

# INGENIERÍA AMBIENTAL

Segunda edición

**J. Glynn Henry y Gary W. Heinke**

con la participación de otros ingenieros y científicos:

Ian Burton

F. Kenneth Hare

Thomas C. Hutchinson

Donald Mackay

William J. Moroz

R. Ted Munn

O. J. C. Runnalls



TRADUCCIÓN:

**M. en C. Héctor Javier Escalona y García**

Universidad Nacional Autónoma de México

REVISIÓN TÉCNICA:

**José Salvador Pantoja M.**

Maestría en Ingeniería Ambiental

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Estado de México



MÉXICO • ARGENTINA • BRASIL • COLOMBIA • COSTA RICA • CHILE  
ESPAÑA • GUATEMALA • PERÚ • PUERTO RICO • VENEZUELA

This One



28AK-Q24-FPE4

erial

Datos de catalogación bibliográfica

Henry, J. Glynn  
Heinke, Gary W.

Ingeniería ambiental

PRENTICE HALL, México, 1999

ISBN: 970-17-0266-2

Área: Universitarios

Formato: 20 x 25.5

Páginas: 800

*EDICIÓN EN ESPAÑOL:*

EDITOR:  
SUPERVISOR DE TRADUCCIÓN:  
SUPERVISOR DE EDICIÓN:  
CORRECTORA DE ESTILO:

PABLO EDUARDO ROIG VÁZQUEZ  
ARMANDO CASTAÑEDA GONZÁLEZ  
MAGDIEL GÓMEZ MARINA  
LAURA LAURÍA BACA

*EDICIÓN EN INGLÉS:*

ACQUISITIONS EDITOR:  
PRODUCTION EDITOR:  
COVER DESIGNER:  
BUYER:  
EDITORIAL ASSISTANT:

BILL STENQUIST  
IRWIN ZUCKER  
BRUCE KENSELAAR  
JULIA MEEHAN  
MEG WEIST

*HENRY: INGENIERÍA AMBIENTAL, 2a. Ed.*

Traducido de la segunda edición en inglés de la obra: **Environmental Science and Engineering.**

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by Prentice Hall, Inc.

Todos los derechos reservados. Traducción autorizada de la edición en inglés publicada por Prentice Hall, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o método sin autorización por escrito del editor.

Derechos reservados © 1999 respecto a la primera edición en español publicada por:  
PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, S. A.  
Calle 4 Núm. 25, 2o. piso, Fracc. Industrial Alce Blanco  
53370 Naucalpan de Juárez, Edo. de México.

**ISBN 970-17-0266-2**

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial, Reg. Núm. 1524.

Original English Language Edition Published by Prentice Hall, Inc.  
Copyright © 1996  
All rights reserved

**ISBN 0-13-120650-8**

IMPRESO EN MÉXICO/PRINTED IN MEXICO

ENE FEB MAR ABR MAY JUN JUL AGO SEP OCT NOV DIC

SERVICIOS LITOGRAFICOS  
ULTRASOL, S.A. DE C.V.  
FISCALES No. 43, COL. SIFÓN  
09400 MÉXICO, D.F.

ISBN

# CONTENIDO

---

***PREFACIO*** ***xvi***

***ACERCA DE LOS AUTORES Y COLABORADORES*** ***xviii***

**Primera parte Causas de los problemas ambientales** **1**

**1 NATURALEZA Y ALCANCE**

***DE LOS PROBLEMAS AMBIENTALES, Gary W. Heinke*** **1**

1.1 De qué trata este libro 1

1.2 Algunas definiciones importantes 2

1.3 Interacción de sistemas 2

1.4 Perturbaciones ambientales 3

1.5 Conciencia pública y acción 7

1.6 El papel cambiante de la tecnología 9

*1.6.1 Desarrollo sostenido, 9*

*1.6.2 Tecnología preventiva, 10*

1.7 Cuantificación de los problemas ambientales 11

Problemas 11

Referencias 12

**2 CRECIMIENTO POBLACIONAL Y ECONÓMICO, Gary W. Heinke 14**

- 2.1 Introducción 14
- 2.2 Crecimiento poblacional 15
  - 2.2.1 La naturaleza del crecimiento poblacional, 15
  - 2.2.2 Crecimiento poblacional en las regiones más y menos desarrolladas, 18
  - 2.2.3 Parámetros de población, 22
  - 2.2.4 Proyecciones de población y métodos, 25
  - 2.2.5 Ímpetu del crecimiento de la población mundial, 29
- 2.3 Industrialización 30
  - 2.3.1 Medidas de crecimiento económico e industrialización, 31
  - 2.3.2 Tecnología de producción, 35
- 2.4 Urbanización 36
  - 2.4.1 Definición de urbanización, 37
  - 2.4.2 Crecimiento de las ciudades, 38
- 2.5 Impacto ambiental 40
- 2.6 El dilema de la industrialización y la urbanización 44
  - Problemas 46
  - Referencias 47

**3 CRECIMIENTO DE LA ENERGÍA, O. J. C. Runnalls y Donald Mackay 49**

- 3.1 Fuentes de energía primaria 50
- 3.2 Consumo actual de energía 52
- 3.3 Consumo futuro y disponibilidad de fuentes de energía 60
- 3.4 Impactos ambientales del desarrollo energético 64
- 3.5 Matrices de impactos ambientales 69
  - 3.5.1 Impactos ambientales del petróleo, 70
  - 3.5.2 Impactos ambientales del gas natural, 72
  - 3.5.3 Impactos ambientales del carbón, 73
  - 3.5.4 Impactos ambientales del desarrollo hidroeléctrico, 75
  - 3.5.5 Impactos ambientales de la energía nuclear, 76
- 3.6 Estudio de caso: La situación energética de Canadá 78
  - Problemas 82
  - Referencias 84

**4 PELIGROS AMBIENTALES NATURALES, Ian Burton** **85**

- 4.1 Introducción 85
- 4.2 Clasificación y medición de peligros naturales 86
- 4.3 ¿Qué es un peligro natural? 89
- 4.4 Acontecimientos extremos y cambio ambiental 92
- 4.5 Efectos y tendencias 93
- 4.6 Adaptaciones y su clasificación 98
  - 4.6.1 Enfoque preindustrial, 98
  - 4.6.2 Enfoque industrial, 98
  - 4.6.3 Enfoque posindustrial, 101
  - 4.6.4 Clasificación, 103
- 4.7 Una perspectiva teórica: respuestas futuras posibles 104
  - Problemas 107
  - Referencias 109

**5 PERTURBACIONES AMBIENTALES DE ORIGEN HUMANO, F. Kenneth Hare y Thomas C. Hutchinson** **111**

- 5.1. Perspectiva general 111
- 5.2. El efecto invernadero y el agotamiento del ozono: problemas mundiales 113
  - 5.2.1 Dióxido de carbono y otros gases de invernadero, 113
  - 5.2.2 Efectos de la acumulación de gases de invernadero, 115
  - 5.2.3 El problema del agotamiento del ozono, 119
  - 5.2.4 Medidas de control: Convenio para el cambio del clima, 120
- 5.3 Lluvia ácida: un problema regional 122
  - 5.3.1 La naturaleza del problema, 122
  - 5.3.2 Fuentes y distribución de la lluvia ácida, 122
  - 5.3.3 Efectos de la lluvia ácida en los sistemas acuáticos, 123
  - 5.3.4 Efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas terrestres, 129
  - 5.3.5 Efectos de la lluvia ácida en las aguas subterráneas, los materiales y las construcciones, 133
  - 5.3.6 Medidas de remedio y control, 135
- 5.4 Lecciones aprendidas 137
- 5.5 Epílogo 138
  - Problemas 139
  - Referencias 140

**Segunda parte Bases científicas 142****6 FÍSICA Y QUÍMICA, Gary W. Heinke y J. Glynn Henry 142**

- 6.1 Introducción 142
- 6.2 Dispersión de partículas 142
  - 6.2.1 Tamaño, forma y distribución de las partículas, 143
  - 6.2.2 Dispersiones coloidales, 145
  - 6.2.3 Métodos para expresar concentraciones de partículas, 146
  - 6.2.4 Sedimentación de una partícula en un fluido, 147
- 6.3 Soluciones 150
  - 6.3.1 Soluciones y solubilidad, 150
  - 6.3.2 Métodos para expresar la composición de las soluciones, 152
  - 6.3.3 Reacciones ácido-base, 158
- 6.4 Gases, mezclas gaseosas y transferencia gas-líquido 169
  - 6.4.1 Leyes de los gases, 169
  - 6.4.2 Transferencia gas-líquido, 175
- 6.5 Balances de materia 179
  - 6.5.1 Concepto de balance de materia, 179
  - 6.5.2 Pautas para hacer balances de materia, 183
  - 6.5.3 Ejemplos de balances de materia, 184
- 6.6 Cinética de reacción y reactores 189
  - 6.6.1 Cinética de reacción, 189
  - 6.6.2 Tipos de reactores, 195
  - 6.6.3 Determinación de velocidades de reacción, 203
  - 6.6.4 Principios de diseño de reactores, 205
- Problemas 208
- Referencias 215

**7 CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, F. Kenneth Hare 216**

- 7.1 Introducción 216
- 7.2 Propiedades fundamentales de la atmósfera 217
  - 7.2.1 Composición y estado físico, 217
  - 7.2.2 Estado térmico y eléctrico, 219
- 7.3 Salidas y entradas de energía 221
  - 7.3.1 Radiación solar, 221

- [7.3.2 Radiación terrestre, 223](#)
    - [7.3.3 Balance de radiación superficial, 224](#)
    - [7.3.4 Uso de energía en la superficie, 228](#)
  - [7.4. Viento, estabilidad y turbulencia 229](#)
    - [7.4.1 Movimiento de la atmósfera baja, 229](#)
    - [7.4.2 Turbulencia y estabilidad, 232](#)
  - [7.5. Agua en la atmósfera 235](#)
    - [7.5.1 Humedad y precipitación, 235](#)
    - [7.5.2 El ciclo hidrológico, 238](#)
  - [7.6. Clima 242](#)
    - [7.6.1 Distribución en el mundo, 242](#)
    - [7.6.2 Variabilidad de los climas, 245](#)
    - [7.6.3 El sistema climatológico, 246](#)
    - [7.6.4 Climas urbanos, 247](#)
  - [Problemas 250](#)
  - [Referencias 252](#)

## **8 MICROBIOLOGÍA Y EPIDEMIOLOGÍA, Gary W. Heinke**

**254**

- [8.1 Introducción 254](#)
- [8.2 Fundamentos de microbiología 255](#)
  - [8.2.1 Clasificación de los microorganismos, 255](#)
  - [8.2.2 Bacterias, 256](#)
  - [8.2.3 Crecimiento y muerte de las bacterias, 260](#)
  - [8.2.4 Virus, algas, hongos y protozoarios, 265](#)
- [8.3 Microbiología aplicada 271](#)
  - [8.3.1 Microbiología de suelos y de residuos sólidos, 271](#)
  - [8.3.2 Microbiología del agua, de aguas residuales y organismos indicadores, 273](#)
  - [8.3.3 Microbiología del aire atmosférico y de interiores, 275](#)
- [8.4 Epidemiología y enfermedades 278](#)
  - [8.4.1 Saneamiento y salud, 278](#)
  - [8.4.2 Patógenos, 279](#)
  - [8.4.3 Enfermedades transmitidas a través del agua. Calidad del agua, 283](#)
  - [8.4.4 Enfermedades transmitidas a través del aire, 288](#)
  - [8.4.5 Enfermedades transmitidas a través de insectos y roedores, 290](#)
- [8.5 Enfermedades no infecciosas 292](#)
  - [8.5.1 Contaminantes inorgánicos, 293](#)
  - [8.5.2 Contaminantes orgánicos, 296](#)
  - [8.5.3 Límites seguros, 298](#)

Problemas 299

Referencias 301

## **9 ECOLOGÍA, Thomas C. Hutchinson 303**

9.1 Conceptos introductorios 303

9.2 Flujo de la energía de los ecosistemas 304

9.2.1 Estimaciones de producción primaria, 305

9.2.2 Comparación de la productividad primaria en diferentes ecosistemas del mundo, 308

9.2.3 Flujo de energía en los ecosistemas más allá de los productores primarios, 310

9.3 Cadena alimenticia y niveles tróficos 311

9.4 Ciclos de nutrientes 313

9.4.1 Ciclo del carbono, 313

9.4.2 Ciclo del nitrógeno, 314

9.4.3 Ciclo del fósforo, 317

9.5 Elementos de limnología 320

9.5.1 Cantidad y calidad del agua, 321

9.5.2 Comunidades bióticas, 321

9.5.3 Luz en los lagos, 322

9.5.4 Temperatura y estratificación vertical de los lagos, 324

9.6 Eutroficación 326

9.6.1 El problema, 326

9.6.2 Cambios fisicoquímicos y biológicos, 327

9.6.3 Control de la eutroficación, 328

9.6.4 Estudio de caso: Los Grandes Lagos, 329

9.6.5 Un nuevo desafío: los estuarios costeros, 333

Problemas 334

Referencias 335

## **Tercera parte Tecnología y control 337**

### **10 RECURSOS HIDRÁULICOS, J. Glynn Henry 337**

10.1 Introducción 337

10.2 Administración de los recursos hidráulicos 338

10.2.1 Importancia del agua, 338

10.2.2 Necesidad de control, 339

10.2.3 Objetivos de la administración de los recursos hidráulicos, 340



<u>10.3</u>	<u>Consideraciones tecnológicas</u>	<u>341</u>
	<u>10.3.1</u>	<u>Propiedades del agua, 341</u>
	<u>10.3.2</u>	<u>Precipitación anual, 342</u>
	<u>10.3.3</u>	<u>Cantidad de agua disponible, 343</u>
	<u>10.3.4</u>	<u>Uso del agua, 347</u>
	<u>10.3.5</u>	<u>Opciones para satisfacer la demanda de agua, 349</u>
	<u>10.3.6</u>	<u>Cuantificación de los efectos ecológicos y sociales, 352</u>
<u>10.4</u>	<u>Necesidades de planeación</u>	<u>354</u>
	<u>10.4.1</u>	<u>Propósito de la planeación, 354</u>
	<u>10.4.2</u>	<u>Etapas del proceso de planeación, 355</u>
	<u>10.4.3</u>	<u>Formulación del estudio, 355</u>
	<u>10.4.4</u>	<u>Evaluación de alternativas y de sus efectos, 357</u>
	<u>10.4.5</u>	<u>Adopción de un plan, 361</u>
<u>10.5</u>	<u>Controles legislativos</u>	<u>361</u>
<u>10.6</u>	<u>Influencias políticas</u>	<u>364</u>
	<u>10.6.1</u>	<u>Grupos de presión, 364</u>
	<u>10.6.2</u>	<u>Políticas administrativas, 365</u>
<u>10.7</u>	<u>Desafíos futuros</u>	<u>368</u>
<u>10.8</u>	<u>Estudio de casos</u>	<u>371</u>
	<u>10.8.1</u>	<u>El Canal Periférico, 371</u>
	<u>10.8.2</u>	<u>La hoya tributaria de Occoquan, 376</u>
	Problemas	379
	Referencias	381

## **11 ABASTECIMIENTO DE AGUA, Gary W. Heinke**

**383**

<u>11.1</u>	<u>Introducción</u>	<u>383</u>
<u>11.2</u>	<u>Requerimientos en la cantidad de agua</u>	<u>384</u>
	<u>11.2.1</u>	<u>Demanda de agua, 384</u>
	<u>11.2.2</u>	<u>Fluctuaciones en el uso del agua, 386</u>
<u>11.3</u>	<u>Necesidades de calidad del agua</u>	<u>389</u>
	<u>11.3.1</u>	<u>Estándares de calidad del agua, 389</u>
	<u>11.3.2</u>	<u>Características físicas, 390</u>
	<u>11.3.3</u>	<u>Características químicas, 392</u>
<u>11.4</u>	<u>Fuentes de agua</u>	<u>392</u>
	<u>11.4.1</u>	<u>Aguas subterráneas, 392</u>
	<u>11.4.2</u>	<u>Aguas superficiales, 394</u>
	<u>11.4.3</u>	<u>Agua de mar, 395</u>

- [11.4.4 Aguas residuales recicladas, 395](#)
- [11.5 Procesos de tratamiento de aguas 395](#)
  - [11.5.1 Plantas de tratamiento de agua, 395](#)
  - [11.5.2 Eliminación de materia particulada, 397](#)
  - [11.5.3 Desinfección, 405](#)
  - [11.5.4 Eliminación de sustancias disueltas, 407](#)
- 11.6 Trasmisión, distribución y almacenamiento de agua 409**
  - [11.6.1 Trasmisión, 409](#)
  - [11.6.2 Distribución, 410](#)
  - [11.6.3 Almacenamiento, 411](#)
- 11.7 Necesidades y desarrollo futuros 415**
  - Problemas 416**
  - [Referencias 420](#)

## **[12 CONTAMINACIÓN DEL AGUA, J. Glynn Henry](#)**

**[421](#)**

- [12.1 Introducción 421](#)
- [12.2 Aguas residuales 422](#)
  - [12.2.1 Componentes, 422](#)
  - [12.2.2 Medición de la DBO, 425](#)
  - [12.2.3 Aguas residuales municipales, 427](#)
  - [12.2.4 Aguas residuales industriales, 428](#)
  - [12.2.5 Agua pluvial, 428](#)
- [12.3 Contaminación de aguas receptoras 431](#)
  - [12.3.1 Efectos de los contaminantes, 431](#)
  - [12.3.2 Requisitos de calidad del agua, 433](#)
  - [12.3.3 Necesidad de control de la contaminación, 435](#)
- [12.4 Recolección de aguas residuales 436](#)
  - [12.4.1 Los primeros sistemas, 436](#)
  - [12.4.2 Sistemas actuales, 436](#)
  - [12.4.3 Contaminación causada por derrames de alcantarillas combinadas, 438](#)
- 12.5 Principios para el tratamiento de aguas residuales 440**
  - [12.5.1 Requisitos de los efluentes, 440](#)
  - [12.5.2 Procesos de tratamiento, 440](#)
  - [12.5.3 Selección del método de tratamiento, 450](#)
- [12.6 Métodos de tratamiento con base en terrenos 451](#)
  - [12.6.1 Sistemas de aplicación a terrenos, 451](#)
  - [12.6.2 Sistemas de embalse, 452](#)

- 12.7 Plantas de tratamiento de aguas residuales 456
  - 12.7.1 Sistemas de crecimiento en suspensión, 457
  - 12.7.2 Cinética del crecimiento en suspensión, 461
  - 12.7.3 Procesos de película fija, 470
  - 12.7.4 Procesamiento de lodos, 474
  - 12.7.5 Eliminación de los residuos, 479
  - 12.7.6 Problemas de olor, 481
- 12.8 Instalaciones de tratamiento in situ 481
  - 12.8.1 Sistemas sin agua, 482
  - 12.8.2 Tanques sépticos, 482
  - 12.8.3 Plantas en paquete, 483
- 12.9 Papel del gobierno y del público en el control de la contaminación 484
  - 12.9.1 Subsidios gubernamentales, 484
  - 12.9.2 Reglamentación directa, 485
  - 12.9.3 Estatutos municipales, 485
  - 12.9.4 Participación del público, 485
- 12.10 Tendencias en el control de la contaminación del agua 486
  - Problemas 487
  - Referencias 491

## **13 CONTAMINACIÓN DEL AIRE, William J. Moroz**

**492**

- 13.1 La contaminación del aire en perspectiva 492
  - 13.1.1 Introducción, 492
  - 13.1.2 Episodios de contaminación del aire, 493
  - 13.1.3 El smog de Los Ángeles, 495
  - 13.1.4 Contaminantes globales y regionales, 497
  - 13.1.5 Principales contaminantes de la atmósfera, 497
- 13.2 Efectos de la contaminación del aire 498
  - 13.2.1 Efectos en la salud, 498
  - 13.2.2 Efectos en plantas y animales, 502
  - 13.2.3 Efectos en materiales y servicios, 503
  - 13.2.4 Estándares ambientales de la calidad del aire, 503
- 13.3 Fuentes de contaminación del aire 506
  - 13.3.1 Identificación de contaminantes del aire, 506
  - 13.3.2 Fuentes naturales, 508
  - 13.3.3 Fuentes domésticas, 510
  - 13.3.4 Fuentes comerciales, 511
  - 13.3.5 Fuentes agrícolas, 512
  - 13.3.6 Fuentes industriales, 513
  - 13.3.7 Fuentes relacionadas con el transporte, 517

- 13.4 Control de la contaminación del aire 521
  - 13.4.1 Limpieza natural de la atmósfera, 521
  - 13.4.2 Control de la calidad del aire, 522
  - 13.4.3 Control de la emisión de partículas, 523
  - 13.4.4 Control de la emisión de gases, 536
  - 13.4.5 Diagramas de flujo para procesos de recuperación representativos, 538
  - 13.4.6 Control de la emisión de óxidos de nitrógeno, 546
  - 13.4.7 Control de la calidad del aire por dilución ambiental, 547
- 13.5 Predicción de concentraciones de contaminantes en el aire 548
  - 13.5.1 Meteorología de la contaminación del aire, 548
  - 13.5.2 Modelos de dispersión de contaminantes, 552
  - 13.5.3 Modelos de ascensión de columnas, 556
  - 13.5.4 Otros modelos de dispersión de contaminantes y exactitud de las predicciones, 558
- 13.6 Costos para el control de la contaminación del aire 559
  - 13.6.1 Planta de energía eléctrica alimentada con carbón, 559
  - 13.6.2 Costos para el control de emisiones de los automóviles, 560
- Problemas 560
- Referencias 565

## **14 RESIDUOS SÓLIDOS, J. Glynn Henry**

**567**

- 14.1 Introducción 567
- 14.2 Características de los residuos sólidos 568
  - 14.2.1 ¿Qué son los residuos sólidos?, 568
  - 14.2.2 Cambios en los residuos sólidos municipales, 569
  - 14.2.3 Cantidades, 571
  - 14.2.4 Características, 572
- 14.3 Consideraciones sobre la administración de los residuos sólidos 577
  - 14.3.1 Protección de la salud pública y del ambiente, 577
  - 14.3.2 Reducción de las fuentes, 578
  - 14.3.3 Reciclaje, 578
  - 14.3.4 Recuperación de energía, 580
- 14.4 Sistemas de recolección 581
  - 14.4.1 Facilidad y frecuencia de recolección, 581
  - 14.4.2 Equipo de recolección, 582
  - 14.4.3 Estaciones de transferencia, 583
  - 14.4.4 Transporte por tren, 584
  - 14.4.5 Selección de rutas, 585

- 14.5 Separación y procesamiento de RSM 586
  - 14.5.1 Separación y procesamiento en la fuente, 586
  - 14.5.2 Separación y procesamiento centralizados, 587
- 14.6 Conversión de RSM 590
  - 14.6.1 Incineración, 590
  - 14.6.2 Conversión en abono, 595
  - 14.6.3 Otros procesos de conversión, 596
- 14.7 Rellenos de tierras 596
  - 14.7.1 Criterios para el diseño de rellenos sanitarios, 597
  - 14.7.2 Problemas que ocasionan los rellenos de tierras, 598
  - 14.7.3 Control y tratamiento de la generación de lixiviados, 600
  - 14.7.4 Producción de gas, 608
- 14.8 Oportunidades futuras 609
  - 14.8.1 Legislación, 610
  - 14.8.2 Recolección, 610
  - 14.8.3 Incineración, 610
  - 14.8.4 Los rellenos de tierras, 611
- Problemas 612
- Referencias 617

---

**.5 RESIDUOS PELIGROSOS, J. Glynn Henry y O. J. C. Runnalls 620**

- 15.1 Introducción 620
- 15.2 Residuos nucleares 622
  - 15.2.1 Efectos en la salud y el ambiente, 622
  - 15.2.2 Residuos nucleares derivados de la extracción y procesamiento de uranio, 628
  - 15.2.3 Residuos nucleares de reactores productores de energía, 629
  - 15.2.4 Manejo de residuos nucleares, 631
  - 15.2.5 Retiro de servicio de reactores de energía nuclear, 636
  - 15.2.6 Comentarios finales, 636
- 15.3 Residuos médicos 637
  - 15.3.1 Tipos de residuos, 637
  - 15.3.2 Control de los residuos médicos, 637
- 15.4 Residuos químicos 638
  - 15.4.1 Necesidad de control, 638
  - 15.4.2 Efectos ambientales, 638
- 15.5 Identificación de residuos peligrosos 640
  - 15.5.1 Métodos, 640
  - 15.5.2 Prácticas en Estados Unidos, 641

- 15.6 Manejo de residuos peligrosos 645
- [15.6.1 Cantidades de residuos peligrosos generados, 646](#)
  - [15.6.2 Componentes de un plan para el manejo de residuos peligrosos, 649](#)
  - [15.6.3 Minimización de los residuos peligrosos, 650](#)
- 15.7 Tratamiento y eliminación de residuos químicos 651
- [15.7.1 Tratamiento y eliminación por la industria, 651](#)
  - [15.7.2 Tratamiento y eliminación externos de residuos peligrosos, 653](#)
  - [15.7.3 Cantidades de residuos por confinar, 654](#)
  - [15.7.4 Prácticas en Europa Occidental y en el Reino Unido, 656](#)
  - [15.7.5 Prácticas en Estados Unidos y Canadá, 662](#)
- 15.8 Confinamientos controlados 665
- [15.8.1 Función, 665](#)
  - [15.8.2 Residuos aceptables, 665](#)
  - [15.8.3 Selección y aprobación de terrenos, 666](#)
  - [15.8.4 Diseño y construcción, 667](#)
  - [15.8.5 Problemas, 668](#)
- 15.9 Tratamiento y eliminación de lixiviados 670
- [15.9.1 Tratamiento combinado, 670](#)
  - [15.9.2 Tratamiento por separado, 670](#)
- 15.10 Rehabilitación de terrenos 671
- [15.10.1 Técnicas de rehabilitación, 673](#)
  - [15.10.2 Estudio de caso: Rehabilitación del predio del Superfund de Seymour, Indiana, 676](#)
- 15.11 Desafíos futuros 677
- Problemas 679
  - [Referencias 682](#)

**16 ADMINISTRACIÓN DEL AMBIENTE, R. Ted Munn,  
Gary W. Heinke y J. Glynn Henry**

**685**

- 16.1 [Introducción 685](#)
- 16.2 [Desarrollo sostenido 686](#)
- 16.3 Evaluación del impacto ambiental 687
- [16.3.1 Perspectiva histórica, 687](#)
  - [16.3.2 Elementos del proceso de evaluación del impacto ambiental, 689](#)
  - [16.3.3 Diseño de una evaluación del impacto ambiental, 692](#)
  - [16.3.4 EIA internacionales, 695](#)
  - [16.3.5 Conclusiones, 695](#)

16.3.6	<i>Estudio de caso: Componente atmosférico de una EIA para una planta de energía alimentada con carbón</i> , 696	
16.4	Estrategias para el control de la contaminación	700
16.4.1	<i>Aspectos económicos</i> , 700	
16.4.2	<u><i>Estándares ambientales y de efluentes</i></u> , 701	
16.4.3	<i>Normas para el control de la contaminación ambiental</i> , 702	
16.4.4	<i>Estudio de caso: Residuos químicos tóxicos (el problema del río Niágara)</i> , 709	
16.5	<u>Ética ambiental</u>	715
16.5.1	<u><i>La ética en la sociedad</i></u> , 715	
16.5.2	<i>Consecuencias para el ambiente</i> , 716	
16.5.3	<u><i>Responsabilidad por la degradación ambiental</i></u> , 717	
16.5.4	<i>Teorías éticas y códigos de ética</i> , 718	
16.5.5	<u><i>Resolución de problemas éticos</i></u> , 719	
16.5.6	<u><i>Actitudes cambiantes</i></u> , 722	
16.5.7	<i>Conclusiones</i> , 724	
	Problemas	726
	<u>Referencias</u>	728
<b>Apéndice A</b>	<b>SÍMBOLOS, DIMENSIONES Y UNIDADES</b>	<b><u>730</u></b>
<b>Apéndice B</b>	<b>PROPIEDADES Y CONSTANTES FÍSICAS</b>	<b><u>748</u></b>
<b>Apéndice C</b>	<b><u>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</u></b>	<b><u>755</u></b>
<b>Apéndice D</b>	<b><u>PROBLEMAS AMBIENTALES ESPECIALES</u></b>	<b><u>758</u></b>
	<b><u>ÍNDICE</u></b>	<b><u>761</u></b>

# PREFACIO

---

Esta segunda edición de *Ingeniería ambiental*, al igual que la primera, está dirigida a un curso introductorio sobre dicho tema a un nivel universitario. Tenemos la convicción, incluso más fuerte ahora que antes, de que *todos* los ingenieros y estudiantes de licenciatura de estudios ambientales necesitan un curso que se ocupe en forma cuantitativa de los problemas ambientales, sus causas, las bases científicas necesarias para entenderlos y el papel que desempeñan los científicos e ingenieros en su resolución.

Las mejoras al libro, además de la actualización de diagramas, gráficas, tablas y otros datos, se basan en los comentarios de profesores que han utilizado el texto y en los resultados de cuestionarios proporcionados a estudiantes de ingeniería de segundo año de la University of Toronto, quienes han completado el curso de Ingeniería Ambiental I. Los profesores expresaron su deseo de incrementar el número de problemas con soluciones en esta edición, de modo que éstos han aumentado alrededor de un tercio, con lo cual el número total de ejemplos y problemas se eleva a más de 300.

A los estudiantes les agradó la primera edición (más del 75% la calificaron de Muy Buena a Excelente) pero consideraron

- que tratar de cubrir el texto completo en un periodo de 60 horas no es realista
- que se deberían incluir más estudios de caso
- que se debería poner mayor énfasis en la ética ambiental.

Éstas son sugerencias razonables que ameritan consideración por parte de los profesores. Los cambios específicos al contenido se describen a continuación.

En la primera parte, titulada *Causas de los problemas ambientales* (capítulos 1 al 5), se ha agregado una exposición respecto al papel cambiante que tiene la tecnología en nuestros días (sección 1.6); esta parte incluye una introducción al concepto de "la tecnología preventiva" como alternativa a la forma tradicional de remediar los problemas. Hacer conscientes a los estudiantes respecto a esta idea ha sido, durante años, la misión de W. H. Vanderburg en sus trabajos de investigación y enseñanza en la University of Toronto. En los capítulos subsecuentes se ha incorporado la información más reciente disponible en: población y crecimiento económico (2), crecimiento de la energía (3), peligros ambientales naturales (4) y perturbaciones ambientales de origen humano (5). Varias figuras y secciones de los capítulos 4 al 5 se han agregado, modificado o incluso sustituyen a otras que han sido descartadas.

La segunda parte: *Bases científicas* (capítulos 6 al 9), ha cambiado relativamente poco, a excepción del capítulo 7 que ahora se titula Ciencias de la atmósfera (en lugar de Climatología y meteorología), el cual ha sido revisado con datos recientes y se han eliminado algunas partes de varias secciones. En el capítulo 8 se agregó información acerca de *Cryptosporidium*.

La tercera parte: *Tecnología y control* (capítulos 10 al 16) es la que se ha revisado con más amplitud porque las técnicas para el control y la administración de nuestros recursos del aire, el agua y la tierra están en continua evolución. Se han actualizado los datos sobre el consumo del agua (capítulo 10) y los estándares del agua potable. El capítulo 12, *Contaminación del agua*, contiene información nueva acerca de los métodos de tratamiento basados en terrenos, filtros de goteo, contactores biológicos rotatorios y procesos duales, en virtud del renovado interés en estos antiguos procesos. Asimismo, se ha considerado el efecto de los nuevos reglamentos de la EPA de EUA (40 CRF Part 503 Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge) para el futuro manejo de los biosólidos. Se ha agregado una nueva sección que describe las



tendencias para el control de la contaminación del agua, las cuales abarcan el espectro desde el control en la fuente, la recolección y el tratamiento, hasta la reutilización de efluentes. En el capítulo 13, *Contaminación del aire*, se han modificado casi todas las secciones, pero otras, como la 13.2 "Efectos" y la 13.3 "Fuente", han aumentado su información.

El capítulo sobre residuos sólidos (14) se ha reorganizado totalmente, con tablas revisadas y material nuevo sobre: reducción en la fuente, separación, reciclaje, recuperación, conversión en abono e incineración (en particular el caso de Detroit).

Los cambios que ha experimentado el manejo de los residuos peligrosos han hecho necesarias importantes revisiones al capítulo 15. Se han agregado tablas y se han actualizado las anteriores. Hay nuevas secciones sobre: efectos ambientales, reducción de residuos al mínimo, incineración, eliminación conjunta y otros temas. Se ha incluido un resumen de los procesos que se utilizan en los 146 centros de tratamiento de residuos peligrosos de EUA, así como un análisis extenso de la rehabilitación de terrenos con un predio del Superfund en Indiana como estudio de caso. El último capítulo (el 16), *Administración del ambiente*, trata tres temas: evaluación de los impactos ambientales, estrategias para el control de la contaminación y la ética ambiental. El material de cada uno se ha revisado y, en el caso del último tema, en buena medida se ha redactado una vez más. Se describe un procedimiento inteligente para resolver los problemas éticos.

Por lo que toca a las unidades de medida, los canadienses han cambiado, al menos desde un punto de vista educativo, a las unidades más universales del *Système International* (SI). Mientras que, por otro lado, los estadounidenses todavía prefieren las unidades del sistema inglés. En consecuencia, nos hemos apegado a la práctica que se adoptó para la primera edición tratando de proporcionar los datos tanto en unidades SI como en las del sistema inglés en algunas partes del texto, y de usar uno u otro sistema en los ejemplos y problemas. Los estudiantes y quienes practican la ingeniería necesitan conocer bien ambos sistemas, no sólo en virtud de la tendencia al libre comercio entre los países, sino además por la creciente aceptación de "acuerdos de reconocimiento mutuo" entre organismos profesionales que permiten, por ejemplo, que ingenieros con licencia en una jurisdicción practiquen su profesión en otra sin someterse a exámenes.

El éxito de la primera edición, escrita por 9 autores con la asesoría de sus colegas y la ayuda de estudiantes de posgrado, pone de manifiesto que el libro satisfizo una necesidad y ha sido un gran crédito para esos colaboradores pioneros. Deseamos hacer también un reconocimiento a los colaboradores de esta segunda edición: al profesor Bill Vanderburg por permitirnos presentar, si bien en forma breve, su filosofía sobre la tecnología preventiva; al doctor John Newton por ayudar a Ian Burton a revisar el capítulo 4 y por aportar nuevos problemas; a Durga Prasad por la corrección tipográfica de casi todos los capítulos de las dos primeras partes y por actualizar el capítulo 8. Tenemos una deuda especial con Kevin Rich, estudiante de posgrado, por su exhaustivo escrutinio en el lenguaje escrito y por el importante papel que desempeñó en las extensas revisiones de la tercera parte (en concreto, los capítulos 10, 12, 14 y 15 escritos por Glynna Henry y los capítulos 11 y 16 escritos por Gary Heinke); gracias a él el libro ha resultado más comprensivo. Yuan Cathy He merece nuestra gratitud por llevar a cabo la difícil tarea de obtener autorización para utilizar material de otras fuentes. Nuestro agradecimiento también a Diane McCartney, quien se encargó de mecanografiar el manuscrito; agradecemos profundamente su eficiencia y buen ánimo a lo largo de las múltiples repeticiones.

Por último, esta segunda edición está dedicada a los científicos e ingenieros que sirven a la sociedad y conservan el ambiente *resolviendo* los problemas que lo aquejan.

Toronto, Ontario  
Canadá

J. Glynn Henry  
Gary W. Heinke

# ACERCA DE LOS AUTORES Y COLABORADORES

---

Copyrighted image

**J. GLYNN HENRY**, profesor emérito de Ingeniería Civil en la University of Toronto y presidente de J. G. Henry Associates Limited, Consulting Environmental Engineers desde 1973. De 1974 a 1993 fue director de los Laboratorios de Ingeniería Ambiental, y de 1977 a 1986 jefe del Programa de Ingeniería Ambiental, un proyecto en el que colaboraron cuatro departamentos de posgrado en ingeniería de dicha universidad. Se graduó como Ingeniero Civil en la Queen's University, la Princeton University y la University of Toronto. Dedicó más de veinte años al campo de la consultoría en ingeniería como Director de R. V. Anderson Associates, en Toronto, antes de integrarse como profesor a la universidad de esa ciudad. Sus responsabilidades incluían todas las actividades ambientales y de investigación de la empresa, entre ellas el diseño y construcción de más de veinte proyectos importantes para el tratamiento de las aguas residuales. A lo largo de su carrera académica y de consultoría ha impartido 16 cursos de ingeniería y publicado más de 120 publicaciones e informes especializados. Sus actuales áreas de interés incluyen la solubilización biológica, la precipitación y extracción de metales pesados, la contaminación por metales pesados, las aguas industriales y desagües ácidos de minas. Es ingeniero registrado en Ontario y miembro de la Canadian Society for Civil Engineering; también ha sido asesor de varios organismos del gobierno canadiense. En 1996 se hizo acreedor a la medalla Albert E. Berry por "su significativa contribución a la ingeniería ambiental en Canadá".

Copyrighted image

**GARY W. HEINKE**, profesor de tiempo completo en la carrera de Ingeniería Civil en la University of Toronto desde 1968. En 1993 inició un periodo de 4 años como director del Institute for Environmental Studies de la Hong Kong University of Science and Technology. De 1986 a 1993 fue decano de la facultad de Ciencias Aplicadas e Ingeniería en la University of Toronto, y de 1974 a 1984 fue jefe del Departamento de Ingeniería Civil de esa institución. Se graduó como Ingeniero Civil en la University of Toronto y como Ingeniero Químico en la McMaster University. Dedicó diez años de su vida a la consultoría en ingeniería en los campos municipal y ambiental antes de pertenecer a la University of Toronto. En dicha institución inauguró en 1975 el curso de Ingeniería Ambiental I y actualmente imparte cursos de posgrado sobre procesos para el tratamiento del agua y también para las aguas residuales. Sus principales intereses en la investigación incluyen la ingeniería ambiental de climas fríos, el tratamiento físico-químico, y la ingeniería para la salud pública. Su trabajo ha fructificado en aproximadamente 70 artículos e informes especializados. Es ingeniero registrado en Ontario y los Territorios del Noroeste, y miembro de la Canadian Society for Civil Engineering, la Hong Kong Institution of Engineers, la Canadian Academy of Engineering y la Hong Kong Academy of Engineering Science. Sus actividades de consultoría para todo tipo de industrias y niveles del gobierno de Canadá se han expandido en tiempos recientes para también incluir a organizaciones similares de Hong Kong, China y el sureste asiático.

Copyrighted image

**IAN BURTON**, director del Environmental Adaptation Research Group, del Atmospheric Environmental Service y del Environment Canada desde 1990; también fue asesor *senior* de las políticas empresariales de Environment Canada de 1989 a 1990. Fue profesor de Geografía en la University of Toronto de 1961 a 1990 y director del Institute for Environmental Studies de 1989 a 1994. Se graduó en geografía, en recursos hidráulicos y también en administración de recursos en universidades de prestigio como son la University of Birmingham y la University of Chicago. Antes de unirse a la University of Toronto, impartió cursos ambientales en las universidades de Indiana, Queen's, Clark y también en East Anglia. Sus principales intereses en el campo de la investigación incluyen los peligros ambientales naturales y la evaluación de tales riesgos. Ha editado o colaborado en diez libros y escrito más de 100 artículos académicos, informes y reseñas. Los nombramientos que le han sido otorgados por los gobiernos canadienses, varias universidades y por la Ford Foundation en relación con la administración de recursos, la creación de programas ambientales y la planeación de recursos hidráulicos le han proporcionado una amplia perspectiva sobre los problemas ambientales en Canadá, Estados Unidos, África y la India. Muchas empresas de consultoría han aprovechado su pericia en cuestiones de control de crecidas.

Copyrighted image

**F. KENNETH HARE**, rector de la Trent University de 1989 hasta 1995, director del Trinity College de 1980 a 1986 en la University of Toronto y director del Institute for Environmental Studies de 1974 a 1979. Tiene el título de Profesor Universitario (en la carrera de Geografía), que es el más alto honor académico en la University of Toronto. Recibió su educación en la University of London (tanto en el Kings College, como en la London School of Economics) y en la University of Montreal. Tiene diez doctorados honoríficos, las medallas Patterson y Massey, la medalla de Patrocinador de la Royal Geographical Society y el premio IMO de la Organización Meteorológica Mundial. Es miembro de la Royal Society of Canada y Caballero de la Orden de Canadá. Ha servido en el National Research Council (Canadá), el Natural Environment Research Council (Reino Unido) y como director de Resources for the Future, Inc. (Washington, D.C.).

Un interés continuo en su amplia gama de investigaciones atmosféricas ha sido la bioclimatología del bosque boreal, así como la variación climática en latitudes nórdicas. Ha estudiado los equilibrios existentes entre la energía y el agua de superficie en Canadá y Estados Unidos, la climatología de las márgenes de los desiertos y la circulación de la estratosfera polar nórdica. Ha publicado alrededor de 150 artículos, libros y monografías. De 1979 a 1990 fue presidente del Climate Program Board of Canada; es miembro activo en el World Climate Programme, y fue el encargado de acordar y editar los artículos sobre perspectivas generales para la Conferencia del Clima Mundial en la ONU durante 1979, para la cual escribió un artículo sobre variabilidad y variación de los climas. En 1977 fue el principal autor del artículo sobre los antecedentes del clima, elaborado para la Conferencia sobre Desertificación de la ONU.

Copyrighted image

**THOMAS C. HUTCHINSON**, es presidente del Environmental Resource Studies Program de la Trent University desde 1991. De 1967 a 1989 fue profesor de Botánica en la University of Toronto y de 1976 a 1982 Jefe del Departamento. Fue designado como profesor de Silvicultura y tuvo una larga asociación con el Institute for Environmental Studies. Fue educado en la University of Manchester y en la University of Sheffield. Sus principales intereses en la investigación incluyen el estudio de los efectos de la lluvia ácida y los metales pesados en los ecosistemas terrestres y acuáticos, los efectos de los derrames de petróleo en el ártico, y los mecanismos fisiológicos que han permitido a las plantas adaptarse al desgaste causado por la contaminación. Ha editado cinco libros y ha sido coautor de más de 150 artículos científicos, informes y capítulos de libros. Organizó y presidió la primera Conferencia Internacional sobre Metales Pesados en el Ambiente que

se celebró en Toronto en 1979, y fungió como editor en jefe de las actas. La OMS en Europa y el gobierno canadiense han recurrido a sus conocimientos sobre el desgaste ecológico para la realización de estudios en el Ártico.

Copyrighted image

**DONALD MACKAY**, profesor que tiene a su cargo la Cátedra de la Industria Química-NSERC de Modelos Ambientales de la Trent University, Peterborough, desde 1995. Es además Profesor Emérito en la University of Toronto, a la cual se unió en 1967, después de trabajar en la industria petroquímica. Todos sus títulos le fueron otorgados por la University of Glasgow. Imparte clases de operaciones unitarias en ingeniería química y en cuestiones energéticas y ambientales. Sus principales intereses en el campo de la investigación incluyen el comportamiento de las sustancias orgánicas tóxicas en el ambiente y la elaboración de los modelos de tales sustancias, los cuales incluyen: cuantificación de la actividad de reparto, persistencia, transporte y acumulación. Sus estudios sobre los derrames del petróleo en tierra y agua lo han llevado al Ártico canadiense y a regiones marinas de la costa oriental. Ha sido autor de más de 400 artículos e informes científicos, ha aportado capítulos a varios libros, ha coeditado un texto sobre hidrocarburos en el ambiente y ha sido coautor de cinco libros sobre diversos aspectos de la ingeniería ambiental. Es ingeniero registrado en Ontario y miembro del Chemical Institute of Canada. Diversos gobiernos canadienses, la U.S. Environmental Protection Agency, el National Bureau of Standards y muchas organizaciones industriales han recurrido a su pericia.

Copyrighted image

**WILLIAM J. MOROZ**, director de W. J. Moroz Associates, una empresa que proporciona servicios de consultoría al gobierno y a la industria sobre la vigilancia o monitoreo de la contaminación del aire y también sobre el control de los procesos de incineración, generación de energía e industriales. De 1980 a 1985 fungió como director del Departamento de Estudios y Evaluaciones Ambientales de Ontario Hydro, y de 1978 a 1986 fue profesor adjunto en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la University of Toronto. Durante diez años fue director de James F. MacLaren Limited, una empresa consultora de Toronto. Durante ocho años fue profesor de la University of Toronto y director del Center for Air Environment Studies de la Pennsylvania State University. Se graduó como Ingeniero Mecánico en dos grandes instituciones: la University of Toronto y la University of Michigan. Sus principales intereses en el campo de la investigación se centran en la contaminación del aire. Ha publicado alrededor de 40 artículos especializados, es ingeniero registrado en Ontario y en Pensilvania, y miembro de la Royal Meteorological Society. Como asesor del Ministerio de Salud de Ontario supervisó al equipo canadiense para un estudio de la International Joint Commission sobre la contaminación transfronteriza.

Copyrighted image

**R. TED MUNN**, investigador asociado del Institute for Environmental Studies de la University of Toronto, se educó en la McMaster University (en Física), la University of Toronto (en Meteorología) y la University of Michigan (en Ingeniería Civil). Fue Jefe del Equipo Científico de la Air Quality Branch de Environment Canada y Jefe de Programas Ambientales del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (Laxenburg, Austria). Sus logros incluyen el diseño de un sistema de vigilancia o monitoreo ambiental global (adoptado más tarde como base para el moderno sistema mundial), la elaboración de un manual de la OMS sobre el diseño de sistemas urbanos para detectar la contaminación del aire (con fines de estudios epidemiológicos), y su apoyo en la elaboración de una Ley para el aire limpio en São Paulo, Brasil. Sus principales intereses en la investigación se centran en la política ambiental a

largo plazo, que incluye los campos de la evaluación del impacto ambiental, la evaluación ambiental acumulativa, el diseño de sistemas de advertencia temprana y el desarrollo de métodos para evaluaciones de múltiples cuestiones. Durante 25 años fue editor en jefe del International Journal of Boundary Layer Meteorology. Ha escrito siete libros, es autor de más de 200 artículos científicos y es miembro de la Royal Society of Canada.

Copyrighted image

**O. JOHN C. RUNNALLS**, director de O.J.C. Runnalls & Associates Limited y asesor de gobiernos e industrias en el campo de la energía nuclear. De 1979 a 1989 fue profesor designado para la Cátedra de Estudios en Ingeniería en la Facultad de Ciencia Aplicada e Ingeniería de la University of Toronto. Fue seleccionado para este importante puesto en virtud de su amplia experiencia en cuestiones de energía adquirida cuando ocupaba altos puestos en Atomic Energy of Canada Limited, en Uranium Canada Limited y también en el Departamento de Energía, Minas y Recursos del gobierno de Canadá. De 1983 a 1989 fungió como director del nuevo Centro de Ingeniería Nuclear de la University of Toronto. Obtuvo todos sus títulos de ingeniería en la University of Toronto. Sus intereses actuales en el campo de la investigación incluyen estudios sobre sistemas de energía, oferta y demanda del uranio, desarrollo de combustibles nucleares, tecnología de materiales nucleares y

también manejo de residuos nucleares. Ha publicado más de 100 artículos e informes técnicos y científicos. Es ingeniero registrado en Ontario, miembro de la Royal Society of Canada y miembro de la Canadian Academy of Engineering.

# PRIMERA PARTE

---

## Causas de los problemas ambientales

# CAPÍTULO 1

---

## Naturaleza y alcance de los problemas ambientales

*Gary W. Heinke*

### 1.1 DE QUÉ TRATA ESTE LIBRO

El objetivo de este libro es introducir a los estudiantes de ingeniería y de ciencias al estudio interdisciplinario de los problemas ambientales: sus causas, por qué son motivo de preocupación y cómo podemos controlarlos. El libro:

- Proporciona una descripción de lo que se quiere decir con *ambiente y sistemas ambientales*
- Aporta información acerca de las causas básicas de las perturbaciones ambientales
- Repasa o presenta los conocimientos científicos que una persona necesita para entender la naturaleza de los problemas ambientales y para ser capaz de cuantificarlos
- Describe el estado actual que guarda la tecnología de control ambiental en cuanto a su aplicación a los problemas de contaminación de agua, aire y suelos
- Expone los considerables vacíos que hay en nuestro conocimiento científico actual relacionado con la comprensión y el control de las complejas interacciones entre las actividades humanas y la naturaleza
- Señala que existen bastantes problemas ambientales que se podrían eliminar o reducir con la aplicación de la tecnología actual, pero no se atacan por falta de voluntad para hacerlo, o en muchos casos debido a la carencia de recursos para ello

- Pone énfasis en la necesidad de (y en las oportunidades para) evitar o reducir al mínimo la generación de residuos mediante cambios tecnológicos y métodos de diseño apropiados

## 1.2 ALGUNAS DEFINICIONES IMPORTANTES

Cuando se usan por primera vez en el libro, las definiciones se presentan en forma de bloques, como se muestra aquí, o impresas en negritas.

**Ambiente** es el hábitat físico y biótico que nos rodea; lo que podemos ver, oír, tocar, oler y saborear.

**Sistema** se puede definir como "un conjunto o arreglo de cosas relacionadas o conectadas de tal manera que forman una unidad o un todo orgánico; por ejemplo, un sistema solar, un sistema de irrigación, un sistema de suministro, el mundo o el universo".

**Contaminación** se puede definir como un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, el agua o el suelo que puede afectar de manera adversa la salud, la supervivencia o las actividades de los humanos o de otros organismos vivos.

Cuando se considera que la meta de mejorar la calidad ambiental consiste en acrecentar el bienestar humano, la palabra *ambiente* se emplea para incluir en el medio toda clase de aspectos sociales, económicos y culturales. Este tipo de amplitud es inmanejable en muchas situaciones reales e impráctica en un texto proyectado para un curso de un semestre. En consecuencia, nuestro examen de los problemas ambientales está limitado por la definición de *ambiente* que hemos dado.

## 1.3 INTERACCIÓN DE SISTEMAS

En la parte 3 nos ocuparemos de diversos problemas ambientales asociados, ya sea de manera particular o conjunta, con sistemas de agua, aire o tierra; aquellos que se presentan sólo en uno de los sistemas justifican la división en estas tres categorías. Una clasificación de este tipo facilita la comprensión de problemas afines dentro de un sistema. Si consideramos que la contaminación del aire, el suministro de agua, la eliminación de aguas residuales y de desperdicios sólidos suelen ser manejados por separado por distintas dependencias gubernamentales, esta clasificación es aún más razonable.

Lamentablemente, numerosos problemas ambientales no están confinados a un sistema, sino que implican interacciones entre ellos. Un ejemplo de actualidad es la lluvia ácida, la cual tiene su origen en la emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno gaseosos a la atmósfera por las chimeneas de estaciones generadoras, fundiciones y escapes de automóviles. Estos gases son transportados por corrientes aéreas sobre amplias regiones. La precipitación pluvial "los lava" y origina la lluvia ácida, dañina para la vida acuática, los bosques y los cultivos. En el



capítulo 5 se presentan dos ejemplos de interacción entre sistemas que causan perturbaciones ambientales muy importantes: la acumulación de dióxido de carbono atmosférico, un problema global, y la lluvia ácida, de naturaleza regional.

Si bien muchos problemas ambientales que se analizan en capítulos posteriores son locales o regionales y se pueden atacar de manera eficaz a esos niveles, otros se deben mirar desde un punto de vista general, de interacción agua-aire-tierra, sobre una base nacional, continental o global. La figura 1-1, al explicar la ubicuidad actual de un insecticida como el DDT, ilustra, de manera sencilla, esta interacción.

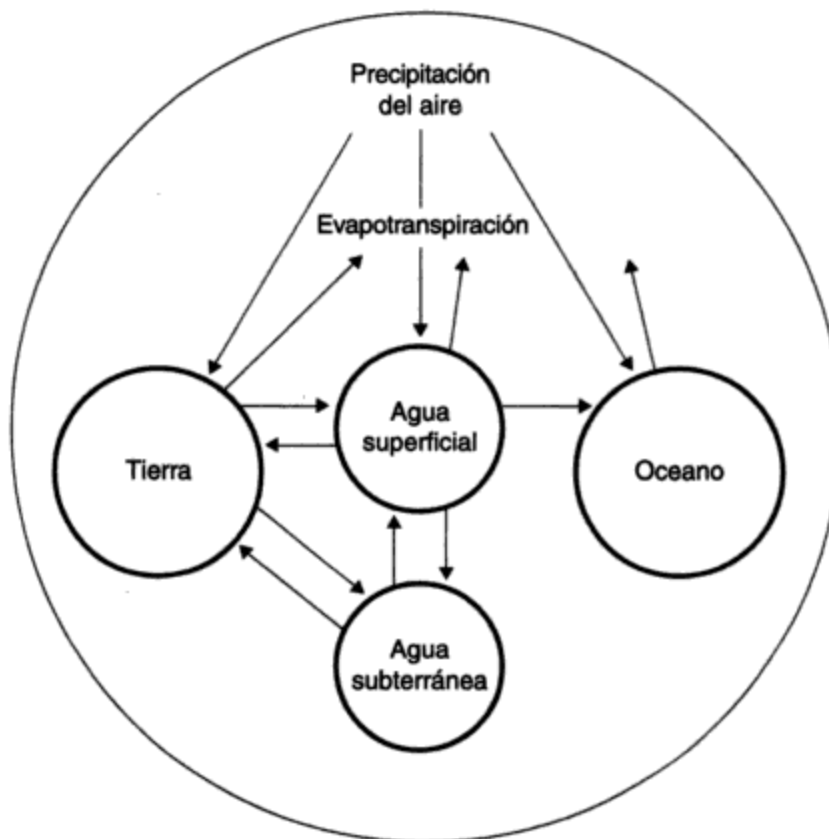


Figura 1-1 Interacciones agua-aire-tierra.

## 1.4 PERTURBACIONES AMBIENTALES

Importantes mejoras a nuestro estándar de vida se pueden atribuir a la aplicación de la ciencia y la tecnología. Aquí se indican unos cuantos ejemplos. ¿Puede usted pensar en otros?

- La mayor producción de alimentos de mejor calidad
- La creación de viviendas como protección contra los climas extremos y como espacio vital

- La construcción de medios de transporte rápidos y confiables
- La invención de diversos sistemas de comunicación
- La invención de máquinas para reemplazar el trabajo hecho por los hombres o los animales
- El suministro de agua saludable y la eliminación de los desperdicios
- La eliminación de muchas enfermedades infecciosas
- En los países desarrollados la disminución de la mayoría de las enfermedades de transmisión por agua por la aplicación de mejor tecnología hidráulica
- La disponibilidad de tiempo libre por mayor productividad, la cual ofrece oportunidades para actividades culturales y recreativas
- La protección contra los peores efectos de los desastres naturales como inundaciones, sequías, terremotos y erupciones volcánicas

No obstante estas mejoras, se han presentado efectos perturbadores colaterales como la pérdida de tierras cultivables, la desaparición de bosques, contaminación ambiental y organismos resistentes a los controles. Muchas consecuencias que en un principio se consideraban como simples molestias hoy se reconocen como amenazas potenciales tanto para la naturaleza como para los humanos. En una sociedad agrícola, las personas vivían fundamentalmente en armonía con la naturaleza, cultivando alimentos, recolectando leña y fabricando ropa y herramientas con los recursos de la tierra. Los desperdicios de animales y humanos se devolvían al suelo como fertilizantes. Había pocos, quizá ningún, problema de contaminación del agua, la tierra o el aire (figura 1-2). Para los pequeños asentamientos que surgieron, el suministro de alimentos, agua y otros materiales indispensables, así como la eliminación de los desperdicios, se tenían que mantener en equilibrio con la comunidad en proceso de cambio, por ello no se creaban problemas ambientales considerables.

Las ciudades de los tiempos antiguos, en particular las del Imperio Romano, tenían sistemas para el suministro de agua y la eliminación de los desperdicios; ejemplo de ello son los acueductos que proveían a la antigua ciudad de Roma (con una población cercana a un millón de habitantes) de agua saludable proveniente de los Montes Apeninos, y la Cloaca Máxima, uno de los más antiguos sistemas de drenaje. La tecnología municipal de las antiguas ciudades parece haber sido olvidada durante muchos siglos por quienes construyeron ciudades en Europa. Se descuidó el abastecimiento de agua y la eliminación de los residuos, y esto ocasionó brotes de disentería, cólera, fiebre tifoidea y otras enfermedades de transmisión por agua. Antes de la segunda mitad del siglo XIX no se tuvo conciencia de que la eliminación inadecuada de residuos contaminaba el suministro de agua con organismos portadores de enfermedades. La Revolución Industrial en Gran Bretaña, Europa y Estados Unidos en el siglo XIX agravó los problemas ambientales, pues como consecuencia de la industrialización se produjo una mayor urbanización. Ambos fenómenos fueron, y son, la causa fundamental de la contaminación del agua y del aire, problemas que las ciudades de aquella época fueron incapaces de manejar.

A lo largo de las décadas siguientes, en los países desarrollados rápidamente se produjeron avances tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales. Esto condujo a una reducción espectacular en la incidencia de enfermedades de transmisión por agua. La figura 1-3 ilustra el ciclo de eliminación de residuos para una sociedad industrializada. Advierta que todos los residuos se descargan en el ambiente, contaminando así los sistemas de agua, aire y tierra.

Después de la Segunda Guerra Mundial los países industrializados experimentaron un florecimiento económico estimulado por una población en crecimiento, tecnología avanzada y un

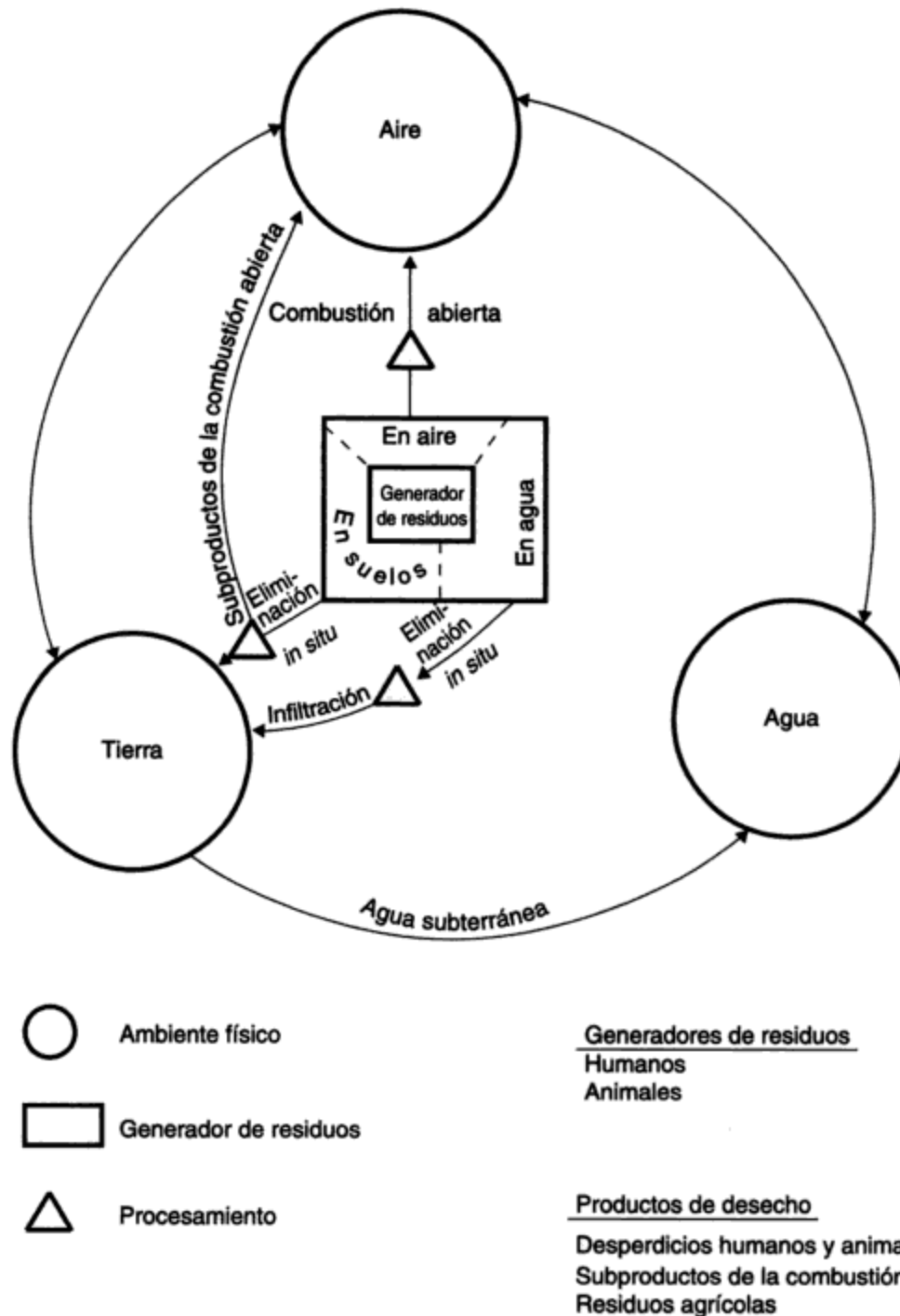
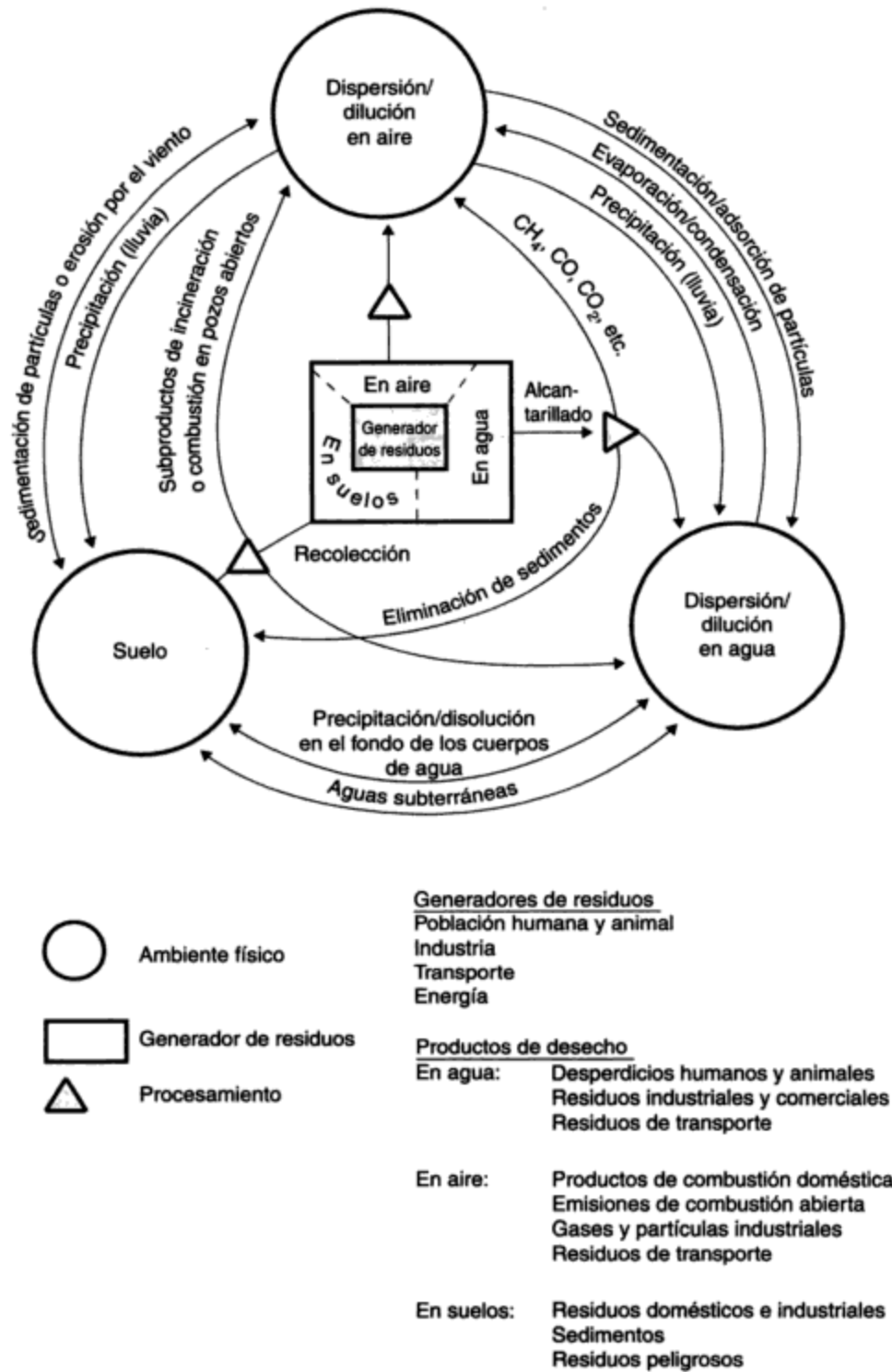


Figura 1-2 Ciclo de los residuos o desperdicios en una sociedad agrícola.

rápido incremento en el consumo de energía. Durante las décadas de 1950 y 1960 esta actividad incrementó de manera significativa la cantidad de residuos descargados en el medio. Los nuevos productos químicos, entre ellos insecticidas y plaguicidas, utilizados sin evaluar suficientemente sus efectos en el ambiente y la salud, causaron, y continúan causando, enormes problemas no previstos en el momento de su introducción. Por desgracia, la situación ambiental se agrava conforme la variedad y cantidad de contaminantes que se depositan en el medio



**Figura 1-3** Ciclo de los residuos o desperdicios en una sociedad industrializada.

umentan de manera inexorable, en tanto la capacidad de los sistemas para asimilar desperdicios es limitada.

## 1.5 CONCIENCIA PÚBLICA Y ACCIÓN

Unas cuantas voces comenzaron a hacerse oír acerca de los nuevos problemas. Entre los que con mayor eficacia consiguieron intensificar la conciencia pública están Rachel Carson con *Silent Spring* (1962); G. Hardin con su famoso ensayo *The Tragedy of the Commons* (1968); Paul Ehrlich, *The Population Bomb* (1968); D. H. Meadows *et al.*, *The Limits to Growth* (1972); Barry Commoner, *The Closing Circle* (1971); Paul y Ann Ehrlich, *The End of Affluence* (1974); Barbara Ward y Rene Dubos, *Only One Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet* (1972); Erik R. Eckholm, *Losing Ground* (1976), *The Picture of Health* (1977), y *Down to Earth* (1982); y Holdgate *et al.*, *The World Environment 1972-1982* (1983). Todos éstos son libros fascinantes y estimulantes, algunos traducidos al español y que resultan ser una importante lectura de referencia.

Otra razón por la cual la contaminación saltó a un primer plano en Estados Unidos fue expresada por Goldman (1967):

Finalmente la atención pública se orientó hacia la contaminación por razones inusitadas. A mediados de los años 60 nuestro gobierno se había quedado casi sin campañas domésticas que realizar. Después de años de batallar, se habían adoptado medidas legales para enfrentar la mayor parte de los retos de gran envergadura; se había aprobado el programa del fondo de seguro social de asistencia médica para personas mayores de 65 años (Medicare), así como otros programas para la expansión de carreteras, control de la pobreza, renovación urbana y mejoramiento de la educación. Con el control de la contaminación se podía despertar un espíritu misionero similar entre votantes y políticos. ¡No podría existir una Gran Sociedad si el agua, el aire y los vertederos estaban sucios!

Goldman afirmó también que “hay razones para creer que sólo los países muy ricos son capaces de permitirse el lujo de tener agua y aire limpios, y los que pueden armar un alboroto al respecto”. Aunque se puede argumentar contra esta afirmación, se debe considerar que por años fue repetidamente citada, en las Naciones Unidas y en sus dependencias, por los delegados de los países en desarrollo. En general, estas naciones que no eran ricas no estaban dispuestas a considerar los consejos de los países desarrollados, quienes los exhortaban a “no cometer de nuevo nuestros errores omitiendo los controles de la contaminación en los nuevos desarrollos industriales”.

Desde finales de los 60 hasta finales de los 70 en la mayoría de los países occidentales se instauró una legislación para controlar varios aspectos de la contaminación. En 1970 se creó en Estados Unidos la *Environmental Protection Agency* (EPA), dependencia encargada de administrar el programa ambiental. A partir de entonces, todos los estados de la Unión Americana establecieron agencias o dependencias ambientales. Algo similar ocurrió en otros países occidentales y, hasta cierto punto, en otras partes del mundo. Era un comienzo alentador, pero es mucho lo que faltaba por hacer. Las Naciones Unidas enfocaron su atención en el problema organizando una Conferencia sobre el ambiente humano en 1972 en Estocolmo. Posteriormente, conferencias de las Naciones Unidas dedicadas a la población, los alimentos, los derechos de la mujer, la desertificación, los asentamientos humanos, la ciencia y la tecnología y el Tercer Mundo continuaron poniendo énfasis en los problemas ambientales. Finalmente, en 1992 la ONU organiza en Río de Janeiro la conferencia “Cumbre de la Tierra” para abordar temas de ambiente y desarrollo.

A esta reunión asistieron 102 jefes de Estado de 182 países. Ésta es la reunión ecológica más grande que haya tenido lugar; sin embargo, las expectativas para compartir los problemas globales no se materializaron ni tampoco se resolvieron cuestiones fundamentales, como el calentamiento planetario, la protección a los bosques, la contaminación de los océanos y el control de la población. Los mismos resultados desalentadores se obtuvieron en 1994 en El Cairo en la conferencia "Población y desarrollo" de la ONU. Esto no es sorprendente, tan sólo manifiesta la dificultad que existe para conciliar los puntos de vista, ampliamente divergentes en las distintas áreas, y que son originados por distintas condiciones económicas, sociales, religiosas y políticas. Estas conferencias poco fructíferas, aunque desalentadoras para los ambientalistas, han alertado a la población mundial respecto a los problemas ambientales. La opinión pública es, después de todo, el medio más eficaz con que contamos para obligar a la acción política. Por el momento la sociedad civil parece estar adelante de los políticos en lo que concierne a su preocupación por el ambiente.

La enorme tarea que encaran los países del Tercer Mundo fue descrita de manera gráfica por Eckholm en 1982:

Agua razonablemente limpia y abundante, dispositivos higiénicos para la eliminación de excrementos y la práctica de principios sanitarios son, todos juntos, fundamentales para una mejor salud; ... no obstante, más de la mitad de la población del Tercer Mundo (excluyendo a China) no tiene acceso razonable a un suministro de agua saludable; tres de cada cuatro no cuentan con dispositivos adecuados para la eliminación de desperdicios; menos aún cuentan con una letrina de cubo.

Durante las décadas de 1960 y 1970 el porcentaje de residentes en el Tercer Mundo con acceso a estos suministros aumentó significativamente. Sin embargo, a medida que la población crecía, también lo hacía el número absoluto de personas carentes de dichos recursos necesarios. Contra este telón de fondo, las Naciones Unidas declararon los años 80 como "Década internacional para el suministro y saneamiento del agua potable". La esperanza, que se sabía vana incluso en el momento de anunciarse, era que los gobiernos tercermundistas y los donadores de ayuda internacional incrementaran de manera drástica sus inversiones para, en 1990, abastecer de agua y servicios sanitarios a todos. Alcanzar esta meta requeriría un incremento de tres a cinco veces el gasto respecto a los niveles de inversión en 1979, es decir, se necesitaban de 6 a 7 mil millones de dólares, un tercio de los cuales fueron aportados como ayuda internacional. También precisaría apoyar el gasto para agua y servicios sanitarios, un mayor uso de tecnologías sencillas, y la búsqueda de nuevas formas de participación y educación para las comunidades, de tal forma que se asegure que los nuevos pozos y letrinas reciban un mejor mantenimiento del que suele dárseles.

Los fondos necesarios parecen grandes hasta que se comparan con otros a nivel mundial. Satisfacer las necesidades financieras de la década requeriría un gasto global de aproximadamente 80 millones de dólares diarios; esto en un mundo que consume en el mismo periodo más de 250 millones de dólares en cigarrillos y 1,400 millones en armas. No ha surgido un compromiso político genuino para proveer acceso universal al agua y los servicios sanitarios entre los donadores de ayuda o la mayoría de los gobiernos del Tercer Mundo.

Los problemas económicos de los años 80 y principio de los 90 obligó a hacer cambios en las prioridades del público y de sus gobiernos. La inflación, el desempleo y la energía se convirtieron en preocupaciones importantes, lo cual es comprensible. Con la desintegración de la Unión Soviética en 1992, la disminución de la amenaza de una guerra nuclear y el creciente nacionalismo, muchos países del mundo se han vuelto inestables. La rivalidad racial y religiosa es más evidente. La criminalidad, la educación, los cuidados médicos, la desintegración familiar y la discriminación relacionada con la raza y el género, compiten por la atención del político. Los galopantes aumentos en los costos de la energía en el pasado, así como los enormes incre-

mentos en los costos de la asistencia social y el desempleo, han causado enormes déficit financieros a los gobiernos del mundo desarrollado y han llevado a muchos países subdesarrollados al borde del desastre financiero. Se necesitará una extraordinaria habilidad política y prudencia en lo nacional o lo internacional para conducirnos en la próxima década. ¿Qué tan alta será la prioridad del mejoramiento ambiental en estos tiempos difíciles?, es algo que está por verse. Al parecer la preocupación pública por los aspectos de salud y manejo de los residuos tóxicos y peligrosos continuará en aumento durante largo tiempo.

## 1.6 EL PAPEL CAMBIANTE DE LA TECNOLOGÍA

Conforme nos acercamos al siglo XXI, el uso de la tecnología para resolver problemas ambientales aumenta, pero se aplica de diferente manera. Hay indicios de que el papel de la tecnología en las cuestiones ambientales está cambiando en dos áreas importantes: el *desarrollo sostenido*, que se ocupa primordialmente de problemas mundiales, y la *tecnología preventiva*, proyectada para reducir los efectos de los procesos, operaciones y productos en el ambiente.

### 1.6.1 Desarrollo sostenido

En 1987 la Comisión Mundial para el Ambiente y el Desarrollo de la ONU (encabezada por la entonces primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland) publicó el informe, ampliamente aclamado e incitante a la reflexión, "Nuestro futuro común", en el que aparece la siguiente definición:

**Desarrollo sostenido** es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

El concepto de *desarrollo sostenido* ha cambiado la filosofía de explotación destructiva de la sociedad a una que fomente la protección del ambiente y sus habitantes a largo plazo. Para los científicos y los ingenieros esto significa un cambio respecto a prácticas pretéritas cuando los avances tecnológicos tenían como guía criterios de eficiencia, productividad, rentabilidad y otros similares de tipo económico. Éstos conservan su validez, pero ahora se han agregado a ellos inquietudes por los impactos en la salud y el ambiente, la conservación de los recursos y la energía, el manejo de los residuos y los problemas sociales como las demandas públicas, el desempleo y la criminalidad.

Algunas prácticas adoptadas para satisfacer las necesidades de una población en crecimiento son en realidad soluciones de corto alcance y no pueden continuar. Ejemplo de ello es la excesiva fertilización de la tierra, la cosecha en bosques antiguos, no tomar en cuenta los controles de la contaminación y dar lugar a otras prácticas nocivas similares. En último término, el desarrollo sostenido mundial demanda una población estable, asentada en un medio social y físico seguro. Esta situación es diferente del "estado estacionario" que se alcanza en experimentos de laboratorio con condiciones controladas. Si el desarrollo sostenido global se alcanza será mediante el ingenio humano y la adaptación natural de los seres vivos a un mundo en continuo cambio. (La sección 16.2 incluye comentarios adicionales sobre el desarrollo sostenido.)

### 1.6.2 Tecnología preventiva\*

Hasta mediados de la década de los 70 e incluso en nuestros días, en Europa Oriental y en muchos países subdesarrollados las decisiones económicas y tecnológicas encaminadas al desarrollo han tenido y tienen como eje principal preocupaciones de mercado y de rentabilidad, con poca o ninguna consideración por los impactos ambientales y sociales. A medida que éstos se hicieron inaceptables para la sociedad de los países desarrollados, sus gobiernos impusieron leyes que obligaron a adoptar medidas para disminuir la contaminación. Además, con el fin de controlar la problemática del agua, el aire y el suelo se crearon plantas de tratamiento para residuos industriales y municipales, controles de emisión para chimeneas de incineradores, y rellenos sanitarios seguros para la eliminación de residuos sólidos. El tratamiento de los residuos al final de los ciclos de producción industrial, o para desechos municipales, suele describirse como tratamiento *al final del tubo o después de los hechos*. Éste se ha considerado la principal filosofía del control para la contaminación durante los últimos veinte años. Existen fuerzas poderosas que tienden a empujar a las sociedades hacia la continuación de este enfoque tradicional, en particular en los países en desarrollo. Muchos gobiernos e industrias consideran aún a la economía como el motor que debe mover todo lo demás, haciendo circular riqueza sin importar las consecuencias. Según su punto de vista, una sociedad debe hacer elecciones inevitables y difíciles entre conservar o alcanzar una competitividad internacional y disponer de un ambiente saludable, entre la productividad de la mano de obra y los lugares de trabajo y comunidades socialmente saludables, entre la producción de energía para mantener en movimiento el motor económico y los riesgos asociados a ello, entre los impuestos municipales asequibles y las ciudades habitables, y una multitud de otras elecciones similares difíciles. En otras palabras, a ellos sólo les parece posible continuar con el desarrollo industrial y la urbanización guiados en primer término por motivos de mercado y de rentabilidad, y utilizar la riqueza resultante para ayudar a pagar los inevitables costos ambientales y sociales.

Las objeciones al enfoque tradicional por parte de quienes están a favor de una estrategia preventiva van en aumento. Estas personas preguntan cómo se pueden rediseñar o ajustar los procesos, operaciones y productos del sistema industrial para evitar o reducir al mínimo la producción de residuos. En vez de considerar este concepto como un aumento de costos y reducción de utilidades, consideran mayores las implicaciones de controlar la contaminación *después de los hechos*. Estas personas consideran beneficios la reducción de los costos de energía y mantenimiento, la menor necesidad de recursos naturales, la disminución o eliminación de costos para el control de la contaminación y una menor necesidad de medidas para la salud y seguridad ocupacional, todo esto en función de procesos de producción *más limpios*, reducción de los riesgos por derrames o descargas accidentales, moral más alta en los trabajadores que se enorgullecen de sus productos "verdes", y mejor aceptación en el mercado de este tipo de mercancía. Los esfuerzos que realizan las compañías que abrazan esta nueva filosofía ayudan a reducir algunos *gastos* de un país, como los costos del cuidado de la salud y el ambiente, con lo cual disminuyen los déficit y las cargas fiscales.

La **tecnología preventiva** ha resultado especialmente atractiva para la industria a causa de los beneficios económicos potenciales y la publicidad obtenida por la extensa cobertura de los

\*Parcialmente citado de un libro de próxima publicación escrito por W. H. Vanderberg, *The Ecology of Technology and Preventive Engineering*. (Sin editor responsable todavía.)



medios de comunicación. Uno de los primeros ejemplos de la tecnología preventiva es el programa corporativo de 3M: "La prevención de la contaminación vale la pena", el cual comprendió reformulación de productos, modificación de procesos, rediseño de equipos y recuperación de productos de desecho para nuevo uso. El ahorro total que la compañía alcanzó fue mayor a 30 millones de dólares en 3 años (Campbell y Glenn, 1982). Los fabricantes de automóviles están instituyendo medidas de conservación similares, a través del diseño de piezas y materiales destinados a reusarse al final de la vida útil de un vehículo. Los fabricantes de refrigeradores, estufas y otros aparatos de "línea blanca" están comenzando a incluir en sus diseños el desensamblado y reabsorción de materiales en los ciclos de producción y consumo. Los economistas comienzan a darse cuenta del potencial de estas estrategias.

## 1.7 CUANTIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS AMBIENTALES

Como futuro ingeniero o científico, al estudiante no le basta con entender las causas y los efectos de los problemas ambientales en términos exclusivamente cualitativos. También debe ser capaz de expresar el problema que se percibe y su solución potencial de manera cuantitativa. Muchas cuestiones ambientales son muy complejas. Con frecuencia, el problema se puede dividir en varios componentes, que se pueden analizar llevando a cabo balances de materia o energía para cada componente, lo cual conduce a una solución para el sistema total. Los balances de materia son una herramienta muy eficaz en este sentido y se presentan en capítulos posteriores. A lo largo del libro se ofrecen ejemplos ilustrativos y al final de cada capítulo se incluyen problemas. En el texto se utilizan unidades SI (Système International) y AES (American Engineering System). En los apéndices del A.1 al A.3 se incluyen factores de conversión y problemas para practicar.

## PROBLEMAS

- 1.1. Para cada uno de los productos siguientes, indique un beneficio de su uso y un efecto perjudicial en el ambiente o en la calidad de vida: fertilizantes sintéticos, DDT, detergentes fosfatados, PCB, antibióticos.
- 1.2. Cite tres problemas de contaminación con los que esté familiarizado. En cada caso explique con pocas palabras por qué constituye un problema y de qué manera está implicado más de un sistema (aire, agua, tierra).
- 1.3. Estudie la tabla de contenido de este libro y enumere los problemas ambientales que parezcan estar ausentes.
- 1.4. Averigüe cuáles son las dependencias que se encargan de (a) el suministro de agua, (b) la contaminación del agua, (c) la contaminación del aire, (d) los desechos sólidos, y (e) los residuos peligrosos en (1) la comunidad local, (2) el estado o provincia, y (3) en el ámbito federal.
- 1.5. Comente la siguiente expresión: "El control ambiental es un lujo que los países pobres no se pueden dar."
- 1.6. ¿Está usted tomando este curso porque alguien decidió que debería formar parte de su plan de estudios básico o porque usted decidió tomarlo como materia optativa? ¿Qué espera obtener de él? Haga una lista de varios puntos en los que pueda pensar en este momento relacionados con el

tema. Al terminar el curso revise su lista. ¿Han cambiado sus expectativas? ¿Han sido satisfechas?

- 1.7. Explique su interpretación del término "desarrollo sostenido" en cuanto a su aplicación: (a) al crecimiento de la población mundial, (b) al área central de una ciudad, (c) en un área agrícola próspera.
- 1.8. Seleccione una industria en la cual se podría, como describe la sección 1.6, utilizar tecnología preventiva (fábrica de pulpa y papel, cadena de comida rápida, fabricante de muebles, etc.) y mencione algunos de los beneficios que la industria podría obtener.
- 1.9. Redacte un ensayo de 500 palabras sobre una compañía del área donde usted vive que haya utilizado tecnología preventiva para evitar o reducir la generación de residuos.
- 1.10. Busque un artículo periodístico (anéxelo a su trabajo) que se ocupe de un problema ambiental de nuestros días. Evalúe la validez del reportaje y la seriedad de los problemas. Considere, entre otras cosas,
  - si es de naturaleza local, regional o global,
  - si se puede corregir, ¿qué pasos son necesarios para ello?;
  - ¿cuánto tiempo tomará?;
  - ¿cuáles son los costos, y quién proporcionará los fondos?
- 1.11. Explique, ¿por qué la eliminación de desechos sólidos en rellenos sanitarios es un problema ambiental?, ¿de qué manera se altera nuestro entorno y qué lo afecta?
- 1.12. Seleccione un problema ambiental local que en su opinión será motivo de preocupación *creciente* en el futuro, y escriba una carta de 500 palabras al funcionario público apropiado. Se deberán incluir los siguientes puntos.
  - Planteamiento de la fuente del problema y sus efectos adversos.
  - Razones por las que la situación podría empeorar, en qué medida y cuándo.
  - Acciones que se deben adoptar con prontitud en los sectores de (1) investigación, (2) control ambiental y desarrollo de tecnología, y (3) necesidades legislativas.

## REFERENCIAS

- CAMPBELL, M. E. y GLENN, W. M. *Profit from Pollution Prevention*. Toronto. Pollution Probe Foundation, 1982.
- CARSON, R. *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin, 1962.
- COMMONER, B. *The Closing Circle*. Nueva York: Alfred A. Knopf, 1971; Nueva York: Bantam, 1972.
- ECKHOLM, E. P. *Losing Ground: Environmental Stress and World Food Prospects*. Nueva York: W. W. Norton, 1976.
- ECKHOLM, E. P. *The Picture of Health: Environmental Sources of Disease*. Nueva York: W. W. Norton, 1977.
- ECKHOLM, E. P. *Down to Earth: Environment and Human Needs*. Nueva York: W. W. Norton, 1982.
- EHRlich, P. R. *The Population Bomb*. Nueva York: Ballantine, 1968.
- EHRlich, P. R. y EHRlich, A. H. *The End of Affluence*. Nueva York: Ballantine, 1974.
- GOLDMAN, M. I., ed. *Controlling Pollution: The Economics of a Cleaner America*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1967.
- HARDIN, G. "The Tragedy of the Commons", *Science* 162 (1968): 1243.
- HOLDGATE, M. W., KASSAS, M. y WHITE, G. F. *The World Environment 1972-1982*. Dublín: Tycooly, 1983.

- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J. y BEHRENS, W. W. *The Limits of Growth*. Nueva York: Universe Books, 1972; Nueva York: Signet, 1972.
- UNITED NATIONS WORLD COMMISSION, World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Londres: Oxford University Press, 1987.
- VANDERBERG, W. H. *The Ecology of Technology and Preventive Engineering*.
- WARD, B. y DUBOS, R. *Only One Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet*. Nueva York: W. W. Norton, 1972.

# CAPÍTULO 2

---

## Crecimiento poblacional y económico

*Gary W. Heinke*

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Hace unos 250 años la humanidad existía en un número relativamente pequeño y con una tecnología bastante limitada. Cualquier perturbación ambiental causada por personas era local y generalmente estaba dentro de las posibilidades de la misma naturaleza para absorberla. En los últimos dos siglos se han producido cuatro hechos que han creado problemas ambientales que superan la capacidad de asimilación de la naturaleza. Primero, un crecimiento explosivo de la población que ha creado enormes presiones ambientales. Segundo, este crecimiento, en particular en los países desarrollados, ha estado acompañado de nuevos procesos industriales que con sus desperdicios alteran el ambiente. Tercero, el crecimiento poblacional y la industrialización han dado origen a la urbanización, es decir, al movimiento de personas que emigran de pequeños asentamientos a ciudades y pueblos, lo cual contribuye a intensificar los problemas ambientales en función de la densidad de personas e industrias. Por último, el crecimiento explosivo del uso de energía y la introducción de nuevos productos, en particular desde la Segunda Guerra Mundial, que han acentuado más la tensión ambiental.

En general, estos acontecimientos han tenido un impacto negativo y desastroso en ciertas áreas del ambiente físico. El éxito económico y los elevados niveles de vida en los centros urbanos de las naciones desarrolladas han estado acompañados del consumo de recursos natu-

rales como agua, madera, depósitos minerales, suministro de energía y terrenos. Las crecientes demandas domésticas e industriales y el correspondiente agotamiento de recursos no puede continuar de manera indefinida sin ocasionar un desorden ambiental grave.

## 2.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL

### 2.2.1 La naturaleza del crecimiento poblacional

El *crecimiento poblacional* suele caracterizarse como exponencial; esto es, aumenta (o disminuye) en un porcentaje fijo con relación al número total existente durante un intervalo unitario. Matemáticamente, esto se expresa como

$$P = P_0 e^{rt} \quad (2.1)$$

en donde  $P$  = tamaño futuro de la población

$P_0$  = tamaño actual de la población

$t$  = número de años para la extrapolación

$r$  = tasa de crecimiento calculada por cada uno de los años  $t$  (expresado como fracción)

$e$  = base de los logaritmos naturales

La tasa de crecimiento  $r$  generalmente se expresa como un incremento porcentual por año, o bien, como el aumento anual en el número de personas por cada 1,000 habitantes. En la actualidad, la tasa de crecimiento de la población mundial es aproximadamente de 1.7%, esto es, 17 personas más por cada 1,000 habitantes al año. Para cualquier país, la tasa de crecimiento poblacional está determinada por cuatro componentes principales: nacimientos, muertes, inmigración y emigración. Por ello, la *tasa de crecimiento* se define con la ecuación

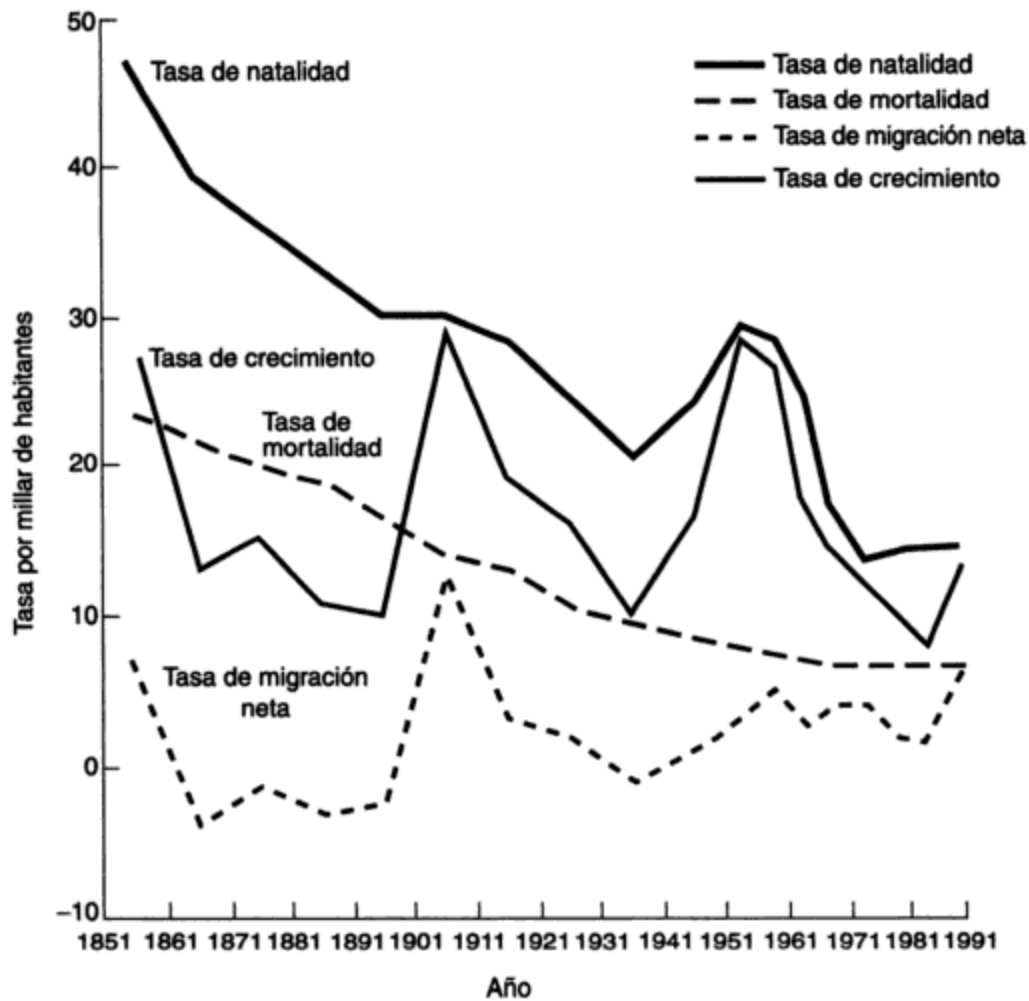
$$r = (b - d) + (i - e) \quad (2.2)$$

en donde  $n$ ,  $m$ ,  $i$  y  $e$  son las tasas de natalidad, mortalidad, inmigración y emigración, respectivamente, expresadas como cantidad o porcentaje anual por cada 1,000 habitantes. El exceso de nacimientos en relación con las muertes se conoce como aumento natural de la población; en tanto la diferencia entre el número de inmigrantes y el de emigrantes se llama *migración neta*. Otra base útil para expresar el crecimiento exponencial es el *tiempo de duplicación*, que se refiere al tiempo necesario para que la cantidad que se considera duplique su tamaño cuando aumenta a una tasa de crecimiento constante,  $r$ . Una aproximación que se usa para estimar el tiempo de duplicación es

$$T_{db} \approx \frac{70}{r} \quad (2.3)$$

en donde  $T_{db}$  es el tiempo de duplicación en años y  $r$  es la tasa de crecimiento expresada como porcentaje anual.

La figura 2-1 es una presentación gráfica de las estadísticas correspondientes a Canadá de 1851 hasta 1990. La ilustración muestra que la tasa de crecimiento anual sufrió enormes

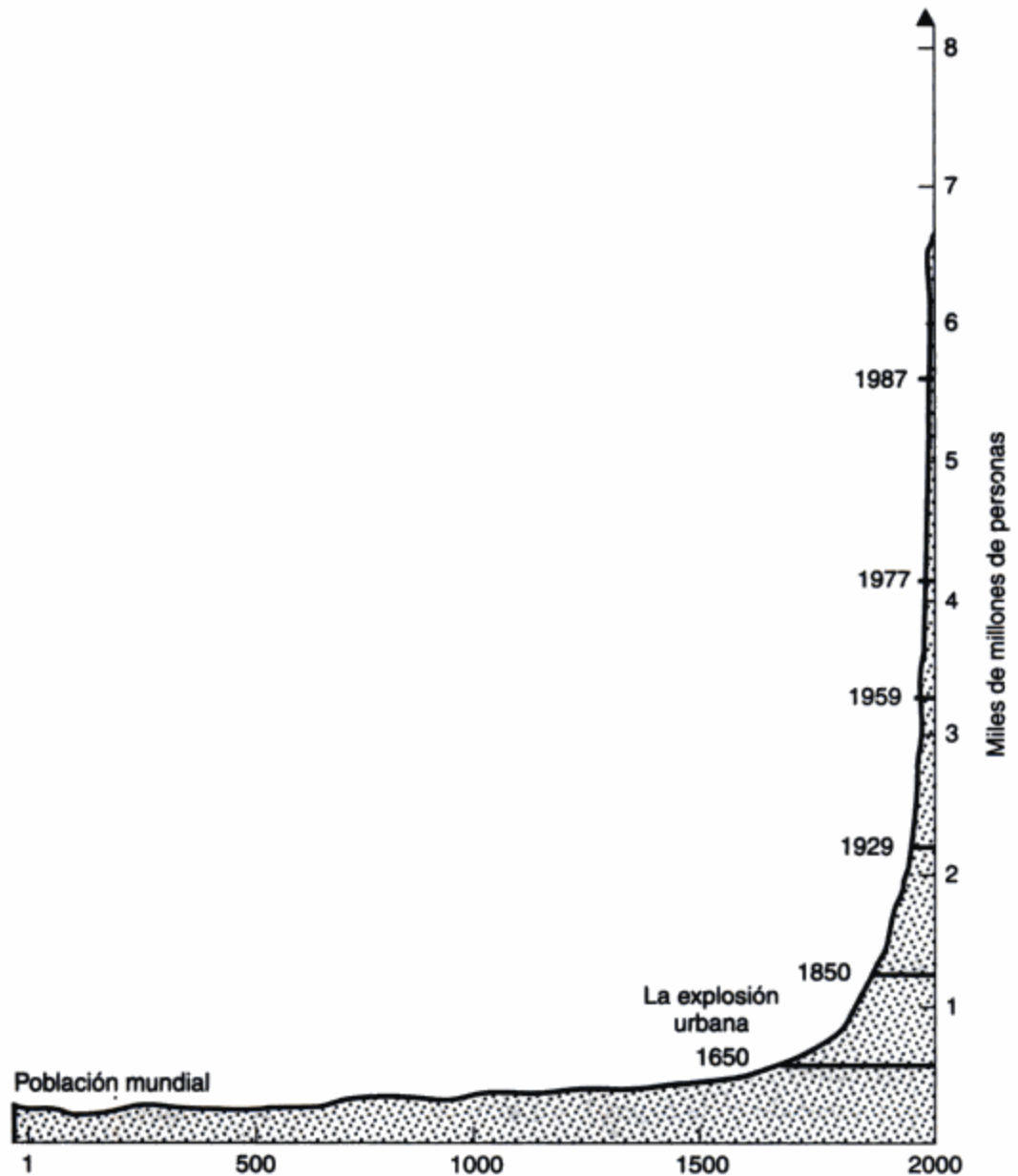


**Figura 2-1** Tasa de natalidad, tasa de mortalidad, migración neta y tasa de crecimiento para Canadá, 1851-1990, por cada 1,000 habitantes. *Fuente:* Ministerio de Industria, Oficios y Comercio (1989, 1992).

aumentos durante la década posterior al año 1896 y también durante un lapso de 20 años después de 1936. Puesto que el aumento natural de la población antes de 1906 estaba en descenso, es evidente que los inmigrantes causaron el salto en la tasa de crecimiento entre 1896 y 1906. Por otra parte, el alza vertiginosa de la tasa de crecimiento entre 1936 y 1956 se debió a un incremento en la tasa de natalidad (el auge de nacimientos durante la posguerra), así como a otro periodo de alta inmigración. El alza más reciente en la tasa de crecimiento también tuvo su origen en una elevada inmigración.

Las tendencias mundiales de la población han sido descritas por Bramwell (1977):

La figura 2-2 proporciona una imagen gráfica del crecimiento de la población mundial en los dos últimos milenios. Durante la Era Cristiana el número de habitantes en el mundo era de, aproximadamente, 300 millones de personas. Para 1650, año que se considera como el principio de la era moderna de la ciencia y la tecnología, había aumentado a 500 millones; desde entonces el creci-



**Figura 2-2** Población mundial. *Fuente:* Towns and Cities (Gage Studies Series), por R. D. Bramwell. Copyright 1977, Gage Educational Publishing Limited. Reproducido con autorización del editor.

miento ha sido tan explosivo que en 1983 había alrededor de 4,700 millones. En otras palabras, se necesitó casi todo el tiempo que tiene la humanidad sobre la Tierra, quizá 500,000 años, para tener una población de 1,000 millones, cantidad estimada en el año 1800; pero bastaron 130 años (hasta 1930) para agregar otros 1,000 millones, 30 más (hasta 1960) para llegar a los 3,000, y sólo 15 más (hasta 1975) para agregar otro tanto y alcanzar una población mundial estimada de 4,000 millones. Así pues, la población mundial ha crecido en proporciones que han aumentado aproxi-

madamente 2% por cada mil años durante la era paleolítica hasta dos por ciento anual a mediados de la década de 1950, esto es, un incremento de mil veces.

David Suzuki, renombrado genetista y activista ambiental, empleó bacterias para ilustrar la imposibilidad del crecimiento exponencial continuo de la población, del producto nacional bruto (PNB), del uso de energía, de la contaminación o, de hecho, de cualquier cosa que crezca constantemente en proporción a su tamaño. Suzuki sugirió (1986) imaginar un tubo de ensaye con un medio para bacterias en su interior:

A las 11:00 introducimos una célula bacteriana con un tiempo de duplicación de un minuto. Un minuto más tarde hay dos células, a las 11:02 hay cuatro, y así sucesivamente hasta que, a las 12:00 el tubo está lleno. La pregunta es, ¿a qué hora está el tubo a la mitad? La respuesta, desde luego, es a las 11:59. Si usted fuera una bacteria, ¿en qué momento se daría cuenta de que hay un problema de espacio (o de población)? A las 11:58 el tubo estaría lleno a la cuarta parte, a las 11:57 a un octavo, etc. Si una bacteria dijera a sus compañeras a las 11:55, "creo que tenemos un problema de espacio", sería el hazmerreír de las demás: ¡cualquier bacteria sensata podía ver que el 97% del tubo estaba vacío! No obstante, faltarían sólo 5 minutos para que el tubo quedara lleno.

Suponga que a las 11:58 algunas células emprendedoras se salieran del tubo, recorrieran el planeta en busca de nuevos recursos, y regresaran con tres tubos de ensaye de alimentos.

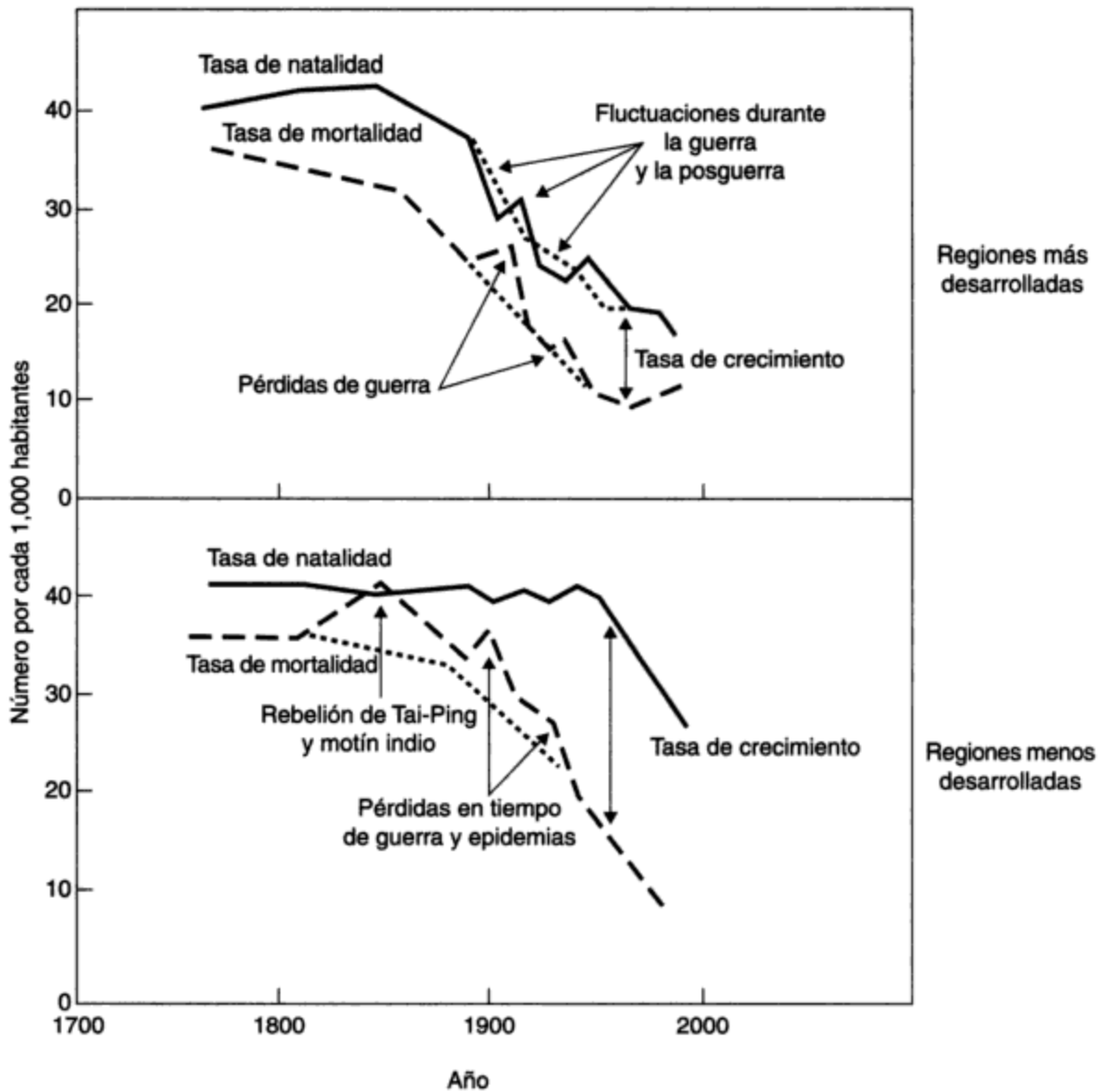
Esto es un hallazgo fenomenal, ¡tres veces las existencias conocidas! (¿Se imagina usted cuánto nos tranquilizaría si hiciéramos un hallazgo de petróleo de tal magnitud?) ¿Cuánto tiempo se ganaría con eso? A las 12:00, el primer tubo estaría lleno, a las 12:01, el segundo tubo quedaría lleno, y a las 12:02, ¡los cuatro estarían hasta el tope! Al cuadruplicar la cantidad de alimento sólo se ganan dos minutos si el crecimiento continúa al mismo ritmo.

### 2.2.2 Crecimiento poblacional en las regiones más y menos desarrolladas

Es instructivo examinar con más detalle el periodo de rápido crecimiento de los últimos 250 años, presentado en la figura 2-3. Como las diferencias de crecimiento poblacional entre las regiones más desarrolladas (R+D) del mundo y las menos desarrolladas (R-D) son muy significativas, entonces se presentan por separado. A primera instancia, al dividir el mundo en estas dos regiones, la migración neta entre ellas es pequeña en comparación con el incremento total de la población y se puede despreciar. Por consiguiente, la tasa de crecimiento global en cada una de las regiones se determina como la diferencia entre la tasa de natalidad y la tasa de mortalidad. En la figura se ve con claridad que ha ocurrido lo siguiente:

- En las R+D a partir de 1800 las tasas de natalidad han descendido notablemente desde 40 habitantes por cada 1,000 al año hasta menos de 15 en la actualidad. En tanto, en las R-D, las altas tasas de natalidad de 1800 continuaron hasta mediados del presente siglo, pero han descendido bruscamente en los últimos 25 años alrededor de 25 por cada 1,000 habitantes al año.
- Las tasas de mortalidad anual han descendido considerablemente en las R+D de 35 en 1800 hasta menos de 10 por cada 1,000 habitantes en la actualidad. Se considera que 10 es un mínimo que puede aumentar ligeramente durante el resto del siglo porque la pobla-





**Figura 2-3** Tasa de crecimiento para las regiones más y menos desarrolladas. *Fuente:* Datos anteriores a 1950 de la ONU (1971); datos posteriores a 1950 de la ONU (1981).

<b>Regiones más desarrolladas (R+D)</b>	<b>Regiones menos desarrolladas (R-D)</b>
Europa, Comunidad de Estados Independientes (CEI; la antigua URSS), Estados Unidos, Canadá, Japón, Sudamérica templada, Australia, Nueva Zelanda	Todas las demás áreas

ción está envejeciendo. El mismo descenso se manifiesta en las R-D; a pesar de haberse iniciado más tarde, a comienzos de este siglo, en nuestros días se tienen niveles aproximadamente iguales a los de las R+D.

- Las tasas de crecimiento, presentadas de forma gráfica en la figura 2-3 como la distancia vertical entre las líneas de la tasa de natalidad y la tasa de mortalidad, se han conservado más o menos iguales en las R+D los últimos 200 años: en cerca de 10 por cada 1,000 habitantes al año, pero con importantes variaciones como los nacimientos inusitados en los periodos de guerra y posguerra. Desde luego, hay importantes variaciones en los países que componen las R+D. Para las R-D la gráfica muestra con gran claridad que las tasas de crecimiento han aumentado considerablemente desde casi 5 antes de 1900 hasta más de 20 por cada 1,000 habitantes por año durante la mayoría del presente siglo. La gráfica muestra que son las tasas de mortalidad en descenso, y no las de natalidad crecientes, la causa del crecimiento de la población. Al mejorar las medidas públicas de salubridad y la producción de alimentos agrícolas en las regiones menos desarrolladas, se ha reducido notablemente la tasa de mortalidad. En consecuencia, las tasas de natalidad históricamente elevadas ya no se compensan con altas tasas de mortalidad, produciéndose un brusco aumento en las tasas de crecimiento. Durante el siglo XIX se han experimentado en las regiones más desarrolladas tasas de mortalidad en descenso, como consecuencia de mejoras en los servicios sanitarios y en medicina. Posteriormente, se ha dado una reducción en las tasas de natalidad, originada en parte por la urbanización. En las regiones menos desarrolladas la disminución de las tasas de natalidad se inició después de la Segunda Guerra Mundial. Las inversiones en campañas para el control de la natalidad de los últimos 30 o 40 años han conseguido disminuir la tasa de natalidad. Actualmente el ritmo de reducción de la tasa de natalidad es casi igual al de la disminución de la tasa de mortalidad, que de forma gráfica se muestran como paralelos en la figura.

Es importante entender la diferencia que existe en el crecimiento poblacional en los países de las R+D y las R-D para apreciar las tendencias en el aumento de la población mundial y las implicaciones socioeconómicas. Un hecho sencillo ilustra el punto: de cada 10 personas vivas en la actualidad, cuatro habitan en uno u otro de los dos países que pertenecen al bloque de naciones menos desarrolladas, China e India.

Las tablas 2-1 y 2-2 indican que más del 75% de la población del planeta habita en las regiones menos desarrolladas. Los descensos en la tasa de crecimiento de las regiones más desarrolladas han sido compensados con incrementos en las regiones menos desarrolladas; es probable que el resultado sea una tasa de crecimiento mundial aproximada de 1.6% en el periodo 1985-2010. En términos absolutos, la consecuencia socioeconómica de una tasa de crecimiento constante de 2.5% para los países menos desarrollados, como muchos de África y Latinoamérica, implica que para mantener su nivel de vida actual, inferior al de los países desarrollados, se tendría que duplicar cada escuela, hospital, casa, camino, planta de tratamiento de agua, mercado, planta de energía eléctrica, etcétera, en los próximos 28 años. Se emplea la frase *términos absolutos* porque estas proyecciones no toman en cuenta aspectos tales como el reemplazo de servicios que se han desgastado o el creciente consumo per cápita de bienes y servicios. En muchas de las regiones menos desarrolladas la escala de la industrialización y la tecnología necesarias, tan sólo para conservar los niveles actuales para la población en rápido crecimiento, simplemente no existe. Por ello, la reducción de la tasa de crecimiento en estos países tiene una importancia capital para el bienestar futuro de la población.

**TABLA 2-1 DATOS DE POBLACIÓN PARA LAS REGIONES MÁS DESARROLLADAS Y MENOS DESARROLLADAS\***

	Población (millones)	Nacimientos anuales por cada 1,000 habitantes (1980-1985)	Muertes anuales por cada 1,000 habitantes (1980-1985)	Tasa de crecimiento (%) (1950-1985)	Tasa de crecimiento estimada (%) (1985-2010)	Tiempo de duplicación (años)	Población estimada (millones) (2010)
R+D	1224	15.2	9.6	1.04	0.47	148	1310
R-D	4196	31.7	10.6	2.26	1.92	34	5895

\*Regiones más desarrolladas (R+D): Europa, CEI (la antigua URSS), Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia y Nueva Zelanda; regiones menos desarrolladas (R-D): todas las demás áreas.

Fuente: Para todos los datos, excepto población de 1992 y tiempo de duplicación, U.N. (1991b); población de 1992 y tiempo de duplicación tomados de PRB (1992).

**TABLA 2-2 DATOS DE POBLACIÓN MUNDIAL**

	Población (millones) (1992)	Nacimientos anuales por cada 1,000 habitantes (1980-1985)	Muertes anuales por cada 1,000 habitantes (1980-1985)	Tasa de crecimiento (%) (1950-1985)	Tasa de crecimiento estimada* (%) (1985-2010)	Tiempo de duplicación (años) (1992)	Población estimada (millones) (2010)
Mundial	5420	27.6	10.4	1.9	1.61	41	7204
Norteamérica	287	15.6	8.5	1.39	0.7	89	311
Canadá	(27)	15.2	7.1	1.87	0.75	89	(30)
Estados Unidos	(256)	15.7	8.6	1.34	0.7	89	(281)
Europa	511	13.4	10.5	0.7	0.21	338	516
CEI (antigua URSS)	284	19.1	10.5	1.29	0.69	104	327
África	654	45.3	16.4	2.55	2.93	23	1148
Asia	3207	28.4	9.7	2.1	1.65	39	4240
Latinoamérica	453	30.6	7.9	2.61	1.83	34	629
Oceanía	28	20	8.2	1.96	1.29	57	34

Fuente: Para todos los datos, excepto población de 1992 y tiempo de duplicación, U.N. (1991b); población de 1992 y tiempo de duplicación tomados de PRB (1992).

\*ONU, variante media.

La tendencia poblacional actual muestra una ligera disminución en la tasa de crecimiento en las R - Dy, en consecuencia, en la población mundial. Sin embargo, serán necesarios algunos años para determinar si esta reducción será duradera y afectará la tasa de crecimiento mundial estimada de 1.6% (1985-2010).

### 2.2.3 Parámetros de población

Algunos parámetros de población de uso más frecuente son:

**Estructura de edades** se refiere a la distribución de edades de la población.

**Pirámide de población** es una representación gráfica de la distribución de edades y sexos en la cual la población masculina se grafica en el lado negativo (izquierdo) del eje horizontal, en tanto la femenina se muestra al lado opuesto. Las cifras se indican como porcentaje de la población total correspondiente a cada grupo de edad.

**Fertilidad** es el número anual de nacimientos vivos en una población.

**Tasa de fertilidad total** es el número de hijos que la mujer media tiene durante su vida.

El **crecimiento de reposición** se da cuando la tasa de fertilidad total es aproximadamente de 2.1.

El **crecimiento de población cero** se produce cuando la tasa de mortalidad es igual a la tasa de natalidad y la migración neta es cero.

La figura 2-4 muestra las *pirámides poblacionales* de México, Estados Unidos y Suecia en 1974. Como se puede ver, en una pirámide típica las edades aparecen en el eje vertical, comenzando por el cero en el origen. La población masculina se grafica del lado negativo (izquierdo) del eje horizontal, en tanto la femenina del lado positivo (derecho). El eje horizontal presenta el porcentaje de la población total para cada edad. Esta escala porcentual, en contraste con la indicación de números totales, facilita la comparación entre países o regiones. La pirámide se compone de 18 barras horizontales, cada una representa intervalos de cinco años.

La pirámide de México, a la izquierda, muestra la estructura de edades de una población en rápido crecimiento. Esta pirámide con lados bastante angostos es típica de una población de gente joven, representada con una base grande. Se produce un rápido crecimiento a medida que los grupos jóvenes alcanzan la edad reproductiva. El caso diametralmente opuesto es Suecia, la pirámide de la derecha, tiene lados casi rectos hasta alcanzar los grupos de mayor edad. La base es casi igual a los rangos de edad que están sobre ella; tanto tiempo sin observar un aumento en las cifras de jóvenes suecos implica que cada generación reproductiva ha estado reponiéndose a sí misma. La pirámide de Suecia es característica de una población sin crecimiento. Por su parte, la de Estados Unidos representa una población con desarrollo intermedio entre México y Suecia. En Estados Unidos hay gran población en los primeros años reproductivos,

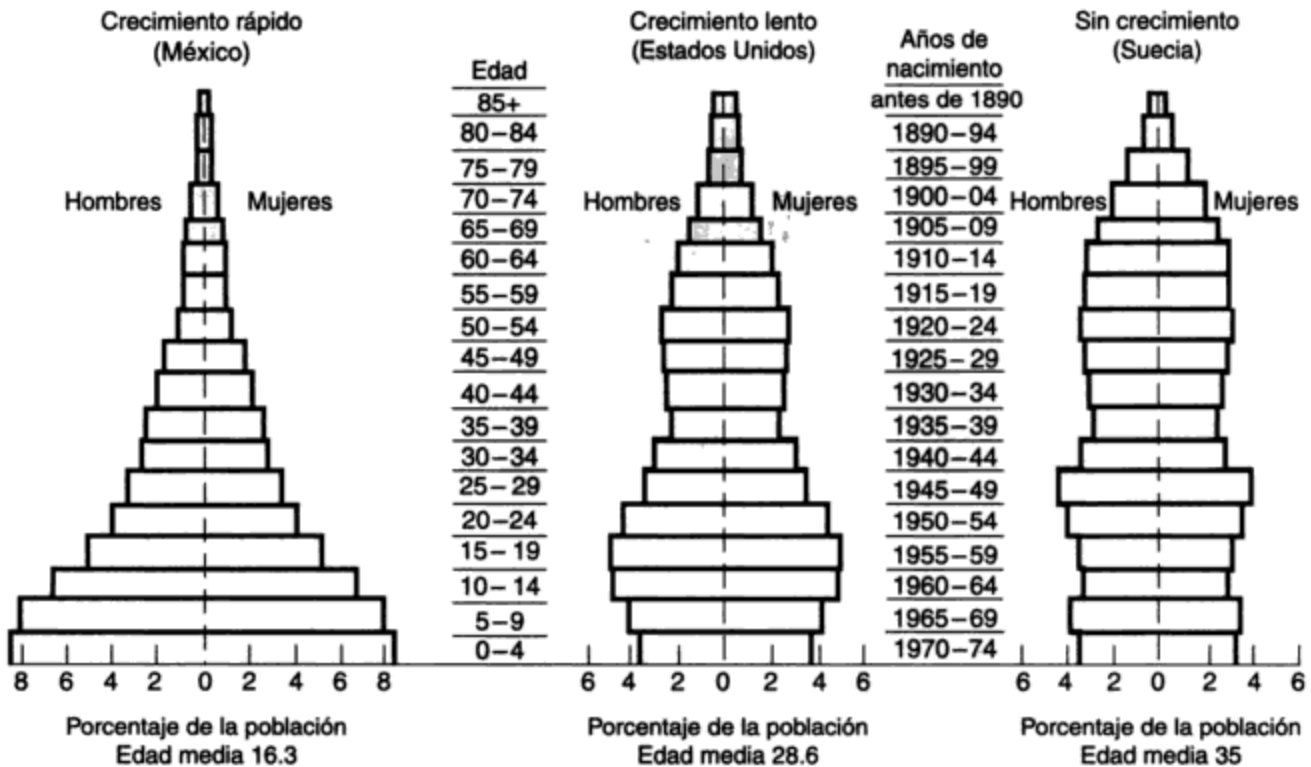
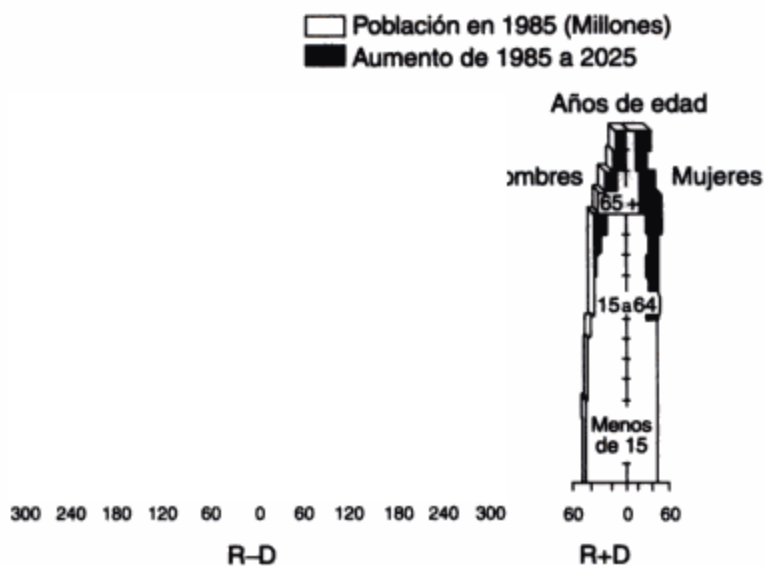


Figura 2-4 Pirámides de población (estructura de edades) para la población de 1974 de México, Estados Unidos y Suecia. Fuente: Zito (1979).

esto es consecuencia del desmesurado nacimiento de niños durante la Segunda Guerra Mundial. A pesar de ello, el tamaño de la base se está encogiendo, con lo cual la pirámide de este país tiende a la típica de una población de crecimiento lento. La figura 2-5 muestra la pirámide de la población mundial en 1985 y en 2025, separando las R+D de las R -D. Esta gráfica pone en relieve el crecimiento desproporcionado entre ambas regiones y las implicaciones en cuanto a presiones sociales, económicas y ambientales en las R-D.

La *fertilidad* es una medida que representa el número de nacimientos vivos anuales en una población, en tanto que la *tasa de fertilidad total* es el número de hijos que la mujer media tiene durante su vida. En Estados Unidos esta última tasa era de aproximadamente siete hace 200 años, y ha decaído de manera constante a más o menos dos en la actualidad. La tabla 2-3 muestra las tasas de fertilidad total para algunos países y regiones del mundo.

El *crecimiento de reposición* se presenta a una tasa de fertilidad de 2.1 aproximadamente. Podría pensarse que si cada pareja tiene dos hijos, simplemente están reponiéndose a sí mismas y por ende no habrá crecimiento de la población. Sin embargo, no es así por dos razones. Primera, para la mayor parte de los países la distribución de edades es tal que es mayor el número de personas que están entrando a la etapa reproductiva que las que están saliendo de ella. Aunque la tasa de fertilidad total, es decir el número promedio de hijos por cada mujer, fuese exactamente dos, habría más mujeres en edad fértil que antes; por tanto, la población continuaría creciendo varias generaciones. Segunda, el crecimiento de reposición implica el nacimiento de más de dos hijos por mujer, pues algunas morirán antes de alcanzar sus años reproductivos, y otras no tendrán hijos ya sea por decisión propia o incapacidad



**Figura 2-5** Composición por edad y género de la población mundial, 1985 y 2025.  
Fuente: PRB (1988).

**TABLA 2-3** TASAS DE FERTILIDAD TOTAL  
PARA UNA SELECCIÓN DE PAÍSES  
Y REGIONES

País/región	Tasa de fertilidad total, 1992
<b>Total mundial</b>	3.3
Regiones más desarrolladas	1.9
Regiones menos desarrolladas	3.8
<b>África</b>	6.1
<b>Asia oriental</b>	2.1
China	2.2
Japón	1.5
<b>Sur de Asia</b>	3.4
Indonesia	3.0
Filipinas	4.1
<b>Latinoamérica</b>	3.4
Haití	6.0
República Dominicana	3.6
<b>Norteamérica</b>	2.0
Canadá	1.8
Estados Unidos	2.0
<b>Europa</b>	1.6
Suecia	2.1
Alemania	1.4
<b>CEI (antigua URSS)</b>	2.2
<b>Oceanía</b>	2.6

Fuente: PRB (1992).

para ello, además de que el porcentaje de hijas es ligeramente menor que el de hijos. El número exacto que se requiere para un crecimiento de reposición varía de un país a otro dependiendo de la distribución en las edades de los niños y del porcentaje en cada uno de los sexos. Con la tabla 2-3 se puede ver que Estados Unidos, Canadá, Alemania y Japón están por debajo del crecimiento de reposición; la CEI se acerca a él, y Haití, Indonesia y la mayoría de los Estados africanos lo superan.

El *crecimiento de población cero* es un término que con frecuencia se entiende mal. Sin considerar la inmigración y emigración, este crecimiento se produce cuando la tasa de mortalidad es igual a la tasa de natalidad. Por las razones anteriores, crecimiento de reposición no significa crecimiento cero de la población, salvo cuando se hayan dado tasas de crecimiento de reposición por largo tiempo.

#### 2.2.4 Proyecciones de población y métodos

Los ingenieros y científicos se valen de proyecciones poblacionales para diseñar servicios comunitarios, regionales o nacionales, y para controlar los impactos ambientales futuros en los cuales el crecimiento de la población habrá de jugar un papel importante. El tiempo para hacer estimaciones puede ser de corto plazo (máximo 10 años) para los servicios que se pueden ampliar con relativa facilidad al final del periodo, o de largo plazo (máximo 50 años) para aquellos que sería muy costoso duplicar o ampliar en un futuro cercano.

Ambas proyecciones poblacionales dependen en alto grado de los registros del pasado y de la exactitud de las predicciones del crecimiento futuro de la actividad comercial e industrial de una región, la cual puede tener un efecto importante en la migración neta a la región. Muchos otros factores difíciles de evaluar pueden tener una importante influencia en el crecimiento de la población y en las proyecciones de largo plazo. Algunos de ellos son la actitud de las personas hacia el hecho de procrear hijos, las condiciones económicas, las guerras, los desastres naturales, los desarrollos tecnológicos y la actitud de los gobiernos. La "ciencia" de la proyección poblacional aun hoy requiere el uso intenso de una bola de cristal. No obstante, los planificadores de población han aprendido mucho en años recientes, y los ingenieros pueden recurrir a ellos para obtener los mejores pronósticos posibles para los proyectos sujetos a consideración. En casi todas las comunidades y regiones de la Unión Americana la oficina del comisionado local de planificación proporciona esta información. Sin embargo, es importante que los ingenieros conozcan un poco acerca de los datos y los supuestos que están atrás de los pronósticos a fin de estimar la posibilidad de fluctuaciones en las predicciones. Las proyecciones se presentan como dos o más estimaciones alternativas, como proyecciones altas, medianas y bajas. Es sensato tratarlas con precaución e incorporar en el diseño de los servicios la flexibilidad para hacer cambios en caso de que el crecimiento real sea considerablemente mayor o menor que las proyecciones previas.

**Métodos gráficos.** Se hacen proyecciones gráficas de estadísticas poblacionales pasadas para estimar la población futura. Éstas se pueden hacer por simple representación gráfica, por extensión aritmética o geométrica, o por líneas de regresión de mínimos cuadrados. A veces es útil servirse de curvas de crecimiento de comunidades similares, aunque

más grandes, para hacer comparaciones al elaborar la extensión gráfica. Los métodos gráficos son simples de usar y fáciles de aplicar; sin embargo, los resultados de los diferentes estimadores pueden variar, de acuerdo con la experiencia de las personas que hacen la proyección.

**Métodos matemáticos.** Para los métodos matemáticos, se supone que el crecimiento de la población se ajusta a una relación numérica. El crecimiento puede ser aritmético o exponencial, o seguir una de las múltiples formulaciones matemáticas que se han propuesto para diversas situaciones. Un método común consiste en utilizar una expresión que describe, como se muestra en la figura 2-6, una curva en forma de "S".

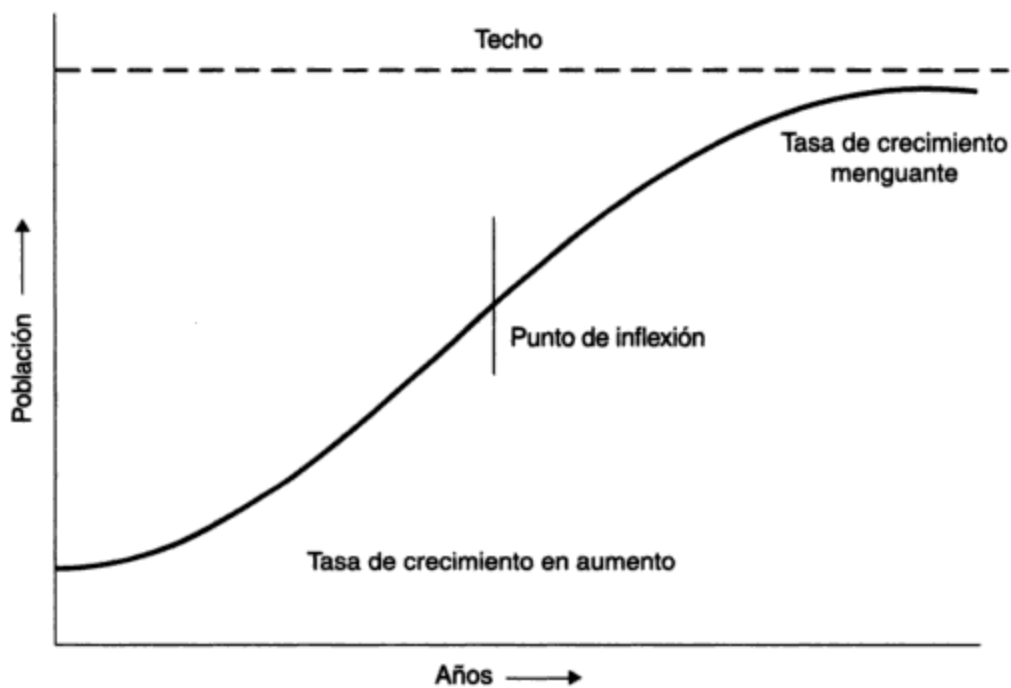


Figura 2-6 Curva de crecimiento poblacional con forma de S.

**Método de componentes.** El método de componentes para proyección es el más complejo de los tres, pero generalmente produce una imagen muy detallada de las características y cifras futuras de una población. Las tendencias de fertilidad y mortalidad se toman en cuenta en esta proyección dividiendo la base de población en edad y género (casi siempre agrupamientos de cinco años), y aplicando después a cada grupo las tasas de fertilidad y mortalidad específicas. Los efectos de la inmigración y la emigración se pueden calcular también bajo el supuesto de un número futuro de migrantes. Éstos posteriormente se deben subdividir en componentes de edad y género para que los supuestos apropiados de fertilidad y mortalidad también sean aplicables a ellos.

La elección del método para proyectar la población suele depender de la precisión, o falta de la misma, de los datos históricos de población. Cuando sólo se dispone de cifras totales y no



existe información sobre tasas de natalidad o mortalidad o sobre tasas de inmigración y emigración, una proyección gráfica o matemática sencilla es la única opción. En cambio, cuando los datos disponibles son suficientes, se puede emplear el método de componentes, incluido el uso de una computadora refinada. Un análisis más detallado de las proyecciones de población queda fuera del alcance de este libro. Sin embargo, *Demographic Techniques* (Pellard et al., 1974) es un buen libro que trata sobre este tema.

**Ejemplo 2.1**

Estime la población de la ciudad de Waterville en el año 2000 con base en los datos históricos de población proyectados más allá de 1983.

Año	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1983
Población a la mitad del año	10,240	12,150	18,430	26,210	22,480	32,410	45,050	51,200	54,030	54,800

La ciudad ha intentado activamente incrementar su crecimiento industrial, pero ha tenido sólo un éxito limitado a lo largo de los últimos 10 años.

**Solución** Se elabora una gráfica con los datos históricos de población (figura 2-7). Puesto que sólo se dispone de las poblaciones reales de los censos (periodos de 10 años), se pueden conectar los puntos suponiendo un cambio lineal entre cada censo. Es posible especular acerca de las razones de algunos de los cambios con base en la experiencia en otras partes: el descenso de población durante la Gran Depresión de la década de 1930 probablemente porque la gente se mudó a otra parte por falta de empleo; el rápido crecimiento en los periodos de auge durante la guerra y la posguerra (años cuarenta y cincuenta); y una desaceleración del crecimiento durante la difícil década de 1970. ¿Qué sucede con el periodo que finalizará en el año 2000? El planteamiento del

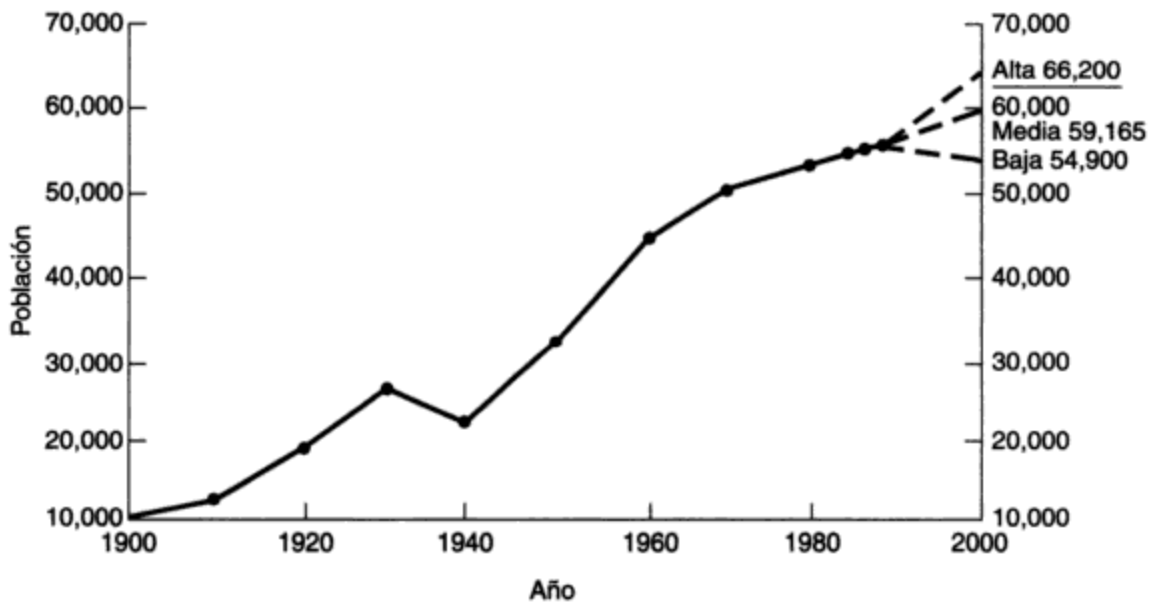


Figura 2-7

problema menciona de manera específica los intentos recientes, con éxito limitado, de atraer industrias. ¿Será la década de los ochenta una repetición de lo ocurrido en los 30? ¿Tendrá éxito la campaña para crear más empleos a través de nuevas industrias? La tasa de crecimiento en los años venideros, ¿podrá ser tan alta como lo fue durante el periodo de rápido crecimiento de 1940 a 1960?

Sin más información específica de la ciudad y la región, no es posible responder puntualmente estas preguntas. De hecho nadie puede, aun con información extensa, hacer más que una conjetura informada con ciertas bases. Lo mejor que podemos hacer son las proyecciones siguientes.

- *Proyección alta.* Suponga que las actuales tasas de crecimiento se mantendrán por 5 años, seguidas de una tasa creciente de alrededor de dos tercios de la tasa máxima de crecimiento experimentada previamente hasta el año 2000.

$$(1980 - 1983) = \frac{54,800 - 54,030}{3} = 257 \text{ por año}$$

$$(1950 - 1960) = \frac{45,050 - 32,410}{10} = 1,264 \text{ por año}$$

$$\begin{aligned} \text{Población alta en el año 2000} &= 54,800 + 5 \times 257 + 12 \times \frac{2}{3} \times 1,264 \\ &= 54,800 + 1,285 + 10,112 = 66,187 = 66,200 \end{aligned}$$

- *Proyección mediana.* Las actuales tasas de crecimiento se mantendrán los próximos 17 años.

$$\text{Población mediana en el año 2000} = 54,800 + 17 \times 257 = 59,165$$

- *Proyección baja.* Habrá un descenso de población de 100 habitantes por año en los próximos 5 años, seguido de un crecimiento lento a un ritmo de 50 anuales. El fuerte descenso de la década de 1930 no se repetirá en virtud de la existencia de programas de asistencia social que permitirán conservar a las personas desempleadas en la comunidad.

$$\text{Población baja en el año 2000} = 54,800 - 5 \times 100 + 12 \times 50 = 54,900$$

Así pues, el orden estimado de crecimiento de la población es de

	un valor alto de 66,200
la población actual de 54,800 a	un valor mediano de 59,165
	un valor bajo de 54,900

o un intervalo de 11,300, equivalente a más o menos el 20% del tamaño de la población actual. En términos de obras que caerían dentro del ámbito del ingeniero municipal, este intervalo de población se traduce más o menos en lo siguiente:

- 3,300 unidades de vivienda
- 20 millas (32 km) de nuevos caminos
- 20 millas (32 km) de conductos de desagüe y tubería maestra
- Extensiones a la planta de tratamiento de aguas
- Extensiones a la planta de tratamiento de residuos
- Extensiones al hospital

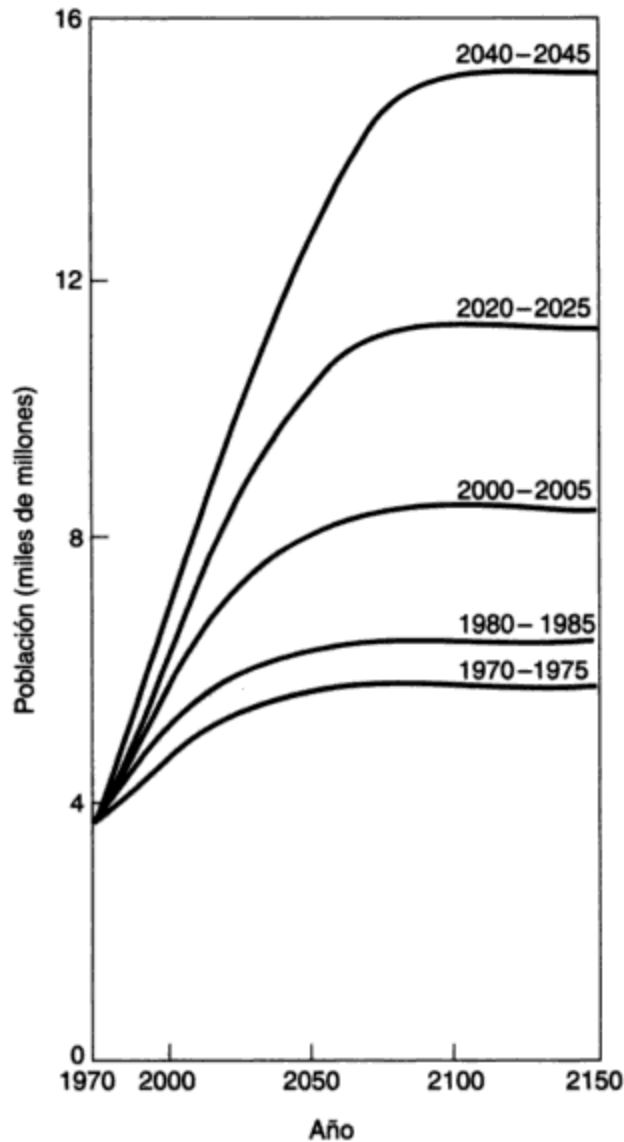
- Una nueva escuela de educación media
- Varias escuelas públicas nuevas
- Un centro comercial regional
- Varios centros comerciales de vecindario
- Tres nuevas estaciones de bomberos
- Dos nuevas bibliotecas

Lo más importante es que el crecimiento o la falta del mismo tendrá importantes efectos financieros en los ingresos de la comunidad para gastos de capital y gastos de operación y mantenimiento. Por consiguiente, lo que parece ser una pequeña extensión de la esquina superior derecha de la gráfica de población tiene consecuencias muy importantes para el futuro de la localidad.

### **2.2.5 Ímpetu del crecimiento de la población mundial**

La presentación de ciertas proyecciones de la población mundial hechas por T. Frejka en 1973, y que invitan a la reflexión, constituye un digno final para el estudio del material referente al crecimiento de la población. Las proyecciones de Frejka corresponden a diversos supuestos en relación con el año en el que se alcanzaría un nivel mundial de fertilidad de reposición. Como se muestra en la figura 2-8, las dos proyecciones más bajas se basan en alcanzarlo a principios de la década de los 70 o durante los 80, con una estabilización de la población mundial en 5,700 millones o 6,500 millones, respectivamente, alrededor de 100 años después. En la actualidad es evidente que estas dos proyecciones más bajas serán sobrepasadas. La razón de esto es que, en tanto que la necesidad de restringir la tasa de natalidad parece obvia para el planificador social, el crecimiento de la población ha sido fomentado por actitudes sociales que tenían validez en el pasado y que, en ciertas partes del mundo, aún están vigentes. Hace doscientos años se esperaba que una mujer tuviera de cuatro a siete hijos para asegurar la supervivencia de la comunidad, ya que la mitad de esos hijos morirían antes de alcanzar la fertilidad, y muchas mujeres perecían al dar a luz. A pesar que la tasa de mortalidad comenzó a descender, estos patrones de crianza de niños no cambiaron de inmediato. De hecho, se habla de un tiempo reciente cuando las actitudes sociales comenzaron a cambiar. Además, la falta de legislación para la asistencia social en los países en desarrollo influye en las actitudes sociales hacia el hecho de tener hijos: en un país donde pocas personas pueden contar con que recibirán una pensión, la gente espera de sus hijos sostén y cobijo en la vejez.

La proyección más alta de Frejka muestra, para el año 2040, una población mundial próxima a 15,100 millones una vez alcanzada la fertilidad de reposición. Puesto que el crecimiento mundial parece estar desacelerándose, es concebible un nivel de fertilidad de reposición para el año 2000 o 2010. Así pues, la proyección de Frejka entre las líneas de los años 2000 a 2005 y 2020 a 2025 parece la más probable, aunque daría por resultado una población mundial estabilizada en alrededor de 10,000 millones. Esta información tiene implicaciones pasmosas: en menos de 100 años habrá alrededor de dos veces más personas en el mundo en proporción a las que hay en la actualidad. La tarea de alimentarlas, vestir las y darles empleo será monumental.



**Figura 2-8** Ímpetu del crecimiento de la población mundial. Fuente: T. Frejka, "The Prospects for a Stationary World Population," *Scientific American*, marzo de 1973.

### 2.3 INDUSTRIALIZACIÓN

Para la mayoría de la gente, la palabra *industrialización* tiene una conexión histórica con la Revolución Industrial de los siglos XVIII y XIX. Sin embargo, se trata de un fenómeno continuo, que actualmente se extiende por el planeta y afecta a muchas de las regiones menos desarrolladas. La industrialización trae consigo niveles de vida más altos; se trata de una meta que persiguen todas las naciones.

La Revolución Industrial se inició en Gran Bretaña en el siglo XVIII. Este fenómeno se distinguió por numerosas invenciones tecnológicas que incluyeron, entre las más notables, la máquina para hilar y el motor de vapor. Oficios tan tradicionales como la costura, la molienda

de harina, la elaboración de cerveza y la fabricación de calzado se transformaron en tareas mecanizadas. El principal avance fue la conversión termodinámica de energía calorífica en energía cinética. Esto permitió secar minas por bombeo, transportar carbón y minerales a lo largo de grandes distancias, y la operación de máquinas para muchas tareas con independencia casi total de la energía motriz proveniente de personas o animales.

En último término, el beneficio de la Revolución Industrial para el individuo fue un mayor nivel de vida proporcionado por salarios más altos que generaron mayor poder adquisitivo. Esto trajo como consecuencia que la gente demandara más productos, lo cual causó un incremento en el consumo de recursos y la producción de más efluentes de las fábricas por vía aérea y acuática. La industrialización se aceleró también en las naciones más desarrolladas por la explotación de la mano de obra barata, las tierras y los recursos de las regiones menos desarrolladas del mundo.

### 2.3.1 Medidas de crecimiento económico e industrialización

El indicador económico del nivel de vida de un país que más se utiliza es el producto nacional bruto (PNB).

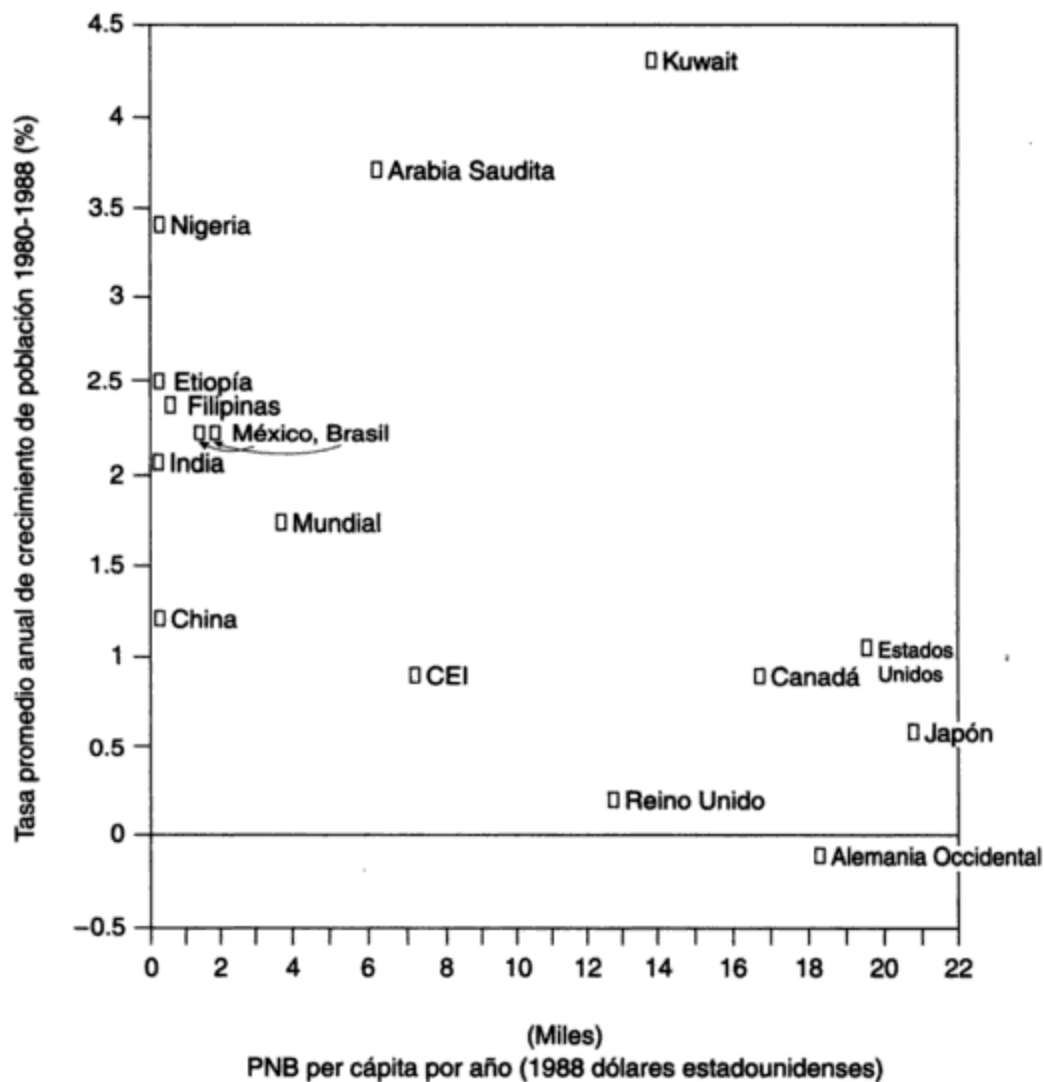
**Producto nacional bruto (PNB)** es la suma de todos los gastos personales y gubernamentales en bienes y servicios dentro de un país, e incluye el valor de las exportaciones netas.

**Mejoramiento ambiental bruto (MAB)** es un componente del PNB que incluye los costos de las mejoras ambientales, por ejemplo el dinero que se gasta en reforestación o en medidas de control de la contaminación.

Es importante reconocer lo que el PNB implica y lo que no. El PNB no refleja por sí mismo la salud y el bienestar económicos de un país, ni muestra la distribución de la riqueza en una nación. Asimismo, no revela si los bienes y servicios consumidos benefician o perjudican al ambiente, ni indica el grado de agotamiento de los recursos naturales. Tan sólo se calcula el valor monetario de todos los bienes y servicios, de tal forma que se obtiene la estadística económica única, bastante utilizada y muy útil, pero que proporciona una imagen incompleta. Varias personas han argumentado en favor de la inclusión del agotamiento de los recursos y los daños ambientales en un indicador económico. El economista John Hardesty (Treshow, 1976, pág. 288) afirma que en las sociedades tecnológicas modernas algunos componentes del PNB se pueden vincular de alguna manera con la destrucción ambiental, y que un PNB alto probablemente implique una tasa alta de agotamiento de los recursos. Un ejemplo citado por Hardesty es la industria automotriz estadounidense, la cual representa cerca del 10% del PNB. Una mayor producción de automóviles ayuda a mantener un PNB en crecimiento, pero también incrementa la generación de residuos derivados de la producción de acero, gases tóxicos emitidos por los motores de gasolina, la degradación adicional de nuestros paisajes producto de las carreteras, los lotes de estacionamiento y los cementerios de automóviles. En respuesta a la necesidad de correlacionar

en forma cuantitativa el PNB con los daños al ambiente y el agotamiento de los recursos se han sugerido varias alternativas. Entre éstas es notable la estadística conocida como mejoramiento ambiental bruto (MAB). Otras propuestas que incluyen efectos ambientales no han sido afinadas al grado de poder utilizarse en lugar del PNB o de manera conjunta.

La brecha de crecimiento económico entre las naciones ricas de las regiones más desarrolladas y los países pobres de las regiones con menor desarrollo se hace evidente si expresamos el PNB per cápita. La figura 2-9 ilustra lo anterior en diversas regiones del mundo, y está correlacionado con la tasa de crecimiento de la población. Un alto PNB per cápita en un país entevé un gran número de autos, alta producción de acero, alimentos en abundancia, buenas viviendas, etcétera. Significa también que el combustible, esto es, los recursos naturales



**Figura 2-9** Tasa promedio anual de crecimiento de población contra PNB per cápita para una selección de países. Fuente: Adaptado de World Bank (1989), "Gross National Product" y "Population and Growth Rates".

propios y los de otros países que los proveen, se están agotando y que los productos de desecho de la producción industrial (contaminantes del aire, el agua y el suelo) crearán problemas ambientales. Así pues, desde un punto de vista ambiental, una persona que habita en un país con un PNB alto puede crear una presión sobre el ambiente y los recursos equivalente a la que quizás causan cientos de individuos en un país con un PNB bajo. En este sentido las estadísticas sobre el PNB permiten hacer comparaciones entre países y que pueden ser útiles para determinar las presiones relativas sobre el ambiente y los recursos: los beneficios y comodidades de un alto nivel de vida en los países desarrollados se pueden traducir, mediante el uso de estadísticas de PNB per cápita, como daños ambientales potenciales y agotamiento de los recursos.

Sin embargo, hacer comparaciones directas de datos de PNB per cápita entre países y regiones con características muy diferentes nos puede llevar a conclusiones falsas: considerar que una persona de un país desarrollado y urbanizado que presenta una cifra de \$10,000 per cápita está en condiciones diez veces mejores que una persona de un país subdesarrollado y rural con una cifra de \$1,000 per cápita es, desde luego, un error. Las necesidades de los ciudadanos no son las mismas que las de los habitantes de zonas rurales; ellos proveen la mayor parte de sus alimentos, vestido y combustible con sus propias manos, y por tanto estos productos no se incluyen en el PNB.

La producción de acero también ha sido reconocida como índice del desarrollo industrial. El proceso descubierto por Henry Bessemer para convertir los lingotes de hierro en acero sometiendo a combustión las impurezas mediante la introducción de aire a la carga fue fundamental para la Revolución Industrial. Antes de esto, el hierro se fundía tostando el mineral sobre coque. Con el advenimiento del acero se hizo posible la construcción de vías férreas, barcos, puentes y maquinaria pesada que antes tenía grandes limitaciones a causa de las insuficiencias estructurales del hierro.

La producción mundial de acero aumentó de manera espectacular, de 0.5 millones de toneladas en 1870 a 28 millones en 1900. En 1988, la producción mundial de acero fue, aproximadamente, de 780 millones de toneladas métricas. La tabla 2-4 muestra una clasificación de los 16 países con mayor producción de acero en 1988. Adviértase que, con excepción de tres países, China, India y Brasil, todas son naciones desarrolladas. No es sorprendente ver que en 1988 la CEI y Estados Unidos encabezaron la lista junto con Japón. Sin embargo, en años recientes la tasa de crecimiento de la producción de acero en los países desarrollados ha descendido, en tanto ha aumentado bruscamente en ciertos países menos desarrollados, lo cual es un indicio de la difusión de la industrialización a las regiones de menor desarrollo.

La tasa anual de crecimiento de la industria pone de relieve el hecho de que la industrialización se está extendiendo. Este índice abarca las industrias minera, manufacturera, de la construcción, eléctrica y de los gases. El efecto multiplicador o de onda expansiva de la industrialización queda incluido en este índice porque, para calcularlo, se toman en cuenta variables como la existencia de mano de obra, la disponibilidad de materias primas y la infraestructura de soporte, como el transporte por carretera, vías férreas o aire. Puesto que estas variables están relacionadas con la población, el consumo y la contaminación, el índice sirve como una medida indirecta del incremento anual de la degradación ambiental. En años recientes el índice anual de crecimiento de la industria ha sido alto en los países menos desarro-

**TABLA 2-4 LOS DIECISÉIS PAÍSES PRODUCTORES DE ACERO MÁS GRANDES, 1988**

Posición <sup>a</sup>		País	Producción de acero <sup>a</sup> (millones de toneladas métricas)		Participación de la producción mundial <sup>a</sup> (%)	
1	(1)	CEI <sup>b</sup> (antigua URSS)	164.0	(151.0)	21.0	(21.2)
2	(3)	Japón	105.7	(102.1)	13.6	(14.3)
3	(2)	Estados Unidos	90.6	(124.3)	11.6	(17.5)
4	(5)	China	59.0	(31.0)	7.6	(4.4)
5	(4)	Alemania Occidental	41.0	(41.2)	5.3	(5.8)
6	(13)	Brasil	24.6	(12.2)	3.2	(1.7)
7	(6)	Italia	23.7	(24.3)	3.0	(3.4)
8	(22)	Corea del Sur	19.1	(5.0)	2.5	(0.7)
9	(8)	Reino Unido	19.0	(20.3)	2.4	(2.8)
10	(7)	Francia	19.0	(22.8)	2.4	(3.2)
11	(9)	Polonia	17.0	(19.5)	2.2	(2.7)
12	(11)	República Checa/Eslovaquia	15.4	(15.4)	2.0	(2.2)
13	(12)	Canadá	15.1	(14.9)	1.9	(2.1)
14	(14)	Rumania	15.0	(11.6)	1.9	(1.6)
15	(10)	Bélgica/Luxemburgo	14.9	(17.4)	1.9	(2.4)
16	(16)	India	14.2	(9.5)	1.8	(1.3)
		Total mundial	779.8	(711.8)		

<sup>a</sup>Cifras para 1978, entre paréntesis para comparar.

<sup>b</sup>CEI: Comunidad de Estados Independientes formada en 1991 con 11 de 12 Repúblicas Soviéticas.

Fuente: AISI (1978, 1988).

llados, con un valor entre 4.5 y 7.2%. Las naciones más desarrolladas alcanzaron un promedio de 3.2%. La razón de la diferencia radica en que las naciones más desarrolladas, al contar con bases empresariales grandes y bien establecidas, han alcanzado una meseta en su crecimiento industrial.

Las estadísticas del crecimiento de la producción de acero se han proporcionado tan sólo como una medida de la industrialización. Se podrían citar muchas otras, como las estadísticas en relación con el aluminio, el cemento, los materiales de construcción, los plásticos, los fertilizantes, la maquinaria agrícola, los automóviles y los aviones. Las estadísticas de este tipo son proporcionadas por organizaciones nacionales e internacionales anualmente, o con pocos años de diferencia. En términos generales estos datos confirman que los aumentos en la producción industrial en el mundo se han originado con especial rapidez en los países más desarrollados durante las dos o tres décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, y recientemente en algunos de los países menos desarrollados.

Los países desarrollados han intentado transmitir las lecciones aprendidas al no tomar en cuenta los efectos ambientales. No obstante, las naciones en vías de desarrollo suelen estar sujetas a severas restricciones financieras y no es sorprendente que estos consejos se pasen por alto. Para los países más pobres y sobrepoblados el crecimiento industrial, junto con el empleo y el mayor PNB resultantes, es más importante que la protección del ambiente. Por consiguiente, es de esperar que el daño ambiental aumente en las regiones menos desarrolladas a medida que la población se incremente y se produzca un crecimiento económico.



### 2.3.2 Tecnología de producción

En el periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial se experimentó un crecimiento sin precedentes en la economía de la mayor parte de los países más desarrollados, en particular Estados Unidos, Japón y la antigua Alemania Occidental. En Estados Unidos este crecimiento se ha producido en muchos sectores de la economía: en la agricultura y la silvicultura, la manufactura, las comunicaciones, los transportes, las industrias de recursos y otros. Se fabricaron en gran escala nuevos productos: televisores, aparatos estereofónicos, acondicionadores de aire, detergentes, vehículos para la nieve, plásticos, computadoras, microcomputadoras, artículos elaborados con fibras sintéticas, fertilizantes artificiales e insecticidas. Algunos de ellos sustituyeron artículos menos eficaces, no tan durables o más costosos. Por ejemplo, los detergentes reemplazaron a los jabones, las fibras sintéticas tomaron el lugar de la lana y el algodón, en tanto los fertilizantes artificiales sustituyeron la composta y los desperdicios animales. Posteriormente se observó que los nuevos productos y los desperdicios derivados de ellos resultaban muy perjudiciales para el ambiente. Son numerosos los ejemplos que ilustran este punto. Barry Commoner, el eminente ecologista estadounidense, los comenta en su libro *The Closing Circle* (1972):

- El uso de plaguicidas, en particular el DDT, para controlar los insectos y aumentar así la producción agrícola, ha tenido efectos colaterales muy serios en la vida silvestre y los seres humanos. Por ello hace pocos años se prohibió el uso del DDT en ciertos países.
- La concentración de ganado en terrenos pequeños, nutridos con alimentos artificiales para obtener una alta productividad, dio como resultado el nacimiento de “industrias agrícolas”. Los criaderos para pollos, los asaderos, o los comederos para cerdos y reses, pueden producir mayor cantidad de residuos orgánicos que domésticos. A causa de la escasez de tierra, los residuos que antes se depositaban en ella ahora suelen descargarse en los ríos sin tratamiento alguno, o manejados de manera deficiente, contribuyendo en gran medida a la contaminación del agua.
- El uso intensivo de fertilizantes sintéticos, en particular los nitrogenados, ha incrementado los niveles de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas; estos compuestos producen en los infantes metahemoglobinemia, o enfermedad de los “bebés azules”. El problema de la eutroficación de los lagos es otro efecto colateral del uso excesivo de fertilizantes sintéticos.
- La producción de sustancias químicas orgánicas, utilizadas como materia prima para elaborar fibras sintéticas, plaguicidas, detergentes, plásticos y caucho artificial, ha aumentado en alto grado. Puesto que el uso de cloro es frecuente en estos procesos, su producción se ha incrementado también de manera notable, y esto ha requerido una mayor producción de mercurio, pues este metal se emplea para producir cloro. La creciente liberación de mercurio en aguas superficiales ha dado origen, a través de la cadena alimenticia, a elevadas concentraciones de mercurio en los peces, y consecuentemente envenenamiento en las personas que con frecuencia ingieren pescado. Además, los productos sintéticos requieren mucha energía para su producción, y la generación de ésta contribuye a aumentar aún más las presiones ambientales.
- El enorme incremento en el número de automóviles (y hasta hace poco tiempo de automóviles de gran potencia), junto con el cambio en el transporte de mercancía de trenes a camiones, han hecho crecer de manera significativa los problemas de contaminación del aire.
- La introducción de botellas no retornables y latas ha contribuido a aumentar el problema de eliminación de desechos sólidos y a incrementar la generación de basura.

- El empaquetado de alimentos, así como de otros tipos de embalaje, ha generado grandes cantidades de residuos sólidos que es necesario recolectar y eliminar.
- El enorme incremento en la producción de energía eléctrica ha dado origen a una fuente creciente de problemas de contaminación. Las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y de diversos óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) de las plantas de energía eléctrica contribuyen de manera importante a generar la lluvia ácida. Las emisiones radiactivas potenciales derivadas de la operación de las plantas de energía nuclear, junto con la eliminación de desechos radiactivos de bajo y alto nivel y las descargas de agua de enfriamiento a alta temperatura, constituyen otros problemas ambientales.

Se podrían citar muchos otros casos. Una de las preguntas al final de este capítulo demandará al estudiante la elaboración de un estudio de caso específico. En suma, está claro que a partir de la Segunda Guerra Mundial la fabricación y el uso excesivo de nuevos productos son, en gran medida, la causa del incremento de las perturbaciones ambientales evidentes en muchos de los países altamente industrializados. Estas perturbaciones superan con creces las que son explicables en términos de aumentos de población y crecimiento económico por sí solos.

## 2.4 URBANIZACIÓN

El término *urbanización* se refiere a un aumento en la proporción de población urbana con respecto a la rural. Históricamente, es posible que las semillas de la urbanización se hayan sembrado hace mucho tiempo, entre el 7000 y el 5000 a.C., en lo que se denomina la Revolución Agrícola. De manera gradual, los cazadores nómadas y los recolectores de alimentos de aquella época se asentaron en número cada vez mayor para domesticar animales y cultivar alimentos. El resultado de esta transición fue la creación de un excedente de alimentos que liberó a las personas del duro trabajo de labrar la tierra. Pronto se generó división y especialización del trabajo en este grupo recién surgido de población no agrícola. A partir de estos primitivos desarrollos sociales, la comunidad creó estructuras sociales complejas e interrelacionadas que hoy podemos reconocer como ciudades. Las primeras ciudades surgieron a lo largo de los ríos Tigris y Éufrates entre 4000 y 3000 a.C., en lo que hoy es Irak. Los factores ambientales desempeñaron un papel primordial en el desarrollo de estas primeras ciudades. Para el cultivo se necesitaban cerca terrenos llanos con suelos ricos. Existía la necesidad de un fácil acceso al solar y debía haber agua disponible. Los lechos de inundación del Tigris y del Éufrates, así como los de los ríos Nilo e Indo, eran ideales para estos propósitos. Esta primera urbanización dio origen a la destrucción de bosques en el Medio Oriente para proveer de madera y combustible a las ciudades; posiblemente éste fue el primer impacto ambiental, y sin duda uno de los más desastrosos de la historia. La inestabilidad resultante del suelo, la desertificación consiguiente, y finalmente la pérdida de tierras productivas fueron las consecuencias trágicas que todavía sufre esta región.

Sin embargo, fue en el siglo XVIII cuando la urbanización se aceleró de verdad. La urbanización limitada que había tenido lugar antes de ese momento se debió casi por completo a la migración (de personas que ya no eran necesarias para la agricultura) desde las áreas rurales a los pueblos. El incentivo para el crecimiento urbano en los últimos 200 años ha sido el desarrollo tecnológico, que ha estimulado la industrialización y aumentado la demanda de mano de obra en las ciudades.

### 2.4.1 Definición de urbanización

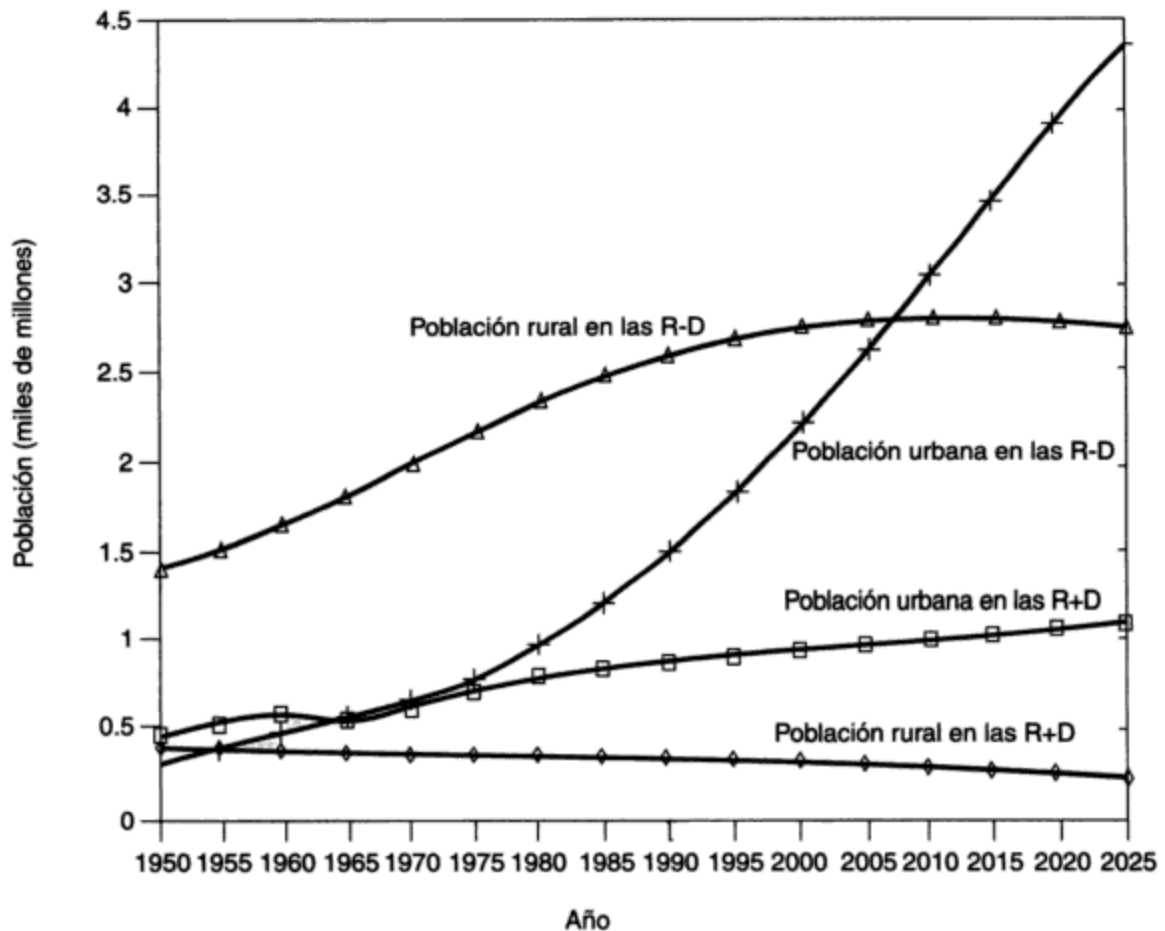
Es difícil comparar estadísticas de tendencias y tasas de urbanización en diversos países. El problema surge en función de las múltiples definiciones de urbanización. Ciertos países hacen la distinción entre áreas urbanas y rurales por el tamaño de la comunidad. Pero, ¿en qué punto una concentración de personas se convierte en urbana? ¿Cinco mil? ¿Diez mil? ¿Cien mil? Lo que se define como urbano en un país puede ser rural en otro. Por ejemplo, las áreas con un mínimo de 400 habitantes se designan como urbanas en Albania, en tanto que en Japón el límite inferior es de 50,000 habitantes. En otros países la condición urbana se asigna con base en la densidad. En Suecia, las áreas urbanas son las construidas con menos de 200 m entre cada casa; en la India se refiere a los lugares con una densidad mayor a 1,000 personas por kilómetro cuadrado, donde al menos tres cuartas partes de la población masculina adulta está empleada en trabajos no agrícolas. Otros países definen las áreas urbanas en términos del alcance de las características urbanas, como el número de plazas o escuelas, o incluso la disponibilidad de servicios de alcantarillado, electricidad o suministro de agua. Algunos países clasifican las áreas urbanas por el tipo y alcance del control administrativo que se ejerce en ellas.

Las múltiples definiciones de áreas urbanas, consecuencia de diferencias históricas, culturales y administrativas entre las naciones, dificultan el discernimiento de un patrón común. Con mayor frecuencia, se toma una población de 20,000 como el tamaño mínimo para que un área se designe como urbana. Es éste el criterio que se utiliza en el presente libro.

**Situación actual.** El acelerado crecimiento urbano de la segunda mitad del siglo XX ha sido un fenómeno global. Este incremento ha sido más notorio en las regiones menos desarrolladas del planeta y se ha producido a una tasa de 4% o más durante el periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial. En las regiones más desarrolladas, y durante el mismo periodo, la urbanización alcanzó un promedio de 2%, que es más o menos la mitad de la tasa de crecimiento de la población en las R-D. Aunque la tasa de crecimiento de la población en las R+D ha estado disminuyendo, la proporción urbana ha crecido del 55 al 70% de la población total. Gran parte de este aumento se debe a la disminución que ha existido de la población rural que se va de las áreas rurales a las urbanas, más que a la llegada de nuevos inmigrantes a las ciudades.

El crecimiento extremadamente rápido de la población urbana en las R-D en comparación con las R+D se aprecia con claridad en la figura 2-10. En 1950 las R+D tenían alrededor de 60% más población urbana que las R-D, pero para 1990 la población urbana en las R-D era casi el doble que en las R+D (1,500 millones contra 875 millones; figura 2-10). Las proyecciones de la ONU sugieren que para el año 2025 las R-D tendrán más de 4,000 millones de pobladores urbanos, en comparación con 1,100 millones de las R+D. Obsérvese en la figura que las tasas de crecimiento de la población han estado disminuyendo en las áreas rurales de las R+D durante algún tiempo, en tanto que la misma tendencia apenas se inicia en las R-D.

La tendencia hacia una mayor urbanización tendrá repercusiones importantes tanto para las regiones más desarrolladas como para las de menor desarrollo. Si la tasa de crecimiento económico de un país no excede la tasa de crecimiento de población urbana, las condiciones



**Figura 2-10** Población urbana y rural en las regiones más y menos desarrolladas. Fuente: ONU (1990, 1991a).

de vida en las ciudades de esa nación no mejorarán. Por otra parte, si la economía no sigue el ritmo del crecimiento urbano, la implicación puede ser que la mayor parte de los recursos se consumirán para sostener a la población urbana y quedarán pocos, si es que acaso quedan, para la economía rural. La producción agrícola por agricultor tendrá que aumentar para aprovisionar al número creciente de habitantes urbanos y a la población rural en descenso o de crecimiento más lento.

#### 2.4.2 Crecimiento de las ciudades

Una de las características actuales de la urbanización es la tendencia hacia el “gigantismo urbano”. Se ha estimado que en el periodo de 1950 a 1975 las ciudades con 5 millones de habitantes o más casi duplicaron su participación de la población urbana total, en tanto las ciudades con menos de 100,000 habitantes perdieron importancia relativa. Esta tendencia se refleja en la tabla 2-5. También se manifiesta en esta tabla la tendencia hacia el gigantismo urbano en muchas de las regiones menos desarrolladas. Por ejemplo, se ha proyectado un aumento en el porcentaje de habitantes urbanos de las R-D que viven en ciudades de más de 5 millones, de 2.2% en 1950 a 23.5% para el año 2000. Estadísticas similares para las R+D muestran un salto de 9%

en 1950 a sólo 16.4% en el año 2000. Por consiguiente, en las R-D ciudades como la de México, São Paulo y Shanghai pronto tendrán poblaciones mucho mayores que ciudades como Tokio y Nueva York de las R+D. Con el propósito de ilustrar mejor este punto, la tabla 2-6 rastrea el historial de población reciente con proyecciones al año 2000 para algunas ciudades grandes. París y Londres, las grandes ciudades históricas, en 1990 salieron de la lista de las 12 ciudades más grandes del mundo.

**TABLA 2-5 PORCENTAJE ESTIMADO DE POBLACIÓN URBANA, CLASIFICADAS POR TAMAÑO DE CIUDAD EN 1950, 1975 Y PROYECCIÓN AL 2000**

	Mundial			R+D			R-D		
	1950	1975	2000	1950	1975	2000	1950	1975	2000
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Más de 5 millones	6.6	12.6	20.9	9.0	14.2	16.4	2.2	10.9	23.5
De 2 a 5 millones	10.2	10.4	13.0	10.5	8.9	13.3	9.5	11.8	12.9
De 1 a 2 millones	7.8	9.5	10.0	8.6	10.1	10.3	6.5	8.9	9.9
De 500,000 a 1 millón	9.6	9.9	8.9	9.1	10.0	9.3	10.6	9.8	8.6
De 200,000 a 500,000	11.8	12.7	10.7	11.6	12.5	11.5	12.1	12.9	10.2
De 100,000 a 200,000	8.6	8.0	6.6	8.2	8.0	7.1	9.3	8.1	6.3
Otras poblaciones urbanas	45.4	36.9	29.9	43.0	36.3	32.1	49.8	37.6	28.5

Fuente: ONU (1979).

**TABLA 2-6 POSICIÓN Y POBLACIÓN (MILLONES) DE UNA SELECCIÓN DE CIUDADES, 1960-2000**

Ciudad	1960		1970		1980		1990		2000 <sup>a</sup>	
	Pos.	Pobl.	Pos.	Pobl.	Pos.	Pobl.	Pos.	Pobl.	Pos.	Pobl.
Ciudad de México	13	5.4	4	9.4	3	14.5	1	20.2	1	25.6
Tokio	2	10.7	2	14.9	1	16.9	2	18.1	3	19.0
São Paulo	15	4.7	10	8.1	4	12.1	3	17.4	2	22.1
Nueva York	1	14.2	1	16.2	2	15.6	4	16.2	5	16.8
Shanghai	4	8.8	3	11.2	5	11.7	5	13.4	4	17.0
Los Ángeles	7	6.5	7	8.4	7	9.5	6	11.9	9	13.9
Calcuta	12	5.5	14	6.9	8	9.0	7	11.8	6	15.7
Buenos Aires	6	6.8	6	8.4	6	9.9	8	11.5	12	12.9
Bombay	17	4.1	16	5.8	15	8.1	9	11.2	7	15.4
Seúl	30 <sup>a</sup>		19	5.3	13	8.3	10	11.0	15	12.7
Beijing	9	6.3	9	8.1	9	9.0	11	10.8	8	14.0
Río de Janeiro	14	4.9	13	7.0	10	8.8	12	10.7	16	12.5

<sup>a</sup>Población estimada.

Fuente: ONU (1990, 1991a).

La densidad mundial en 1976 era de 20 personas por kilómetro cuadrado. Esta cifra no parece muy alta, pero no toma en cuenta la tendencia humana a reunirse en grupos: las ciudades. Sólo el 30% del suelo del planeta es potencialmente arable. El resto, en las montañas,

las áreas gélidas, los desiertos y otras zonas estériles, es de poca utilidad para la agricultura. Para todo fin práctico, los suelos arables limitados deben sostener a la creciente población mundial.

En contraste con la baja densidad global, la densidad en las áreas urbanas puede ser mayor en dos órdenes de magnitud. Por ejemplo, la densidad de Hong Kong es de más de 6,000 personas por kilómetro cuadrado. Los problemas de suministro de agua, eliminación de desperdicios, vivienda y transporte que crean estas densidades tan altas son apabullantes.

## 2.5 IMPACTO AMBIENTAL

Es importante reconocer los efectos que la urbanización y la industrialización tienen en el ambiente. La matriz de impactos ambientales proporciona un inventario y una presentación convenientes de estos efectos. El trabajo pionero en esta área fue obra de Leopold *et al.* (1971), y ha sido reseñado por Munn (1979). En las tablas 2-7 y 2-8 se ilustran las matrices de impactos de la urbanización y la industrialización. El eje horizontal enumera diversos aspectos de la urbanización o la industrialización, en tanto que el eje vertical contiene los componentes del ambiente: la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera, los impactos humanos, y otros, según corresponde. Los elementos de la matriz identifican interacciones potenciales entre cada actividad y cada característica ambiental. De esta manera, se pueden considerar preguntas acerca de cada elemento de la matriz. Por ejemplo, ¿afecta la industria minera la calidad del aire? (Respuesta: sí, por la materia particulada que se desprende de las operaciones a cielo abierto, y las emisiones de gases y partículas derivadas del procesamiento.) La técnica de matrices asegura que se formule la mayor cantidad de preguntas. Si un efecto no se considera, es porque se ignora su existencia, no por olvido.

Los impactos identificados se pueden clasificar entonces como graves, moderados, leves o nulos; también se puede utilizar un esquema numérico. La clasificación es en último término subjetiva, y de preferencia debe estar a cargo de varias personas que influyan en la opinión de las demás, con la esperanza de que surja un consenso imparcial e informado. Suele poner un énfasis especial en los cambios ambientales que son irreversibles, como las perturbaciones graves del terreno, la extinción de especies raras o en peligro, o la contaminación generalizada.

Los impactos ambientales de la *urbanización* son múltiples y muy variados (tabla 2-7). El efecto atmosférico predominante de la urbanización es la alteración de la química atmosférica por la liberación de cantidades masivas de CO<sub>2</sub>, óxidos de azufre, nitrógeno, polvo, materia particulada y sustancias químicas tóxicas. Las fuentes de estos contaminantes son diversas: la industria, casi todas las formas de transporte, la calefacción de los edificios, los incineradores municipales, las obras para tratamiento de aguas negras, las quemaduras al aire libre y los rellenos sanitarios. Sobre los centros urbanos se produce un calentamiento significativo de masas de aire como resultado de la reirradiación de superficies que absorben calor, como caminos, estacionamientos y techos, todo esto además del calor que desprenden los sistemas de combustión y las industrias. La combustión de hidrocarburos, en particular los que se utilizan en el sector del transporte, da origen al smog fotoquímico, generado por la interacción de diversos productos secundarios del proceso de combustión y la energía de la radiación solar.

TABLA 2-7 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA URBANIZACIÓN

Componente ambiental	Componente urbano			
	Población (número y densidad)	Uso del suelo	Transporte	Servicios
Atmósfera	Creciente liberación de dióxido de carbono, menor producción de oxígeno conforme las colonias vegetales son destruidas por las áreas urbanas en expansión	Temperaturas medias más elevadas en la mayor parte de las áreas urbanizadas	Contaminación del aire por quema de combustibles Creación de esmog fotoquímico Emisión de plomo por ciertos motores	Partículas, emanaciones nocivas de incineradores, rellenos sanitarios, obras de tratamiento de aguas negras, etcétera
Hidrosfera	Mayor demanda de recursos acuíferos (tanto de superficie como del subsuelo)	Uso intensivo de recursos hidrológicos que causa una carga de contaminación mayor	Aguas pluviales y superficiales contaminadas con plomo Patrones de drenaje alterados por la infraestructura	Lixiviados de contaminantes de los rellenos sanitarios Descargas de las salidas del alcantarillado Contaminación proveniente de barcos
Litosfera	Incremento en la transformación de tierras agrícolas o no utilizadas y deshabitadas para usos urbanos	Cambios completos debido a construcción, enjardinado, etcétera	Destrucción o desfiguramiento del paisaje, etcétera	El relleno sanitario para los desperdicios urbanos y la instalación y reparación de servicios alteran el paisaje
Impactos humanos	Impactos psicológicos de la vida en zonas de alta densidad	Impactos psicológicos	Niveles de ruido más altos Efectos del ruido y la contaminación del aire en la salud	

El impacto de la urbanización en la hidrosfera es grave a causa de los grandes volúmenes de agua pura que es necesario suministrar y la magnitud proporcional de agua contaminada que es preciso eliminar. Las aguas pluviales también tienen un impacto. Aunque es posible que las cantidades totales de aporte pluvial no se alteren de forma significativa, la rapidez y las características del desagüe pueden causar daños o inconvenientes. La rapidez con la que el agua escurre de un camino o un estacionamiento pavimentados, o de un techo liso inclinado, es considerablemente mayor que la rapidez con la que desaloja un área rural o boscosa (como un campo de golf o un parque). En consecuencia, el agua se puede acumular con rapidez en un sistema urbano de drenaje y, si se produce un desbordamiento, podrían ocurrir daños extensos por inundación. Más aún, estas aguas pluviales suelen estar contaminadas con sustancias químicas o partículas adsorbidas o absorbidas durante la precipitación, o con materiales de tipo aceitoso arrastrados de las calles y estacionamientos. La degradación de los recursos acuíferos por el agua pluvial es un problema en casi todos los medios urbanos. Otro contribuyente potencial de la contaminación de la hidrosfera es el drenaje, llamado *lixiviado* o *percolado*, que procede de los rellenos sanitarios para residuos municipales sólidos o de desechos tóxicos y peligrosos.

Con base en una inspección visual del ambiente urbano, uno concluiría que la litosfera es la parte del ambiente alterada en mayor medida por la urbanización. El estado original del ambiente parece haber cambiado de manera irreparable. Las elevaciones de la superficie han

sido modificadas, los ríos desviados y las tierras bajas excavadas para crear bahías o rellenadas para levantar construcciones. En muchas ciudades la "orilla del agua" ha sido desplazada más adentro del lago para facilitar el desarrollo y la expansión de la industria, el transporte y las instalaciones recreativas. De hecho, la construcción de edificios y caminos ha reformado el carácter de muchas regiones. Los ecosistemas nativos se han reemplazado por patrones urbanos. La circulación del aire ha sido alterada (en una escala local) por la presencia de edificios altos y chimeneas. El transporte, tanto público como privado, es el causante de una variación considerable del paisaje en virtud de la construcción de caminos, vías férreas, estacionamientos, aeropuertos, bahías e instalaciones para almacenamiento y embarque. La provisión de servicios municipales como torres de agua, estaciones de bombeo, depósitos, rellenos sanitarios y otras estructuras determinan algunos de los cambios que se observan en el ambiente urbano.

Los impactos humanos de la urbanización tienden a ser difíciles de definir y evaluar. Los efectos del ruido y de la contaminación del aire y del agua sobre la salud, las tensiones psicológicas causadas por la alta densidad, así como un medio con un "ritmo" relativamente rápido no se cuantifican con facilidad. Varios efectos no son especialmente nocivos en los contactos aislados, pero la exposición prolongada a la inhalación de concentraciones bajas de plomo, por ejemplo, puede ser un problema serio. Los impactos psicológicos son los menos comprendidos y, en consecuencia, los más difíciles de evaluar. No obstante, pocas personas estarían dispuestas a negar la existencia de estas tensiones.

Establecer los impactos de la *industrialización* tiende a ser un poco más fácil que con los de la urbanización, ya que el foco de atención es un grupo más pequeño de intereses. La tabla 2-8, que presenta los impactos ambientales de grupos selectos de industrias, está organizada de manera similar a la tabla 2-7, la cual muestra los efectos de la urbanización. Aunque la tabla se explica por sí misma en grado razonable, puede ser útil una breve revisión, y como ejemplo analizaremos la industria minera.

El impacto de la industria minera en el ambiente es considerable. La explotación al aire libre y el transporte de los minerales aportan materia particulada a la atmósfera. El procesamiento (fundición, tostación, etc.) de los minerales metálicos aporta, según el material que se procesa, óxidos de azufre y de nitrógeno a la atmósfera. Diversas emisiones gaseosas pueden ser nocivas, tóxicas, o en el caso de los óxidos, precursoras de lluvia ácida.

El drenaje en el que se vierten los desechos de las minas puede arrastrar materiales peligrosos hacia recursos acuíferos de superficie o subterráneos cercanos. En ocasiones, los residuos de proceso se descargan directamente al cuerpo de agua receptor, deteriorando la calidad del agua y afectando la vida acuática. Los impactos más patentes de la minería en la litosfera son: (1) los residuos derivados de la descarga de desechos y desperdicios de proceso directamente en el suelo, y (2) el trastorno de muchas actividades, como la agricultura, la silvicultura y la recreación, en particular a causa de la explotación a cielo abierto y la cantería.

El impacto de la industria minera en la salud y el bienestar humanos es objeto de debate. Sin embargo, los efectos adversos de la exposición continua de los mineros a minerales como el carbón (que causa la enfermedad del pulmón negro) y el asbesto (que causa asbestosis) han sido establecidos más allá de toda duda. La contaminación por ruido causada por operaciones de explotación de minas o canteras cerca de áreas habitadas también puede tener efectos negativos en la salud y el bienestar de la población local.



TABLA 2-8 IMPACTOS AMBIENTALES DE GRUPOS SELECTOS DE INDUSTRIAS

Consecuencias ambientales	Componente industrial					
	Petroquímica	Metales	Alimentos/bebidas	Minería	Agricultura	Pulpa y papel
Atmósfera	Emissiones a la atmósfera de plantas de refinación y procesamiento (nocivas, tóxicas)	Emissiones de partículas y gases durante la forja, labrado y fabricación	Emissiones nocivas del procesamiento de alimentos	Partículas de materia derivadas de la explotación superficial y el transporte Emissiones nocivas y tóxicas de la fundición	Arrastre de rocíos agrícolas Escape de polvo y polen por operaciones en los campos	Desperdicios de fabricación emissiones nocivas durante el procesamiento
Hidrosfera	Emissiones de plantas a cuerpos de agua receptores	Descarga de licores de talleres limpiadores de metales Otras descargas de residuos en cuerpos de agua Liberación de metales pesados (intencional, no intencional)	Los desperdicios suelen tener un alto contenido orgánico	Desagüe de desechos de minas Residuos de procesamiento descargados directamente en cuerpos de agua	Escurremientoficial y percolado de plaguicidas y fertilizantes a aguas subterráneas Azolvado de cuerpos de agua por prácticas agrícolas deficientes	Desperdicios de fabricación contaminados (mercurio, sustancias orgánicas) Acarreo fluvial de pendientes deforestadas Pérdida de hábitats de vida silvestre
Litosfera	Eliminación de sólidos y lodos de desecho en rellenos de tierras Derrames accidentales durante el transporte y almacenamiento	Eliminación de escoria y productos de desecho del procesamiento		Descarga de desechos de minas y residuos de procesamiento Trastorno de la agricultura, la silvicultura y la recreación por minas a cielo abierto	Erosión de la superficie del suelo Agotamiento de material orgánico, microorganismos necesarios del suelo, etcétera	Degradación del ecosistema en áreas desmontadas Erosión de tierras no protegidas
Impactos humanos	Ciertos productos y desperdicios tóxicos para muchas formas de vida Perturbación del estilo de vida por emissiones a las tres esferas	Efectos en la salud de los tóxicos liberados en aire y agua		Peligro para la salud de los mineros (mercurio, asbesto, explotación de carbón)	Peligro para la salud por pescado y mariscos contaminados con mercurio.	Peligro para la salud por pescado y mariscos contaminados con mercurio

## 2.6 EL DILEMA DE LA INDUSTRIALIZACIÓN Y LA URBANIZACIÓN

La industrialización y la urbanización son fenómenos mundiales. Un número creciente de personas están habitando en ciudades cada vez más grandes. Estas comunidades de alta densidad poblacional plantean un reto especial en cuanto al aprovisionamiento de agua potable, aire limpio, eliminación de desperdicios, transporte y espacio recreativo. La comunicación moderna ha transformado el mundo en una aldea global y ha elevado las expectativas de la mayoría de nosotros respecto a una vida mejor. Se requerirá un enorme ingenio, diplomacia y determinación de parte de los líderes mundiales y de quienes los ayudan (científicos, ingenieros, abogados, economistas y gerentes) para dirigir el desarrollo a lo largo del próximo siglo. Con el objetivo de influir en las políticas gubernamentales relacionadas con estas cuestiones han surgido grupos de presión que generalmente plantean su causa de manera prejuiciada y exagerada. No es sorprendente que aparezcan informes diametralmente opuestos sobre una cuestión ambiental específica. Todos hemos sido testigos de esto en la prensa popular, la radio, la televisión y el campo científico. En ocasiones se dificulta saber a quiénes y qué creer.

Ciertos grupos afirman que el continuo crecimiento económico de las naciones es una meta imposible que, de forma inevitable, llevará al fracaso de la sociedad mundial y al desastre ambiental. Estas personas argumentan que una economía en estado estacionario es una situación futura necesaria y deseable, aunque los tiempos para esto habrán de variar de manera considerable entre las naciones, de acuerdo con su estado actual de desarrollo. Por ejemplo, Daly (1977) afirma que "una economía de consumo de grandes masas al estilo de Estados Unidos, ante una economía dominada por el crecimiento de una población mundial de cuatro mil quinientos millones de personas es imposible. Aún más imposible es el prospecto de un nivel creciente de consumo per cápita para una población mundial en continuo crecimiento". Meadows *et al.* (1972), Schumacher (1973), Ward (1976) y Ward y Dubos (1972) se han ocupado también del controvertido tema del crecimiento limitado.

Por otra parte, prácticamente todos los países están tratando de aumentar su participación en la economía global. Las compañías multinacionales compiten de forma vigorosa por los mercados mundiales. Los países subdesarrollados que intentan industrializarse encuentran que su escala de salarios, mucho más baja, les proporciona una ventaja competitiva respecto a los países desarrollados en ciertos campos. La recesión económica y el desempleo consiguiente tienen un efecto predecible en la perspectiva de los gobiernos respecto al conflicto aparente entre crecimiento económico y protección ambiental. Por desgracia, cuando el problema se presenta de manera simplista como empleos contra ambiente limpio, la presión que se ejerce sobre los políticos para que permitan a la industria "diferir" las medidas de control de la contaminación suele ser irresistible.

Dos informes estadounidenses ponen de relieve la controversia entre las filosofías ambientales de "ruina y pesimismo" y de "las cosas van mejor". El *Global 2000 Report to the President of the United States* (Barney, 1980), encargado por el presidente Carter, fue elaborado en gran medida por dependencias gubernamentales y cuasi gubernamentales. Aunque resulte presuntuoso clasificar un informe de tan grandes dimensiones en una de las categorías mencionadas, pertenece a la de "ruina y pesimismo". Una versión actualizada, titulada originalmente *Global 2000 Revised*, elaborada por un grupo de científicos independientes encabezados

por J. L. Simon y Herman Kahn, estaba en total desacuerdo con varios aspectos de la versión anterior. El informe, que posteriormente se llamó *The Resourceful Earth* (Simon y Kahn, 1985), afirmaba: "si las tendencias actuales continúan, en el año 2000 el mundo estará menos atestado y menos contaminado; en términos ambientales será más estable y menos vulnerable a la perturbación de los recursos y el aprovisionamiento de ellos". Así pues, dos estudios serios sobre el mismo tema llegan a conclusiones muy diferentes.

Uno de los informes más completos sobre los efectos del abuso ambiental en la economía del planeta fue elaborado en tres años por una comisión de 22 miembros de la ONU encabezados por la primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland (Naciones Unidas, 1987). El informe advertía que la contaminación y el uso excesivo de los recursos amenazan con alterar de manera radical tanto el planeta como la vida de muchas especies que lo habitan, entre ellas la humana. El accidente químico de Bhopal (el peor accidente industrial hasta la fecha), la hambruna africana y la muerte anual de aproximadamente 20 millones de niños por enfermedades relacionadas con la desnutrición y agua insalubre para beber fueron algunas de las calamidades señaladas. La predicción para la década de 1990 fue que habría aún más desastres, en particular sequías e inundaciones, que se asocian de la manera más directa con un mal manejo ambiental.

Una advertencia similar fue la que expresó Lester Brown (1987), presidente del Worldwatch Institute, quien señaló que el uso humano del aire, el agua, los suelos, los bosques y otros sistemas que sostienen la vida sobre la Tierra estaba llevando a esos sistemas a cruzar los "umbrales" en los cuales ya no se puede más que causar daños permanentes a la naturaleza. En reconocimiento a la importancia de la protección del ambiente, el Banco Mundial anunció en 1987 que los factores ambientales serían una de las consideraciones primordiales en todas las decisiones futuras de préstamos y políticas bancarias.

Es de esperar que el gran abismo en cuanto a calidad de vida entre las naciones más ricas y las más pobres del planeta se ensanche a causa del aumento de las tasas de crecimiento poblacional en las regiones menos desarrolladas. Las naciones desarrolladas han reconocido la desigual distribución de la riqueza, pero les ha resultado difícil desviar de sus recursos cantidades suficientes para ayudar a los países más pobres, pues ellas mismas encaran problemas de crecimiento económico lento e inflación. Los costos crecientes de los recursos, en particular de la energía, han causado severos problemas económicos a todos los países, pero en especial a los pobres, quienes deben pagar sus importaciones de energía con cualesquiera exportaciones que consiguen hacer. Las tres cuartas partes de la población mundial que ahora residen en las regiones menos desarrolladas aspiran alcanzar el mismo nivel de vida que la cuarta parte que vive en las regiones más desarrolladas, el consumo global de energía y recursos tendría que aumentar aproximadamente diez veces para que eso sucediera. Sin embargo, al considerar las reservas actuales de energía y su valor, es claro que esto es imposible. Además, un aumento de diez veces en el consumo de energía y recursos podría significar también el mismo incremento en la contaminación, el cual sería difícil o (lo que es más probable) imposible de asimilar por el entorno. En último término, el nivel de vida de los países más ricos tendrá que descender para dar cabida a un aumento en el nivel de vida de los países más pobres. ¿Podrá suceder esto por medios pacíficos? Debemos confiar en que se encontrará un medio para ello.

**PROBLEMAS**

- 2.1. Defina o explique los términos siguientes.
- |  |                              |
|--|------------------------------|
| (a) Crecimiento poblacional              | (f) Tasa de fertilidad total |
| (b) Aumento natural de la población      | (g) Estructura de edades     |
| (c) Migración neta                       | (h) Producto nacional bruto  |
| (d) Tasa de crecimiento poblacional cero | (i) Urbano contra rural      |
| (e) Tasa de crecimiento de reposición    | (j) Densidad de población    |
- 2.2. En 1975 un país tenía una población de 10 millones. A lo largo de los últimos 20 años, su tasa anual de nacimientos de 30 por millar y su tasa anual de mortalidad de 14 por millar han sido relativamente constantes. ¿Cuál será la población en el año 2000? ¿Cuál es el tiempo de duplicación de esta población y la tasa de crecimiento anual?
- 2.3. En 1977 Ghana tenía una población de 11.3 millones. En ese año ocurrieron 542,400 nacimientos y 192,100 muertes. Suponga que la migración neta fue cero.
- ¿Cuáles fueron las tasas de natalidad y de mortalidad en ese año?
  - ¿Cuál fue la tasa de aumento natural de la población?
  - ¿Cuál fue el tiempo de duplicación aproximado en años?
  - ¿Cuál será la población en 1997 si esta tasa de crecimiento persiste 20 años?
- 2.4. (a) Explique con palabras o por medio de una ecuación lo que significa crecimiento o decaimiento exponencial.
- (b) Proporcione cinco ejemplos que sigan un crecimiento o decaimiento exponencial.
- 2.5. Obtenga las estadísticas demográficas anuales promedio de su país (estado o provincia) para el periodo más reciente disponible, esto es, la tasa de natalidad, la tasa de mortalidad, la tasa de inmigración y la tasa de emigración. Calcule la tasa promedio de crecimiento anual de la población con base en esta información.
- 2.6. Haga la distinción entre crecimiento poblacional cero y crecimiento de reposición. ¿Cuál es probable que se produzca en los ejemplos de la figura 2-3?
- 2.7. Bosqueje pirámides poblacionales hipotéticas para:
- Una población en rápido crecimiento
  - Una población en descenso
  - Una población estable
  - Una población estable que ha experimentado recientemente importantes bajas por guerra
  - Una población estable que experimenta una inmigración grande reciente de individuos jóvenes
- 2.8. En 1800 un país subdesarrollado tenía una población de 20 millones con tasas anuales de natalidad y mortalidad de 50 y 45 por millar, respectivamente. Esta situación continuó hasta 1900, cuando la tasa de mortalidad se redujo de manera instantánea a 20, pero la tasa de natalidad se mantuvo constante. En 1980 la tasa de natalidad cayó a 30 y la tasa de mortalidad permaneció constante.
- Grafique la población desde 1800 hasta el año 2000.
  - Graficando la tasa de natalidad, la tasa de mortalidad y la tasa de crecimiento en la misma escala de tiempo, muestre el extraordinario aumento de población (llamado *transición demográfica*) que se produjo.
  - ¿Qué condiciones habrían hecho que esto sucediera?
- 2.9. Hace unos 200 años, Robert Malthus, un economista inglés, dijo que como la población aumenta de manera exponencial en tanto las reservas de alimentos aumentan de forma aritmética, muy pronto la población tomará la delantera respecto a los alimentos disponibles y se tendrá que limitar la población para evitar una catástrofe mundial. ¿Por qué no ha sucedido esto?
- 2.10. En el material que se presentó sobre población y crecimiento económico se estableció una distinción entre las regiones más y menos desarrolladas del mundo. En su opinión, ¿por qué se hizo así?

- 2.11. Enuncie y comente las razones por las que la población mundial se va a duplicar por lo menos a lo largo de los próximos 100 años.
- 2.12. Enumere las ventajas y desventajas para un país con (a) una alta tasa de crecimiento de población; (b) una alta tasa de crecimiento económico.
- 2.13. Enumere varios métodos que se han utilizado para controlar el crecimiento de la población. ¿Cuáles estaría usted dispuesto a apoyar en su país, suponiendo que vive en (a) un país con una población estable; (b) un país con una población en rápido crecimiento?
- 2.14. El libro de Meadows *et al.* (1972) causó considerable controversia cuando se publicó. Ahora está disponible en edición rústica (Signet Books, New American Library). Léalo y redacte un ensayo corto sobre su contenido.
- 2.15. Se dice que un estadista occidental planteó el dilema siguiente en relación con el libro de Meadows: "Sé lo que necesito hacer para resolver los problemas que plantea este libro, pero si lo pongo en práctica, seré derrotado en las urnas y reemplazado por alguien que sabe menos acerca del asunto que yo." ¿Cuál es su opinión ante este aparente dilema?
- 2.16. La Revolución Industrial ha producido cambios sociales, económicos y ambientales. Mencione un ejemplo de uno y analice sus consecuencias.
- 2.17. Explique el significado de *urbanización*. Enumere y describa tantas implicaciones ambientales de la urbanización como se le ocurran; cuide que no se hayan mencionado en la tabla 2-7.
- 2.18. Explique cuál es la relación entre el ambiente y el PNB de un país desarrollado.
- 2.19. Elabore un estudio de caso para un producto que haya sido inventado, producido y comercializado en años recientes y que haya causado problemas ambientales significativos. En su opinión, ¿qué se puede y se debe hacer acerca de un producto de esa clase? Utilice el método de matrices para mostrar el impacto ambiental del producto.
- 2.20. Seleccione una industria específica que sea muy importante en su área y elabore una matriz de impacto ambiental para ella. Analice sus hallazgos.
- 2.21. Elabore una matriz de impacto ambiental para el manejo de residuos sólidos municipales bajo los encabezados siguientes: Fuentes; recolección y transporte; procesamiento; eliminación; controles recomendados.
- 2.22. Elabore una matriz ambiental para uno de los siguientes casos:
  - Una tenería o curtiduría en las afueras de una población de 3,000 habitantes
  - Un taller de reparación de automóviles ubicado en el centro de una población
  - Un relleno sanitario para 20,000 personas
  - Una planta de tratamiento de aguas residuales para dar servicio a una población de 100,000 en una ciudad situada a orillas de un lago

## REFERENCIAS

- AISI. *Annual Statistical Report*, 1978. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1978.
- AISI. *Annual Statistical Report*, 1988. Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1988.
- BARNEY, G. O. *The Global 2000 Report to the President of the United States*, vol. 2. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1980.
- BRAMWELL, R. D. *Towns and Cities: Yesterday, Today and Tomorrow*. Agincourt, Ontario: Gage Educational Publishing, 1977.
- BROWN, L. (ed). *State of the World, 1987*. Washington, D.C.: Worldwatch Institute, 1987.
- COMMONER, B. *The Closing Circle*. Nueva York: Bantam, 1972.

- DALY, H. E. *Steady-State Economics*. San Francisco: W. H. Freeman, 1977.
- FREJKA, T. *The Future of Population Growth*. Nueva York: Wiley, 1973.
- LEOPOLD, L. B., CLARKE, F. E., HANSHAW, B. B. y BALSEY, R., Jr. "A Procedure for Evaluating Environmental Impact". *U.S. Geological Survey Circular 645*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1971.
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J. y BEHRENS, W. W. *The Limits to Growth*. Nueva York: Universal Books, 1972; disponible también como Signet Book de la New American Library, 1972.
- Ministry of Industry, Trade and Commerce. *Canada Yearbook*. Ottawa: Ministry of Industry, Trade and Commerce, 1970.
- Ministry of Industry, Trade and Commerce. *Canada Yearbook, 1988/89*. Ottawa: Ministry of Industry, Trade and Commerce, 1989.
- Census 1991*. Ottawa: Ministry of Industry, Trade and Commerce, 1992.
- MUNN, R. E. *Environmental Impact Assessment, Scope 5*. Toronto: Wiley, 1979.
- PELLARD, A. H., YOSUF, F. y POLLARD, G. W. *Demographic Techniques*. Sydney, Australia: Pergamon Press, 1974.
- PRB. Population Reference Bureau, *World Population Data Sheet 1988*. Washington, D.C.: 1988.
- PRB. Population Reference Bureau, *World Population Data Sheet 1992*. Washington, D.C.: 1992.
- SCHUMACHER, E. F. *Small is Beautiful*. Nueva York: Harper & Row, 1973.
- SIMON, J. L. y KAHN, H. *The Resourceful Earth*. Nueva York: Oxford University Press, 1985.
- SUZUKI, D. "Exponential Growth is Merely Another Case of False Worship", *The Toronto Star*, 11, enero de 1986.
- TRESHOW, M. *The Human Environment*. Nueva York: McGraw-Hill, 1976.
- U.N. *Concise Report on the World Population in 1969* (Population Studies, núm. 48). Nueva York: Naciones Unidas, 1971.
- U.N. *Prospects of Population: Methodology and Assumptions* (Population Studies, núm. 63). Nueva York: Naciones Unidas, 1979.
- U.N. *Concise Report on the World Population in 1980* (Population Studies, núm. 78). Nueva York: Naciones Unidas, 1981.
- U.N. World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Londres: Oxford University Press, 1987 (Informe Brundtland).
- U.N. *World Urbanization Prospects, 1990*. Nueva York: Naciones Unidas, 1990.
- U.N. *World Urbanization Prospects, 1991a*. Nueva York: Naciones Unidas, 1991.
- U.N. *World Population Prospects, 1990* (Population Studies, núm. 120). Nueva York: Naciones Unidas, 1991b.
- WARD, B. *Human Settlements: Crisis and Opportunity*. Informe elaborado para Information Canada, Conference on Human Settlement, 1976.
- WARD, B. y DUBOS, R. *Only One Earth*. Nueva York: W. W. Norton, 1972.
- WORLD BANK. *World Bank Atlas*. Washington, D.C.: The World Bank, 1989.
- ZITO, G. V. *Population and its Problems*. Syracuse, N. Y.: Syracuse University, 1979.

## CAPÍTULO 3

---

# Crecimiento de la energía

*O.J.C. Runnalls*  
*Donald Mackay*

Como se indicó en el capítulo 2, la población del planeta y su producción económica continuarán acrecentándose varias décadas más. Se proyecta que el crecimiento, tanto de población como de producto nacional bruto, será mayor para los países menos desarrollados en comparación con los más desarrollados (Barney, 1980). En la actualidad, tres de cada cuatro habitantes de la Tierra viven en los países menos desarrollados, y dos terceras partes de ellos (más de 2,000 millones de personas) dependen de la recolección de madera y desechos agrícolas y animales para proveerse de combustible para cocinar y calentarse (World Bank, 1981).

Es evidente que el mundo encara aumentos considerables en el consumo de energía, en particular en las áreas menos favorecidas donde el crecimiento aún es alto, pero las expectativas individuales de mejoramiento son también comprensiblemente elevadas. La producción de energía trae consigo la consecuencia inevitable de una perturbación ambiental. Ya sea que consideremos la destrucción de bosques para suministrar madera a las personas del mundo en desarrollo, o la contaminación atmosférica que acompaña la generación de electricidad en plantas que usan carbón como combustible, los problemas ambientales crecen a medida que las necesidades de energía aumentan. El propósito de este capítulo es, por consiguiente, examinar la disponibilidad de fuentes de energía en el futuro y los impactos ambientales derivados de una mayor producción de energía.

### 3.1 FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA

Las fuentes de energía primaria disponible para nuestro uso frecuentemente se clasifican como renovables o no renovables. Sin embargo, también se pueden dividir de acuerdo con la descripción propuesta por Putnam (1953), quien utilizó las frases *ingreso energético* y *capital energético*. El *ingreso energético*, o recursos energéticos renovables, comprende aquellos bienes que se renuevan continuamente a causa de la presencia de fuerzas físicas como marea, viento, agua que cae, gradientes térmicos en el océano, calor geotérmico, aportación solar directa, o la generación de materia vegetal y animal. El *capital energético*, o recursos energéticos no renovables, se refiere principalmente a combustibles fósiles depositados en la Tierra hace cientos de millones de años, o a minerales radiactivos que estaban presentes cuando el planeta se formó. Cuando estos materiales se explotan, el capital energético se reduce. En la actualidad los combustibles fósiles se están reponiendo en la naturaleza tan despacio en la escala del desarrollo humano que resulta insignificante. Por tanto, en un sentido práctico el petróleo, el gas natural y el carbón se pueden considerar como no renovables. Los combustibles radiactivos uranio y torón tampoco se están reponiendo. De hecho, en un largo periodo, de miles de millones de años, se están transformando en elementos estables por procesos de desintegración radiactiva. La clasificación de las fuentes de energía actual se muestra en la tabla 3-1.

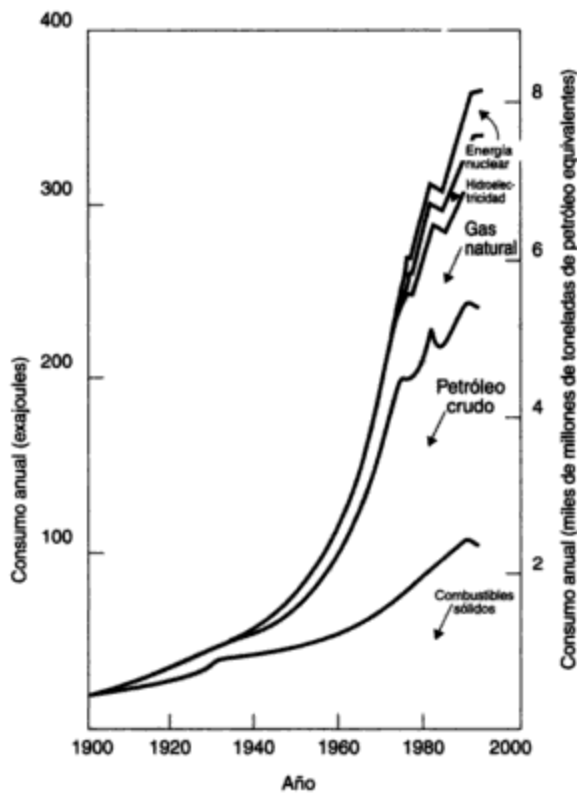
**TABLA 3-1 FUENTES DE ENERGÍA DISPONIBLES**

Renovables (ingreso energético)	No renovables (capital energético)
Energía hidroeléctrica	Petróleo crudo
Mareas	Gas natural
Calor geotérmico	Carbón
Biomasa (madera, desechos animales, materia vegetal, etc.)	Fisión nuclear
Viento	Petróleo sintético (de arenas y esquistos petrolíferos)
Aportación solar	
Calor de los océanos	

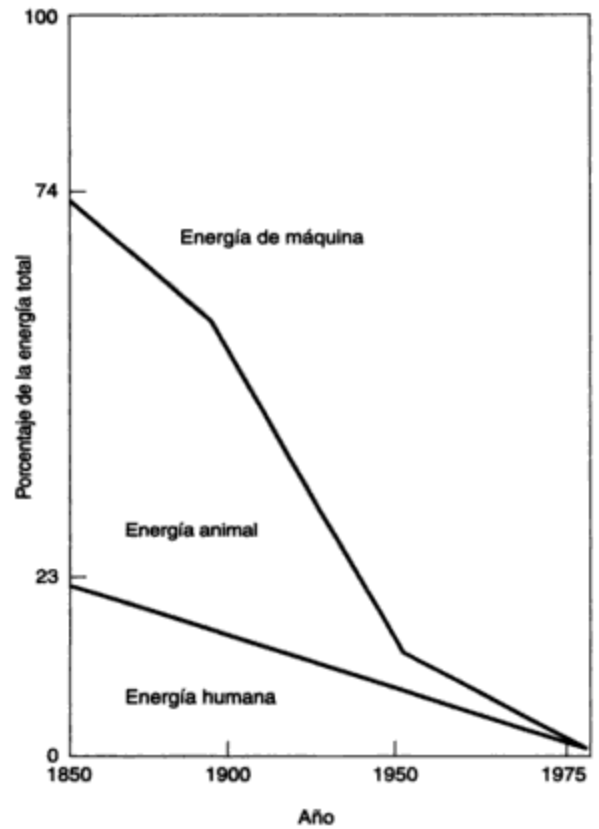
Durante el siglo xx el consumo anual de energía primaria suministrada de forma comercial en el mundo ha aumentado más de diez veces, como se muestra en la figura 3-1. Parte del incremento fue demandado por un crecimiento de aproximadamente 2.5 veces de la población mundial durante ese periodo. Otra parte importante del aumento en el consumo de energía fue consecuencia de una mayor mecanización, en particular en el mundo industrializado. Esto se ilustra en la figura 3-2, donde es fácil apreciar la creciente importancia de la energía de máquina en el siglo xx en uno de los países industrializados, como lo es Estados Unidos.

Como se ilustra en la figura 3-3, la madera sirvió como combustible predominante en el mundo hasta casi el año de 1875, cuando comenzó a ser reemplazada por el carbón. La con-





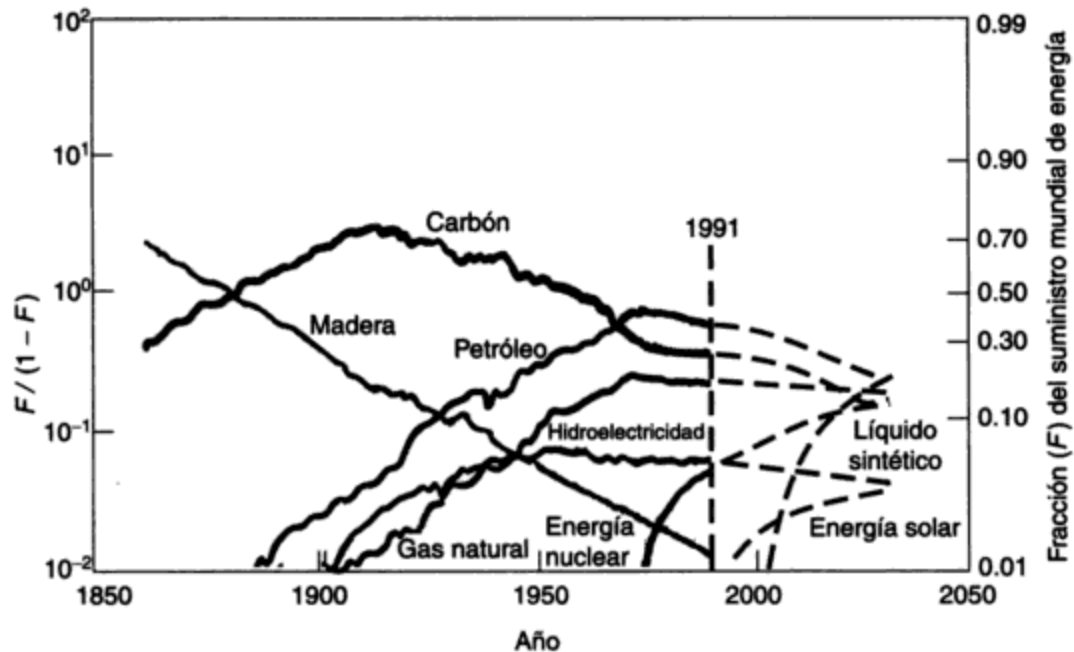
**Figura 3-1** Consumo mundial de energía primaria durante el siglo XX. Fuente: World Energy Conference (1986); British Petroleum (1992).



**Figura 3-2** Crecimiento de la energía de máquina en Estados Unidos desde 1850. Fuente: Wyatt (1978).

tribución porcentual del carbón a la provisión mundial de energía primaria alcanzó su máximo unos 40 años más tarde, cuando su uso comenzó a declinar a medida que el petróleo y el gas natural adquirieron mayor importancia. Actualmente hay quienes piensan que el petróleo ya ha pasado su máximo como contribuyente a la provisión mundial de energía.

El crecimiento de la energía de máquina se ha facilitado durante el siglo XX por el rápido desarrollo de los motores de combustión interna y el suministro de combustible líquido para los mismos por medio de refinados sistemas de transporte, refinación y distribución. El creciente consumo de productos derivados del petróleo ha dado origen a intensivos programas mundiales encaminados a la búsqueda de depósitos de petróleo crudo y gas natural; se han descubierto muchos de ellos en el siglo XX. La mayor parte de los países que tienen a los usuarios principales de estas dos materias primas no cuentan con un suministro doméstico significativo y deben recurrir a otros países para obtenerlos. Este desequilibrio entre suministro y demanda de combustibles líquidos y gaseosos constituye la base de un grave problema de abastecimiento de energía, el cual fue reconocido por primera vez en el mundo en la década de 1970.

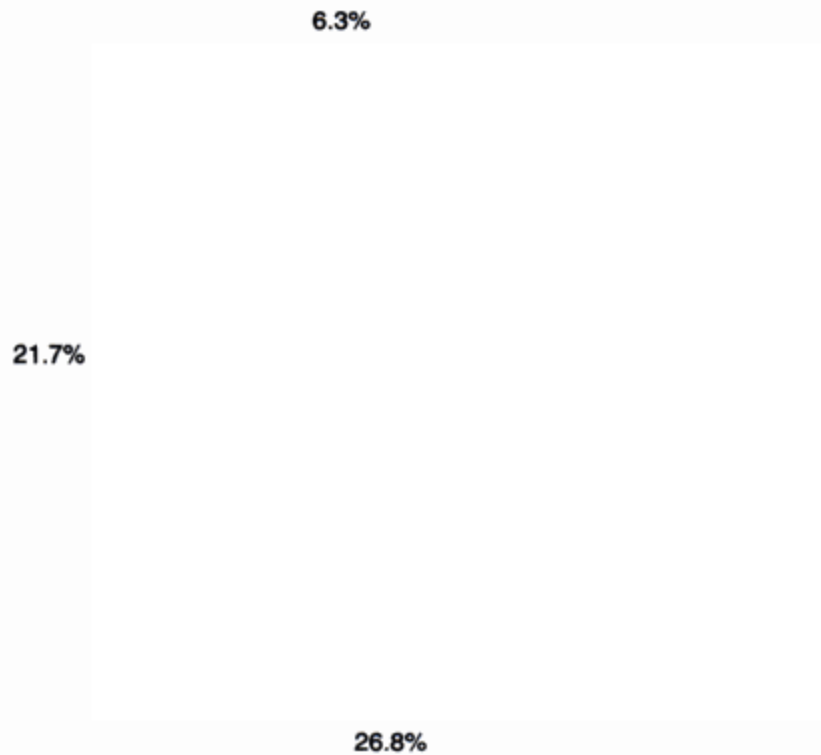


**Figura 3-3** Fuentes de energía en el mundo, 1860-2030. *Fuente:* Hafele, (1981) (derechos reservados en 1981 por el International Institute for Applied Systems Analysis; reproducido con autorización de Ballinger Publishing Company); British Petroleum (1992).

### 3.2 CONSUMO ACTUAL DE ENERGÍA

El consumo anual de energía suministrada comercialmente en el mundo en 1991 fue alrededor de 375 EJ [exajoule =  $10^{18}$  joules (J)] y se subdividió como se muestra en la figura 3-4 (véanse los prefijos SI en la tabla A-1.3 del apéndice A.1). En ciertas industrias se suministran internamente cantidades significativas de energía por combustión de desechos, reciclado de residuos, etcétera, y no se toman en cuenta en el sentido comercial normal. Un buen ejemplo es la industria de productos silvícolas. La energía no comercial desempeña un papel especialmente importante en los países en desarrollo, donde la madera y los residuos animales aún sirven como fuentes fundamentales de calor. En el mundo occidental en 1991 se produjo una cantidad estimada en 35 EJ de energía de generación interna. Por consiguiente, el consumo total de energía en 1991 fue de cerca de 410 EJ. Usando los porcentajes que se incluyen en la figura 3-4, es posible expresar el consumo de energía suministrada comercialmente en 1991 en términos de exajoules, como se muestra en la tabla 3-2. El uso de otras unidades está muy extendido en la literatura, por lo cual suele ser deseable describir la producción de energía en otros términos. Los datos de la tabla 3-3 tienen por objeto facilitar el proceso de conversión. Ahora, si los datos de la tabla 3-2 se expresan en unidades más comunes para cada fuente, se obtienen los resultados que se describen en la tabla 3-4.

Obsérvese en la figura 3-4 que en 1991 más de un tercio de la energía primaria del mundo fue aportada por el petróleo. El enorme consumo de petróleo crudo constituye la raíz del problema energético del planeta. El crecimiento de este apetito en los últimos 26 años se repre-



**Figura 3-4** Consumo mundial de energía suministrada comercialmente, 1991. *Fuente:* British Petroleum (1992).

**TABLA 3-2** CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA SUMINISTRADA COMERCIALMENTE, 1991

Fuente	Porcentaje	Cantidad (EJ)
Petróleo crudo	38.5	144.4
Gas natural	21.7	81.4
Carbón	26.8	100.5
Energía hidroeléctrica	6.7	25.1
Energía nuclear	6.3	23.6
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>375.0</b>

*Fuente:* British Petroleum (1992).

senta, de manera gráfica, en la figura 3-5. Se hace evidente de inmediato que la demanda se ha duplicado en ese periodo. Para satisfacer esa demanda la producción ha aumentado como se muestra en la figura 3-6. Muchos de los consumidores más importantes, principalmente los países industrializados, no poseen cuantiosos depósitos convencionales de petróleo crudo, como se ilustra en la figura 3-7.

Los países de la ex Unión Soviética, que en la actualidad se llaman Comunidad de Estados Independientes (CEI), más Europa oriental y China, colectivamente son autosuficientes en el

TABLA 3-3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y FACTORES DE CONVERSIÓN

Forma de energía	Valor calorífico	
	Unidades SI	Unidades AES
<b>Producción de energía</b>		
Petróleo crudo	38.512 TJ/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	5.803 × 10 <sup>6</sup> Btu/barril
Gas natural	37.229 TJ/10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1.000 × 10 <sup>6</sup> Btu/10 <sup>3</sup> pies <sup>3</sup>
Carbón bituminoso	29.993 TJ/10 <sup>3</sup> toneladas	25.800 × 10 <sup>6</sup> Btu/tonelada corta
Electricidad	(1) <sup>a</sup> 10.5 TJ/GWh (2) <sup>b</sup> 3.6 TJ/GWh	10.000 × 10 <sup>6</sup> Btu/MWh 3.412 × 10 <sup>6</sup> Btu/MWh
<b>Factores de conversión</b>		
Petróleo crudo	1 m <sup>3</sup> = 6.293 barriles 1 L = 0.264 gal 1 barril = 42 gal	
Gas natural	1 m <sup>3</sup> = 35.3 pies <sup>3</sup>	
Carbón	1 tonelada = 1.1023 toneladas cortas = 2204.6 lb	
Energía	1 kJ = 0.948 Btu	

<sup>a</sup>Para cálculos de energía primaria, este valor se adopta para electricidad hidráulica, nuclear y adquirida; es la energía térmica equivalente de una planta quemadora de carbón suponiendo que la eficiencia de conversión es similar.

<sup>b</sup>Para cálculos de energía secundaria, como la conversión de energía eléctrica en energía térmica, o como en el calentamiento por resistencias, se adopta este valor.

TABLA 3-4 CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA SUMINISTRADA COMERCIALMENTE, 1991

Fuente	Cantidad
Petróleo crudo	10.4 × 10 <sup>6</sup> metros cúbicos por día
Gas natural	69.4 billones de pies cúbicos
Carbón	3.6 millones de toneladas
Energía hidroeléctrica	6.7 × 10 <sup>12</sup> kilowatts hora térmicos, 2.2 × 10 <sup>12</sup> kilowatts hora eléctricos
Energía nuclear	6.2 × 10 <sup>12</sup> kilowatts hora térmicos, 2.0 × 10 <sup>12</sup> kilowatts hora eléctricos

suministro de petróleo crudo. Sin embargo, no es éste el caso del mundo occidental. Estados Unidos, por ejemplo, produjo en 1991 sólo el 55% del petróleo que consumió en ese año, no obstante que su producción fue la más alta de cualquier país del mundo. La producción interna de Estados Unidos alcanzó un máximo en 1970 (el 80%), posteriormente fue descendiendo en forma paulatina hasta el nivel de 1991. A finales de 1985, las reservas probadas de petróleo crudo\* en EUA

\*Las reservas probadas se definen como el volumen de petróleo que queda en el subsuelo y que la información geológica y de ingeniería indica es recuperable de depósitos conocidos en las condiciones económicas y de operación existentes.

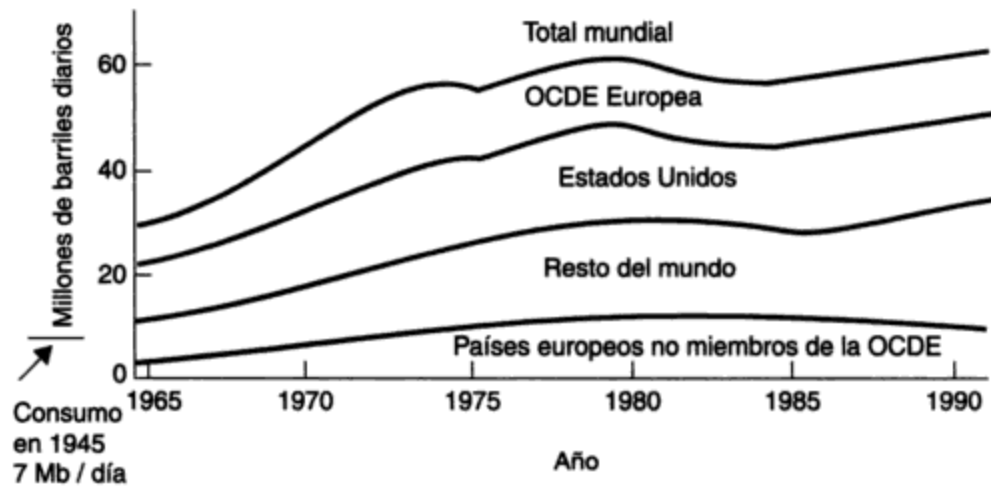


Figura 3-5 Consumo mundial de petróleo crudo, 1965-1991. Fuente: British Petroleum (1992); EMR (1993).

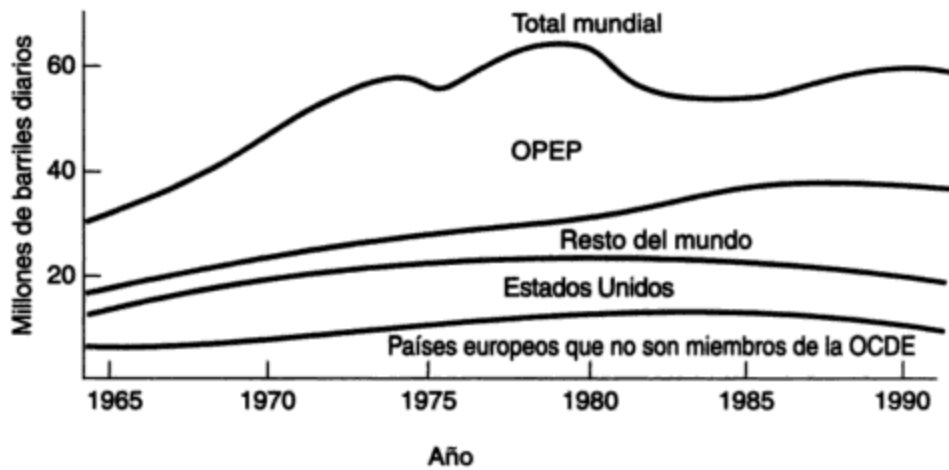
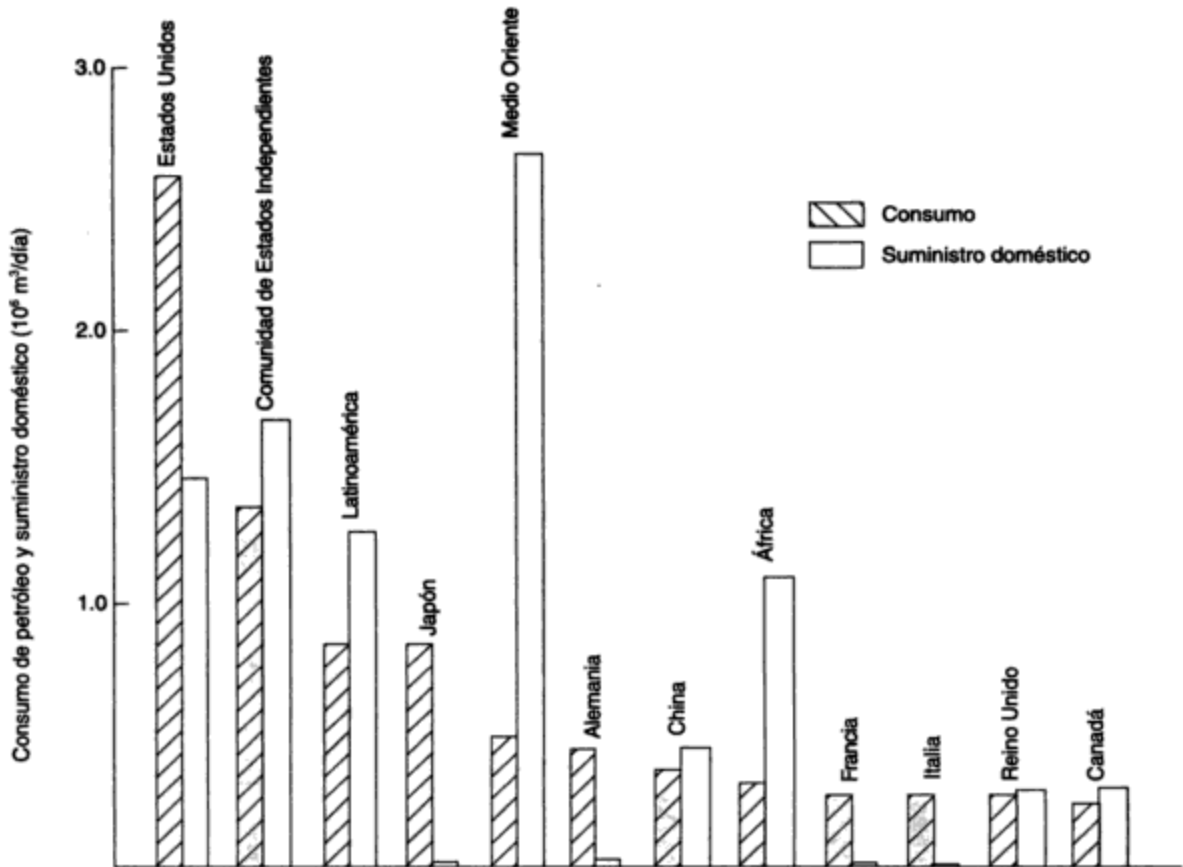


Figura 3-6 Producción mundial de petróleo crudo, 1965-1991. Fuente: British Petroleum (1992); EMR (1993).

eran de  $5.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ , alrededor de seis veces la tasa de consumo de 1991, de  $9.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Estados Unidos depende en alto grado del suministro externo, e importó más del equivalente de \$50,000 millones en petróleo en 1991.

También las naciones de Europa occidental y Japón son grandes consumidores de productos petroleros. A excepción del Reino Unido y Noruega, con sus depósitos recién descubiertos bajo el Mar del Norte, casi todos estos países dependen en alto grado del petróleo importado de productores extranjeros, en su mayoría miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). El volumen de petróleo crudo que produjo cada miembro de la OPEP en 1991 se muestra en la figura 3-8. Al comparar las gráficas de las figuras 3-7 y 3-8 se advertirá que la CEI, Estados Unidos y Arabia Saudita son los tres productores más grandes, en tanto México, que no pertenece a la OPEP, es el exportador de petróleo más grande con una producción de  $472 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{día}$  en 1991.



**Figura 3-7** Principales consumidores de petróleo en el mundo y su suministro doméstico de productos de petróleo en 1991. Fuente: British Petroleum (1992).

Más del 45% de las necesidades de petróleo crudo del mundo en 1991 (con exclusión de la CEI, Europa oriental y China) fue suministrado por países de la OPEP. Cerca del 62% de esa producción provino de los seis miembros de la OPEP ubicados en el Medio Oriente: Arabia Saudita, Irak, los Emiratos Árabes Unidos, Kuwait, Irán y Qatar. La naturaleza los ha favorecido con reservas de petróleo grandes y de fácil recuperación, casi 20 veces mayores que las que quedan en Norteamérica, por ejemplo, como se ilustra en la figura 3-9. En consecuencia, el impacto del Medio Oriente se extiende mucho más allá de su población, que en la actualidad es de menos de 50 millones de personas.

Arabia Saudita, con una población inferior a los 10 millones, tiene la mayor influencia en la OPEP porque es, con mucho, el productor más grande de los 13 miembros ya que tiene el mayor potencial de producción. Por fortuna para los países occidentales, sus políticas de producción y precios parecen ser las más moderadas. Sin embargo, el Medio Oriente puede ser políticamente inestable y está sujeto a la amenaza siempre presente de conflictos locales, que tienen el potencial para terminar en confrontaciones militares. Un ejemplo fue la invasión, en agosto de 1990, de Kuwait por Irak y la subsecuente Guerra del Golfo, en la que participaron muchas naciones de todo el mundo.

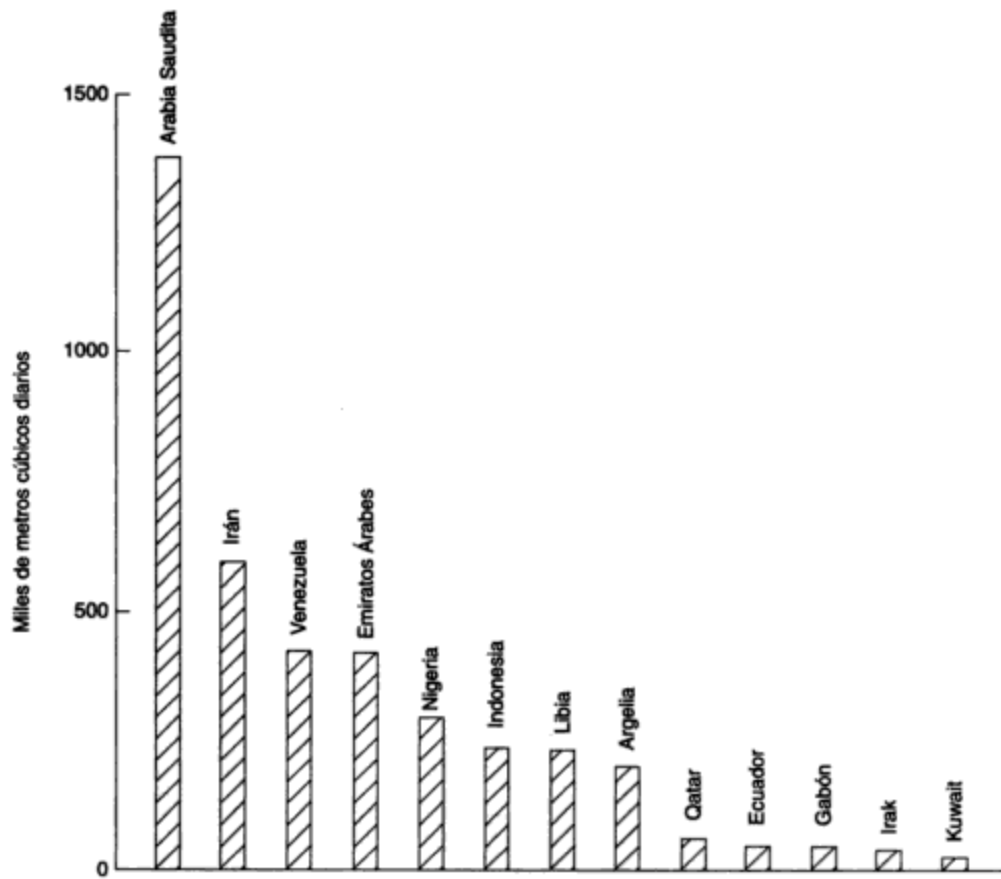
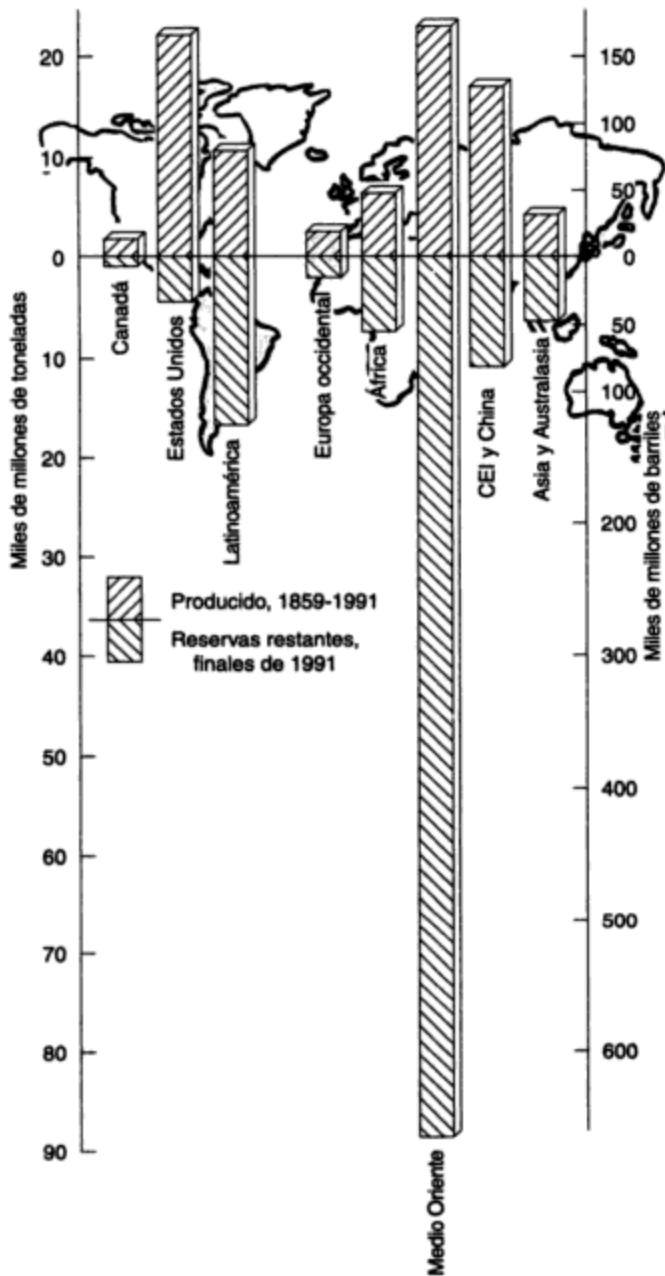


Figura 3-8 Producción de petróleo crudo en los países de la OPEP en 1991. Fuente: British Petroleum (1992).

Sin duda alguna, el acceso a los recursos de petróleo del Medio Oriente es fundamental para el bienestar económico del mundo occidental. Entretanto, las sacudidas de precios impuestas por la OPEP a los consumidores de petróleo, primero en 1973-1974, y de nuevo en 1979-1980, dieron por resultado en 1981 un aumento de más de 10 veces en dólares actuales del precio mundial del petróleo, como se muestra en la figura 3-10. Esta pesada carga económica ha llevado a las naciones que dependen del petróleo a buscar alternativas energéticas que intentan frenar los apetitos existentes, no obstante que los precios han regresado a los 135 dólares por metro cúbico (véase la figura 3-10). Los esfuerzos por reducir el consumo de petróleo han sido particularmente manifiestos en los países occidentales, como se indica en la tabla 3-5. Esto se podría haber esperado, puesto que había, y todavía hay, usuarios excesivos. Sin embargo, algunos podrían argumentar que una porción significativa de la reducción se debió a la disminución de la actividad económica generada por los enormes aumentos en el precio del petróleo en los años 70. Otros factores que han contribuido son la conversión a formas de energía menos costosas y las medidas para conservar la energía. En consecuencia, la demanda de petróleo y su precio por barril han disminuido de forma significativa a partir de 1980.

La tabla 3-5 muestra con claridad que las tasas de crecimiento del consumo en muchas de las áreas del mundo en desarrollo todavía tienen niveles altos. Este tipo de esta-



**Figura 3-9** Petróleo descubierto total.  
Fuente: British Petroleum (1992).

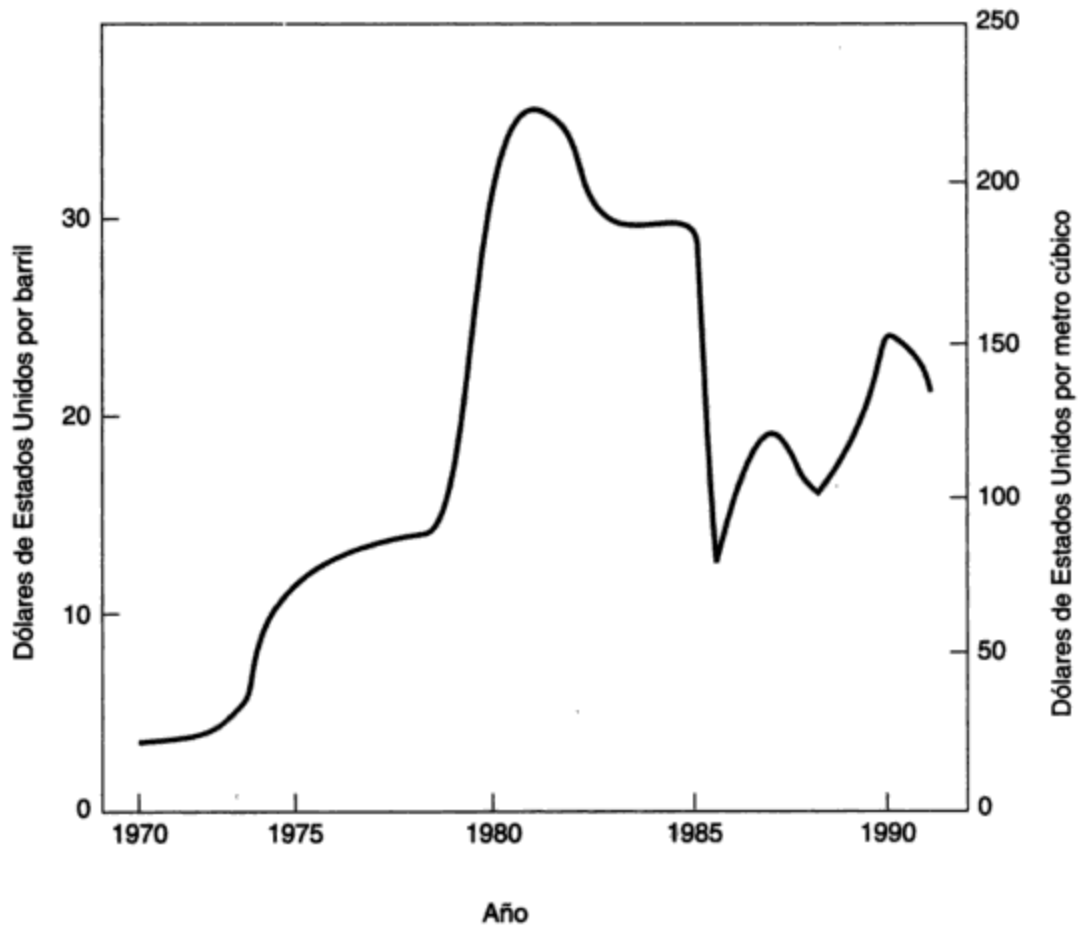
dística es un poco engañosa, pues la población en las áreas en desarrollo aumenta cada año a una tasa aproximada de cuatro veces mayor que la de los países desarrollados, y el consumo de energía per cápita es mucho menor en las áreas subdesarrolladas. Por ejemplo, Europa occidental consumió más petróleo crudo en 1991 que África, Latinoamérica y el Medio Oriente combinados. La tasa de crecimiento desproporcionadamente alta en los países más pobres y el consumo excesivo por parte de las naciones más ricas impondrá fuertes presiones económicas y ambientales a la comunidad mundial durante las décadas venideras.



**TABLA 3-5 CAMBIOS EN EL CONSUMO DE PETRÓLEO (%) EN UNA SELECCIÓN DE ÁREAS Y PAÍSES**

País/área	1991 respecto a 1979
Estados Unidos	-10.8
Canadá	-17.0
Latinoamérica	+23.9
OCDE europea	-13.9
Japón	-6.7
Medio Oriente	+103.1
África	+47.8
CEI	-1.6
China	+29.4

Fuente: British Petroleum (1992).



**Figura 3-10** Costo promedio de las importaciones de petróleo crudo en Canadá.  
Fuente: EMR (1987); NEB (1991, 1992).

### 3.3 CONSUMO FUTURO Y DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE ENERGÍA

Al terminar la Segunda Guerra Mundial, la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos se interesó en los problemas de política pública relacionados con el posible desarrollo y uso de estaciones generadoras de energía nuclear. En consecuencia, en 1949 se pidió a Palmer Putnam, un ingeniero consultor, que investigara cuáles eran las máximas demandas mundiales probables de energía para el periodo de 1950 a 2050. Los resultados (Putnam, 1953) todavía constituyen una lectura fascinante. El investigador asumió el papel de un fideicomisario mundial hipotético, con la tarea de identificar y describir las contingencias que podrían afectar el consumo de energía durante los 100 años siguientes. Un componente importante de la ecuación general era la estimación de la población mundial máxima antes de predecir las necesidades de energía. De acuerdo con los resultados cuidadosamente proyectados de Putnam, la población mundial podría aumentar 2,900 millones en 1975, 3,700 millones en 2000 y 6,000 millones en 2050. De hecho, la población actual ha crecido considerablemente más allá de los pronósticos de Putnam.

En el momento en que se hizo el pronóstico, 1950, la población mundial era alrededor de 2,300 millones. De acuerdo con datos recientes de la ONU, la población alcanzó los 5,000 millones en 1987 y podría superar la marca de 6,000 millones en 1998. La mayor parte del aumento imprevisto se produjo en los países en desarrollo, principalmente a causa de un descenso significativo en la mortalidad infantil, como se expuso en el capítulo 2. Ahora parece probable que el mundo estará habitado por al menos 9,000 millones de personas para 2050 (véase la figura 2-8). Las demandas que planteará una población tan grande a los recursos de energía pondrán a prueba el ingenio de los encargados de la recuperación de recursos y la conversión de desperdicios en formas útiles de calor y energía eléctrica.

Se ha pronosticado que el consumo de energía se duplicará o incluso triplicará entre 1985 y 2060, como se muestra en la figura 3-11. Tan sólo la incertidumbre en cuanto a necesidades de energía será para entonces mayor que el consumo mundial total de 1991. Un estimado que describe cómo se podría satisfacer esta enorme demanda futura se representa en la figura 3-12, donde el carbón desempeña el papel dominante como fuente de energía en el siglo XXI. No obstante, si se ha de preservar un ambiente seguro se tendrán que resolver graves problemas ambientales derivados de las emisiones gaseosas para que sea posible quemar carbón en la escala prevista en la figura.

Las tasas futuras de crecimiento energético en las regiones menos desarrolladas, a veces descritas como el sur (Asia, África y Latinoamérica), pueden ser más del doble de las correspondientes a las regiones más desarrolladas o del norte (Norteamérica, Europa, CEI, países industrializados del Pacífico, Sudáfrica), como se muestra en la figura 3-13. No obstante, los niveles de consumo de energía en 2060 podrían ser siete veces menores per cápita en el sur que en el norte (Frisch, 1986). Las fuentes de energía dominantes en el sur en las primeras décadas del próximo siglo serán el petróleo y la energía hidroeléctrica (véase la figura 3-14), simplemente porque la naturaleza ha dotado a esa parte del mundo con mayor cantidad de estos recursos.

La demanda externa de suministro de petróleo por el norte será especialmente severa a medida que el sur utilice internamente una proporción cada vez mayor de sus depósitos nativos. Así pues, se desarrollarán presiones en el norte para encontrar sustitutos económicos para las cada vez más costosas y menguantes cantidades de petróleo crudo. Los datos de producción dis-

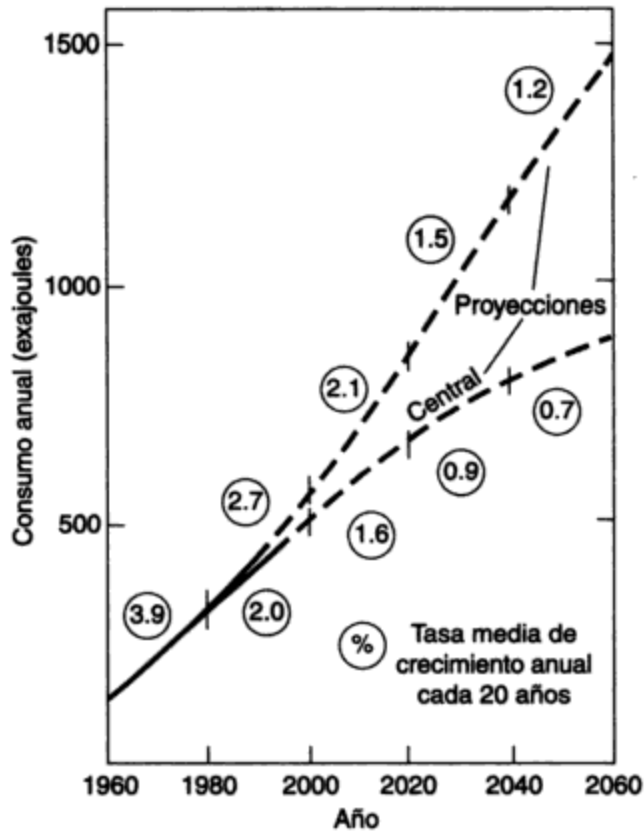


Figura 3-11 Producción mundial de energía primaria. Fuente: Frisch, con autorización de la World Energy Conference, 1986.

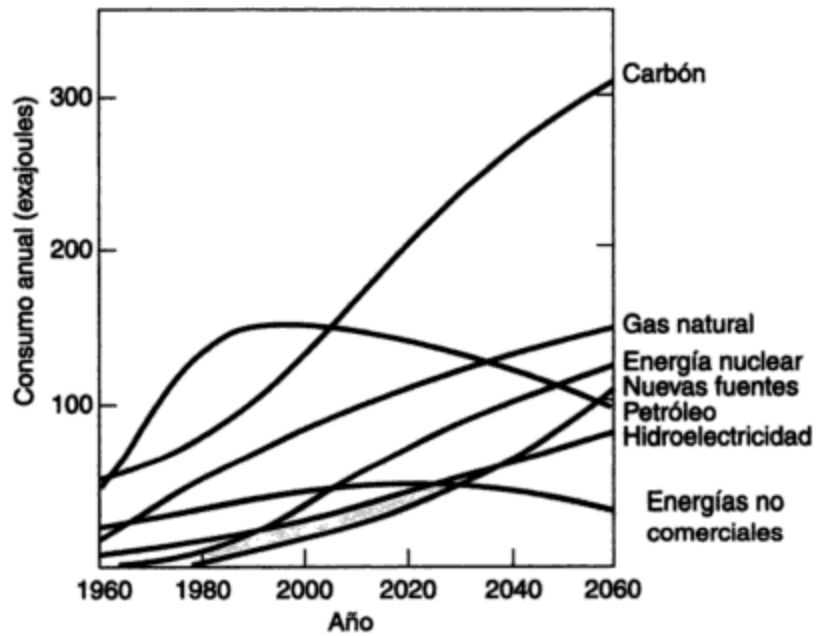
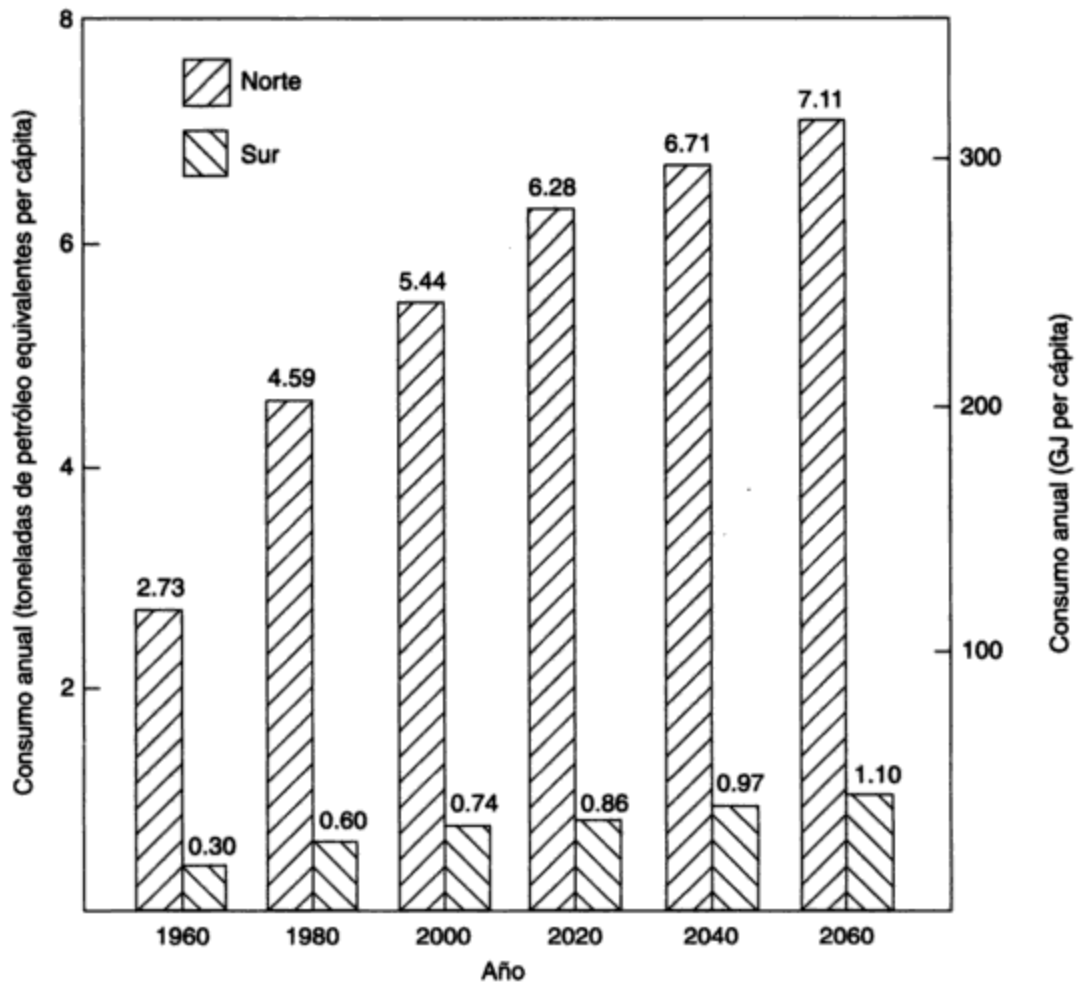


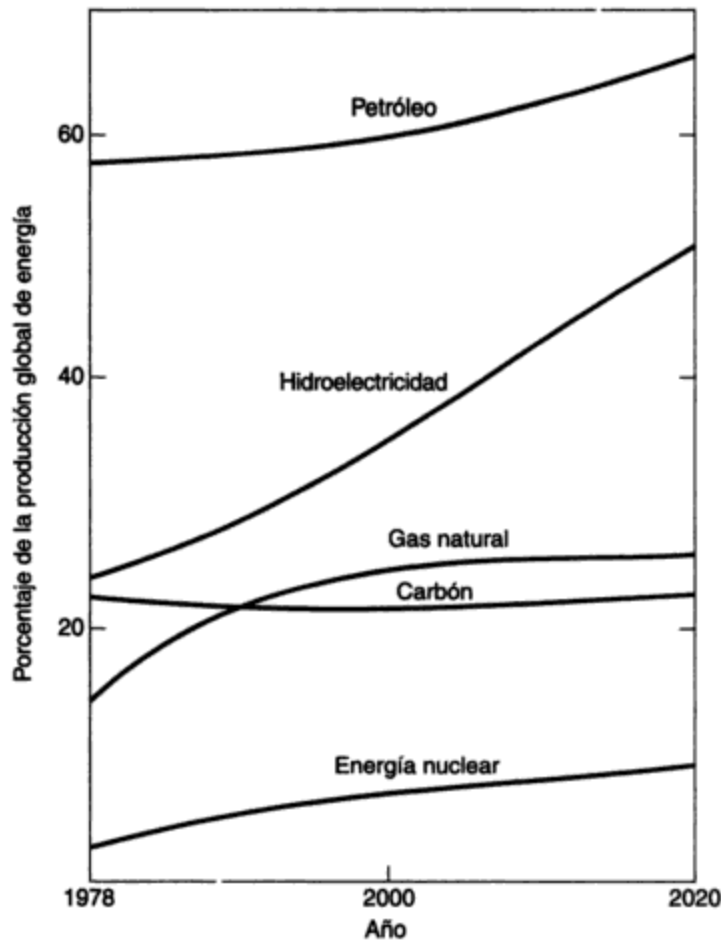
Figura 3-12 Evolución del suministro mundial de energía. Fuente: Frisch, con autorización de la World Energy Conference, 1986.



**Figura 3-13** Niveles de consumo de energía. Fuente: Frisch, con autorización de la World Energy Conference, 1986.

ponibles apoyan la sugerencia de que la producción mundial de petróleo pudo haber alcanzado ya un máximo alrededor de 1979. Las cifras de consumo de petróleo a partir de 1970 indican que el mundo occidental fue afectado seriamente por las alzas en el precio del petróleo inducidas por la OPEP en 1973-1974 y 1979-1980, en tanto que los países del bloque oriental salieron más o menos incólumes, como se ve con claridad en la figura 3-5.

Para ilustrar la magnitud de las tasas de producción, basta con advertir que las reservas probadas de petróleo para toda Europa occidental, principalmente las que están bajo el Mar del Norte, serían necesarias para proveer poco más de siete meses el consumo mundial en 1991. Además, el descubrimiento del Mar del Norte fue sólo uno de tres hallazgos importantes hechos en el mundo en los últimos 20 años; los otros dos se produjeron en México y en la bahía Prudhoe de Alaska. Por consiguiente, encaramos el claro prospecto de una menguante contribución del petróleo a las necesidades de energía primaria del planeta. El gas natural podría alcanzar esa posición también a mediados del próximo siglo, cuando se espera que las can-



**Figura 3-14** Producción de energía en las regiones menos desarrolladas. Fuente: Frisch, con autorización de la World Energy Conference, 1983.

tidades de petróleo y gas recuperadas decaigan conforme los depósitos se agoten. Ahora bien, si el petróleo y el gas van a menguar en importancia como fuentes de energía en el siglo XXI y más allá, ¿cómo será posible satisfacer las demandas de energía de una población mundial todavía en crecimiento? Es claro que, para que se alcancen incrementos importantes en la producción de energía, los recursos deben provenir del carbón y de fuentes nucleares; las renovables, esto es, la energía hidroeléctrica, el petróleo y el gas no convencionales (principalmente de arenas y esquistos), serán importantes también, pero nunca en la misma medida. De forma similar, no se espera que las fuentes potencialmente nuevas, como la fusión termonuclear, por ejemplo, contribuyan en un grado importante a las necesidades energéticas del mundo antes del año 2050.

Es probable que se logre un uso más económico y eficiente de las fuentes de energía (de la nuclear en particular) durante los próximos 40 años mediante el desarrollo de técnicas de almacenamiento de energía que permitirán a los reactores nucleares operar con una mayor producción. Un medio de almacenamiento de esta clase es el hidrógeno, que se produce por electrólisis de agua. Otro puede ser consecuencia del desarrollo de materiales que se hacen superconductores a temperaturas como la del nitrógeno líquido y más altas.

El recurso individual de combustibles fósiles más grande disponible es el carbón, como se indica en la tabla 3-6. Las proporciones de recursos a demanda para el carbón y el uranio incluidas en esta tabla parecen ser confortablemente grandes. Sin embargo, como se indica en

la figura 3-11, la utilización de ambos recursos podría crecer notablemente durante las décadas por venir. Así pues, las proporciones de recursos para la demanda, en particular para el uranio, se podrían medir en décadas en lugar de siglos. No obstante, una vez que los diseños actuales de reactores térmicos sean sustituidos por reactores reproductores rápidos y reactores térmicos avanzados, los recursos conocidos de uranio y torón se utilizarán de manera más eficaz y la contribución energética de la energía nuclear deberá aumentar de 50 a 60 veces. La fisión nuclear suministraría entonces considerablemente más energía en el futuro que la que está disponible de todos los recursos de combustibles fósiles restantes.

**TABLA 3-6 RECURSOS ENERGÉTICOS MUNDIALES NO RENOVABLES**

Fuente	Recursos probados (EJ)	Demanda mundial, 1985 (EJ)	Proporción recursos/demanda
Carbón	40,123	102.1	393
Petróleo crudo	4,344	125.8	39
Arenas y esquistos petrolíferos	582		
Gas natural	3,314	69.0	48
Uranio <sup>a</sup>	1,164	15.2	77

<sup>a</sup>Reactores térmicos actuales.

Fuente: British Petroleum (1986); Frisch (1986).

Un factor importante que influye en el uso futuro de las fuentes de energía es el impacto ambiental y social de cada una. Esto se aplica en particular al uso del carbón y la energía nuclear. Los peligros de extraer de las minas y transportar cantidades enormes de carbón, y las incapacidades (como la enfermedad del pulmón negro) que se generan en los mineros, son consideraciones importantes. El daño ambiental que se causa al dejar escapar a la atmósfera cantidades siempre en aumento de residuos de la quema de carbón puede poner límites al uso de ese combustible. Aunque la eliminación de los gases azufrados y nitrogenados del proceso de combustión plantea el mayor desafío técnico, la reducción del contenido de metales pesados en los efluentes de los equipos lavadores es también una tarea importante. Además, se alza sobre todos estos problemas ambientales, por su impacto potencial en el clima mundial, el efecto de un aumento significativo del contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (véase el capítulo 5).

A juicio de muchas personas con formación técnica, la energía nuclear es la más benigna de todas las fuentes de energía en términos de impacto ambiental. Otros, sin embargo, son fervientes luchadores en contra de la opción nuclear, pues afirman que los peligros potenciales de la radiación de bajo nivel, los accidentes nucleares y la proliferación de armas nucleares la hacen intolerable como fuente futura (véase el capítulo 15). Otras fuentes de energía plantean también riesgos asociados con su producción; muchos de ellos son de naturaleza ambiental y se examinan más a fondo en la sección siguiente y en otros capítulos.

### 3.4 IMPACTOS AMBIENTALES DEL DESARROLLO ENERGÉTICO

Después de examinar los patrones pasados, presentes y futuros de la producción y el consumo de energía, analizaremos ahora los impactos ambientales de estas tecnologías. Se han escrito

muchos libros e informes acerca de los impactos ambientales del desarrollo energético. Casi todos los tratados de tecnología y política energéticas incluyen un recuento de los aspectos ambientales, pues se reconoce que las consideraciones ambientales pueden restringir la producción de energía, en especial cuando el ambiente se expone a un riesgo. La mayor parte de los textos sobre cuestiones ambientales contiene secciones que tratan temas como la contaminación del aire por los automóviles y las plantas de energía, así como la contaminación térmica por dichas plantas y la contaminación del agua por derrames de petróleo. Algunos libros e informes que exploran el problema energía/ambiente con más detalle son los de Fowler (1975), Tuve (1976), Chigier (1981) y Biswas (1973). Aquí se sigue el formato de matriz desarrollado en el volumen de Biswas para la enumeración de los impactos de la energía en el medio.

Es útil analizar en primer término ciertos temas recurrentes en el problema energía/ambiente. Éstos son: (1) una comparación del uso actual de energía en una sociedad industrial con el "trasfondo" de energía solar que recibimos y con la energía mínima necesaria en forma de alimento para la supervivencia; (2) los volúmenes de combustibles que generamos, procesamos y utilizamos; (3) la imagen cambiante de la disponibilidad de energía; y (4) el problema de la dispersión de sustancias tóxicas derivadas del desarrollo de la energía.

**Trasfondo de radiación solar y energía alimenticia.** El consumo de energía comercial por la sociedad se puede comparar con el trasfondo de energía que se recibe por la radiación solar y la energía alimenticia mínima necesaria para la supervivencia. En seguida se expone un ejemplo, y se sugiere que el lector emprenda un cálculo similar para una región o país específico (véase el problema 3.10).

### Ejemplo 3.1

Compare y analice el consumo de energía o las tasas de flujo en unidades de joules por año, gigawatts (GW) y watts por persona en forma de combustibles, alimentos y radiación solar para un país con una densidad de población de 20 personas/km<sup>2</sup>, un área de 1 millón de km<sup>2</sup> y una tasa de consumo de energía de combustibles de 250 GJ por persona al año. La radiación solar que llega al suelo equivale aproximadamente a 150 W/m<sup>2</sup>. La persona media consume alimentos que contienen 2,000 "calorías" (en realidad kilocalorías) por día [1 (kilo) caloría = 4,182 J].

### Solución

#### Energía de combustibles:

$$\begin{aligned} \text{Energía total (J/año)} &= 250 \times 10^9 \text{ (J)} \times 20 \text{ (personas/km}^2\text{)} \times 10^6 \text{ (km}^2\text{)} \\ &= 5 \times 10^{18} \text{ J/año.} \end{aligned}$$

(La energía se expresa por lo común en watts = J/s)

$$\text{J/s} = \text{watts (W)} = \frac{5 \times 10^{18}}{365 \times 24 \times 3600} = 1.59 \times 10^{11} \text{ W} = 159 \text{ GW}$$

$$\text{Watts/persona} = \frac{1.59 \times 10^{11}}{20 \times 10^6} = 7950$$

**Energía solar:**

$$\begin{aligned} \text{Energía total (watts)} &= 150 \text{ (W/m}^2\text{)} \times 10^6 \text{ (m}^2\text{/km}^2\text{)} \times 10^6 \text{ (km}^2\text{)} \\ &= 1.5 \times 10^{14} \text{ W} \\ &= 150,000 \text{ GW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{J/año} &= 1.5 \times 10^{14} \text{ (J/s)} \times 3600 \text{ (s/h)} \times 24 \text{ (h/día)} \times 365 \text{ (días/año)} \\ &= 4.7 \times 10^{21} \text{ (J/año)} \end{aligned}$$

$$\text{Watts/persona} = \frac{1.5 \times 10^{14}}{20 \times 10^6} = 7.5 \times 10^6$$

**Energía alimenticia:**

$$\begin{aligned} \text{J/año} &= 2000 \text{ ("cal"/día} \cdot \text{ persona)} \times 4182 \text{ (J/"cal")} \times 365 \text{ (días/año)} \\ &\quad \times 20 \times 10^6 \text{ (persona)} \\ &= 6.1 \times 10^6 \text{ J/año} \\ &= 1.94 \times 10^9 \text{ J/s} = 1.94 \text{ GW} \end{aligned}$$

$$\text{Watts/persona} = \frac{1.94 \times 10^9 \text{ (W)}}{20 \times 10^6} = 97$$

**Resumen:**

	J/año	GW	Watts/persona	Proporción
De combustibles	$5 \times 10^{18}$	159	7950	1
Solar	$4.7 \times 10^{21}$	150,000	$7.5 \times 10^6$	943
Alimenticia	$6.1 \times 10^{16}$	1.94	97	0.012

**Comentarios:** Advierta que la densidad de población que se utiliza en este ejemplo es representativa de Estados Unidos, alrededor de un décimo de la correspondiente al Reino Unido y diez veces la de Canadá. Las necesidades humanas de energía son pequeñas en comparación con la radiación solar, pero la dificultad para explotar ésta radica en su amplia dispersión o "dilución". Las necesidades de energía alimenticia son muy pequeñas, aunque cada persona genera casi el mismo calor que una bombilla de 100 W.

El consumo de energía de combustibles de 7,950 W (7.95 kW) equivale a 80 veces el consumo alimenticio, lo cual ha dado origen a afirmaciones como "el hombre industrializado moderno tiene el equivalente de 80 esclavos de energía".

Si la densidad de población aumenta 100 veces o más (como puede suceder en áreas urbanas) los flujos de energía de combustibles y energía solar se hacen semejantes, en particular durante las épocas de bajas tasas de insolación en invierno. Esto da origen a modificaciones climáticas locales. En consecuencia, los inviernos en las grandes ciudades suelen ser más moderados que en los suburbios.

**Volúmenes de combustibles.** El potencial de perturbación del ambiente por las actividades relacionadas con la energía se puede dilucidar también calculando la masa o volumen de combustibles que utiliza cada persona anualmente. La obtención de esta masa de combustible,



su separación de otros materiales indeseables, su transporte y, en último término su quema, todo ello impacta en el ambiente. La tabla 3-7 indica la densidad de energía de una selección de combustibles en unidades de MJ/L (megajoules o  $10^6$  J/L). *Densidad de energía* significa la cantidad de energía que contiene un volumen unitario del combustible. Si correlacionamos esto con el uso de energía per cápita, vemos que cada uno de nosotros es el causante de la producción y movimiento anual de un volumen considerable de materiales relacionados con la energía. Por ejemplo, un residente de un país industrializado puede “consumir” 400,000 MJ/año, lo cual corresponde a más de 10,000 L de petróleo, 6,000 L de carbón, 11 millones de litros de gas natural o 45,000 L ( $45 \text{ m}^3$ ) de madera. Estos volúmenes son considerables, en especial si se advierte que su obtención puede requerir la eliminación de otros materiales (p. ej., roca en la extracción de carbón).

**TABLA 3-7 DENSIDAD ENERGÉTICA DE ALGUNOS COMBUSTIBLES**

Combustible	Densidad energética (MJ/L)
Gas natural	0.036
Petróleo o gasolina (petróleo)	35
Carbón (sólido)	65
Madera	9

Aunque cada etapa, desde la extracción hasta la comercialización, puede ser dañina por sí misma, surgen problemas específicos de la combustión cuando el combustible contiene porcentajes incluso pequeños de materiales indeseables, como el azufre. Por ejemplo, si sólo el 1% del volumen de carbón o petróleo es azufre, se emiten en la atmósfera cantidades considerables de este elemento, por lo común en forma de dióxido de azufre, como consecuencia de la combustión. Esto crea grandes problemas de contaminación del aire y del agua, como se explica en los capítulos 5, 7 y 13.

El uranio y otros combustibles nucleares plantean una situación especial en cuanto a que los volúmenes que se requieren para la producción de energía son muy reducidos. Sin embargo, los peligros asociados con la radiactividad de estos materiales compensan esta pequeña cantidad, puesto que la radiactividad es un “veneno” extraordinariamente potente (véase el capítulo 15).

**Disponibilidad.** En la explotación de recursos energéticos ha existido en el pasado una tendencia comprensible de parte de los industriales a explotar en primer término las fuentes de energía más económicas, cercanas, ricas y menos contaminadas. Estas fuentes producen la máxima utilidad. Para bien o para mal, se tiende a dejar las fuentes menos deseables a las futuras generaciones. En consecuencia, se llevaron a cabo los siguientes criterios: suelen explotarse primero los yacimientos de carbón más ricos y los depósitos de petróleo abundantes, próximos a la superficie y con bajo contenido de azufre; los proyectos hidroeléctricos no complicados y cercanos fueron los primeros en desarrollarse; se ha preferido el petróleo de tierra adentro que el de depósitos subacuáticos; el gas natural se ha utilizado como fuente de energía con preferencia al carbón o al gas de hulla, en las partes donde se encuentra disponible; y el petróleo importado de bajo costo, cuando está disponible, se prefiere al costoso petróleo doméstico. Una consecuencia general de todo esto es que el suministro futuro de energía puede (1) tender a provenir de áreas más remotas, lo cual implica distancias de transporte más largas; (2) estar más contaminado

con elementos indeseables; y (3) estar más "diluido" (por ejemplo, los yacimientos de carbón pueden ser más delgados o las tasas de producción de petróleo más bajas). Además, los combustibles fósiles que se explotan pueden estar a mayor profundidad bajo la tierra y por tanto su localización y producción será más difícil y costosa. En conjunto, los desarrollos energéticos futuros serán probablemente más dañinos para el ambiente y se encontrarán en muchos casos en áreas con usos tradicionales en competencia, como pesca, agricultura y turismo. Estas áreas estarán pobladas quizá por personas con un estilo de vida que genera demandas de energía relativamente leves en comparación con el sistema energético urbano industrial y que resienten, como es comprensible, la intrusión de desarrollos energéticos en sus "patios traseros".

**Sustancias tóxicas.** En 1962, Rachel Carson publicó su ahora clásico libro *Silent Spring*, un recuento de los efectos adversos de los plaguicidas que se usan principalmente para fines agrícolas, en organismos que no son el objetivo (o víctimas) como las aves. Desde entonces a la fecha se ha creado una preocupación de amplio alcance acerca de la diseminación de sustancias tóxicas en el ambiente. Éstas pueden ser metales como plomo o mercurio, compuestos orgánicos como DDT o los bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés: *polychlorinated biphenyls*), sustancias inorgánicas como compuestos de azufre o asbesto, o materiales radiactivos. Por fortuna, los efectos son rara vez letales para los seres humanos, pero pueden tener efectos letales o subletales en otros organismos, lo cual produce cambios ambientales. Por ejemplo, puede haber pérdida de capacidad reproductora en peces o aves, o cambios de comportamiento que afectan las relaciones depredador/presa. Por consiguiente, es prudente observar de cerca el ambiente natural en busca de cambios, puesto que un efecto tóxico en las aves puede servir como advertencia de un efecto potencial en los seres humanos. Después de todo, estamos hechos por los mismos bloques bioquímicos de construcción.

Las industrias que producen energía manejan cantidades considerables de estas sustancias peligrosas; por ejemplo, uranio para combustibles nucleares, y también los compuestos de azufre que provienen de la combustión de petróleo y carbón. Es motivo de particular preocupación la generación de sustancias que inducen mutaciones o cáncer. Son ejemplos de las mismas los compuestos aromáticos polinucleados, como los benzopirenos, y diversos compuestos orgánicos heterocíclicos que incluyen nitrógeno y azufre. Estos compuestos se producen durante la combustión o en la síntesis de combustibles líquidos sintéticos a partir de carbón, y están presentes en el escape de los motores diesel; por tanto, un cambio de automóviles impulsados por gasolina a otros movidos por diesel, puede ser deseable desde un punto de vista energético, pero puede causar mayores efectos adversos para la salud.

En el pasado los ingenieros y científicos no consiguieron en muchos casos predecir, y por tanto controlar, los efectos adversos de los nuevos desarrollos energéticos en el ambiente y en la salud humana. Las presas hidroeléctricas han causado muertes de peces y azolvamiento, el dióxido de azufre ha dañado bosques y lagos, y los desechos de las minas de uranio han producido niveles altos indeseables de radiactividad. Estos errores se excusan en parte porque no existía un mecanismo de eficacia probada para evaluar los impactos ambientales futuros. Sin embargo, esto ya no es una excusa. Hoy en día existen técnicas prácticas y (en muchos países) mecanismos reguladores para asegurar que estos impactos evitables no se produzcan, o que al menos se reduzcan al mínimo (véase el capítulo 16). Un enfoque consiste en compilar matrices de impactos ambientales en los cuales se examina por una parte el entorno y, por otra, la actividad, que en este caso es el desarrollo energético, y se pregunta de manera sistemática y exhaustiva cuáles serán los impactos de cada componente del desarrollo energético en cada elemento del ambiente. En la sección siguiente aplicamos este enfoque.

### 3.5 MATRICES DE IMPACTOS AMBIENTALES

La matriz de impactos ambientales se presentó en el capítulo 2; en este caso, proporciona un inventario y una exposición convenientes de los impactos de la producción de energía (Leopold *et al.*, 1971). Como se ilustra en la tabla 3-8, la matriz se compila enumerando en el eje horizontal los componentes del desarrollo, como exploración, explotación de minas, transporte o utilización. En el eje vertical están los componentes del ambiente: la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y los impactos humanos. La matriz indica las interacciones potenciales entre las actividades y el entorno, y proporciona respuestas a preguntas como: ¿afecta la exploración la calidad del agua? (Respuesta: sí, por los derrames de petróleo.) O ¿afecta el uso de hidroelectricidad la calidad del aire? (Respuesta: probablemente no.) Con el método sistemático de matrices es poco probable que se pasen por alto los impactos ambientales.

En las matrices adoptadas en esta sección para los impactos ambientales de la energía utilizamos cuatro columnas y cuatro filas.

- *Columna 1. Exploración.* Incluye la búsqueda de fuentes de combustible previa a la producción. La exploración suele no tener éxito y es posible que se lleve a cabo en áreas remotas en competencia con otros usos de la tierra o el agua.

**TABLA 3-8 IMPACTOS AMBIENTALES DEL PETRÓLEO**

Ambiente	Tipo de actividad			
	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Trasmisión	Uso y eliminación
Atmósfera	Emisiones de H <sub>2</sub> S e hidrocarburos como resultado de un estallido	Emisiones de SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> e hidrocarburos de las refinérfas	—	Emisiones de SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> e hidrocarburos
Hidrosfera	ESTALLIDOS Y DERRAMES DE POZOS DE EXPLORACIÓN MARINA QUE ORIGINAN CONTAMINACIÓN POR PETRÓLEO	ESTALLIDOS Y DERRAMES Eliminación de salmuera y productos químicos de perforación Efluentes de las refinérfas	ACCIDENTES DE BUQUES CISTERNA QUE ORIGINAN CONTAMINACIÓN POR PETRÓLEO DERRAMADO	Contaminación de aguas subterráneas por tanques con fugas
Litosfera	Estallidos y derrames en tierra	Estallidos y derrames Eliminación de lodos	Construcción de tuberías y vertederos Daños al <i>permafrost</i>	Eliminación de aceites usados
Impactos humanos	Perturbación del estilo de vida	Interferencia con pesquerías	Interferencia con pesquerías o uso del suelo Perturbaciones del estilo de vida durante la construcción	Hidrocarburos que provienen de la combustión, incluso los aromáticos polinucleados

- *Columna 2. Extracción, producción y procesamiento.* Incluye la extracción del combustible de su ubicación actual por explotación de minas, perforación de pozos, construcción de presas, refinación del combustible (por ejemplo, una refinería de petróleo) y, en el caso de la generación de electricidad, la producción de efluentes térmicos.
- *Columna 3. Trasmisión.* Esto es el transporte del combustible desde el lugar donde se produce por tubería, carretera, ferrocarril, buque cisterna o línea de trasmisión de electricidad hasta el punto de utilización.
- *Columna 4. Uso y eliminación.* Incluye la generación de productos de combustión, combustibles agotados, y óxidos de azufre, nitrógeno y carbono.  
Estos procesos no necesariamente se llevan a cabo en el orden citado. Por ejemplo, habitualmente el petróleo se extrae, se transporta y después se refina, en tanto que el gas natural se extrae, se procesa para eliminar azufre, y después se transporta.
- *Fila 1. Atmósfera.* Incluye el entorno atmosférico inmediato del desarrollo y el impacto de la transportación de contaminantes de largo alcance, en especial cuando se utilizan chimeneas altas para dispersar el contaminante en un área más extensa en un intento por resolver un problema local por dilución.
- *Fila 2. Hidrosfera.* Incluye el agua dulce (ríos, lagos y aguas subterráneas) y los océanos. También comprende la biota nativa del agua, que va desde bacterias hasta peces y mamíferos marinos.
- *Fila 3. Litosfera.* Incluye suelo, roca y sedimentos del fondo de ríos, lagos y océanos, incluso la vegetación y la vida animal concomitantes.

En las tres categorías anteriores hemos incluido la biota residente como víctima potencial del impacto ambiental. En la categoría final damos una consideración especial a los impactos humanos.

- *Fila 4. Impactos humanos.* Incluye el bienestar humano en su sentido más amplio y los efectos en la salud, la economía, la seguridad, el estilo de vida, la estructura social y las consideraciones estéticas.

Los impactos de mayor gravedad se muestran con **mayúsculas** en las tablas 3-8 a la 3-12. Algunos de ellos son "crónicos", con emisión y efecto continuos (por ejemplo, la descarga de aguas residuales de las refinerías de petróleo), mientras que otros son ocasionales y accidentales, con un efecto masivo, los cuales se pueden producir una vez en cinco años y durar algunos meses (por ejemplo, un derrame de petróleo). La comparación de estos impactos fundamentalmente diferentes constituye un reto.

### 3.5.1 Impactos ambientales del petróleo

La figura 3-8 muestra los impactos ambientales del petróleo. Durante la exploración en busca de petróleo, ya sea en tierra o lejos de las costas, existe el riesgo de un estallido cuando se llega a perder el control del pozo. Esto puede ocasionar graves y prolongados derrames de petróleo que dañan el ambiente marino. El estallido del Ixtoc, en 1979, en el Golfo de México es un ejemplo. La recuperación del control de un pozo estallado puede tomar un tiempo considerable y generalmente es necesario perforar un pozo de alivio para interrumpir el flujo de petróleo. Este problema es particularmente grave en los climas nórdicos, donde la formación y el movimiento del hielo puede obstaculizar seriamente o incluso impedir la perforación de pozos de alivio.

Los derrames de petróleo pueden ser causa de mortalidad en las aves y de contaminación en las costas, con efectos biológicos graves en los organismos que habitan en la zona de mareas y cerca de la costa, y en valiosas pesquerías de mariscos. También se ensucian embarcaciones, redes e instalaciones de bahías, lo cual requiere una limpieza costosa. El impacto del petróleo en el medio marino abierto es más difícil de evaluar, pero es probable que el derrame tenga cierto efecto en las pesquerías y, en general, en los organismos presentes en las aguas superficiales del océano. El problema de la contaminación por petróleo ha sido reseñado en varios libros, entre ellos los de Nelson-Smith (1973) y de Malins (1977).

Las actividades de exploración, producción y transmisión pueden tener un efecto profundo en los estilos de vida de áreas remotas. Por ejemplo, en el norte de Canadá y en Alaska, en especial en las comunidades *inuit* tradicionales, las personas no están bien equipadas para soportar las presiones sociales de la vida industrial moderna.

Existe también un riesgo de derrame durante la producción y recolección de petróleo en tierra antes de su traslado a las refinerías. En ellas existe el potencial de emisión de hidrocarburos: óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), que causan acidificación de lagos y problemas respiratorios en los seres humanos; ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que es muy tóxico y maloliente; dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que da origen al "efecto invernadero" (véase el capítulo 5); óxidos de nitrógeno, que causan smog fotoquímico y acidificación; y ciertas sustancias malolientes. Las refinerías generan además efluentes líquidos que pueden contener hidrocarburos, fenoles, amoníaco y otras sustancias tóxicas. Los compuestos orgánicos disueltos en estos efluentes se tratan normalmente por medio de procesos de oxidación biológica, y el petróleo se extrae por separación física. Es inevitable la formación de lodos compuestos de mezclas de hidrocarburos y organismos contaminados en muchos casos con metales, en particular níquel y vanadio, que están presentes por lo común en el petróleo crudo.

Durante la producción de petróleo existe el potencial de daños debidos a la contaminación del entorno local por productos químicos y lodos de perforación, así como la salmuera (una solución de sal) que suele salir de la formación asociada con el petróleo crudo.

El petróleo se transporta por buque cisterna y por tubería en cantidades muy grandes, y ninguno de estos medios está exento de causar contaminación ambiental. De hecho, han ocurrido varios accidentes impresionantes de buques cisterna petroleros que han causado la contaminación generalizada de regiones costeras, entre los cuales sobresalen los incidentes del *Torrey Canyon* y del *Amoco Cadiz* en el Canal de la Mancha. En general los efectos son similares a los producidos por estallidos que ya hemos analizado. Los derrames de petróleo de las tuberías son menos graves porque es más fácil controlar el petróleo, aunque puede haber contaminación de terrenos agrícolas que causan una pérdida de productividad. Un problema especial es la construcción de tuberías para la transmisión de petróleo o gas natural en climas nórdicos, donde bajo el suelo existen estratos permanentemente congelados, llamados *permafrost*. Normalmente, el petróleo se bombea caliente para disminuir su viscosidad y reducir con ello las necesidades de potencia. Por consiguiente, es necesario que la tubería esté bien aislada para impedir que el suelo se descongele, pues esto causaría un hundimiento conocido como *termokarst*. Una práctica común de ingeniería consiste en construir la tubería sobre pilotes, o en trincheras con aislamiento adecuado para separarla así de suelo vulnerable. La primera tubería importante de este tipo fue la tubería que atraviesa Alaska desde la bahía de Prudhoe hasta Valdez. Esta clase de tuberías suelen atravesar áreas silvestres escasamente pobladas donde las actividades de construcción pueden tener impactos severos en los estilos de vida local, las pesquerías, la cacería con trampas

y el uso de la tierra en general. Una cuestión controvertida y aún no resuelta es la de la posible interferencia con la migración de los caribús por las tuberías superficiales, las cuales pueden constituir en efecto una barrera para esos animales en el norte de Canadá y en Alaska.

El uso y la eliminación de petróleo crudo trae como consecuencia la emisión de hidrocarburos y de óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, todos ellos causantes de problemas ambientales y de salud. Algunos de los hidrocarburos que se producen durante la combustión incompleta son compuestos aromáticos polinucleados como los benzopirenos, que son carcinógenos potenciales. Un impacto final es la eliminación del petróleo ya usado, en particular el aceite lubricante, que puede estar contaminado con plomo. En principio, es desde luego deseable que se vuelva a procesar este aceite para recuperar los hidrocarburos valiosos y eliminar la fuente de contaminación; sin embargo, suele descargarse en rellenos sanitarios.

### 3.5.2 Impactos ambientales del gas natural

La tabla 3-9 muestra los impactos ambientales del gas natural. Es claro que estos efectos son considerablemente menos graves que los del petróleo. En general, el impacto de los escapes de gas natural (metano) en el ambiente es de poca importancia, siempre y cuando no estén acompañados de incendios o explosiones. El metano tiende a dispersarse con rapidez en la atmósfera y tiene pocos efectos adversos en el ambiente.

TABLA 3-9 IMPACTOS AMBIENTALES DEL GAS NATURAL

Ambiente	Tipo de actividad			
	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Trasmisión	Uso y eliminación
Atmósfera	Emisiones de gas y H <sub>2</sub> S durante un estallido accidental	Emisiones de H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> e hidrocarburos de las plantas de gas	—	Emisiones de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>
Hidrosfera	Estallidos	Estallidos y perforación Eliminación de productos químicos	—	—
Litosfera	—	—	Construcción de la tubería Daños al <i>permafrost</i>	—
Impactos humanos	—	ACCIDENTES CON GNL Emisiones de H <sub>2</sub> S	ACCIDENTES CON GNL Perturbación del estilo de vida durante la construcción	—

También en este caso existe el riesgo de emisión de hidrocarburos durante los estallidos, pero probablemente es más grave el peligro por emanación de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

durante la exploración y la producción. El sulfuro de hidrógeno, acompañante normal de gas natural en los depósitos de petróleo, es muy tóxico. El procedimiento usual consiste en eliminarlo del metano en una "planta de gas" próxima al pozo. Una y otra vez los desperfectos en el funcionamiento de las plantas han ocasionado fuertes emisiones de  $H_2S$  que han hecho necesaria una evacuación rápida de grandes áreas en la dirección del viento. Como en el caso del petróleo, la eliminación de la salmuera y los productos químicos de perforación tiene un impacto. Además, la construcción de tuberías de gas puede ser destructiva y particularmente difícil en regiones donde hay *permafrost*.

Un área de preocupación creciente es la posibilidad de que se produzcan accidentes graves como consecuencia del transporte de gas natural licuado (GNL). No resulta económico transportar gas natural gaseoso por buque cisterna; la licuefacción aumenta en alto grado la densidad energética de la carga y permite acarrear una mayor cantidad por viaje. Estas cargas se deben mantener a temperaturas muy bajas (abajo del punto de ebullición del gas natural) o a grandes presiones. Si en el recipiente que lo contiene hay una falla, se producirá una emisión de metano líquido, el cual se evapora muy rápido en esas condiciones y crea una condición muy riesgosa; por lo tanto, es probable que se produzcan incendios y explosiones. Han ocurrido varios incendios de GNL, pero por fortuna ningún incidente grave que ocasione, por ejemplo, la pérdida de una carga completa. Es necesario un cuidado extremo en el diseño de las instalaciones para licuefacción, transporte y gasificación, y existe un incentivo apremiante para que estas instalaciones se ubiquen lejos de lugares habitados por el hombre.

### 3.5.3 Impactos ambientales del carbón

Los impactos ambientales del carbón se presentan en la tabla 3-10. Normalmente, el carbón se recupera por uno de los dos procesos. En las minas a cielo abierto, el carbón próximo a la superficie se extrae por medio de equipo para movimiento de tierra; la sobrecarga de suelo se retira y se guarda para reposición posterior. El área se puede rellenar y cubrir con vegetación después de extraer el carbón. En la explotación de depósitos más profundos con cantidades considerables de azufre y compuestos metálicos que han permanecido inertes en su entorno subterráneo a lo largo de las eras geológicas, la exposición de los minerales extraídos hacia el oxígeno y el agua inicia una serie de reacciones, en particular de oxidación y disolución, que antes no se podían producir. El resultado es la formación de óxidos de azufre (y por tanto de ácido sulfúrico), soluciones de metales, fenoles y otros compuestos diversos, muchos de los cuales son dañinos para el ambiente. Los apilamientos de carbón y los montones de escoria pueden generar cantidades considerables de estas sustancias, y es necesario controlar los lixiviados e impedir que penetren en aguas superficiales o subterráneas.

Un problema humano importante es la seguridad y la salud de quienes trabajan en las minas de carbón. Los problemas de seguridad en las minas son muy conocidos, y han ocurrido muchas pérdidas trágicas de vidas humanas en accidentes subterráneos. Menos espectacular, aunque igualmente devastador, es el grave daño a la salud humana de padecimientos como el pulmón negro, cuya causa es la exposición de los trabajadores a partículas o polvo en las minas de carbón.

Una preocupación relacionada y creciente es la exposición humana a los productos de la fabricación de combustibles sintéticos a partir de carbón. El carbón es en muchos sentidos un

TABLA 3-10 IMPACTOS AMBIENTALES DEL CARBÓN

Ambiente	Tipo de actividad			
	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Trasmisión	Uso y eliminación
Atmósfera	—	Emisiones de SO <sub>2</sub> y APN del procesamiento a combustible gaseoso o líquido	—	EMISIONES DE SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> y partículas
Hidrosfera	—	Dispersión de polvo de carbón PERCOLADO DE ÁCIDOS Y METALES Compuestos orgánicos formados con los combustibles sintéticos ("synfuels")	—	Efectos térmicos
Litosfera	—	Azolvamiento DESTRUCCIÓN POR EXPLOTACIÓN A CIELO ABIERTO Y HUNDIMIENTO Montones de escoria	—	Eliminación de cenizas finas
Impactos humanos	—	AFECCIONES PULMONARES SEGURIDAD EN LAS MINAS	—	Exposición a emisiones de hornos de combustión y de coque

combustible menos conveniente que el petróleo crudo o el gas natural. La conversión del carbón en un combustible líquido o gaseoso facilita su transporte, distribución y uso. Tradicionalmente, el carbón se ha utilizado para producir "gas de carbón" (una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno) en muchos países, aunque en el Reino Unido ha sido desplazado en tiempos recientes por el gas natural que se produce en el Mar del Norte y es más conveniente. En la actualidad se están haciendo muchas investigaciones encaminadas a la gasificación del carbón, un proceso de licuefacción que por lo general implica la conversión a alta temperatura, y en muchos casos a alta presión, del carbón en productos líquidos o gaseosos. Durante estos procesos, los compuestos orgánicos sintéticos que se forman suelen tener estructuras que no se presentan normalmente en el material orgánico biológico, y pueden ser muy tóxicos. Son notables los hidrocarburos aromáticos polinucleados (APN), los compuestos orgánicos nitrogenados y orgánicos azufrados, muchos de los cuales tienen olor desagradable. Si la conversión del carbón en combustibles gaseosos o líquidos desempeña un papel importante en las futuras economías energéticas, se pueden producir impactos ambientales significativos como consecuencia de la formación y dispersión de estas sustancias en los ambientes aéreos y acuáticos.

A medida que la demanda de electricidad aumenta y los sitios hidrológicos se explotan a toda su capacidad, y conforme se reduce la disponibilidad de petróleo, habrá de nuevo una tendencia hacia la utilización de carbón como fuente de energía eléctrica. Esto puede originar la emisión de grandes cantidades de óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, así como materia particulada en el entorno atmosférico. Se ha establecido sin lugar a dudas que las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno en la atmósfera durante un periodo prolongado dan por resultado la acidificación de las regiones en la dirección del viento, en muchos casos a varios cientos o miles de kilómetros de distancia. En este sentido es notable la acidificación de los lagos escandinavos a causa de emisiones procedentes de Europa central (en especial del valle del Ruhr) y del Reino Unido, y en Ontario y el estado de Nueva York debida a emisiones considerables en



Estados Unidos (de Ohio en particular). Son especialmente vulnerables los lagos con baja capacidad amortiguadora, es decir, que contienen sólo pequeñas cantidades de material alcalino natural, como ion bicarbonato, capaz de neutralizar el ácido que cae al lago con la lluvia o la nieve, o por depositación en seco. El problema de la acidificación, el cual se analiza en detalle en el capítulo 5, es quizá uno de los problemas ambientales más graves entre los que causa la energía. Se está destinando un esfuerzo técnico considerable a la invención de sistemas para quitar el azufre al carbón o a los gases de combustión. Por desgracia, es probable que estos procesos resulten muy costosos.

La generación de electricidad a partir de carbón implica una pérdida aproximada de dos tercios de la energía de la planta generadora en forma de calor residual. Este calor se disipa en los gases de combustión y en el agua de enfriamiento. La descarga del agua de enfriamiento puede producir "contaminación térmica" del entorno acuático local; por ejemplo, un lago o río puede sufrir una elevación anormal de temperatura. Son más graves las situaciones en las cuales un río está sujeto a un calentamiento repetido por parte de varias plantas generadoras. En condiciones de flujo bajo, en especial durante el verano, la temperatura del agua puede aumentar más allá de los límites tolerables para la vida acuática y el resultado puede ser una mortandad de peces. En estos casos es preferible el uso de aire como medio de enfriamiento, aunque en general es más costoso.

### 3.5.4 Impactos ambientales del desarrollo hidroeléctrico

La tabla 3-11 muestra los impactos ambientales del desarrollo hidroeléctrico. De todas las formas de producción de energía, la hidroeléctrica es quizá la menos dañina para el ambiente, en el sentido de que rara vez se producen efectos químicos. Los efectos principales son consecuencia de cambios a la región local debidos a inmersión de tierras, pérdida de hábitat animal y modificaciones de la hidrología local, por ejemplo, la alteración de las características de flujo de ríos y aguas freáticas. En ciertos casos puede haber problemas graves de azolvamiento. Se buscan cada vez en mayor proporción sitios hidroeléctricos remotos, muchas veces en áreas silvestres con una escasa población de residentes que dependen de la cacería con trampas y tienen un estilo de vida sencillo. Para ellos, la pérdida de sus tierras o la perturbación de su estilo de vida puede ser devastadora.

**TABLA 3-11 IMPACTOS AMBIENTALES DEL DESARROLLO HIDROLÓGICO**

Ambiente	Tipo de actividad			
	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Trasmisión	Uso y eliminación
Atmósfera	—	—	—	—
Hidrosfera	—	AZOLVAMIENTO, CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE FLUJO DE AGUAS DE SUPERFICIE Y SUBTERRÁNEAS	—	—
Litosfera	—	INMERSIÓN DE TIERRAS, PÉRDIDA DE HÁBITAT ANIMAL	Líneas de trasmisión	—
Impactos humanos	—	Perturbación del estilo de vida por pérdida de tierras	—	—

### 3.5.5 Impactos ambientales de la energía nuclear

La tabla 3-12 muestra los impactos ambientales de la energía nuclear. Es un problema de máxima importancia la contaminación ambiental por radionúclidos (resultado de la explotación de minas), de accidentes en los que ocurren descargas de combustible, de la falla del sistema del reactor nuclear o de la contaminación por el combustible agotado. En la mente de muchas personas, la cuestión de la energía nuclear está ligada íntimamente, aunque de manera irracional, con los horrores de Hiroshima, Nagasaki y la guerra nuclear en general. Ningún otro problema ambiental ha despertado una preocupación tan generalizada.

**TABLA 3-12 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA NUCLEAR**

Ambiente	Tipo de actividad			
	Exploración	Extracción, producción, procesamiento	Trasmisión	Uso y eliminación
Atmósfera	—	Accidentes Emisiones de radón de los desechos de las minas	—	—
Hidrosfera	—	Accidentes Percolado de desechos de minas	—	Efectos térmicos
Litosfera	—	Accidentes Contaminación por desechos de minas	Líneas de trasmisión	ELIMINACIÓN DEL COMBUSTIBLE AGOTADO Y LOS DESPERDICIOS
Impactos humanos	—	ACCIDENTES Y RIESGOS DE EXPLOSIÓN EN LA EXPLOTACIÓN DE MINAS Y OPERACIÓN DE PLANTAS MINERAS	Accidentes durante el transporte del combustible	Exposición a desperdicios TERRORISMO

A excepción de la explosión de 1986 en la estación nuclear de Chernobyl en Ucrania, los pocos accidentes en plantas de energía nuclear restantes, como la descompostura del reactor de Three Mile Island en Pensilvania en 1979, han ocasionado escapes insignificantes de material radiactivo y ningún fallecimiento registrado. Aun si se incluyen las víctimas de Chernobyl (31 muertes en el momento del accidente y 2,000 casos adicionales de cáncer estimados en Europa a lo largo de los 50 años siguientes),\* una pérdida de vidas y daños a la salud mucho mayores son atribuibles a la industria del carbón (véase también la sección 15.2.1).

Se han dado casos de exposición alta indeseable de mineros a materiales radiactivos, tanto en la mina como en el procesamiento de minerales. Además, los desechos de la mina pueden contener radiactividad residual, aunque de bajo nivel, y en ciertos casos estos desechos no se han eliminado de forma apropiada. Existe gran preocupación por el problema de eliminar o volver a procesar el combustible agotado. Este combustible es muy radiactivo y continuará siéndolo durante siglos. El procesamiento del combustible para asegurar que ésta y las futuras

\* Editorial, London Free Press, Ontario, 26 de marzo de 1987.

generaciones no corran peligro de exposición es un desafío tecnológico considerable, y un reto sociopolítico aún mayor. Un aspecto preocupante es la posibilidad de terrorismo por parte de personas inconformes que podrían obtener cierta cantidad de material radiactivo. Al igual que en el caso de la generación de electricidad a partir de carbón, puede haber un efecto térmico en el agua local que se usa para fines de enfriamiento. La eliminación de desperdicios nucleares se analiza más a fondo en el capítulo 15.

**Ejemplo 3.2**

Una estación generadora de electricidad de 100 MW que consume carbón opera con una eficiencia de 33% al quemar carbón que contiene 5% de ceniza y 2% de azufre. Suponga para el carbón un contenido calorífico de 30 kJ/g. Si el 95% de las cenizas y el 50% del azufre se capturan antes que se emitan por la chimenea, calcule (a) la tasa de emisión a la atmósfera de cenizas y azufre (en SO<sub>2</sub>), en g/s, y (b) el volumen de SO<sub>2</sub> que se genera a 20°C y presión atmosférica. (c) Si el azufre se emite en un área urbana de aire estancado de 500 m de altura y 5 km de diámetro, ¿cuánto tiempo se requiere para que la concentración de SO<sub>2</sub> alcance el nivel indeseable de 0.3 ppm (partes por millón en peso)?

**Solución** (Se requiere conocer las secciones 6.3.2 y 6.4.1)

$$(a) \quad \text{Uso de carbón} = \frac{100 \times 10^6 \text{ J/s}}{30 \times 10^3 \text{ J/g} \times 0.33} = 1.0 \times 10^4 \text{ g/s}$$

	Extraída	Emitida
Producción de ceniza = $1 \times 10^4 \times 0.05 = 500 \text{ g/s}$	475 g/s	25 g/s
Producción de azufre = $1 \times 10^4 \times 0.02 = 200 \text{ g/s}$	100 g/s	100 g/s

(b) El peso molecular del SO<sub>2</sub> es 64. Por tanto,

$$100 \text{ g/s SO}_2 = \frac{100}{64} = 1.56 \text{ mol}$$

De la ecuación (6.41),

$$\begin{aligned} \text{Volumen de SO}_2 &= \frac{nRT}{P} = \frac{1.56 \text{ (mol)} \times 8.314 \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K)} \times 293 \text{ (K)}}{101,325 \text{ (Pa)}} \\ &= 0.037 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$(c) \quad \text{Volumen de aire} = 500 \times \frac{\pi}{4} (5000)^2 = 0.98 \times 10^{10} \text{ m}^3$$

$$\text{Concentración de SO}_2 = \frac{\text{volumen de SO}_2}{\text{volumen de aire}}$$

$$\text{Volumen de SO}_2 \text{ para } 0.3 \text{ ppm} = \frac{0.98 \times 10^{10} \times 0.3}{10^6} = 2.94 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo para alcanzar } 0.3 \text{ ppm de SO}_2 &= \frac{\text{volumen de SO}_2 \text{ en m}^3}{\text{tasa de emisión de SO}_2 \text{ (m}^3/\text{s)}} = \frac{2.94 \times 10^3 \text{ (m}^3)}{0.037 \text{ (m}^3/\text{s)}} \\ &= 7.95 \times 10^4 \text{ s} = 22 \text{ h} \end{aligned}$$

**Ejemplo 3.3**

Una refinería de petróleo procesa 100,000 barriles de petróleo crudo al día y opera con una eficiencia energética de 90%. El petróleo y los productos derivados de él tienen un contenido de energía de 35 MJ/L.

- (a) ¿Cuáles son los flujos de energía y combustible a y desde esta refinería, en J/día?
- (b) Si el petróleo se suministra por una tubería en la cual fluye a 0.8 m/s, ¿qué diámetro de tubo se requiere?
- (c) Si la refinería guarda una provisión de petróleo para 5 días (en caso de interrupción del suministro), ¿cuál es el volumen de los tanques de almacenamiento necesarios? Sugiera sus dimensiones, suponiendo que los tanques son cilindros cuya altura es la mitad de su diámetro. Un barril de petróleo equivale a 159 L.

### Solución

(a)  $100,000 \text{ bbl/día} = 159 \times 10^5 \text{ L/día de petróleo} = 159 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{día de petróleo}$

Producto:  $90,000 \text{ bbl/día (al 90\% de eficiencia)} = 143 \times 10^5 \text{ L/día de producto}$   
 $= 14,300 \text{ m}^3 \text{ de producto}$

Entrada de energía:  $159 \times 10^5 \text{ L/día} \times 35 \times 10^6 \text{ J/L} = 5.57 \times 10^{14} \text{ J/día}$

Salida de energía: al 90% de eficiencia =  $5.01 \times 10^{14} \text{ J/día}$

- (b) El gasto de la tubería es  $Q = uA$ , donde la velocidad  $u = 0.8 \text{ m/s}$  y el gasto  $Q = 159 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{día}$ . Por tanto, el área del tubo es

$$A = \frac{Q}{u} = \frac{159 \times 10^2 \text{ (m}^3/\text{día)}}{24 \times 3600 \text{ (s/día)} \cdot 0.8 \text{ (m/s)}}$$

$$= 0.23 \text{ m}^2 = 2300 \text{ cm}^2$$

y el diámetro  $D = 54 \text{ cm}$ .

- (c) El volumen de los tanques de almacenamiento necesarios para una provisión de petróleo para 5 días es

$$V = 159 \times 10^2 \times 5 = 7.95 \times 10^4 \text{ m}^3$$

Elija 10 tanques, cada uno con un volumen de  $7950 \text{ m}^3$  y una altura de  $d/2$ . Entonces

$$\text{volumen del tanque} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{2}$$

Por tanto,

$$d = \sqrt[3]{\frac{7950 \times 2 \times 4}{\pi}} = 27.3 \text{ m}$$

Así pues, se necesitan 10 tanques de 27.3 m de diámetro y 13.6 m de altura.

### 3.6 ESTUDIO DE CASO: LA SITUACIÓN ENERGÉTICA DE CANADÁ

En el futuro será cada vez más difícil para los países equilibrar sus necesidades de energía con el suministro de ésta. Que esto se puede conseguir en forma regional ha sido demostrado por la *Florida Power and Light Corporation*, la cual da servicio a una gran parte del estado. En escala nacional, ni Estados Unidos ni Canadá han elaborado una política energética integral de

largo plazo. La situación energética de Canadá servirá para ilustrar la dificultad que representa poner en práctica un plan de esta naturaleza. Canadá es uno de los pocos países industrializados del mundo con el potencial para ser autosuficiente en el suministro de energía a largo plazo. La razón fundamental es que este país, con su gran masa de tierras y su población relativamente pequeña, está bien dotado de recursos naturales, entre ellos petróleo crudo, gas natural, arenas petrolíferas, carbón, uranio y potencial hidroeléctrico. Desafortunadamente, casi todas las áreas ricas en recursos están separadas por grandes distancias de las principales regiones consumidoras del país. Esto no sólo incrementa los costos de transporte, sino que, como hay un comercio interprovincial, el gobierno federal interviene en la administración de los recursos y en la política impositiva. En consecuencia, en el pasado se han producido confrontaciones entre el gobierno federal y el provincial en relación con cuestiones como precios, reparto de ingresos, incentivos a la exploración y propiedad de los recursos subacuáticos, todo ello en detrimento del público consumidor. Por consiguiente, no hay certeza en cuanto a que a largo plazo el país alcance alguna vez la autosuficiencia energética.

El National Energy Board (Consejo Nacional de Energía) de Canadá ha informado respecto al posible suministro y demanda de energía canadiense en el periodo 1980-2000 (NEB, 1981). Los resultados ilustran la naturaleza de los problemas y las incertidumbres que se pueden presentar en la provisión de futuros suministros de energía.

La demanda de energía primaria en Canadá en 1980 fue de 10.3 EJ. Suponiendo un crecimiento de población de 1.0% anual en promedio y un aumento anual de 3.2% en el gasto nacional bruto real durante el periodo 1980-2000, las necesidades de energía podrían crecer hasta 16.2 EJ para el año 2000 (NEB, 1981). Las demandas se satisfarían como se muestra en la figura 3-15. Una gran parte del carbón que se produce, así como algo de petróleo y gas natural, se quema para producir electricidad. El papel total de la electricidad en el cuadro de la demanda energética se muestra en la figura 3-16.

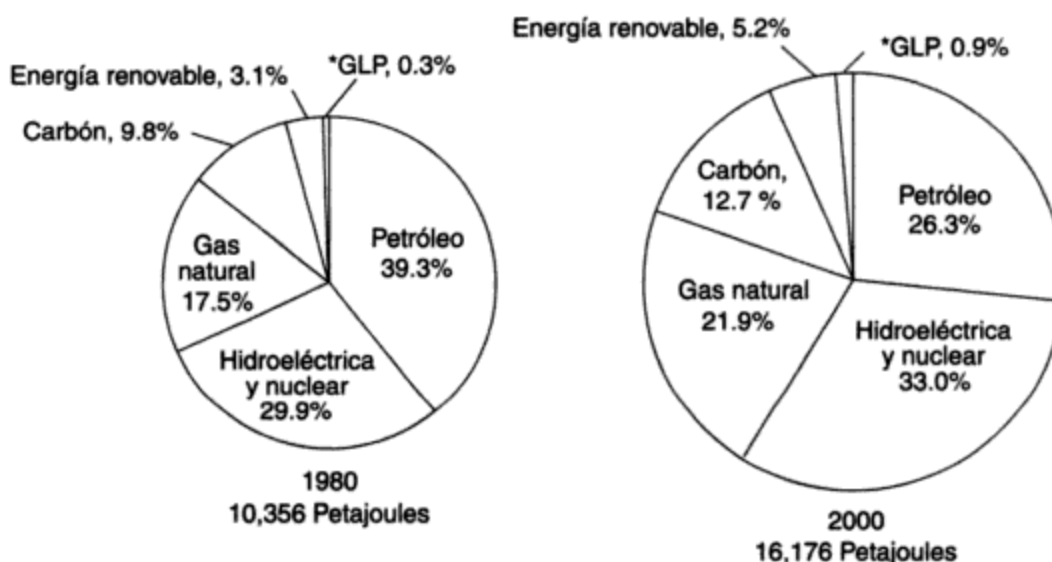
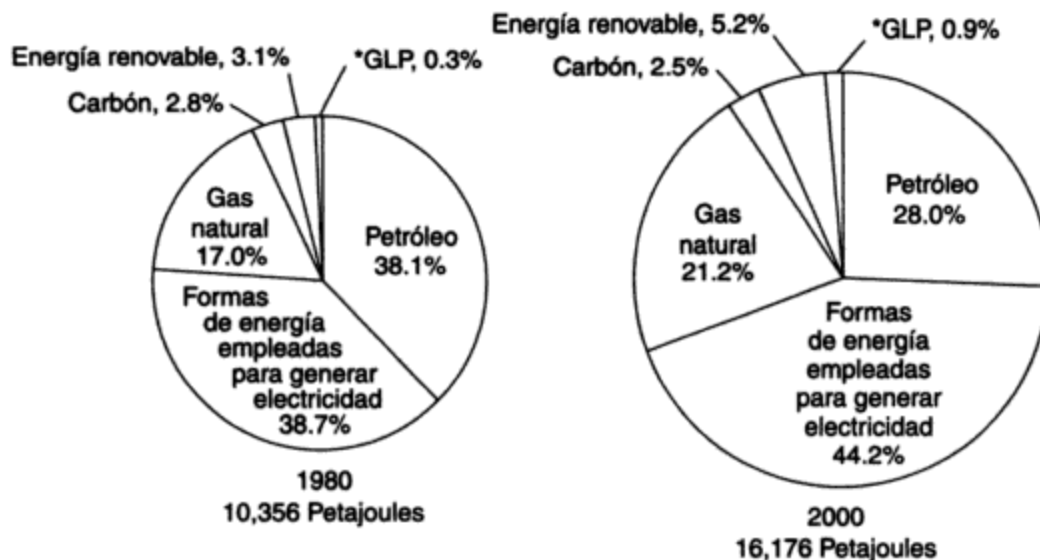


Figura 3-15 Demanda de energía primaria en Canadá. Fuente: NEB (1981).

\*Gases licuados de petróleo de plantas de gas únicamente.



**Figura 3-16** Demanda de energía primaria en Canadá. Se muestra el papel total de la electricidad. Fuente: NEB (1981).

\*Gases licuados de petróleo de plantas de gas únicamente.

Dos componentes importantes en el lado del suministro para el futuro son el petróleo y el gas natural. La ubicación de las fuentes principales se muestra en la figura 3-17. Si comparamos el planteamiento de provisión base del NEB para petróleo crudo y productos equivalentes con sus supuestos de demanda media, vemos que la demanda superará al suministro en 183,000 m<sup>3</sup>/día en el año 2000, como se muestra en la figura 3-18. Desde luego, el nivel de importaciones necesarias se podría reducir de manera significativa si los precios del petróleo, que se derrumbaron bruscamente en 1986, se recuperaran al nivel en el cual se podrían hacer inversiones rentables en nuevas plantas de recuperación de arenas petrolíferas. Sin embargo, en tanto esa recuperación no se produzca, es poco probable que se alcance la curva de suministro base modificada de la figura. Por consiguiente, la curva de suministro base parece la más probable de momento.

El aprovisionamiento doméstico de gas natural es más alentador. Al concluir el año de 1985, las reservas establecidas se estimaban en un total de 77.4 EJ (NEB, 1987). Así pues, las tasas de producción de 1985 de alrededor de 2.7 EJ/año equivalen a casi 30 años de suministro. Si toda la capacidad de producción disponible se utilizara, las reservas fronterizas y subacuáticas del Mar de Beaufort, las Islas Árticas y la costa atlántica no se necesitarían antes del 2000. Sin duda, se harán nuevos descubrimientos de gas que alargarán el periodo de fuerte dependencia de Canadá respecto al gas natural. No obstante, los prospectos de que continúe la exportación de grandes volúmenes de gas natural a Estados Unidos más allá del año 2000 parecen inciertos.

En 1985, Canadá disfrutó de un balance comercial positivo en materias primas energéticas, como se indica en la tabla 3-13. La entrada neta de dólares al país, derivada del comercio energético, fue de \$11,000 millones (canadienses), cercana a la entrada de \$14,500 millones por el comercio total de mercancías. El cuadro del comercio energético deberá permanecer saludable

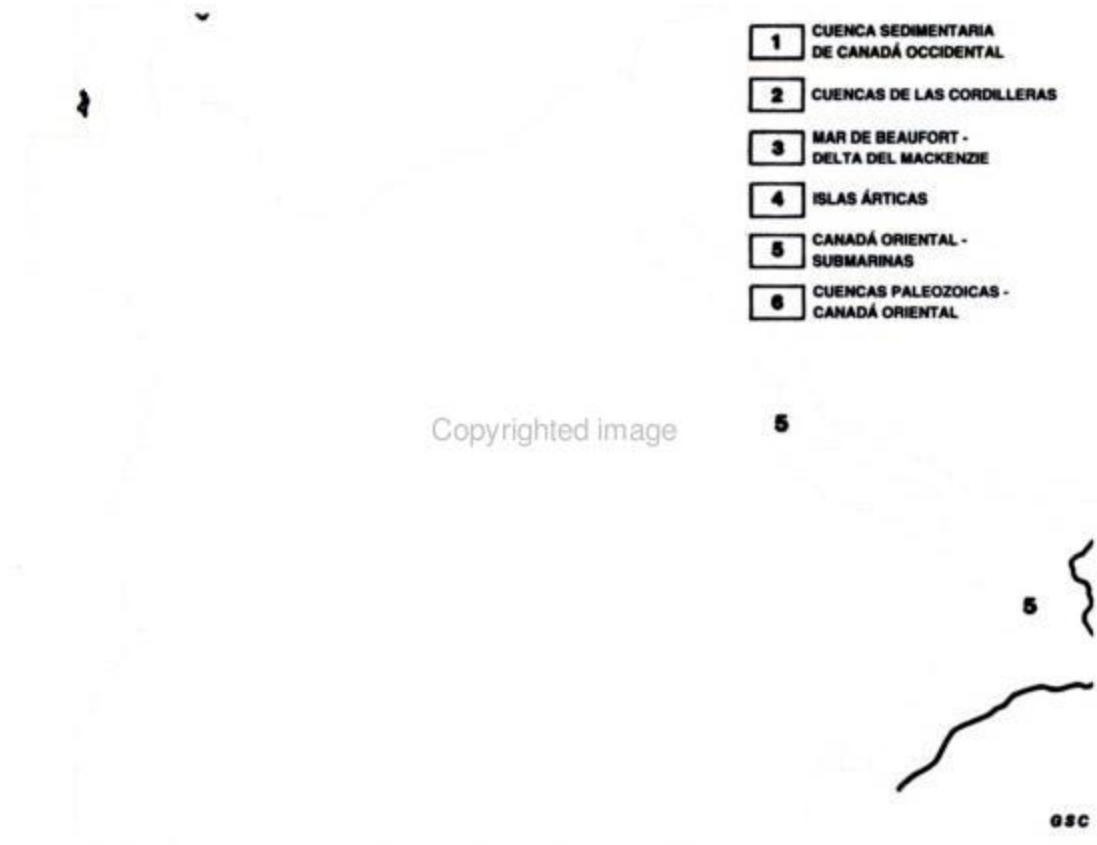


Figura 3-17 Regiones de Canadá con recursos de petróleo y gas. Fuente: Procter et al. (1984).

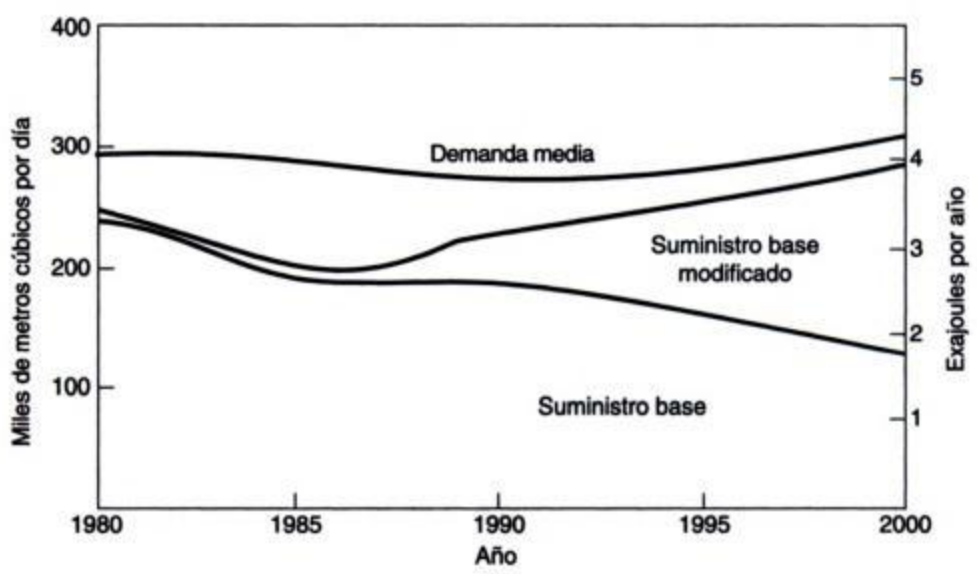


Figura 3-18 Suministro y demanda de petróleo crudo y productos equivalentes en Canadá. Fuente: NEB (1981).

en la década de 1990, cuando es probable que se reduzcan las exportaciones de petróleo y gas natural. Para entonces es posible que Canadá tenga que importar grandes cantidades de petróleo crudo de origen subacuático.

**TABLA 3-13 COMERCIO ENERGÉTICO DE CANADÁ, 1985 (MILLONES DE DÓLARES CANADIENSES)**

	Exportaciones	Importaciones	Balance
Petróleo crudo	5,930	3,701	2,229
Productos de petróleo	2,318	1,419	899
Gas natural	3,912	—	3,912
Gases licuados de petróleo	991	122	869
Carbón	1,996	887	1,109
Productos de carbón	34	136	-102
Electricidad	1,408	8	1,400
Uranio	822	28	794
Total	17,411	6,301	11,110

Fuente: EMR (1986).

Otros países industrializados del mundo buscarán también aprovisionamiento de petróleo de fuentes que quizá no estarán en condiciones de suministrar el total requerido. Por tanto, los políticos canadienses pueden verse obligados a responder en el futuro cercano una cuestión que se debió haber resuelto hace muchos años: cómo asegurar que el vasto potencial del país en arenas petrolíferas, carbón, uranio y fuentes hidroeléctricas se pueda desarrollar y utilizar con el objetivo de alcanzar en último término la autosuficiencia energética.

Otros países enfrentarán decisiones más críticas en cuanto a necesidades de energía que Canadá o Estados Unidos, y los problemas desde una perspectiva global serán mayores. La necesidad de una planeación mundial cooperativa del uso de energía, el crecimiento de la población, así como la protección del ambiente, no se pueden hacer a un lado de manera indefinida si se quieren evitar graves convulsiones económicas y sociales.

## PROBLEMAS

- 3.1. Enumere las fuentes de energía renovables y no renovables.
- 3.2. Enumere según su punto de vista las fuentes de energía disponibles para el mundo en la actualidad y de aquí a 40 años en orden decreciente de importancia (véase la figura 3-12).
- 3.3. Si estuviera usted encargado del diseño de un tanque cilíndrico para contener la provisión para un día del consumo mundial de petróleo crudo, ¿qué dimensiones tendría que especificar? Suponga que la altura del tanque es la mitad de su diámetro.
- 3.4. ¿Qué volumen de combustible de uranio se necesitaría para suministrar la misma cantidad de energía térmica del problema 3.3? Esto a partir de reactores de energía alimentados con uranio natural que operan con un consumo de combustible de 7,300 MWd (térmicos)/tonelada de uranio. (Suponga que la densidad del uranio es de 9,300 kg/m<sup>3</sup>.)



- 3.5. Como proyecto de grupo, elabore un estudio de caso similar al que se expone en este capítulo para Canadá, aplicado al país que usted elija.
- 3.6. La planta de arenas petroleras Syncrude del norte de Alberta fue proyectada para producir 129,000 barriles por día de petróleo crudo sintético. Suponga que toda esta producción se entrega a una planta de energía alimentada con petróleo en Edmonton, la cual opera con una eficiencia de 35% y un factor de capacidad\* de 80%. ¿Cuál sería la producción eléctrica bruta de la planta de energía?
- 3.7. ¿Cuánto ha aumentado el consumo mundial de energía durante el siglo XX, y por qué ha crecido de esa manera?
- 3.8. Nombre los tres países productores de petróleo crudo más grandes del mundo en 1991 y tabule su producción. ¿Exportó alguno de los tres petróleo crudo? De ser así, ¿cuánto?
- 3.9. Un edificio de oficinas tiene 500 trabajadores, cada uno de los cuales pasa 8 horas en el edificio 5 días por semana. Existen 150 máquinas de oficina, cada una de las cuales genera 500 W durante 5 horas por día laborable. Calcule la cantidad anual (52 semanas) de energía que generan los trabajadores y las máquinas suponiendo una "energía" por trabajador de 100 W. Si a cada trabajador se le pagaran 3 centavos de dólar/kWh por el calor suministrado, ¿cuál sería el pago total anual y el pago por trabajador?
- 3.10. Un país con un área de 200,000 km<sup>2</sup> tiene un consumo anual de energía de 10<sup>15</sup> Btu/año. Calcule los watts totales de radiación solar, combustibles y alimentos para un país con una densidad media de 1 persona/km<sup>2</sup>. Suponga un consumo de alimentos de 8 MJ/persona · día y una radiación solar de 150 W/m<sup>2</sup> que alcanza el suelo.
- 3.11. Una persona que vive y trabaja en una granja consume 500,000 MJ de energía por año, de la cual el 40% es petróleo, el 10% es carbón, el 20% es gas natural, el 5% es madera y el 25% es electricidad. Calcule los volúmenes de combustible que usa anualmente (excepto la electricidad).
- 3.12. Una planta generadora de electricidad debe producir 200 MW de electricidad a partir de carbón. Suponiendo que opera con una eficiencia térmica de 35%, calcule la utilización de carbón en toneladas anuales considerando que el carbón tiene un contenido calorífico de 30 kJ/g. Si el flujo de agua de enfriamiento acepta el 65% de calor no convertido y su temperatura sube 5°C, ¿cuál debe ser el flujo de agua de enfriamiento en metros cúbicos por segundo? La capacidad calorífica del agua es de 4.18 J/g · °C y su densidad es de 1,000 kg/m<sup>3</sup>.
- 3.13. (a) Seleccione un complejo de desarrollo energético como una refinería de petróleo, una presa hidroeléctrica, una estación generadora de electricidad o una mina de carbón en un área conocida para usted. Calcule los flujos de energía que se producen en el complejo con base en datos de rendimiento publicados, como la producción o el "wattaje" de una refinería.
- (b) Compile una matriz de impactos ambientales para el complejo de la parte (a); enumere todos los impactos e identifique las tecnologías que se han instalado (por ejemplo, tratamiento de aguas residuales).
- 3.14. Elabore una matriz de impactos ambientales para un proyecto hidroeléctrico bajo los encabezados siguientes: preparación del emplazamiento; depósito; presa; transmisión de energía.
- 3.15. Se ha construido una estación generadora de 1,000 MW alimentada con carbón en el lago Erie para servir a un área de crecimiento industrial. Elabore una matriz de impactos ambientales para esta estación bajo los encabezados de almacenamiento de carbón; quema de carbón; generación de vapor; distribución de energía. Identifique los controles ambientales que se deben instalar.

\* Factor de capacidad = producción real de energía + producción perfecta.

## REFERENCIAS

- BARNEY, G. O. *The Global 2000 Report to the President of the United States*. Washington, D.C.: Pergamon Press, 1980.
- BISWAS, A. K. *Energy and Environment*. Ottawa: Environment Canada, 1973.
- British Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy*. Londres: British Petroleum Company, 1986.
- British Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy*. Londres: British Petroleum Company, 1992.
- CARSON, R. *Silent Spring*. Nueva York: Fawcett Crest, 1962.
- CHIGIER, N. *Energy, Combustion and Environment*. Nueva York: McGraw-Hill, 1981.
- EMR, *Current Energy Statistics*. Ottawa: Mines and Resources, Canadá, 1986.
- EMR, *Current Energy Statistics*. Ottawa: Energy, Mines and Resources, Canadá, 1987.
- EMR, *Current Energy Statistics*. Ottawa: Energy, Mines and Resources, Canadá, 1993.
- FOWLER, J. M. *Energy and the Environment*. Nueva York: McGraw-Hill, 1975.
- FRISCH, J. R. "Energy Abundance: Myth or Reality?" Trabajo presentado en el 13<sup>er</sup> congreso de la World Energy Conference, Cannes, Francia, octubre de 1986.
- FRISCH, J. R. "Energy 2000-2020: World Prospects and Regional Stresses". Trabajo presentado en la World Energy Conference, Londres, 1983.
- HAFELE, W. *Energy in a Finite World: Global Systems Analysis*, vol. 2, Cambridge, Mass.: Ballinger, 1981.
- LEOPOLD, L. B., CLARKE, F. E., HANSHAW, B. B., y BALSEY, J. R. "A Procedure for Evaluating Environmental Impact". U.S. Geological Survey Circular 654. Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office, 1971.
- MALINS, D. C. (ed.). *Effects of Petroleum on Arctic and Subarctic Marine Environments and Organisms*, vols. 1 y 2. Nueva York: Academic Press, 1977.
- MUNN, R. E. *Environmental Impact Assessment, Scope 5*. Toronto: Wiley, 1979.
- NEB. *Annual Report 1986*. Ottawa: National Energy Board of Canada, 1987.
- NEB. *Annual Report 1990*. Ottawa: National Energy Board of Canada, marzo de 1991.
- NEB. *Annual Report Supplement 1991*. Ottawa: National Energy Board of Canada, agosto de 1992.
- NEB. *Canadian Energy Supply and Demand, 1980-2000*. Ottawa: National Energy Board of Canada, 1981.
- NELSON-SMITH, A. *Oil Pollution and Marine Ecology*. Nueva York: Plenum Press, 1973.
- PROCTER, R. M., TAYLOR, G. C. y WADE, J. A. "Oil and Natural Gas Resources of Canada". *Geological Survey Paper 83-31*. Ottawa: Energy, Mines and Resources, Canadá, 1984.
- PUTNAM, P. C. *Energy in the Future*. Nueva York: Van Nostrand, 1953.
- TUVE, G. L. *Energy, Environment, Populations and Food*. Nueva York: Wiley, 1976.
- WORLD BANK. *World Development Report*. Londres: Oxford University Press, 1981.
- WORLD ENERGY CONFERENCE. *Survey of Energy Resources*. Oxford: Holywell Press, 1986.
- WYATT, A. *The Nuclear Challenge*. Toronto: Book Press, 1978.

# CAPÍTULO 4

---

## Peligros ambientales naturales

*Ian Burton*

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Los peligros ambientales naturales son las condiciones o procesos del ambiente que dan origen a pérdida de vidas o daños económicos en poblaciones humanas. Los peligros naturales se distinguen de las perturbaciones ambientales humanas por el hecho de que deben su origen al medio natural, no a las acciones humanas. Los peligros naturales más importantes comprenden inundaciones, sequías, terremotos, tornados e incendios no provocados por el hombre. Son ejemplos de perturbaciones ambientales humanas la contaminación del aire, la del agua, la eliminación inadecuada de residuos tóxicos, los peligros asociados con la falla de los componentes manufacturados de nuestro entorno (por ejemplo, el derrumbe de un edificio o de un puente) y la emisión accidental de radiación de una estación generadora nuclear o de cloro gaseoso de un carro cisterna en el descarrilamiento de un tren.

Esta distinción entre perturbaciones naturales y humanas es útil porque sugiere hacia dónde se debe dirigir la atención cuando se intenta atemperar o controlar los peligros. Al examinar los riesgos de inundación, por ejemplo, es sin duda necesario concentrar la atención en los procesos naturales de precipitación, drenaje y comportamiento de corrientes para mitigar sus efectos. Cuando se examinan problemas de contaminación o peligros tecnológicos, son los procesos industriales y el diseño de los sistemas de ingeniería los que demandan atención,

además de los procedimientos naturales a los que afecta la contaminación. Entender los procesos naturales es una parte necesaria del manejo de los peligros naturales, pero, como se muestra más adelante, no basta por sí mismo porque los peligros naturales no son totalmente "naturales" (Hewitt, 1983) ni las perturbaciones ambientales humanas se deben por completo a las actividades de la gente. Esta cuestión se examina con mayor profundidad después de describir el problema de los peligros naturales.

El tema de los peligros ambientales naturales debe su importancia a dos hechos. Primero, los daños y la pérdida de vidas que sufre la sociedad son sucesos catastróficos que hacen de los peligros naturales un problema destacado para las personas expuestas al riesgo y para sus gobiernos. Segundo, en el campo del control ambiental el historial más grande se encuentra en los registros de cómo han hecho frente las personas a los peligros naturales. Los estudios de esa experiencia son una fuente potencial de comprensión y conocimientos para encontrar formas eficaces de encarar los problemas ambientales identificados en los tiempos más recientes y que se tratan en otros capítulos.

## 4.2 CLASIFICACIÓN Y MEDICIÓN DE PELIGROS NATURALES

Es evidente que los peligros naturales comprenden una amplia gama de fenómenos diferentes. Éstos se pueden clasificar de acuerdo con el proceso causal principal de cada uno (tabla 4-1). En este capítulo enfocaremos nuestra atención, en primer término, a los peligros geofísicos más que a los biológicos; algunos de estos últimos se tratan en el capítulo 8. Los peligros geofísicos se pueden separar en los que tienen relación con procesos atmosféricos (fenómenos climáticos y meteorológicos) y los que están conectados con los procesos geológicos y geomorfológicos de la corteza y la superficie terrestres.

**TABLA 4-1** CLASIFICACIÓN DE LOS PELIGROS NATURALES POR UN AGENTE CAUSAL PRINCIPAL

Geofísico		Biológico	
Climático y meteorológico	Geológico y geomórfico	Por flora	Por fauna
Nieve y hielo	Avalanchas	Enfermedades fúngicas (p. ej., pie de atleta, grafiosis del olmo, enfermedad del tallo del trigo, moho)	Enfermedades bacterianas y virales (p. ej., influenza, paludismo, viruela, rabia)
Sequías	Sismos	Infestaciones (p. ej., yerbas, freatofitos, jacinto de agua)	Infestaciones (p. ej., de conejos, termitas, langostas)
Inundaciones	Erosión (incluso erosión de suelos, de litorales y playas)	Fiebre del heno	Mordeduras de animales venenosos
Niebla	Desprendimientos de tierra	Plantas venenosas	
Heladas	Arenas móviles		
Granizo	Tsunamis		
Ondas cálidas	Erupciones volcánicas		
Ciclones tropicales			
Rayos e incendios			
Tornados			

Fuente: Adaptado de Burton y Kates (1964).

La investigación de los peligros naturales se asigna a diferentes disciplinas científicas. Así, los meteorólogos e hidrometeorólogos estudian el tiempo, la formación y comportamiento de las tormentas, la intensidad de la precipitación pluvial y otros factores que dan origen a inundaciones. Los hidrólogos se ocupan de la magnitud y frecuencia de las inundaciones y de su predicción. Los campos de la geología y la geofísica se subdividen en especializaciones como la sismología (que se ocupa de los terremotos), la vulcanología (que tiene que ver con los volcanes) y la geomorfología (que trata la erosión y los derrumbes). Por lo común, estos especialistas estudian los mecanismos y procesos físicos básicos y se ocupan menos del control y el manejo de los peligros relacionados. Esto da origen a ciertas diferencias fundamentales de enfoque, ejemplificadas por los intentos para crear escalas de medición de los peligros naturales. Se necesitan diferentes tipos de mediciones para propósitos distintos.

¿Cómo se miden los peligros naturales? Son dos los enfoques principales. El primero se orienta al proceso geofísico y procura medir sus dimensiones por volumen o energía. El segundo examina los efectos e intenta medirlos. La diferencia entre estos enfoques se aprecia con claridad en las dos escalas que se han ideado para medir los terremotos (véase la figura 4-1). La *escala de Richter* mide los terremotos en términos de la energía liberada, en ergs.\* Se mide con un sismógrafo, que es un instrumento muy delicado calibrado de modo que la magnitud del desplazamiento de una plumilla refleja la cantidad de energía liberada como la transmiten las ondas sísmicas. La gama de magnitudes de los terremotos es muy grande, desde la vibración más tenue que sólo detecta un instrumento y no es percibida de manera directa por los seres humanos, hasta movimientos masivos que derriban edificios enteros. Para dar cabida a esta gama, la escala de Richter está construida de forma logarítmica, lo cual usualmente causa confusión al momento de interpretarla. Los informes noticiosos de terremotos emplean por lo común la escala de Richter. Esta escala transmite muy poca información, excepto para los expertos, puesto que por ejemplo, probablemente el público suponga que un terremoto de 6 grados en la escala de Richter es sólo dos veces más fuerte que uno de 3. Por consiguiente, se puede crear una impresión enteramente engañosa.

Por otra parte, la *escala de Mercalli Modificada* intenta medir no el terremoto mismo, sino su efecto en las personas. Un terremoto se designa como número V si tiene la intensidad suficiente para ser percibido por la mayoría de las personas y causa daños a vidrios y revoques. En el nivel X, un terremoto causa daños a muchas estructuras y la destrucción de algunas de ellas.

La diferencia fundamental entre los dos enfoques proviene de los diferentes objetivos del científico geofísico (escala de Richter) y del encargado de manejar los peligros (escala de Mercalli Modificada). Cuando y dondequiera que se produzca, un terremoto de 6.5 en la escala de Richter siempre implica la misma liberación de energía. La medición es estandarizada y universal; existe independientemente de la presencia de asentamientos humanos en la zona del terremoto. El *efecto* de dos terremotos puede no guardar relación con su nivel respectivo en la escala de Richter. Un terremoto muy fuerte (de 7 en la escala de Richter) puede causar menos daños en un área escasamente poblada que un terremoto mucho más débil en un área de asentamiento

\* Un *erg*, unidad de trabajo en el sistema centímetro-gramo-segundo, es el trabajo que efectúa una fuerza de 1 dina que actúa en la dirección de la fuerza a lo largo de una distancia de 1 centímetro. Una dina es la fuerza que, al actuar durante un segundo sobre una masa de 1 gramo, le proporciona una aceleración de 1 centímetro por segundo cuadrado.

Escala de efecto (Mercalli Modificada)												
Número de Mercalli Modificado	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Percibido por::	Personas			Casi todas								
Daños a:	Ninguna	Pocas	Algunas	Muchas	Vidrio Revoques	Muebles Chimeneas	Estructuras			Muchas	Casi todas	Todas
Destrucción de:							Deficientes	Ordinarias	Resistentes	Algunas	Muchas	Casi todas

Escala de energía (Richter)							
Número de Richter	1-2	3	4	5	6	7	8
Liberación de energía en ergs:	$4.47 \times 10^{12}$	$7.94 \times 10^{14}$	$2.51 \times 10^{16}$	$7.94 \times 10^{17}$	$2.51 \times 10^{19}$	$7.94 \times 10^{20}$	$2.51 \times 10^{22}$
En múltiplos de la base	1-31.6	1,000	31,600	1,000,000	31,600,000	1,000,000,000	31,600,000,000

**Figura 4-1** Comparación de las escalas de Richter y de Mercalli Modificada para magnitud de sismos. *Fuente:* The Environment as Hazard, por Ian Burton, Robert W. Kates y Gilbert F. White. Derechos reservados © por Oxford University Press, Inc. Reproducido con autorización.

humano concentrado. La ventaja de la escala de Richter, por tanto, es su aplicabilidad universal sobre una base constante en cualquier lugar del mundo. Su gran desventaja es que no trasmite información alguna acerca de la magnitud real de los daños producidos.

El efecto de un sismo medido por la escala de Mercalli Modificada refleja a la vez el carácter del asentamiento humano en la zona del terremoto y la intensidad del mismo. Los edificios mal construidos o los ubicados en pendientes o suelos inestables tienen probabilidad de sufrir mayores daños que aquellos con construcción y cimentación adecuadas. Medido en estos términos, el terremoto registra un nivel más alto o más bajo en la escala de Mercalli Modificada de acuerdo con la calidad de la construcción. Por consiguiente, esta escala proporciona una medida del efecto a expensas de la pérdida de la universalidad de la escala de Richter. Ambas escalas son útiles, pero no hay manera de convertir una en otra de forma confiable. La escala de Richter es una escala para geofísicos; la de Mercalli Modificada está destinada al encargado de manejar los peligros.

Existen problemas similares de medición para los demás peligros naturales. En casi todos los casos se dispone de un equivalente de la escala de Richter. Así, los ciclones tropicales se miden en términos de su presión central, del gradiente de presión del centro a la periferia de la tormenta, de la velocidad del viento y la rapidez de movimiento del sistema meteorológico entero. Las inundaciones se miden, por lo general, en términos de la descarga de agua en un punto determinado del río y del aumento y el descenso de los niveles de agua reflejados en un gráfico fluviométrico de crecida. Las ventiscas se miden de acuerdo con la profundidad de la

acumulación de nieve y las velocidades del viento asociado. Existen pocos equivalentes de la escala de Mercalli Modificada para otros peligros, y habitualmente se emplean estimados monetarios de los daños. Esto refleja, en parte, el énfasis del interés científico en los procesos geofísicos mismos. Es más importante la dificultad para elaborar escalas de efecto para ciertos peligros naturales. Por ejemplo, el efecto de una fuerte tormenta de nieve en una ciudad grande, medida en profundidad de acumulación de nieve y en velocidad del viento, tendrá un nivel de efecto diferente de acuerdo con una serie de factores que se enumeran en la tabla 4-2. Esta variabilidad se aplica a otros peligros naturales. Por ejemplo, el volumen de descarga de un río puede tener poca o ninguna relación con la cantidad de daños por inundación; el déficit de humedad medido por el método de balance de agua de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1955) o el índice de sequía de Palmer (Palmer, 1965) no miden los daños reales sufridos por la agricultura. Estas dos medidas de deficiencia de humedad son escalas climáticas que no toman en cuenta la resistencia a la sequía de diversos cultivos o los métodos de cultivo utilizados.

**TABLA 4-2 FACTORES QUE AFECTAN EL IMPACTO DE LAS TORMENTAS DE NIEVE EN LAS ÁREAS URBANAS**

Frecuencia de las tormentas de nieve fuertes	Cuanto más frecuentes son, más preparada está la ciudad y menor es el efecto por unidad de nevada.
Pendiente del terreno, en especial en calles y carreteras	Las acumulaciones de nieve en calles con pendiente originan trastornos mucho mayores del tránsito que cantidades similares de nieve en suelos horizontales.
Momento en que se producen	Las tormentas de nieve que se producen durante la noche o a la mitad del día tienen menos efectos en el tránsito que las que ocurren en horas pico. Las tormentas que se presentan durante el fin de semana afectan menos el tránsito que las que acaecen entre semana.
Nivel de temperatura asociado	A temperaturas cercanas a la congelación, la aplicación de sal a las carreteras las despeja rápidamente. A temperaturas más bajas, es necesario palear y quitar físicamente la nieve.
Disponibilidad de transporte público	Una ciudad con un sistema de tránsito bien desarrollado, que incluye un sistema de tren subterráneo, tiene un medio de transporte alternativo no disponible en las ciudades que dependen en mayor grado del automóvil privado.

En términos generales se carece de buenas escalas de medición para el efecto de los peligros naturales. El mejor criterio disponible es la pérdida económica o los daños. La dificultad con tales medidas es que la unidad de medición misma no deja de cambiar (véase la sección 4.5).

### 4.3 ¿QUÉ ES UN PELIGRO NATURAL?

En el párrafo inicial de este capítulo proporcionamos una definición de peligros naturales. Vistos a la luz de nuestros comentarios acerca de la medición, ahora está claro que, así como se

necesitan dos para armar un pleito, también se requieren dos para hacer un peligro: la naturaleza y los seres humanos. Cuando se trata de entender el componente humano de los peligros naturales, se debe considerar la contribución de la investigación antropológica. Un examen detallado de la relación de diferentes grupos culturales con sus entornos puede iluminar nuestra comprensión de cómo los seres humanos han respondido con éxito a los peligros ambientales (Sutlive *et al.*, 1986). En ausencia de seres humanos y de sus obras no puede haber peligros naturales.

Esto no significa que en un continente deshabitado (por ejemplo, Norteamérica antes de que llegaran colonos a través del Estrecho de Bering) no se producían inundaciones o terremotos, sino que, cuando esa clase de incidentes ocurrían no eran un peligro para las personas. La palabra *inundación* tiene ahora dos acepciones: en su sentido más común significa un peligro natural, pero en otro, más estricto, es tan sólo un acontecimiento geofísico extremo.

Así pues, para entender los peligros naturales debemos comprender los acontecimientos geofísicos extremos. Una característica importante de éstos es su probabilidad. En el caso de las inundaciones, por ejemplo, es común describirlas de una magnitud determinada, en términos de su periodo de retorno o su intervalo de repetición (esto es, con qué frecuencia cabe esperar que se produzca). Una crecida de 100 años en cualquier punto de un río es la descarga de agua que se puede esperar que suceda en promedio una vez cada 100 años. Como se muestra en el diagrama de la figura 4-2, un lecho de crecida se puede definir en términos de una frecuencia de inundación específica. Se traza una línea en el mapa para mostrar las áreas que se espera inunde la crecida de 100 años. Más allá de ella puede haber inundaciones, pero con una frecuencia menor. De forma similar, dentro de la línea las crecidas se producen con más frecuencia, hasta que se alcanza el canal del río mismo. En casi todas las regiones húmedas y templadas los ríos alcanzan la parte superior de sus riberas prácticamente una vez al año.

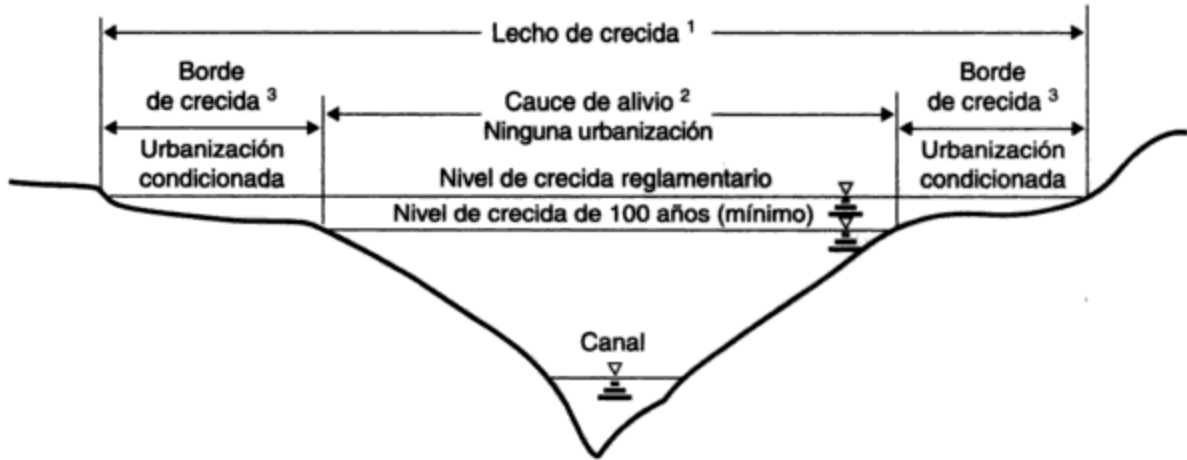
Esto introduce un elemento adicional en la definición de un peligro natural. Cuando un acontecimiento se hace tan frecuente que es parte de la condición normal (como el agua en el canal de un río) ya no constituye un peligro. De manera similar, en el otro extremo, cuando se espera que un acontecimiento se produzca muy rara vez en una escala de tiempo humana, deja de ser un peligro natural para toda consideración práctica.

Así pues, para replantear nuestra definición:

Un **peligro natural** es un acontecimiento extremo en la naturaleza, potencialmente dañino para los seres humanos y que se produce con una frecuencia suficientemente reducida para no ser considerado como parte de la condición o estado normal del medio, pero sin dejar de ser motivo de preocupación en una escala de tiempo humana.

La distinción entre peligros y condiciones normales es importante para entender el manejo de los peligros o la adaptación a los mismos como se describe más adelante en la sección 4.6. El Ártico canadiense es sin duda un lugar difícil para vivir, como también lo son los tórridos desiertos del planeta. Éstos son ejemplos de ambientes rigurosos. Sin embargo, para grupos culturales como los *inuit* en Canadá y los nómadas pastorales del Sahel en África, su rigor no constituye un





**Figura 4-2** Definición hidrológica de un lecho de crecida y su uso en la reglamentación del uso de suelos. Fuente: Ontario Ministry of Natural Resources.

*Notas:*

1. El lecho de crecida se define como la frecuencia de inundación (esto es, la crecida de 100 años o por una crecida grande registrada). Por ejemplo, en Ontario las inundaciones causadas por el paso del huracán Hazel en 1954 se utilizan en algunas cuencas de ríos.
2. El cauce de alivio es la parte más baja del lecho de crecida, donde no se permite urbanización y se reserva para el paso de caudales de avenida.
3. El borde de crecida es un área de los terrenos del lecho de crecida donde se puede permitir el relleno y la urbanización condicionados a las normas de uso de suelos y del código de construcción cuyo propósito es reducir los daños al mínimo.

peligro. Es sólo cuando se producen acontecimientos fuera de lo ordinario que existe un peligro para una sociedad bien adaptada a su entorno.

Tomando en cuenta que los peligros ambientales son fenómenos interactivos más que acontecimientos independientes, Mitchell (1990) considera que el grado de un peligro es una función del riesgo, la exposición, la vulnerabilidad y la respuesta.

$$\text{Peligro} = f(\text{riesgo} \times \text{exposición} \times \text{vulnerabilidad} \times \text{respuesta})$$

Se considera que el **riesgo** es la frecuencia de los incidentes que causan pérdidas. La **exposición** es la magnitud de la población y las estructuras en riesgo. La **vulnerabilidad** se puede medir en términos de preparación, donde un grado alto de acciones de preparación, en muchos casos con base en experiencias previas, da por resultado una vulnerabilidad baja. Como sucede en el caso de los grupos culturales antes mencionados, las acciones de preparación pueden ser parte de la "vida diaria" y convertir en normales los acontecimientos que de otro modo serían peligrosos. La **respuesta** incluye las acciones adoptadas por los directamente afectados y por las dependencias gubernamentales externas para mitigar las pérdidas que podría causar el peligro ambiental. Lo que se trata de demostrar aquí es que "los peligros son fenómenos *reactivos, no absolutos*" (Mitchell, 1990).

El ambiente puede cambiar no sólo a causa de acontecimientos naturales; también los actos humanos pueden dar por resultado un cambio ambiental drástico. Por consiguiente, una consideración de los peligros naturales implica una apreciación de cómo se comparan los cam-

bios en el ambiente causados por acontecimientos naturales con los cambios que originan los actos humanos.

#### 4.4 ACONTECIMIENTOS EXTREMOS Y CAMBIO AMBIENTAL

Cuando se producen acontecimientos extremos en la naturaleza, los mismos tienen un efecto directo en los seres humanos porque causan muertes o lesiones y daños en las propiedades. Estos incidentes tienen también un efecto indirecto porque cambian el carácter del ambiente.

Por largo tiempo ha existido una controversia entre los estudiosos de la historia de la Tierra acerca de la importancia relativa de los acontecimientos extremos contra el cambio gradual. Quienes ponen énfasis en la importancia de los acontecimientos extremos (llamados a veces *catastrofistas*) pueden señalar el papel de las inundaciones en la erosión y la deposición, el de los sismos en la formación de las montañas y el de una glaciación repentina en el moldeo del paisaje de montañas y lagos. Por otra parte, los *uniformitarios* destacan la lenta evolución del planeta bajo la larga continuidad de procesos que son observables todos los días.

Hasta hace muy poco tiempo las fuerzas de la naturaleza, que incluyen tanto acontecimientos extremos como procesos graduales, han excedido con mucho en importancia el efecto de los impactos humanos en el ambiente, excepto en una escala local. La modificación del clima por las erupciones volcánicas es un fenómeno muy conocido (véase el capítulo 7). Las partículas de polvo en la atmósfera aumentan el albedo, lo cual da por resultado temperaturas más bajas en grandes regiones de la superficie de la Tierra por periodos de hasta dos años después de la erupción. Por ejemplo, la gran erupción volcánica del monte Tomboro de Indonesia, en 1815, causó dos años sucesivos de estaciones húmedas y frías crecientes en todo el mundo a partir de 1816 ("los años sin verano"). Los efectos se agravaron en Gran Bretaña, Francia, Alemania y los Países Bajos por las consecuencias económicas de las guerras napoleónicas, y fueron causa de mucho sufrimiento (Post, 1977). Las erupciones volcánicas también pueden desprender gases venenosos, como sucedió en Camerún en agosto de 1986, cuando murieron 1,700 personas y 10,000 más fueron afectadas de diversas maneras por las emisiones tóxicas.

En cambio, la contaminación del aire causada por actos humanos se ha concentrado en alto grado en las áreas urbanas. Aproximadamente 4,000 "muertes en exceso" se han atribuido al gran episodio de smog en Londres, Inglaterra, del 5 al 9 de diciembre de 1952 (Larsen, 1970; Aulicims y Burton, 1973). No es fácil hacer comparaciones válidas de estas diversas clases de incidentes en términos de consecuencias humanas.

Los cambios que se han producido en el ciclo hidrológico por la extracción de aguas del subsuelo, la deforestación y urbanización de cuencas colectoras, el sembrado de nubes y la construcción de depósitos todos ellos parecen muy pequeños en comparación con la escala de los incidentes naturales. Desde luego, estos cambios pueden tener un efecto importante en pequeña escala, pero parecen insignificantes desde una perspectiva planetaria cuando se comparan con las inmensas fuerzas de la naturaleza.

Este punto de vista convencional que asume que los efectos ambientales más grandes provienen de los peligros naturales ha sido cuestionado en los últimos años. En la actualidad se acepta que la quema de combustibles fósiles ha incrementado de manera sustancial el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera, y que esto puede dar origen a un cambio climático significativo (específicamente, a un calentamiento global) para mediados del próximo siglo (véase

el capítulo 5). El reconocimiento de la posibilidad de que los seres humanos cambien el medio en una escala global, ya sea de forma deliberada o involuntaria, ha ocasionado una importante reorientación del esfuerzo científico hacia el estudio de los ciclos biogeoquímicos (White y Tolba, 1979).

La mayor parte de los acontecimientos geofísicos extremos no causan un cambio permanente en el ambiente. Se les puede considerar como fluctuaciones o desequilibrios temporales, de los cuales los sistemas ambientales regresan a un estado "normal", o de equilibrio. Desde luego, estos cambios ambientales temporales tienen efectos graves en la sociedad, en gran medida porque son extremos y de corta duración. Ellos representan una desviación respecto a las condiciones normales a las cuales los humanos se han adaptado. En cambio, la mayoría de los cambios debidos a actividades humanas se verifican con lentitud y, por tanto, dan oportunidad para la adaptación. Cuando las sociedades se están adaptando a condiciones ambientales en proceso de deterioro, es más difícil medir los efectos porque son demasiadas las variables que están cambiando al mismo tiempo. Por consiguiente, el estudio de los efectos de los peligros naturales es doblemente importante: tiene valor por derecho propio y por lo que podemos aprender y que es aplicable a las perturbaciones ambientales de origen humano.

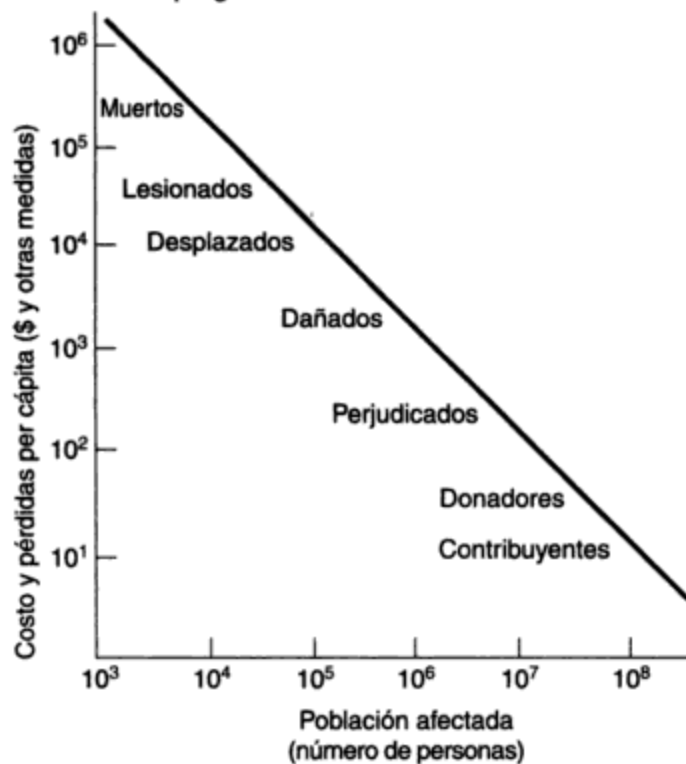
#### 4.5 EFECTOS Y TENDENCIAS

Los peligros naturales afectan a todo el mundo, no sólo a las "víctimas" obvias. Tendemos a pensar en el término *víctimas* porque se informa del efecto de los peligros de manera dramática cuando se produce un desastre. Cuando estos desastres son graves constituyen el extremo de un espectro que se extiende hasta perturbaciones de menor importancia debidas a fluctuaciones en el medio y que causan pérdidas pequeñas. Sin embargo, los daños causados por muchos incidentes de menor magnitud pueden, en conjunto, ser superiores a las pérdidas que se registran en los desastres graves.

El espectro completo de efectos se sugiere en la figura 4-3, la cual muestra estimaciones aproximadas de las consecuencias de diversas clases (desde muertes hasta impuestos) que se espera resultarían de una repetición del famoso terremoto de 1906 en San Francisco. Por repetición se entiende un terremoto de la misma magnitud del que se produjo en 1906 (8.3 en escala de Richter). Los efectos ahora serían muy diferentes porque la ciudad ha cambiado desde 1906. En aquella época murieron 450 personas y 514 manzanas de la ciudad con 28,000 edificaciones fueron destruidas casi en su totalidad por el terremoto o por el incendio subsecuente que se prolongó por 4 días.

La simulación científica (Algermissen *et al.*, 1972) y los escenarios sociales (Cochrane *et al.*, 1974) permiten estimar los efectos de una repetición. Así, se calcula que un sismo de la magnitud del de 1906 produciría en el área de la bahía un número de muertos del orden de 2,000 a 10,000 y que podría haber hasta 40,000 lesionados, según la hora en que se produjera el terremoto. Otras 20,000 personas podrían quedar desplazadas: sin lesiones pero sin hogar. La escala de las pérdidas de construcciones residenciales estaría afectada en gran medida por la incidencia subsecuente de incendios y la capacidad para controlarlos pronto, así como por los cambios en los códigos y prácticas de construcción que han tenido lugar desde 1906. Otras personas más sufrirían pérdidas financieras. En ciertos casos esto provendría de daños a construcciones y otras propiedades o por perjuicios indirectos, como la pérdida de ganancias. Las pérdidas per cápita podrían ser del orden de miles de dólares. Además de los afectados en el área del impacto físico,

## El entorno como peligro



**Figura 4-3** Pérdidas compartidas: el futuro terremoto de San Francisco. Fuente: *The Environment as Hazard*, por Ian Burton, Robert W. Kates y Gilbert F. White. Derechos reservados © por Oxford University Press, Inc. Reproducido con autorización.

muchos otros sufrirían pérdidas ocasionadas por la desorganización. Se trastornaría el funcionamiento normal de la economía en un área amplia.

Como en todos los desastres graves, muchas personas más harían aportaciones voluntarias a un fondo de ayuda para los damnificados del terremoto. Estos donadores son gente que, de manera voluntaria acepta compartir la pérdida haciendo un sacrificio económico a través de la Cruz Roja o de diversas organizaciones filantrópicas. El gobierno de Estados Unidos sin duda proporcionaría ayuda para remediar el desastre, la cual, de acuerdo con la escala del desastre, podría ascender a varios miles de millones de dólares. La población entera de Estados Unidos, como contribuyentes, participaría de los costos de ayuda y rehabilitación, y el efecto económico de onda expansiva sin duda se extendería a Canadá y aún más lejos.

En los desastres naturales graves, el número de muertes puede ser mayor que en cualquier perturbación ambiental humana, a excepción de la guerra. Se cree que perecieron 3.7 millones de personas en las grandes inundaciones del Hwang Ho (río Amarillo) en China en agosto de 1931; que murieron unas 830,000 en el terremoto que azotó la provincia de Shensi, China, el 23 de enero de 1956. Estas estimaciones son notoriamente poco confiables. Inicialmente se informó que el ciclón tropical que llevó una marea de temporal 7 m arriba de la normal a las islas exteriores del delta del Ganges en Bangladesh (entonces Pakistán Oriental) en noviembre de 1970, causó la muerte de más de un millón de personas. Estimaciones más realistas indicaron posteriormente que el número de muertos ascendió a 225,000, pero no se dispone de cifras exactas.

Las grandes pérdidas de vidas humanas a consecuencia de inundaciones, terremotos y sequías se producen ahora de manera casi exclusiva en los países en desarrollo. En las sociedades

industriales desarrolladas la pérdida de vidas suele ser muy pequeña en comparación, pero los daños a las propiedades pueden ser muy grandes. La tormenta tropical Agnes, que trajo crecidas a la parte oriental de Estados Unidos (en especial a Virginia, Pensilvania y Nueva York) en junio de 1972, fue un fenómeno meteorológico muy parecido al ciclón de Bangladesh en 1970. Los daños causados se estimaron en 3,500 millones de dólares, pero murieron sólo 118 personas. Las pérdidas fueron tan grandes porque se habían realizado muchos desarrollos urbanos en los angostos lechos de crecida sobre los cuales se ubicaban muchas poblaciones del Este. En comparación, el número de muertos fue pequeño porque se aplicaron planes eficaces de advertencia y evacuación para desalojar 250,000 personas de sus hogares y llevarlas lejos del peligro. No existió un programa con estas características que pudiera haber desalojado a las 225,000 personas que murieron en Bangladesh.

El patrón resulta conocido. En los países más pobres, los desastres naturales tienden a causar grandes pérdidas de vidas y relativamente pocas de carácter económico. En las sociedades industriales más desarrolladas, la pérdida de vidas es por lo general pequeña, pero los daños económicos pueden ser muy grandes.

En las inundaciones debidas al huracán Hazel en Toronto en 1954, el número de muertos fue de 81 y los daños se estimaron en 3.5 millones de dólares tan sólo en el Valle del Don (Burton, 1965). La Gran Crecida del río Mississippi y sus tributarios en 1993 fue uno de los desastres naturales más generalizados que se han producido en Estados Unidos; sumergió 13.5 millones de acres (5.5 millones de hectáreas) y causó más de \$10.2 millones en daños. No obstante, fueron pocas las muertes atribuidas a la inundación (EOM, 1993). El terremoto que azotó Los Ángeles en 1994 alcanzó un grado relativamente bajo de 6.6 en la escala de Richter, pero las estimaciones de los daños derivados del desastre natural más costoso en la historia de Estados Unidos fueron de \$30 a \$40 mil millones con una pérdida de 55 vidas (Maclean's, 1994).

En las sociedades industriales muy organizadas, los costos del trastorno que causan los peligros naturales y otras perturbaciones del sistema pueden ser mayores que los daños directos. Se han hecho pocas estimaciones detalladas, pero un estudio del efecto del descarrilamiento del tren y la evacuación de Mississauga, Ontario, del 11 al 17 de noviembre de 1979\* mostró que, si bien los daños físicos fueron muy pocos, el costo del trastorno para las 225,000 personas evacuadas fue de \$68.7 millones, según un cálculo conservador (Burton *et al.*, 1981).

En general, los efectos de los peligros naturales de tipo geofísico en la salud son ahora pequeños en los países desarrollados, pero aún permanecen como una preocupación importante para los socorristas y los equipos de asistencia en desastres de los países desarrollados, porque es probable que se produzcan epidemias de fiebre tifoidea y de cólera, a causa de las deficientes condiciones de sanidad que son comunes entre los sobrevivientes.

Los efectos sociales y psicológicos de los acontecimientos graves son mucho más difíciles de evaluar. En el manejo de las emergencias suele expresarse la preocupación de que la amenaza de los peligros naturales y el trastorno social asociado a los mismos, cuando se produce un incidente, sean causa de pánico, desórdenes sociales como pillaje y mayor número de crímenes con violencia, así como angustia psicológica. Si bien todo esto se produce en ocasiones, los indicios de

\*El descarrilamiento produjo incendios y explosiones de carros cisterna que transportaban propano y tolueno, y en un carro cisterna que llevaba 90 toneladas de cloro se formó un gran agujero. La evacuación se hizo necesaria por temor a un escape repentino de cloro gaseoso.

estudios recientes sugieren que las sociedades bien establecidas y normalmente saludables no son víctimas del pánico de inmediato, no recurren al pillaje o al crimen con violencia, y son resistentes al daño psicológico. De hecho, una sociedad saludable responde con un arranque de energía constructiva y espíritu comunitario. Los voluntarios se hacen cargo de los diques, llenan sacos de arena, ayudan a buscar a los desaparecidos, cuidan a los lesionados y proporcionan albergue a los que han perdido su vivienda. En muchos casos los servicios oficiales de emergencia del gobierno no podrían hacer frente al desastre sin una ayuda considerable de parte de organizaciones de voluntarios, la cual suele brindarse en abundancia.

En las sociedades donde ya existen problemas serios de hostilidad interracial o de clases, falta de confianza en un gobierno responsable, e inquietudes sociales o políticas latentes, un acontecimiento peligroso puede ser tomado como una oportunidad para manifestar estos males sociales. Por ejemplo, se ha asociado el pillaje con acontecimientos naturales peligrosos en ciudades estadounidenses. También, la separación de Pakistán Oriental (Bangladesh) de Pakistán se produjo poco después del ciclón de 1970. La impopularidad del gobierno nacional en Islamabad (Pakistán Occidental) se atribuyó en parte a su falta de interés por las víctimas del ciclón. De manera similar, el derrocamiento del emperador Haile Selassie en Etiopía en 1973 se atribuyó, en gran medida, a que su gobierno no respondió de manera eficaz a la sequía que afectó a su país a principios de la década de 1970.

Los peligros naturales probablemente facilitan, no causan, este tipo de acontecimientos políticos y sociales. No obstante, estos peligros parecen tener mucho que ver con el momento en que se producen los disturbios sociales o políticos, porque proporcionan un pretexto para la expresión de inconformidades que ya existen.

Los efectos de los acontecimientos peligrosos importantes son muy conocidos y están bien documentados (Nash, 1976; Gibney, 1978). Aunque se llevan a cabo mediciones, existen dificultades para que éstas sean precisas. Sin embargo, con unas pocas excepciones, no existe un registro sistemático de las pérdidas originadas por los peligros que permita extraer conclusiones firmes acerca de las tendencias.

Existen razones válidas para que esto sea así. En muchos países en desarrollo el aparato gubernamental no tiene las dimensiones ni la fuerza suficientes para dedicar tiempo a reunir esta clase de datos. En la mayor parte de los países industrializados y desarrollados más pequeños, la incidencia de acontecimientos naturales extremos es relativamente baja a causa de la limitada extensión del territorio nacional. En los casos en que se reúnen estadísticas, las mismas tienden a ser referentes a un peligro específico y no a todos.

Los mejores datos, fácilmente disponibles, provienen de Estados Unidos. Ejemplo de ello es la información acerca de la frecuencia de los tornados junto con la información relativa a sus muertes y pérdidas de propiedades; esto se encuentra disponible en la National Oceanographic and Atmospheric Administration de Estados Unidos. El número de tornados de los que se ha informado en décadas recientes es considerablemente mayor al de las primeras décadas de este siglo (más de 6,800 en la década de los sesenta en comparación con los casi 1,300 en los años veinte), debido sin duda a informes más completos y no a un incremento real en la frecuencia de los tornados. Se debe tener cuidado al buscar tendencias en las estadísticas sobre muertes y pérdidas de propiedades, pues el número de tornados registrados pone en duda la comparación de las cifras más recientes con las de años anteriores.

Las muertes causadas por cuatro peligros naturales [rayos (7,124), tornados (4,892), inundaciones (3,277) y huracanes (1,879)] en Estados Unidos de 1940 a 1975, según lo han documen-

tado Mogil y Groper (1977), muestran tendencias leves a lo largo de un marco temporal de 36 años. La tendencia de largo plazo parece ser descendente para las muertes debidas a huracanes y rayos, y ascendente, o en el mejor de los casos poco clara, para tornados e inundaciones. Las tendencias están ocultas en amplios límites de variación de un año al siguiente.

El estudio de los peligros naturales en Estados Unidos más completo a la fecha llegó a la conclusión de que los daños acumulados (no per cápita) debidos a peligros naturales van en aumento en casi todos los casos (tabla 4-3). En ocasiones hay indicios de que el número de muertes está descendiendo o permanece más o menos igual. Aunque no es posible ser muy preciso acerca de las tendencias de los daños, parece probable que en muchas sociedades industriales desarrolladas las pérdidas causadas por peligros naturales continúan en aumento.

**TABLA 4-3 TENDENCIAS DE LAS MUERTES Y DAÑOS A CAUSA DE UNA SELECCIÓN DE PELIGROS NATURALES EN ESTADOS UNIDOS, 1954-1978**

Peligro	Daños	Muertes
Avalancha	+	+
Erosión de costas	+	ND
Sequía	?	ND
Terremoto	+	+
Inundación	+	+
Helada	+	ND
Granizo	+	ND
Huracán	+	-
Desprendimiento de tierra	+	0
Rayos	?	-
Tornado	+	+
Tsunami	ND	?
Nieve urbana	+	+
Volcán	ND	0
Tormenta de viento	+	+

Fuente: White y Haas (1975).

Son pocos los intentos que se han hecho por estimar las pérdidas debidas a desastres naturales en una escala mundial. Un resumen estadístico para el periodo de 1947 a 1981, 35 años (Thompson, 1982), indicó una pérdida total de vidas en el mundo de 1,208,000 personas, que da un promedio de 34,514 muertes anuales. El número de desastres naturales por año registrado en el *New York Times Index* en términos generales muestra una tendencia descendente de 1955 a 1975, y una fuerte tendencia ascendente a partir de 1975 (Mogil y Groper, 1977). No se dispone de estimados mundiales de las pérdidas debidas a peligros o desastres naturales en términos monetarios.

Las pérdidas por inundaciones en Estados Unidos se han citado a menudo como ejemplo de daños en aumento (White *et al.*, 1958). Incluso en este caso la falta de confiabilidad de los datos arroja dudas acerca de tales conclusiones. Existe una gran variación año con año, la cual tiende a enmascarar las tendencias de largo plazo. Los gastos importantes destinados al control

de inundaciones se iniciaron en Estados Unidos con la aprobación de la Ley para el Control de las Inundaciones de 1936. El registro de las pérdidas por inundaciones a partir de esa fecha, cuando se reducen a términos de dólares constantes, no proporcionan indicios claros de una tendencia.

## **4.6 ADAPTACIONES Y SU CLASIFICACIÓN**

De una manera simplificada pero válida en términos generales, podemos ver la historia de nuestros intentos por hacer frente a los peligros naturales como dividida en tres periodos: preindustrial, industrial y posindustrial.

### **4.6.1 Enfoque preindustrial**

En las sociedades preindustriales tradicionales no se disponía de los medios para controlar o intentar modificaciones importantes del ambiente natural. Las personas se valían de su ingenio para defenderse de los peligros ambientales, empleando la tecnología que poseían y el criterio, producto de su experiencia, en cuanto a lo que la naturaleza podría hacer. Las pequeñas casas de madera y papel de Japón eran resistentes a los terremotos o, si se derrumbaban, era poco probable que aplastaran a quienes estuvieran en su interior. Los aldeanos de los Alpes proyectaban casas con techos muy inclinados para soportar las fuertes nevadas, y las ubicaban en lugares donde sabían por experiencia que era poco probable que se produjeran avalanchas. Los campesinos agricultores de los climas de sabana tropical practicaban la siembra de entre surcos con diversas plantas como protección contra la sequía. Los campesinos agricultores de la India fijaban el momento de plantar y de cosechar el arroz y otros cultivos en armonía con la llegada de las lluvias monzónicas.

Por todas partes, los ritmos y las tecnologías de las sociedades tradicionales intentaban utilizar los recursos del entorno natural mientras procuraban evitar los efectos de los peligros. Comúnmente esto funcionaba de manera satisfactoria, y fracasaba sólo cuando se producían acontecimientos extremos de gran magnitud (figura 4-4).

En unos pocos casos, las sociedades preindustriales se organizaron para construir obras de gran envergadura para el control del agua. La construcción de pólderes en los Países Bajos, los diques masivos para el control de crecidas a lo largo del río Hwang Ho en China, y los sistemas de irrigación en los valles del Tigris y del Éufrates son ejemplos muy conocidos. Estos sistemas fueron parte del desarrollo de las civilizaciones avanzadas y sin duda permitieron sustentar una mayor densidad de población en las tierras. No obstante, cuando se producían grandes oleadas de marea, inundaciones o sequías, se provocaban desastres en una escala que antes nunca se habría presentado.

### **4.6.2 Enfoque industrial**

Los primeros proyectos importantes para el control del agua en el periodo industrial fueron precursores de la aplicación de la tecnología moderna al control ambiental. Desde principios del siglo XIX hasta nuestros días los sistemas tecnológicos de control han sido proyectados y construidos en una escala creciente y a un ritmo acelerado. Muchos de estos sistemas tienen por objeto proporcionar protección contra peligros naturales o contra fluctuaciones extremas de



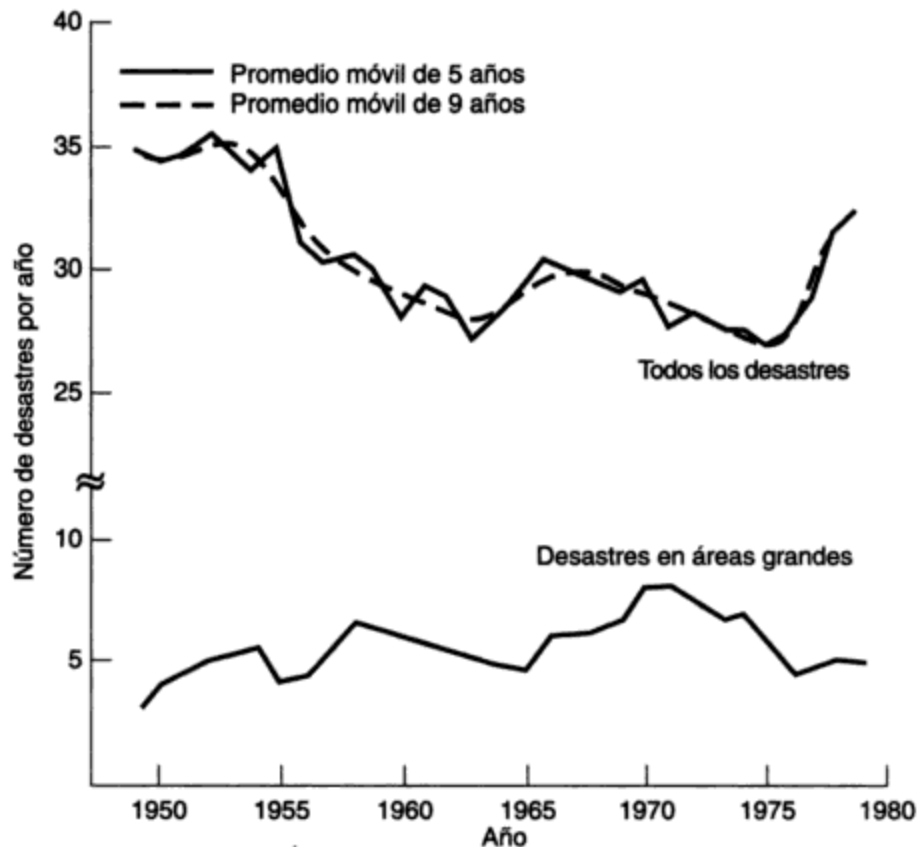


Figura 4-4 Desastres mundiales, 1947-1981. Fuente: Thompson (1982).

sistemas naturales. En las décadas recientes se han construido bastantes presas grandes para almacenar agua, controlar las crecidas y proporcionar un suministro de agua confiable para la irrigación de áreas de precipitación pluvial escasa o incierta.

Otros ejemplos de la aplicación de la ciencia y la tecnología para el control de la naturaleza incluyen la siembra de nubes para producir lluvia en áreas áridas y modificaciones a la fuerza y la ruta de los huracanes. Se han creado diversas tecnologías para eliminar el granizo, dispersar niebla y controlar avalanchas. Se construyen malecones y escolleras como protección contra inundaciones costeras y erosión. En la categoría de peligros biológicos, se aplican plaguicidas químicos de forma masiva para controlar las plagas. Prácticamente dondequiera que se miren los peligros naturales hay indicios de intentos de control o de investigación y desarrollo para alcanzarlo. El descubrimiento de que la eliminación a profundidad de desechos líquidos en Colorado desencadenó una serie de sismos muy pequeños, ha llevado a sugerir que estas tensiones de la corteza terrestre se podrían mitigar gradualmente mediante un proceso controlado.

Algunos de estos logros tecnológicos han aportado grandes beneficios a la sociedad humana. Es claro que, por el criterio del análisis de costo-beneficio, las ganancias para la sociedad derivadas del control ambiental ha superado los costos. En el control de las inundaciones, por ejemplo, los gastos para construir, conservar y manejar presas, diques y canales son excedidos comúnmente, a veces con mucho, por el valor de los daños por inundación que estas obras impiden. La mayor parte de los estudios de factibilidad de proyectos para presas tienen

como requisito integrado que el control de inundaciones y otros beneficios deben exceder los costos.

Entonces, ¿por qué hay indicios de pérdidas en aumento a causa de los peligros naturales en general? Dos posibles explicaciones, que en ocasiones se citan, se pueden descartar de inmediato. Primero, el incremento no se debe al valor en descenso de la moneda por la inflación: las estimaciones de los daños originados por peligros naturales se hacen en términos de dólares (u otras divisas) constantes, ajustándolos a un valor base común. Segundo, la causa del aumento no responde, excepto quizá en pequeña medida, a cambios en el medio: la percepción de que las inundaciones, terremotos u otros acontecimientos extremos se producen con más frecuencia ahora que antes resulta ser falso en alta proporción cuando se examinan los registros. De forma similar, si bien es cierto que el clima cambia, las tendencias son de plazo demasiado largo para reflejarse en el periodo relativamente corto durante el cual se han recolectado datos sobre daños. Además, las fluctuaciones de corto plazo tienen un efecto, pero se promedian a lo largo de las décadas.

Las mejores explicaciones de las pérdidas crecientes debidas a ciertos peligros naturales se encuentran en las limitaciones de la tecnología y en los cambios en la sociedad. Desde el punto de vista tecnológico, no es práctico proyectar y construir sistemas de control de peligros para dar cabida a acontecimientos de muy baja frecuencia y gran magnitud. En el control de inundaciones, por ejemplo, la tormenta de diseño tiene por lo común un intervalo de repetición de 100 años. Esto es, se espera que las condiciones que producen el flujo de agua que una presa ha sido proyectada para controlar se produzcan en promedio una vez cada 100 años. Cuanto más grande es la presa, mayor es el costo marginal de cada incremento adicional en capacidad de almacenamiento. A medida que los costos marginales de construcción tienden a crecer con la escala, también se reducen los beneficios. Cualesquiera que sean las pérdidas económicas que pueda causar una crecida de 100 años, los beneficios anuales medios de la prevención, cuando se reducen a valor presente, pueden ser muy pequeños. En la economía del control ambiental por lo común es costeable controlar los acontecimientos más frecuentes en vez de los que se producen rara vez. Esto significa que, cuando se excede la capacidad de diseño del sistema, las inundaciones (u otros peligros) continuarán presentándose. Así, aunque se provee un rebosadero para llevar sin peligro el exceso de flujo más allá de una presa cuando su capacidad de almacenamiento está saturada, los residentes del lecho de crecida de más abajo de la presa pueden no estar a salvo de una inundación.

La segunda explicación del crecimiento de los daños causados por peligros naturales es que la causa son ciertos cambios en la sociedad (Hewitt, 1983). A medida que las poblaciones crecen y las economías se desarrollan, y conforme las personas se concentran en las ciudades, existe una mayor acumulación de propiedades y riqueza que se puede dañar. Si otros aspectos se mantienen constantes, cabe esperar que las pérdidas debidas a peligros naturales crezcan junto con la población y el producto nacional bruto. En la medida en que los sistemas de control ambiental son eficaces, se puede esperar que reduzcan las pérdidas o, en todo caso, que conserven el incremento en pérdidas por debajo del aumento de población y de PNB. No obstante, todo indica que en ciertos casos al menos sucede lo contrario.

Si la población y las propiedades en expansión estuvieran distribuidas al azar en la superficie de la Tierra, o en un territorio nacional, cabría esperar que las pérdidas aumentaran al mismo paso que el desarrollo. Si los sistemas de control ambiental fueran siempre eficaces, y si las personas procuraran evitar las áreas de las que se sabe son peligrosas, las pérdidas deberían reducirse;

pero han aumentado porque la gente no ha evitado las zonas de peligro, sino que parece haber decidido ponerse en el trayecto del peligro. En el caso de las inundaciones esto quizá se deba a un falso sentido de seguridad generado por las obras para el control de las crecidas: el conocimiento de que el lecho de crecida está protegido ahora hasta una descarga de diseño de 100 años, parece proporcionar confianza a la gente y alentarla a construir en él. En otros lugares, la gente se congrega en estaciones de esquí de los Alpes y fomenta la creación de asentamientos en el paso de las avalanchas. A veces se construyen casas frente al mar en zonas de huracanes, a una altura apenas superior a los niveles de la marea alta promedio. En estos últimos casos, el valor recreativo y placentero del lugar suele ser lo que atrae a las personas, independientemente de la existencia de defensas costeras o protección contra avalanchas.

En ciertos casos la misma existencia física de sistemas de control ambiental genera la confianza que lleva al desastre. En otros, cuando es poca o ninguna la protección contra acontecimientos extremos en la naturaleza, la confianza parece ser parte de una fe ampliamente compartida en el poder de la tecnología y en nuestra capacidad para controlar la naturaleza. Los beneficios de este orgullo desmedido son válidos en tanto duran. No obstante, es casi seguro que ocurra un desastre, más tarde o más temprano, para quienes se aventuraron a llegar en un principio o para quienes arriban después.

Las investigaciones de campo en muchas localidades peligrosas (Burton *et al.*, 1978; Haas *et al.*, 1977) sugieren que pocas personas ocupan áreas peligrosas en condiciones de ignorancia total. Las razones por las cuales las personas se mudan a lugares conocidos como peligrosos y permanecen en ellos son múltiples. El exceso de confianza y un mal cálculo del riesgo es sin duda un factor importante en muchos casos. En otros, los beneficios recreativos, estéticos o económicos superan el riesgo percibido. En otros más, cada uno de los ocupantes se encuentra en la zona de peligro sólo de manera temporal, como en las nuevas estaciones alpinas de esquí, y por consiguiente está dispuesto a aceptar el riesgo, o incluso no da importancia al asunto. En ciertos casos (por ejemplo, en las islas exteriores del delta del Ganges o en las pendientes fértiles de los volcanes), la falta de otras oportunidades económicas puede, literalmente, forzar la elección. En las sociedades más prósperas suele haber una fuerte expectativa de que, si lo peor llega a ocurrir, se proporcionará ayuda gubernamental para remediar el desastre.

Sin embargo, la percepción puede verse modificada por influencias externas, como los medios noticiosos o las evaluaciones científicas del riesgo, con lo cual se amplifica la percepción social del acontecimiento (Kasperson *et al.*, 1988). Un peligro amplificado da origen a respuestas secundarias, las cuales son difíciles de diferenciar de las acciones primarias, pero pueden hacer que crezca la magnitud general de la respuesta.

### 4.6.3 Enfoque posindustrial

No obstante todos sus logros, la aplicación de la tecnología al control de los sistemas ambientales se considera cada vez más como deficiente a menos que tome en cuenta también sus limitaciones inherentes y el probable comportamiento futuro de las personas en los sistemas sociales y económicos. No hacer esto puede dar por resultado la pérdida de muchos de los beneficios del control ambiental. La aplicación de la tecnología al control de los peligros naturales también puede preparar el camino para desastres mayores y fomentar un sentido de dependencia por parte del público respecto al gobierno e incluso en las grandes organizaciones privadas.

Lo que se busca ahora de manera consciente es una respuesta más flexible a los peligros, en la cual los sistemas de control ambiental se combinen con un conjunto de políticas sociales y económicas, cuyo objetivo sea crear una relación más armoniosa del desarrollo humano con el entorno natural, en especial en sus fluctuaciones más extremas.

Para estos fines, en la actualidad es común hablar de adaptaciones a los peligros e incluir en el conjunto de ellas todas las acciones que se podrían llevar a cabo para alcanzar un equilibrio. Son cinco los conjuntos, o clases, de adaptaciones:

1. Compartir y sobrellevar las pérdidas, o *aceptación*
2. Control de los peligros, o *control tecnológico*
3. Adaptaciones sociales, o *reglamentación*
4. Cambios al uso radical y migración, o *reubicación*
5. Planeación de emergencias, o *medidas de emergencia*

Todas ellas pueden considerarse una secuencia de respuestas cambiantes y que toman la experiencia de los cada vez más alarmantes peligros.

**Aceptación.** La respuesta más común a los peligros naturales, incluso en la actualidad, es la de aceptar las pérdidas. Esto es así porque muchos acontecimientos peligrosos son de importancia más bien menor y es más fácil sobrellevar la pérdida que emplear el tiempo y los recursos necesarios en una respuesta activa. Muchas sequías, por ejemplo, no llegan a ser graves, pero los agricultores las registran como una deficiencia de humedad en el suelo que trae como consecuencia un rendimiento más bajo y no una pérdida total de la cosecha. Las nevadas moderadas y esperadas causan demoras e incomodidades que se aceptan con quejas, pero adoptando pocas o ninguna acción correctiva.

Cuando las pérdidas reales o esperadas tienen un efecto demasiado grande en los individuos, la familia o la comunidad, se crean mecanismos para compartirlas. En las sociedades tradicionales el clan familiar aporta ayuda (Newton, 1992). Cuando esto es insuficiente, el círculo de auxilio se extiende hasta abarcar la tribu o grupos sociales más grandes. En las sociedades modernas se presentan los mismos procesos informales de participación, en especial en las emergencias, y a ellos se agregan los mecanismos más formales de planes de seguros, auxilio en caso de desastre y ayuda gubernamental que incluye compensación.

**Control tecnológico.** Un segundo conjunto de adaptaciones consiste en las que se encaminan al control de los acontecimientos naturales mismos. Como hemos visto, estas adaptaciones tienen raíces históricas pero han alcanzado su pleno florecimiento en nuestros días. El deseo de las personas de controlar la naturaleza es muy antiguo. Los estudios antropológicos muestran que las reverencias a los dioses para prevenir inundaciones catastróficas, o las danzas de la lluvia para mitigar la sequía son expresiones de este deseo. Los intentos modernos por controlar la naturaleza, no obstante sus limitaciones, se aceptan en general como más eficaces.

**Reglamentación.** Es muy amplia la gama de adaptaciones posibles en la operación de la sociedad humana que pueda ser capaz de reducir la vulnerabilidad a los peligros naturales. Un enfoque obvio, al que ya se ha hecho alusión, consiste en mantener las personas y las propiedades lejos de las áreas peligrosas. Esto se puede hacer por medio de planeación y reglamentación del

uso del suelo, lo cual constituye una adaptación particularmente eficaz en lo referente a inundaciones (véase la figura 4-2). Donde los peligros son más generalizados y no están confinados a localidades definibles, es posible adoptar otros dispositivos de planeación, como la reglamentación de las construcciones (estructuras resistentes a sismos) y patrones de cultivo (adaptaciones a la sequía y el granizo).

Muchas políticas sociales tienen un efecto indirecto y en muchos casos involuntario en la vulnerabilidad de una sociedad ante los peligros naturales. Por ejemplo, los programas de renovación urbana o reurbanización pueden incrementar o reducir las pérdidas futuras por inundación, la política de transporte logra impedir los trastornos que causan las tormentas de nieve, y los códigos de construcción pueden modificar el alcance de los daños relacionados con tornados.

**Reubicación.** Una forma extrema de adaptación social es la modificación del uso del suelo y la migración. Así como el uso y la ocupación de terrenos riesgosos por el hombre crean peligros, también los mismos se reducen o eliminan modificando el uso del suelo o por medio de emigración en masa (temporal o permanente) lejos del peligro. Por ejemplo, las propiedades residenciales y de otro tipo de los lechos de crecida de los ríos Don y Humber en Toronto, Canadá, fueron adquiridas de manera obligatoria por el gobierno después de las crecidas del huracán Hazel de 1954; las construcciones se demolieron y el uso del suelo se modificó para crear espacios con fines recreativos (Burton, 1965). De forma similar, la población entera de la isla de Tristán da Cunha en el Atlántico sur fue evacuada por Gran Bretaña después de una erupción volcánica ocurrida en 1961 (Blair, 1964). Se evacuó a muchas personas de la región del Monte de Santa Helena de Washington después de la erupción volcánica de 1980. La emigración de las áreas azotadas por la sequía es también un fenómeno muy conocido en el polígono seco del sureste brasileño, en la zona de Zahel de África del Norte, y en otras partes.

**Medidas de emergencia.** Muchas dependencias gubernamentales locales, nacionales e internacionales han establecido organizaciones de emergencia con el objetivo de prepararse para hacer frente a los desastres de origen tanto humano como natural y dar respuesta ante los mismos. Las medidas preparatorias incluyen establecer planes de organización ante emergencias para enfrentar con más facilidad los acontecimientos inesperados, poner a prueba estos planes por medio de ejercicios de simulación y proporcionar capacitación y educación a los coordinadores de respuesta ante emergencias designados y a los miembros de los equipos de respuesta. Estas medidas enfocadas se complementan con material y campañas de concientización pública que informan al público en general acerca de sus responsabilidades individuales en el contexto de esfuerzos de respuesta de mayor alcance.

Las adaptaciones de esta naturaleza se hacen de manera continua, a la luz de la experiencia adquirida en desastres anteriores. No es posible sobrestimar el valor de la preparación. El hecho de contar con los recursos apropiados y un operador capacitado puede salvar vidas y evitar el desastre. El lema de Sir Robert Baden-Powell, "siempre listo", se aplica a todos aquéllos cuyas vidas o posesiones podrían hallarse en riesgo a causa de un medio peligroso.

#### 4.6.4 Clasificación

Para cualquier peligro natural existen tantas posibilidades teóricas de adaptación que es útil agruparlas por tipo. Tres clasificaciones son de uso común. La primera, ya descrita, es la distinción entre las adaptaciones encaminadas al control del ambiente o de los procesos naturales

mismos y los que implican cambios en la sociedad humana o en el patrón de actividad y comportamiento social. En las naciones industriales occidentales, después de un periodo de fuerte énfasis en las adaptaciones de la primera categoría, se ha producido una ampliación general de la respuesta para incluir más adaptaciones sociales.

La segunda clasificación se basa en el criterio de oportunidad (es decir, especifica las acciones que se deben llevar a cabo antes, durante y después del acontecimiento peligroso). En las sociedades tradicionales las adaptaciones se limitaban en gran medida a las acciones de emergencia que se podían adoptar durante el evento. En ausencia de sistemas de advertencia eficaces, las personas solían ser tomadas por sorpresa y sin preparación alguna; las acciones de emergencia, incluso la huida, de nada servían, como se observa de manera dramática en las ruinas desenterradas en Pompeya, Italia.

Con el surgimiento de la ciencia y la tecnología modernas, se ha generado un énfasis en la prevención del peligro, en el cual la incidencia de un desastre natural va seguida de manera casi invariable por una investigación, y después por programas de acción encaminados a "no permitir que esto vuelva a ocurrir". Puesto que los acontecimientos naturales extremos son consecuencia de fluctuaciones aleatorias de los procesos naturales, habrá siempre una futura consecuencia que, dado el paso del tiempo suficiente, superará en magnitud a todos los acontecimientos experimentados en el pasado. Por consiguiente, todas las adaptaciones posteriores al acontecimiento son también previas al próximo incidente, ya sea de mayor o de menor magnitud que los anteriores.

La eficacia de los ajustes para reducir las pérdidas relacionadas con los peligros debe evaluarse en términos de la relación entre el ambiente y el carácter cambiante de los asentamientos humanos. ¿Alcanzará la sociedad poco a poco una condición menos vulnerable en relación con los acontecimientos naturales extremos? En otras palabras, ¿aprendemos de nuestras experiencias con los peligros? Si la adaptación a los acontecimientos peligrosos naturales es parte de un proceso de aprendizaje, las pérdidas relacionadas con los peligros deberían disminuir con el paso del tiempo. El hecho de que no ha ocurrido así sugiere que hay más por aprender acerca del manejo de los peligros naturales.

Una tercera clasificación de las adaptaciones se identifica en la distinción entre las acciones que llevan a cabo las organizaciones privadas, como las empresas, y las que adopta el gobierno en todos los niveles, desde el local hasta el federal. En este caso se aprecia una vez más una clara tendencia en la selección de las adaptaciones: el surgimiento de sociedades urbanizadas en gran escala en el mundo moderno se ha visto acompañado de una reducción de la atención que se presta a las adaptaciones en lo individual y en el hogar, y de un crecimiento en la responsabilidad de las organizaciones, en especial de los gobiernos, por la protección de las personas ante los peligros naturales. Esto es, y como ha ocurrido en otras partes, en el campo de los peligros naturales ha habido una disminución en la independencia individual y un aumento en la dependencia respecto al estado.

#### **4.7 UNA PERSPECTIVA TEÓRICA: RESPUESTAS FUTURAS POSIBLES**

En la introducción a este capítulo se sugirió que los peligros naturales no son totalmente naturales: aunque los procesos físicos o ambientales que dan origen a acontecimientos extremos lo son, la intensidad de sus consecuencias o efectos depende en gran medida de lo que las personas han decidido o no hacer respecto a ellos.

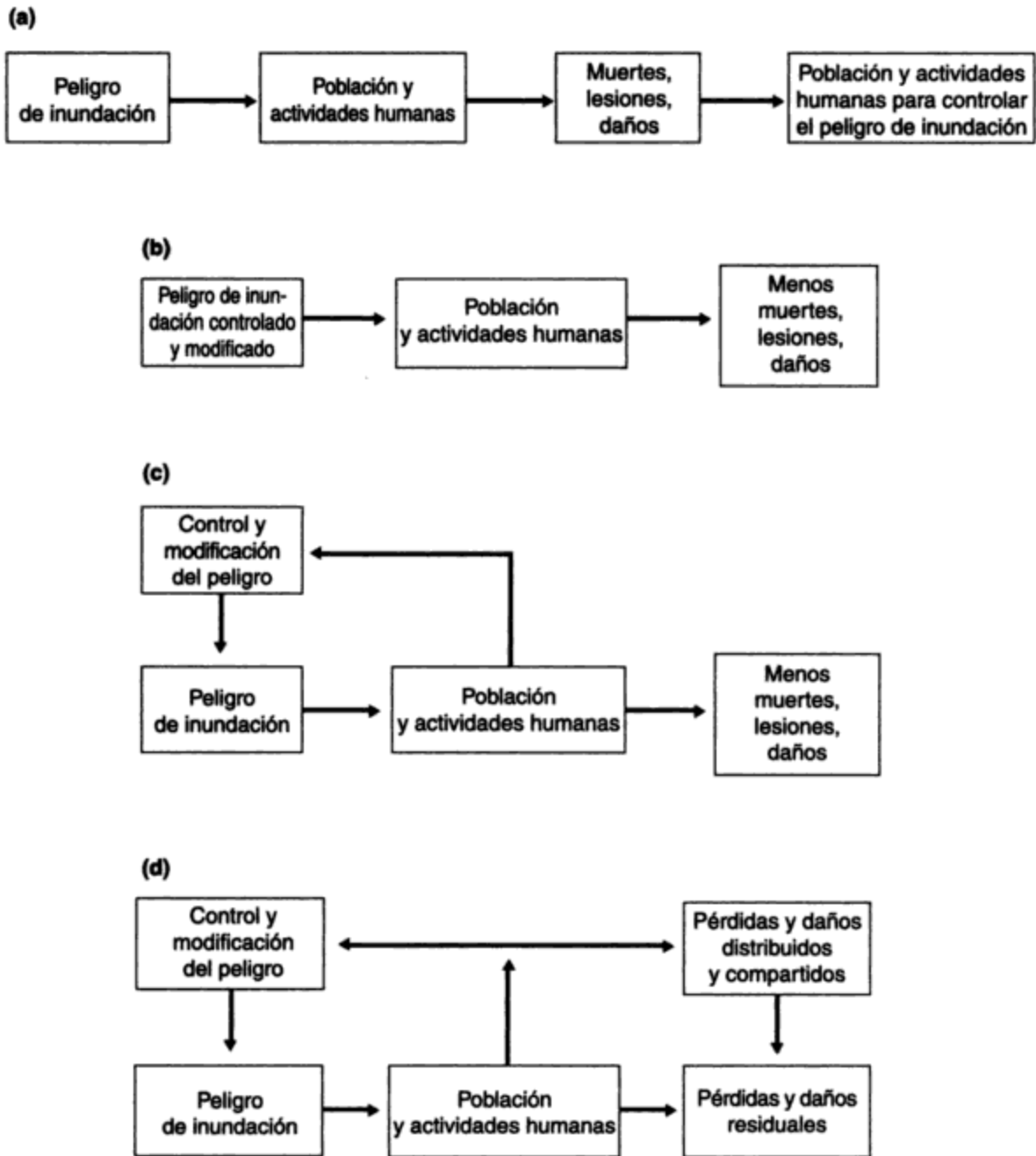


Figura 4-5 Modelos de peligros: I.

En la figura 4-5a se ilustra una perspectiva tradicional de los peligros de las inundaciones. Las crecidas se ven como acontecimientos en el entorno natural que inciden en la sociedad humana causando muertes y daños. Otra perspectiva generalizada (figura 4-5b) es que las fuerzas de la naturaleza se pueden controlar o modificar a fin de eliminar o aminorar sus efectos en la sociedad. Este punto de vista se puede representar como un modelo de retroalimentación positiva como se muestra en la figura 4-5c.

La investigación sistemática y la observación de los efectos de las políticas basadas en el enfoque de modelo o enfoque teórico que se representa en la figura 4-5c han puesto de manifiesto que los esfuerzos de retroalimentación positiva para el control de inundaciones producen también efectos de retroalimentación negativa, los cuales proporcionan a las poblaciones humanas incentivos para expandir las actividades en los lechos de crecida y agregar así más población y propiedades. Además, el efecto de retroalimentación negativa se ve reforzado por los programas gubernamentales de auxilio y rehabilitación proyectados para distribuir las pérdidas o compartirlas con una comunidad amplia, como se ilustra en la figura 4-5d, en la cual se indican unas cuantas respuestas humanas posibles. Las pérdidas y daños "residuales" con el tiempo pueden hacerse mayores de lo que habrían sido sin estos efectos de retroalimentación.

La identificación a través de la investigación de los procesos de refuerzo que incrementan los daños ha dado origen a cambios de política pública. Estas modificaciones principalmente han tenido por objeto ampliar las opciones disponibles para los encargados de tomar las decisiones, de manera específica para incluir una gama de adaptaciones sociales. Éstas incluyen mejores políticas para compartir las pérdidas, procedimientos fortalecidos para la planeación de emergencias y, en ocasiones, pasos encaminados a modificar el uso del suelo de formas más radicales para facilitar la emigración de las zonas peligrosas.

Para cualquier peligro específico, la gama de adaptaciones sociales es grande y suele verse incrementada por innovaciones derivadas de investigaciones o políticas. En el caso de las inundaciones, por ejemplo, en términos generales no ha habido disponibilidad de seguros de parte de la industria aseguradora privada, excepto en una escala muy limitada. En ocasiones se aseguran con Lloyd's of London propiedades costeras de los litorales del Atlántico y del Golfo en Florida y otros estados adyacentes, pero las primas son muy elevadas.

Entre las razones de la falta de seguros privados contra inundaciones está el hecho de que muchos propietarios no esperan sufrir una inundación durante el plazo de residencia en la zona, no obstante que saben que habitan en un lecho de crecida. Una razón que cita la industria de seguros es que la definición tan estrecha del alcance del riesgo (sólo quienes residen en lechos de crecida) significa que no existe una base suficientemente amplia para distribuir el riesgo: todo el mundo necesita un seguro contra incendio, pero sólo quienes habitan en áreas propensas a las inundaciones necesitan un seguro precisamente para inundaciones.

Para poner esta adaptación social a disposición de los residentes en lechos de crecida en Estados Unidos, el gobierno federal ha aprobado leyes destinadas a crear un plan de seguros contra inundación con patrocinio federal (Kunreuther, 1977), comercializado por la industria de seguros privada y garantizado por el gobierno. Se percibe un peligro en esta acción: al haber disponibilidad de seguros contra inundación, se podría acelerar el proceso de urbanización de terrenos de lecho de crecida, con el consecuente aumento en los daños y grandes reclamaciones a los seguros. Para compensar este peligro, el gobierno federal de Estados Unidos requiere que, para tener derecho a los programas de seguros patrocinados por el gobierno, cada comunidad debe tener establecido un plan para el uso de suelos de lecho de crecida, con normas de zonificación aprobadas por el gobierno estatal.

El modelo conceptual que se muestra en la figura 4-5d incluye sólo una gama limitada de respuestas humanas. Los resultados de las investigaciones empíricas han producido refinamientos adicionales, como se describe en la sección 4.6, en la cual se especifica un conjunto de adaptaciones alternativas por "medios múltiples". Esto se representa en la figura 4-6.



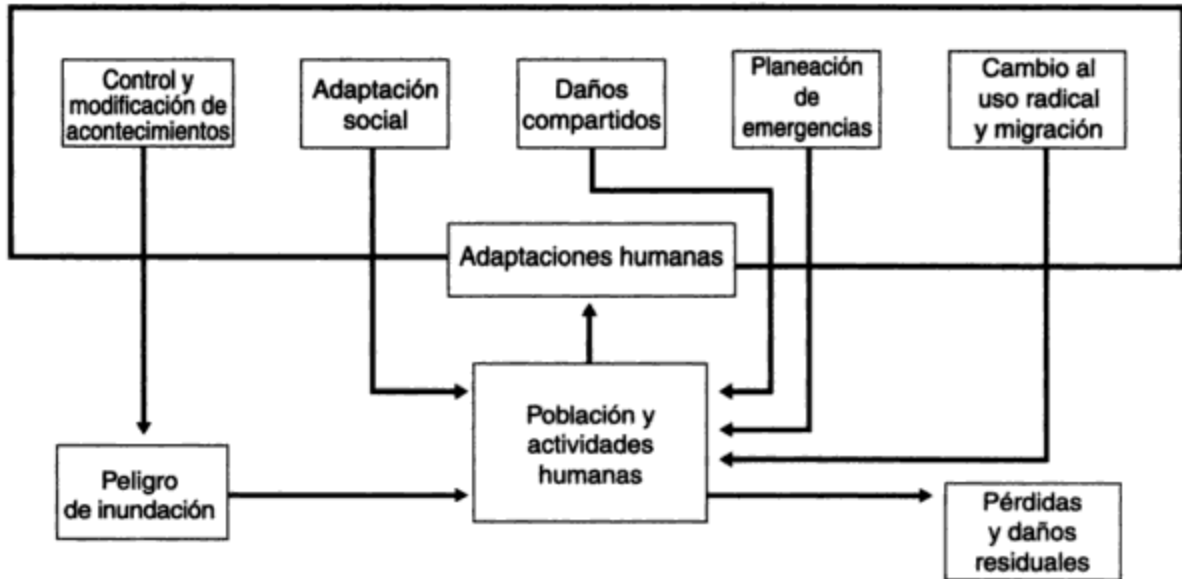


Figura 4-6 Modelos de peligros: II.

La consideración de los factores que intervienen en el proceso de selección ha llevado a la adopción de un punto de vista cognoscitivo de los peligros (White, 1964; Burton y Kates, 1964), en el cual la percepción del peligro y las adaptaciones por parte del encargado de tomar las decisiones se convierte en una variable significativa. La mayor parte de este modelo se mantiene en el nivel conceptual y no correlaciona la adaptación a los peligros con los lugares y actividades de trabajo de todos los días, tampoco toma en cuenta las opciones en cuanto a medios de vida o ubicación, ni explica las diferencias en la toma de decisiones individual en contraste con la colectiva. Se han conseguido avances valiosos a lo largo de las cuatro últimas décadas en las áreas de investigación del comportamiento y la percepción de los peligros naturales (Sarrinen, 1966; O’Riordan, 1986), los cuales han convertido el enfoque estructural tradicional de diques y cobertizos contra avalanchas, tan sólo en una de varias respuestas potenciales (Smith y Tobin, 1979).

Los indicios, tanto empíricos como teóricos, sugieren que a pesar de una poderosa y creciente capacidad para ejercer control sobre la naturaleza por medios tecnológicos, en el futuro continuarán produciéndose muertes, daños y otros efectos de los peligros naturales. De hecho, es factible que los perjuicios aumenten y adopten formas más catastróficas, a menos que su manejo mejore. A medida que las sociedades modernas buscan ejercer un mayor control sobre su entorno y el hecho de que el éxito en relación con algunos de los peligros naturales elementales se nos escapa de las manos, debe ser una protección contra el exceso de confianza y el optimismo ingenuo en los intentos por controlar el ambiente en todos sus variados aspectos.

## PROBLEMAS

- 4.1. Todos los peligros naturales tienen un componente natural y uno humano. Elija un peligro natural de su interés, describa en pocas palabras cada componente y comente acerca de su interacción.
- 4.2. No obstante el gasto acumulado de miles de millones de dólares para mitigar los efectos de las inundaciones en Estados Unidos, las pérdidas anuales han crecido, de unos pocos millones de

- dólares a principios del siglo XX, hasta más de mil millones en la actualidad. ¿Por qué continúan en aumento las pérdidas a pesar de que se hacen inversiones significativas?
- 4.3. Explique cómo se mide la magnitud de cada uno de los peligros naturales siguientes y señale las deficiencias de este enfoque.
    - (a) Inundaciones
    - (b) Terremotos
    - (c) Ciclones
    - (d) Ventiscas
  - 4.4. Explique por qué nuestra definición preliminar de un peligro natural (esto es, una condición ambiental que causa pérdida de vidas o pérdidas económicas) era incompleta. ¿Cuáles son los cuatro factores que se incluyen en la definición revisada?
  - 4.5. Elija un peligro natural que se haya presentado en su área residencial y grafique en la figura 4-3 su línea con base en los efectos causados. Explique su estimación de la manera como se comparieron las pérdidas.
  - 4.6. Las ventiscas y las crecidas son peligros estacionales en ciertas partes del mundo y requieren adaptaciones por parte de las poblaciones afectadas. Con referencia a la sección 4.6, identifique las adaptaciones de uso más común para mitigar los efectos de las ventiscas y las crecidas. Comente acerca del éxito o fracaso de estas medidas.
  - 4.7. Para un proyecto de periodo seleccione una corriente o río cercano a su zona residencial para el cual disponga de datos topográficos e hidrológicos y:
    - (a) Describa la cuenca colectora y las variaciones estacionales.
    - (b) Dibuje la curva de descarga anual en una comunidad ubicada a la orilla del río.
    - (c) Con base en el registro hidrológico calcule la etapa de crecida para 100 años y grafíquela en un mapa de la comunidad.
    - (d) Decida si esta comunidad está preparada para la crecida de 100 años. Indique las áreas donde se prevén daños y comente acerca de los medios posibles para reducir las pérdidas.
  - 4.8. Para un peligro natural específico de su elección elabore un modelo conceptual del peligro a la manera de las figuras 4-5 y 4-6 para mostrar cómo se genera el peligro y para hacer un modelo del proceso de ajuste.
  - 4.9. Suponga que usted trabaja para un gobierno regional o estatal donde las crecidas se están convirtiendo en un peligro anual. Redacte el borrador de una declaración política para enfrentar esta situación y contribuir a reducir las pérdidas. Considere las opciones tanto físicas como sociales.
  - 4.10. En la preparación para un peligro natural, o en la respuesta al mismo, la percepción precede y guía las acciones. Seleccione un peligro natural que se presenta en su región y describa la percepción de éste por parte de las personas siguientes.
    - (a) Las que se exponen al peligro
    - (b) Los funcionarios del gobierno
    - (c) Los ingenieros o científicos que manejan o controlan el peligro
    - (d) El público en general
  - 4.11. Los códigos de construcción deben tomar en cuenta las condiciones potencialmente peligrosas. Haga una lista de las secciones de su código local o nacional de construcción que se ocupan de los peligros naturales y explique cómo reducen las pérdidas potenciales y protegen al público en general.

## REFERENCIAS

- ALGERMISSEN, S. T., *et al.* *A Study of Earthquake Losses in the San Francisco Bay Area: Data and Analysis*. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, 1972.
- AULICIEMS, A. y BURTON, I. "Trends in Smoke Concentrations Before and After the Clean Air Act of 1956". *Atmospheric Environment* 7 (1973): 1063-1070.
- BLAIR, J. P. "Home to Tristan da Cunha". *National Geographic* 125 (1964): 60-81.
- BURTON, I. "A Preliminary Report on Flood Damage Reduction". *Geographic Bulletin* 7 (3). Ottawa: Department of Mines and Technical Surveys, 1965.
- BURTON, I. y KATES, R. W. "The Perception of Natural Hazards in Resource Management". *Natural Resources Journal* 3 (1964): 412-441.
- BURTON, I., KATES, R. W. y WHITE, G. F. *The Environment as Hazard*. Nueva York: Oxford University Press, 1978.
- BURTON, I., VICTOR, P. y WHITE, A. V. *Final Report on the Mississauga Evacuation: A Report to the Solicitor-General of Ontario*. Toronto: Ontario Ministry of the Solicitor-General, 1981.
- COCHRANE H. C., *et al.*, *Social Perspectives on the Coming San Francisco Earthquake: Economic Impact, Prediction and Reconstruction*. Natural Research Working Paper 21. Boulder, Colo.: Institute of Behavioral Science, 1974.
- EOM "The Flood of '93". *Earth Observation Magazine*, Septiembre (1993): 23-27.
- GIBNEY, F. (ed.) *Disaster! When Nature Strikes Back*. Nueva York: Bantam/Britannica Books, 1978.
- HAAS, J. E., KATES, R. W. y BOWDEN, M.J. (eds.). *Reconstruction Following Disaster*, Cambridge, Mass.: MIT Press, 1977.
- HEWITT, D. (ed.) *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology*. Boston: Allen & Unwin, 1983.
- KASPERSON, R. E. *et al.* "The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework". *Risk Analysis* 8(2) (1988): 177-187.
- KUNREUTHER, H. *Limited Knowledge and Insurance Protection: Implications for Natural Hazard Policy*. Filadelfia: University of Pennsylvania Press, 1977.
- LARSEN, R. I. "Relating Air Pollutant Effects to Concentration and Control". *Journal of the Air Pollution Control Association* 20 (1970): 214-225.
- MACLEANS. "A Powerful Earthquake Paralyzes Los Angeles". *Maclean's Magazine* 107(5), 31 de enero (1994).
- MITCHELL, J. K. "Human Dimensions of Environmental Hazards". En *Nothing to Fear*, Andrew Kirby (ed.). Tucson, Ariz.: University of Arizona Press, 1990, págs. 131-175.
- MOGIL, M. y GROPER, H. S. "NWS Severe Local Storm Warning and Disaster Preparedness Programs". *Bulletin of the American Meteorological Society* 58(4), abril (1977).
- NASH, J. R. *Darkest Hours: A Narrative Encyclopedia of Worldwide Disasters from Ancient Times to the Present*. Chicago: Nelson-Hall, 1976.
- NEWTON, J. "Living on the Edge of a Disaster". *Emergency Preparedness Digest* 19(4), octubre-diciembre (1992): 10-14.
- O'RIORDAN, T. "Coping with Environmental Hazards". En *Geography, Resources, and Environment*, vol. II, R. W. Kates y también I. Burton (eds.). Chicago: University of Chicago Press, 1986, págs. 272-309.

- PALMER, W. C. *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau, Office of Climatology Research Paper 45. Washington, D.C.: U.S. Weather Bureau, 1965.
- POST, J. D. *The Last Great Subsistence Crisis in the Western World*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1977.
- SARRINEN, T. F. *Perception of the Drought Hazard on the Great Plains*. Research Paper 1056. Chicago: Department of Geography, University of Chicago, 1966.
- SMITH, K. y TOBIN, G. *Human Adjustment to the Flood Hazard*. Topics in Applied Geography. Londres: Longman, 1979.
- SUTLIVE, et al. (eds.). *Natural Disasters and Cultural Responses*. núm. 36, Williamsburg, Va.: Department of Anthropology, College of William and Mary, 1986.
- THOMPSON, S. A. *Trends and Developments in Global Natural Disasters, 1947-1981*. Natural Hazard Research Working Paper 45. Boulder, Colo., Institute for Behavioral Science, 1982.
- THORNTWHAITE, C. W. y MATHER, J. R. *The Water Balance*, Publications in Climatology, vol. 8. Centerton, N. J.: Laboratory of Climatology, 1955.
- WHITE, G. F., et al., *Changes in Urban Occupance of Flood Plains in the United States*. Research Paper 57. Chicago: University of Chicago Press, 1958.
- WHITE, G. F. *Choice of Adjustment to Floods*. Research Paper 93. Chicago: University of Chicago Press, 1964.
- WHITE, G. F. y HASS G. *Assessment of Research on Natural Hazards*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975.
- WHITE, G. F. y TOLBA, M. *Global Life Support Systems*, United Nations Environment Programme Information 47. Nairobi, Kenia: United Nations Environment Programme, 1979.

# CAPÍTULO 5

---

## Perturbaciones ambientales de origen humano

*F. Kenneth Hare*  
*Thomas C. Hutchinson*

### 5.1 PERSPECTIVA GENERAL

En el capítulo 1 recordamos las múltiples mejoras tecnológicas que se han conseguido para la existencia humana y el disfrute de la vida. Sin embargo, no se puede negar que se han producido impactos destructivos en el ambiente, incluso en los lugares más remotos. Se han detectado gases contaminantes a gran altura sobre el continente antártico, o bien sustancias químicas sintéticas desconocidas en la naturaleza. Es posible encontrar compuestos de plomo, emitidos en la atmósfera en los gases de escape, en el hielo glacial de Groenlandia y la Antártida. Es muy difícil encontrar bosques o pastizales intactos. Los seres humanos son los más poderosos perturbadores de su propio medio, no obstante que su salud y quizá su supervivencia sobre la Tierra dependen de las condiciones del mismo.

Los océanos muestran ciertas perturbaciones con claridad. El petróleo que se escapa de los barcos ha dispersado hidrocarburos en gran parte de su superficie. Algunos de ellos se presentan en forma de pequeños nódulos que son arrastrados por la corriente hacia playas de todo el mundo, en especial cerca de las líneas de embarque. Aquí y allá derrames mucho mayores han devastado comunidades que habitan a lo largo de las costas. Dado el enorme tamaño de los barcos cisterna modernos, es de sorprender que estos derrames no hayan sido más extensos. El tritio, hidrógeno 3 radiactivo, proveniente de pruebas nucleares aéreas en la década de los 50 y principios de los 60, ha penetrado cientos de metros en las aguas de los océanos. Hasta ahora, las aguas profundas no han sido prácticamente afectadas, pero absorberán poco a poco los contaminantes persistentes a menos que modifiquemos nuestro modo de actuar.

Los bosques y praderas muestran una clase de perturbación diferente. Al menos la mitad de la cobertura forestal original del planeta ha sido despejada para la agricultura o el pastoreo. En Estados Unidos, por ejemplo, es difícil encontrar áreas supervivientes de pastizales de pradera en las llanuras altas, o bosques caducifolios semejantes a los que los colonos pioneros del este vieron cuando colonizaron el país. También el suelo ha cambiado de manera drástica. Más de una cuarta parte del carbono almacenado en el suelo del planeta ha sido oxidado y devuelto a la atmósfera como dióxido de carbono, a causa del arado de la tierra y el pastoreo excesivo de animales de granja. Sin duda, las personas necesitan alimentarse y encontrar leña, madera y minerales, pero ello ha dañado mucho el medio natural, y el deterioro continúa en aumento.

Está claro que son dos las razones de este daño. Una es que no tenemos más opción que explotar el medio natural: el alimento, los minerales y el cobijo son fundamentales para nuestra vida. Con el continuo aumento de la población mundial durante al menos los próximos 50 o 100 años, esta presión legítima no hará sino intensificarse. Todo lo que podemos hacer es asegurar que nuestra tecnología y el uso de los recursos sean eficientes y causen el menor daño posible. La segunda razón es el descuido, o incluso la destrucción sin sentido. Demasiadas ciudades continúan vertiendo sus productos de desecho en el aire o el agua, nuestra agricultura suele ser innecesariamente destructiva del suelo, y muchos de nosotros somos culpables, como individuos, de un consumo y desperdicio excesivo de recursos. Así pues, el deber del ingeniero y el científico es obvio: elevar el nivel de la tecnología hasta el punto en que se puedan satisfacer las necesidades reales de la humanidad, sin dejar de proteger al ambiente. Pero, ¿cómo se puede hacer esto?

Los problemas por atacar se presentan en todas las escalas. Ciertos problemas, como el humo o los malos olores que producen las industrias, son locales y se controlan sin dificultad; el problema se localiza fácilmente y por lo común se corrige por medio de mejores métodos de combustión o de eliminación de desperdicios, aunque a un costo considerable. Otros casos afectan regiones grandes e implican miles de contaminadores y millones de víctimas. La lluvia ácida (sección 5.3) es de este tipo. Este fenómeno es resultado de las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno de las chimeneas y tubos de escape, y ahora afecta todo el noreste de Norteamérica y el noroeste de Europa. Otros problemas son literalmente mundiales. El efecto invernadero (sección 5.2) es un ejemplo de este tipo. Todos nosotros contribuimos a él cada vez que encendemos fuego o conducimos un automóvil, y el resultado afecta a todos. Muchas otras perturbaciones ambientales de origen humano y atribuibles al "progreso" se tratan en detalle en la parte 3.

Las acciones necesarias para remediar estas perturbaciones ambientales de origen humano estarán determinadas por cuestiones de escala y por la clase de tecnología que interviene. La primera tarea consiste en entender el problema: el médico no puede curar al paciente sin antes diagnosticar con exactitud la enfermedad. En particular, uno debe ver el problema como un todo y entender cómo afecta otras cosas. En el manejo del ambiente por lo común es mejor buscar una solución lo más completa posible, porque son muchas las cosas que están interconectadas. Por desgracia esto resulta difícil a causa de las restricciones de carácter político, jurídico o jurisdiccional. En muchos casos, por ejemplo, se encuentra que la contaminación del aire afecta la calidad del agua, la salud de los cultivos y de los seres humanos, la corrosión de las construcciones e incluso el atractivo estético. El control de la contaminación misma puede ser muy simple, aunque costoso; pero la reparación del daño ya hecho será mucho más difícil y sin duda muy costoso.

Al principio de este libro (sección 1.6) argumentamos que esta clase de cambio tecnológico es una parte necesaria del movimiento hacia el desarrollo sustentable. En ese punto argumentamos (y lo haremos de nuevo en el capítulo 16) que el ingeniero está obligado a interesarse por esas cuestiones, y debe esforzarse por analizar de manera cuantitativa los problemas que enfrentamos. La fortaleza radica en el respeto por la calidad, pero también en el uso respetuoso de los indicios cuantificados.

La interacción entre los sistemas de aire, agua y tierra es patente en las tres próximas secciones que se ocupan de cuestiones ambientales importantes en nuestros días: el efecto invernadero, el agotamiento del ozono y el problema de la lluvia ácida. Los tres se comprenden razonablemente bien, y es casi indudable que son atribuibles a las actividades humanas. Su control puede ser técnicamente factible, pero será muy costoso.

## 5.2 EL EFECTO INVERNADERO Y EL AGOTAMIENTO DEL OZONO: PROBLEMAS MUNDIALES

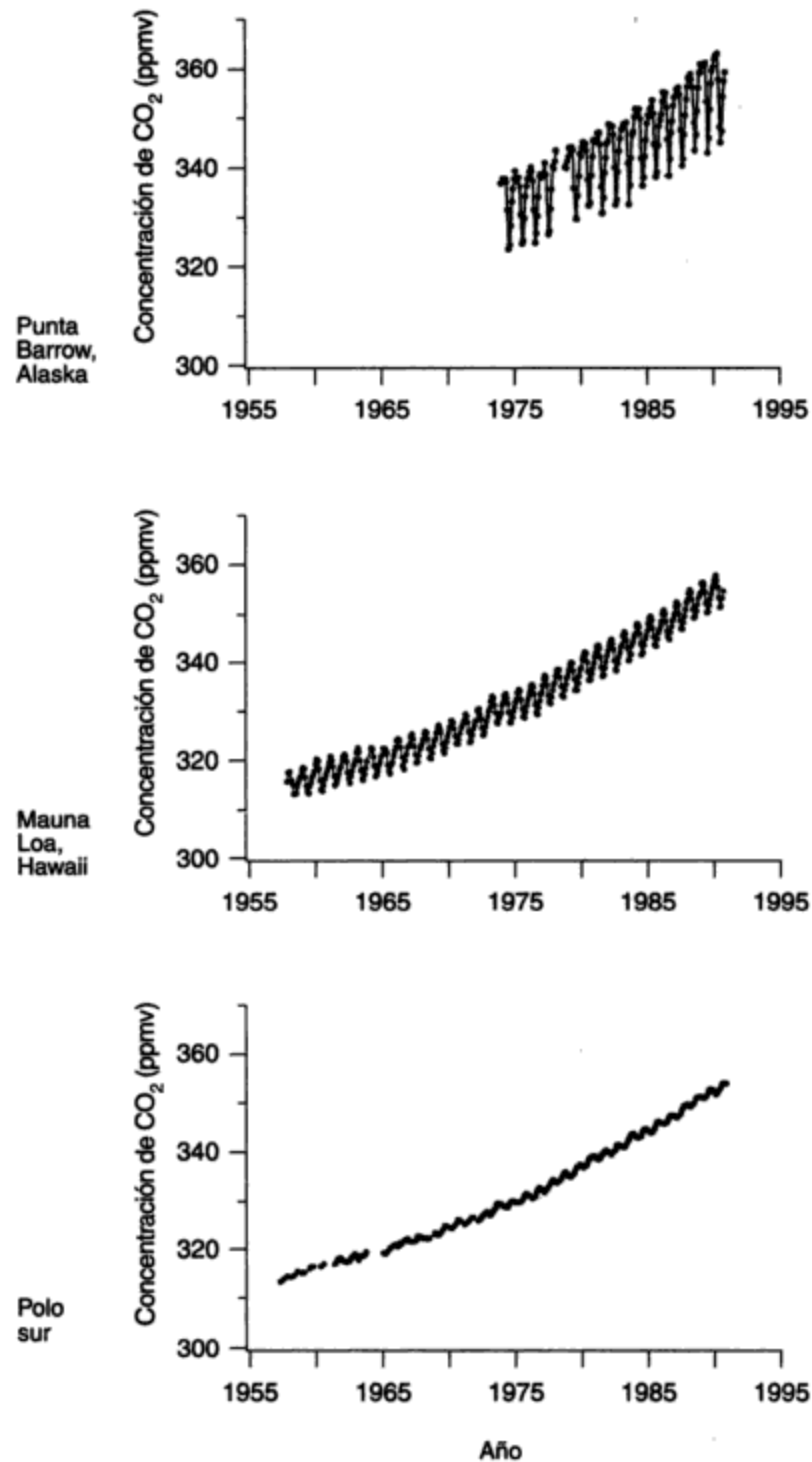
### 5.2.1 Dióxido de carbono y otros gases de invernadero

Uno de los cambios ambientales más importantes que se están produciendo en la actualidad es la acumulación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico. Sin duda, el  $\text{CO}_2$  adicional proviene de la quema de combustibles fósiles, la tala de bosques y el desgaste del *humus* del suelo (el complejo orgánico coloidal que contiene la tierra). Además, se están agregando otros gases con propiedades similares (véase también la sección 7.3.2). Es probable que el resultado final de la acumulación sea un cambio en el clima, en especial temperaturas más altas. Esto puede afectar la economía mundial.

El contenido atmosférico de  $\text{CO}_2$  normalmente se mide en términos de su concentración en relación con los demás gases en partes por millón en volumen (ppmv). Aunque se producen grandes variaciones diurnas en la concentración de  $\text{CO}_2$  cerca del suelo (a causa de la acción de las plantas verdes o del consumo de combustible), el gas está bien mezclado en la atmósfera baja. Más aún, la concentración es casi la misma en todos los niveles en ambos hemisferios. Los valores medios anuales en 1995 fueron cercanos a 360 ppmv. La figura 5-1 muestra cómo ha cambiado la concentración desde que se inició su seguimiento formal en 1958. Se registra un aumento persistente año con año en todas las estaciones de monitoreo de todas partes del mundo (Houghton *et al.*, 1992).

Por desgracia, carecemos de registros sistemáticos previos a 1958 y por esta razón no sabemos cuándo se inició el aumento. El  $\text{CO}_2$  atmosférico preindustrial probablemente era cercano a 280 ppmv. El aumento subsecuente ha sido alrededor de 75 ppmv. En el Observatorio Mauna Loa de Hawaii, el incremento anual desde 1958 ha variado de 0.5 ppmv en 1962-1963 y 1974-1975 hasta 2.2 ppmv en 1972-1973. La tasa reciente de incremento es evidentemente mayor que en años pasados de este mismo siglo, pero ha tenido considerables fluctuaciones. Durante los 80, la tasa de aumento fue de 4% por década. A principios de la década de los 90 se redujo, pero en apariencia se ha recuperado. Son muy pocos los otros cambios ambientales globales de tal magnitud que se han medido efectivamente.

Puesto que la masa del carbono que contiene el planeta es prácticamente constante, el aumento debe provenir de otro depósito de almacenamiento. La figura 5-2 muestra un estimado



**Figura 5-1** Tendencias en la concentración media anual de dióxido de carbono en Punta Barrow, Alaska; Mauna Loa, Hawaii; y el polo sur. El ritmo anual se debe a la variación estacional en la absorción y liberación por las plantas y el suelo, principalmente en el hemisferio norte. Todas las estaciones alrededor del mundo muestran una tendencia ascendente de más o menos 4% por década. *Fuente:* Houghton *et al.* (1992).



de los depósitos identificados y las rutas de transferencia, con cantidades almacenadas y tasas de transferencia en gigatoneladas (1 Gt =  $10^9$  toneladas =  $10^{12}$  kg) de carbono anuales (Gt/año). La reserva atmosférica de carbono en 1995 se estimaba alrededor de 760 Gt, en comparación con 610 Gt en 1860. Se indican tres transferencias netas:

1. Una adición aproximada a la atmósfera de 5 Gt/año debida a la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas y turba); la existencia de éstos en la corteza terrestre es de más de 5,000 Gt.
2. Una adición a la atmósfera más o menos de 0 a 2 Gt/año de carbono proveniente de la oxidación de tejidos vegetales, basura y carbono del suelo, debida principalmente a la tala de bosques. La existencia total de cada una se supone en 590 Gt de biomasa viva, 60 Gt de basura y 1,670 Gt de *humus* del suelo. Se cree que la fotosíntesis y la transferencia por respiración son iguales a 63 Gt/año. En cada estimación hay incertidumbres sobre los datos.
3. Una transferencia neta de la atmósfera a los océanos de 4 Gt/año de carbono (la diferencia entre intercambios muy grandes en ambos sentidos). También en este caso la cifra es muy incierta.

Estas estimaciones sugieren un incremento anual de 2 a 4 Gt de carbono en la atmósfera. El aumento medio observado equivale a poco menos de 3 Gt/año. Por consiguiente, las adiciones del inciso (2) o las transferencias al océano del inciso (3) pueden ser erróneas, puesto que se considera que el consumo de combustibles fósiles del inciso (1) es razonablemente preciso. De hecho, existe amplio desacuerdo acerca de las transferencias desde biotas vivas, y desde suelos, hacia el océano. La acumulación atmosférica anual es aproximadamente la mitad del carbono que se libera por quema de combustibles fósiles (la *tasa de retención*). Los océanos son el único sumidero importante identificado para el carbono atmosférico.

Las respuestas a la pregunta "¿continuará el aumento?" evidentemente dependen del uso futuro de combustibles fósiles y, en menor medida, del uso del suelo y los recursos forestales. De las opciones de energía disponibles, sólo la fisión nuclear (y, en el futuro distante, la fusión), la hidroelectricidad y la energía solar ofrecen un alivio a la acumulación de  $\text{CO}_2$ . Incluso el gas natural, el más eficiente de los combustibles fósiles, agrega  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.

Por otra parte, hoy nos damos cuenta que otros gases tienen un efecto similar al del  $\text{CO}_2$ . Estos gases de invernadero incluyen el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y diversos gases sintéticos, principalmente los clorofluorocarbonos (compuestos de carbono, cloro y flúor). Estos últimos se han utilizado de forma generalizada como refrigerantes, propelentes en latas de aspersión y para expandir espumas plásticas. Todos ellos son similares al  $\text{CO}_2$  en cuanto a comportamiento radiactivo. Aunque están presentes en cantidades minúsculas, se piensa que estos gases rivalizan con el  $\text{CO}_2$  en su efecto de calentamiento (World Meteorological Organization, 1981). El calentamiento global de invernadero puede muy bien ser el *doble* del efecto esperado para el  $\text{CO}_2$  solo, y es casi equivalente, en cuanto a efecto de calentamiento, a un incremento de 1% de  $\text{CO}_2$  por año.

### 5.2.2 Efectos de la acumulación de gases de invernadero

La acumulación de gases de invernadero inevitablemente influye en la temperatura de la atmósfera y de la superficie terrestre. El dióxido de carbono emite y absorbe radiación a longitudes de onda típicas del planeta y de la atmósfera. Si su concentración aumenta, la atmósfera ofrece mayor resistencia al escape necesario de la radiación hacia el espacio. Puesto que a la radiación

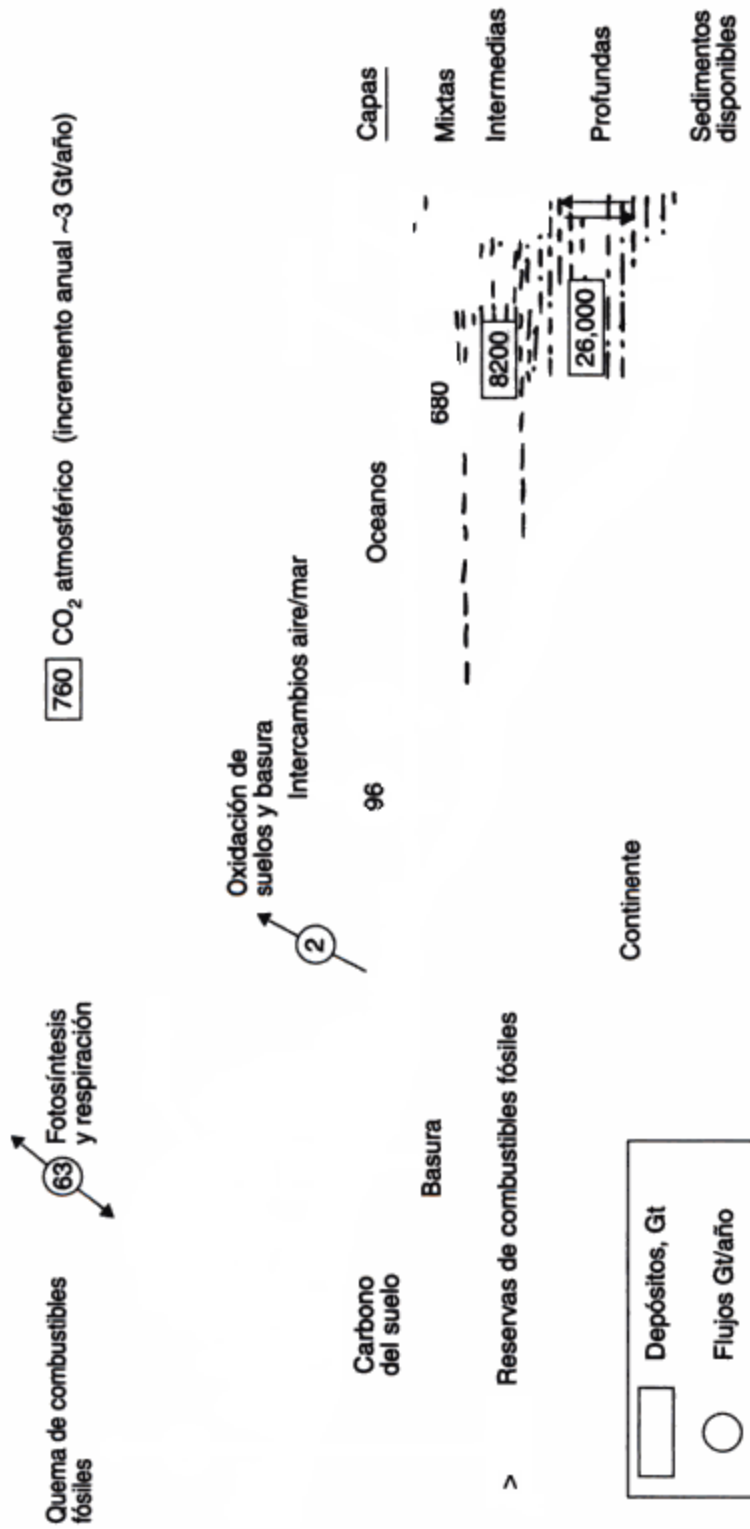


Figura 5-2 Bosquejo de los principales depósitos de almacenamiento y procesos de transferencia del ciclo del carbono. Fuente: Principalmente U.S. Department of Energy (1980a); Houghton *et al.* (1990).

solar que llega no le afecta mucho el cambio de concentración de  $\text{CO}_2$ , la temperatura de la superficie debe aumentar como consecuencia de la mayor resistencia del flujo de regreso. Aunque no es idéntica, la influencia de los otros gases de invernadero es similar. La altura de la atmósfera, desde la cual la radiación escapa finalmente, aumenta también un poco (véanse además las secciones 7.3.2 y 7.3.3).

Para predecir las consecuencias de este cambio de radiación debemos tomar en cuenta la redistribución de la energía disponible por los vientos y, de ser posible, por las corrientes oceánicas. Los primeros intentos para hacer esto por medio de modelos sencillos en una o dos dimensiones llevaron a la conclusión de que la superficie terrestre se calentaría decididamente a medida que el  $\text{CO}_2$  aumentara, pero el calentamiento calculado variaba de un estimado a otro.

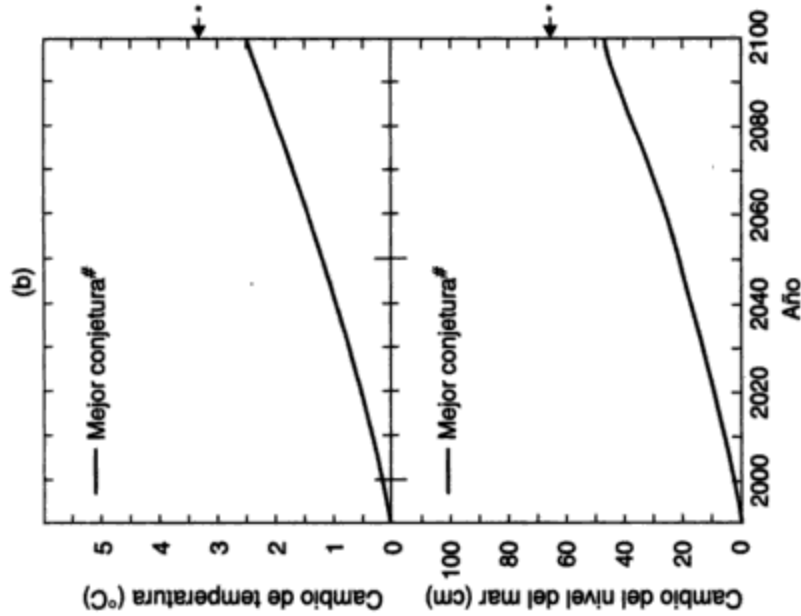
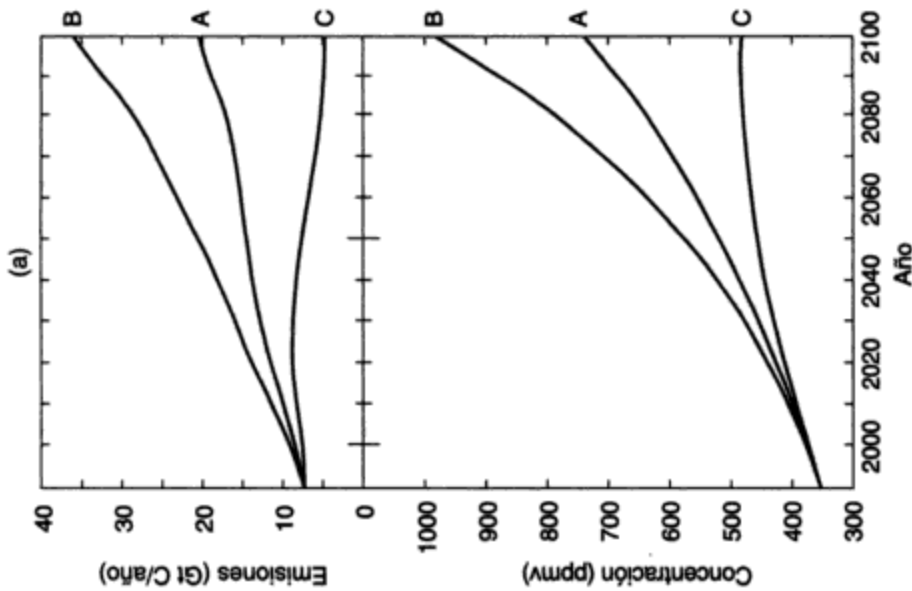
En 1990, un Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) reunió opiniones de expertos sobre emisiones futuras, acerca de diversas respuestas que podrían compensar el calentamiento, y también sobre la sensibilidad de la atmósfera a este tipo de aportaciones de energía alteradas. La figura 5-3, tomada de una actualización de 1992 (Wigley y Raper, 1992), muestra en el lado izquierdo la gama de futuras emisiones de carbono que se consideran posibles a fin de destacar el alto grado de incertidumbre. Se muestra también la concentración de  $\text{CO}_2$  correspondiente. Para el año 2100 podría estar entre 485 y 985 ppmv, ¡un intervalo de más de 100% de incertidumbre! Las curvas del lado derecho muestran la predicción correspondiente del cambio de temperatura y de nivel del mar calculada por medio de un modelo sencillo. Es evidente que no hay certidumbre alguna acerca de los resultados futuros.

Se emplean modelos más elaborados para representar la circulación general de la atmósfera y los océanos, los cuales transportan calor y humedad. El IPCC revisó 22 de estos modelos (Houghton *et al.*, 1990) y concluyó lo siguiente:

1. Si se supone que las cosas siguen como están (esto es, sin nuevas medidas de control), la temperatura media global del aire en la superficie será alrededor de  $1^\circ\text{C}$  más alta para 2025 que en 1990, y  $3^\circ\text{C}$  más alta para finales del siglo XXI. Si se introducen de inmediato medidas de control es posible que retarden este calentamiento, pero poco probable que lo detengan (porque se necesitarán reducciones de más del 60% aun para mantener las concentraciones en los niveles actuales).
2. El calentamiento puede ser más pronunciado en el sur de Europa y el centro de Norteamérica, acompañado de menor precipitación pluvial en verano y menos humedad en el suelo para los cultivos.
3. Se espera que el nivel mundial del mar se eleve alrededor de 20 cm para el año 2030, y unos 65 cm para finales del siglo XXI (las estimaciones más recientes sugieren cifras más reducidas).
4. La temperatura media global del aire en la superficie ha aumentado entre 0.3 y 0.6 K en el último siglo, y el nivel del mar ha subido de 10 a 20 cm.

Estas predicciones de temperaturas en aumento tienen implicaciones importantes para Norteamérica, algunas buenas y otras malas. Los efectos positivos pueden incluir los siguientes:

1. Una reducción en los costos de calentamiento de espacios debido a inviernos menos fríos, compensada en parte por aumentos en los costos del aire acondicionado.
2. Temporadas más largas de crecimiento de cultivos, con la consecuente posibilidad de mejores cosechas en las regiones nórdicas, de nuevo compensadas por menores rendimientos



**Figura 5-3** (a) Emisiones estimadas de carbono (C) y consiguientes concentraciones atmosféricas (gigatoneladas de C y ppmv de CO<sub>2</sub>) hasta el año 2100 con base en las políticas ambientales existentes. Las curvas A suponen un crecimiento medio de la población, con desarrollo económico y disponibilidad de recursos medios. Las curvas B suponen un crecimiento medio de la población, con desarrollo económico y disponibilidad de recursos altos. Las curvas C suponen un crecimiento de población de medio a bajo, con desarrollo económico y disponibilidad de recursos bajos. (b) Respuestas por mejor conjetura pronosticadas para el aumento de CO<sub>2</sub> en relación con el aumento en la temperatura media global del aire superficial (curva superior) en grados centígrados, y elevación del nivel del mar en centímetros (curva inferior).

Fuente: \*Wigley y Raper (1992), \*Houghton *et al.* (1992).

en las regiones del sur (donde los veranos suelen ser demasiado cálidos para obtener buenos rendimientos de los cultivos).

3. Navegación mucho más fácil y durante un mayor periodo en el verano en los mares árticos (p. ej., Beaufort, Bering, bahía de Baffin) y en el ártico canadiense (bahía y estrecho de Hudson, estrecho de Lancaster, estrecho de Barrow y otros estrechos), aunada a condiciones más fáciles para la extracción submarina de petróleo y gas.

Los efectos menos favorables pueden ser los siguientes:

4. Condiciones de cultivo más áridas en muchas partes del oeste medio y las Grandes Llanuras, incluso en las Praderas Canadienses, con la consecuente necesidad de un uso aún mayor de agua de irrigación, ya de por sí costosa y escasa.
5. Deshielo generalizado del suelo permanentemente congelado (*permafrost*) que en la actualidad subyace a muchas partes de Alaska y del norte de Canadá. Esto alterará la tecnología de urbanización y las condiciones para la construcción de caminos y tuberías en estas áreas.

Estos cambios son hipotéticos y puede ser que nunca se lleven a efecto. Hay escépticos que sugieren un efecto menor en las temperaturas atmosféricas. Este tipo de conflictos son comunes en los primeros tiempos del estudio de los sistemas naturales, y surgen de la dificultad de incorporar el detalle suficiente en las condiciones límite de los modelos y en sus diferentes sistemas de ecuaciones.

### 5.2.3 El problema del agotamiento del ozono

Como se mostrará en el capítulo 7, la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra se interrumpe bruscamente cerca de los 290 nm (véase la figura 7-2, curva 3), aunque la radiación que penetra la parte superior de la atmósfera incluye cantidades considerables de longitudes de onda más cortas. La razón es que pequeñas cantidades de ozono ( $O_3$ ), principalmente en las capas entre 15 y 40 km sobre el nivel del suelo, filtran la radiación faltante y la utilizan para generar las condiciones cálidas de la estratosfera superior (véase la figura 7-1).

Esta capa protectora, necesaria en virtud de que la radiación ultravioleta daña el ADN de la piel humana produciendo quemaduras solares y en ciertos casos cáncer de la piel, debe su existencia a la luz ultravioleta misma. Todos los tejidos vivos están expuestos en alguna medida al riesgo. Esta radiación, rica en energía, es capaz de escindir moléculas de  $O_2$ , y los átomos aislados de O se combinan con  $O_2$  para crear  $O_3$ . Este proceso se ha estado verificando desde el primer momento en que hubo oxígeno libre en la atmósfera como resultado de la fotosíntesis. La vida ha prosperado en la Tierra porque la poderosa radiación ultravioleta se elimina totalmente por filtración.

En la naturaleza, la creación de  $O_3$  es continua en tanto brilla el Sol; no obstante, la cantidad de  $O_3$  se conserva pequeña y está confinada en gran medida a la estratosfera. Esto se debe a que el ozono es atacado por otros gases que se difunden hacia arriba desde la superficie de la Tierra. De ellos el más importante en la naturaleza es el óxido nitroso ( $N_2O$ ), que emana del suelo y de ciertos procesos industriales. En la estratosfera este compuesto se oxida rápidamente a NO, el cual ataca el  $O_3$ . Éste y otros procesos crean un equilibrio natural: la radiación ultravioleta produce ozono, y otros procesos naturales causan su descomposición.

Por desgracia, la actividad económica humana ha agregado otros compuestos capaces de atacar el ozono. Los principales son los compuestos de cloro, en primer término los ya mencionados clorofluorocarbonos (CFC), por su papel como gases de invernadero. En la estratosfera baja y media estos compuestos se descomponen y permiten la existencia de átomos de cloro libres, los cuales atacan el ozono. Desde que se identificó el proceso en 1974, muchas muestras han indicado altas concentraciones de dióxido de cloro, un subproducto del proceso de destrucción de ozono. El dióxido de cloro mismo se disocia y el ciclo se repite. Se trata de un proceso catalítico, por esta razón la pérdida de ozono es mucho mayor que la que implicaría la cantidad liberada de CFC.

Por añadidura, la eficacia de la destrucción del ozono aumenta si están presentes nubes estratosféricas. Esto sucede sólo en el frío de la noche polar, cuando las temperaturas descienden a menos de 200 K y, en el Antártico, a 180 K o menos. En la primavera antártica, fundamentalmente en octubre y noviembre, se han registrado cantidades de ozono notablemente reducidas y menguantes desde 1975. Este fenómeno se conoce como el *agujero de ozono*. Cuando el Sol regresa, la pérdida se recupera rápidamente. Pero la intensidad de las pérdidas de primavera parece ir en aumento, y se temen efectos similares en el Ártico, aunque en una escala menor. Una pequeña disminución general en el ozono parece haber afectado otras áreas, sobre todo en primavera, aunque no se tiene aún la certeza de que esto se debe a destrucción por efecto del cloro. Estos descubrimientos, muy recientes (la amenaza se identificó apenas en 1971, y el fenómeno del agujero de ozono en 1981), ilustran la importancia de la química atmosférica, y en particular, de las pequeñas cantidades de especies químicas activas que tienen un efecto climático tan notorio.

Al igual que el efecto invernadero, el problema del agotamiento del ozono es mundial y se puede atacar sólo por medio de una acción planetaria. La atmósfera es un eficiente difusor de contaminantes. Esto puede ser útil para dispersar la contaminación local del aire, pero también garantiza que los gases insolubles se dispersen por toda la atmósfera y creen con ello desequilibrios químicos que no se previeron, pero que ahora se deben combatir.

#### **5.2.4 Medidas de control:**

##### **Convenio para el cambio del clima**

En la Conferencia sobre Ambiente y Desarrollo de la ONU, celebrada en Río de Janeiro en junio de 1992, las naciones presentes adoptaron el Convenio para el cambio del clima, que confirmó la severidad de los problemas de calentamiento global y de agotamiento del ozono e hizo un llamado a la acción para abatir la amenaza. En particular, dicho convenio identificó acciones nacionales que se deben emprender para estabilizar las emisiones de gases de invernadero y para controlar el problema de agotamiento del ozono. Este último es un problema tecnológicamente manejable, puesto que los gases que atacan la capa de ozono han sido identificados y se pueden controlar desde la fuente (esto es, en las plantas de los fabricantes). Pero el control de las emisiones de otros gases de invernadero es más difícil porque todo el mundo contribuye a que se agrave el problema.

El consumo de combustibles fósiles, ya sea de petróleo y gasolina para los automóviles, aviones, trenes y barcos, o de petróleo, gas natural y carbón para la generación de electricidad y el calentamiento de espacios, es la fuente principal de acumulación de CO<sub>2</sub> y al mismo tiempo es vital para el trabajo y la comodidad del hombre. El ingeniero enfrenta la necesidad urgente de avanzar hacia una mayor eficiencia energética y de alejarse de los combustibles del carbón. Estos esfuerzos, aun si cuentan con un patrocinio nacional, tardarán en surtir efecto; en consecuencia, se ha dado mucha atención a otras medidas posibles. Una de ellas, la eliminación tecnológica del

CO<sub>2</sub> de los gases de combustión y de los tubos de escape, es factible pero prohibitiva pues consume demasiada energía y su costo es muy elevado. El Departamento de Energía de Estados Unidos ha argumentado que esto es factible sólo con una economía totalmente electrificada, pues de lo contrario las necesidades de inversión de capital quedan fuera de toda posibilidad (U.S. Dept. of Energy, 1980b). Para las emisiones centralizadas de gases de combustión, la extracción por absorción y separación con monoetanolamina (MEA) es la tecnología disponible que menos energía requiere, pero la eficiencia neta de las plantas de energía se reduce desde un 38% supuesto con cero extracción hasta alrededor de 20% con extracción total: una carga enorme. La eliminación del inmenso volumen de carbono extraído se tendría que hacer en las profundidades del oceano, lo cual incrementaría los costos y plantearía una amenaza para el ciclo de carbono del oceano. Cualquier intento por aumentar la absorción de CO<sub>2</sub> por los oceanos parece pertenecer al reino de la ciencia-ficción y es, en cualquier caso, peligroso dado el estado insatisfactorio actual del conocimiento del ciclo oceánico del carbono.

De las otras medidas posibles, sólo el control de los intercambios de carbono biótico y del suelo parece útil por otros motivos además de la eliminación de CO<sub>2</sub>. La cantidad de carbono almacenada actualmente en la biota, principalmente en tallos, ramas, troncos y raíces leñosos de arbustos y árboles, se ha estimado en un rango que aproximadamente va desde 500 Gt hasta más de 900 Gt, con tasas de intercambio anuales debidas a la fotosíntesis y la respiración del orden de 45 a 70 Gt/año. Por tanto, estos depósitos son comparables con la masa de carbono presente en la atmósfera. El desmonte de los bosques, con el subsecuente uso de la tierra para un almacenamiento menos eficiente de carbono, transfiere desde luego carbono a la atmósfera, principalmente por combustión. Un estimado bastante cuidadoso que se hizo recientemente sitúa la transferencia neta a la atmósfera entre 0 y 2 Gt/año, aunque también existen estimaciones más altas. Se calcula que la cantidad almacenada en el suelo es del orden de 1,450 a 1,730 Gt, un 25% menos que antes de la revolución agrícola. Las estimaciones de las transferencias actuales de carbono del suelo a la atmósfera son muy variadas, y van desde valores despreciables hasta una sorprendente cifra de 4.6 Gt/año.

El desmonte de bosques para la agricultura y la reducción de la biomasa forestal, debida a prácticas de silvicultura deficientes, están claramente al alcance de un posible control. La mayor parte de los depósitos están en la selva tropical, que se está transformando rápidamente para otros usos. También hay grandes cantidades almacenadas en los bosques nórdicos (alrededor de un octavo del total mundial). Tan sólo en Canadá se ha calculado que los depósitos forestales totales son de 44 Gt y que otras 38 Gt están almacenadas en los *muskegs* altos del norte. Un buen manejo de los bosques debe tener como objetivo un alto nivel de biomasa almacenada, o cultivos permanentes. Gran parte de la explotación forestal actual funciona en sentido contrario. De hecho, el mundo enfrenta ahora la necesidad de una era de silvicultura cabalmente controlada, en la cual pueda ser posible reconstruir parte de las pérdidas de biomasa de los dos últimos siglos.

El desenlace final del debate iniciado por la Conferencia de Río aún no está claro. Las dificultades políticas para conciliar los intereses de tantos países son muy grandes y no se han resuelto. Pero una cosa ha quedado clara para todos nosotros: las soluciones simples y unidimensionales no funcionarán. Lo que se necesita, una vez alcanzado el consenso político, es un enfoque amplio que reconozca el carácter interrelacionado de todos los aspectos del ambiente. El efecto invernadero, por ejemplo, afecta el suministro de alimentos, el nivel del mar y por consiguiente la seguridad de los populosos aunque productivos deltas de los países tropicales, los rendimientos forestales (y la necesidad de protección silvícola), y por encima de todo el problema del número de seres humanos, también interviene en el agotamiento de los recursos

y afecta el bienestar de las futuras generaciones. La necesidad de manejar nuestro medio en forma responsable, que es el tema del capítulo 16, es evidente ahora para todo el mundo, pero sólo las medidas radicales nos ayudarán.

### 5.3 LLUVIA ÁCIDA: UN PROBLEMA REGIONAL

#### 5.3.1 La naturaleza del problema

La **lluvia ácida**, el rótulo con el que se describe normalmente la sedimentación ácida tanto húmeda como seca, es una adición bastante reciente a nuestro idioma. Aunque el término fue acuñado hace 120 años por el químico británico Angus Smith con base en sus estudios sobre el aire de Manchester, Inglaterra, no fue sino hasta que se creó una red de vigilancia de la calidad de la lluvia en el norte de Europa, en la década de 1950, cuando se reconoció la incidencia generalizada de la lluvia ácida. Durante la última década, la lluvia ácida ha sido un importante motivo de preocupación porque continúa contaminando grandes áreas de nuestro planeta. La lluvia ácida se produce (siguiendo la dirección del viento) en las áreas de importantes emisiones industriales de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) (Environment Canada, 1981). Después de que el  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$  se depositan en la atmósfera se transforman en partículas de sulfato o de nitrato, y más tarde se combinan con vapor de agua en ácidos sulfúrico o nítrico diluidos. Estos ácidos retornan más tarde al suelo en forma de rocío, llovizna, niebla, cellisca, nieve y lluvia.

La precipitación pluvial transparente normal es ligeramente ácida, con un pH aproximado de 5.6. Esto se debe al equilibrio entre el agua de lluvia y el  $\text{CO}_2$  del aire, el cual se disuelve en cantidad suficiente en las gotas para dar una solución diluida de ácido carbónico. En la actualidad, sobre amplias áreas del este de Norteamérica y del norte de Europa, donde predominan las fuertes precipitaciones pluviales, la lluvia cae con un pH cercano a 4.0 y, en raras ocasiones, de 3.0. La preocupación tiene relación sobre todo con los efectos de la acidez en las poblaciones de peces y otros animales acuáticos, con daños potenciales a cultivos y bosques, y con el creciente deterioro de los materiales para construcción. Incluso parece probable que las lluvias acidificadas pudiesen penetrar en las reservas de aguas subterráneas y aumentar la solubilidad de los metales tóxicos. Las aguas ácidas disuelven también metales como el plomo y el cobre de las tuberías de agua caliente y fría. Los efectos potenciales en el turismo y en los usos recreativos de lagos y ríos podrían haber sido enormes. Afortunadamente, desde la década de 1980 se ha avanzado mucho en la reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  y algunos lagos muestran indicios de recuperación.

#### 5.3.2 Fuentes y distribución de la lluvia ácida

El material contaminante que desciende con la lluvia se conoce como *sedimentación húmeda*, e incluye partículas y gases barridos del aire por las gotas de lluvia. El material que llega al suelo por gravedad durante los intervalos secos se llama *sedimentación seca*, e incluye partículas, gases y aerosoles. Los contaminantes pueden ser arrastrados por los vientos predominantes a lo largo de cientos, incluso miles, de kilómetros. Este fenómeno se conoce como el *transporte de largo alcance de contaminantes aéreos* (TLACA). En 1968, Svante Oden, de Suecia, demostró que la precipitación sobre los países escandinavos se estaba haciendo cada vez más ácida, que los compuestos de azufre de las masas de aire contaminado eran la causa primor-



dial, y que grandes cantidades de las sustancias acidificantes provengan de emisiones de las áreas industriales de Europa central y Gran Bretaña. Poco tiempo después se obtuvieron datos acerca de cambios en la acidez de los lagos. Los estudios de trayectorias en Norteamérica han demostrado que más del 50% de la precipitación ácida en Ontario central se debe a las masas de aire que pasan sobre las fuentes emisoras de azufre más importantes de los estados del oeste medio de Estados Unidos, en especial Ohio e Indiana (Environment Canada, 1981). Por otra parte, las lluvias ácidas de los Adirondacks y del sur de Quebec, en muchos casos parecen tener su origen en los estados industriales del litoral oriental como Nueva York, Massachusetts y Maryland, y también en Pensilvania y otros estados sobre los cuales ya ha pasado antes el aire (figura 5-4). Las provincias marítimas de Canadá sufren los efectos de las emisiones del litoral oriental de Estados Unidos y también, en ocasiones, de las fundiciones de Ontario y Quebec. Más del 10% de la lluvia ácida que cae en el noreste de Estados Unidos proviene de fuentes canadienses.

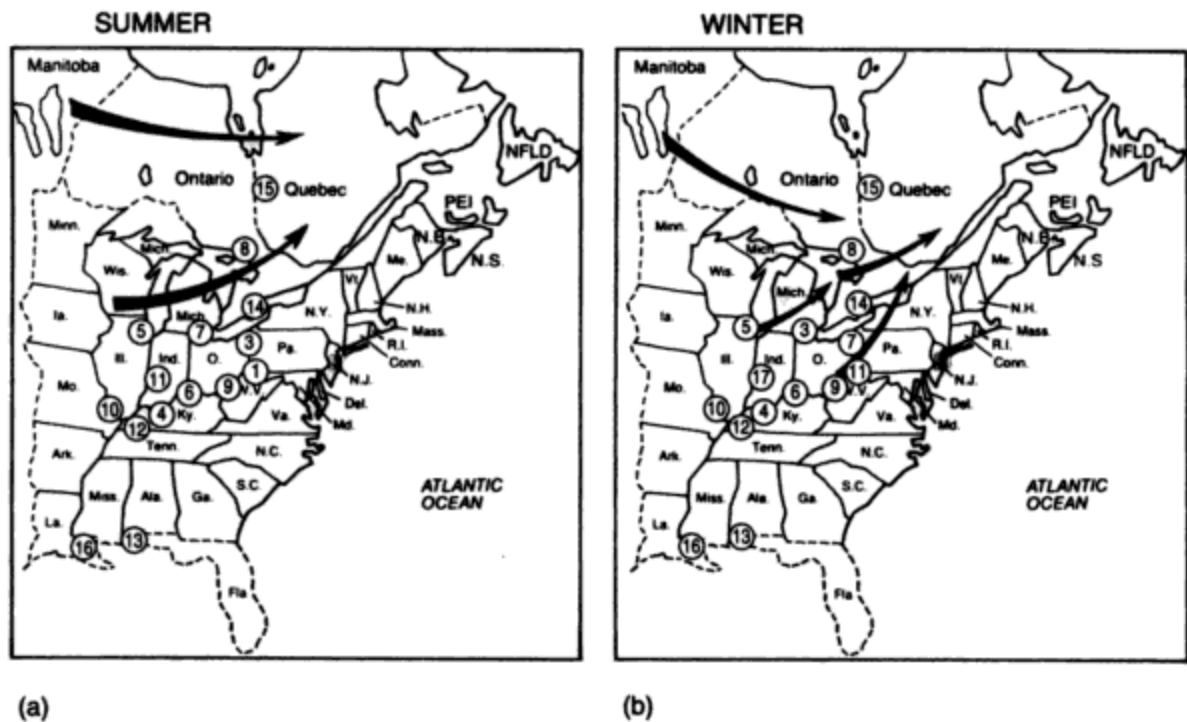
La figura 5-5 presenta la distribución de emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en Norteamérica. La figura 5-6 muestra las áreas vulnerables a la acidificación. Las líneas indican la incidencia de sedimentación de sulfatos húmedos y las cifras muestran los niveles de sedimentación en  $\text{kg/ha} \cdot \text{año}$ . Los niveles de sedimentación superiores a  $20 \text{ kg/ha} \cdot \text{año}$  en general se consideran como una amenaza en las áreas vulnerables. La sedimentación de nitratos, no mostrada en el mapa, amenaza las mismas áreas.

En la tabla 5-1 se presenta una comparación entre las fuentes de azufre y  $\text{NO}_x$  en varios estados de Estados Unidos y en Ontario. La importante contribución de las plantas generadoras alimentadas con carbón de los principales estados emisores de azufre es patente en Ohio, Pensilvania, Indiana, Illinois y Kentucky; también se advierte el predominio de las fundidoras de níquel y cobre de Sudbury como fuente de azufre para Ontario e incluso más lejos. En todos los casos, estas emisiones de fuentes muy grandes se han dispersado a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de la tecnología de dilución de la contaminación con chimeneas altas; esto ha sucedido a finales de los años 60 y durante la década de los 70, y ahora contribuyen a los problemas regionales de lluvia ácida.

Los materiales ácidos se acumulan en el banco de nieve en las regiones sometidas a precipitación ácida. El primer deshielo importante de primavera libera la mayor parte de la acumulación ácida, la cual escurre como agua de fusión sobre el suelo todavía congelado y entra rápidamente a los ríos y arroyos. Una consecuencia de esto es la súbita entrada en los lagos de un "tapón" de aguas ácidas, en especial en áreas costeras poco profundas. La figura 5-7 muestra la "depresión primaveral del pH" en una de las seis corrientes que llegan al lago Harp, un lago en estudio de Muskoka, Ontario. A medida que el escurrimiento de primavera aumenta el caudal de la corriente, la nieve ácida derretida reduce el pH y produce graves "efectos de choque" químico en la vida acuática. Las consecuencias en los peces que desovan en aguas poco profundas se examinan más adelante. En la naturaleza, los acontecimientos extremos, más que los de magnitud media, tienden a tener el mayor impacto.

### 5.3.3 Efectos de la lluvia ácida en los sistemas acuáticos

El efecto más importante de la lluvia ácida en los sistemas acuáticos es el descenso de las poblaciones de peces, situación especialmente perjudicial para la pesca deportiva. El resultado indirecto en el turismo es de tipo económico. Otros efectos de la lluvia ácida relacionados con



**Figura 5-4** Trayectorias de las tormentas sobre las principales áreas emisoras de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en (a) verano y (b) invierno. Fuente: Ontario Ministry of the Environment (1980).

*Nota:* Las tasas de emisión en Estados Unidos de la base de datos SURE II son tasas de emisión de 1977-1978 para fuentes del área.

Los datos canadienses de Environment Canada son tasas estimadas de emisión en 1978 para los principales puntos fuente de  $\text{SO}_2$  y tasas de emisión en 1974 para otras áreas fuente. Trayectorias de tormentas por J. Kurtz, científico meteorológico. Environment Ontario se basa en 40 años de datos. U.S. Weather Bureau.

**NORTEAMÉRICA ORIENTAL: PRINCIPALES ÁREAS EMISORAS DE  $\text{SO}_2$  Y  $\text{NO}_2$**

Área geográfica	Gramos/s	Área geográfica	Gramos/s
1. Este y oeste de Pittsburgh; valle del río Ohio superior y central	98,718.7	8. Sudbury, Ontario	43,915.3
2. Nueva York, Nueva Jersey	81,892.2	9. Valle del río Ohio inferior y central; Clarksburg, Virginia Occidental	42,401.3
3. Toledo, Ohio; Detroit, Michigan	65,421.6	10. Este de Missouri, Illinois	41,298.8
4. Oeste de Kentucky; sur de Indiana	53,623.7	11. Indianapolis, Indiana	30,202.9
5. Chicago, Illinois	53,040.7	12. Oeste de Kentucky	25,849.3
6. Cincinnati, Ohio; norte de Kentucky	50,051.0	13. Mobile: sur de Alabama	24,138.5
7. Cleveland, Ohio; oeste de Pensilvania	47,997.7	14. Toronto, Ontario	18,584.7
		15. Rouyn-Noranda, Quebec	16,404.2
		16. Sur de Luisiana	14,596.8

**TABLA 5-1 CANTIDADES DE SO<sub>2</sub> Y NO<sub>x</sub> QUE SE EMITEN ANUALMENTE DESDE DIVERSOS ESTADOS DE ESTADOS UNIDOS Y ONTARIO**

	Dióxido de azufre (10 <sup>3</sup> ton/año)	óxidos de nitrógeno (10 <sup>3</sup> ton/año)
Ohio	3259 (Se redujo a 2,700 en 1980)	1187
Pensilvania	2495	1023
Ontario	2100 <sup>a</sup>	No se conoce
Indiana	1891	960
Illinois	1707	1274
Kentucky	1631	569
Texas	1541	2117
Missouri	1507	618
Tennessee	1277	560
Arizona	1239	276
Virginia	1226	471
Occidental		
Michigan	1225	742
Alabama	1038	511
Nueva York	1022	906
California	675	1284

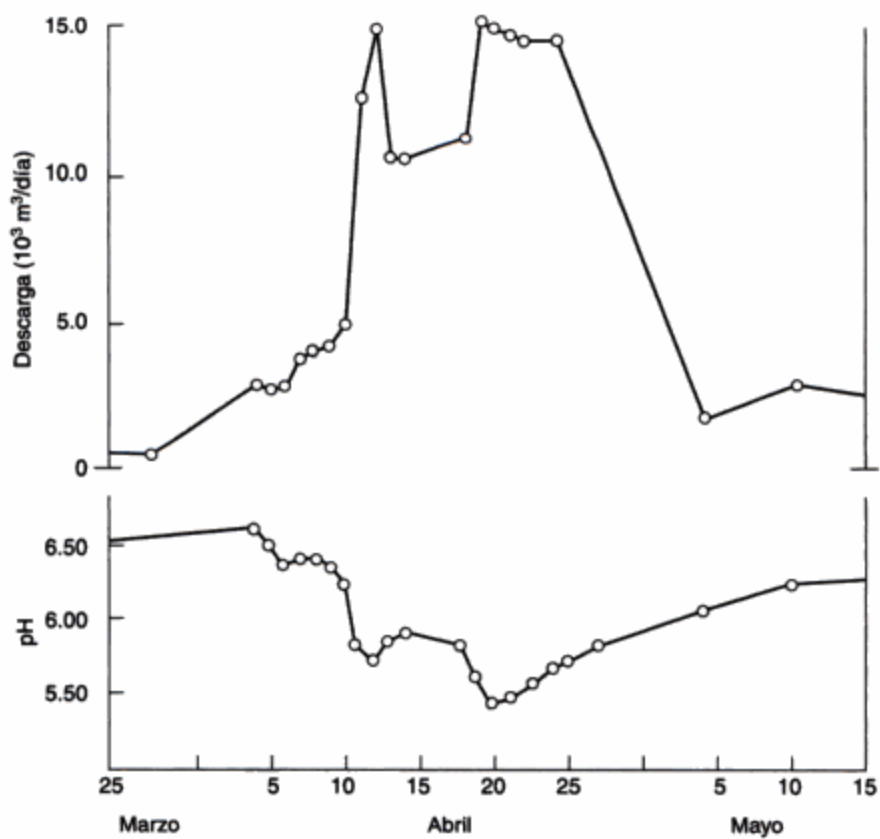
<sup>a</sup>Incluye las emisiones de Ontario Hydro y las fundidoras del complejo de Sudbury.

Fuente: Government of Ontario report, 1981.



**Figura 5-5** Distribución de las emisiones de (a) dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); (b) óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Fuente: Environment Canada (1984).

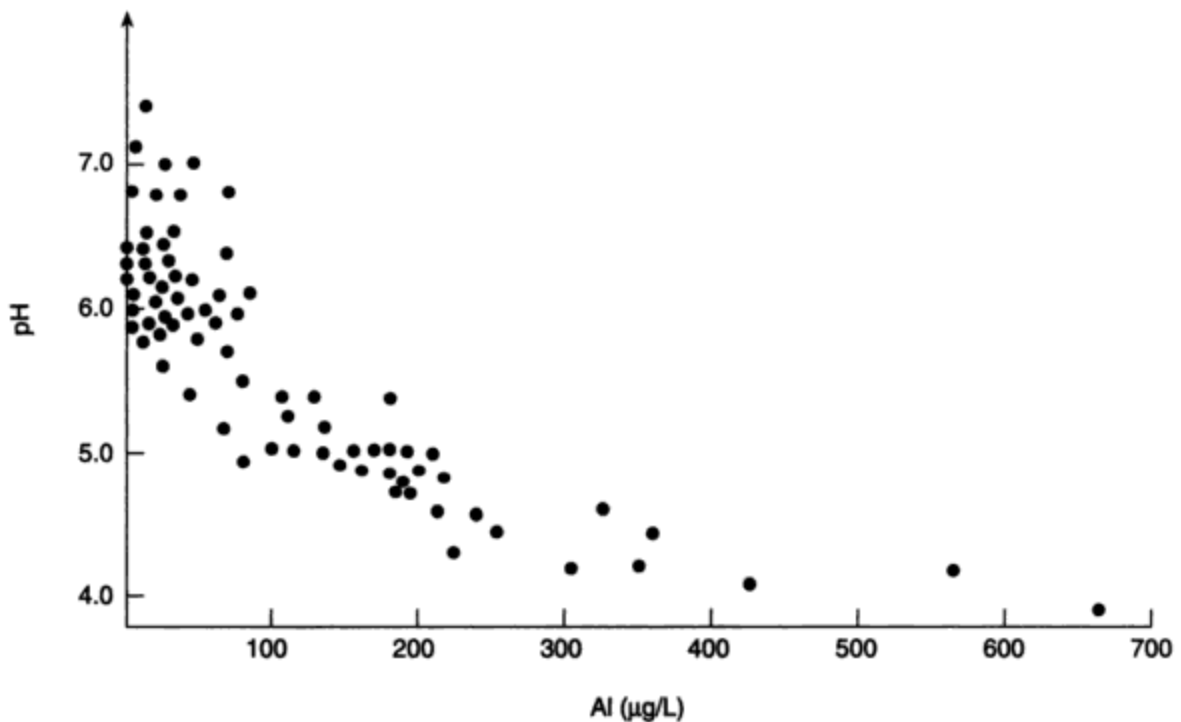
**Figura 5-6** Áreas vulnerables a la acidificación, con base en la geología del lecho rocoso y los depósitos de superficie. *Fuente:* Environment Canada (1984).



**Figura 5-7** Depresión primaveral del pH de una corriente. *Fuente:* Ontario Ministry of the Environment (1980).

el agua incluyen los que se producen en los seres humanos que comen peces con una mayor concentración de metales en su carne y la reducción de ciertos grupos de zooplancton, algas y plantas acuáticas, todo lo cual trastorna la cadena alimenticia global de los lagos y potencialmente causa desequilibrios ecológicos. Los estudios han demostrado con claridad que la trucha y el salmón del Atlántico son particularmente sensibles a los niveles bajos de pH, los cuales interfieren con sus procesos reproductivos y con frecuencia dan origen a deformaciones en el esqueleto (Beamish *et al.*, 1975).

Las altas concentraciones de aluminio en las aguas acidificadas suelen ser el agente que mata los peces y quizá otras biotas sensibles, como los crustáceos del plancton. En los lagos alcalinos o casi neutros las concentraciones de aluminio son muy bajas. No obstante, a medida que el pH desciende, el aluminio antes insoluble, que está presente en concentraciones muy altas en las rocas, los suelos y los sedimentos de ríos y lagos, comienza a disolverse (figura 5-8). Una vez en solución, el aluminio a bajas concentraciones (de 0.1 a 1 mg/L) es excesivamente tóxico para diversas formas de vida acuática. Aunque la concentración de aluminio aumenta de forma exponencial abajo de un pH de 4.5 a 4.7, la toxicidad para los peces se presenta arriba de este valor. Los estudios realizados en la Cornell University por Baker y Schofield (1980) muestran que la toxicidad máxima del aluminio para los peces tiene lugar alrededor de un pH de 5.0. Esto se debe a la complejidad química del aluminio: la estructura y sus proporciones relativas en solución cambian con el pH. El aluminio iónico libre está presente sobre todo abajo de 4.2 y es muy tóxico. A un pH cercano a 5.0 predomina la forma hidroxílica, y la toxicidad desciende arriba y abajo de este nivel de pH. A un pH de 5.0 las concentraciones de aluminio de 0.2 mg/L o mayores causan daños a las branquias y secreción de mucosidad hacia las mismas en la trucha parda y la rémora blanca. Parece ser que la mucosidad viscosa hace las veces de un tapón en las



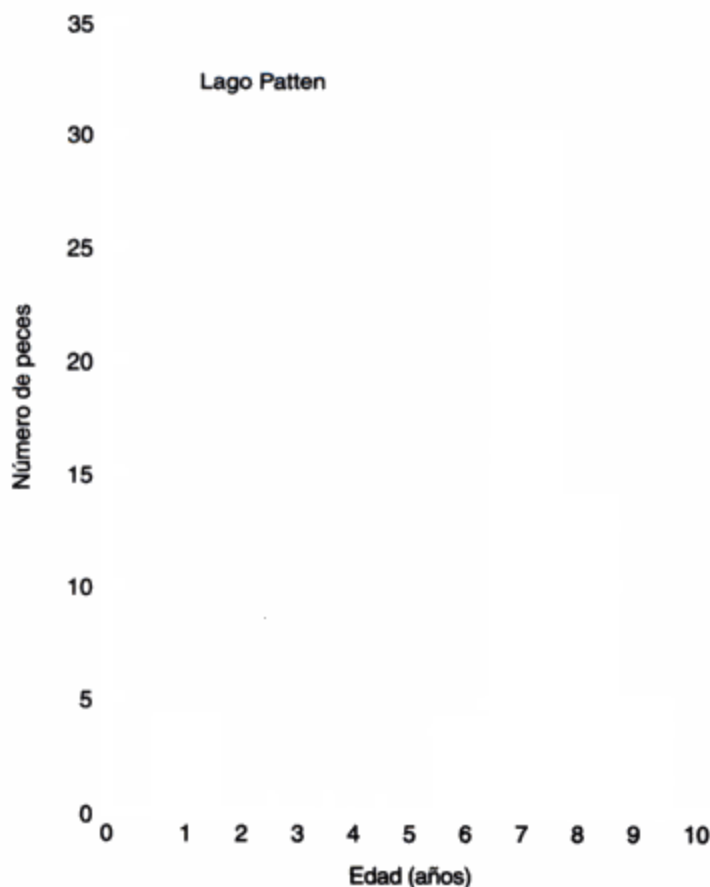
**Figura 5-8** Relación entre el pH y el contenido de aluminio total en ciertos lagos suecos de aguas transparentes. *Fuente:* Dickson (1980).

branquias y causa problemas respiratorios. Además, se altera la integridad esencial de la membrana branquial semipermeable, a través de la cual se verifica el intercambio de gases y sales. Así pues, todo indica que no sólo un aumento en la concentración de iones  $H^+$  puede causar mortalidad de peces y descensos en su población, sino que además el aluminio puede ser un factor tóxico adicional y tal vez crucial en aguas con un pH alrededor de 5.0 y sin duda alguna a un pH de 4.0 (Harvey, 1980; Harvey y Pierce, 1981).

Aunque los peces pueden morir a causa de la acidificación, lo más común es que dejan de reproducirse. Los añejos no se incorporan a la colonia o lo hacen en número reducido, y después de algunos años de este fracaso reproductivo cada vez se tiene una población más vieja, hasta que la especie termina por desaparecer del lago o la corriente. Este envejecimiento y merma poblacionales de un año se ilustra con los datos sobre la perca amarilla en el lago Patten, Ontario (figura 5-9) (Harvey, 1980; Beamish y Harvey, 1972).

Algunas de las áreas afectadas por la lluvia ácida son las siguientes:

- Alrededor de una docena de ríos de Nueva Escocia, muy lejos de las fuentes locales de contaminación situadas contra el viento, ya no cuentan con poblaciones saludables de salmón del Atlántico.
- Unos 200 lagos de los Adirondacks del norte del estado de Nueva York ya no sustentan trucha de arroyo ni cherna de boca pequeña. Miles de lagos más están perdiendo su capacidad para amortiguar la lluvia ácida (Harvey, 1980).



**Figura 5-9** Composición por edades de la población de perca amarilla en el lago Patten, Ontario. *Fuente:* P. M. Ryan y H. H. Harvey (1980). Derechos reservados © 1980 por Dr. W. Junk Publishers. Reproducido con autorización de Kluwer Academic Publishers.

- De los 4,016 lagos evaluados en la provincia de Ontario, se han encontrado acidificados 155, el 4%, y su capacidad para sustentar vida acuática es muy limitada. Un total de 2,896 lagos mostraron cierta susceptibilidad a la acidificación. D. W. Schindler (comunicación personal, 1987) sugiere que estas estimaciones subestiman en grado considerable la magnitud del problema.

Se han producido fenómenos similares en los ríos del sur de Noruega, en un buen número de lagos de Galloway, Escocia, y en la región de Erzgebirge en Alemania oriental, donde las poblaciones de peces han desaparecido o han sufrido notables reducciones a lo largo de los últimos 30 años.

Muchas especies de anfibios (por ejemplo, ranas, sapos y salamandras) se reproducen en estanques temporales que forman las lluvias de primavera y la nieve fundida. Los huevecillos y los embriones en desarrollo están expuestos al choque ácido primaveral, el cual causa deformaciones o muertes. El trabajo de campo ha establecido que el 80% de los huevos de salamandra no maduran en aguas con un nivel de pH inferior a 6.0. Para la rana grillo y la piadora primaveral nórdica, una exposición a aguas con un nivel de pH cercano a 4.0 produjo una mortalidad superior al 85%. Los anfibios son miembros significativos de los ecosistemas acuáticos y terrestres; como depredadores importantes de insectos acuáticos y también como alimento de alto contenido proteínico para muchas aves y mamíferos, estos animales son eslabones importantes de la cadena alimenticia.

Ciertos grupos de biotas, como los moluscos que incluyen animales con concha (por ejemplo, caracoles, lapas, mejillones y ostras), en gran medida dependen del calcio para su esqueleto externo protector. Puesto que el agua ácida disuelve con facilidad el carbonato de calcio e interfiere para que los organismos incorporen el calcio, mueren en este tipo de aguas.

Muchos crustáceos (familia de la langosta) del pequeño grupo de nadadores libres que se conoce como zooplancton (animales microscópicos de la columna de agua), también son muy sensibles a un aumento en la acidez del agua dulce. Puesto que muchos miembros del zooplancton son fuente de alimento muy importante para los peces, su pérdida eliminaría especies sin un efecto directo de la acidez en los peces mismos.

Por último, al considerar los efectos en la cadena alimenticia es necesario reconocer el papel fundamental de las plantas verdes. Éstas constituyen el sistema de sustento para toda la biota acuática, pues son los únicos organismos capaces de fijar carbono (en presencia de luz) produciendo los carbohidratos, grasas y proteínas indispensables para la vida. Su desaparición causaría un desplome directo de la cadena alimenticia.

#### **5.3.4 Efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas terrestres**

**Efectos en los bosques.** Los bosques de Canadá, Estados Unidos y Escandinavia tienen una enorme importancia económica. Cientos de miles de personas son empleadas por las diversas industrias asociadas con la madera y los bosques. Uno de cada 10 canadienses trabaja de manera directa o indirecta en este tipo de industrias, y Suecia y Noruega tienen un perfil de empleo similar. Además, los bosques y lagos de estos países son importantes áreas turísticas y recreativas. La lluvia ácida plantea una amenaza insidiosa y potencialmente devastadora para nuestros bosques. Se ha demostrado que la lluvia moderadamente ácida (pH 4.6) daña las plantas recién nacidas. Los investigadores están comenzando a evaluar el papel de la lluvia ácida

en el aumento de vulnerabilidad de los árboles ante enfermedades e insectos. No se observa un daño directo y visible al follaje por la lluvia ácida, pero la dramática y sorprendente muerte y marchitamiento de los árboles en Europa central es un catalizador de este tipo de preocupaciones. Miles de hectáreas de bosques de piceas y abetos en Checoslovaquia y de Alemania oriental han muerto en los últimos 20 años. Los bosques de las montañas Hartz y de la Selva Negra de Alemania occidental también tienen problemas, pues las hayas y piceas mueren o su crecimiento se reduce en los suelos menos amortiguados (NATO, 1980). A partir de 1990 se ha advertido cierta recuperación de los bosques de piceas.

Según Bernhardt Ulrich de la Universidad de Gotinga, la mayor acidez de la lluvia en Alemania a lo largo de los últimos 25 años, combinada con las fuertes y ácidas nevadas en las áreas montañosas, ha causado deslave del calcio y magnesio de los suelos; al mismo tiempo, ha aumentado la concentración de aluminio en los solutos del suelo. En consecuencia, se ha reducido la proporción Ca/Al. Cuando esta relación molar es inferior a 1.0 se favorece la incorporación de aluminio en las finas raíces absorbentes, donde se manifiesta la toxicidad de este elemento, capaz de matar las raíces o reducir su vigor. Esto, a su vez, permite la entrada de bacterias y hongos patógenos (causantes de enfermedades) que infectan los árboles y contribuyen de manera gradual a su decadencia. La incidencia de concentraciones altas de aluminio en la solución del suelo ha sido especialmente notoria por años, en los cuales se han producido graves sequías estivales, como en 1975 y 1976 en Europa. En estas circunstancias, la concentración de aluminio aumenta como consecuencia de la concentración de los solutos del suelo inducida por la sequía. Sin duda, las tasas de decadencia de los bosques de Alemania occidental se han acelerado notoriamente desde 1975. Se piensa que el alto nivel de actividad industrial en Alemania occidental y sus alrededores es un factor fundamental para esto, como lo es la elevada precipitación pluvial en las áreas de montaña, donde los efectos son más severos. En los bosques de mayor altitud, las aguas de nubes ácidas envuelven los árboles en niebla durante largos periodos cada año. La figura 5-10 ilustra los efectos de la contaminación ácida del aire.

Una de las mayores dificultades que enfrentamos al estudiar el crecimiento forestal y los posibles efectos de la lluvia ácida en éste es la muy considerable variación anual en cuanto a crecimiento, causada por fluctuaciones climáticas normales y por el ataque de insectos. El crecimiento puede diferir en varios tantos de un año a otro. Por consiguiente, es muy difícil identificar tendencias pequeñas en la reducción del crecimiento forestal en un periodo corto. Las evaluaciones de este tipo se han basado en la anchura de la madera depositada en los troncos de los árboles cada año en forma de anillos. Esta clase de estudios se han llevado a cabo en Estados Unidos y Noruega. Todos ellos han utilizado cantidades limitadas de datos, han tenido dificultades para tomar en cuenta el crecimiento normal en edades diferentes dentro de una misma especie, y no han llegado a conclusiones concretas. Un estudio estadounidense sugiere que "la lluvia ácida amerita una consideración importante como factor supresor del crecimiento en los Pine Barrens de Nueva Jersey", pero otros sugieren que es imposible inferir conclusiones con base en esos datos. Así pues, tenemos una situación muy frustrante, en la cual *podríamos* estar enfrentando una reducción grave del vigor forestal, pero en el momento actual somos incapaces de poner en orden las diversas explicaciones alternativas.

Se han hecho experimentos rociando ácido en el campo o en condiciones controladas de laboratorio (invernadero). Varios de estos estudios han mostrado un crecimiento mayor al aumentar la acidez del rocío hasta 3.0 de pH. En un estudio a cargo de la Environmental Protection



Copyrighted image

(a)

Copyrighted image

(b)

**Figura 5-10** Efectos de la contaminación ácida del aire. (Fotografías cortesía de T. C. Hutchinson.)

- (a) Región severamente afectada, ubicada a unos 8 km de las fundiciones de níquel y cobre del área de Sudbury, provincia de Ontario. La destrucción del bosque en gran medida ha sido originada por fumigaciones con dióxido de azufre a lo largo de muchos años. No hay coníferas, aquí sólo quedan abedules y arces rojos raquíticos. Los suelos se han acidificado y se han contaminado con metales pesados. El aluminio se solubiliza en los suelos fuertemente ácidos.
- (b) Marchitamiento y decadencia de piceas en la región de los Adirondacks del estado de Nueva York. Se aprecia la pérdida gradual de agujas de la parte superior del árbol y de las puntas de las ramas. Esto es similar a gran parte del daño forestal que se ha producido en Alemania.

Agency de Estados Unidos (Lee y Neely, 1980) se observó un aumento en el crecimiento de plantas recién nacidas en cuatro especies, mientras que otras siete no sufrieron efecto alguno hasta 3.0 de pH. Se sugirió que, en virtud de las propiedades del suelo, el efecto de crecimiento fue un efecto de fertilización por incorporación de azufre a través del follaje.

El estudio más detallado se realizó en grupos de pinos albares en Noruega (Drablos y Tollan, 1980). Las aplicaciones se hicieron por encima del pabellón y variando el pH desde 5.6 hasta 2.0. En vástagos de pino albar se observó incluso un pH de 2.0 con mayor altura y crecimiento del diámetro en los primeros cuatro años. El efecto se atribuyó a la fertilización con nitrógeno por las adiciones de ácido nítrico. Estos datos han sido tomados por algunos como "prueba" de que la lluvia ácida es benéfica para los bosques. Por desgracia para esta hipótesis, en Noruega los dos últimos años mostraron una inversión de esta tendencia que se manifestó en una reducción del crecimiento en las parcelas tratadas con ácido en comparación con las parcelas testigo. Parece ser que el efecto benéfico de fertilización fue superado por los efectos perjudiciales de la acidez y el aluminio.

Es importante entender que por sí mismos los suelos ácidos no son dañinos para el crecimiento de las plantas. La acidificación del terreno y el deslave de nutrimentos del mismo, en especial de calcio, magnesio y otras bases, son procesos normales de los suelos. Los vastos bosques boreales que se extienden por todo el mundo en latitudes altas del hemisferio norte están creciendo en suelos ácidos que se formaron desde la última gran glaciación de hace 10,000 o 12,000 años. Por consiguiente, las plantas se han adaptado al suelo ácido. La pregunta que se nos plantea al evaluar el peligro de la lluvia ácida es: ¿acaso los aumentos de acidez pueden llevar a estos bosques a traspasar un umbral más allá del cual no están adaptados fisiológicamente? La respuesta es crucial, pero en la actualidad se desconoce. Sin duda, la decadencia del abeto rojo en el oriente de Norteamérica está bien documentada (Klein y Perkins, 1987), y la propagación del marchitamiento del arce de azúcar en Quebec y en áreas adyacentes ha sido motivo desde 1982 de gran preocupación.

Otro efecto de la lluvia ácida en los bosques incluye el deslave de componentes fácilmente solubles en ácido del follaje, de los troncos de los árboles, y de las capas superiores del suelo. Algunos de estos componentes se vuelven a depositar en el suelo, o bien, se deslavan hacia la cuenca colectora o las aguas subterráneas. Se piensa que los niveles más altos de K, Ca, Mg, Al y  $SO_4$  que aparecen en las corrientes de áreas afectadas por la lluvia ácida proceden de los suelos. Es posible que, con el tiempo, los componentes fundamentales de estos suelos se agoten a tal grado que se presenten deficiencias de nutrimentos. También se podría inducir toxicidad por aluminio. Por dos razones, las concentraciones altas de este metal parecen ser dañinas para muchas especies de plantas superiores en función de sus efectos en los sistemas radiculares. La primera es que inhibe la división celular y las raíces pierden su flexibilidad y plasticidad; se hacen cortas y frágiles. La segunda, que el aluminio tiene diversos efectos en otros iones, entre los cuales se cuenta la interferencia con la incorporación de fósforo y su precipitación como fosfato de aluminio.

**Efectos en los cultivos.** Aunque la sensibilidad hacia el daño foliar directo por la lluvia ácida de algunos cultivos parece ser mayor que la de muchas especies de árboles, no existen pruebas sólidas de que las hojas de los cultivos hayan sido dañadas por gotas ácidas en el campo (NATO, 1980). No obstante, algunos estudios detallados han comenzado a insinuar que

incluso en un sistema agrícola bien amortiguado la lluvia ácida puede ser perjudicial. En un estudio realizado por Lee y Neely (1980) a 27 plantas agrícolas cultivadas en tiestos y expuestas a lluvia ácida simulada con un intervalo de pH de 2.5 a 5.7, aparecieron lesiones visibles y desagradables en el follaje en 21 cultivos a un pH de 3.0, el cual se presenta con una frecuencia de precipitación de 0.5 a 1.0% en las regiones afectadas de Norteamérica. Los estudios de cultivos importantes de Ontario realizados por Hutchinson (1981) mostraron que las lluvias con pH entre 2.5 y 3.0 afectaban seriamente la lechuga, el betabel, la cebolla, la soya, el frijol pinto y el tabaco. Cultivos como el tabaco, la lechuga y la espinaca dependen de un follaje saludable para su venta. Por otro lado, los estudios realizados en el Brookhaven National Laboratory de Estados Unidos (Evans *et al.*, 1983) demostraron que las plantas expuestas a precipitaciones ácidas simuladas de un pH de 4.2, 3.8 y 3.5 tuvieron rendimientos de semilla menores en 2.6, 6.5 y 11.4% respectivamente, en comparación con plantas expuestas sólo a precipitación ambiental. Estos daños de semilla en un cultivo importante, como la soya, equivaldrían a pérdidas de muchos millones de dólares al año en Estados Unidos.

De manera experimental se ha demostrado que la etapa crítica del ciclo vital de las plantas, en la cual el polen se transfiere a la flor hembra y lo fertiliza para producir un largo tubo (de polen), es muy sensible a un pH bajo (Sidhu, 1983). En general, la germinación y el crecimiento del tubo polínico de manzanas y uvas se reducen con un pH igual o menor a 3.5. En estudios de especies forestales boreales (Cox, 1983) se encontró que el polen de abedul es muy sensible, en tanto que el polen de pino no lo es. Para cultivos frutícolas, los cuales dependen por supuesto del establecimiento de un buen fruto en el tiempo de la polinización, la lluvia ácida plantea un peligro que no ha sido evaluado.

En resumen, queda claro que los sistemas terrestres son menos sensibles a la sedimentación ácida que los sistemas acuáticos. Algunos efectos a corto plazo de la lluvia ácida pueden ser benéficos, probablemente a causa de las aportaciones de nitrógeno fertilizante. Sin embargo, a largo plazo es muy posible que se produzcan efectos dañinos. Sin duda se afectarán los ciclos y los equilibrios de los nutrientes en el bosque, y el crecimiento de los árboles puede menguar.

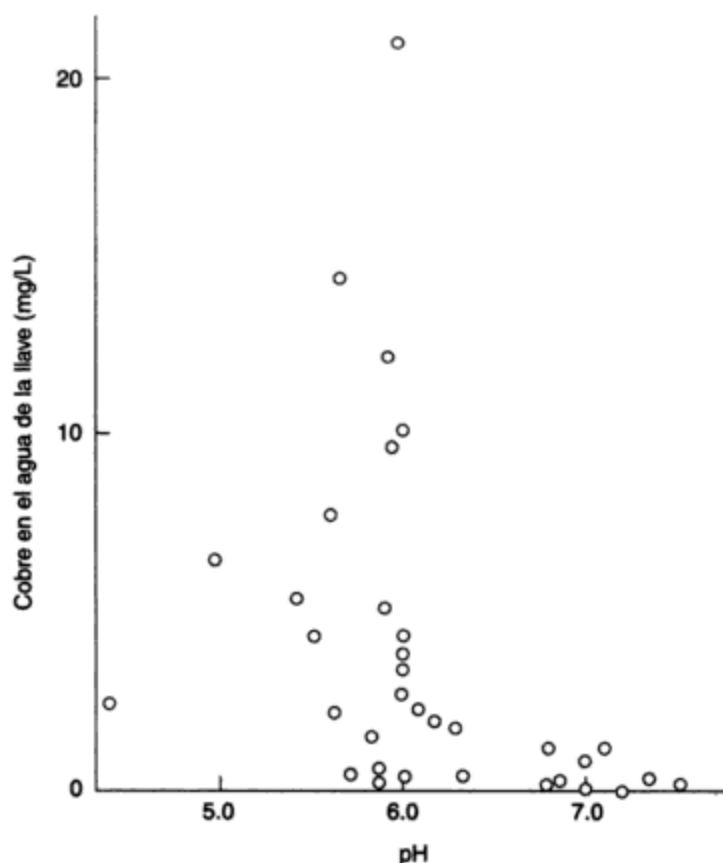
### **5.3.5 Efectos de la lluvia ácida en las aguas subterráneas, los materiales y las construcciones**

**Calidad de las aguas subterráneas y potables.** El agua del subsuelo se acumula con gran lentitud por la filtración de aguas de superficie a través del suelo y el lecho rocoso hasta la capa freática. Si las aguas subterráneas se acidifican, las poblaciones que dependen del agua del subsuelo como fuente de agua potable podrían verse obligadas a ajustar químicamente el agua a estándares aceptables. Sin embargo, en muchas áreas rurales, y en especial en las áreas con cabañas, los pozos se llevan más abajo del nivel freático y el agua se bombea a la superficie para consumirse sin previo tratamiento. Los datos científicos indican que en ciertas áreas está ocurriendo acidificación del agua del subsuelo y la consecuente contaminación de la misma con metales solubles en ácido. Los metales que son causa de mayor preocupación son el plomo, el cobre y el zinc (que pueden deslavarse de tuberías y recipientes para agua), y también el aluminio procedente del lecho rocoso.

Los estudios realizados por el Reconocimiento Geológico de Suecia (Ministerio sueco de agricultura, 1982) han mostrado que se presentan valores de pH entre 5 y 6 en aguas subterráneas de todas partes de Suecia, excepto en las regiones del suroeste, donde se han registrado valores

entre 4 y 5 en pozos poco profundos, con un pH inferior a 4.0 en unos cuantos. El agua del subsuelo es muy susceptible a infiltración y a sustitución por aguas ácidas que se filtran de más arriba. El riesgo de que estas aguas subterráneas se contaminen con metales pesados y aluminio aumenta de forma considerable a medida que el pH de la lluvia y del agua que se filtra del suelo baja a 4.0 y da origen a efectos adversos en la salud. El hecho de que más de un millón de suecos utilicen agua extraída de un pozo propio, y de que alrededor de la mitad de ellos viva en áreas donde los lagos acidificados son comunes, pone de relieve la importancia del problema en esas áreas.

**Corrosión de tuberías de agua.** El agua ácida corroe las tuberías. Esto desde luego obliga a una reposición más frecuente de los tubos, pero algo más importante es el riesgo de que los metales que se disuelven de las paredes de los tubos lleguen a los seres humanos de forma directa por el consumo de agua. En Suecia predominan los tubos de cobre, al igual que en Canadá y el este de Norteamérica en conjunto. Todavía existen antiguas tuberías de plomo en las residencias más viejas y son comunes en casas antiguas de Gran Bretaña e Irlanda. Los tubos galvanizados, con un alto contenido de zinc, se usan también ampliamente. La solubilidad del cobre aumenta bruscamente abajo de un pH de 5.0, y también a temperaturas más elevadas. Los tubos de agua caliente con agua ácida en su interior son los más susceptibles a destruirse disolviéndose. Se ha informado de concentraciones de hasta 20 mg de Cu/L en agua fría, y de 45 mg/L en agua que ha permanecido en los tubos de un día para otro (figura 5-11). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un contenido máximo de cobre de 1.5 mg/L. Se ha informado en Suecia de personas cuyo cabello se pone verde después de enjuagarlo con agua caliente que



**Figura 5-11** Contenido de cobre en el agua que proviene de la llave en Europa occidental. Fuente: Ministerio sueco de agricultura (1982).

tiene altos niveles de cobre, y de niños que sufren diarrea a causa de niveles de cobre tan bajos como 0.5 mg/L. El cadmio y el plomo se disuelven también de las uniones de soldadura, y el zinc de los tubos galvanizados. En los Adirondacks del estado de Nueva York se han presentado problemas similares. En áreas con aguas subterráneas acidificadas se han encontrado altos niveles de cobre, plomo y aluminio en los sistemas de agua de las casas.

**Efectos en construcciones, materiales y pintura.** Las construcciones, las estatuas y los monumentos de piedra sufren erosión por efecto de diversos contaminantes que arrastra el aire, entre ellos la lluvia ácida. Los materiales de construcción como acero, pintura, plásticos, cemento, mampostería, acero galvanizado, piedra caliza, piedra arenisca y mármol también están expuestos a sufrir daños. La frecuencia con la que es necesario aplicar nuevos recubrimientos protectores a las estructuras va en aumento, con los consecuentes costos adicionales, los cuales se estiman en miles de millones de dólares anuales.

Los efectos de los diversos contaminantes todavía no se pueden separar unos de otros de manera confiable. Sin embargo se acepta que el principal agente corrosivo individual de los materiales de construcción es el dióxido de azufre y sus productos secundarios.

Las piedras arenisca y caliza se han utilizado con frecuencia como materiales para monumentos y esculturas. Ambas se corroen con más rapidez en el aire citadino cargado de azufre que en el aire campestre libre de azufre. Cuando los contaminantes azufrados se depositan en una superficie de piedra arenisca o caliza, reaccionan con el carbonato de calcio del material y lo convierten en sulfato de calcio (yeso), fácilmente soluble, que se deslava con la lluvia. En el Informe sobre la lluvia ácida, encargado por el gobernador de Ohio en 1980 (Scientific Advisory Task Force, 1980), el comité afirma que "la lluvia ácida es motivo de preocupación especial a causa de sus efectos en estructuras de importancia arqueológica o histórica". La desfiguración y disolución de famosas estatuas y monumentos, como la Acrópolis de Atenas y tesoros artísticos de Italia se ha acelerado considerablemente en los últimos 30 años, en muchos casos en obras que han estado en pie por siglos. Esto es una tragedia de la cual no es posible hacer un análisis económico.

### 5.3.6 Medidas de remedio y control

Puesto que es indudable que se está causando un daño bastante considerable a nuestro medio, es claro que se necesita actuar para remediarlo. Debemos estar conscientes de la complejidad del problema, con sus ramificaciones e interacciones en el aire, el suelo, el agua y los sedimentos, así como sus efectos en las plantas, los animales y los microbios. Si es probable que ciertas acciones reparadoras tengan altos costos asociados con ellas, es necesario tener la seguridad de que estos costos se justifican y que la acción va a ser eficaz.

No puede haber soluciones rápidas. La limpieza puede tomar décadas, aun si comenzamos ahora. En los últimos años hemos establecido los requisitos fundamentales para la acción:

- El reconocimiento de que la lluvia ácida es un problema grave
- El conocimiento de que la reducción de las emisiones es la mejor solución

Los óxidos de azufre se producen en la quema de combustibles, en la fundición de minerales y en otros procesos industriales. Las emisiones de dióxido de azufre se pueden reducir si se toman las medidas siguientes antes, durante y después de la combustión.

### ANTES DE LA COMBUSTIÓN

Cambio de combustible	Cambio de los combustibles con alto contenido de azufre a otros con menor contenido de azufre
Mezclado de combustibles	Mezclado de combustibles con contenido de azufre más alto y más bajo para producir un combustible con un contenido de azufre de nivel medio
Desulfuración de petróleo	Eliminación del azufre durante el proceso de refinación del petróleo por hidrogenación (adición de hidrógeno)
Lavado del carbón (limpieza física del carbón)	Trituración y eliminación de azufre y otras impurezas del carbón poniendo éste en un líquido (el carbón limpio flota, las impurezas se hunden)
Limpieza química del carbón	Disolución del azufre del carbono con sustancias químicas

### DURANTE LA COMBUSTIÓN

Combustión en lecho fluidizado (CLF)	Mezclado de piedra caliza finamente molida con carbón y combustión en suspensión
Inyección de piedra caliza en quemadores de etapas múltiples (ICQM)	Inyección de piedra caliza finamente molida en un quemador especial

### DESPUÉS DE LA COMBUSTIÓN

Desulfuración de gases de combustión (DGC), o lavado	Mezclado de un absorbente químico, con cal o piedra caliza, con los gases de combustión para eliminar el dióxido de azufre
--	--

Las emisiones de dióxido de azufre de fundiciones no ferrosas se pueden reducir por diversos medios, entre los cuales se cuentan:

Separación de minerales	Eliminación de algunos de los minerales azufrados de los minerales metálicos antes de la fundición
Cambio de proceso	Uso de procesos de fundición que provocan menos SO <sub>2</sub> o generación de corrientes residuales más fáciles de controlar
Fabricación de subproductos	Captura del SO <sub>2</sub> después del proceso de fundición para producir ácido sulfúrico (que se utiliza en muchos procesos industriales y en la fabricación de fertilizantes) o azufre elemental (que se usa en procesos industriales)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), a la que pertenecen casi todas las naciones occidentales industrializadas, ha llevado a cabo investigaciones extensas de las consecuencias del transporte de la lluvia ácida a largas distancias (OCDE, 1981); también ha examinado en detalle las tecnologías de control y los costos asociados con su implantación. Las investigaciones dejan en claro que las consecuencias políticas y socioeconómicas serán graves si nada se hace.

Los cálculos de la OCDE se aplican a las regiones del noroeste y sur de Europa, y tienen como base el dólar americano de 1980. El costo medio de limpieza se calcula en \$780 por tonelada de azufre. Aplicado a toda Europa, con exclusión de la Comunidad de Estados Independientes (antes URSS), el costo de una reducción del 50% en el SO<sub>2</sub> sería alrededor de \$8,000 millones anuales.

La General Accounting Office (Oficina General de Contabilidad) del gobierno de Estados Unidos sugirió en su informe de 1982 sobre la lluvia ácida que una reducción en las emisiones de  $\text{SO}_2$  de 10 millones de toneladas anuales en el este de Estados Unidos costaría entre 3,000 y 4,500 millones de dólares de 1980 (GAO, 1981). Las emisiones totales de  $\text{SO}_2$  en 1980 en Estados Unidos fueron de 24.1 millones de toneladas. Es evidente que Estados Unidos no se arriesgará a poner en práctica un programa tan costoso hasta estar seguro de que cuenta con la tecnología apropiada y de que mitigará con éxito los efectos de la lluvia ácida.

Se tendrán que tomar decisiones respecto a estas tecnologías a medida que el medio continúe degradándose y aumenten las tensiones entre Estados Unidos y Canadá, y entre los países escandinavos y sus vecinos. La Clean Air Act (Ley para el aire limpio), firmada en 1990 por Estados Unidos y Canadá, fija como objetivo una reducción del 50% en las emisiones de azufre para el año 2000, lo cual constituye un paso en esta dirección.

## 5.4 LECCIONES APRENDIDAS

Aunque los dos problemas de perturbaciones ambientales de origen humano que examinamos en las secciones 5.2 y 5.3 son muy diferentes, pueden ofrecernos lecciones importantes acerca del control de estos problemas ambientales omnipresentes. Entre estas enseñanzas están las siguientes.

La *tecnología humana* puede ser la causa de graves impactos económicos en extensas áreas del planeta, incluso en zonas que están a cientos o miles de kilómetros de los emisores de la contaminación. La razón de esto es que la atmósfera es un portador muy eficaz de gases y partículas. Los gases poco solubles como el  $\text{CO}_2$  y diversos compuestos sintéticos como los halocarbonos se dispersan por todo el mundo y se convierten en parte duradera o permanente de la atmósfera. Los gases más solubles como el  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$  pueden afectar grandes porciones de los continentes y causar graves daños a los ecosistemas, el turismo, la agricultura y la silvicultura, así como a construcciones y materiales.

De esto se concluye que la acción correctiva sólo es posible si los gobiernos en cuestión están de acuerdo con cooperar. En Norteamérica, cualquier intento por resolver el problema de la lluvia ácida implica la participación de los gobiernos de Estados Unidos y Canadá, así como los estados y provincias de gran parte de la mitad oriental del continente. En virtud de que esto implica costos elevados, y puesto que las víctimas están muy distantes de los emisores, será muy difícil que los gobiernos actúen de manera conjunta.

La presión pública para que se lleve a cabo una acción reparadora va en aumento. Esto implica que la tecnología futura tendrá que ser más limpia que antes y que habrá una búsqueda continua de fuentes de energía y materias primas que generen menos residuos capaces de escapar a la atmósfera. El control de esta clase de problemas tiene dos componentes: la reglamentación y el control técnico.

La *reglamentación gubernamental* es una medida establecida desde hace tiempo en el caso de la contaminación del aire y del agua en escala local. En esta escala es fácil identificar las fuentes contaminantes, rastrear el trayecto de dichos contaminantes, identificar efectos reales y correlacionar éstos con las concentraciones de los contaminantes sobre una base de dosis y respuesta. En correspondencia, es fácil proyectar reglamentos idóneos para las emisiones o normas ambientales y vigilar su utilidad.

Es mucho más difícil proceder de esta manera en el caso de problemas regionales o mundiales como los de la lluvia ácida o la acumulación de  $\text{CO}_2$ . Los opositores a la acción reparadora alegan, en muchos casos con éxito, que los costos son mayores que los beneficios, que no es posible identificar a los verdaderos culpables, o que no se dispone de pruebas científicas sólidas de que los efectos adversos son en realidad resultado de la contaminación, y que puede haber incluso beneficios. Como vimos en las secciones 5.2 y 5.3, existe mucha incertidumbre en ambos casos, y no es probable que la contaminación desaparezca con rapidez.

Las *medidas de control técnico* constituyen el campo especial del científico y del ingeniero. La mejor de estas medidas es la elección de métodos libres de contaminación en la industria originadora (por ejemplo, en la generación de energía eléctrica y en la fundición de metales). No obstante, aun esto puede causar problemas. Por ejemplo, las plantas generadoras de energía nuclear son un medio mucho más "limpio" para producir energía que las plantas generadoras alimentadas con carbón. Sin embargo, el público está alarmado por el posible peligro de accidentes en los reactores y por las dificultades potenciales que plantea la eliminación futura de los residuos. Así pues, aunque reduce las emisiones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}_2$ , la sustitución de hornos de carbón o petróleo por reactores nucleares puede no ser aceptable como solución permanente para algunas personas. De cualquier manera, el científico y el ingeniero deben buscar continuamente métodos más limpios y eficientes para eliminar los problemas desde la fuente.

La eliminación de contaminantes como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}_2$  de los gases de combustión es factible, pero muy costoso. Los medios técnicos para conseguir esto se presentan en el capítulo 13. En el caso del  $\text{CO}_2$ , la eliminación del carbono reduciría la eficiencia de la conversión neta de calor, a tal grado que el costo sería prohibitivo. Es más fácil ocuparse de los precursores de la lluvia ácida, pero aun en este caso el costo de eliminación es alto.

Es necesario hacer un juicio de valor político de estas cuestiones: los representantes del público deben decidir si la protección ambiental justifica el costo. Lo más probable es que se avance de manera gradual hacia niveles mayores de protección; por consiguiente, los especialistas en el control de la contaminación deben tener a la mano las soluciones técnicas.

## 5.5 EPÍLOGO

Por último, conviene hacer énfasis en que en este capítulo sólo se han analizado dos perturbaciones ambientales de origen humano. De las muchas otras perturbaciones a nuestro ecosistema global que se podrían haber examinado, la tala inmoderada de la selva tropical es una de las más destructivas. En 1.2 hectáreas de selva tropical malaya existen más especies de árboles (con su vida vegetal, animal y microbiana interdependiente) que en todo Estados Unidos.

Aproximadamente la mitad de los árboles que se cortan en todo el mundo se utilizan como combustible (desde el 22% en Estados Unidos hasta el 91% en la India). El resto se emplea para construcción, muebles, periódicos y otros productos de papel. Sin embargo, desde un punto de vista ambiental, los árboles son un recurso que no tiene precio. Por ejemplo, un árbol de hoja caduca totalmente desarrollado diariamente extrae del suelo  $1 \text{ m}^3$  (265 gal) de agua; absorbe 12 kg (26 lb) de  $\text{CO}_2$ , cantidad que emite un automóvil que recorre 18,000 km (11,000 mi) y produce oxígeno suficiente para satisfacer las necesidades de respiración de una familia de cuatro integrantes durante un año. [*Life*, 13(6), mayo de 1990.]



La cosecha de la tasa de crecimiento anual de un bosque (esto es, la tala sostenida en vez del desmonte) debería ser la práctica normal. El desmonte destruye el ecosistema de un bosque y causa la erosión del suelo (en ciertos casos, hasta convertirlo en desierto), de la cual la tierra nunca se recupera.

Existe un sinnúmero de perturbaciones ambientales de origen humano que se nos presentan cada día. ¿Puede usted pensar algunas? ¿Considera estos problemas como desafíos que la sociedad resolverá, o son signos de la posible desaparición de la raza humana? Nuestra respuesta colectiva podría ser una profecía que acarrea su propio cumplimiento. La tecnología será importante para corregir los problemas ambientales y alcanzar un desarrollo global sostenido (definido en la sección 1.6.1). No obstante, el desarrollo sostenido a largo plazo será aún más dependiente de la cooperación entre los gobiernos, las industrias y la sociedad para implantar políticas ambientales sólidas. Las pautas para el manejo apropiado del ambiente se tratan en el capítulo 16, junto con una explicación de por qué dicho desarrollo debe ser un proceso evolutivo que se adapta a los cambios en las condiciones económicas y sociales (sección 16.2).

## PROBLEMAS

- 5.1. Enumere los gases y las posibles fuentes de ellos, mismos que contribuyen a (a) el calentamiento global; (b) el agotamiento del ozono.
- 4.2. El calentamiento global parece avanzar de manera inexorable. ¿Qué condiciones ambientales derivadas de (a) causas naturales y (b) actividades humanas tenderían a compensar esta tendencia al calentamiento?
- 4.3. ¿Por qué está disminuyendo la capa de ozono, y cuáles son las posibles consecuencias?
- 4.4. En este capítulo se han presentado ejemplos de perturbaciones globales ( $\text{CO}_2$ ), regionales/continentales (lluvia ácida) y locales. Con base en sus conocimientos actuales de las perturbaciones del ambiente, naturales o artificiales, cite otros ejemplos que en su opinión son de escala (a) global; (b) regional/continental; (c) local.
- 4.5. Seleccione uno de los ejemplos citados en el problema 5.4 y elabore una serie de ideas respecto a ese problema ambiental específico.
- 4.6. Varios indicios sugieren que la mayor acidez de las aguas de los lagos y ríos es la causa de un descenso en sus poblaciones de peces. Explique.
- 4.7. Si las emisiones de  $\text{SO}_2$  se controlan por medio de una tecnología apropiada, ¿cuál será el efecto de esto en la lluvia, en regiones como California, Michigan y Ontario? (Véase la tabla 5-1.)
- 4.8. Los árboles necesitan azufre (S) y nitrógeno (N) en cantidades adecuadas para un crecimiento saludable. ¿Por qué, entonces, la lluvia ácida es un problema para ellos?
- 4.9. ¿Por qué se piensa que los gases  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  son los causantes de la acidificación regional? ¿Por qué se considera que el transporte de masas de aire contaminante a largas distancias es la causa del problema regional de la lluvia ácida?
- 4.10. Las poblaciones de peces viejas y en proceso de envejecimiento pueden indicar la presencia de lluvia ácida. ¿Por qué?
- 4.11. ¿Por qué es difícil emplear los incrementos anuales de los anillos como indicio de daños por lluvia ácida?
- 4.12. Enumere cinco perturbaciones ambientales de origen humano, regional o global, además del efecto invernadero y la lluvia ácida. Seleccione una de ellas y comente acerca de las causas y las posibles soluciones de esta perturbación.

## REFERENCIAS

**Sobre acumulación de dióxido de carbono**

- HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J. y EPHRAUMS, J. J. (eds.). *Climate Change, 1990: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- HOUGHTON, J. T., CALLANDER, B. A. y VARNEY, S. K. (eds.). *Climate Change, 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, *A Comprehensive Plan for Carbon Dioxide Effects Research and Assessment*. Part 1, *The Global Carbon Cycle and Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide, Carbon Dioxide Effects Research and Assessment Program*. Report 008. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1980a.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, *Environmental Control Technology for Atmospheric Carbon Dioxide, Carbon Dioxide Effects Research and Assessment Program*. Report 006. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1980b.
- WIGLEY, T. M. L. y RAPER, S. C. B. "Implications for Climate and Sea Level of Revised IPCC Emission Scenarios." *Nature* 357 (1992): 293.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *World Climate Programme: On the Assessment of the Role of CO<sub>2</sub> on Climate Variations and Their Impact*. Villach, Austria y Ginebra, Suiza: World Meteorological Organization, 1980 y 1981.

**Sobre lluvia ácida**

- BAKER, J. P. y SCHOFIELD, C. L. "Aluminum Toxicity to Fish as Related to Acid Precipitation and Adirondack Surface Water Quality". En *Ecological Impact of Acid Precipitation*, D. Drablos y A. Tollan (eds.). Sandefjord, Noruega: SNSF, Oslo, 1980, págs. 292-296.
- BEAMISH, R. J. y HARVEY, H. H. "Acidification of the La Cloche Mountain Lakes, Ontario, and Resulting Fish Mortalities". *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 29 (1972): 1131-1143.
- BEAMISH, R. J., LOCKHART, W. L., VANHOON, J. C. y HARVEY, H. H. "Long-Term Acidification of a Lake and Resulting Effects on Fishes". *Ambio* 4 (1975): 98-102.
- COX, R. M. "Sensitivity of Forest Plant Reproduction to Long Range Transported Air Pollutants". *New Phytologist* 95 (1983): 269-276.
- DICKSON, W. "Properties of Acidified Waters". En *Ecological Impact of Acid Precipitation*, D. Drablos y A. Tollan (eds.). Sandefjord, Noruega: SNSF, Oslo, 1980, págs. 75-83.
- DRABLOS, D. y TOLLAN, A. (eds.) *Ecological Impact of Acid Precipitation*, Sandefjord, Noruega: SNSF, Oslo, 1980.
- ENVIRONMENT CANADA. *The Acid Rain Story*. Ottawa: Environment Canada, 1984.
- ENVIRONMENT CANADA. *Downwind: The Acid Rain Story*. Ottawa: Environment Canada, 1981.
- EVANS, L. S., LEWIN, K. F., PETTI, M. J. y CUNNINGHAM, E. A. "Productivity of Field-Grown Soybeans Exposed to Simulated Acidic Rain". *New Phytologist* 93 (1983): 377-388.
- GAO. *General Accounting Office Report on Acid Rain*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1981.

- HARVEY, H. H. "Widespread and Diverse Changes in the Biota of North American Lakes and Rivers Coincident with Acidification". En *Ecological Impact of Acid Precipitation*, D. Drablos y A. Tollan (eds.). Sandefjord, Noruega: SNSF, Oslo, 1980, págs. 93-98.
- HARVEY, H. H. y PIERCE, R. C. (eds.). *Acidification in the Canadian Aquatic Environment*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1981.
- HUTCHINSON, T. C. "Report to the Ontario Ministry of Environment on the Relative Sensitivity of Ontario Crops to Acid Rain Spray". Unpublished, 1981.
- KLEIN, R. M. y PERKINS, T. D. "Cascades of Causes and Effects of Forest Decline". *Ambio* 16 (1987): 86-93.
- LEE, J. J. y NEELY, G. E. *Sulfuric Acid Rain Effects on Crop Yield and Foliar Injury*. Corvallis, Oreg.: U.S. Environmental Protection Agency, 1980.
- MINISTERIO SUECO DE AGRICULTURA, *Acidification Today and Tomorrow*. Estocolmo: Ministerio Sueco de Agricultura, 1982.
- NATO. *Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems*. Nueva York: Plenum Press, 1980.
- OECD. "The Costs and Benefits of Sulfur Oxide Control: A Methodological Study". Paris. Organization for Economic Co-operation and Development, 1981.
- ONTARIO MINISTRY OF ENVIRONMENT. *The Case Against Acid Rain*. Toronto: Ontario Ministry of the Environment, 1980.
- RYAN, P. M. y HARVEY, H. H. "Growth Responses of Yellow Perch to Lake Acidification in the La Cloche Mountain Lakes of Ontario". *Environmental Biology of Fish* 5 (1980): 97-108.
- SCIENTIFIC ADVISORY TASK FORCE. *Acid Rain: Report to the Governor of Ohio*. Columbus, Ohio: Estado de Ohio, 1980.
- SIDHU, S. S. "Effects of Simulated Acid Rain on Pollen Germinations and Pollen Tube Growth of White Spruce (*Picea Glauca*)". *Canadian Journal of Botany* 61 (1983): 3095-3099.

## SEGUNDA PARTE

---

### Bases científicas

## CAPÍTULO 6

---

### Física y química

*Gary W. Heinke*  
*J. Glynn Henry*

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

Gran parte de este libro se ocupa del agua, del aire, y de mezclas de sólidos como desperdicios y lodos. Cuando decimos **agua**, normalmente no queremos decir  $H_2O$ , sino lluvia, ríos, lagos, aguas subterráneas o agua de mar. En cada uno de estos casos estamos tratando con sistemas bastante diluidos, con partículas dispersas y solutos disueltos en agua, el disolvente universal. Cuando decimos **aire**, por lo general no hacemos referencia a la mezcla pura de nitrógeno, oxígeno y pequeñas cantidades de otros gases, sino a los contaminantes gaseosos y a las partículas líquidas y sólidas suspendidas en el aire. Por consiguiente, en este capítulo resumiremos algunos conceptos fundamentales que conciernen a las partículas y a las dispersiones de las mismas; posteriormente presentaremos información básica de física, química, fisicoquímica y cinética de reacción, pertinente a los sistemas de agua y de aire. Parte de este material se trata en los cursos elementales de las diversas disciplinas, y otra parte será nueva aquí.

#### 6.2 DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS

Para describir y tratar las aguas naturales y residuales, el aire, los desperdicios sólidos y los lodos es fundamental el conocimiento del medio y de las partículas y solutos que hay en él. Ciertas

propiedades del medio pueden sufrir efectos grandes o sólo muy leves a causa de la presencia de partículas o solutos. Por ejemplo, la densidad de diversos tipos de agua, incluso las residuales muy contaminadas, se aproxima tanto a la del agua que por lo común se pueden pasar por alto las pequeñas diferencias. Aun el agua de mar, con una concentración total de sólidos disueltos de alrededor de 34,500 mg/L, tiene una densidad sólo 2.5% mayor que la del agua pura. La presencia de partículas o solutos puede afectar en alto grado otras propiedades del medio. Un ejemplo conocido es la pérdida de visibilidad en el aire cuando contiene partículas líquidas (niebla) o sólidas (humo) muy finas.

### 6.2.1 Tamaño, forma y distribución de las partículas

Una partícula se define como cualquier porción concreta (es decir, particulada) de materia sólida, líquida o gaseosa mayor que una sola molécula pequeña [de más de 1 nanómetro (nm) de diámetro]. El agua, el aire y los desperdicios sólidos contienen muchas partículas que varían considerablemente en tamaño. Para muchas situaciones es importante encontrar una manera conveniente de expresar la forma, el tamaño y la distribución de las partículas.

La figura 6-1 presenta un diagrama en escala logarítmica que cubre la gama de tamaños de partícula de importancia en la ingeniería ambiental. Los límites que se muestran son flexibles. En agua, se dice que las partículas están en suspensión cuando se pueden eliminar por sedimentación o por filtración a través de papel filtro. El límite inferior para esto es aproximadamente 0.4  $\mu\text{m}$ . Las partículas menores a esta dimensión se llaman *coloides*, y normalmente varían de tamaño entre 1 y 400 nm, así que no son visibles con un microscopio ordinario de alta potencia. En virtud de su importancia para la ingeniería ambiental, los coloides se estudian por separado en la sección 6.2.2. Abajo de 1 nm, con diámetros oscilando entre el de un átomo individual (alrededor de 0.2 nm) y el tamaño de una molécula (alrededor de 1 nm), se encuentran dispersos en el disolvente formando una solución.

En pocos casos las partículas de una mezcla o suspensión son de tamaño uniforme o de forma esférica. La descripción analítica de mezclas de partículas es difícil, en especial para residuos sólidos, donde las partículas difieren bastante en cuanto a tamaño y forma. Es más fácil caracterizar las partículas pequeñas en el aire o en suspensiones líquidas. La forma irregular, definida por la longitud, la anchura y la altura de la partícula, se relaciona normalmente por medios matemáticos con un diámetro equivalente. Otros métodos se basan en factores de forma, que comparan la superficie de la partícula o su velocidad de sedimentación con la de una esfera equivalente. Un ejemplo de esto, la esfericidad  $\Psi$ , se presenta en la sección 6.2.4 en la ecuación (6.8).

La distribución de tamaños de las partículas esféricas o equivalentes en general no se puede expresar por medio de un solo parámetro o función, como, por ejemplo, el diámetro de partícula promedio. En cambio, la clasificación puede depender de la forma efectiva de medir el diámetro de las partículas. Los métodos varían desde la observación del material, en el caso de partículas burdas, hasta el conteo con microscopio cuando las partículas son pequeñas. En cualquier caso se clasifican en intervalos de tamaño arbitrarios que pueden ser, por ejemplo, tamaños de tamiz. Esta información se grafica como se muestra en la figura 6-2, con una curva de peso acumulativo inferior a un diámetro determinado  $d_p$  en función del diámetro de partícula. Se emplean también expresiones matemáticas para describir la distribución de tamaños de partícula, pero las mismas quedan fuera del alcance de este libro.

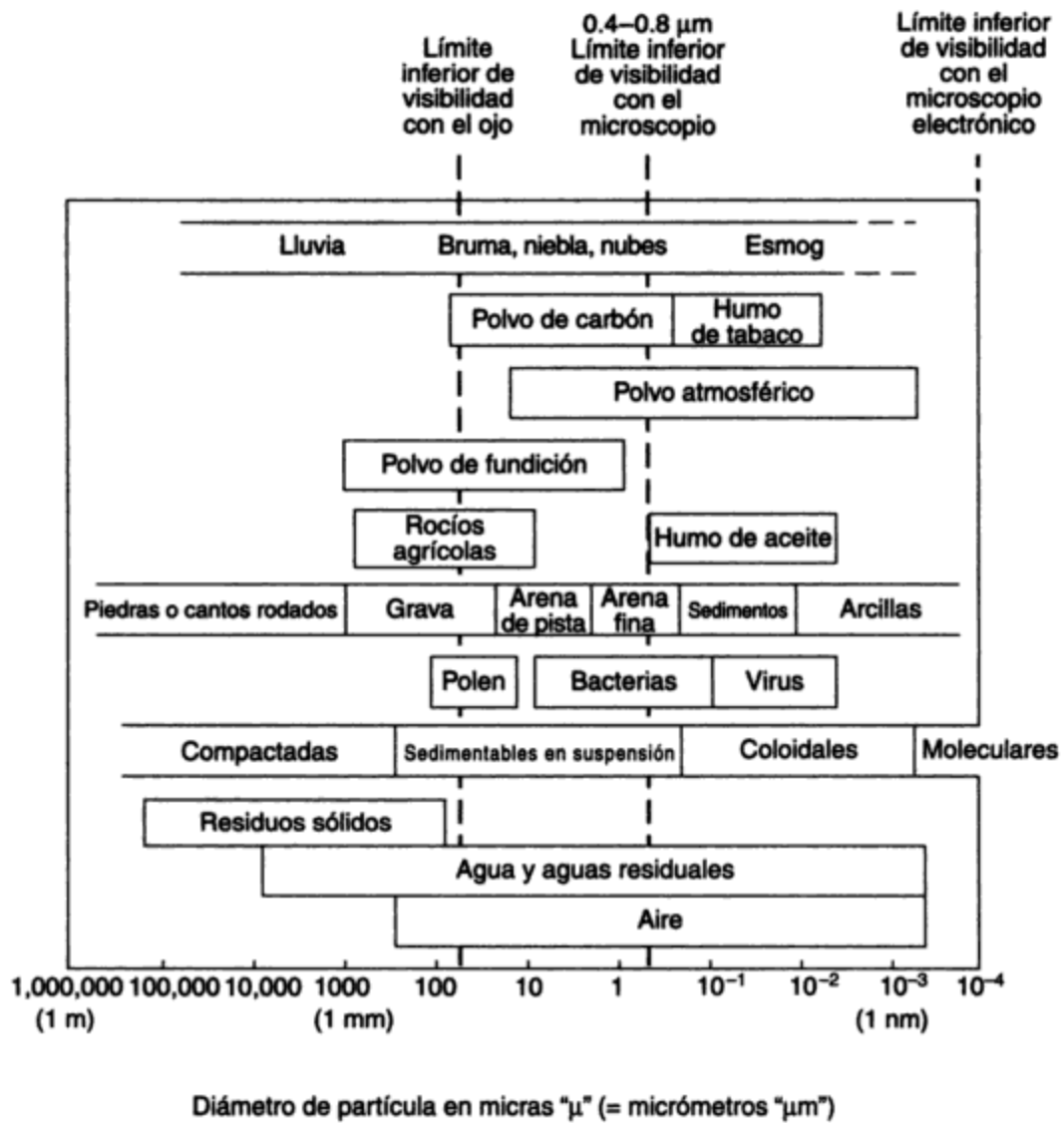


Figura 6-1 Intervalos típicos de tamaños de partícula. Fuente: Adaptado de varias fuentes, entre ellas Williamson (1973), Hidy y Brock (1970) y Perkins (1974).

Nota: Las unidades comunes: μ, micras (1 × 10<sup>-6</sup>m), y mμ, milimicras (1 × 10<sup>-9</sup>m) eran comunes antes de la adopción del SI. Unidades SI: μ se reemplazó por μm, micrómetros (1 × 10<sup>-6</sup>) mμ se reemplazó por nm, nanómetros (1 × 10<sup>-9</sup>) (Ambos sistemas todavía están en uso, y se emplean en este libro.)

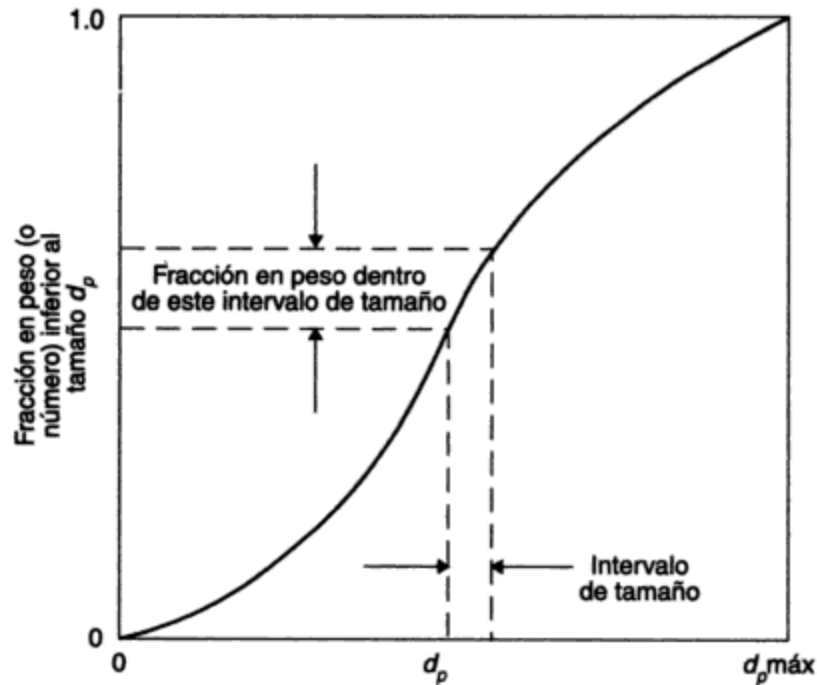


Figura 6-2 Distribución de tamaños de partícula.

### 6.2.2 Dispersiones coloidales

Las dispersiones coloidales se componen de partículas muy pequeñas que varían en tamaño desde 1 hasta 400 nm, separadas por el medio de dispersión. Las partículas coloidales dispersas pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. Aunque existen en medios sólidos, el medio de dispersión de interés en los campos ambientales es el líquido o el gaseoso. En la siguiente tabla se indican los nombres comunes de las dispersiones:

FASE DISPERSA	MEDIO DE DISPERSIÓN	NOMBRE COMÚN
Sólida	Líquido	Suspensión
Líquida	Líquido	Emulsión
Gaseosa	Líquido	Espuma
Sólida	Gaseoso	Humo, aerosol
Líquida	Gaseoso	Niebla, aerosol

Las propiedades características de las partículas coloidales son atribuibles a su pequeño tamaño, el cual proporciona un área superficial muy grande por unidad de volumen. Para demostrar cuán grande es el área que poseen estas partículas, considere un cubo de 1 cm por lado, con un área superficial de 6 cm<sup>2</sup>. Si lo dividimos en ocho cubos de ½ cm por lado, duplicamos el área superficial total a 12 cm<sup>2</sup>, pero el volumen no varía. Si continuamos haciendo cubos cada vez más pequeños hasta que sean del orden del tamaño coloidal, o de aproximadamente 10<sup>-5</sup> mm por lado, el volumen total todavía será el mismo, pero el área superficial total habrá aumentado de

6 cm<sup>2</sup> a 600 m<sup>2</sup>, un incremento de un millón de veces. En virtud de esta elevada relación de superficie a volumen, los coloides tienen una enorme capacidad de adsorción en proporción a su reducida masa. Además, con la gran área de superficie las débiles cargas atómicas superficiales de los coloides se convierten en un factor significativo de su comportamiento.

Las dos propiedades de los coloides que tienen relación con su superficie son por tanto su capacidad de adsorción y su carga electrocinética. La **adsorción** se refiere a la capacidad de ciertos sólidos para concentrar en su superficie sustancias del medio circundante. La **carga eléctrica** que poseen todas las partículas coloidales puede ser positiva o negativa, y su magnitud varía según el material del cual está hecho el coloide. Las partículas de carga similar se repelen mutuamente e impiden la formación de partículas más grandes por aglomeración. Esta repulsión entre partículas dificulta la separación de las mismas del medio de dispersión. La coagulación, un proceso de tratamiento que resuelve el problema con la adición de partículas (iones) de carga opuesta, se analiza en el capítulo 11. Esta práctica se emplea también para eliminar del aire contaminado las partículas (capítulo 13).

### 6.2.3 Métodos para expresar concentraciones de partículas

La masa de partículas en una unidad de volumen (o masa) se conoce como **concentración de partículas**. Existen varias maneras de expresar concentraciones de partículas en aire, agua y aguas residuales.

**Aire.** Las unidades usuales para expresar la concentración de pequeñas partículas suspendidas en aire son gramos de particulados por metro cúbico de aire. La concentración se determina aspirando un volumen conocido de aire a través de un filtro cuyo peso se ha determinado previamente, y pesando la cantidad de partículas que han quedado atrapadas. Para el polvo, que se compone de partículas más grandes que se sedimentan con rapidez, las mediciones se hacen colectando el material sedimentable en tarros de caída de polvo durante un tiempo específico y determinando el peso acumulado. La concentración se expresa entonces en peso recolectado por unidad de área durante un periodo determinado. Son ejemplos de estas unidades las ton/mi<sup>2</sup> mes, o los kg/m<sup>2</sup> mes. Se emplean también otros métodos para expresar la concentración de partículas en aire (véase el capítulo 13).

**Agua y aguas residuales.** La concentración de partículas en agua normalmente se expresa de forma diferente que para aguas residuales. Puesto que en la mayor parte de las aguas naturales hay sólo pequeñas cantidades de partículas, en especial en el agua potable, se utiliza un método óptico en lugar de uno gravimétrico. La **turbidez** es una expresión de la propiedad óptica que causa que la luz se disperse y se absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. La turbidez en el agua se debe a la materia suspendida, como arcilla, lodo, algas, sílice, herrumbre, bacterias y otras partículas. La unidad estándar de medición de turbidez, adoptada por la industria del agua, es la unidad nefelométrica de turbidez (NTU, por sus siglas en inglés), llamada así por el instrumento que se emplea para medirla, el nefelómetro (del griego *nephos*, nube). Esta unidad se basa en una concentración específica de una suspensión de polímero de formazina (APHA *et al.*, 1985).

Para aguas residuales y lodos, la concentración de sólidos en suspensión (SS) por lo general es lo suficientemente grande como para preferir los métodos gravimétricos, y las unidades normales son mg/L. Una pequeña muestra (100 mL) de agua residual o lodo se filtra a



través de un filtro de fibra de vidrio que se seca y se pesa antes y después de la filtración a fin de determinar la concentración de SS. Otro procedimiento gravimétrico, útil cuando la filtración es difícil, consiste en pesar un volumen conocido de muestra antes y después de la evaporación del líquido (a 103°C); en este caso, el residuo representa los SS (APHA *et al.*, 1985). Las concentraciones de sólidos mayores de 10,000 mg/L se pueden expresar como porcentaje (1% = 10,000 mg/L).

#### 6.2.4 Sedimentación de una partícula en un fluido

Los principios que gobiernan la sedimentación de una partícula en un fluido son aplicables para la eliminación de los sólidos en suspensión de un río o lago (capítulo 9), el diseño de clarificadores para el tratamiento de aguas (capítulo 11) o el tratamiento de aguas residuales (capítulo 12), y la sedimentación de particulados en el aire (capítulo 13).

Considere la situación de una partícula individual de arena que se sedimenta a una velocidad  $u$  en un fluido estático. Por acción de la gravedad una partícula que cae se acelera hasta que la resistencia al avance por fricción del fluido equilibra la aceleración gravitatoria, después de lo cual continúa cayendo a una velocidad constante que se conoce como la velocidad de sedimentación terminal  $u_t$  (Rich, 1980). Esta velocidad se calcula haciendo un balance de fuerzas sobre la partícula (véase la figura 6-3):

$$F_R = F_E - F_B - F_D \quad (6.1)$$

- donde  $F_E$  = fuerza externa sobre la partícula, en este caso la gravedad (pero podría ser otra fuerza externa, como la centrífuga)  
 $F_B$  = fuerza de flotación (buoyancy force)  
 $F_D$  = fuerza de fricción o de resistencia al avance que se opone a la sedimentación de la partícula (drag force)  
 $F_R$  = Fuerza resultante (igual a 0 cuando se alcanza la velocidad terminal)

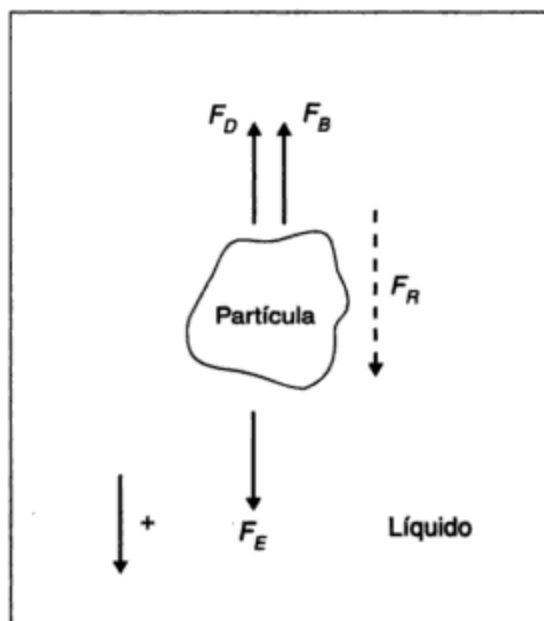


Figura 6-3 Fuerzas que actúan sobre una partícula que se sedimenta en un líquido estático.

Estas fuerzas se pueden expresar como

$$F_R = M \frac{du}{dt}$$

$$F_E = Ma_E = Mg$$

$$F_B = \frac{\rho}{\rho_p} Ma_E = \frac{\rho}{\rho_p} Mg$$

en donde  $M$  = masa de la partícula

$u$  = velocidad de sedimentación de la partícula

$a_E$  = aceleración, igual a  $g$  para sedimentación gravitatoria (por centrifugación,  $a_E = r\omega^2$ , donde  $\omega$  = velocidad angular)

$\rho$  = densidad del fluido

$\rho_p$  = densidad de la partícula

Sustituyendo los valores de  $F_R$ ,  $F_E$ ,  $F_B$  y  $F_D$  en la ecuación (6.1) y reordenando, obtenemos

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{F_D}{M} \quad (6.2)$$

Experimentalmente, se ha encontrado que

$$F_D = \frac{C_D A_p \rho u^2}{2}$$

en donde  $C_D$  es el coeficiente de resistencia al avance o de fricción (adimensional) y  $A_p$  es el área proyectada de la partícula en ángulo recto a la dirección de sedimentación. Si sustituimos estos valores en la ecuación (6.2), obtenemos

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{C_D A_p \rho u^2}{2M} \quad (6.3)$$

Si suponemos que la partícula es esférica, tenemos que

$$\frac{A_p}{M} = \frac{\pi d_p^2 / 4}{(\pi d_p^3 / 6) \rho_p} = \frac{3}{2 \rho_p d_p} \quad (6.4)$$

en donde  $d_p$  es el diámetro de la partícula. Por consiguiente, la sustitución de este valor de  $A_p/M$  en la ecuación (6.3) nos da

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{3 C_D \rho u^2}{4 \rho_p d_p} \quad (6.5)$$

La velocidad de sedimentación terminal  $u_t$  se alcanza muy pronto. En ese punto,

$$\frac{du}{dt} = 0$$

por tanto, despejando  $u_t$ , obtenemos

$$u_t = \left[ \frac{4g(\rho_p - \rho)d_p}{3C_D\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.6)$$

La ecuación (6.6) es aplicable a partículas en proceso de sedimentación ( $\rho_p > \rho$ ) así como a partículas en ascenso ( $\rho_p < \rho$ ), como aceite o aire en agua.

Experimentalmente se ha encontrado que  $C_D$  es una función del número de Reynolds adimensional  $Re$ :

$$C_D = \frac{b}{Re^n}$$

en donde los valores de  $b$  y  $n$  son los que se indican en la siguiente tabla:

Flujo	$Re$	$b$	$n$	Comentarios
Laminar	<2	24	1	Predomina la resistencia al avance por fricción
Intermedio	2-500	18.5	0.6	La resistencia al avance por fricción y por forma son importantes
Turbulento	500-200,000	0.44	0	Predomina la resistencia al avance por forma

\*El número de Reynolds,  $Re$ , se define como

$$Re = \frac{ud_p\rho}{\mu}$$

en donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica (absoluta) del medio.

Para condiciones de flujo laminar,

$$C_D = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{\rho u d_p}$$

Sustituyéndolo en la ecuación (6.6) obtenemos:

$$u_t = \frac{(\rho_p - \rho)gd_p^2}{18\mu} \quad (6.7)$$

La ecuación (6.7) es la de velocidad terminal de Stokes, aplicable sólo si el flujo es laminar y las partículas son esféricas.

La materia en suspensión en aguas naturales y aguas residuales y las emisiones de particulados que se sedimentan en el aire rara vez son de forma esférica. Estas partículas tienen un área superficial por unidad de volumen mayor que la de una esfera y, por consiguiente, se asientan con mayor lentitud que las esferas de volumen equivalente. Para partículas de forma irregular se ha definido un índice llamado **esfericidad**, de modo que

$$\frac{A_p}{V_p} = \frac{1.5}{\Psi d_p} \quad (6.8)$$

en donde la esfericidad  $\Psi$  es un índice relativo de la redondez de la partícula y es adimensional. Para una esfera  $\Psi = 1$ , en tanto que para partículas no esféricas es siempre menor a la

unidad. Por ejemplo, para escamas de mica  $\Psi = 0.28$ , para arena de sílex irregular  $\Psi = 0.66$ , para carbón pulverizado  $\Psi = 0.73$ , y para arena de Ottawa, casi esférica,  $\Psi = 0.95$ . La aplicación práctica de la ecuación de velocidad terminal de Stokes es más complicada, puesto que las partículas suspendidas en agua o aire no son normalmente partículas discretas y el medio acuoso o aéreo no es estático. Por tanto, casi siempre es necesario emplear métodos tanto experimentales como empíricos para el diseño de tanques de sedimentación para agua o aguas residuales (capítulos 11 y 12) o de unidades de tratamiento para limpiar aire contaminado (capítulo 13).

### Ejemplo 6.1

Calcule la velocidad de sedimentación de dos partículas esféricas (a) 0.1 mm y (b) 0.001 mm de diámetro en agua inmóvil con una temperatura de 20°C. La densidad relativa de las partículas es 2.65. Suponga condiciones de flujo laminar. Un tiempo de retención común para tanques de sedimentación es de 2 h. ¿Se asentarán estas partículas hasta el fondo de un tanque de 3.5 m de profundidad en ese tiempo?

**Solución** Del apéndice B.2,

$$\rho_{20^\circ\text{C. agua}} = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_p = 2.65 \times 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{20^\circ\text{C. agua}} = 1.00 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 1.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

Por tanto, empleando la ecuación (6.7), obtenemos

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad u_t &= (2.65 - 1.00) 998 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times \frac{(0.1 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2}{18 \times 1.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} \\ &= 9.0 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 9.0 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

Así pues, el tiempo necesario para una sedimentación de 3.5 m =  $3.5/9.0 \times 10^{-3} = 390 \text{ s} = 6.5 \text{ min} \ll 2 \text{ h}$ . Esta velocidad de asentamiento es desde luego práctica para la eliminación de partículas por sedimentación.

$$\text{(b)} \quad u_t = 9.0 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 9.0 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$$

Por tanto, el tiempo para una sedimentación de 3.5 m =  $390 \times 10^4 \text{ s} = 1083 \text{ h}$ .

Esta velocidad de sedimentación es demasiado lenta para eliminar las partículas sólo por sedimentación, de modo que es necesario emplear coagulación/floculación para aumentar el tamaño de partícula y alcanzar así una mayor velocidad de sedimentación (véase el capítulo 11).

## 6.3 SOLUCIONES

### 6.3.1 Soluciones y solubilidad

Los gases, líquidos y sólidos pueden disolverse en agua para formar soluciones verdaderas. La sustancia que se disuelve se llama **soluto**, y la sustancia o medio en el cual se disuelve recibe el nombre de **disolvente**. Una solución puede tener cualquier concentración de soluto bajo cierto límite, que es la **solubilidad** de esa sustancia en ese medio. Una solución que contiene a una temperatura determinada tanto soluto como puede retener en presencia de la sustancia

que se disuelve se conoce como **solución saturada**. Las soluciones que contienen menos soluto se describen como **no saturadas**, y las que contienen más (en condiciones especiales) se conocen como **sobresaturadas**.

Son varios los factores que afectan la solubilidad. Los más importantes son la temperatura y el carácter químico de las sustancias en cuestión. La presión tiene una importancia relativamente menor para los líquidos, excepto en el caso de reservas subterráneas profundas o de las aguas profundas de los océanos. La solubilidad de casi todas las sustancias aumenta con la temperatura, pero hay excepciones importantes. En general, si una sustancia se disuelve en el punto de saturación con absorción de calor, la solubilidad aumenta a medida que la temperatura lo hace. Por otra parte, si se desprende calor en el proceso de disolución, la solubilidad disminuye cuando la temperatura del disolvente aumenta. La solubilidad de diversos compuestos de calcio, entre ellos  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{Ca(OH)}_2$ , disminuye a medida que la temperatura se eleva. La solubilidad del oxígeno en agua también se reduce al aumentar la temperatura. Esto tiene consecuencias importantes a causa de la menor capacidad de las aguas naturales para suministrar oxígeno a la vida acuática y para oxidar los contaminantes orgánicos durante el verano.

El carácter químico del soluto y del disolvente puede ser de tal naturaleza que se forma una solución con facilidad. Por ejemplo, el alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) y el agua se mezclan sin dificultad y sin límite de saturación; es decir, son totalmente miscibles. Por otra parte, el agua y el mercurio son casi inmiscibles. Existe una amplia gama de miscibilidad entre estos extremos. Los manuales proporcionan información acerca de la solubilidad de las sustancias (constantes de solubilidad) en diversos disolventes. Las reacciones químicas con el agua o con otros disolventes afectan la solubilidad de muchas sustancias. Por ejemplo, el carbonato de calcio es ligeramente soluble en agua pura, pero tiene una solubilidad aparente mucho mayor si el agua contiene dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a causa de la reacción química entre el  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{CO}_2$ . En general, las sustancias como las sales, los ácidos y las bases se disuelven en agua para formar soluciones que contienen **iones**. En estas soluciones la presencia de un exceso de cualquiera de los iones afecta en alto grado la solubilidad.

En las reacciones de precipitación, una forma de la constante de equilibrio recibe el nombre de **producto de solubilidad**. Por ejemplo, en la reacción del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en agua, en donde  $\text{CaCO}_3$  (sólido)  $\rightleftharpoons \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{-2}$ , el producto de solubilidad se define como  $[\text{Ca}^{+2}] [\text{CO}_3^{-2}] = K_{ps}$ .  $K_{ps}$  es la constante del producto de solubilidad, y un  $[\cdot]$  indica la concentración de la sustancia en mol/L. Los valores numéricos de  $K_{ps}$  para reacciones de precipitación se pueden obtener de los manuales.

La solubilidad de los gases en los líquidos depende de la naturaleza del gas, de la del disolvente, y también de la presión y la temperatura. Por ejemplo, el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) son relativamente insolubles en agua, en tanto que el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) son muy solubles. En la sección 6.4 se presenta un análisis de las leyes de los gases que incluye las que son importantes para la transferencia entre gas y líquido.

Las aguas naturales contienen siempre iones disueltos, mismos que provienen del contacto del agua con minerales como piedra caliza, magnesita, yeso y lechos salinos. Los cationes más comúnmente encontrados en el agua natural son calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ). Los aniones más comunes son bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), los sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) y, en menor medida, los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). En cualquier tipo de agua se conserva la electroneutralidad, de modo que la suma de los cationes debe ser siempre igual a la suma de los aniones. El agua que contiene iones que interfieren con la acción del jabón se describe como agua

“dura”. La “dureza” se debe principalmente a iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  que reaccionan con el jabón para formar precipitados, y con diversos aniones para formar incrustaciones en las calderas y en las tuberías de agua caliente.

La alcalinidad, una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos (capacidad amortiguadora), es atribuible en gran medida a los bicarbonatos, hidróxidos y carbonatos (véase la página 163). Ejemplo de compuestos presentes en menor cantidad en el agua son los siguientes:

CATIONES	ANIONES
Hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ o $\text{Fe}^{+3}$ )	Carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ )
Manganeso ( $\text{Mn}^{+2}$ )	Hidróxido ( $\text{OH}^-$ )
Aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ )	Azufre ( $\text{S}^{-2}$ , $\text{SO}_3^{-2}$ )
Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )	Fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ , $\text{HPO}_4^{-2}$ , $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$ )
Cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ )	

La actividad humana, principalmente en las descargas de desperdicios industriales, puede incorporar iones a las aguas naturales y algunas veces originar problemas de contaminación generalizada. Los iones de metales pesados, que pueden ser tóxicos para microorganismos, plantas y animales, son ejemplos destacados.

### 6.3.2 Métodos para expresar la composición de las soluciones

Los siguientes dos sistemas son frecuentemente utilizados para expresar la composición de las soluciones:

1. *Masa/masa* (expresada comúnmente como peso/peso) o, de manera más explícita, masa de soluto sobre masa de solución. Una unidad típica es mg/kg, que también se expresa como ppm\* (partes por millón). Este método no depende de la temperatura.
2. *Masa/volumen* (expresada comúnmente como peso/volumen) o, de manera más explícita, masa de soluto sobre volumen de solución. Una unidad típica es mg/L\*. Este método depende de la temperatura, pues el volumen varía con la misma. Por consiguiente, se debe informar la temperatura cuando se expresa la concentración por este método.

\*Las unidades ppm y mg/L suelen emplearse de manera indistinta. Esto se justifica si la densidad relativa de la solución es la unidad, lo cual se cumple de manera aproximada para casi todos los tipos de agua y aguas residuales. Si la densidad relativa no es la unidad, la conversión se puede calcular a partir de

$$\text{concentración en ppm (mg/kg)} = \text{concentración en (mg/L)} \times \frac{1}{\text{densidad relativa de la solución}}$$

Para soluciones muy diluidas puede ser más conveniente expresar la concentración en microgramos por litro ( $\mu\text{g/L}$ ). Esto equivale a 0.001 partes por billón (ppb), en donde un billón equivale a  $10^9$ .

Para cada uno de estos sistemas existen diversos métodos para expresar concentraciones:

1. Masa/masa (o peso/peso)

(a) Porcentaje en peso Ejemplo: Solute 1% de NaCl  
Disolvente 99% H<sub>2</sub>O

(b) Partes por millón Ejemplo: 10,000 partes de NaCl/millón de partes de H<sub>2</sub>O  
10,000 mg de NaCl/kg de H<sub>2</sub>O

(c) Molalidad,  $m$  = número de moles\* de soluto por 1,000 g de disolvente

Ejemplo: Solución de NaCl en agua con una molalidad de 1

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ mol de NaCl (soluto)} & = & 58.5 \text{ g} \\ \text{H}_2\text{O (disolvente)} & = & \frac{1000.0 \text{ g}}{1058.5 \text{ g de solución}} \end{array}$$

(d) Fracción mol,  $X_i = \frac{\text{número de moles de soluto, } n}{\text{número total de moles, } n_t}$

El siguiente ejemplo ilustra la conversión de un método a los otros.

**Ejemplo 6.2**

Expresa la composición de una solución de NaCl al 2% en peso en términos de las otras unidades de masa/masa.

**Solución** Tome 100 g de solución como base. (Cualquier otro peso es apropiado.) Tenemos 2 g de NaCl y 98 g de H<sub>2</sub>O. Por tanto

$$\text{Para (b), } \frac{2}{100} = \frac{2 \times 10^4}{10^6} = 20,000 \text{ ppm}$$

$$\text{Para (c), molalidad, } m = \frac{2/58.5}{98/1000} = 0.349$$

$$\text{Para (d), fracción mol } X_{\text{NaCl}} = \frac{2/58.5}{2/58.5 + 98/18} = 0.0062$$

$$\text{fracción mol } X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{98/18}{2/58.5 + 98/18} = \frac{0.9938}{1.0000}$$

(La suma de las fracciones mol debe ser igual a la unidad.)

\*Un mol es la cantidad de una sustancia que contiene el número de Avogadro de moléculas. Por consiguiente, el mol se refiere a un número fijo de cualquier tipo de partículas, no a un peso. En la práctica no contamos las moléculas o partículas, sino que las pesamos. Así pues, una definición de ingeniería de un mol es la masa de una sustancia (en las unidades apropiadas: g, kg, lb, ton, etc.), numéricamente igual al peso molecular de la sustancia. Por ejemplo, 1 mol de oxígeno = 32 g de oxígeno.

## 2. Peso/volumen

- (a) mg/L Ejemplo: 1000 mg de NaCl en 1 L de solución
- (b) Molaridad\*,  $M$  = número de moles de soluto por 1 L de solución  
Ejemplo: Solución de NaCl de molaridad = 1  $M$ , contiene 1 mol o 58.5 g de NaCl por litro de solución  
Las soluciones de igual molaridad tienen el mismo número de moléculas de sustancia disuelta por litro o por cualquier otro volumen unitario.
- (c) Normalidad,  $N$  = número de pesos equivalentes-gramo de soluto por 1 L de solución (eq/L).
- (d) meq/L. Para sistemas muy diluidos, en muchos casos es conveniente emplear miliequivalentes por litro (meq/L) en vez de equivalentes (gramo) por litro (eq/L). Advierta que 1 eq/L = 1000 meq/L y 1 eq/m<sup>3</sup> = 1 meq/L.

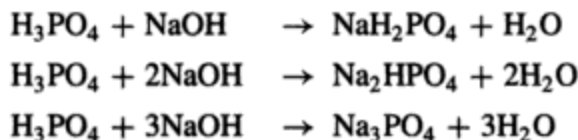
**Cómo expresar la normalidad.** Puesto que una sustancia determinada puede tener más de un peso equivalente-gramo, de acuerdo con la reacción que experimenta, es necesario, al expresar una concentración como normalidad, especificar en cuál reacción o tipo de reacción se va a utilizar la solución. En general,

$$\text{peso equivalente (g/eq)} = \frac{\text{peso atómico o molecular (g)}}{n \text{ (equivalentes)}} \quad (6.9)$$

en donde  $n$  es un entero positivo y

$$n = \begin{cases} \text{número de protones que se donan (en reacciones ácido-base)} \\ \text{cambio total del número de oxidación de un compuesto (en reacciones de oxidación-reducción)} \end{cases}$$

Por ejemplo, en las reacciones ácido-base,



$n = 1, 2$  y  $3$ , respectivamente.

La ventaja de las soluciones *normales* es que, si la normalidad de dos soluciones, A y B, es igual, 1 mL de A reacciona con exactamente 1 mL de B. Esto es así porque

$$V_A N_A = V_B N_B \quad (6.10)$$

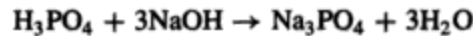
en donde  $N_A$  y  $N_B$  son la normalidad de las soluciones A y B, es decir, el número de pesos equivalentes-gramo en 1 L de las soluciones A y B, y  $V_A$  y  $V_B$  son el volumen de solución A (B) de normalidad  $N_A$  ( $N_B$ ) que reacciona con el volumen  $V_B$  ( $V_A$ ) de normalidad  $N_B$  ( $N_A$ ). Por consiguiente, si  $N_A = N_B$ , entonces  $V_A = V_B$ . Esta relación sirve para encontrar la normalidad de una solución desconocida.

\* *Molaridad* es la que se presenta de un cuerpo disuelto en una mezcla; el número de moles de aquél contenido en un litro de la solución. *Molalidad* es el número de moles o moléculas-gramo de un cuerpo por unidad de masa de una fase o sistema, por ejemplo, de un soluto o cuerpo disuelto por kilogramo de diluyente



**Ejemplo 6.3**

Si una solución contiene 5 g de NaOH/L, calcule la concentración de NaOH en términos de unidades de peso/volumen expresada como (a) mg/L, (b) molaridad, y (c) normalidad. La temperatura de la solución es 20°C. La reacción es

**Solución**

(a) Concentración en mg/L = 5000 mg/L

(b) Concentración en molaridad =  $\frac{5/40}{1} = 0.125 \text{ M}$

Nota: Para convertir molaridad a mg/L, use

$$\begin{aligned} \text{mg/L} &= \text{molaridad} \times \text{peso molecular gramo} \times 10^3 \\ &= 0.125 \times 40 \times 10^3 = 5000 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

(c) Peso equivalente de NaOH para esta reacción =  $\frac{40 \text{ g}}{1 \text{ Eq}} = 40 \text{ g/Eq}$

$$\begin{aligned} \text{Número de pesos equivalentes de NaOH en 1 L de solución} &= \frac{5 \text{ g/L}}{40 \text{ g/Eq}} \\ &= 0.125 \text{ Eq/L} \end{aligned}$$

Por consiguiente,

$$\text{Normalidad } N = 0.125 \text{ Eq/L}$$

**Ejemplo 6.4**

Determine la normalidad de una solución de NaOH de la cual se requieren 17.5 mL en la titulación de 35.0 mL de una solución 0.2 N de HCl. Una gota de indicador de naranja de metilo en la solución ácida sirve para señalar el punto final de la titulación por un cambio de color.

**Solución** De la ecuación (6.10),  $V_A N_A = V_B N_B$ . Sea A la solución de HCl y B la solución de NaOH. Entonces

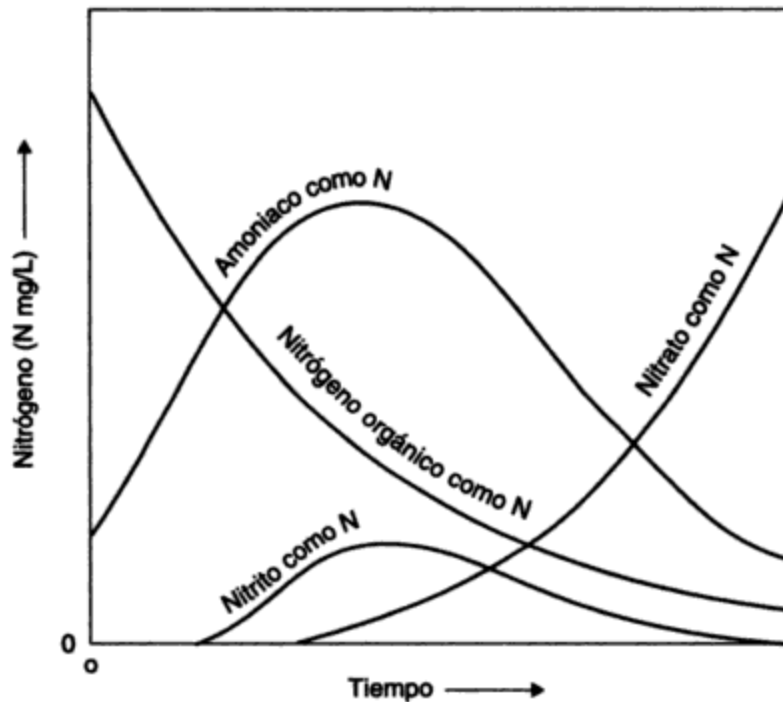
$$N_{\text{NaOH}} = \frac{V_{\text{HCl}} \times N_{\text{HCl}}}{V_{\text{NaOH}}} = \frac{35.0 \times 0.2}{17.5} = 0.4 \text{ N}$$

Por tanto, la normalidad de la solución de NaOH es 0.4 N.

**Concentración en términos de un constituyente común.** En la química del agua ha resultado útil expresar las concentraciones en términos de un constituyente común cuando el agua contiene diferentes formas químicas, pues todas contienen el constituyente común. Este método no se utiliza en química general y por tanto se hace necesaria una explicación. Por ejemplo, los compuestos de nitrógeno pueden estar presentes en las aguas residuales en las siguientes formas:

Nitrógeno amoniacal	$\text{NH}_4^+$ , $\text{NH}_3$
Nitrógeno orgánico	diversas formas
Nitrógeno de nitrito	$\text{NO}_2^-$
Nitrógeno de nitrato	$\text{NO}_3^-$

Se acostumbra informar todos los resultados en términos de nitrógeno (N) para que sea posible comparar los valores en forma directa. Por ejemplo, la figura 6-4 muestra los cambios que se producen en las formas del nitrógeno en ciertas aguas residuales en condiciones aerobias. Todas las concentraciones se expresan como mg/L N. La expresión 10 mg/L  $\text{NO}_3^-$  N significa que la concentración de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es de 10 mg/L expresada como N.



**Figura 6-4** Formas de los compuestos nitrogenados en las aguas residuales en condiciones aerobias. Fuente: Sawyer y McCarty (1978).

### Ejemplo 6.5

Un análisis de nitrógeno que proviene de una muestra de aguas residuales dio los siguientes resultados:

Amoniaco	30.0 mg/L $\text{NH}_3$
Nitrito	0.10 mg/L $\text{NO}_2^-$
Nitrato	1.50 mg/L $\text{NO}_3^-$
Nitrógeno orgánico (diversas formas)	5.0 mg/L N

Encuentre la concentración total de nitrógeno.

### Solución

$$\text{Amoniaco} \quad \text{NH}_3 = \frac{14}{17} \times 30.0 = 24.70 \text{ mg/L } \text{NH}_3^- \text{ N}$$

$$\text{Nitrito} \quad \text{NO}_2^- = \frac{14}{46} \times 0.10 = 0.03 \text{ mg/L } \text{NO}_2^- \text{ N}$$

$$\text{Nitrato} \quad \text{NO}_3^- = \frac{14}{62} \times 1.50 = 0.34 \text{ mg/L NO}_3^- \text{ N}$$

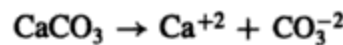
$$\text{Nitrógeno orgánico} \quad = 15.0 \text{ mg/L N}$$

$$\text{Concentración total de nitrógeno} \quad = 40.1 \text{ mg/L N}$$

El método del constituyente común con frecuencia se utiliza para la concentración de fósforo y para expresar la dureza y la alcalinidad del agua, las cuales son parte del sistema carbónico. La dureza se debe a cationes metálicos divalentes, principalmente  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , en tanto que a la alcalinidad contribuyen los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  y  $\text{OH}^-$ . Ha sido práctica común expresar la dureza y la alcalinidad en términos de mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , pero el uso de "equivalentes" va en aumento. Tenemos que\*

$$\text{dureza (en mg/L como CaCO}_3) = M^{+2} \text{ (en mg/L)} \times \frac{50 \text{ mg/meq}}{\text{equiv wt } M^{+2}} \quad (6.11)$$

en donde  $M^{+2}$  representa un ion metálico divalente. Advierta que  $n$  en la ecuación (6.9) es ahora igual a 2 con base en la reacción



#### Ejemplo 6.6

Calcule la dureza, en mg/L  $\text{CaCO}_3$ , de una muestra de agua con el siguiente análisis:

Catión	Conc.	Equivalente en wt
$\text{Na}^+$	40 mg/L	23
$\text{Mg}^{+2}$	10 mg/L	12.2
$\text{Ca}^{+2}$	55 mg/L	20.0
$\text{K}^+$	2 mg/L	39.0

**Solución** Sólo los iones divalentes  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  contribuyen a la dureza. Por tanto, de la ecuación (6.11),

$$\begin{aligned} \text{dureza (mg/L CaCO}_3) &= 55 \times \frac{50}{40/2} + 10 \times \frac{50}{24.3/2} \\ &= 138 + 41 = 179 \text{ mg/L como CaCO}_3 \end{aligned}$$

\*Para la conversión entre miliequivalentes por litro de  $\text{Ca}^{+2}$  ó  $\text{Mg}^{+2}$  y miligramos por litro como  $\text{CaCO}_3$ , emplee

$$\text{peso miliequivalente de CaCO}_3 = \frac{100 \text{ mg/mol}}{2 \text{ meq/mol}} = 50 \text{ mg/meq}$$

### 6.3.3 Reacciones ácido-base

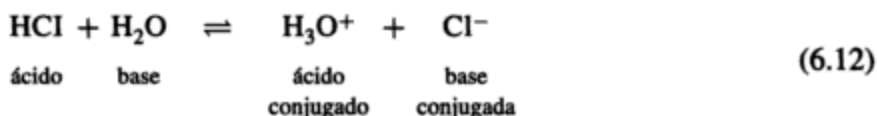
Las reacciones ácido-base, quizá la clase más importante de equilibrios químicos, son especialmente importantes en la química del agua. Entre los ejemplos se cuentan el sistema carbónico y su relación con el pH, la acidez y la alcalinidad, la concentración de iones metálicos en agua, el ablandamiento de este líquido, así como ciertas reacciones de precipitación y oxidación-reducción.

**Definición de ácidos y bases según Lowry-Brønsted.** Existen varias acepciones para ácido y base. La más común es la de Lowry-Brønsted, que establece:

Un **ácido** es una sustancia que tiene tendencia a ceder o donar un protón ( $H^+$ ), y una **base** es aquella que muestra tendencia a incorporar o aceptar un protón.

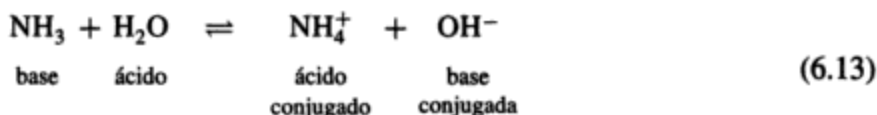
Por consiguiente, en una reacción ácido-base debemos tener siempre, además del ácido (o base), cierta sustancia capaz de aceptar (o donar) el protón.

Dos reacciones, en las cuales interviene el agua, permiten ilustrar la definición. La primera es



El HCl es un ácido porque dona un protón ( $H^+$ ) a la base  $H_2O$ , la cual lo acepta para convertirse en  $H_3O^+$ . Una vez que un ácido ha donado un protón, es capaz de aceptar otro y, por tanto, se describe como una **base conjugada**, que en este caso es  $Cl^-$ . De forma similar, una base que ha aceptado un protón tiene ahora la posibilidad de donarlo, y por consiguiente se dice que es un **ácido conjugado**, en este caso  $H_3O^+$ . El HCl y el  $Cl^-$  sólo difieren en un protón, y se les conoce como un par **ácido-base conjugado**, de la misma manera que el  $H_3O^+$  y el  $H_2O$ .

Cuando el agua reacciona con amoníaco,  $NH_3$ , que es una base, se comporta como un ácido y no como una base como en la ecuación (6.12). Tenemos que



Aquí estamos tratando con los pares ácido-base conjugados  $NH_4^+$  con  $NH_3$ , y  $H_2O$  con  $OH^-$ .

La fuerza de un ácido, es decir, la magnitud de su tendencia a perder un protón, se mide comparando esta tendencia contra una base común. El agua es una base de este tipo, como se muestra en la reacción general



en donde HA representa un ácido. La constante de equilibrio para esta reacción es

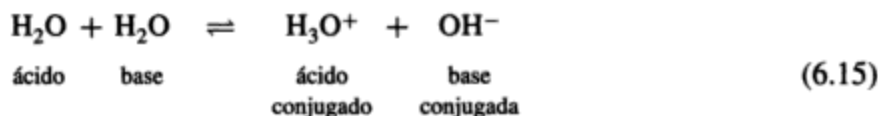
$$K_A = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]}$$

en donde  $[ \cdot ]$  significa "la concentración de" expresada en mol/L. Por tanto, a  $K_A$  se le conoce como la constante de disociación de ácido. Cuando un ácido es fuerte, su base conjugada es débil, y viceversa. La tabla 6-1 contiene una lista de algunos ácidos, sus bases conjugadas y sus constantes de disociación a una temperatura común de 25°C. Se indica también el uso o presencia de estos ácidos. En los manuales de química se puede obtener información de otras constantes de disociación a diferentes temperaturas

Todos los ácidos fuertes están totalmente disociados. En la siguiente tabla se muestran ejemplos de ácidos fuertes:

	Ácido fuerte	Base conjugada débil
Ácido clorhídrico	HCL	Cl <sup>-</sup>
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	
Ácido perclórico	HClO <sub>4</sub>	

**Ionización del agua.** Como ya sabemos, de acuerdo con la naturaleza de la otra sustancia reaccionante, el agua puede actuar ya sea como ácido o como base. El agua misma se ioniza débilmente y de manera reversible, como se muestra en la siguiente ecuación:



La constante de disociación  $K$  está determinada por

$$K = \frac{[H_3O^+] \cdot [OH^-]}{[H_2O]} = 1.8 \times 10^{-16} \text{ mol/L (a } 25^\circ\text{C)}$$

la cual se simplifica usualmente a

$$[H_3O^+] \cdot [OH^-] = K[H_2O]$$

en donde

$$[H_2O] = \frac{1000 \text{ g/L}}{18 \text{ g/mol}} = 55.5 \text{ mol/L}$$

de modo que

$$K_w = 1.8 \times 10^{-16} \times 55.5 = 1.0 \times 10^{-14}$$

A  $K_w$  se le conoce como la **constante del producto iónico del agua**.

TABLA 6-1 ÁCIDOS/BASES CONJUGADAS Y CONSTANTES DE DISOCIACIÓN

Presencia	Ácido	Base conjugada	Reacción	Constante de disociación $K_a$ (a 25°C)(mol/L)
Control de pH, coagulación	Ion sulfato ácido, $\text{HSO}_4^-$ (ácido relativamente fuerte)	$\text{SO}_4^{2-}$ (base conj. muy débil)	$\text{HSO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{SO}_4^{2-}$	$1.2 \times 10^{-2}$ (mayor)
Ablandamiento, amortiguadores	<sup>b</sup> Ácido fosfórico, $\text{H}_3\text{PO}_4$ ( $K_1$ )	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^-$	$7.5 \times 10^{-3}$
Fluoruración	Ácido fluorhídrico, HF	$\text{F}^-$	$\text{HF} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{F}^-$	$6.8 \times 10^{-4}$
Nitrificación, demanda de cloro	Ácido nítrico, $\text{HNO}_2$	$\text{NO}_2^-$	$\text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}_2^-$	$4.5 \times 10^{-4}$
Digestión de lodos	Ácido acético, $\text{CH}_3\text{COOH}$	$\text{CH}_3\text{COO}^-$	$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-$	$1.8 \times 10^{-5}$
Coagulación, control de pH	<sup>c</sup> Ácido carbónico, $\text{H}_2\text{CO}_3$ ( $\text{CO}_2$ ) ( $K_1$ )	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HCO}_3^-$	$4.2 \times 10^{-7}$
Control de olores, aireación	Sulfuro de hidrógeno, $\text{H}_2\text{S}$	$\text{HS}^-$	$\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HS}^-$	$1.1 \times 10^{-7}$
Ablandamiento	Ion fosfato dihidrógeno, $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ( $K_2$ )	$\text{HPO}_4^{2-}$	$\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$	$6.2 \times 10^{-8}$
Desinfección	Ácido hipocloroso, HOCl	$\text{OCl}^-$	$\text{HOCl} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OCl}^-$	$2.9 \times 10^{-8}$
Desinfección, digestión de lodos	Ion amonio, $\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{NH}_3$	$5.6 \times 10^{-10}$
Toxicidad de residuos	Cianuro de hidrógeno, HCN	$\text{CN}^-$	$\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CN}^-$	$4.8 \times 10^{-10}$
Coagulación	Ion bicarbonato, $\text{HCO}_3^-$ ( $K_2$ )	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$4.8 \times 10^{-11}$
control de pH	Ion fosfato ácido, $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ( $K_3$ )	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{PO}_4^{3-}$	$4.7 \times 10^{-13}$
Ablandamiento	<sup>a</sup> Agua, $\text{H}_2\text{O}$	$\text{OH}^-$ (base conjugada relativamente fuerte)	$\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$	$1.8 \times 10^{-16}$ (menor)

<sup>a</sup>La constante de disociación para la base conjugada es  $K_b = K_w / K_a$ , donde  $K_w$  es el producto iónico del agua.

<sup>b</sup>Ciertos ácidos, como el fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) o el carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), tienen más de un ion hidrógeno (protón) para donar. La ionización por etapas da origen a constantes de disociación individuales, las cuales se indican por medio de un subíndice:  $K_1$ ,  $K_2$ , etcétera.

<sup>c</sup>La concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en agua es alrededor de 600 veces la concentración de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , pero la conversión de  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2\text{CO}_3$  es muy rápida; por consiguiente, la suposición de que todo el  $\text{CO}_2$  disuelto existe como  $\text{H}_2\text{CO}_3$  es correcta para el cálculo del pH de soluciones acuosas de  $\text{CO}_2$ .

Al igual que con las constantes de disociación de ácido  $K_a$ , la temperatura afecta a  $K_w$ , la constante del producto iónico del agua, como se muestra en la siguiente tabla:

$T(^{\circ}\text{C})$	$K_w$
0	$1.1 \times 10^{-15}$
10	$2.9 \times 10^{-15}$
20	$6.8 \times 10^{-15}$
25	$1.0 \times 10^{-14}$
30	$1.5 \times 10^{-14}$
100	$7.0 \times 10^{-13}$

La disociación a  $100^{\circ}\text{C}$  es más de dos órdenes de magnitud mayor que a  $0^{\circ}\text{C}$ .

**La escala de pH.** La fuerza de un ácido o base se puede indicar por su concentración molar de iones hidrógeno. Sin embargo, debido a que esto es incómodo, se ha establecido la convención de expresar la concentración de ion hidrógeno en términos de su logaritmo negativo, que se conoce como el **pH** de la solución. Así

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+] \quad (6.16)$$

de forma similar, el pOH representa el logaritmo negativo de la concentración de ion hidróxido, de modo que

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-] \quad (6.17)$$

Puesto que  $[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ , se concluye que

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \text{ a } 25^{\circ}\text{C}$$

Una solución acuosa **neutra** (es decir, ni ácida ni básica) tiene por definición concentraciones iguales de iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  y  $\text{OH}^-$ , y a  $25^{\circ}\text{C}$  su  $\text{pH} = \text{pOH} = 7$ . Las soluciones acuosas con un pH menor de 7 se describen como *ácidas*, y aquéllas con un pH mayor de 7 se conocen como básicas o *alcalinas*.

#### Ejemplo 6.7

(a) Encuentre el pH de una solución con  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 3.4 \times 10^{-4}$  mol/L.

(b) Encuentre  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  si el pH de una solución es 6.7.

**Solución** De la ecuación (6.16),

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \text{pH} &= -\log[\text{H}_3\text{O}^+] = -\log(3.4 \times 10^{-4}) \\ &= -\log 3.4 - \log 10^{-4} \\ &= -0.53 + 4 \\ &= 3.47 \end{aligned}$$

$$(b) \quad 6.7 = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

o

$$10^{-6.7} = [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$10^{0.3} \times 10^{-7} = \text{H}_3\text{O}^+$$

o

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 2 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$$

**El sistema carbónico.** El sistema ácido-base conjugada más importante en las interacciones aire/agua es el carbónico, el cual controla el pH de la mayor parte de las aguas naturales y se compone de las siguientes especies:

- Dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , en forma gaseosa,  $\text{CO}_2(g)$ , o disuelto en agua,  $\text{CO}_2(ac)$
- Ácido carbónico,  $\text{H}_2\text{CO}_3$
- Ion bicarbonato,  $\text{HCO}_3^-$
- Ion carbonato,  $\text{CO}_3^{2-}$
- Sólidos a base de carbonatos, principalmente de calcio y de magnesio

Entre los ejemplos que tienen importancia en el sistema carbónico en el campo ambiental se cuentan los siguientes:

- La producción de  $\text{CO}_2$  en la respiración biológica
- El consumo de  $\text{CO}_2$  en la fotosíntesis
- El intercambio de  $\text{CO}_2$  entre aire y agua
- La disolución de carbonatos minerales, principalmente  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ , por las aguas subterráneas
- La capacidad amortiguadora de las aguas naturales, que principalmente proviene del sistema carbónico (acidez y alcalinidad)
- Ablandamiento de aguas
- Diversos procesos de tratamiento de agua y de aguas residuales
- El intercambio entre las formas sólida y disuelta del  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{MgCO}_3$ ) en el fondo de los lagos

Es difícil establecer la naturaleza del sistema carbónico, el cual puede participar en equilibrios homogéneos en solución, así como en equilibrios heterogéneos aire/agua y agua/sólido.

Snoeynik y Jenkins (1980) han identificado cuatro sistemas:

1. Un sistema abierto sin sólidos presentes
2. Un sistema abierto con un sólido presente
3. Un sistema cerrado sin sólidos presentes
4. Un sistema cerrado con un sólido presente



En la figura 6-5 se describen algunos ejemplos de sistemas reales. El cálculo de la concentración tanto de especies de carbonato en sistemas abiertos y cerrados como en presencia de iones metálicos y sólidos que contienen carbonatos queda fuera del alcance de este libro. Se encontrará un tratamiento detallado en Snoeynik y Jenkins (1980) y en Butler (1982).

Los equilibrios del sistema carbónico son los siguientes:

Equilibrio	Ecuación	Constante de equilibrio <sup>a</sup>	Número de ecuación
Aire $\rightleftharpoons$ agua	$\text{CO}_2(g) \rightleftharpoons \text{CO}_2(ac)$	$K_H = 3.2 \times 10^{-2}$ (véase la ley de Henry, sección 6.4)	(6.18)
En agua	$\text{CO}_2(ac) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{H}_2\text{CO}_3^* \text{ }^b$	$K_m = 1.6 \times 10^{-3}$ (adimensional)	(6.19)
	$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HCO}_3^-$	$K_{a1} = 4.2 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$	(6.20)
	$\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$K_{a2} = 4.8 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$	(6.21)
Sólido $\rightleftharpoons$ agua	$\text{CaCO}_3(s) \rightleftharpoons \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{2-}$	$K_{so} = 5.0 \times 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{L}^2$	(6.22)
	$\text{CaCO}_3(s) + \text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{+2} + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	$K = K_{so}/K_{a1}$	(6.23)

<sup>a</sup>Las constantes son para  $T = 25^\circ\text{C}$ . Para valores a otras temperaturas, consúltense los manuales.

<sup>b</sup> $K_m = 1.6 \times 10^{-3} = [\text{H}_2\text{CO}_3]/[\text{CO}_2(ac)]$ , lo cual indica que  $[\text{H}_2\text{CO}_3] \ll [\text{CO}_2(ac)]$ , en una proporción de 1:600 más o menos. Sin embargo, se acostumbra que  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  represente la suma de  $[\text{CO}_2(ac)] + [\text{H}_2\text{CO}_3]$ .

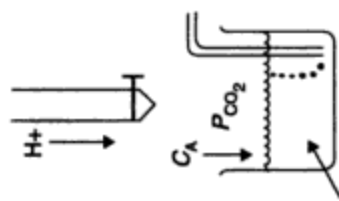
**Capacidad amortiguadora de las aguas naturales.** El conocimiento del sistema carbónico nos ayuda a entender cómo es que la mayor parte de las aguas naturales son capaces de resistir los cambios de pH cuando se agrega o se forma material ácido o alcalino. En las aguas naturales esta capacidad amortiguadora es atribuible sobre todo a la presencia de especies del sistema carbónico. Las bases como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , y  $\text{OH}^-$  confieren al agua la capacidad para resistir cambios de pH cuando se agrega un ácido fuerte. Los ácidos como  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{CO}_2)$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{H}_3\text{O}^+$  proporcionan amortiguamiento contra la adición de bases fuertes.

Un **amortiguador** (o *buffer*) es una sustancia en solución que ofrece resistencia a los cambios de pH cuando se agrega a la solución o se forma en ella un material ácido o alcalino. En el intervalo de pH de 6 a 9, que es característico de la mayor parte de las aguas naturales, sólo los ácidos y bases débiles tienen esta capacidad. La figura 6-6 muestra lo que sucede cuando se adiciona una base fuerte (NaOH) a un ácido débil ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) y a un ácido fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La parte sesgada de la curva de titulación de ácido carbónico nos muestra que se produce amortiguamiento entre los valores de pH de 6 a 8.5, en tanto que lo empinado de la curva de titulación de ácido sulfúrico indica ausencia de capacidad amortiguadora en este intervalo de pH. Esta resistencia al cambio de pH cuando se adiciona material alcalino o ácido se explicará en breve.

En agua natural (con pH alrededor de 7) que contiene  $\text{CO}_2$  libre y alcalinidad de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), las reacciones del  $\text{CO}_2$  y el  $\text{HCO}_3^-$  [ecuaciones (6.19) y (6.20)] y la disociación del agua misma [ecuación (6.15)] ilustran cómo se produce el amortiguamiento. Expresemos de nuevo estas ecuaciones como

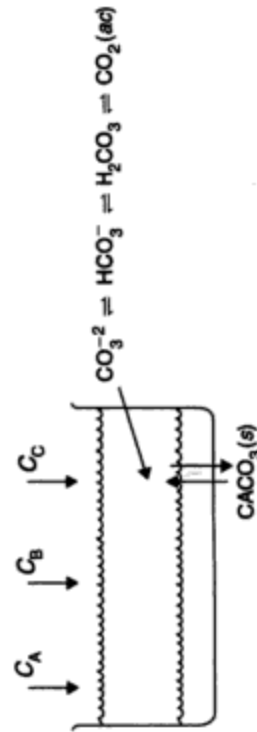
**Titulación: sistema abierto, sin sólidos**

Una muestra de agua que contiene especies carbonáticas se titula con un ácido fuerte. Durante el proceso la muestra se calienta y se burbujea aire vigorosamente para equilibrar la muestra con la atmósfera. El sistema se burbujea en la siguiente figura. El sistema está abierto a la atmósfera y no se encuentra en equilibrio con un sólido que contiene carbonatos.



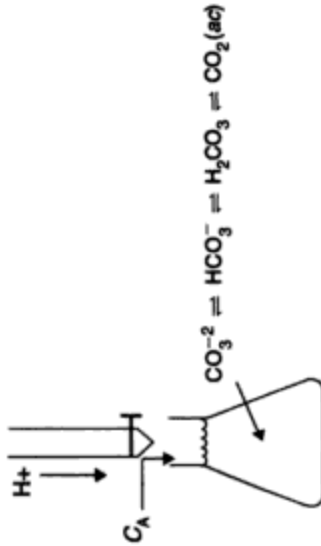
**Tratamiento de aguas: sistema cerrado con sólidos**

Se adicionan sustancias químicas (por ejemplo, cal, carbonato de sodio, ácidos fuertes, bases fuertes y  $\text{CO}_2$ ) al agua en una planta de tratamiento de aguas para ablandar el agua y ajustar su pH. El sistema se burbujea en la siguiente figura. Debido a que la superficie del área para el porcentaje de volumen del estanque para tratamiento es pequeño, el tiempo de residencia es corto y el  $\text{CaCO}_3$  sólido es abundante, entonces el sistema se considera como cerrado a la atmósfera y tiende hacia el equilibrio con sólidos que contienen carbonatos. (El supuesto de un sistema cerrado no es del todo exacto, porque puede haber intercambio de  $\text{CO}_2$  atmosférico.)



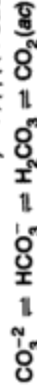
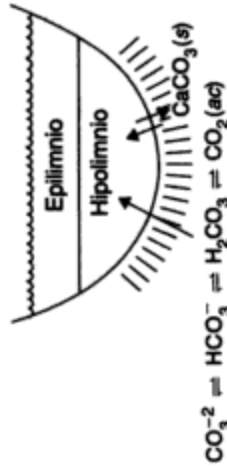
**Titulación: sistema cerrado, sin sólidos**

Una muestra de agua que contiene especies carbonáticas se titula con un ácido fuerte. La titulación se efectúa con rapidez en un recipiente casi lleno y con poca agitación. Se considera que el sistema está cerrado a la atmósfera (aunque puede escapar un poco de  $\text{CO}_2$ ) y no está en equilibrio con un sólido que contiene carbonatos.



**Lago: sistema cerrado con sólidos**

El hipolimnion de un lago estratificado está en contacto con sedimentos que contienen calcita,  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ . El sistema se burbujea en la siguiente figura. El sistema está cerrado a la atmósfera y tiende a estar en equilibrio con un sólido que contiene carbonatos.



**Tratamiento de aguas residuales: sistema abierto sin sólidos**

La nitrificación (oxidación de amoníaco a nitrato) y la oxidación de materia orgánica a  $\text{CO}_2$  y agua se verifican en el estanque vigorosamente aireado de una planta de lodos activados. El sistema se burbujea en la siguiente figura. El sistema está abierto y en equilibrio con la atmósfera con una  $\text{PCO}_2$  del gas de aireación. El sistema no está en equilibrio con un sólido que contiene carbonatos.

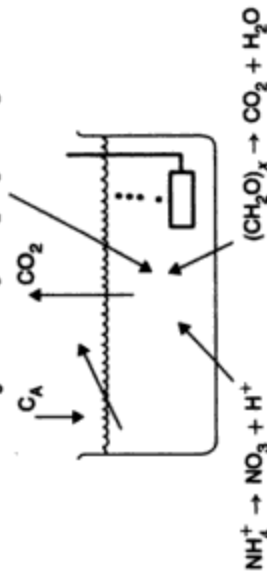
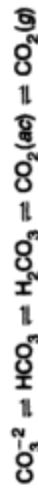


Figura 6-5 Ejemplos de sistemas carbonáticos. Fuente: Snoeyink y Jenkins (1980). Reproducido con autorización de John Wiley & Sons, Inc. Derechos reservados © 1980.

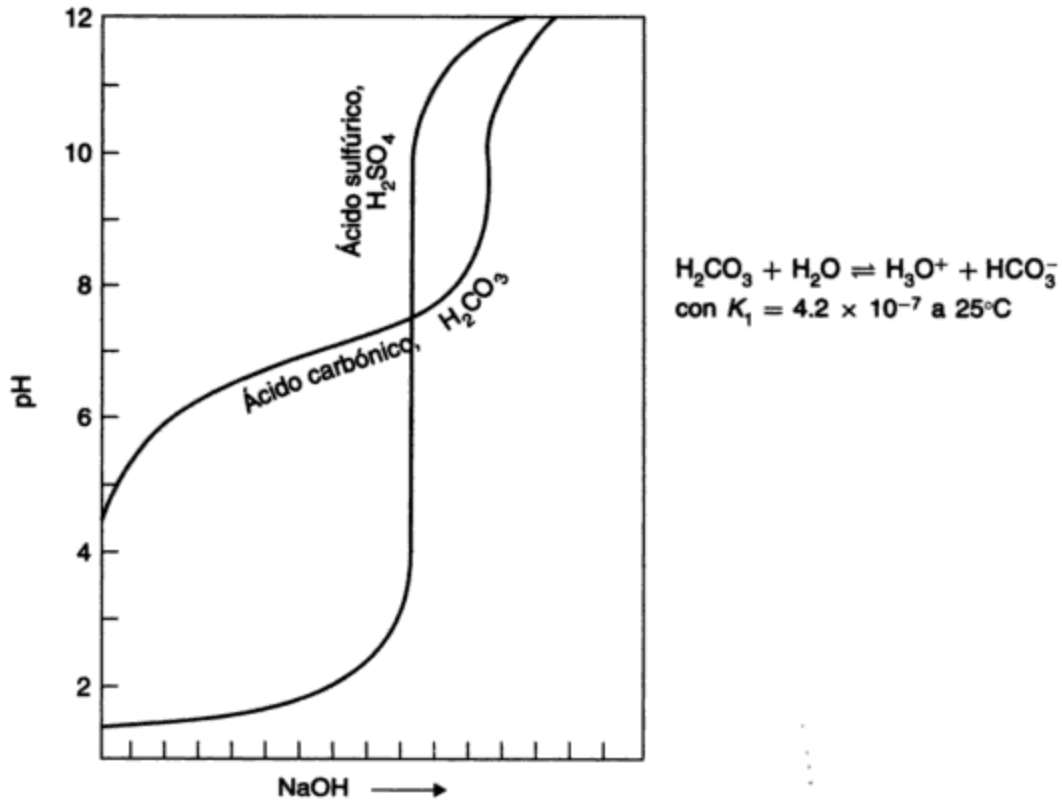
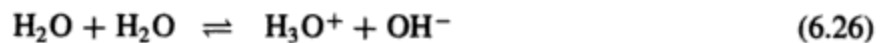


Figura 6-6 Curvas de titulación para ácido carbónico y ácido sulfúrico.



Si agregamos una pequeña cantidad de NaOH, material bastante alcalino (esto es, agregamos  $OH^-$ ), entonces, considerando que  $[H_3O^+][OH^-] = K_w = 10^{-14}$ , advertiremos que un aumento de  $OH^-$  causa una disminución de  $[H_3O^+]$ . Sin embargo, una reducción de  $[H_3O^+]$  desplaza la ecuación (6.25), y por consiguiente a la ecuación (6.24) hacia la derecha, con lo cual se produce más  $[HCO_3^-]$  y  $[H_3O^+]$  y se reduce la concentración de  $CO_2$ . El resultado neto es un ligero aumento de pH. Esta adición de iones hidroxilo puede continuar sin que se produzca un aumento notable de pH, situación que cambia cuando todo el  $CO_2$  libre se ha convertido en  $HCO_3^-$  y se alcanza un pH cercano a 8.3. De forma similar, si agregamos una pequeña cantidad de un ácido fuerte, por ejemplo HCl, la concentración de  $H_3O^+$  aumenta. Esto hace que las ecuaciones se desplacen hacia la izquierda; el resultado final es un aumento en la cantidad de  $CO_2$  libre y un pH ligeramente menor. Esta capacidad amortiguadora de las aguas naturales es una propiedad muy importante porque impide que ocurran grandes cambios de pH en el agua cuando se agregan a ella contaminantes ácidos o alcalinos. Muchas bacterias y otras formas de vida acuática tienen un intervalo de tolerancia al pH relativamente estrecho y se destruirían si no contaran con la protección del sistema carbónico.

**Acidez y alcalinidad.** La **acidez** de una muestra de agua es su capacidad para neutralizar bases; la **alcalinidad** es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Al examinar las curvas de titulación de un ácido fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y de uno relativamente débil [ $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{CO}_2)$ ] de la figura 6-6, se ve que abajo de 4.5 de pH la acidez se debe a la presencia de un ácido mineral fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), en tanto que en un rango de pH entre 4.5 y 8.5, el  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{CO}_2)$  es la fuente de la acidez que tiende a neutralizar la base fuerte ( $\text{NaOH}$ ). En las aguas naturales, las fuentes principales de acidez son el dióxido de carbono proveniente de la atmósfera y de la oxidación bacteriana de la materia orgánica, la acidez mineral de los residuos industriales y el drenaje de las minas y de la lluvia ácida. Las aguas ácidas no constituyen una amenaza para la salud humana, pero causan gran preocupación por su capacidad de corrosión y porque trastornan las condiciones ambientales de los lagos. La acidez se determina en el laboratorio titulando un volumen conocido de la muestra con una solución estándar de un reactivo alcalino hasta que se alcanza el punto final, un pH de 4.5 o de 8.5 (según el tipo de acidez presente). El punto de equivalencia puede ser indicado por un potenciómetro o por sustancias químicas que cambian de color con un pH de 4.5 o de 8.5 (naranja de metilo o fenolftaleína).

Los bicarbonatos, que se forman por la acción del  $\text{CO}_2$  sobre materiales básicos [ecuación (6.27)], se integran a las aguas superficiales, representando la forma principal de alcalinidad:



Con valores de pH altos, las aguas naturales pueden contener cantidades considerables de alcalinidad de carbonato e hidróxido, como se muestra en la figura 6-7, la cual indica las cantidades relativas de carbonato en el agua. La causa de un pH elevado puede ser la presencia de algas, las cuales al extraer  $\text{CO}_2$  del agua por fotosíntesis aumentan el pH. La alcalinidad del agua, sea alta o baja, no tiene efectos nocivos en los seres humanos; sin embargo, las aguas muy alcalinas tienen mal sabor. La alcalinidad total se mide por titulación con ácido sulfúrico hasta el punto final, un pH aproximado de 4.5. El uso de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  N/50 es conveniente para expresar la alcalinidad en términos de mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , puesto que el peso equivalente del  $\text{CaCO}_3$  es 50. Tenemos que

alcalinidad total (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ )

$$= \text{mL totales de } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ N/50 para un pH de 4.5} \times \frac{1000}{\text{mL muestra}} \quad (6.28)$$

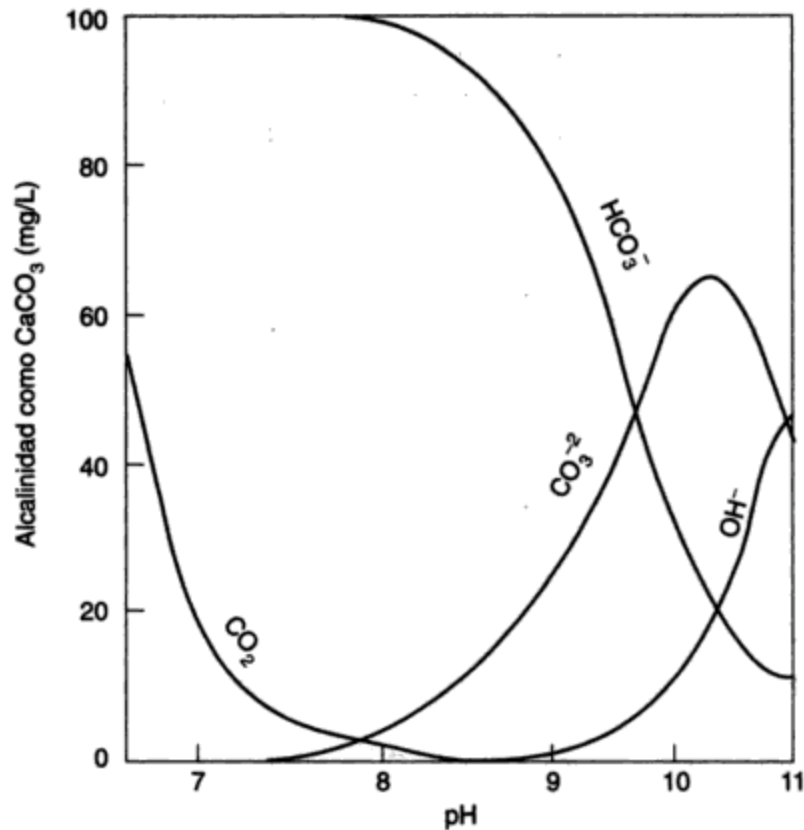
### Ejemplo 6.8

Una muestra de 100 mL de aguas residuales requiere 7.5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  N/50 para su titulación hasta un pH de 4.5. ¿Cuál es la alcalinidad total en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ?

**Solución** De la ecuación (6.28),

$$\text{alcalinidad total} = 7.5 \times \frac{1000}{100} = 75 \text{ mg/L como } \text{CaCO}_3$$

Las formas y las concentraciones en las cuales la alcalinidad está presente en una muestra de agua se pueden determinar a partir de las mediciones de alcalinidad precedentes (esto es, por titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  N/50) o, para mayor exactitud, mediante cálculos realizados con base en las ecuaciones de equilibrio y en el hecho de que la suma de las concentraciones de cationes debe ser igual a la de las concentraciones de aniones.



**Figura 6-7** Cantidades relativas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , y  $\text{OH}^-$  a diversos niveles de pH (valores calculados para agua con una alcalinidad total de 100 mg/L a 25°C). Fuente: Sawyer y McCarty (1978).

Para el método por cálculo, las ecuaciones aplicables son la (6.15), que correlaciona el  $\text{H}_3\text{O}^+$  y el  $\text{OH}^-$ , esto es

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_w = 1 \times 10^{-14} \text{ a } 25^\circ\text{C}$$

en la cual se determina la alcalinidad de hidróxido  $[\text{OH}^-]$  midiendo el pH; la ecuación (6.21) correlaciona el  $\text{CO}_3^{2-}$  y el  $\text{HCO}_3^-$ , esto es

$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = K_{a2} = 4.8 \times 10^{-11} \text{ a } 25^\circ\text{C} \tag{6.29}$$

Ahora bien, puesto que los cationes y los aniones deben estar balanceados, y en virtud de que la alcalinidad es equivalente a todos los cationes que se miden, excepto el ion  $\text{H}_3\text{O}^+$ , podemos escribir

$$[\text{alcalinidad}] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] \tag{6.30}$$

Note que la concentración de carbonato,  $\text{CO}_3^{2-}$ , se multiplica por 2 porque se combina con dos iones hidrógeno al formar ácido carbónico, y que las concentraciones de los iones se dan en

mol/L. Las concentraciones en mg/L como  $\text{CaCO}_3$  son de 50,000 veces estos valores, puesto que el peso equivalente-gramo del  $\text{CaCO}_3$  es 50.

Las incógnitas de las ecuaciones (6.29) y (6.30) son  $[\text{HCO}_3^-]$  y  $[\text{CO}_3^{2-}]$ , que se encuentran al resolver de manera simultánea las ecuaciones. El resultado (Sawyer y McCarty, 1978) es:

alcalinidad de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ )

$$\frac{\text{alcalinidad total (mg/L como CaCO}_3) + 50,000[\text{H}_3\text{O}^+] - 50,000(K_w/[\text{H}_3\text{O}^+])}{1 + [\text{H}_3\text{O}^+]/2K_{a2}} \quad (6.31)$$

alcalinidad de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) (mg/L como  $\text{CaCO}_3$ )

$$\frac{\text{alcalinidad total (mg/L como CaCO}_3) + 50,000[\text{H}_3\text{O}^+] - 50,000(K_w/[\text{H}_3\text{O}^+])}{1 + 2K_{a2}/[\text{H}_3\text{O}^+]} \quad (6.32)$$

### Ejemplo 6.9

Se dispone de la siguiente información acerca de una muestra de aguas residuales.

Alcalinidad total	75 mg/L como $\text{CaCO}_3$ (por titulación)
Temperatura	25°C
pH	10.1 (medido con potenciómetro)

Calcule la alcalinidad de bicarbonato, carbonato e hidróxido.

**Solución** De la ecuación (6.16),

$$10.1 = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$10^{-10.1} = [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$10^{0.9} \times 10^{-11} = [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 7.9 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$$

De la ecuación (6.31),

$$\begin{aligned} \text{mg/L CO}_3^{2-} \text{ (como CaCO}_3) &= \frac{75 + 50,000 \times 7.9 \times (10)^{-11} - 50,000[10^{-14}/(7.9 \times 10^{-11})]}{1 + (7.9 \times 10^{-11})/(2 \times 4.8 \times 10^{-11})} \\ &= \frac{75 + 3.9 \times 10^{-6} - 6.3}{1 + 0.82} = \frac{68.7}{1.82} = 37.8 \end{aligned}$$

De la ecuación (6.32),

$$\text{mg/L HCO}_3 \text{ (como CaCO}_3) = \frac{75 + 3.9 \times 10^{-6} - 6.3}{1 + 1/0.82} = \frac{68.7}{2.22} = 30.9$$

De la ecuación (6.15),

$$[\text{OH}^-] = \frac{1 \times 10^{-14}}{[\text{H}_3\text{O}^+]}$$

$$\text{mg/L } [\text{OH}^-] \text{ (como CaCO}_3) = 50,000 \times \frac{10^{-14}}{7.9 \times 10^{-11}} = 6.3$$

*Comprobación:* Alcalinidad total = 37.8 + 30.9 + 6.3 = 75 (por cálculo).

## 6.4 GASES, MEZCLAS GASEOSAS Y TRANSFERENCIA GAS-LÍQUIDO

Es necesario conocer el comportamiento de los gases y las mezclas gaseosas en diversas condiciones ambientales para el control de la contaminación del aire, el agua y el suelo. Por ejemplo, en la digestión anaerobia de aguas residuales se producen tres gases principales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), cada uno de los cuales es, respectivamente corrosivo, rico en energía y venenoso. El gas que se desprende de la descomposición orgánica en zonas de confinamiento podría originar incendios y explosiones que representan un peligro para cualquier desarrollo urbano en la zona o cercano a ella. Además, la disolución de gases en líquidos, así como la extracción de gases disueltos en líquidos, son de especial importancia para el ingeniero y el científico dedicados al campo ambiental.

En esta sección repasaremos los gases ideales y las leyes que describen su comportamiento. En la mayor parte de las situaciones ambientales, los gases se encuentran a presiones suficientemente bajas, que les permiten comportarse casi como gases ideales. A través del estudio experimental de los gases han surgido ciertas "leyes" o generalizaciones: la ley de Boyle, la de Charles (conocida también como ley de Gay-Lussac), la de los gases ideales y la de Dalton (Mahan, 1975). Por las razones señaladas en la sección 6.3, la ley de Raoult y la de Henry, que se ocupan de los sistemas de gas/líquido, se presentan después de las leyes de los gases.

### 6.4.1 Leyes de los gases

**Ley de Boyle.** La ley de Boyle establece que:

**El volumen de un gas a temperatura constante varía en proporción inversa a su presión.**

Esto es,

$$V_a T_{\text{constante}} \propto \frac{1}{P} \quad (6.33)$$

o

$$P_a T_{\text{constante}} \propto \frac{1}{V} \quad (6.34)$$

o

$$PV_a T_{\text{constante}} = \text{constante} = K \quad (6.35)$$

La figura 6-8a es una gráfica de la presión en función del volumen para un gas a tres temperaturas,  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , en la cual se muestran los datos de  $P$ - $V$  medidos experimentalmente. Las ecuaciones para estas curvas serían iguales a la ecuación (6.35), de la forma  $xy = \text{cons}$

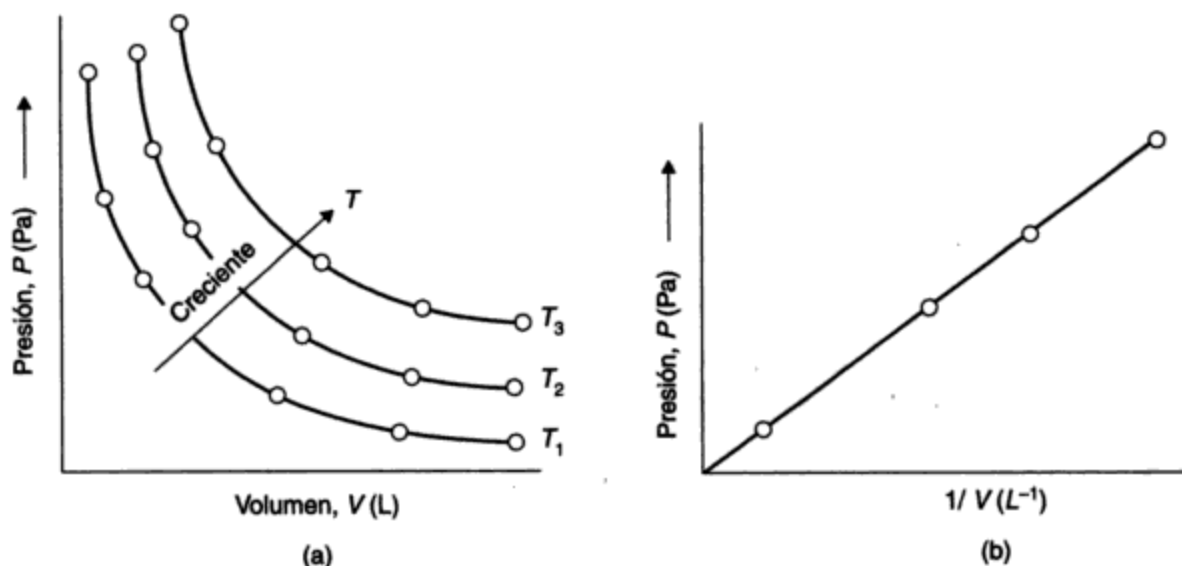


Figura 6-8 Relación de presión a volumen.

tante, que es la expresión matemática de una hipérbola. Una gráfica de  $P$  en función de  $1/V$  (figura 6-8b) a una temperatura constante debe dar una línea recta; por consiguiente, graficar los valores experimentales nos permite juzgar qué tanto se apega el gas a la ley de Boyle.

La ley de Boyle tiene aplicación directa en la conversión de volúmenes de gas medidos a diversas presiones (esto es, altitudes) en condiciones estándar.

**Ley de Charles (o ley de Gay-Lussac).** La ley de Charles establece que:  
**El volumen de un gas a presión constante varía en proporción directa a su temperatura absoluta.**

Los experimentos demuestran que, para todos los gases que se mantienen a una presión baja constante, el aumento de volumen por cada grado centígrado es  $\frac{1}{273}$  del volumen del gas a  $0^\circ\text{C}$ , o

**A  $P$  constante:**

$$V = V_{0^\circ\text{C}} + \frac{T_C}{273} V_{0^\circ\text{C}} = V_{0^\circ\text{C}} \frac{273 + T_C}{273} \quad (6.36)$$

Si definimos una nueva escala de temperatura  $T_K$  tal que

$$T_K = T = 273 + T_C$$

en donde  $T_C$  es la temperatura en grados centígrados, y a  $T_C = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_K = T_0 = 273$  (en realidad, 273.15), y  $T_K = T =$  temperatura absoluta en grados kelvin, por lo tanto la ecuación (6.36) se transforma en

**A  $P$  constante:**

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$



o

$$V \text{ a } P \text{ constante} = \frac{V_0}{T_0} T = \text{constante} \times T \quad (6.37)$$

La figura 6-9 es una gráfica de la ecuación (6.37), la cual correlaciona el volumen de un gas (cualquiera, pues todos tienen el mismo volumen a la misma temperatura y presión) con la temperatura absoluta a diferentes presiones constantes. La ley de Charles se aplica en un intervalo de temperatura limitado y como resultado se obtienen líneas rectas. En teoría, a  $T_0 = 0 \text{ K}$ ,  $V = 0$ . Sin embargo, en la realidad los gases se licuan o solidifican mucho antes de que se alcance la temperatura del cero absoluto, de modo que las líneas rectas son más cortas que las que se muestran. No obstante, la extrapolación de las líneas correspondientes a distintos gases, hasta el punto donde cortan el eje de la temperatura, muestra que el punto de intersección es el mismo para todos los gases y es cercano a  $0 \text{ K}$  ( $-273^\circ\text{C}$ ).

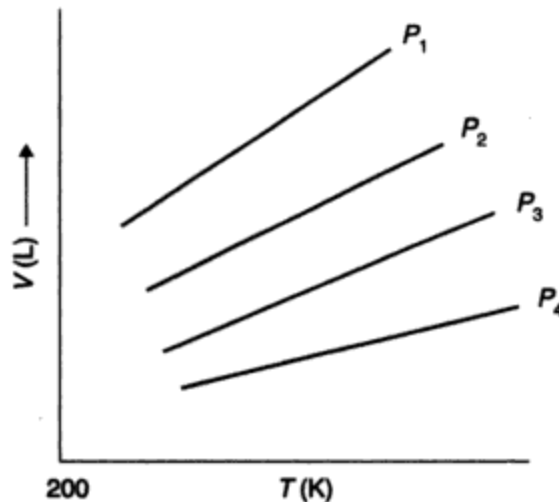


Figura 6-9 Relación de volumen a temperatura.

La ley de Charles permite calcular en recipientes rígidos la presión conforme la temperatura varía. La determinación del tamaño necesario para un tanque de gas y las presiones que son de esperar en una gama de temperaturas sería una aplicación práctica de la combinación de las leyes de Boyle y de Charles.

**Ley de los gases ideales.** Examinemos ahora la situación en la cual la presión  $P$  y la temperatura  $T$  de un gas varían entre el estado 1 ( $P_1$ ,  $T_1$  y  $V_1$ ) y el 2 ( $P_2$ ,  $T_2$  y  $V_2$ ). Hemos medido experimentalmente  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $V_1$ ,  $P_2$  y  $T_2$ , y deseamos calcular  $V_2$ . Por lo tanto, utilizando la ley de Boyle,

$$\text{a } T_{\text{constante}} = T_1: \frac{V_x}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} \quad (6.38)$$

en donde  $V_x$  es el volumen del gas a  $T_1$  y  $P_2$ .

Aplicando la ley de Charles

$$\text{a } P_{\text{constante}} = P_2: \frac{V_2}{V_x} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.39)$$

o

$$V_2 = V_x \frac{T_2}{T_1} = V_1 \frac{P_1}{P_2} \times \frac{T_2}{T_1}$$

después de reordenarla, se transforma en

$$\frac{V_1 P_1}{T_1} = \frac{V_2 P_2}{T_2} = \text{constante} = K$$

Así pues, en general,

$$PV = KT \quad (6.40)$$

El valor numérico de  $K$  está determinado por el número de moles de gas en cuestión y las unidades de  $P$ ,  $V$  y  $T$ , y es independiente del tipo de gas. Si consideramos que

$$K = nR$$

en donde  $n$  es el número de moles de gas y  $R$  es la constante universal de los gases (por mol de gas). Entonces

$$PV = nRT \quad (6.41)$$

La ecuación (6.41) se conoce como **ley de los gases ideales** y es la forma más sencilla de la ecuación general que se aplica a los gases reales. A presiones bajas y temperaturas normales casi todos los gases tienen un comportamiento ideal. La evaluación numérica de  $R$  se puede hacer con base en el hecho experimental de que 1 mol de cualquier gas ideal en condiciones estándar [temperatura y presión estándar (TPE)] de 0°C (273.15 K) y 101,325 Pa ocupa un volumen de 22.414 L. Por consiguiente,

$$\begin{aligned} R &= \frac{PV}{nT} = \frac{101,325 \text{ N/m}^2 \times 22.414 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ g mol} \times 273.15 \text{ K}} \\ &= 8.31 \text{ N} \cdot \text{m/K} \cdot \text{mol} = 8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \\ &\text{(El valor exacto 8.31441)} \end{aligned}$$

Las dimensiones de  $R$  son

$$\left[ \frac{\text{ML}^2}{\text{t}^2 \text{ T} \cdot \text{mol}} \right]$$

Si  $P$  se da en atmósferas y  $V$  en litros,  $R = 0.082056 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol}$ . En los manuales se encuentran en diferentes sistemas de unidades otros valores para  $R$ .

**Ley de Dalton de las presiones parciales.** La ley de Dalton establece que: **En una mezcla de gases, cada uno ejerce presión con independencia de los otros. La presión parcial de cada gas es proporcional a la cantidad, medida por el porcentaje en volumen o el número de moles de ese gas en la mezcla.**

Es decir,

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = \Sigma P_i$$

en donde  $P_i$  es la presión parcial que el gas  $i$  ejercería si sólo él llenara el volumen total.

Si la presión y la temperatura de una mezcla gaseosa no son extremas, podemos emplear la ley de los gases ideales para la mezcla, la cual contiene  $n_A$  moles del gas A,  $n_B$  moles del gas B y  $n_C$  moles del gas C, con un volumen total  $V$  y a la temperatura  $T$ . En ese caso, las presiones parciales de los tres gases están determinadas por

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{n_A RT}{V} = \frac{n_A}{n_{\text{total}}} P_{\text{total}} \\ P_B &= \frac{n_B RT}{V} = \frac{n_B}{n_{\text{total}}} P_{\text{total}} \\ P_C &= \frac{n_C RT}{V} = \frac{n_C}{n_{\text{total}}} P_{\text{total}} \end{aligned} \quad (6.42)$$

y la presión es

$$P_{\text{total}} = P_A + P_B + P_C = (n_A + n_B + n_C) \times \frac{RT}{V} = n_{\text{total}} \frac{RT}{V} \quad (6.43)$$

### Ejemplo 6.10

El indicador de presión de una tubería maestra de agua indica 80 lb/in<sup>2</sup>. La presión atmosférica es 100 kPa. Calcule la presión absoluta en pascales en la tubería maestra.

### Solución

$$\begin{aligned} \text{Presión absoluta} &= \text{presión manométrica en la tubería maestra} + \text{presión atmosférica} \\ &= 80 \text{ psi} \times 6,895 \text{ Pa/psi} + 100,000 \text{ Pa} \\ &= 551,600 + 100,000 \\ &= 651,600 \text{ Pa} \\ &= 651.6 \text{ kPa} \end{aligned}$$

*Nota:* Se requiere algún tiempo para acostumbrarse al pascal como unidad de presión. Para aquellos que están familiarizados con las libras por pulgada cuadrada (lb/in<sup>2</sup>) o las libras por pie cuadrado (lb/ft<sup>2</sup>), la conversión a pascales parece incómoda. Una relación sencilla es la siguiente: para altitudes cercanas al nivel del mar, 1 atm (14.7 lb/in<sup>2</sup>) es aproximadamente 100 kPa, que equivalen a un bar. El *bar* se emplea en Alemania y en otros países, y el *milibar* (100 Pa) es una unidad básica en meteorología (capítulo 7).

**Ejemplo 6.11**

Calcule el volumen de un tanque de gas necesario para guardar cuando menos por 7 días  $\text{CH}_4$  gaseoso producido en un proceso de digestión. La producción diaria de gas es de 500 kg; su temperatura es de  $25^\circ\text{C}$  y la presión en el tanque es de 200 kPa.

**Solución**

$$\text{Masa molecular del } \text{CH}_4 = 12 + (4 \times 1) = 16 \text{ g}$$

$$\text{Número de mol/semana} = \frac{7 \times 500 \times 1,000}{16} = 218,750$$

De la ecuación (6.41),

$$V = \frac{nRT}{P} \\ = \frac{218,750 \text{ (g mol)} \times 8.31 \text{ (J/K} \cdot \text{g mol)} \times 298 \text{ (K)}}{200,000 \text{ (Pa)}} = 2708.5 \text{ J/Pa}$$

Puesto que

$$\text{Pa} = \text{N/m}^2 = (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2)/\text{m}^2 \\ = \text{kg/m/s}^2$$

y

$$\text{J} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$$

se sigue que  $\text{J/Pa} = \text{m}^3$  y el volumen necesario del tanque =  $2708.5 \text{ m}^3$ .

**Ejemplo 6.12**

La composición del gas proveniente de la digestión anaerobia de un lodo residual es 68% de  $\text{CH}_4$ , 30% de  $\text{CO}_2$  y 2% de  $\text{H}_2\text{S}$ . Si se almacenan 1,000 kg de la mezcla de gases en un tanque a una presión de 300 kPa( $p_t$ ), calcule la presión parcial de cada componente.

**Solución** Las masas molares de los componentes son:

Para el  $\text{CH}_4$  16 g/mol

Para el  $\text{CO}_2$  44 g/mol

Para el  $\text{H}_2\text{S}$  34 g/mol

La cantidad de cada componente presente es la siguiente:

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{1000 \text{ kg} \times 1000 \text{ g/kg} \times 0.68}{16 \text{ g/mol}} = 42,500 \text{ mol}$$

$$n_{\text{CO}_2} = 6,820 \text{ mol}$$

$$n_{\text{H}_2\text{S}} = 590 \text{ mol}$$

$$\text{por tanto} \quad n_{\text{total}} = 49,910 \text{ mol}$$

Las presiones parciales son

$$P_{\text{CH}_4} = \frac{n_{\text{CH}_4}}{n_t} p_t = \frac{42,500}{49,910} \times 300 \text{ kPa} = 255 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{CO}_2} = 41 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{H}_2\text{S}} = 4 \text{ kPa}$$


---


$$P_{\text{total}} = 300 \text{ kPa}$$

### 6.4.2 Transferencia gas-líquido

**Ley de Raoult y presión de vapor.** La ley de Raoult se ocupa de la presión de vapor de una solución ideal (que se define como aquella cuyas propiedades son un promedio molar de los componentes de esa solución). La ley de Raoult establece que:

**Si una solución obedece la ley de Raoult, la presión parcial de cualquier componente dependerá, en primer término, de su volatilidad y, en segundo, de la cantidad presente en la solución. La presión de vapor del componente mide la primera propiedad, en tanto que su fracción molar mide la segunda.**

Matemáticamente, esto se expresa como

$$P_a = X_A P_A \quad (6.44)$$

en donde  $P_a$  = presión parcial del componente A en equilibrio con la solución

$P_A$  = presión de vapor de la sustancia A pura a la temperatura de la solución

$X_A$  = fracción molar del componente A en la solución

Advierta que la ley de Raoult difiere de la de Dalton. La primera permite calcular las presiones parciales de la fase gaseosa con base en la composición del líquido. La ley de Dalton, por su parte, define la presión parcial con base en la composición de la fase gaseosa, la cual puede ser muy diferente de la líquida.

La separación de componentes con diferente presión de vapor por evaporación/destilación y condensación repetidas se lleva a cabo en diversas operaciones de procesamiento de residuos industriales. Esta técnica es un ejemplo práctico de la ley de Raoult.

**Gases disueltos en líquidos: ley de Henry.** Varias situaciones que se presentan en la ciencia y la ingeniería ambientales implican la transferencia de gases, hacia adentro o hacia afuera de líquidos. Por ejemplo, en la aireación de ríos y lagos se transfiere oxígeno del aire al agua para así proveer el oxígeno disuelto indispensable para los peces y otras formas de vida acuática. La aireación de agua y de aguas residuales para eliminar gases malolientes, y la aireación de estas últimas para favorecer la oxidación biológica, son otros ejemplos.

El grado de solubilidad de un gas en un líquido depende de la clase de gas de que se trate, de la naturaleza del líquido disolvente, así como de la presión y la temperatura. En muchas

aplicaciones ambientales el líquido disolvente es agua. Entre los gases poco solubles se cuentan el  $N_2$ , el  $H_2$ , el  $O_2$  y el He. Por otra parte, el  $NH_3$ , es un gas muy soluble. La naturaleza del disolvente es importante. Por ejemplo, el  $N_2$ , el  $O_2$  y el  $CO_2$  son mucho más solubles en alcohol (etílico) que en agua, en tanto que el  $H_2S$  y el  $NH_3$  actúan de manera inversa.

Muchas soluciones que se presentan en el campo ambiental son mezclas bastante diluidas. La ley de Henry es un caso especial de la ley de Raoult aplicada a soluciones de este tipo. En las soluciones diluidas la presión parcial del soluto, presente en pequeña cantidad, puede ser diferente de la que predice la ley de Raoult, pero no dejará de ser proporcional a su fracción molar (esto es, de tener una relación lineal con ella) (Breck *et al.*, 1981).

Suponga que estamos tratando con una solución de una pequeña cantidad de un gas ideal B en un disolvente ideal A, como, por ejemplo, oxígeno disuelto en agua. La ley de Henry se expresa matemáticamente como

$$P_B = X_B K_H(A,B) \quad (6.45)$$

en donde  $P_B$  = presión parcial del soluto B en el gas

$X_B$  = fracción molar de B en la solución

$K_H(A,B) = K_H$  = constante de Henry, que depende de las propiedades del soluto B y del disolvente A

La ley de Henry suele expresarse como

$$X_B = K_H^* P_B \quad (6.46)$$

que es igual a la ecuación (6.45) excepto que  $K_H(A,B) = 1/K_H^*$ . En ocasiones se expresa como

$$C_B = K_H^{**} P_B \quad (6.47)$$

en donde  $C_B$  es la concentración del gas disuelto en el líquido en el equilibrio [en mL/L (o mg/L)] y  $K_H^{**}$  es numérica y dimensionalmente diferente de  $K_H^*$  y  $K_H(A,B)$ . Al buscar valores de la constante de Henry en los manuales, es importante saber a cuál de las tres ecuaciones se aplican los valores.

La constante de Henry depende también de la temperatura. La tabla 6-2 proporciona los valores de  $K_H$  para diversos gases de importancia en el campo ambiental; las temperaturas seleccionadas están en el intervalo que normalmente se presentan. En los manuales de ingeniería, como el Perry (1984), se encuentran valores para otros gases. Por medio de la combinación de las leyes de Dalton, de Raoult y de Henry, se pueden resolver problemas de transferencias gas-líquido en equilibrio.

Se debe advertir que la ley de Henry es una *ley de equilibrio*. Por ejemplo, permite calcular la concentración de equilibrio (saturación) de oxígeno disuelto en un río a cierta temperatura. Al recibir desperdicios orgánicos consume una parte o la totalidad del oxígeno disuelto en el agua, con lo cual se crea una concentración subsaturada. La magnitud del diferencial entre la concentración de equilibrio y la concentración real gobierna la tasa de transferencia de oxígeno del aire al agua del río. En términos matemáticos esto se expresa como

**TABLA 6-2 VALORES DE LA CONSTANTE DE HENRY  $K_H$  PARA UNA SELECCIÓN DE GASES DISUELTOS EN AGUA**  
 [para uso con la ecuación (6.45)]<sup>a</sup>

T(°C)	O <sub>2</sub>		H <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> S		CH <sub>4</sub>		CO <sub>2</sub>	
	MPa	10 <sup>4</sup> atm	MPa	10 <sup>4</sup> atm	MPa	10 <sup>4</sup> atm	MPa	10 <sup>4</sup> atm	MPa	10 <sup>4</sup> atm	MPa	10 <sup>4</sup> atm
0	2,580	2.55	5,870	5.79	5,360	5.29	27.2	0.0268	2,270	2.24	73.8	0.0728
10	3,310	3.27	6,450	6.36	6,770	6.68	37.2	0.0367	3,010	2.97	105	0.104
20	4,060	4.01	6,920	6.83	8,150	8.04	48.9	0.0483	3,810	3.76	144	0.142
30	4,810	4.75	7,390	7.29	9,365	9.24	61.7	0.0609	4,550	4.49	189	0.186
40	5,420	5.35	7,610	7.51	10,540	10.4	75.5	0.0745	5,270	5.20	236	0.233

<sup>a</sup>Ley de Henry:  $p_B = X_B K_H(A,B)$  (en atm o Pa), donde  $X_B$  es la fracción molar de B en la solución y  $K_H(A,B) = K_H$  es la constante de Henry (en atm o Pa).  
 Fuente: *National Research Council International Critical Tables*, vol. III (Nueva York: McGraw-Hill, 1929). Conversión al SI por los autores.

$$\frac{dC}{dt} \propto C \propto (C_{\text{equil}} - C_{\text{real}}) \quad (6.48)$$

La cinética de esta transferencia gas-líquido no se examina en este libro.

### Ejemplo 6-13

Calcule la cantidad de oxígeno disuelto (se abrevia OD) en mg/L presente en el agua de un río a 20°C y a 0°C en condiciones de saturación. Suponga que la presión atmosférica es de 100 kPa.

**Solución** De la tabla 6-2,

$$K_{H_{20^{\circ}\text{C}}} = 4060 \text{ MPa}$$

$$K_{H_{0^{\circ}\text{C}}} = 2580 \text{ MPa}$$

De la ecuación (6.45),

$$P_{\text{O}_2} = X_{\text{O}_2} \times K_H(\text{H}_2\text{O}, \text{O}_2)$$

De la ecuación (6.44),

$$\begin{aligned} P_{\text{O}_2} &= 0.209 \times 100 \text{ kPa, puesto que el aire contiene 20.9\% de oxígeno} \\ &= 20,900 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Por tanto,

$$\text{A } 20^{\circ}\text{C } X_{\text{O}_2} = \frac{20,900}{4060 \times 10^6} = 5.15 \times 10^{-6}$$

y

$$\text{A } 0^{\circ}\text{C } X_{\text{O}_2} = \frac{20,900}{2580 \times 10^6} = 8.10 \times 10^{-6}$$

La masa de oxígeno a cada temperatura es

$$5.15 \times 10^{-6} \text{ mol O}_2 \times 32 \text{ g/mol} = 1.65 \times 10^{-4} \text{ g a } 20^{\circ}\text{C}$$

$$8.10 \times 10^{-6} \text{ mol O}_2 \times 32 \text{ g/mol} = 2.59 \times 10^{-4} \text{ g a } 0^{\circ}\text{C}$$

La fracción de masa de O<sub>2</sub> es

$$\frac{1.65 \times 10^{-4}}{1.65 \times 10^{-4} + 18.0} = 9.2 \times 10^{-6} \text{ a } 20^{\circ}\text{C}$$

y

$$\frac{2.59 \times 10^{-4}}{2.59 \times 10^{-4} + 18.0} = 14.4 \times 10^{-6} \text{ a } 0^{\circ}\text{C}$$



Por tanto, la concentración de oxígeno disuelto a las dos temperaturas es

$$DO_{20^{\circ}\text{C}} = 9.2 \text{ mg/L (ppm)}$$

y

$$DO_{0^{\circ}\text{C}} = 14.4 \text{ mg/L (ppm)}$$

Observe que el oxígeno es un gas bastante insoluble y que un aumento de temperatura reduce su solubilidad en agua.

## 6.5 BALANCES DE MATERIA

### 6.5.1 Concepto de balance de materia

Al caer la lluvia, parte del agua se evapora directamente en la atmósfera; otra lo hace desde la superficie del suelo y del agua que regresa hacia la atmósfera; una porción la absorberán los vegetales retornándola a la atmósfera mediante la transpiración; finalmente, el resto escurre directamente a los ríos y lagos o se filtra hacia las aguas subterráneas para, más adelante, juntarse con el agua superficial. Este sistema de agua se conoce como *ciclo hidrológico*. La figura 6-10a presenta un esquema simplificado de este ciclo para una pequeña región que presenta un terreno y un lago. Se identifican varios "sistemas" individuales: (1) las nubes atmosféricas sobre (a) el lago, (b) el terreno y (c) ambos; (2) el terreno; (3) el lago; y (4) el sistema entero. Un examen de la figura 6-10b muestra que las cantidades de agua que atraviesan los límites de cada subsistema se balancean. (Véase en la figura 7-13 un balance de agua similar de carácter global.)

Este ejemplo ilustra la ley de la conservación de la materia. En química, los científicos han encontrado que la suma de los pesos de las sustancias que participan en una reacción siempre es igual a la suma de los pesos de los productos. El concepto general de la ley de la conservación de la materia se ilustra con tres ecuaciones aplicables a un sistema aislado y cerrado. En primer término

$$\text{entrada} = \text{salida} \quad (6.49)$$

dicho de forma sencilla, "lo que entra debe salir".

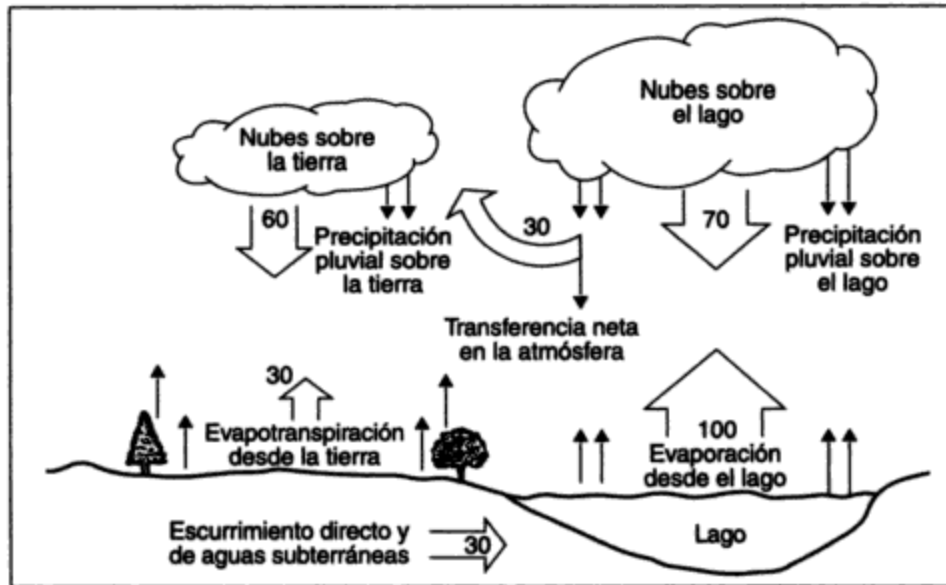
Si el material se acumula dentro del sistema, entonces

$$\text{acumulación} = \text{entrada} - \text{salida} \quad (6.50)$$

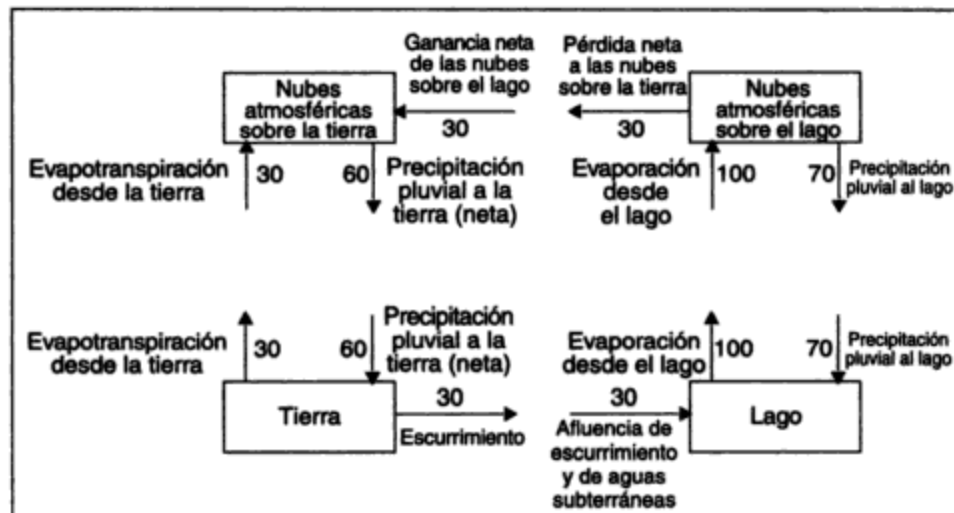
Además, si se produce o se consume material dentro del sistema, el caso más general puede describirse como

$$\begin{aligned} (\text{velocidad de}) \text{acumulación} &= (\text{velocidad de}) \text{entrada} - (\text{velocidad de}) \\ &\text{salida} + (\text{velocidad de}) \text{producción} - (\text{velocidad de}) \text{consumo} \end{aligned} \quad (6.51)$$

en donde el término (velocidad de) hace referencia a los cambios con respecto al tiempo, por lo que son llamados gastos, o velocidades de producción y velocidades de consumo;



(a)



(b)

**Figura 6-10** Ciclo hidrológico en una pequeña región de tierra con lago: (a) esquema del ciclo hidrológico; (b) balance de materia sobre el ciclo hidrológico.

y por consiguiente, velocidades de acumulación (Bird *et al.*, 1960). Los *balances de materia*, generalmente designados como *balances de masa*, son muy útiles para examinar un proceso o partes de él; se emplean bastante en ingeniería química y también son muy útiles en el campo ambiental. Los balances de materia sirven para comprobar las mediciones de aquellas corrientes difíciles, o imposibles, de medir directamente; también ayudan en el diseño de procesos para incluir todos los materiales, tanto de producción como de consumo (inclusive los residuales). Cuando en un sistema no existe acumulación, se tiene un **estado estacionario**. En el **estado no estacionario**, la velocidad de acumulación cambia con el tiempo. El vaciado o

el llenado de un tanque de almacenamiento sería un ejemplo de un balance de materia no estacionario. Los siguientes ejemplos ilustrativos muestran aplicaciones de balances de un solo material.

**Ejemplo 6.14: Sedimentación de sólidos en suspensión de aguas residuales**

Un tanque de sedimentación se utiliza para separar los sólidos en suspensión de aguas residuales. El caudal de aguas residuales que entra al tanque es de 10 L/s, y la concentración de sólidos suspendidos (SS) en el afluente es de 200 mg/L. La eficiencia de separación de los sólidos suspendidos en el tanque es de 60%. Calcule la cantidad de sólidos suspendidos (lodos) que se acumulan diariamente en la zona de sedimentos.

**Solución** Será de utilidad dibujar un diagrama del proceso y marcar en él los datos conocidos y la incógnita, que se identifica por medio de un signo de interrogación (figura 6-11).



Corte longitudinal

Figura 6-11

Ahora, si hay más de un sistema, dibuje los límites apropiados de cada uno. En este caso, el límite se encuentra alrededor de la zona de sedimentación. Para resolver el problema se deben hacer las suposiciones necesarias. Un supuesto razonable es que la cantidad de agua que se extrae cuando se saca por bombeo el lodo de la zona de sedimentos es muy pequeña en comparación con la afluencia de aguas residuales, y por tanto se puede despreciar. Por consiguiente,  $Q_e = Q_i$ .

La concentración  $C_e$  se calcula fácilmente:

$$C_e = C_i \times \frac{100 - (\text{eficiencia de separación})}{100} = 200 \left( \frac{100 - 60}{100} \right)$$

$$= 200 \times 0.40 = 80 \text{ mg/L}$$

El material por balancear en este caso es la masa de los sólidos suspendidos. No hay acumulación de estos sólidos en la zona de sedimentación, que es el sistema alrededor del cual hemos dibujado el límite. Tampoco existe consumo de sólidos suspendidos dentro de la zona de sedimentación. Por tanto, la ecuación (6.49) es aplicable y tenemos que:

Balance de sólidos : entrada = salida en el efluente + salida a zona de sedimentos

o

$$\text{salida a zona de sedimentos} = \text{entrada} - \text{salida en el efluente}$$

En la resolución de problemas de balance de materia es conveniente emplear un intervalo de tiempo fijo o una cantidad supuesta de materiales como base para los cálculos. Para estos problemas de flujo, un día es un periodo razonable. Obtenemos

$$\begin{aligned} \text{entrada de SS} &= 10 \text{ L/s} \times 60 \text{ s/min} \times 60 \text{ min/h} \times 24 \text{ h/día} \times 200 \text{ mg/L} \times 10^{-6} \text{ kg/mg} \\ &= 172.8 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

De manera similar,

$$\text{salida de SS en el efluente} = 69.1 \text{ kg/día}$$

Por tanto,

$$\text{salida a zona de sedimentos} = 172.8 - 69.1 = 103.7 \text{ kg/día}$$

#### Ejemplo 6.15: Dilución

Una industria descarga sus residuos líquidos en un río que tiene un caudal mínimo de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . El contaminante principal depositado es un material orgánico no reactivo llamado *P*. La corriente residual tiene un gasto de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , y la concentración de *P* en la corriente residual es de  $3,000 \text{ mg/L}$ . La contaminación corriente arriba ha causado una concentración de  $20 \text{ mg/L}$  de *P* en las condiciones de caudal mínimo. El organismo regulador estatal ha fijado un límite máximo de  $100 \text{ mg/L}$  de *P* en el río. Suponga que en el río se produce un mezclado total. ¿Podrá la industria descargar sus residuos sin tratamiento?

**Solución** La figura 6-12 presenta un diagrama del proceso para las condiciones de flujo mínimo en el río.

Un balance de materia sobre *P* para un intervalo de 1 segundo es,

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

o

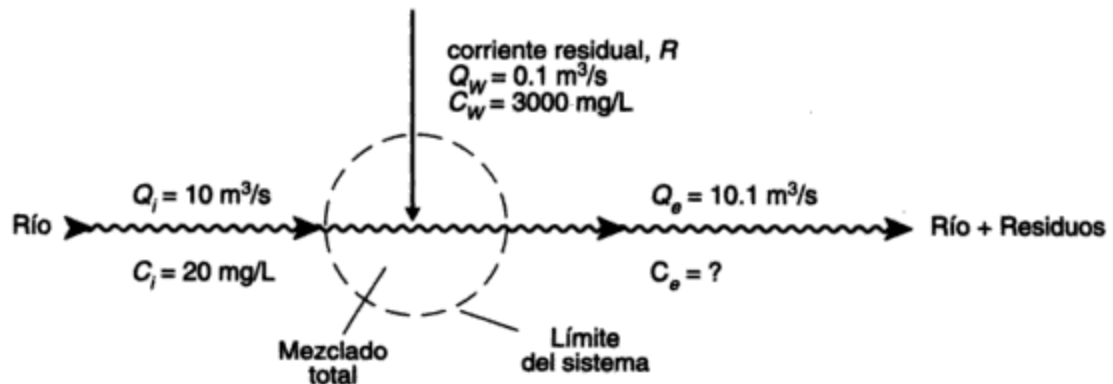


Figura 6-12

$$\text{entrada}_{\text{río corriente arriba}} + \text{entrada}_{\text{residuos}} = \text{salida}_{\text{río corriente abajo}}$$

$$\begin{aligned} 10 \text{ m}^3 \times 10^3 \text{ L/m}^3 \times 20 \text{ mg/L} + 0.1 \text{ m}^3 \times 10^3 \text{ L/m}^3 \times 3000 \text{ mg/L} \\ = 10.1 \text{ m}^3 \times 10^3 \text{ L/m}^3 \times C_e \text{ mg/L} \end{aligned}$$

de modo que

$$200 + 300 = 10.1 C_e$$

o

$$C_e = \frac{500}{10.1} = 49.5 \text{ mg/L}$$

Por consiguiente, no se requiere tratamiento.

### 6.5.2 Pautas para hacer balances de materia

Las siguientes son unas cuantas pautas generales para la resolución de problemas (adaptado de Himmelblau, 1982):

1. Dibuje un esquema o diagrama de flujo del proceso.
2. Calcule sin hacer balances todos los pesos, gastos, concentraciones, etcétera, que sea posible determinar con base en la información que se suministra.
3. Muestre todos los datos conocidos (gastos, concentraciones, etc.) en el diagrama.
4. Asigne símbolos apropiados a las cantidades desconocidas, e indique las incógnitas con signos de interrogación.
5. Seleccione una base conveniente para llevar a cabo todos los cálculos; por ejemplo, un intervalo apropiado, como un día o un segundo; o una cantidad fija de material, como 100 kg o 1 lb.
6. Seleccione los límites de sistema idóneos para el balance o balances de materia por hacer. Elija los límites de tal manera que los cálculos sean lo más sencillos posible.
7. Escriba los balances de materia. Éstos pueden incluir un balance total o uno para cada uno de los materiales componentes que intervienen en el problema. El álgebra nos dice que debemos tener tantas ecuaciones independientes como incógnitas.
8. Haga las suposiciones necesarias para simplificar el problema. Se requiere experiencia para hacer esto de manera razonable.

Los ejemplos siguientes proporcionan práctica en la resolución de problemas. Al final del capítulo se incluyen problemas adicionales sobre balances de materia, y varios más se presentan en capítulos posteriores en los puntos pertinentes.

### 6.5.3 Ejemplos de balances de materia

#### Ejemplo 6.16

El lodo extraído de la zona de sedimentos del tanque de sedimentación del ejemplo 6.14 tiene una concentración de sólidos del 3%. Para que el sedimento pueda quemarse en un incinerador es necesario desecarlo. Esto se hace por medio de un espesador (o condensador) capaz de alcanzar una concentración en el flujo de descarga de 8%, después el lodo se concentra aún más en un filtro al vacío que extrae el 75% del agua de la corriente de alimentación. La densidad del lodo húmedo es aproximadamente igual a la del agua. Calcule (a) el gasto de lodo espesado que debe manejar el filtro al vacío, y (b) la composición de la torta producida por el filtro al vacío.

**Solución** El proceso puede separarse en sus dos componentes para dibujar un diagrama que muestre todos los datos y los límites de los sistemas (figura 6-13).

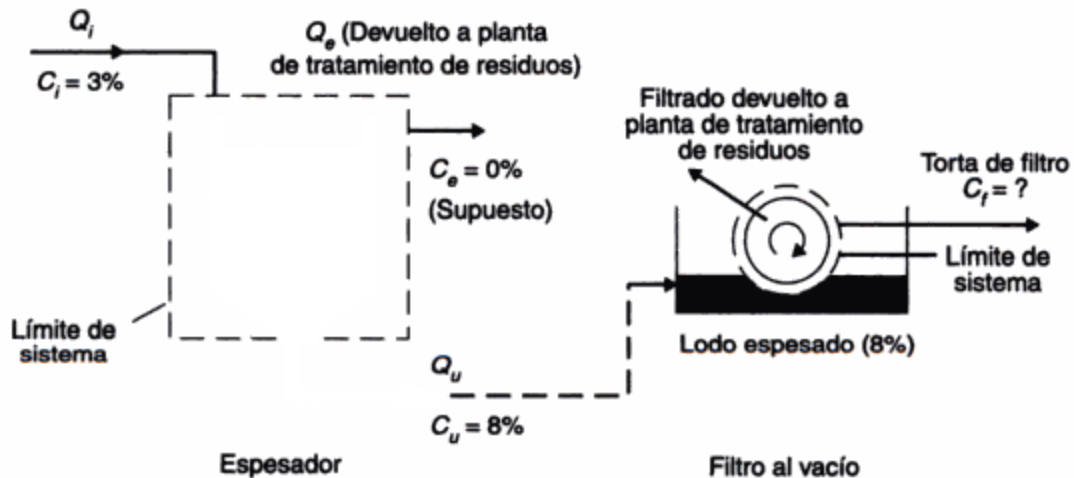


Figure 6-13

(a) **Espesador.** El gasto  $Q_i$  asociado con la extracción de 103.7 kg de sólidos a una concentración de 3% es

$$Q_i = \frac{103.7 \text{ kg/día} \times 10^6 \text{ mg/kg}}{86,400 \text{ s/día} \times 30,000 \text{ mg/L}}$$

$$= 0.040 \text{ L/s}$$

$Q_i$  es, por tanto, el 0.4% del afluente hacia el tanque de sedimentación (10 L/s), lo cual demuestra que la suposición que se hizo en el ejemplo 6.14 respecto a que  $Q_e = Q_i$  fue razonable. De forma similar,

$$Q_u = \frac{103.7 \text{ kg/día} \times 10^6 \text{ mg/kg}}{86,400 \text{ s/día} \times 80,000 \text{ mg/L}}$$

$$= 0.015 \text{ L/s}$$

Hemos supuesto que todos los sólidos se sedimentan en el fondo del espesador, y por tanto la concentración en el efluente  $C_e \approx 0$ . Ésta puede ser una suposición incorrecta, pero sin

duda  $C_e \ll C_u$ . Por consiguiente, esta parte de la pregunta se puede responder sin hacer un balance de materia.

(b) **Filtro al vacío.** Considere 1 kg de lodo espesado como base para el cálculo. Suponga que la cantidad de sólidos en el filtrado es insignificante. La composición de las tres corrientes se muestra en los rectángulos de la figura 6-14.

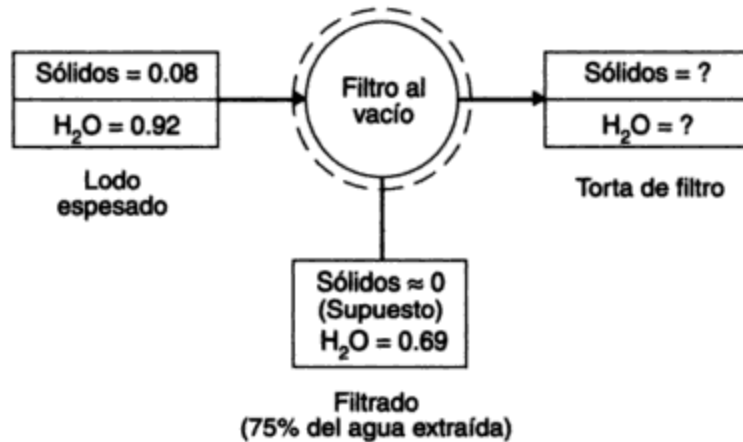


Figura 6-14

Tenemos que

$$H_2O \text{ extraída} = 0.75 \times 0.92 = 0.69 \text{ kg/kg de lodo espesado}$$

La cantidad final de sólidos en la torta de filtro es de 0.08 kg, y el agua asociada a la misma es

$$\text{entrada} - \text{extracción} = \text{resto}$$

$$0.92 - 0.69 = 0.23 \text{ kg } H_2O$$

La composición de la torta de filtro es la siguiente:

	kg	%
Sólidos	0.08	25.8
H <sub>2</sub> O	0.23	74.2
Total	0.31	100.0

Observe que, aunque la torta contiene todavía alrededor de 75% de agua, tiene la consistencia de un trozo de fieltro húmedo y no se puede bombear; por consiguiente, se lleva por medio de una banda transportadora a un área de almacenamiento/carga.

**Ejemplo 6.17: Secado de sedimentos**

La torta de filtro del ejemplo 6.16 se alimenta a un horno secador giratorio. Después de que se han eliminado 500 kg de agua en la operación de secado, se determina que el lodo seco contiene 30% de agua. ¿Cuál es el peso de la torta de filtro que se alimentó al secador?

**Solución** En la figura 6-15 se muestra un diagrama del proceso.

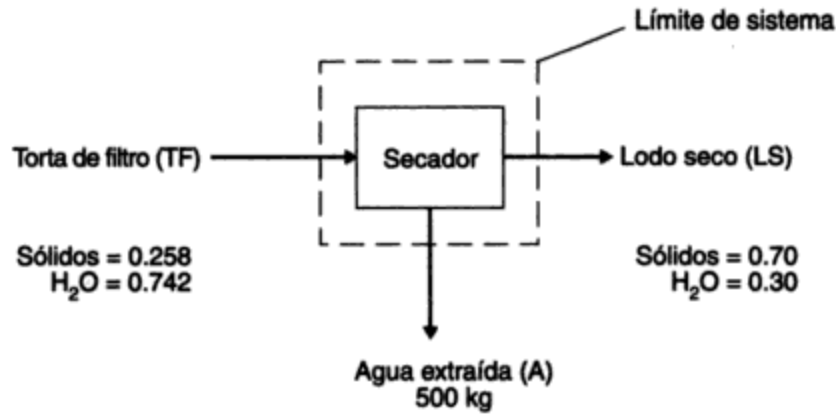


Figura 6-15

Tome los 500 kg de agua eliminados como base para el cálculo. El balance total de materia (sólidos y agua) está dado entonces por

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

$$TF = LS + A = LS + 500 \text{ kg}$$

El balance de sólidos es

$$0.258 TF = 0.70 LS$$

o

$$LS = \frac{0.258}{0.70} TF = 0.369 TF$$

Sustituyendo en el balance total de materia se obtiene

$$TF = 0.369 TF + 500 \text{ kg}$$

$$0.631 TF = 500$$

$$TF = \frac{500}{0.631} = 792 \text{ kg}$$

$$LS = 292 \text{ kg}$$

### Ejemplo 6.18: Mezclado con acumulación\*

Un tanque de mezclado contiene 30 ft<sup>3</sup> de agua. Una corriente residual que contiene 2 lb/ft<sup>3</sup> del contaminante A fluye hacia el tanque con un gasto de 3 ft<sup>3</sup>/min. El líquido sale del tanque a una velocidad de 1 ft<sup>3</sup>/min. Suponga que el contenido del tanque se mezcla totalmente (esto es, las concentraciones del contaminante A en el efluente y en el tanque son iguales). Calcule la concentración de A en el efluente cuando el tanque contiene 50 ft<sup>3</sup> de solución. Suponga que el contaminante no es reactivo.

\* Adaptado de un problema similar por V. G. Jenson y G. V. Jeffreys, *Mathematical Methods in Chemical Engineering* (Nueva York: Academic Press, 1963), pág. 11.



**Solución** Este problema implica la acumulación de agua y de contaminante A en el tanque. Se elabora un diagrama del proceso en que se muestran todos los datos (figura 6-16). Se trata de un caso no estacionario.

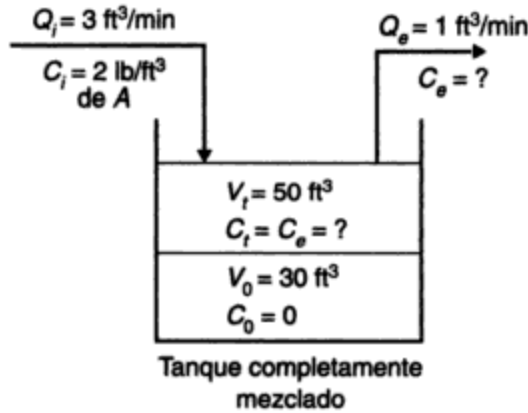


Figura 6-16

**Acumulación de agua.** La velocidad de acumulación de líquido en el tanque es

$$Q_i - Q_e = 3 - 1 = 2 \text{ ft}^3/\text{min}$$

por tanto, el tiempo para alcanzar  $V_t = 50 \text{ ft}^3$  es

$$t = \frac{V_t - V_0}{Q_i - Q_e} = \frac{50 - 30}{2} = 10 \text{ min}$$

**Acumulación de contaminante A.** Inicialmente, no hay contaminante A en el tanque, de modo que  $C_0 = 0$ . Después de 10 min, la concentración incógnita de A está dada por  $C_{10} = C_e$ . Suponga que se produce una variación lineal de la concentración de A con el tiempo. Entonces se puede hacer un balance de materia sobre A en el periodo de 10 min:

$$\text{entrada} - \text{salida} = \text{acumulación}$$

$$(Q_i \times t) C_i - (Q_e t) \frac{C_{10} - C_0}{2} = V_{10} \times C_{10}$$

$$(3 \times 10) \times 2 - (1 \times 10) \frac{C_{10} - 0}{2} = 50 \times C_{10}$$

$$60 - 5C_{10} = 50 \times C_{10}$$

$$C_{10} = \frac{60}{55} = 1.09 \text{ lb/ft}^3$$

Se puede hacer un tratamiento más detallado, sin suponer un aumento lineal de la concentración de A, como sigue. Sean el volumen  $V$  ( $\text{ft}^3$ ) y la concentración de contaminante en el efluente/tanque,  $C_e$  ( $\text{lb/ft}^3$ ) funciones del tiempo,  $t$  (min). Se hace una enumeración sistemática de todas las propiedades del sistema en los tiempos  $t$  y  $t + dt$  de esta manera:

(1) Propiedades del sistema	En $t$ :	
Velocidad de entrada de A (ft <sup>3</sup> /min)	= $Q_0$	= 3
Concentración de entrada de A (lb/ft <sup>3</sup> )	= $C_0$	= 2
Velocidad de salida de solución (ft <sup>3</sup> /min)	= $Q_e$	= 1
Concentración de salida de A (lb/ft <sup>3</sup> )	= $C_e$	= $f(t)$
Volumen de líquido en el tanque (ft <sup>3</sup> )	= $V$	= $f(t)$
Contenido de A en el tanque (lb)	= $VC_e$	= $f(t)$

Balance de volumen a lo largo del intervalo de tiempo  $dt$ :

entrada - salida = acumulación

$$3dt - 1dt = \frac{dV}{dt} dt$$

o

$$\frac{dV}{dt} = 2$$

Balance del contaminante A en el intervalo de tiempo  $dt$ :

entrada - salida = acumulación

$$3 \times 2dt - 1C_e dt = \frac{d(VC_e)}{dt} dt$$

Simplificando

$$6 - C_e = C_e \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_e}{dt}$$

Sustituyendo  $dV/dt = 2$  y  $V = 30 + 2t$  y reordenando se obtiene

$$\frac{dC_e}{6 - 3C_e} = \frac{dt}{30 + 2t}$$

El resultado de la integración es

$$-\frac{1}{3} \ln(6 - 3C_e) = \frac{1}{2} \ln(30 + 2t) + I$$

en donde  $I$  es la constante de integración.

Ahora sabemos que en  $t = 0$ ,  $C_e = 0$ ; por tanto,

$$-\frac{1}{3} \ln 6 = \frac{1}{2} \ln 30 + I$$

de donde

$$I = -\frac{1}{3} \ln 6 - \frac{1}{2} \ln 30$$

Sustituyendo y combinando, encontramos que

$$-\frac{2}{3} \ln(1 - 0.5C_e) = \ln(1 + 0.067t)$$

$$1 - 0.5C_e = (1 + 0.067t)^{-3/2}$$

$$C_e = 2 - 2(1 + 0.067t)^{-3/2}$$

Observe que el supuesto de un aumento lineal de la concentración de contaminante A no es del todo correcto, puesto que, para  $t = 10$  min,  $C_e = 2 - 2 \times 1.67^{-3/2} = 1.07$  lb/ft<sup>3</sup>. Que se justifique o no el supuesto de un comportamiento lineal depende de la exactitud de los datos y del uso que se dará a los resultados. En muchos casos, los problemas complejos se simplifican considerablemente haciendo ciertas suposiciones. La decisión de seguir este camino y cuáles suposiciones hacer depende de la experiencia del ingeniero o el científico.

En los ejemplos de balances de materia presentados hasta el momento no ha habido producción ni consumo de contaminantes. En la práctica, muchos contaminantes sufren cambios en el medio con una rapidez que se describe por medio de una ecuación de velocidad. Este tema se presenta en la sección 6.6, en donde se ilustra un problema de balance de materia con reacción química.

## 6.6 CINÉTICA DE REACCIÓN Y REACTORES

### 6.6.1 Cinética de reacción

No todas las reacciones químicas alcanzan el equilibrio con rapidez. Aquellas que dependen del tiempo se conocen como **reacciones cinéticas**. En el campo ambiental son muchos los casos de este tipo. Algunos ejemplos son los siguientes:

- La eliminación de materia orgánica del agua
- El crecimiento de masas biológicas
- La desintegración radiactiva
- La desinfección química
- La transferencia gas/agua
- Las reacciones de los residuos industriales

La **cinética de reacción** se define como el estudio de los efectos de la temperatura, la presión y la concentración en la velocidad de una reacción química. La breve introducción a la cinética de reacción que se presenta aquí se puede complementar consultando la referencia de Levenspiel (1972) u otros textos similares.

La **velocidad de reacción**,  $r_i$ , es un término que se emplea para describir la rapidez de formación o desaparición de una sustancia (o especie química). Las reacciones como la oxidación biológica y la desinfección, que se producen en una sola fase (líquida, sólida o gaseosa), se llaman *reacciones homogéneas*. Las que se llevan a cabo en las superficies entre fases (la interfaz sólido/agua o aire/agua), como el intercambio de iones y la adsorción, se denominan *reacciones heterogéneas*. Existen clasificaciones intermedias entre sistemas homogéneos y heterogéneos y aquellos donde un catalizador afecta la velocidad; sin embargo, las reacciones homogéneas son las más comunes y aquí pondremos énfasis en ellas.

Para reacciones homogéneas,

$$r_i = \frac{\text{moles (o masa)}}{\text{superficie unitaria} \times \text{tiempo unitario}} \quad (6.52)$$

Para reacciones heterogéneas

$$r_i = \frac{\text{moles (o masa)}}{\text{superficie unitaria} \times \text{tiempo unitario}} \quad (6.53)$$

Por convención, el signo es positivo (+) para la formación de una sustancia y negativo (-) para su desaparición. La velocidad con la cual estas reacciones se llevan a cabo es una función ( $f$ ) de la temperatura ( $T$ ) y de la presión ( $P$ ), y también de la concentración de los reactivos. La relación de velocidad es, por tanto,

$$r_i = f(T, P, [A], [B], \dots) \quad (6.54)$$

Por lo general, los efectos de la temperatura ( $T$ ) y de la presión ( $P$ ) se separan de los efectos de la concentración; por consiguiente,

$$r_i = k f_1(T, P); f_2([A], [B], \dots) \quad (6.55)$$

en donde  $k$  es la constante de velocidad, que normalmente es función sólo de la temperatura, y  $f_1$  y  $f_2$  significan "función de ( $\cdot$ )".

Suponiendo que la presión y la temperatura se mantienen constantes, podemos examinar cómo afecta la concentración de uno o más de los reactivos la velocidad de reacción. Para la ecuación estequiométrica



en donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los coeficientes estequiométricos de la ecuación para los reactivos A y B y el producto C; la ecuación de velocidad es

$$r_A = -k[A]^\alpha[B]^\beta = k[C]^\gamma \quad (6.57)$$

en donde  $[A]$ ,  $[B]$  y  $[C]$  son las concentraciones respectivas y  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son exponentes determinados empíricamente. El signo negativo indica que A y B desaparecen al tiempo que C aumenta.

El **orden de reacción** se define como la suma de los exponentes determinados empíricamente  $\alpha + \beta$ , y el orden con respecto al reactivo A es  $\alpha$ , al B es  $\beta$ , y al producto C es  $\gamma$ . Los exponentes suelen ser números enteros (por ejemplo, 0, 1, 2, etc.), pero se presentan también exponentes fraccionarios. En muchos casos las reacciones son de orden cero, de primer orden o de segundo orden. Esto matemáticamente se expresa como sigue:

$$r_A = -k \quad \text{reacción de orden cero} \quad (6.58)$$

$$r_A = -k[A] \quad \text{reacción de primer orden} \quad (6.59)$$

$$r_A = -k[A^2] \quad \text{reacción de segundo orden} \quad (6.60)$$

$$r_A = -k[A][B] \quad \text{reacción de segundo orden} \quad (6.61)$$

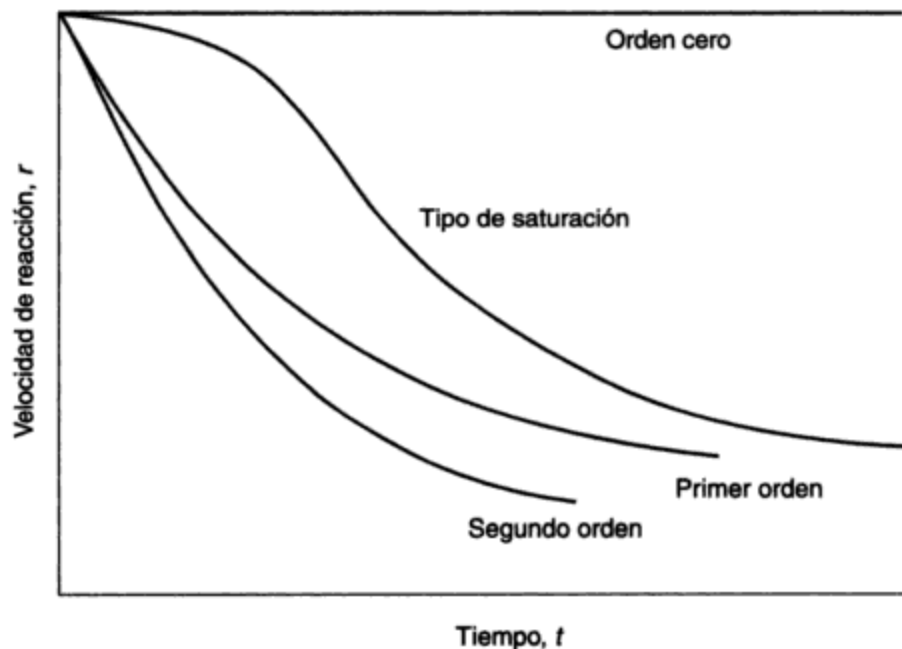
Un ejemplo más complejo es el siguiente:

$$r_A = \frac{-k[A]}{1 + k'[A]} \quad (6.62)$$

- A una baja concentración de A (al final de la reacción),  $k'[A] \ll 1$ ; la reacción se reduce a primer orden.
- Con una alta concentración de A (al principio de la reacción),  $k'[A] \gg 1$ ; la reacción se reduce a orden cero.

La ecuación (6.62) es un ejemplo de una **reacción de saturación**, algo muy común en los problemas ambientales. Este tipo de reacción tiene una velocidad máxima cerca del inicio de la reacción, cuando la velocidad es independiente de la concentración del reactivo o reactivos; después disminuye conforme un reactivo se hace limitante.

La figura 6-17 es una representación gráfica que muestra cómo varía la velocidad de reacción  $r(d[A]/dt)$  con el tiempo para diferentes órdenes de reacción.



**Figura 6-17** Representación gráfica de las ecuaciones de velocidad.

**Tipos de reacciones.** Las **reacciones elementales** se definen como aquellas que se verifican en una sola etapa y donde la ecuación estequiométrica representa no sólo un balance de masa, sino también lo que sucede en realidad a escala molecular. En estos casos,  $a = \alpha$ ,  $b = \beta$  y  $c = \gamma$ , y la ecuación de velocidad se puede escribir con base en la estequiometría. Para la reacción elemental de la ecuación (6.56), la ecuación de velocidad es

$$r = -k[A]^a [B]^b = k[C]^c \quad (6.63)$$

y la velocidad de reacción global (velocidades  $r_A$ ,  $r_B$  y  $r_C$  para los reactivos A y B y el producto C) es

$$r = \frac{r_A}{a} = \frac{r_B}{b} = \frac{r_C}{c} \quad (6.64)$$

En el caso de las reacciones no elementales no hay una relación directa entre la ecuación estequiométrica y la velocidad de reacción. Se supone que se verifica una serie de reacciones elementales y, en consecuencia, es necesario determinar experimentalmente las constantes de velocidad.

Las reacciones elementales en el campo ambiental pueden ser únicas, como en



o múltiples, como en



y ambos pueden ser reversibles. Por ejemplo, para la reacción elemental, múltiple e irreversible



las velocidades de reacción son

$$r_1 = \frac{r_A}{a} = \frac{r_{B1}}{b} \quad (6.68a)$$

$$r_2 = \frac{r_{B2}}{b} = \frac{r_C}{c} \quad (6.68b)$$

y

$$r_A = ar_1 \quad (6.69a)$$

$$r_B = br_1 + br_2 \quad (6.69b)$$

$$r_C = cr_2 \quad (6.69c)$$

### Ejemplo 6.19

- (a) Una reacción tiene la ecuación estequiométrica  $A \rightarrow C + D$ . ¿Cuál es el orden de la reacción?
- (b) Si se sabe que la reacción es elemental e irreversible, ¿cuál es el orden de la reacción con respecto a A?

### Solución

- (a) La pregunta no se puede responder, porque no se indica si la reacción es elemental e irreversible.
- (b)  $r_A = -k[A]$ . Por consiguiente, la reacción es de primer orden.

**Ejemplo 6.20**

Una reacción elemental irreversible tiene la ecuación estequiométrica  $2A + \frac{1}{2} B \rightarrow C$ . Calcule las velocidades de formación y de desaparición de los tres componentes de la reacción y la relación entre los mismos.

**Solución**

$$r_A = -k_1[A]^2[B]^{1/2}$$

$$r_B = -k_2[A]^2[B]^{1/2}$$

$$r_C = +k_3[A]^2[B]^{1/2}$$

Por la estequiometría sabemos que

$$\frac{r_A}{-2} = \frac{r_B}{-\frac{1}{2}} = \frac{r_C}{+1}$$

Por tanto,

$$r_C = -\frac{1}{2} r_A = -2r_B$$

o

$$k_3 = \frac{k_1}{2} = 2k_2$$

**Efecto de la temperatura en la constante de velocidad de reacción.** Se ha determinado de forma experimental que casi todas las velocidades de reacción aumentan con la temperatura, como se muestra en la figura 6-18a, donde la velocidad se duplica (aproximadamente) por cada incremento de  $10^\circ\text{C}$  en la temperatura. Una gráfica de  $\ln k$  en función de  $1/T$  [figura 6-18(b)] proporciona una línea recta y un medio para predecir velocidades de reacción a diferentes temperaturas. Por consiguiente,

$$\frac{d(\ln k)}{d(1/T)} = \text{constante (pendiente de la curva)} = -\frac{E_a}{R} \quad (6.70)$$

en donde  $E_a$  = energía de activación de Arrhenius

$R$  = constante universal de los gases

$T$  = temperatura (K)

$k$  = constante de velocidad de reacción (diversas unidades)

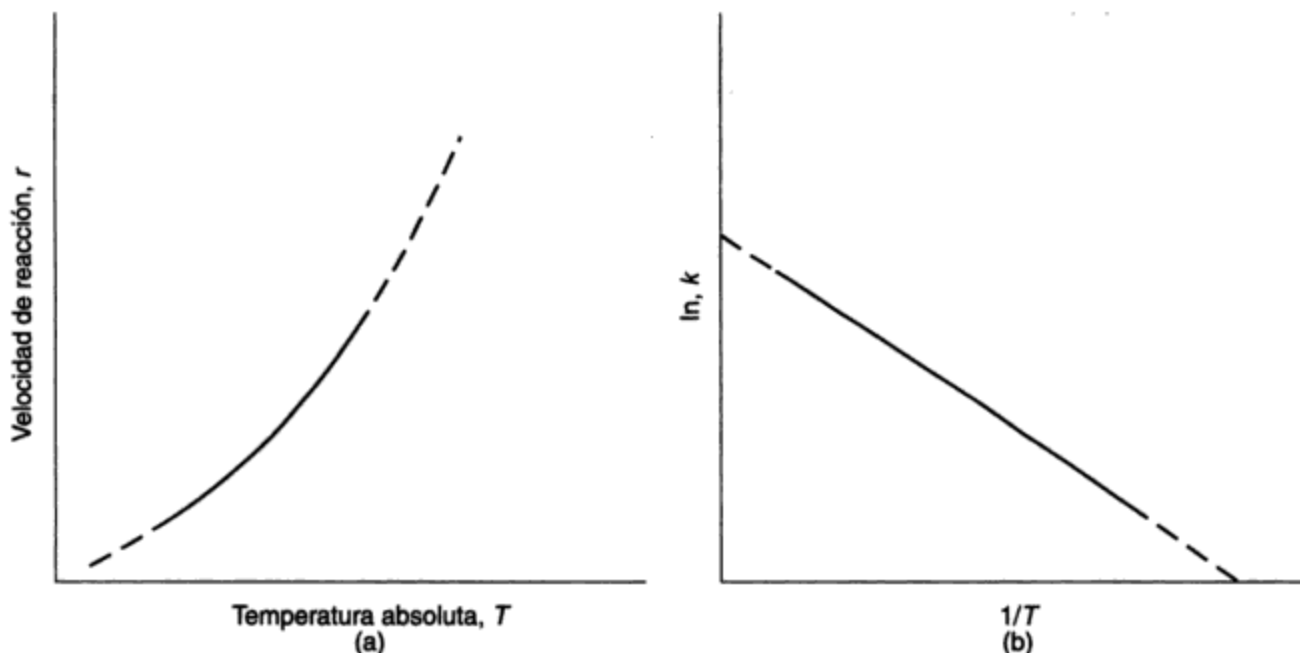
Es necesario que  $E_a$  y  $R$  tengan unidades consistentes.

La integración de la ecuación (6.70) da

$$k = Ae^{(-E_a/RT)} \quad (6.71)$$

donde  $A$  es el coeficiente de van't Hoff-Arrhenius, en las unidades apropiadas.

La ecuación (6.71) se conoce como la **ecuación de Arrhenius de dependencia térmica**. Suele ser conveniente reordenarla como



**Figura 6-18** Efecto de la temperatura en la constante de velocidad de reacción: (a) velocidad de reacción en función de la temperatura absoluta; (b) logaritmo natural de la constante de velocidad de reacción en función del recíproco de la temperatura absoluta.

$$\frac{k_2}{k_1} = (e^{Ea/RT_1 T_2})^{T_2 - T_1} \quad (6.72)$$

para facilitar la comparación de las constantes de velocidad de reacción a dos temperaturas. En ingeniería ambiental el intervalo de temperaturas casi siempre es pequeño, de modo que el producto  $T_2 T_1$  aproximadamente es constante.

Sea  $e^{Ea/RT_1 T_2} = \theta$ , en donde  $\theta$  es el coeficiente de temperatura. La ecuación (6.72) se puede reordenar entonces para dar

$$k_2 = k_1 \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (6.73)$$

La ecuación (6.73) con frecuencia se usa tanto en reacciones bioquímicas como fisicoquímicas para calcular fácilmente los efectos de la temperatura siempre y cuando se disponga de información respecto a  $\theta$ .

### Ejemplo 6.21

La rapidez de crecimiento de un sistema bioquímico a una temperatura de 20°C tiene la constante de velocidad de reacción  $k_{20}$ . Calcule la velocidad de reacción a 30°C si el coeficiente de temperatura  $\theta = 1.072$ .

**Solución** De la ecuación (6.73),  $k_{30} = k_{20} \times 1.072^{(30-20)} = 2k_{20}$ , es decir, la velocidad se duplica con un aumento de temperatura de 10°C.



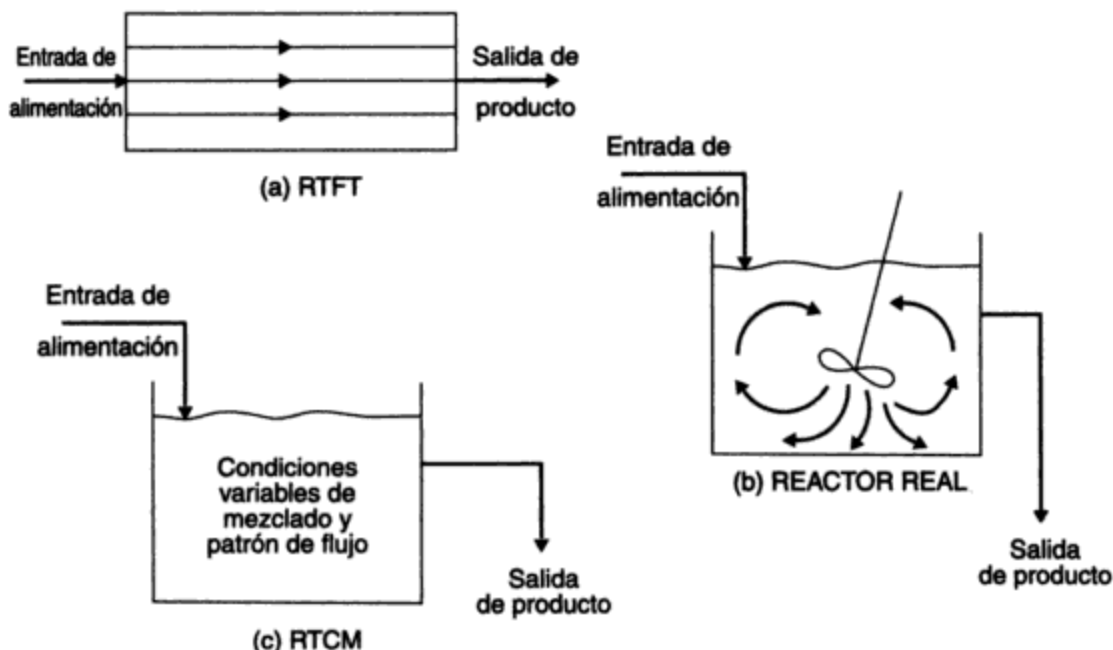
### 6.6.2 Tipos de reactores

En el campo de la ingeniería ambiental se utilizan diversos métodos físicos (sedimentación, filtración, igualación, etc.), químicos (precipitación, coagulación, ablandamiento, etc.) y bioquímicos (lodos activados, digestión anaerobia, etc.), así como de tratamiento, generalmente efectuados dentro de un tanque. Cuando una reacción de naturaleza química o bioquímica se verifica en un tanque, éste se describe por lo común como un *reactor*.

De manera general los reactores se dividen en dos tipos: **reactores intermitentes** y **reactores de flujo**. En el primero, los materiales se adicionan al tanque, se mezclan perfectamente, y se dejan el tiempo suficiente para que la reacción se lleve a cabo. Al final del tiempo establecido, la mezcla se saca del tanque. Como el material normalmente está bien mezclado, la composición dentro del reactor es uniforme en cualquier instante. Sin embargo, a medida que la reacción avanza, la composición cambia. Una **reacción intermitente** se describe por tanto como una *operación en estado no estacionario*.

En un **reactor de flujo**, el material entra al reactor, lo atraviesa y sale de él. De acuerdo con las condiciones de mezclado y los patrones de flujo dentro del tanque, hablamos de *reactores ideales* y *reales*. La figura 6-19 muestra el espectro de reactores de flujo, con un reactor ideal en cada extremo. El reactor ideal de la parte (a) se designa como **reactor tubular de flujo de tapón (RTFT)**, o simplemente como *reactor de flujo de tapón*, *flujo de pistón* o *flujo tubular*. El patrón de flujo dentro del tanque se caracteriza como *uniforme*. Esto es, las partículas fluidas pasan a través del tanque y se descargan con la misma secuencia que entraron al tanque. Las partículas permanecen en el tanque durante un periodo igual al tiempo de retención teórico. La situación es equivalente a forzar un fluido a pasar por un tubo largo, como cuando el agua fluye en una manguera de jardín. El fluido no se mezcla en sentido longitudinal, aunque puede haber o no cierto mezclado lateral. La operación puede ser estacionaria, si el gasto es constante con el tiempo, o no estacionaria cuando cambia con el tiempo. En el otro extremo del espectro de los reactores de flujo (figura 6-19c) está el llamado **reactor de tanque completamente mezclado (RTCM)**, o simplemente *tanque agitado* o *reactor de contramezcla*. Este tipo de reactor tiene como característica que el contenido del tanque se mezcla de manera tan completa que la composición es uniforme. Por consiguiente, la composición del efluente es igual a la del líquido del tanque. Los reactores de flujo reales tienen condiciones de mezclado (y por tanto patrones de flujo) comprendidas entre el RTFT (ningún mezclado) y el RTCM (mezclado total). Ciertos reactores de flujo reales se aproximan a uno u otro. En otros casos es necesario aplicar factores de corrección a las soluciones obtenidas para las reacciones que se verifican en reactores ideales, más fáciles de obtener que las correspondientes a reactores reales.

En la tabla 6-3 se hace una comparación de los reactores intermitentes, RTFT y RTCM. En una operación industrial que genera diversos productos residuales en cantidad relativamente pequeña, aunque quizá muy concentrados, puede ser útil una operación por lotes para el tratamiento de los desperdicios. Esto permite una operación intermitente cada vez que se tiene un volumen suficiente de desperdicios producidos y hace posible cambiar fácilmente un residuo con otro. El tratamiento de los residuos en la industria del recubrimiento metálico, o en ciertas operaciones de la industria textil, son ejemplos del uso del tratamiento por lotes. Es falso, por supuesto, que las operaciones de este tipo sean anticuadas. Por otra parte, en casos en los



**Figura 6-19** Reactores de flujo: (a) reactor tubular de flujo de tapón (reactor ideal); (b) reactor real; (c) reactor de tanque completamente mezclado (reactor ideal).

cuales las corrientes residuales son grandes y se producen de forma continua, un reactor de flujo es mucho más apropiado. Un ejemplo es el tratamiento municipal de los desperdicios líquidos domésticos e industriales. Otra variante, llamada *reactor semintermitente*, se utiliza cuando se alimenta de forma discontinua un reactor con un largo tiempo de retención. Ejemplo de esto es la digestión anaerobia de lodos de alcantarillado en una planta municipal de tratamiento de desechos (véase el capítulo 12).

**Tiempo de retención.** Por definición, en un RTFT cada partícula de fluido tarda exactamente el mismo tiempo en atravesar el reactor. Este **tiempo de flujo completo** en general se designa como **tiempo de retención**. Para un RTFT, su tiempo se calcula por medio de la ecuación

$$t = \frac{V}{q} \quad (6.74)$$

en donde  $t$  = tiempo de retención, [t]

$V$  = volumen de líquido en el reactor ideal, [L<sup>3</sup>]

$q$  = gasto volumétrico de alimentación (afluente)  $q_0$  o de producto (efluente)  $q_f$ ; [L<sup>3</sup>/t] y [L] indican dimensiones de longitud

Para los líquidos,  $q_0 = q_f$ , pero cuando se trata de gases puede haber un cambio de volumen y  $q_0$  puede diferir de  $q_f$ . En este caso se debe utilizar  $q_f$  para calcular el tiempo de retención.

TABLA 6-3 COMPARACIÓN DE TIPOS DE REACTORES

Tipo de recipiente	Reactores de flujo		
	Reactor intermitente	RTFT	RTCM
Dimensiones	Tanque $\frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro}} \approx 1$	Tubo o tanque largo $\frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro}} \gg 1$	Tanque $\frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro}} \approx 1$
Tipos de fluidos	Líquido Sólido	Líquido Gas Gas/sólido	Líquido Gas Lecho fluidizado
Mezclado entre reactivos y productos	Ninguno (se separan con el tiempo)	Ninguno (se separan con la distancia)	Total
Conversión <sup>a</sup> de reacción irreversible individual	Máxima	Máxima	Mínima
Ventajas	Muy flexible, puede cambiar de un proceso a otro y de un día al siguiente El costo de capital es bajo Conversión máxima; por tanto, reactor más pequeño	Opera en estado estacionario (excepto en el arranque y el paro), fácil de verificar en operación por mediciones de $T, P$ y concentración. Costo de capital más bajo que el RTCM Conversión máxima; por tanto, reactor más pequeño Menor costo de operación que el reactor intermitente	Constante con el tiempo (no interviene ecuaciones diferenciales en las soluciones) Es más fácil controlar el proceso porque $T$ y $P$ son constantes Mejor control de calidad Costos de operación más bajos que el RTFT
Desventajas	Opera siempre en estado no estacionario Los costos de operación son altos porque se requiere más mano de obra Más difícil control de la calidad de los productos	Menos flexible que el reactor intermitente si se desea cambiar de un proceso a otro Se necesita un reactor (tubo) largo si la reacción es lenta Es difícil controlar la temperatura local (puntos calientes)	La conversión mínima demanda un reactor más grande Costos de capital mayores porque se requieren mezcladoras

<sup>a</sup>El grado de conversión se explica como sigue. En general, la velocidad de una reacción es (véase la sección 6.6.1)

$$r = \frac{dC}{dt} = k_1(T, P)f_2(C_A, C_B)$$

donde  $C_A$  y  $C_B$  son las concentraciones de los reactivos (o productos). Si, para un reactor específico, la temperatura,  $T$ , y la presión,  $P$ , se mantienen constantes,  $dC/dt$ , el cambio de concentración con el tiempo, es sólo función de la concentración en el tanque, es decir,

$$\frac{dC}{dt} = k_1 f(C_A, C_B)$$

En un RTCM, la concentración de los materiales A y B en la corriente de alimentación se reduce de inmediato a la concentración en el tanque (y el efluente); por consiguiente, la velocidad de reacción global y, en consecuencia, la conversión de reactivo a producto, es menor que para un RTFT, donde no se produce una reducción de concentración de esta naturaleza al entrar al reactor. En palabras más sencillas, en un RTCM los reactivos de la corriente de alimentación se diluyen de inmediato en los productos, lo cual reduce la velocidad de reacción y por tanto la conversión.

Para un RTCM algunas partículas pueden atravesar el reactor en un tiempo menor o mayor que el tiempo medio de retención, pero este último se puede calcular de cualquier forma a partir de la ecuación (6.74).

**Flujo no ideal y estudios con trazadores.** En la práctica, casi ningún tanque real se comporta como los dos reactores de flujo ideales. Se producen desviaciones como resultado de (1) "canalización" de partes del líquido en el reactor a causa de diferencias de densidad generadas por variaciones de temperatura; (2) cortocircuitos, quizá debido a altitudes desiguales de las salidas de los vertederos; (3) la existencia de regiones estancadas, y (4) dispersión causada por turbulencia y mezclado local. En virtud de estas desviaciones, el tiempo medio de retención efectivo es menor que el calculado para el reactor ideal. Ciertas partículas de fluido pueden circular a través del tanque con gran rapidez, mientras que otras requieren varios tiempos medios de retención, y otras más pueden alcanzar regímenes estancados o de "volumen muerto", con lo cual se reduce el volumen útil del tanque. Para obtener una imagen completa de la circulación del fluido en el tanque sería necesario medir las velocidades en varios puntos. Este trabajo consume gran tiempo. Una tarea menos ardua consiste en averiguar qué cantidad del fluido en el tiempo  $t_0$  permanece en el tanque cuando ha transcurrido cierto tiempo. Una técnica que emplee trazadores proporciona una imagen de la *distribución de tiempos de residencia* del flujo a través del tanque. Un colorante, una solución con sal u otro material no reactivo se introduce en la entrada al tanque y se vigila de manera continua en la salida. Los siguientes son métodos comunes para introducir trazadores:

- **Alimentación continua:** De forma ininterrumpida se adiciona un trazador en la entrada para suministrar una concentración de  $C_0$  hasta el final del experimento: se llama también *alimentación escalonada*.
- **Alimentación por pulsación:** Todo el trazador se deposita en la entrada en el tiempo más corto para que la concentración  $C_0$  en el reactor sea  $Q/V$ , la cantidad de trazador agregado/volumen del reactor; se llama también *alimentación de golpe*.

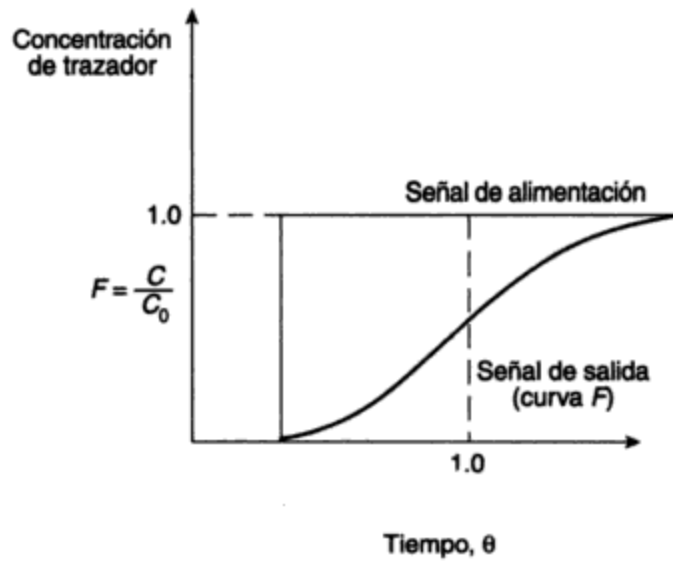
La respuesta de la salida en cada caso para un reactor real se muestra en la figura 6-20. En ambos  $C$  es la concentración de trazador en la corriente de salida.

Suponga que se utiliza un colorante rojo como trazador y que el fluido que atraviesa el reactor es blanco. En el caso de una alimentación continua, en el tiempo  $t = 0$  se agrega en la entrada una corriente constante de líquido rojo. Algunas partículas fluyen en un tiempo muy corto hasta la corriente de salida tiñéndola levemente de rosado. A medida que el tiempo transcurre se hará cada vez más colorida hasta que aparece un color rosado uniforme; su intensidad está determinada por los volúmenes relativos de flujo de líquido blanco y rojo.

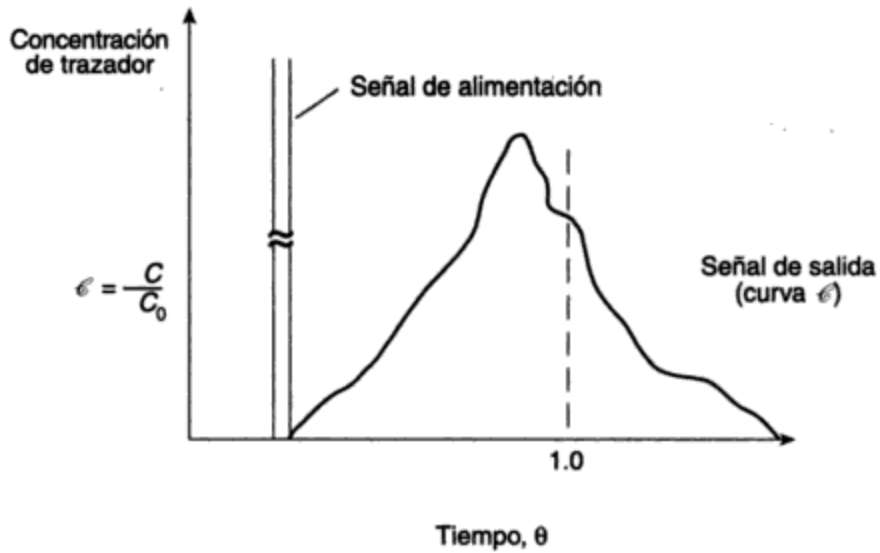
Para la alimentación por pulsación se produce la misma aparición inicial de color que se presenta en el caso anterior; sin embargo, puesto que todo el líquido rojo se vierte de una sola vez, sin adiciones subsecuentes, el color en la salida alcanza una intensidad máxima de rosa y posteriormente comenzará a desvanecerse hasta que el líquido vuelve a ser totalmente blanco.

### Ejemplo 6.22

Describa matemáticamente la respuesta en la salida para un reactor de alimentación continua alimentado con un trazador no reactivo en la entrada de un RTCM. El gasto volumétrico es  $q$ .



(a)



(b)

**Figura 6-20** Respuesta en la salida del reactor al trazador en la entrada: (a) alimentación continua; (b) alimentación por pulsación.  $C/C_0$  = proporción de trazador en la corriente de salida =  $F$  para alimentación continua =  $\epsilon$  para alimentación en una pulsación. Tiempo  $\theta$  (adimensional) =  $t/\bar{t}$ , esto es, el tiempo de retención real/tiempo de retención teórico.

**Solución**

$C_0$  = concentración de trazador en la alimentación continua

$C$  = concentración de trazador en el tanque (y en la corriente de salida de un RTCM)

Por medio de un balance de materia sobre el trazador,

$$\text{entrada} = \text{salida} + \text{acumulación}$$

$$qC_0 = qC + \frac{d}{dt}(VC)$$

Dividiendo entre  $qC_0$ , obtenemos

$$1 = \frac{C}{C_0} + \frac{V}{q} \times \frac{d}{dt} \left( \frac{C}{C_0} \right)$$

Como ya hemos visto

$$\frac{C}{C_0} = F \quad \frac{V}{q} = \bar{t}$$

y puesto que  $\theta = t/\bar{t}$  (véase la figura 6-20),

$$\frac{1}{d\theta} = \bar{t} \frac{1}{dt}$$

(Por convención, la respuesta de salida a una alimentación continua se llama curva  $F$ , en tanto la de una alimentación por pulsación, curva  $\mathcal{C}$ .) Por consiguiente,

$$1 = F + \frac{dF}{d\theta}$$

$$\int_0^\theta d\theta = \int_0^1 \frac{dF}{1-F}$$

$$-\theta = -\ln(1-F)$$

$$e^{-\theta} = 1-F$$

o

$$F = 1 - e^{-\theta}$$

De manera similar a la del ejemplo 6.22, se puede demostrar que para una alimentación por pulsación a un RTCM, la respuesta en la salida es

$$\mathcal{C} = e^{-\theta}$$

Al conocer la proporción  $F$  o  $\mathcal{C}$  de trazador presente en el efluente, se puede determinar la proporción  $I$  de trazador restante en el tanque. Para un RTFT, la respuesta en la salida es idéntica a la entrada, solamente retardada con el tiempo de retención  $\bar{t}$ . Para un RTCM, las concentraciones en la entrada y en la salida son idénticas por definición.

La figura 6-21 proporciona información para un RTFT, un RTCM y un reactor real sobre las curvas  $I$ ,  $F$  y  $\mathcal{E}$  para entradas de trazador. En ocasiones se dan a estas curvas diversos nombres, distintos al de *fracción de trazador presente*. Por ejemplo,  $I$  puede ser *distribución de edades* de las moléculas dentro del tanque, o *distribución de tiempos de residencia*, en tanto que  $F$  o  $\mathcal{E}$  pueden describirse como la *distribución de edades del efluente*, la *distribución de trazador en la salida*, o la *distribución de tiempos de residencia en la salida*. Aunque estas expresiones referentes a  $C/C_0$  aparecen con frecuencia en la literatura, tienden a ocasionar confusión y por tanto no se utilizan aquí.

Por las razones ya señaladas los reactores se desvían del régimen de flujo de un RTFT o de un RTCM, de modo que se han elaborado diversos modelos matemáticos y físicos como aproximación al comportamiento no ideal. Estos modelos se analizan más a fondo en Levenspiel (1972).

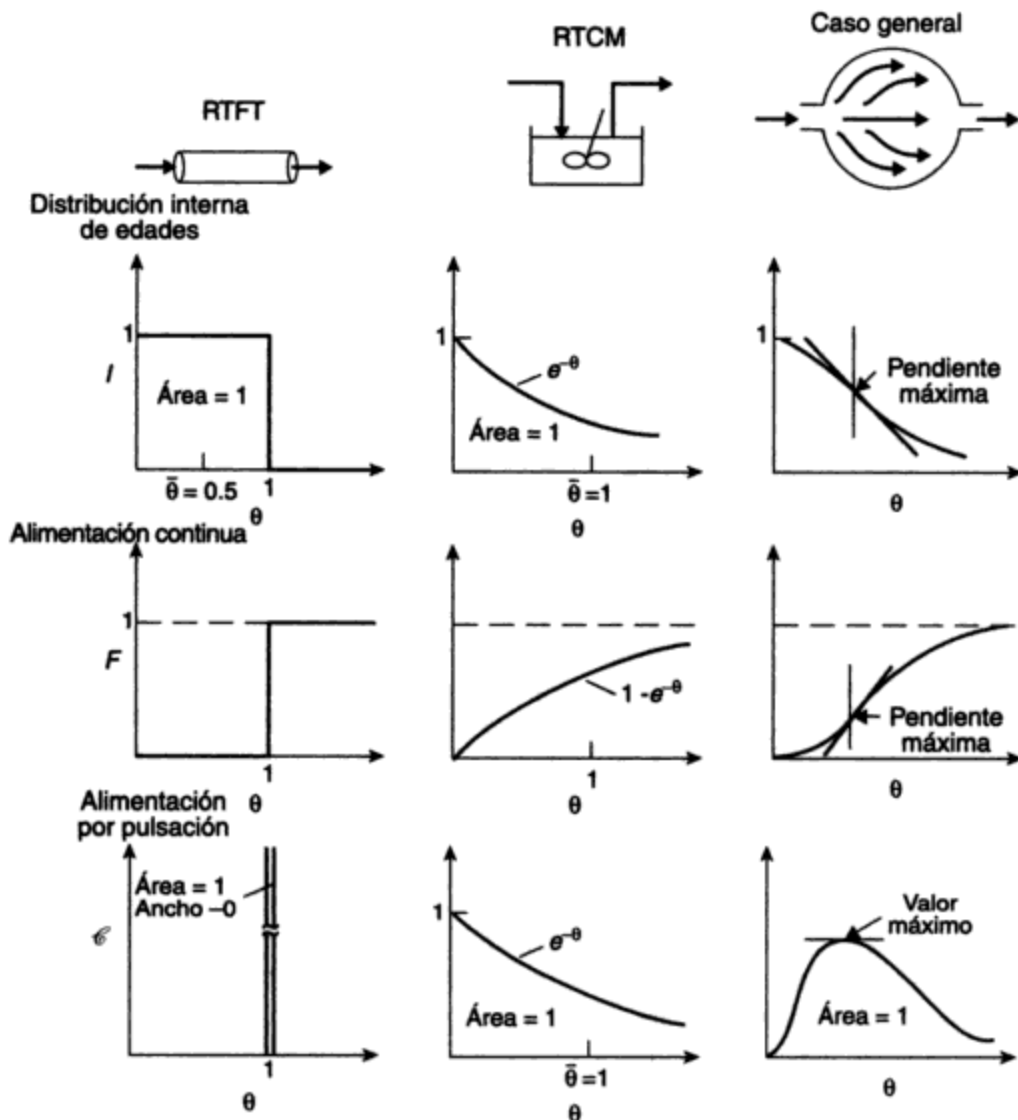
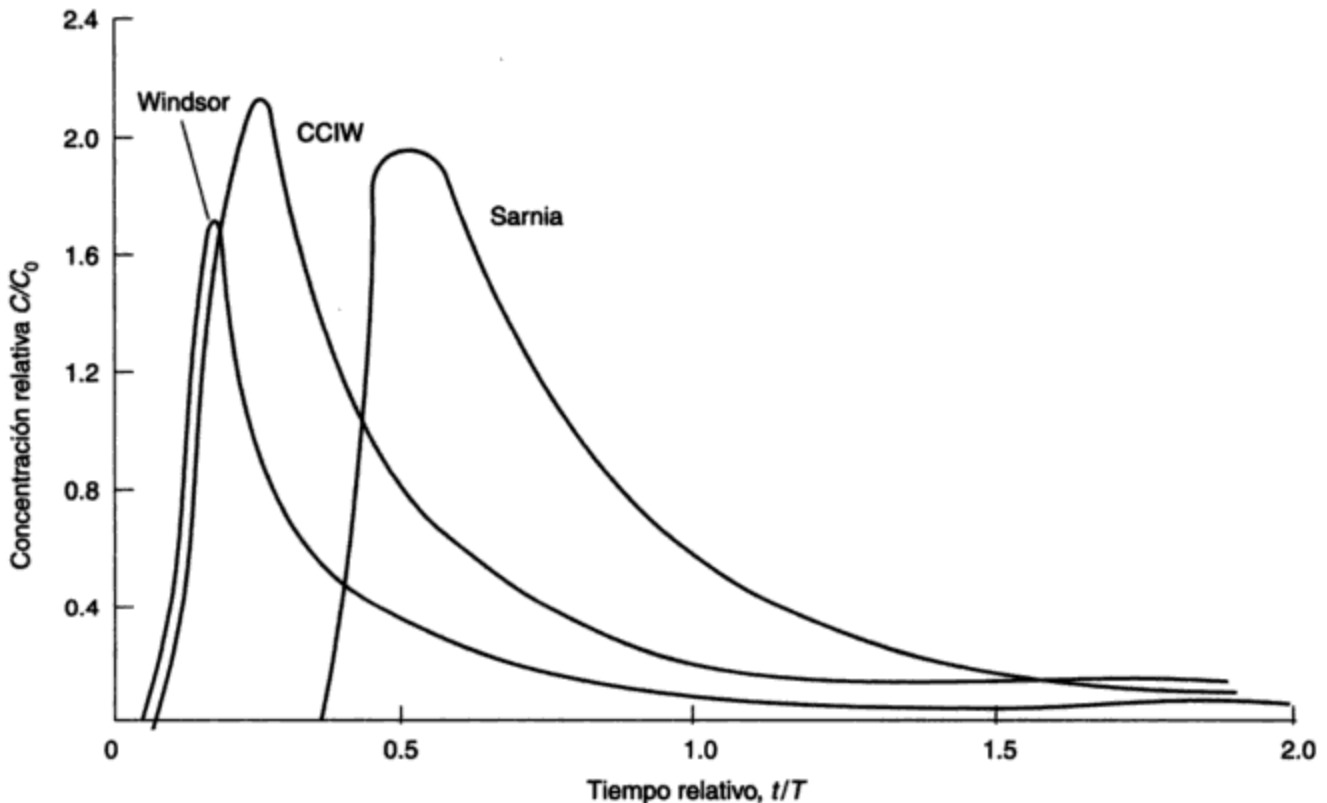


Figura 6-21 Curvas  $I$ ,  $F$  y  $\mathcal{E}$  para diversos tipos de reactores. Fuente: Adaptado de Levenspiel (1972).

**Estudios con trazadores representativos.** Los estudios con trazadores para evaluar el comportamiento de tanques de sedimentación primaria se ilustran en la figura 6-22 y en la tabla 6-4. La figura muestra las curvas  $\mathcal{C}$  correspondientes a los tanques de las plantas de tratamiento de aguas de alcantarillado de Windsor, Sarnia y CCIW (Burlington), Ontario. La tabla contiene una lista de los parámetros de eficiencia hidráulica obtenidos de curvas  $\mathcal{C}$  en diversas condiciones de flujo expresadas como *tasa de rebose* (la proporción del afluente  $Q$  al área superficial del tanque, que se examina en la sección 12.5.2).



**Figura 6-22** Curvas  $\mathcal{C}$  típicas para los tanques de sedimentación primaria en las plantas de tratamiento de aguas de alcantarillado de Windsor, Sarnia y CCIW (Burlington), Ontario. Fuente: G. W. Heinke, A. J. Tay y M. A. Qazi, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 52 (1980): 2946.

La eficiencia hidráulica de un tanque se define como la proporción del tiempo medio real de retención  $t_g$  al tiempo teórico de retención  $T$  expresada como porcentaje. Para el tanque de sedimentación ideal, esta proporción es la unidad (o 100%); para un tanque de sedimentación real, es siempre considerablemente menor que la unidad a causa de la presencia de zonas de estancamiento dentro del tanque. La eficiencia del tanque de Sarnia (alrededor del 73%) es mayor que la del de Windsor (de 30 a 42%). Además, el momento de la aparición inicial del trazador y el momento en que se alcanza la concentración máxima se presentan más pronto en Windsor que en Sarnia, lo cual indica la formación de muchos cortocircuitos en Windsor. Los parámetros hidráulicos de la planta de CCIW son intermedios entre los de Windsor y los de Sarnia. Se puede



**TABLA 6-4** PARÁMETROS DE EFICIENCIA HIDRÁULICA PARA LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA DE WINDSOR, SARNIA Y CCIW (BURLINGTON), ONTARIO

Tasa de rebose (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · día)	Parámetros de eficiencia hidráulica (min)				
	$t_i$	$t_p$	$t_g$	$T$	$t_g/T(\%)$
<b>Sarnia</b>					
36	29	48	79	110	72
49	24	39	59	80	74
73	19	31	39	53	73
98	16	25	29	40	73
<b>Windsor</b>					
24	20	46	60	200	30
49	10	25	33	100	33
73	7	18	27	67	40
98	5	15	21	50	42
<b>CCIW</b>					
29	8	28	42	110	38
49	5	25	36	66	55
73	5	20	30	50	64
98	5	16	24	33	73

Donde  $t_i$  = intervalo de tiempo para la detección inicial de rastreador en el efluente (min)

$t_p$  = intervalo de tiempo para alcanzar la concentración máxima de rastreador en el efluente (min)

$t_g$  = tiempo medio de retención real (centroide de la curva  $\mathcal{C}$ ) (min)

$T$  = tiempo de retención teórico (min)

Fuente: G. W. Heinke, A. J. Tay y M. A. Qazi, *Journal of the Water Pollution Control Federation* 52 (1980): 2946.

concluir, con base en los datos de separación de sólidos suspendidos, que la planta de Sarnia tiene un tanque de sedimentación muy eficiente, en tanto que en la planta de Windsor la separación de estos sólidos es deficiente.

### 6.6.3 Determinación de velocidades de reacción

A fin de obtener expresiones para la velocidad de las reacciones químicas o bioquímicas (es decir, para determinar el orden de una reacción y las constantes de velocidad de reacción) se efectúan experimentos en laboratorios o plantas piloto. El objetivo es obtener datos de la concentración de reactivos o productos ya sea en función del tiempo para un reactor intermitente, o en función del gasto (que equivale a una escala de tiempo) para un reactor de flujo continuo.

Se podría emplear un sistema por lotes o uno continuo, pero los reactores intermitentes son más comunes porque son más sencillos. De los diversos métodos disponibles para determinar constantes de velocidad, el de integración es el más popular y es el que se presenta aquí. Por razones de sencillez, sólo se examinarán reacciones irreversibles con un solo reactivo.

Por integración de las ecuaciones de velocidad [de la (6.58) a la (6.61)] para reacciones de orden cero, primero y segundo, desde  $[A] = [A_0]$  en el tiempo  $t = 0$  hasta  $[A] = [A]$  en el tiempo  $t = t$ , obtenemos expresiones que se grafican como una línea recta si elegimos las ordenadas apropiadas. Los resultados para un reactor de flujo ideal se muestran en la tabla 6-5.

**TABLA 6-5** PROCEDIMIENTO GRÁFICO PARA DETERMINAR EL ORDEN DE REACCIÓN POR EL MÉTODO DE INTEGRACIÓN PARA UN RTFT

Orden	Ecuación de velocidad	Ecuación integrada	Gráfica lineal	Pendiente	Ordenada en el origen
0	$\frac{d[A]}{dt} = -k$	$[A] - [A_0] = -kt$	$[A]$ vs. $t$	$-k$	$[A_0]$
1	$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]$	$\ln \frac{[A]}{[A_0]} = -kt$	$\ln[A]$ vs. $t$	$-k$	$\ln[A_0]$
2	$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]^2$	$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A_0]} = kt$	$\frac{1}{[A]}$ vs. $t$	$k$	$\frac{1}{[A_0]}$

Nota:  $[A]$  indica la concentración de reactivo A.

Los datos para el método de integración se obtienen midiendo la concentración menguante de los reactivos en diversos momentos y calculando las constantes de velocidad para las reacciones de orden cero, y de primer y segundo orden. (Las reacciones de orden superior no son comunes en ingeniería ambiental.) También podríamos graficar los datos para ver cuál orden de reacción se ajusta mejor a ellos. El ejemplo 6.23 ilustra el procedimiento.

### Ejemplo 6.23

Los siguientes datos se obtuvieron para la reacción  $A \rightarrow B + C$ . Determine el orden de la reacción y el valor de la constante de velocidad  $k$ .

$t$ , (min)	0	10	20	40	60
A, (mg/L)	90	72	57	36	23

**Solución** Suponga que la reacción es de orden cero o de primer orden. La siguiente tabla muestra los cálculos apropiados:

$t$ (min)	A (mg/L)	$[A]/[A_0]$	$\ln \frac{[A]}{[A_0]}$	Orden cero, $k_0$ (mg/L · min)	Primer orden, $k_1$ (min <sup>-1</sup> )
0	90	1.00	0.0		
10	72	0.80	-0.223	+1.80	-0.0223
20	57	0.63	-0.457	+1.65	-0.0228
40	36	0.40	-0.916	+1.35	-0.0229
60	23	0.26	-1.347	+1.12	-0.0225

Un cálculo sencillo para el intervalo de cero a 10 minutos es el siguiente:

$$k_0 = \frac{[A_{10}] - [A_0]}{-t} = \frac{72 - 90}{-10} = +1.80$$

$$k_1 = \frac{\ln[A_{10}]/[A_0]}{t} = \frac{-0.223}{10} = -0.0223$$

Puesto que la velocidad  $k_1$  es mucho más coherente que la  $k_0$ , calculada para los diversos intervalos, se considera que la reacción es de primer orden y la constante de velocidad promedio  $k_1 = -0.0226$ .

Podríamos haber encontrado  $k$  graficando  $[A]$  en función de  $t$  y  $\ln[A]$  en función de  $t$ . En esas condiciones habría quedado claro que los datos se ajustan mejor a una línea recta en la gráfica de  $\ln[A]$  que en la gráfica de  $[A]$ , ambas en función de  $t$ . Por consiguiente, se decide que la reacción es de primer orden y la pendiente de la línea recta es  $-k_1$ .

Observe que con el método de integración se determinan sólo números enteros de los exponentes  $\alpha, \beta, \gamma$ . Si es deseable o necesario determinar exponentes fraccionarios, porque los datos parezcan justificarlo, se debe emplear el método de diferenciación (no se describe aquí). Para más información consulte Levenspiel (1972).

### 6.6.4 Principios de diseño de reactores

Las ecuaciones de velocidad de reacción, determinadas a partir de un análisis de un reactor intermitente, pueden proporcionar una base para el diseño de un reactor de flujo continuo. Si es posible pasar por alto el cambio de temperatura y la caída de presión a través del reactor, un balance de masa sobre el cambio en la cantidad de los reactores correlaciona el tiempo de residencia, el grado de conversión de los reactivos y la velocidad de reacción. Los resultados varían con el tipo de reactor y el orden de la reacción que se lleva a cabo.

El balance general de materia para cualquier componente A en un elemento de volumen del reactor será

$$\begin{array}{llll} \text{entrada} & = & \text{salida} & - \text{pérdida por reacción} & + \text{acumulación} \\ & & & (\text{velocidad de} & \\ & & & \text{pérdida de A} & (\text{velocidad de} & (6.75) \\ (\text{velocidad de} & (\text{velocidad de} & \text{pérdida de A} & & \text{velocidad de} & \\ \text{entrada de A} & = & \text{salida de A en} & - & \text{debid a una} & + & \text{acumulación de} & \\ \text{en el elemento)} & \text{el elemento)} & \text{reacción química} & & \text{A en el elemento)} & & & \\ & & \text{en el elemento)} & & & & & \end{array}$$

El siguiente procedimiento es para una reacción de primer orden en un RTCM ideal. En un RTCM en estado estacionario el reactivo A tiene una concentración uniforme en todo el reactor y no se acumula. Por consiguiente, se puede hacer un balance de masa sobre el reactivo A en todo el reactor, y la ecuación (6.75) se transforma en

$$\text{entrada} = \text{salida} - \text{pérdida por reacción}$$

o

$$Q[A_0] = Q[A] - r_A V \tag{6.76}$$

en donde  $Q$  = gasto afluente

= gasto efluente ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$[A_0]$  = concentración del reactivo A en la alimentación ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )

$[A]$  = concentración del reactivo A en el tanque y en el efluente ( $\text{mol}/\text{m}^3$ )

$r_A$  = velocidad de reacción del reactivo A a la concentración  $[A]$

=  $-k[A]$  para una reacción de primer orden ( $\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ )

$V$  = volumen de líquido en el tanque  $Qt$  ( $\text{m}^3$ )

$t$  = tiempo medio de retención hidráulica (h), o tiempo de residencia,  $\bar{t}$

Al dividir la ecuación (6.76) entre  $Q[A_0]$  se obtiene

$$1 = \frac{[A]}{[A_0]} - \frac{r_A V}{[A_0] Q}$$

y puesto que  $V/Q = t$  y  $r_A = -k[A]$ , se obtiene

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{[A]}{[A_0]} + \frac{k[A]t}{[A_0]} \\ &= \frac{[A]}{[A_0]} (1 + kt) \end{aligned}$$

de modo que

$$kt = \frac{[A_0]}{[A]} - 1$$

Un procedimiento similar para otros reactores y órdenes de reacción da por resultado las ecuaciones cinéticas que se resumen en la tabla 6-6.

**TABLA 6-6** ECUACIONES CINÉTICAS QUE CORRELACIONAN EL TIEMPO MEDIO DE RESIDENCIA  $t$  Y LA CONCENTRACIÓN DE REACTIVO  $[A]$  EN REACTORES TFT Y TCM

Ecuación	Tipo de reacción		Tipo de reactor	
	Orden	Velocidad	Flujo de tapón	Flujo mixto
$A \rightarrow C$	0	$-k$	$kt = [A_0] - [A]$	$kt = [A_0] - [A]$
$A \rightarrow C$	1	$-k[A]$	$kt = \ln \frac{[A_0]}{[A]}$	$kt = \frac{[A_0]}{[A]} - 1$
$2A \rightarrow C$	2	$-k[A]^2$	$kt = \frac{1}{[A_0]} \left( \frac{[A_0]}{[A]} - 1 \right)$	$kt = \frac{1}{[A]} \left( \frac{[A_0]}{[A]} - 1 \right)$

El ejemplo 6.24 muestra la aplicación de estas ecuaciones cinéticas.

**Ejemplo 6.24**

Se va a utilizar un reactor para llevar a cabo la conversión del componente A en el producto C. Las especificaciones demandan una conversión del 99% del componente A. La constante de velocidad de primer orden  $k = 1.0 \text{ h}^{-1}$ . Puesto que el reactor es relativamente largo y angosto, el ingeniero supone condiciones de flujo pistón. Sin embargo, en virtud de que se dispone de mezcladores potentes situados a intervalos a lo largo del reactor, las condiciones de mezclado reales son las de un reactor de tanque completamente mezclado. Al suponer condiciones de flujo de tapón, ¿qué error en el volumen necesario del reactor tendrá el ingeniero si la velocidad de alimentación es de  $1,000 \text{ ft}^3/\text{h}$ ? ¿Cuál será la conversión real? Suponga (1) una reacción a volumen constante para el fluido de densidad  $\rho = 1.00$ , (2) que se aplican condiciones de estado estacionario, y (3) que toda la conversión se lleva a cabo en el reactor.

**Solución** RTFT: Para una reacción de primer orden en un RTFT, la ecuación cinética aplicable de la tabla 6-6 es

$$kt = \ln \frac{[A_0]}{[A]}$$

para un 99% de conversión,

$$\frac{[A_0]}{[A]} = \frac{100}{1}$$

y para  $k = 1.0 \text{ h}^{-1}$ ,

$$1 \times t = \ln \frac{100}{1} = 4.6 \text{ h}$$

Para que  $Q = 1000 \text{ ft}^3/\text{h}$ , necesario es  $V = Q \times t = 1000 \times 4.6 = 4600 \text{ ft}^3$ .

RTCM: Para una reacción de primer orden en un RTCM, la ecuación cinética aplicable de la tabla 6-6 es

$$kt = \frac{[A_0]}{[A]} - 1$$

Para un 99% de conversión,

$$\frac{[A_0]}{[A]} = \frac{100}{1}$$

y para  $k = 1.0 \text{ h}^{-1}$ ,

$$t = \frac{100}{1} - 1 = 99 \text{ h}$$

El volumen necesario  $V = Qt = 1000 \times 99 = 99,000 \text{ ft}^3$ . Por consiguiente, el error en el volumen necesario es

$$99,000 - 4600 = 94,600 \text{ ft}^3$$

**Conversión real**

Si el volumen real del reactor es de  $4,600 \text{ ft}^3$  pero las condiciones de trabajo son las de un RTCM, esto es,

$$kt = \frac{[A_0]}{[A]} - 1$$

y

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{4600 \text{ ft}^3}{1000 \text{ ft}^3/\text{h}^{-1}} = 4.6 \text{ h}$$

entonces

$$1 \times 4.6 = \frac{100}{[A]} - 1$$

de modo que

$$[A] = \frac{100}{5.6} = 17.9\% \text{ residual}$$

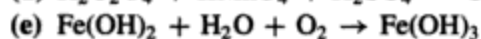
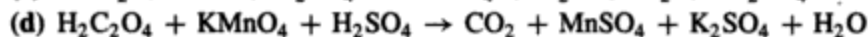
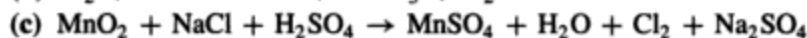
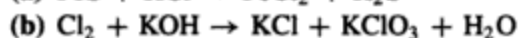
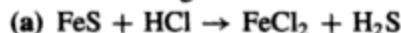
y la conversión real es

$$\frac{100 - 17.9}{100} = 82.1\%$$

El ejemplo 6.24 muestra que la eficiencia de eliminación de un RTCM para una reacción de primer orden es aproximadamente  $\frac{1}{6}$  menos que para un RTFT. Vimos también que para el mismo 99% de conversión el RTCM tendría que ser  $99,000/4,600 = 21.5$  veces más grande que el RTFT. Con base en estos datos podríamos concluir que, puesto que son mucho más eficientes, deberíamos proyectar todos los reactores como RTFT. Sin embargo, las diferencias entre los dos tipos de reactores se reducen cuando el orden de reacción es más bajo y las necesidades de eliminación son menores. Además, en la práctica, las unidades RTFT en gran escala no tienen un rendimiento cercano a las condiciones ideales, sino más bien intermedio entre un RTFT y un RTCM. Por añadidura, las reacciones pueden no ser exactamente de primer orden, sino intermedias entre orden cero y primer orden. En cualquier caso, los volúmenes que se proporcionan son normalmente mayores que los que se requieren en teoría para la conversión, y la eficiencia un poco menor del RTCM se compensa por su mayor estabilidad y las características más uniformes del efluente en condiciones variables de carga. En la literatura se encuentra información sobre sistemas más complejos con reactores en serie o en paralelo, variaciones en el afluente, recirculación y reacciones heterogéneas (Levenspiel, 1972).

## PROBLEMAS

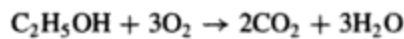
6.1. Balancee las siguientes ecuaciones



6.2. Calcule la velocidad de ascenso de una burbuja de aire de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro en un tanque de agua a 20°C.

6.3. Calcule el tiempo necesario para que una partícula irregular de arena de sílex con un diámetro equivalente de 0.8 mm se sedimente en el fondo de un tanque de 4 m de profundidad.

- 6.4. Determine la velocidad de sedimentación terminal, en agua a 20°C, de una partícula de arena esférica de 0.07 mm de diámetro.
- 6.5. Una planta generadora de electricidad, alimentada con carbón, tiene una chimenea de 100 m de altura desde la cual se emiten partículas que ascienden 100 m más en virtud de la fuerza ascensional térmica del penacho. La velocidad horizontal media del viento entre la superficie terrestre y el nivel de 200 m es de 10 m/s. Calcule la distancia a partir de la chimenea que una partícula de 15 µm (micras) con una densidad de 2 g/cm<sup>3</sup> recorre antes de alcanzar la superficie terrestre. No considere el recorrido horizontal de la partícula durante su ascenso.
- 6.6. La siguiente información procede de una prueba de laboratorio que se llevó a cabo para determinar la concentración de sólidos suspendidos de una muestra de aguas residuales no tratadas. Una muestra de 100 mL se filtra a través de una almohadilla de filtración. El peso de la almohadilla y el crisol limpios, los cuales se secaron, se dejaron enfriar y se pesaron, es de 48.610 g. Después de filtrar, secar a 104°C y dejar enfriar, el peso del crisol, la almohadilla de filtración y los sólidos secos es de 48.903 g. ¿Cuál es la concentración de sólidos suspendidos en la muestra de aguas residuales, en mg/L?
- 6.7. ¿Cuántos moles de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se requieren para formar 65.0 g de CaSO<sub>4</sub> a partir de CaCO<sub>3</sub>?
- 6.8. Una planta generadora de energía eléctrica de 1,000 MW que consume carbón quema antracita, que contiene 5% de cenizas y 2.5% de azufre, con una eficiencia térmica de 40%. El contenido calorífico del carbón es de 31,280 kJ/kg. Si el 99.5% de las cenizas y el 88% del SO<sub>2</sub> se capturan antes de que se emitan por la chimenea, calcule:
  - (a) La tasa de alimentación de carbón al horno (kg/día)
  - (b) La tasa de emisión de cenizas y SO<sub>2</sub> hacia la atmósfera (kg/día)
  - (c) El volumen de SO<sub>2</sub> que se emite (m<sup>3</sup>/día) a 20°C y presión atmosférica
- 6.9. Una muestra de 25.26 g de sulfato de magnesio hidratado (MgSO<sub>4</sub> X H<sub>2</sub>O) se calienta a 400°C para eliminar el agua de cristalización. Se encuentra un residuo de 12.34 g de sulfato de magnesio anhidro. ¿Cuál es el valor de X?
- 6.10. Por accidente se derrama etanol a un río, la acción microbiana lo degrada de acuerdo con la ecuación de reacción



- (a) ¿Cuántos kilogramos de oxígeno se consumen en el proceso si se derramaron 500 kg de etanol?
  - (b) ¿Cuántos kilogramos de CO<sub>2</sub> se producen?
- 6.11. ¿Cuántos gramos de magnesio se necesitan para formar 1 kg de carbonato de magnesio?
  - 6.12. El aire es una solución compuesta principalmente por nitrógeno, oxígeno y argón, con fracciones molares de 0.781, 0.210 y 0.009, respectivamente. Calcule las fracciones de masa de cada uno.
  - 6.13. Una muestra de 7.14 g de yoduro de potasio se disuelve en 145 g de agua. ¿Cuál es (a) la molaridad y (b) la fracción molar de KI en la solución?
  - 6.14. Llene los espacios en blanco de la siguiente tabla.

Ion o compuesto	mol/L	meq/L	ppm como CaCO <sub>3</sub>	mg/L
Na <sup>+</sup>	10 <sup>-3</sup>			
Fe <sup>+3</sup>		9.3		
(HCO) <sub>3</sub> <sup>-</sup>			122	
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>				32
OCl <sup>-</sup>	5 × 10 <sup>-4</sup>			

fecto, los cationes y los aniones que contiene el agua estarían balanceados. Los resultados informados respecto a una muestra de agua son los siguientes:

Cationes (mq/L)		Aniones (mq/L)	
Na <sup>+</sup>	90	Cl <sup>-</sup>	102
Ca <sup>+2</sup>	60	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	220
Mg <sup>+2</sup>	20	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	64
Fe <sup>+2</sup>	2	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1

- ¿Queda comprendido este análisis dentro de un error máximo aceptable de 10%?  
 6.22. Un análisis de una muestra de agua proporciona los siguientes resultados:

Alcalinidad total 72 mg/L como CaCO<sub>3</sub>  
 Temperatura 25°C  
 pH 9.8

- Calcule las alcalinidades de carbonato, bicarbonato e hidróxido.  
 6.23. Una muestra de 200 mL de agua del lago Scugog requirió 2 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N para alcanzar el punto final de fenolftaleína y 10 mL más de ácido para titular del punto final de fenolftaleína al de naranja de metilo. ¿Cuáles son las formas de alcalinidad que están presentes y en qué concentraciones (como CaCO<sub>3</sub>)?  
 6.24. Unas muestras tomadas del lago Muskoka en 1975 tenían una alcalinidad a la fenolftaleína de 50 mg/L; una alcalinidad total de 90 mg/L; (ambas como CaCO<sub>3</sub>) y un pH de 10.3. A partir de entonces la lluvia ácida redujo el pH a 8.6 para 1995 y una muestra de 200 mL requirió 2.0 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N para alcanzar el punto final de fenolftaleína y 10 mL más de ácido estándar para titular desde el punto final de fenolftaleína hasta el de naranja de metilo. Compare los componentes de alcalinidad (OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) que estaban en el agua al principio y al final del periodo de 20 años y determine el porcentaje de eliminación o aumento de cada componente.  
 6.25. Si el agua del lago Ontario tiene concentraciones de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> de 0.00096 y 0.00022 mol/L, respectivamente, ¿cuál es la dureza del agua, expresada en mg/L de CaCO<sub>3</sub>?  
 6.26. Las siguientes concentraciones de cationes se obtuvieron de un análisis de agua:

Cationes	mg/L
Ca <sup>+2</sup>	60
Mg <sup>+2</sup>	20
Na <sup>+</sup>	15.5
K <sup>+</sup>	8

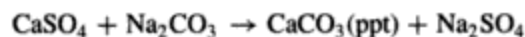
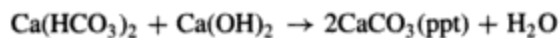
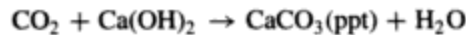
- Calcule la dureza y la alcalinidad como mg/L de CaCO<sub>3</sub>.  
 6.27. Calcule la alcalinidad de una muestra de agua que contiene 20 mg/L de Ca<sup>+2</sup> y 15 mg/L de Mg<sup>+2</sup>, expresada como CaCO<sub>3</sub>. Utilice (a) las fórmulas que se incluyen en la sección 6.3.3 y (b) el método de pesos equivalentes.



- 6.28. Al analizar una muestra de agua, se encuentra que contiene los siguientes constituyentes en las concentraciones que se indican:

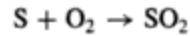
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	8.8 mg/L
Bicarbonato de calcio [Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]	186.3 mg/L
Sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	81.6 mg/L

La cal (Ca(OH)<sub>2</sub>) se usa para precipitar el CO<sub>2</sub> y el Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, y la sosa comercial para precipitar el sulfato de calcio de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



Calcule la masa de cal y la sosa comercial necesaria para ablandar por completo en teoría 1 L de esa agua.

- 6.29. ¿Qué presión (kPa) se necesita para que el aire a 20°C sea tan denso como el aire a 0°C cuya presión es de 1,000 mbar?
- 6.30. Un cilindro que contiene oxígeno a 20 MPa a 0°C podría explotar si la presión pasa de 50 MPa. ¿Cuál es la temperatura máxima (°C) a la que se puede almacenar este cilindro sin peligro, con un factor de seguridad de 2.0?
- 6.31. Un ingeniero desea almacenar el metano gaseoso (CH<sub>4</sub>) que se produce en un digestor anaerobio de lodos en una planta de tratamiento de aguas negras. Si el gas, que se produce a un ritmo de 200 kg/día, se va a almacenar a 20°C y 4 MPa, ¿qué volumen debe tener el tanque para un periodo de almacenamiento de 10 días?
- 6.32. Una muestra de 50 mL de oxígeno a una presión de 0.1 MPa se mezcla con una muestra de 250 mL de nitrógeno a la misma temperatura y a una presión de 0.0667 MPa. La mezcla se coloca en un recipiente de 150 mL, sin que la temperatura cambie. Calcule la presión parcial de cada gas y la presión total en el recipiente.
- 6.33. Calcule la cantidad de oxígeno (mg/L) disuelta en el agua de un río a 30°C en condiciones de saturación, a una presión atmosférica de 100 kPa. (La  $k_H$  en agua a 30°C es 4,810 MPa.)
- 6.34. Una muestra de 1.002 de grafito (C) se quema totalmente en un recipiente de acero que contiene 250 mL de oxígeno a una presión de 1.00 MPa a 27°C. Calcule la fracción molar de cada gas y la presión total después de la combustión; suponga que todos los gases son ideales y que la temperatura aumenta 2.5°C.
- 6.35. ¿Qué volumen de oxígeno a 27°C y 0.21 atm se requiere para la combustión de 25 g de metano gaseoso?
- 6.36. La digestión anaerobia de un residuo industrial, que es principalmente ácido acético, produce dióxido de carbono y metano gaseosos. Calcule el volumen de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub> que se produce diariamente a 20°C para una producción diaria de residuos equivalente a 500 kg de CH<sub>3</sub>COOH.
- 6.37. Una nueva planta de energía eléctrica, carente de medios para eliminar SO<sub>2</sub>, se va a construir en las afueras de una ciudad. Se utilizará carbón con un contenido de azufre de 1.8% en peso. Se estima que las chimeneas afectarán un área de alrededor de 5 km en todas direcciones desde la planta y contendrán, en las peores circunstancias, aproximadamente la producción de un día de SO<sub>2</sub> de la planta. Los registros de precipitación indican una precipitación pluvial típica de 5 cm en 24 h con un pH promedio de 6.2. Calcule el consumo diario permisible de carbón para que el pH del agua de lluvia no sea menor de 5.0. Las siguientes ecuaciones son aplicables (suponga que la precipitación pluvial en el área afectada disuelve todo el SO<sub>2</sub> presente en el lugar

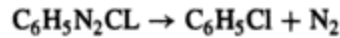


- 6.38.** El problema de la lluvia ácida se analizó en el capítulo 5. Con base en esta información general y los conocimientos adquiridos en el capítulo 6, considere la siguiente situación: una planta industrial emite  $SO_2$  en la atmósfera de manera constante. Los registros de precipitación pluvial indican que la precipitación anual es de 80 cm/año, a un pH de 4.5. Un lago cercano tiene las siguientes características: área superficial = 8 km<sup>2</sup>, profundidad media = 10 m, pH = 5.5, alcalinidad = 25 mg/L como  $CaCO_3$ . El área desde la cual el líquido drena directamente al lago es de 25 km<sup>2</sup>. Suponga que sólo el 20% de la lluvia que cae sobre la tierra llega al lago, que el lago se mezcla totalmente cada año y que el pequeño río que llega al lago y sale de él se puede despreciar, por lo que a la acidificación concierne. ¿Cuántos años transcurrirán para que el lago alcance un pH de 5.0?
- 6.39.** Una ciudad situada en las riberas de un río grande descarga sus residuos tratados al río de manera continua. El caudal mínimo del río es de 210 m<sup>3</sup>/s, y la planta de tratamiento descarga 12.5 m<sup>3</sup>/s. Si el límite máximo aceptable para un cierto contaminante es de 1.0 ppm (1 mg/L) en el río corriente abajo, y la concentración "de fondo" de este contaminante río arriba es de 0.4 ppm, ¿cuál es la concentración máxima del contaminante, en mg/L, que se puede descargar sin peligro de la planta de control de la contaminación del agua?
- 6.40.** En la situación que se describe en el problema 6.39, suponga que una sola fábrica es la causante de la emisión del contaminante, y que la eficiencia global de la planta de tratamiento para la eliminación de este material es de 60%. Si el flujo residual promedio que sale de la fábrica es de 0.05 m<sup>3</sup>/s, entonces, sin tomar en cuenta los volúmenes que se quitan a los flujos (por ejemplo, en los lodos, etc.), ¿cuál es la concentración máxima del contaminante, en mg/L, que se puede descargar al sistema de alcantarillado?
- 6.41.** Una muestra de aguas residuales domésticas contiene 350 mg/L de sólidos suspendidos. Las instalaciones para sedimentación primaria eliminan el 65% de estos sólidos. De forma aproximada, ¿cuántos galones de lodos con un contenido de sólidos de 5.0% se producirán por cada millón de galones de aguas residuales que se manejan?
- 6.42.** Un espesador que trabaja por gravedad recibe 30,000 galones por día de lodos de aguas residuales y aumenta el contenido de sólidos de 3.0 a 7.0% con una recuperación del 90% de los sólidos. Calcule el volumen de lodos espesados.
- 6.43.** Cuatro colectores de polvo que trabajan en paralelo eliminan el polvo de la corriente de aire de un incinerador municipal; cada colector maneja una cuarta parte del gasto de aire, que es de 200 m<sup>3</sup>/min. La corriente de aire contiene 10 g/m<sup>3</sup> de sólidos en suspensión y la eficiencia de los colectores es de 98%, la cual se reduce de manera lineal hasta 74% a medida que el gasto de aire se duplica. Si la concentración máxima permisible de sólidos en la descarga combinada de las chimeneas es de 1.0 g/m<sup>3</sup>, ¿se puede retirar de servicio temporalmente un colector (a) sobrecargando las otras tres unidades; (b) no tratando una cuarta parte del gasto de aire?
- 6.44.** La velocidad de las reacciones catalizadas por enzimas en ocasiones sigue una ecuación de velocidad como ésta:

$$r_A = \frac{-k[A]}{1 + k'[A]}$$

- (a) ¿Cuál es el orden de esta reacción?
- (b) Indique un método aproximado para graficar los datos obtenidos de forma experimental para  $[A]$  y  $t$  por el método de integración, de modo que se obtengan dos líneas rectas si se sigue la ecuación de velocidad.
- (c) Comente acerca de los defectos que implica el ajuste de una línea recta a ambas gráficas. (Cortesía de C. Crowe, McMaster University.)

6.45. El cloruro de bencendiazonio se descompone de acuerdo con la ecuación



A 50°C, con una concentración inicial de 10 g/L de  $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_2\text{Cl}$ , se obtuvieron los siguientes resultados:

Tiempo (min)	6	9	12	14	18	22	24	26	30	$\infty$
$\text{N}_2$ desprendido ( $\text{cm}^3$ )	19.3	26.0	32.6	36.0	41.3	45.0	46.5	47.4	50.4	58.3

- (a) Revise los datos y sugiera el orden de reacción más probable, indicando las razones de su decisión.
- (b) Utilice el método de integración para determinar el orden de la reacción y la constante de velocidad. (Cortesía de C. Crowe, McMaster University.)
- 6.46. Se lleva a cabo una reacción química en un RTCM. El componente A se transforma en el producto C, y la ecuación de velocidad se informa como

$$r_A = -0.15 [A] \text{ mol/L} \cdot \text{s}$$

- (a) Calcule el volumen necesario para una conversión del 90% de A para un gasto volumétrico de 100 L/s, suponiendo que  $[A_0] = 0.10 \text{ mol/L}$ .
- (b) Después que ha completado el diseño, el ingeniero averigua que se ha cometido un error en el orden de reacción, la cual resulta ser de orden cero, y la ecuación correcta es

$$r_A = -0.15 \text{ mol/L} \cdot \text{s}$$

¿Cuál será el efecto de esto en el diseño?

- 6.47. Se van a tratar aguas residuales en un RTCM. Suponga una reacción irreversible de primer orden  $r_A = k[A]$  en donde  $k = 0.15$  por día. Determine el gasto que se puede manejar si el volumen del reactor es de  $20 \text{ m}^3$  y se requiere una eficiencia de tratamiento del 98%. ¿Qué volumen sería necesario para el mismo gasto si bastara con una eficiencia de tratamiento de sólo el 92%?
- 6.48. Una reacción en fase líquida se lleva a cabo en dos reactores RTCM que operan en estado estacionario en paralelo a la misma temperatura. Un reactor es dos veces más grande que el otro. La corriente de alimentación total se divide de manera apropiada entre ambos para conseguir la máxima conversión fraccionaria del reactivo, que es de 0.70. Es necesario retirar de servicio el reactor más pequeño para repararlo. Si la velocidad de alimentación total no cambia, ¿cuál es la conversión fraccionaria resultante en el reactor más grande? Suponga que la reacción es de primer orden. (Cortesía de R. Missen, University of Toronto.)
- 6.49. Se va a llevar a cabo una reacción de segundo orden en fase líquida ( $A \rightarrow$  productos) en un reactor intermitente a temperatura constante. La constante de velocidad es  $0.05 \text{ L/mol} \cdot \text{min}$ . La concentración inicial  $[A]$  es de  $2 \text{ mol/L}$ . Si el periodo de inactividad  $t_D$  entre cada lote es de 20 min, ¿cuál debe ser el tiempo de reacción  $t_R$  para cada lote, de modo que la velocidad de producción sea máxima siempre? Tome en cuenta que el tiempo total por lote es de  $t_R + t_D$ . (Cortesía de R. Missen, University of Toronto.)
- 6.50. Una reacción en fase líquida se lleva a cabo en un reactor intermitente a temperatura constante. Se alcanza una conversión del 50% en 20 min. ¿Cuánto tiempo tomará alcanzar la misma conversión (a) en RTFT; (b) en un RTCM?

- 6.51. El tiempo de retención que se requiere en un reactor tubular de flujo de tapón que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales es de 3 h. Las dimensiones del tanque son: longitud 100 m, anchura 10 m, profundidad 4 m. Calcule el gasto máximo, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , que se puede aceptar y la velocidad del flujo, en  $\text{m/s}$ .
- 6.52. Se inyectan burbujas de aire de 100 micras ( $\mu\text{m}$ ) de diámetro por la entrada inferior de un RTFT de 1 m de profundidad, a través del cual fluye agua a  $20^\circ\text{C}$  con un tiempo de retención de 4 min.
- (a) ¿Alcanzarán las burbujas de aire la superficie del agua antes que el agua se derrame por la salida del tanque?
- (b) Dibuje la curva de salida del trazador para el RTFT y anote todos los parámetros. Suponga una alimentación continua de trazador y un comportamiento de flujo ideal.
- 6.53. ¿Por qué un RTFT tiene en teoría una mayor eficiencia de eliminación que un RTCM, y por qué esta diferencia no se manifiesta en la práctica?

## REFERENCIAS

- APHA, AWWA y WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16a. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Federation, 1985.
- BIRD, R. B., STEWART, W. E. y LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. Nueva York: Wiley, 1960.
- BRECK, W. G., BROWN, R. J. C. y MCCOWAN, J. D. *Chemistry for Science and Engineering*, Toronto: McGraw-Hill Ryerson, 1981.
- BUTLER, J. N. *Carbon Dioxide Equilibria and Their Applications*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1982.
- HIDY, G. M. y BROCK, J. R. *The Dynamics of Aero-colloidal Systems*. Oxford: Pergamon Press, 1970.
- HIMMELBLAU, D. M. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1982.
- LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*. Nueva York: Wiley, 1972.
- MAHAN, B. H. *University Chemistry*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1975.
- PERKINS, H. C. *Air Pollution*, Nueva York: McGraw-Hill, 1974. (Originalmente de C. E. Lapple, *Stanford Research Institute Journal* 5(94) (1961).
- PERRY, R. H. *Chemical Engineer's Handbook*. Nueva York: McGraw-Hill, 1984.
- RICH, L. G. *Unit Operations for Sanitary Engineering*. Nueva York: Wiley, 1980.
- SAWYER, C. N. y MCCARTY, P. L. *Chemistry for Environmental Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill, 1978.
- SNOEYNIK, V. L. y JENKINS, D. *Water Chemistry*. Nueva York: Wiley, 1980.
- WILLIAMSON, J. *Fundamentals of Air Pollution*, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1973.

# CAPÍTULO 7

---

## Ciencias de la atmósfera

*F. Kenneth Hare*

### 7.1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera es un componente vital del ambiente humano. Transmite y altera la energía solar que controla nuestro clima; actúa como escudo protector contra los peligrosos impactos de meteoritos y la radiación penetrante, como los rayos ultravioleta del Sol; sustenta el vuelo de las aves y los insectos; y transporta semillas y esporas. Sus gases suministran las materias primas para la vida misma; sin ellas no podríamos existir.

El tiempo meteorológico y el clima son los aspectos de la atmósfera de los que estamos más conscientes. El **tiempo** (meteorológico) es el nombre que damos a los estados del cielo, el aire, el viento y el agua. Sus elementos son: lluvia, nieve, calor, rayos y niebla. Nuestra experiencia integrada del tiempo meteorológico es el **clima**, ciclo anual característico del tiempo.

La mayoría de nosotros tomamos conciencia de la atmósfera sólo cuando hay una capa de nubes, niebla o bruma, o cuando miramos el color azul del cielo diurno, cuyo origen es la luz solar de longitud de onda corta dispersada por los gases atmosféricos. Sin embargo, ninguna otra parte del ambiente se vigila de manera tan exhaustiva. Los satélites meteorológicos observan la atmósfera desde arriba en muchas bandas de longitud de onda distintas. Los globos de radiosonda, que miden temperatura, presión y humedad, se envían una o dos veces al día a una altitud mayor a 30 km desde más de 1,000 estaciones situadas en diferentes puntos del planeta. Una estrecha red de estaciones de observación terrestres también mide las propiedades de la atmósfera, en ciertos casos cada hora y en otros de forma continua, por medio de instru-

mentos registradores. Este esfuerzo, producto de 150 años de evolución, es coordinado por la Organización Meteorológica Mundial con sede en Ginebra.

El estudio del tiempo dio origen a la ciencia de la **meteorología**, que es la física y la química de la atmósfera baja. La atmósfera alta, que inicia a 100 km sobre el nivel del mar, se comporta de otra manera, y su estudio científico se designa a veces como **aeronomía**. Las fuerzas electromagnéticas y la actividad química son más importantes en este campo que en la meteorología. La **climatología**, que es el estudio del clima, se ocupa del comportamiento de la atmósfera de la Tierra a lo largo de periodos prolongados. Todas estas áreas de estudio, junto con la química atmosférica, constituyen las **ciencias de la atmósfera**.

El ingeniero y el científico necesitan conocer los hechos referentes al tiempo y al clima por diversas razones. Por ejemplo, el control de la contaminación no sólo requiere el conocimiento de cómo se comportan las capas inferiores de la atmósfera, sino que, como algunos contaminantes se dispersan en toda ella, también es preciso estudiar las capas superiores. Comprender el clima mundial es útil en proyectos que se emprenden lejos de casa. Los caprichos del clima pueden hacer poco confiable el aprovisionamiento de alimentos y agua; de forma similar, el conocimiento de la incidencia e intensidad de la precipitación pluvial es fundamental para el diseño de obras públicas, como mejoras a sistemas de drenaje, depósitos, presas y centros de aprovisionamiento de agua. Además, la nieve y el viento se deben tomar en cuenta para el diseño de estructuras; el intervalo de variación de la temperatura del aire tiene relación directa con el diseño de sistemas de calefacción y acondicionamiento de aire y también con los sistemas de aislamiento.

## 7.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LA ATMÓSFERA

### 7.2.1 Composición y estado físico

La atmósfera es una mezcla de gases con numerosas partículas en suspensión, unas sólidas y otras líquidas. La atmósfera baja es eléctricamente neutra y contiene pocos iones libres; en su mayoría, se compone de moléculas. En cambio, la atmósfera alta está extensamente ionizada: muchos gases se descomponen en átomos individuales o en radicales libres como el hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ). A causa del papel especial que desempeña, el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) suele tratarse por separado. En este caso se dice que la atmósfera está compuesta de **aire seco** y **vapor de agua**, además de partículas en suspensión. La tabla 7-1 muestra los constituyentes principales del aire seco.

Como se ilustra en la tabla 7-1, casi todos los gases tienen concentración constante. El oxígeno y el nitrógeno, ambos con dos átomos, constituyen el 99.04% en volumen, en tanto que los átomos de argón inerte el 0.93%. Los demás constituyentes del aire seco sólo equivalen al 0.03%. El dióxido de carbono, por ejemplo, es indispensable para la vida y tiene importancia crítica para el control del clima. El ozono, principalmente presente arriba de 15 km de altitud, es muy tóxico y también afecta el clima; además, nos protege de la radiación ultravioleta dañina. La concentración de dióxido de carbono, ozono y radón (un producto de la desintegración radiactiva que escapa desde la tierra sólida) es variable.

El aire seco tiene una composición tan constante que podemos tratarlo como un solo gas cuyo peso molecular es de 0.028964 kg/mol. En el intervalo de temperaturas y presiones que

**TABLA 7-1 COMPOSICIÓN DEL AIRE PURO SECO (SIN VAPOR DE AGUA) EN LA ATMÓSFERA BAJA, CON PESOS MOLECULARES Y FUNCIONES AMBIENTALES**

Gases	Fórmulas	Concentración (% en volumen)	Peso molecular (kg/mol $\times 10^3$ )	Función ambiental
<i>Gases activos</i>				
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78.09	28.0	Inerte como N <sub>2</sub> ; indispensable para la vida como N
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.95	32.0	Indispensable para la vida; químicamente activo
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	$5.0 \times 10^{-5}$	2.0	Importante en la química atmosférica
<i>Gases inertes</i>				
Argón	Ar	0.93	39.9	Inerte
Neón	Ne	$1.8 \times 10^{-3}$	20.2	Inerte
Helio	He	$5.2 \times 10^{-4}$	4.0	Inerte; escapa de la corteza terrestre
Criptón	Kr	$1.0 \times 10^{-4}$	83.7	Inerte
Xenón	Xe	$8.0 \times 10^{-6}$	131.3	Inerte
Radón	Rn	$6.0 \times 10^{-18}$	222.0	Radiactivo; variable con la altitud y el tiempo porque se desintegra
<i>Gases variables</i>				
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	$3.6 \times 10^{-2}$	44.0	Indispensable para la vida, ópticamente activo
Ozono	O <sub>3</sub>	$1.0 \times 10^{-6}$	48.0	Tóxico, óptica y químicamente activo

Otros constituyentes presentes en cantidades muy pequeñas son dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de un solo nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y diversos contaminantes.

Fuente: R. J. List, *Smithsonian Meteorological Tables* (Washington, D.C.: Smithsonian Institution, 1951, tabla 110, pág. 389, con el CO<sub>2</sub> actualizado.)

se observa en la naturaleza, el aire seco obedece la ley que gobierna a un gas perfecto, es decir,  $PV = nRT$  [ecuación (6.41)], o, expresado de manera un poco diferente,

$$p = R\rho T \quad (7.1)$$

en donde  $p$  = presión (N/m<sup>2</sup> = pascal)

$\rho$  = densidad (kg/m<sup>3</sup>)

$T$  = temperatura Kelvin (K)

$R$  = constante de los gases para aire seco (287.0 J/kg · K)

Esta ecuación de estado es una de las leyes que gobiernan el comportamiento de la atmósfera. En realidad se necesitan sólo dos parámetros, de modo que en la práctica empleamos la temperatura y la presión, las cuales son más fáciles de medir. La temperatura superficial media

de la Tierra es de 288 K, y la presión media en el nivel del mar es 1,013.2 mbar. [Por comodidad, el meteorólogo utiliza el **milibar** (mbar) como unidad. Un mbar es igual a 100 pascales (Pa).] Observe que la presión no determina la temperatura, ni viceversa: el aire frío puede tener baja presión y el aire caliente alta presión.

En la atmósfera puede haber agua en forma de gas (vapor), sólido o líquido. El vapor de agua está presente siempre, y su presión parcial puede llegar hasta 40 mbar, equivalente al 4% en volumen aproximadamente. El agua precipitable es el agua líquida, equivalente al vapor de agua presente en una columna cualquiera de la atmósfera. En la práctica, casi todo el vapor de agua está en los 5 km más bajos. El agua precipitable de toda la columna vertical de 1 m<sup>2</sup> de área varía desde casi cero en aire muy frío hasta alrededor de 60 kg/m<sup>2</sup> en las partes más húmedas de los países tropicales; en ocasiones alcanza los 50 kg/m<sup>2</sup> en las zonas templadas de Norteamérica. El peso molecular del agua natural es de 0.018016 kg/mol. El agua natural contiene dos isótopos estables de hidrógeno, el <sup>1</sup>H ordinario y el deuterio (<sup>2</sup>H o D), el cual contiene un neutrón adicional; \* también contiene cantidades muy pequeñas de tritio radiactivo (<sup>3</sup>H o T), en gran medida a causa de los ensayos con bombas atómicas realizados en el pasado.

Las partículas más pequeñas dentro de la atmósfera forman un aerosol (esto es, partículas de tamaño coloidal en un gas) pues no pueden precipitarse con rapidez. Las partículas detectables más pequeñas tienen un radio de 10<sup>-1</sup> a 10<sup>-3</sup> micrómetros (μm). Son bastante numerosas en las zonas continentales, en especial en las ciudades. En el mar el número de partículas es menor, pero el aire marítimo contiene muchas de mayor tamaño que no son cloruros y que desempeñan un papel fundamental en la condensación. Las partículas de cierto tamaño reflejan la luz solar de manera difusa formando las condiciones de visibilidad reducida que se conocen como bruma, neblina o niebla. Muchas partículas atmosféricas de hecho son líquidas, pues atraen la condensación de vapor de agua y se disuelven.

Sin el aerosol, las nubes, la lluvia y la nieve no se podrían formar. Pero el exceso de partículas, provenientes del humo de las chimeneas, el escape de los automóviles o la tierra suelta, reducen la visibilidad y pueden causar problemas de salud. La mayor parte de la contaminación del aire es de este tipo.

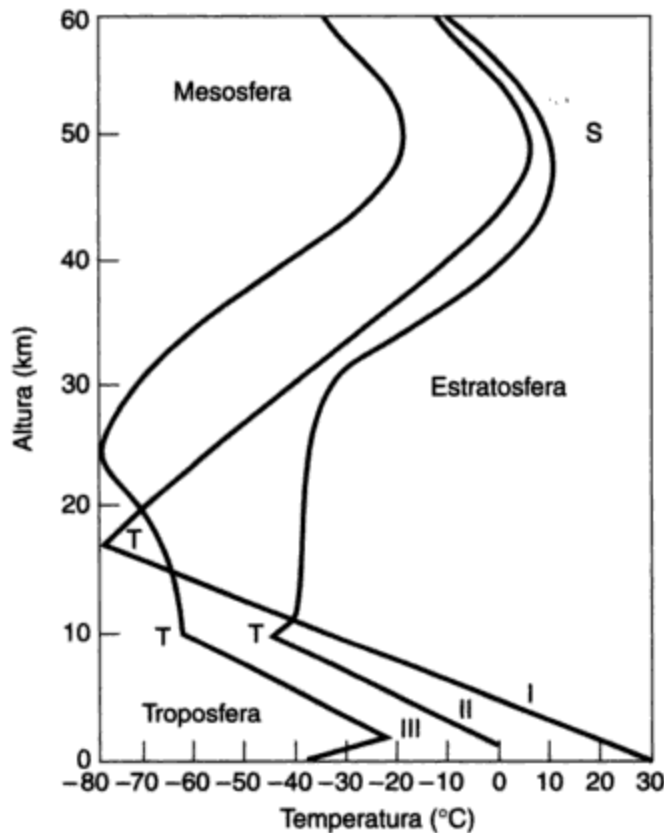
### 7.2.2 Estado térmico y eléctrico

La figura 7-1 muestra las capas permanentes de la atmósfera. En la base está la **troposfera**, rematada por una superficie de temperatura mínima llamada **tropopausa** localizada entre 10 y 17 km sobre el mar. En la troposfera la temperatura disminuye con la altura, pues la fuente principal de calor es la radiación solar que se absorbe en el suelo. La tasa de disminución, llamada **tasa de decaimiento**, es cercana a 5.0 K/km. La troposfera contiene casi todo el vapor de agua, las nubes y las tormentas de la atmósfera. Los vientos tienden a ser más fuertes en la tropopausa, que es donde se dan las corrientes de chorro. Éste es el nivel en el que los aviones vuelan.

Sobre la tropopausa la temperatura aumenta con la altura en la **estratosfera**, y alcanza un máximo a los 50 o 55 km, en la llamada **estratopausa**, en donde la temperatura es similar a la del aire en el nivel del suelo. Esta calidez se debe a la absorción de radiación ultravioleta del Sol por el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). Casi todo el ozono del planeta se encuentra en la estratosfera, en

\*La notación <sup>1</sup>H y <sup>2</sup>H se utiliza aquí para distinguir entre un átomo de hidrógeno ordinario de masa 1 (un protón) y un átomo de hidrógeno de masa 2 (un protón y un neutrón). El tritio, <sup>3</sup>H, tiene un neutrón adicional.





**Figura 7-1** Distribuciones típicas de la temperatura con la altura. I, áreas cálidas tropicales, todo el año; II, regiones polares, verano; III, regiones polares, invierno (T indica la tropopausa en cada curva; E es la estratopausa).

donde puede exceder 5 partes por millón en volumen (ppmv). Por consiguiente, el aire de la estratosfera es letal para los seres humanos, pues además hay muy poco vapor de agua a esa altitud.

La **mesosfera** se extiende desde la estratopausa, a 50 o 55 km, hasta otro mínimo de temperatura a los 80 km, la **mesopausa**. La mesosfera es una región ventosa y turbulenta; normalmente contiene muy poco vapor de agua para permitir la formación de nubes. Sobre la mesopausa la temperatura disminuye de forma indefinida a medida que se asciende hacia la **termosfera**, que es la atmósfera alta caliente.

El estrato más próximo a la superficie terrestre se llama **capa límite**. La **capa límite planetaria** (abajo de 1,000 m) es el estrato en el cual el viento sufre los efectos de la fricción con la superficie terrestre. Los 50 m inferiores suelen describirse como **capa límite de superficie**. Estas capas son muy importantes para el ingeniero, pues la mayoría de su trabajo se lleva a cabo en esos niveles.

Las temperaturas del aire, del mar y de la superficie terrestre están gobernadas por calentamientos y enfriamientos desiguales producidos por el Sol y la radiación saliente. Esto explica los conocidos cambios de temperatura durante un día cualquiera y entre una estación y otra, así como la razón por la cual los trópicos son cálidos y los polos fríos. El transporte de calor, por los vientos y las corrientes oceánicas, también afecta la temperatura del aire.

La atmósfera baja por lo común es eléctricamente neutra, en tanto que la atmósfera alta está ionizada. No obstante, existen fuertes gradientes de potencial, en especial dentro de las tormentas eléctricas y en torno a las mismas. En ocasiones, en una tormenta eléctrica se observan gradientes de 50,000 volts/m cerca del suelo. El rayo (una descarga) se produce cuando se

generan gradientes del orden de 100,000 a 300,000 volts/m en las imponentes nubes de las tormentas eléctricas. Las estructuras de ingeniería, como las torres de acero y los edificios altos, suelen ser afectadas por estas descargas.

## 7.3 SALIDAS Y ENTRADAS DE ENERGÍA

### 7.3.1 Radiación solar

El Sol suministra el 99.97% del calor que se utiliza para todos los procesos naturales en la superficie terrestre. Las otras fuentes son (1) la energía geotérmica, proveniente de la desintegración nuclear que se produce en el interior del planeta, y (2) la luz de las estrellas que llega del espacio. Ambas son minúsculas en comparación con el calor del Sol. Incluso la energía que utilizamos en nuestra economía principalmente es solar. El carbón, el petróleo y el gas natural contienen energía solar almacenada en tejidos vegetales, resultado de la fotosíntesis que se llevó a cabo en el pasado remoto. En la actualidad quemamos estos combustibles a una tasa mundial menor de  $10^{13}$  W, proporción pequeña en comparación con la cantidad de energía solar que recibe la Tierra ( $1.74 \times 10^{17}$  W). \* La energía media anual que se recibe es de  $5.5 \times 10^{24}$  J, o  $1.5 \times 10^{18}$  kWh.

El Sol es una estrella razonablemente constante. Podemos detectar sólo pequeñas variaciones en la naturaleza y la intensidad de la radiación que emite. Por esta razón hablamos de la **constante solar**, que es la intensidad de la radiación solar que alcanza la parte superior de la atmósfera terrestre.

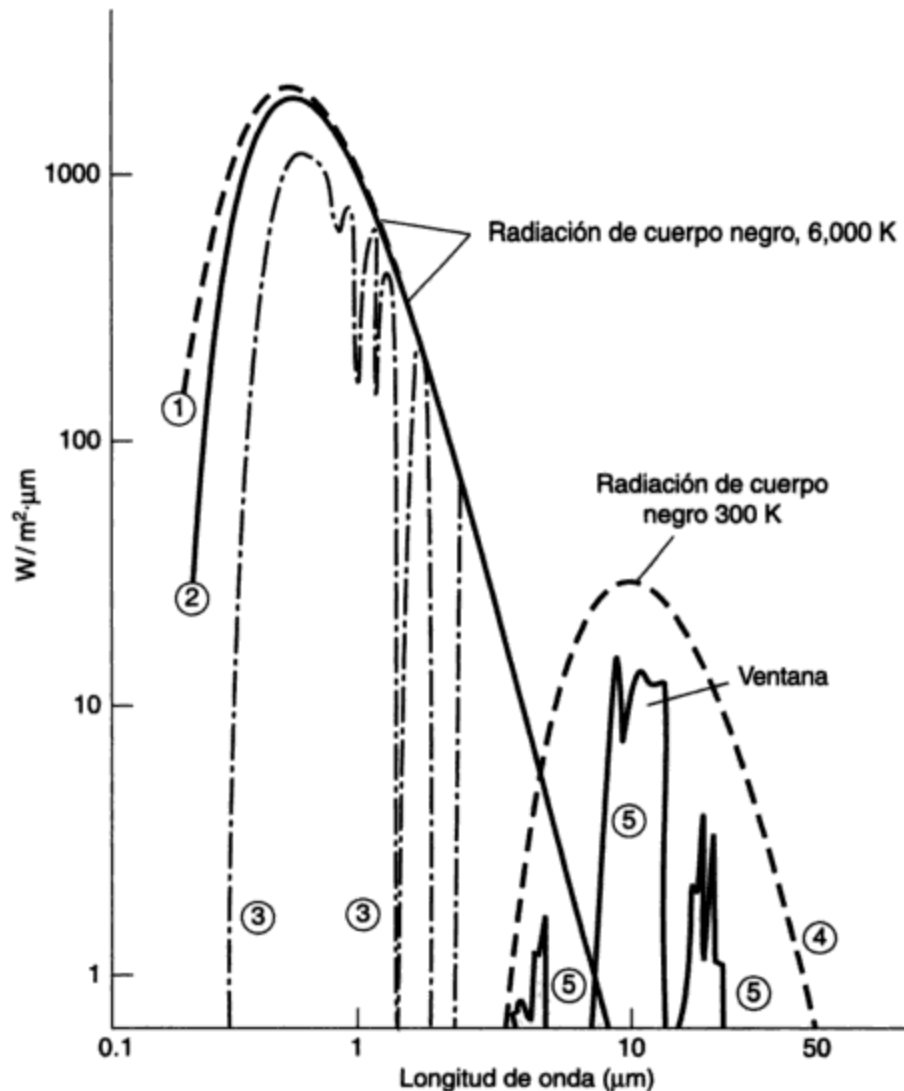
Medida en ángulo recto al haz solar, la constante solar se estima en 1368 W sobre cada metro cuadrado del perfil circular (disco) del planeta de cara al Sol. La rotación de la Tierra distribuye esta energía sobre la superficie de la esfera, cuya área es cuatro veces mayor que la del disco. Por consiguiente, la constante solar media por unidad de área en la superficie terrestre es de  $342 \text{ W/m}^2$ . (El área superficial de una esfera es igual a  $4\pi r^2$ .)

La radiación solar se asemeja a la de un cuerpo negro (el radiador perfecto) cercano a 6,000 K. La intensidad máxima se presenta cerca de una longitud de onda de 500 nm (véase la figura 7-2), con la mayor parte de la energía comprendida en el intervalo entre 200 y 5,000 nm. Los meteorólogos llaman a esto **radiación de onda corta** porque su longitud de onda es más corta que la longitud de la radiación que emite la Tierra misma. El ojo humano percibe la luz de 400 a 700 nm, aproximadamente, que se conoce como espectro de **luz visible**. La radiación de onda más corta (200 a 400 nm) se llama **ultravioleta**, y la de onda más larga es la **infrarroja**.

La figura 7-3 muestra la radiación solar media anual que se recibe en la superficie terrestre. Esta cantidad es inferior a la constante solar media real, porque los rayos solares se debilitan en su paso a través de la atmósfera. En promedio, la radiación se distribuye como sigue:

1. Las nubes, el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben alrededor del 17% y calientan la atmósfera directamente.


\* El watt, una unidad de potencia, es la rapidez con la cual se produce, consume o transmite energía. Equivale a 1 joule por segundo (J/s). Un kilowatt (kW) es  $10^3$  W. El kilowatt-hora se emplea comúnmente como unidad de energía, y equivale a  $36 \times 10^5$  J.



**Figura 7-2** Espectros de radiación solar (onda corta) y terrestre (onda larga). Fuente: Adaptado de Sellers (1965).

Potencia por unidad de área ( $W/m^2$ ) por longitud de onda en micrómetros emitida por un cuerpo negro a 6,000 K (curva 1) y otra a 300 K (curva 4), aproximadamente las temperaturas superficiales del Sol y de la Tierra, respectivamente. Las otras curvas tienen el siguiente significado: 2, potencia real de radiación solar en la parte superior de la atmósfera; 3, lo mismo en la base de la atmósfera; 5, potencia de la radiación que pasa directamente de la superficie terrestre al espacio (se muestra la ventana atmosférica).

2. Aproximadamente el 30% se refleja de regreso al espacio desde las nubes (por lo cual un observador situado en un vehículo espacial las ve de color blanco) y desde los gases o partículas atmosféricas.
3. Alrededor del 53% alcanza el suelo. Unas dos terceras partes de esto es en forma de luz solar directa, capaz de formar sombras. El resto es luz difusa: el azul del cielo y el gris de un día nublado.



**Figura 7-3** Radiación solar media anual sobre una superficie horizontal en el nivel del suelo ( $\text{W/m}^2$ ). Fuente: M. Budyko, *The Heat Balance of the Earth's Surface*, traducido por N. S. Stepanova (Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, 1958).

La intensidad media real (el promedio de 24 horas) de radiación solar en el nivel del suelo varía desde alrededor de  $250 \text{ W/m}^2$  en los desiertos subtropicales hasta  $80 \text{ W/m}^2$  en las áreas subpolares nubladas. Por supuesto, la intensidad es cero durante la noche, y los valores durante el día son considerablemente mayores que el promedio. En ocasiones, con tiempo despejado, cuando el Sol está en dirección casi vertical arriba del área, se observan valores cercanos a la constante solar ( $1368 \text{ W/m}^2$ ) durante periodos cortos. En áreas de latitud media, los valores medios están entre  $130$  y  $160 \text{ W/m}^2$  con base en 24 horas.

Por consiguiente, para acumular  $1 \text{ kW}$  de energía solar es necesario recolectarla sobre un área de  $6$  a  $8 \text{ m}^2$ , si se logra una absorción perfecta. La radiación solar tiene poca energía por unidad de área y por tanto es costoso transformarla para usos que requieren una temperatura alta. Para utilizar la energía en forma de calor se necesitan colectores grandes y una amplia capacidad de almacenamiento.

### 7.3.2 Radiación terrestre

Todos los años el Sol continúa calentando la Tierra, cuya temperatura permanece casi sin variación. Por consiguiente, la Tierra debe enviar de regreso al espacio la misma cantidad de energía. Esto sólo lo puede hacer por radiación. La superficie del planeta en gran medida actúa como cuerpo negro con una temperatura de  $288 \text{ K}$ . De tal forma, emite energía a longitudes de onda entre  $4,000$  y  $50,000 \text{ nm}$ . La intensidad máxima está casi en  $10,000 \text{ nm}$ . Es por esto que a la radiación terrestre se le suele llamar **radiación de onda larga**. Las nubes también irradian como cuerpos negros y sólo están un poco más frías que la Tierra. El flujo necesario de retorno al espacio adopta la forma de radiación de onda larga desde (a) la superficie terrestre o (b) la atmósfera, en especial la parte superior de las nubes.

La atmósfera es en gran medida transparente; la mayor parte de sus gases no absorben ni emiten demasiada radiación, con tres excepciones importantes:

1. El vapor de agua ( $H_2O$ ) absorbe y emite radiación con gran intensidad, entre 5,000 y 7,000 nm y arriba de 17,000 nm.
2. El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) absorbe y emite intensamente cerca de 4,500 nm y arriba de 13,500 nm.
3. El ozono ( $O_3$ ) absorbe y emite cerca de 9,600 nm.

Por tanto, con tiempo despejado existe un hueco o "ventana" entre 7,000 y 13,500 nm por el cual la radiación de longitud de onda larga, emitido por la superficie terrestre o las nubes, escapa libremente al espacio. Además, los gases  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $O_3$  envían radiación hacia el espacio en las bandas de ondas señaladas. Un observador o un satélite que mira hacia la Tierra ve la radiación ascendente de longitud de onda larga que proviene de diversos niveles de la atmósfera o de la superficie terrestre. Si elige el espectro apropiado, el observador puede identificar el nivel desde el cual procede la radiación y, con base en su intensidad, estimar la temperatura de la capa o superficie emisora. De esta manera, aun de noche los satélites examinan la Tierra y pueden identificar nubes y medir su altura. También es posible medir perfiles verticales de temperatura. Con los datos que los satélites proporcionan acerca de la radiación visible reflejada y la de ondas largas emitidas se elaboran películas cinematográficas del movimiento de las nubes. El efecto de la absorción y emisión de ondas largas por parte de estos gases y por las nubes hace más difícil el escape de la energía hacia el espacio, a diferencia de lo que sería en una atmósfera transparente y seca. Esta acción de los gases y las nubes suele describirse como **efecto invernadero**, que causa que la superficie terrestre sea unos  $33^\circ C$  más caliente de lo que sería de otra manera.

### 7.3.3 Balance de radiación superficial

La rapidez de calentamiento o enfriamiento neto por radiación en la superficie terrestre se llama **radiación neta** o **balance de radiación**. Se dispone de instrumentos llamados radiómetros netos para medir esta cantidad, que es la suma de todas las ganancias y pérdidas de energía radiante en la superficie terrestre (figura 7-4) y está determinada por

$$R_n = I(1 - a) + R\downarrow - \epsilon\sigma T^4 \quad (7.2)$$

Términos: (1) (2) (3)

en donde  $R_n$  = radiación neta ( $W/m^2$ )

$I$  = radiación solar en la superficie ( $W/m^2$ )

$a$  = albedo para radiación de onda corta (adimensional)

$R\downarrow$  = radiación de onda larga descendente de la atmósfera ( $W/m$ )

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

$T$  = temperatura de la superficie (K)

$\epsilon$  = emisividad de la superficie (proporción de la radiación real a la de cuerpo negro) (adimensional)

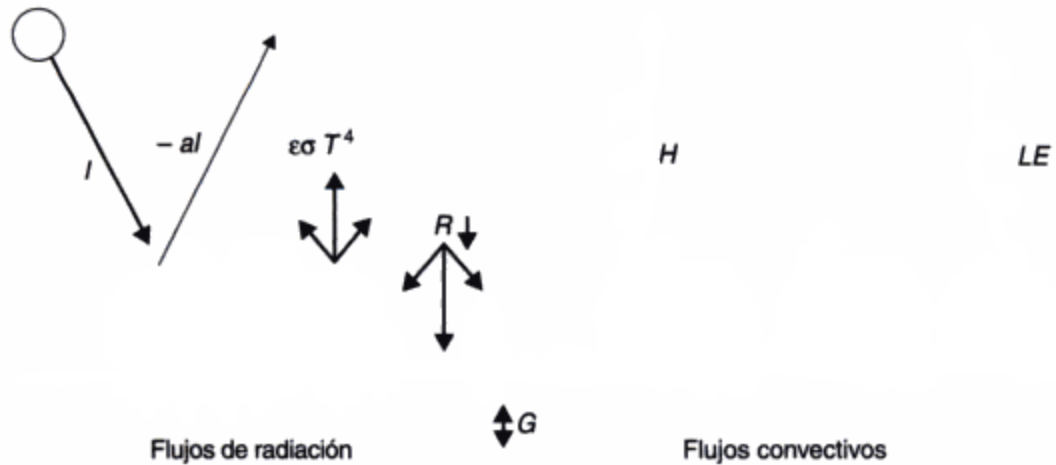


Figura 7-4 Balance térmico en la superficie.

El calentamiento y el enfriamiento por radiación incluyen:

- $I$ , la radiación solar (onda corta) que entra
- $-al$ , la fracción de  $I$  que se refleja sin utilizarse
- $\epsilon\sigma T^4$ , radiación de onda larga que se aleja de la superficie
- $R \downarrow$ , radiación de onda larga que regresa del aire (del  $\text{CO}_2$ , el vapor de  $\text{H}_2\text{O}$ , el  $\text{O}_3$  y las nubes)

El calentamiento y el enfriamiento convectivos incluyen:

- $H$ , el flujo específico de calor sensible (por lo común ascendente) debido a remolinos
- $LE$ , el flujo específico de calor latente, también debido a remolinos, asociado a la evaporación o condensación en la superficie
- $G$ , el flujo térmico específico hacia dentro y fuera del suelo, debido principalmente a conducción

Un signo positivo significa ganancia de energía en la superficie. Puesto que todos los flujos radiantes (esto es, potencia por unidad de área) se miden o se calculan con respecto a una superficie horizontal, se puede pensar en ellos como en transferencias **verticales** de energía.

El término (1) del lado derecho de la ecuación es la **radiación solar absorbida**, en donde  $a$  es el **albedo**, es decir, la fracción de radiación solar que se refleja. El albedo de la superficie depende de la naturaleza del material (suelo, plantas o agua). En la tabla 7-2 se muestran valores representativos. Casi todas las superficies terrestres tienen albedos del orden de 0.1 a 0.3. El de la nieve pasa comúnmente de 0.8, y el del agua es menor de 0.1.

El término (2),  $R \downarrow$ , es el calentamiento de la superficie debido a la radiación de onda larga proveniente de las nubes, el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono y los aerosoles, la cual suele ser menor que  $\epsilon\sigma T^4$  [término (3)], que es el escape de radiación de onda larga de la superficie, de modo que la suma de las ganancias y pérdidas de onda larga es por lo general un enfriamiento neto. La mayor parte de los materiales naturales irradian casi como cuerpos negros a estas temperaturas; es decir, emiten energía a un flujo radiante de  $\sigma T^4$  de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann. Sin embargo, las pérdidas reales son normalmente un poco inferiores a los valores de cuerpo negro, y la emisividad  $\epsilon$  es por lo común del orden de 0.90 a 0.98. En la tabla 7-2 también se incluyen valores representativos de  $\epsilon$ .

TABLA 7-2 PROPIEDADES RADIANTES DE LAS SUPERFICIES NATURALES

Superficie	Comentario	Albedo, $a$	Emisividad (todas las ondas), $\epsilon$
Suelos	Oscuro, húmedo	0.05–0.40	0.90–0.98
Desierto		0.20–0.45	0.84–0.91
Hierba	Larga (1.0 m)	0.16	0.90
	Corta (0.02 m)	0.26	0.95
Cultivos agrícolas y tundra		0.18–0.25	0.90–0.99
Huertos		0.15–0.20	—
Bosques			
Caducifolios	Hojas caídas	0.15	0.97
	Hojas en el árbol	0.20	0.98
De coníferas		0.05–0.15	0.97–0.99
Agua	Ángulo cenital pequeño	0.03–0.10	0.92–0.97
	Ángulo cenital grande	0.10–1.00	0.92–0.97
Nieve	Vieja	0.40	0.82
	Reciente	0.95	0.99
Hielo	Marino	0.33–0.45	0.92–0.97
	De glaciares	0.20–0.40	

Fuente: Oke (1978).

### Ejemplo 7.1

Calcule la radiación neta  $R_n$  en las siguientes condiciones:

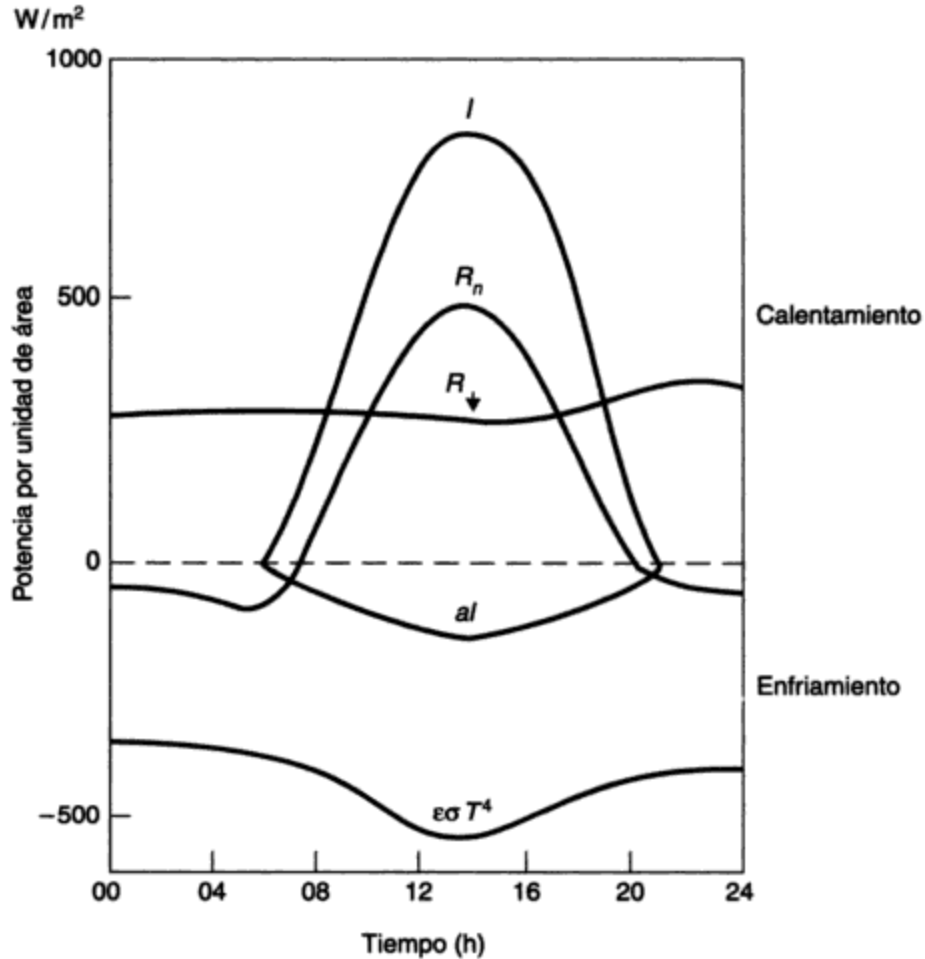
- Radiación solar que llega al mediodía,  $I = 1000 \text{ W/m}^2$
- Albedo de la superficie,  $a = 0.20$
- Emisividad,  $\epsilon = 0.95$
- Temperatura de la superficie,  $T = 300 \text{ K}$
- Radiación de onda larga descendente de la atmósfera,  $R \downarrow = 250 \text{ W/m}^2$  (medida)

**Solución** De la ecuación (7.2),

$$\begin{aligned}
 R_n &= 100(1 - 0.2) + 250 - 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 300^4 \\
 &= 800 + 250 - 440 \\
 &= 610 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

Cada uno de los torrentes de radiación varía diariamente y cada año; por tanto, también lo hace  $R_n$ . La figura 7-5 ilustra la radiación de un día de verano típico, con su amplia variación. Se incluye lo siguiente:

1. La radiación solar es casi cero durante la noche; aumenta hasta un máximo cerca del mediodía local, y después regresa a cero inmediatamente después del ocaso. La afluencia diaria total depende de la cercanía del Sol respecto a la vertical al mediodía (una función



**Figura 7-5** Intercambios de energía sobre hierba corta, Matador, Saskatchewan, 30 de julio de 1971. Fuente: Oke (1978).

Las curvas son representativas para un día despejado y soleado. La radiación solar,  $I$ , y la radiación de onda larga de la atmósfera,  $R_{\downarrow}$ , calientan la superficie. La misma se enfría por efecto de la radiación solar reflejada,  $al$  ( $a$  es el albedo), y la radiación de onda larga emitida,  $\epsilon\sigma T^4$ . Observe que los intercambios de onda larga varían muy poco durante las 24 h.

de la estación y la latitud) y se mide con facilidad. El albedo también se determina sin dificultad, pues basta con medir la radiación que entra y después se invierte el instrumento para medir la luz solar reflejada. La proporción de la radiación saliente con la entrante da el albedo.

- Es mucho más difícil observar el calentamiento por ondas largas de la atmósfera y el enfriamiento por ondas largas de la superficie. Estos valores se calculan ordinariamente con base en mediciones de temperatura y humedad del aire; a diferencia de la radiación solar varían con lentitud y por lo común la suma de los mismos es un enfriamiento tanto de día como de noche. Durante el día el calentamiento solar compensa el enfriamiento neto por ondas largas, pero en la noche predomina este último. La temperatura desciende hasta el amanecer.



- Los cambios en el tiempo meteorológico causan una variación considerable en las cantidades de todos los tipos de radiación. Un cielo encapotado, por ejemplo, en gran medida impide el enfriamiento por ondas largas porque la radiación descendente de éstas es intensa en esas condiciones. Las nubes también reducen la radiación solar. Así pues, los días despejados y los nublados tienen temperaturas muy diferentes.

### 7.3.4 Uso de energía en la superficie

¿Cómo se utiliza la energía de la ecuación (7.2)? Una sencilla ecuación de balance térmico (véase la figura 7-4) proporciona la respuesta. Tenemos lo siguiente

$$R_n - G = H + LE + MS + Q \quad (7.3)$$

(ganancia de calor)                      (calor utilizado)

en donde  $R_n$  = radiación neta, como en la ecuación (7.2) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G$  = pérdida de calor por conducción hacia el suelo (flujo térmico específico al suelo) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$H$  = pérdida de calor por flujo ascendente de remolinos calientes (flujo térmico específico turbulento) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E$  = evapotranspiración de agua (evaporación más transpiración a través de tejidos vegetales) ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$S$  = nevadas por derretir ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$Q$  = conversión de energía por fotosíntesis en las plantas verdes ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$L, M$  = calores latentes de vaporización y de fusión del agua y del hielo (casi constantes  $2.44 \times 10^6$  y  $3.33 \times 10^5$  J/kg, respectivamente)

El calor fluye hacia dentro y fuera del suelo principalmente por conducción a una velocidad  $G$ , que se mide con facilidad por medio de transductores de flujo térmico específico de suelo. El flujo es descendente cuando el calentamiento solar es intenso y ascendente el resto del tiempo; tiende a desvanecerse a lo largo de un día o de un año y es, en todo caso, pequeño (del orden de un décimo a un centésimo de  $R_n$ ). Este flujo suele pasarse por alto, o bien se considera como una pequeña reducción de la radiación neta [es por ello que aparece a la izquierda en la ecuación (7.3)]. El flujo geotérmico específico, procedente del interior del planeta, es aún menor y también se puede pasar por alto, excepto en las zonas volcánicas.

El calentamiento neto ( $R_n - G$ ) es la fuente de calor para los procesos del lado derecho de la ecuación (7.3), que son los siguientes:

- $H$  y  $LE$  son los flujos térmicos específicos sensible y latente, respectivamente, que son acarreados hacia la superficie y desde ella por remolinos turbulentos del viento: las ráfagas y movimientos ascendentes y descendentes típicos del tiempo ventoso.
- $MS$  es el calor necesario para derretir la nieve. Éste es normalmente pequeño, pero en regiones con fuertes nevadas se puede utilizar de esta manera hasta el 10% de la afluencia anual neta de radiación.
- $Q$  es la muy pequeña cantidad de calor que las plantas verdes utilizan durante la manufactura de tejidos por fotosíntesis; rara vez es más del 1% de la radiación neta.

**Ejemplo 7.2**

Un valor típico de la radiación neta diurna en el verano es el de  $+500 \text{ W/m}^2$ , y el del flujo térmico específico de suelo es  $-10 \text{ W/m}^2$ . Por tanto, el calentamiento neto es de  $490 \text{ W/m}^2$ . Sobre un suelo húmedo y cubierto de plantas los valores típicos de los otros términos de la ecuación (7.3) serían los siguientes:

Fotosíntesis, $Q$	$5 \text{ W/m}^2$
Flujo térmico sensible, $H$	$85 \text{ W/m}^2$
Calor latente debido a evapotranspiración, $LE$	$400 \text{ W/m}^2$

Sin embargo, si el suelo es seco, la mayor parte del calor disponible producirá flujo térmico sensible, no evaporación. La proporción  $H/LE$  se conoce como **relación de Bowen**. En este ejemplo su valor es  $85/400$ , o aproximadamente  $0.21$ ; en condiciones de frío o sequedad es mucho mayor. La relación de Bowen desempeña un importante papel en hidrología y climatología.

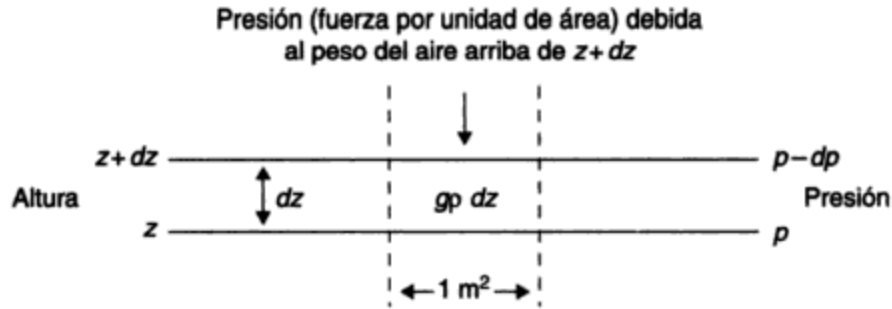
**7.4 VIENTO, ESTABILIDAD Y TURBULENCIA****7.4.1 Movimiento de la atmósfera baja**

Si el aire se mueve respecto al suelo, podemos sentirlo o verlo como viento, esto es, tan sólo aire en movimiento. Una serie de fuerzas pone en movimiento (acelera) al aire:

1. La **fuerza de gradiente de presión** que tiende a impulsar el movimiento del aire de áreas con alta presión a zonas con baja presión.
2. La **gravitación**, la cual tiende a acelerar el aire hacia abajo a una tasa próxima a  $9.8 \text{ m/s}^2$ .
3. La **fricción**, que actúa en sentido opuesto a la dirección del viento y es aproximadamente proporcional al cuadrado de la velocidad del viento.
4. La **fuerza de Coriolis**, causada por la rotación del planeta y que suele llamarse *fuerza deflectora* de la rotación de la Tierra. Ésta actúa en ángulo recto a la dirección del viento y es proporcional a la velocidad del mismo; por consiguiente, actúa hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur (si se observa desde arriba).

En la práctica, el viento tiende a soplar de manera constante (esto es, sin cambios de velocidad o de dirección) respecto a la Tierra. La *segunda ley de Newton* dice que si se aplica una fuerza, se produce una aceleración proporcional. Por consecuencia, si no hay una aceleración, no puede haber fuerzas que estén actuando. Puesto que estas fuerzas no existen, es evidente que por lo común deben estar en equilibrio; es decir, se cancelan entre sí. Sólo de esta manera el viento puede soplar con velocidad constante. En otras palabras, el aire se mueve normalmente sujeto a un equilibrio de fuerzas.

Podemos entender esto con más facilidad si consideramos un kilogramo de aire en algún punto de la atmósfera. Esta masa sufre por efecto de la gravitación una aceleración de  $9.8 \text{ m/s}^2$  hacia abajo; no obstante, en la práctica casi siempre permanece en el mismo nivel. Así pues, la fuerza gravitatoria descendente debe estar equilibrada por fuerzas de igual magnitud y en sentido opuesto. De hecho, la fuerza de gradiente de presión ascendente es la que establece el



**Figura 7-6** Ecuación hidrostática: variación de la presión con la altura. La disminución de la presión,  $-dp$ , debida a la capa  $dz$  refleja el peso de la columna de  $1 \text{ m}^2$  que hay entre  $z$  y  $z+dz$ , que es  $g\rho dz$ . La presión  $p$  en el nivel  $z$  se debe al peso de todas las capas de este tipo que están arriba de él.

equilibrio. La presión atmosférica del aire en reposo simplemente se debe al peso del aire sobrepuesto (figura 7-6). Si consideramos la columna de aire como compuesta por planchas delgadas de  $1 \text{ m}^2$  de área y  $dz$  metros de espesor, el peso de cada una es, por definición,  $g\rho dz$ , en donde  $g$  es  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$  y  $z$  es la altura en metros. En cualquier nivel  $z$ , la presión está dada por

$$p = \int_z^{\infty} g\rho dz$$

la suma de los pesos de todas las capas que están arriba del nivel  $z$ . La atmósfera en reposo distribuye su masa de tal manera que el empuje ascendente debido a la disminución de la presión con la altura equilibra la aceleración descendente de la gravedad. Esto se expresa por medio de la **ecuación hidrostática**:

$$dp = -g\rho dz \quad (7.4)$$

Si despejamos  $\rho$  de la ecuación (7.1) y la sustituimos en la ecuación (7.4), obtenemos la ecuación

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz \quad (7.5)$$

la cual sirve para fijar altímetros o para calcular diferencias de presión en un pequeño intervalo de alturas. La presión hidrostática  $p$  es la misma en todas direcciones.

Por lo general, restringimos el significado de la palabra *viento* al movimiento horizontal del aire, el cual percibimos en nuestra cara o espalda. El equilibrio de fuerzas para un movimiento uniforme, recto y sin fricción se expresa como sigue:

$$2\omega \sin\phi \rho V_g = \frac{dp}{dn} \quad (7.6)$$

en donde  $\omega$  = velocidad de rotación de la Tierra ( $7.3 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ )

$\phi$  = latitud

$V_g$  = velocidad del viento, paralela a las isobaras (líneas de presión constante  $\text{m/s}$ )

$dp/dn =$  gradiente de presión (esto es, la razón de cambio de la presión  $p$  con respecto a la distancia  $n$  en ángulo recto a las isobaras) ( $N/m^3$ )

En este caso, la fuerza de gradiente de presión por unidad de masa está equilibrada por la fuerza de Coriolis, que es el término de la izquierda en la ecuación (7.6). El aire fluye a lo largo de las isobaras a una velocidad  $V_g$ , la cual es lo suficientemente grande para que el término de la izquierda sea igual en magnitud al término de gradiente de presión del lado derecho. La ecuación (7.6) define al **viento geostrófico**, uno idealizado que se acerca mucho al viento real a todas las altitudes de 600 a 1,000 m sobre el suelo.

La figura 7-7 muestra el funcionamiento del equilibrio. En el punto  $P$ , usando la escala de distancias podemos estimar el gradiente de presión en 15 mbar/1,000 km, igual a  $15 \times 10^2 N/m^2/10^6 m$ . El viento sopla a lo largo de las isobaras a una velocidad  $V_g$  manteniendo la presión baja a su izquierda, pues hipotéticamente estamos tratando con el hemisferio norte. Si insertamos el valor anterior en la ecuación (7.6), obtenemos  $V_g \approx 20 m/s$  a  $30^\circ$  de latitud. En otras palabras, para que la fuerza deflectora sea igual y en sentido opuesto a la fuerza de gradiente de presión, el viento debe soplar a lo largo de las isobaras a 20 m/s en el caso que se muestra en la figura 7-7.

Desde luego, podemos medir con facilidad el viento rastreando globos flotantes o montando una veleta con un sensor de velocidad anexo, pero es más fácil medir la presión por medio de un barómetro. Los mapas meteorológicos emplean la distribución de presión como indicador principal del viento. La presión se mide simultáneamente en miles de estaciones de todo el mundo, los valores se estandarizan al nivel del mar por medio de la ecuación (7.5), y

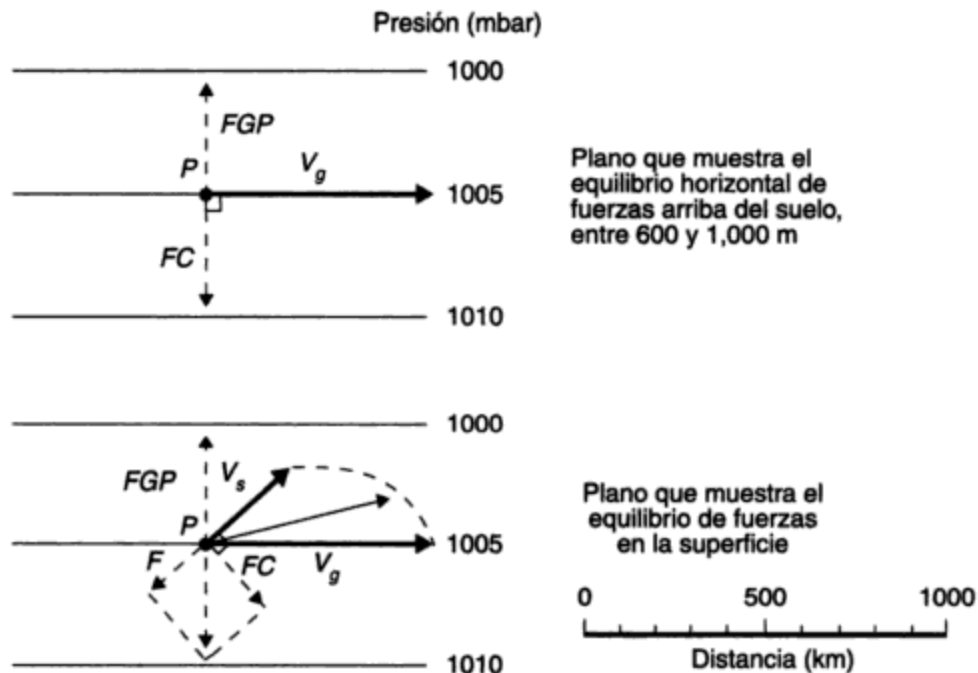


Figura 7-7 Relación entre viento y presión en el plano horizontal.

después se dibujan las isobaras. El mapa resultante es una buena aproximación de la distribución del viento y también de la presión. La ecuación (7.6) permite calcular la velocidad del viento, pues las isobaras son líneas aproximadas de corriente.

La figura 7-7 muestra de forma idealizada la relación del viento con las isobaras de presión constante. Entre 600 y 1,000 m, el viento fluye a lo largo de las isobaras a una velocidad  $V_g$  (el viento geostrófico) a la cual la fuerza de Coriolis (FC) es igual y opuesta a la fuerza de gradiente de presión (FGP). En la superficie, la fricción ( $F$ ) con el suelo retarda el viento, de modo que la fuerza de Coriolis disminuye y ya no compensa la fuerza de gradiente de presión (FGP). Para equilibrar la FCP, el viento vira a través de las isobaras (diagrama inferior) de modo que FC y  $F$  juntas compensen la FGP (véase el paralelogramo de fuerzas). El ángulo que el viento de superficie  $V_s$  hace con la isobara es del orden de  $40^\circ$ , y la velocidad es alrededor de la mitad de la del viento geostrófico  $V_g$ . A medida que uno de los niveles asciende, el viento aumenta y vira hacia la isobara. La punta de la flecha del viento traza una curva espiral durante el ascenso (véase el diagrama inferior, en donde se representa una muestra de viento de nivel medio). El sistema se invierte en el hemisferio sur.

En los mapas meteorológicos reales las isobaras rara vez son rectas. Los mapas muestran áreas ovaladas o circulares de alta y baja presión de cientos o incluso miles de kilómetros de ancho. El aire libre fluye en el sentido de las manecillas del reloj a lo largo de las isobaras de un sistema de alta presión (un **anticiclón**), y en sentido contrario en un sistema de baja presión (un **ciclón**). Esta regla para el hemisferio norte se invierte en el sur. No obstante que las isobaras son de hecho curvas y por tanto el viento cambia de dirección, de cualquier manera la velocidad es cercana al valor geostrófico en la mayor parte de los casos. Los anticiclones y ciclones representan gigantescos remolinos horizontales en la atmósfera, que emigran con lentitud y llevan consigo tiempo bueno (anticiclones) o malo (ciclones). Cerca del ecuador la relación entre el viento y la presión se pierde y las diferencias de presión son pequeñas (porque la fuerza de Coriolis es cero en el ecuador).

### 7.4.2 Turbulencia y estabilidad

Las reglas recién descritas permiten varias clases de movimiento. En la práctica pensamos en el viento tanto como movimiento organizado, descrito en la ecuación (7.6), como movimiento desorganizado, o turbulencia, que esta ecuación no describe. Los vientos organizados y la turbulencia son importantes desde el punto de vista ambiental porque transportan vapor de agua, dióxido de carbono, calor y contaminantes. En esta sección examinaremos la turbulencia, de gran importancia para producir el transporte vertical. Además de ser importante en el estudio de la contaminación del aire (capítulo 13), la turbulencia es decisiva en el diseño de edificios, aviones, puentes y otras estructuras expuestas al viento. Las ráfagas y torbellinos del aire turbulento causan el esfuerzo más intenso que estas estructuras deben resistir.

En la atmósfera, la turbulencia es de dos tipos: forzada y libre. La *turbulencia forzada* se produce cuando el viento encuentra obstáculos, como sucede siempre en la superficie terrestre. Se crea *turbulencia libre* cuando la atmósfera favorece el crecimiento de pequeñas perturbaciones iniciales. Por lo común, esto se debe a que el movimiento libera fuerza ascensional. Ambas clases de turbulencia se producen cerca del nivel del suelo y también en las capas más altas. Ciertas distribuciones de temperatura en la atmósfera fomentan la turbulencia, o *convección libre*, como es mejor llamarla. En la figura 7-1 vemos que la temperatura de la troposfera

por lo general disminuye con la altura (esto es,  $dT/dz$  es negativo). La **tasa de decaimiento ambiental** se define como la rapidez con la que la temperatura disminuye a medida que uno asciende a través de la atmósfera, y normalmente es más o menos de 5 K por kilómetro de ascenso. Si una burbuja o una plancha de aire se eleva, ya sea libremente o de manera forzada, su presión se reduce y el volumen se expande. Se hace trabajo contra el aire circundante. Esto origina un enfriamiento del aire en ascenso que describe la ecuación

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p} \quad (7.7)$$

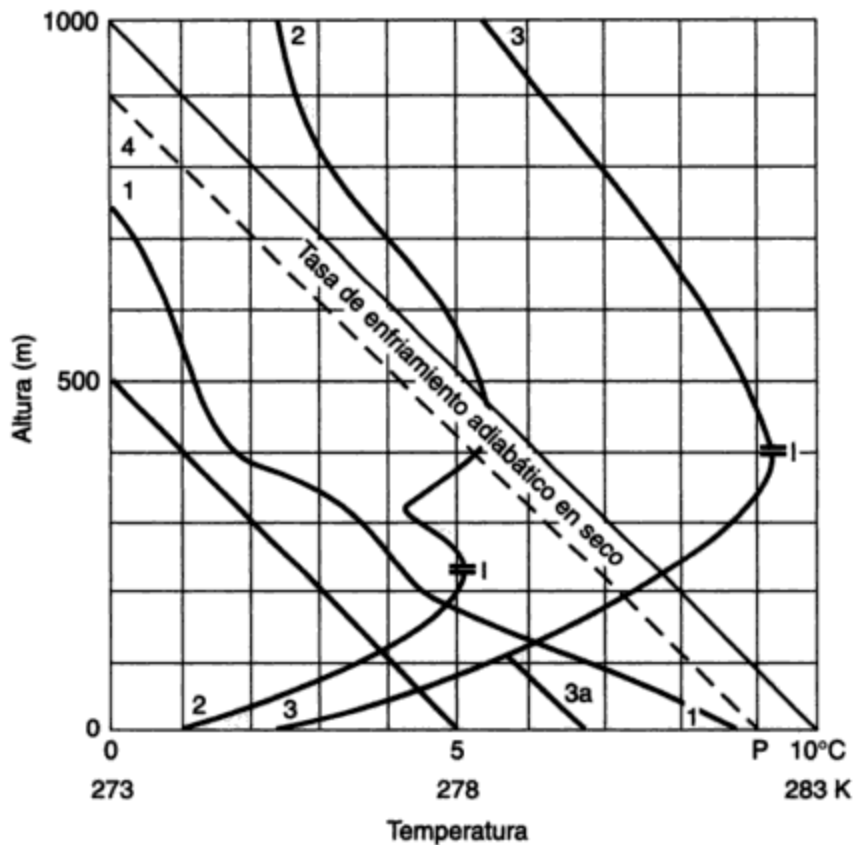
en donde  $g$  es la aceleración debida a la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) y  $c_p$  es el calor específico del aire a presión constante ( $1.0 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ). Esta ecuación define la **tasa de enfriamiento adiabático en seco**, válida sólo en tanto no se produzca condensación. La palabra *adiabático* significa "sin comunicación de calor", es decir, que el cambio de temperatura se debe a conversión de energía, no a pérdida de la misma. Puesto que  $g$  y  $c_p$  son casi constantes,  $dT/dz$  es constante en  $9.8 \text{ K/km}$ . El aire tiende a subir si la temperatura del aire circundante disminuye con la altura con una rapidez mayor que esta cifra. Esto sucede normalmente durante el día, cuando el Sol calienta el suelo, no de noche. Por tanto, la convección ascendente cerca del suelo está restringida sobre todo a las horas diurnas.

Si el aire está húmedo y se satura a medida que asciende, se forma una nube. El calor latente de vaporización se libera en el aire ascendente, el cual se enfría con mayor lentitud. Una tasa de enfriamiento típica para aire saturado es de 4 a 5 K/km, similar a los valores usuales de la tasa de decaimiento ambiental. Por tanto, el aire saturado ascendente (los sistemas de nubes de la atmósfera) por lo común se eleva más que el aire seco, porque conserva su flotabilidad durante más tiempo.

La **estabilidad** es la condición del aire que tiende a amortiguar toda convección que se pudiera presentar. La **inestabilidad** es lo opuesto: condición que fomenta el aumento de la convección. Para el aire no saturado, una tasa de decaimiento ambiental menor a  $9.8 \text{ K/km}$  es estable. El aire saturado lo es si la tasa de decaimiento ambiental es menor que la tasa de enfriamiento reducida en las corrientes ascendentes.

Las relaciones precedentes son visibles casi cualquier día soleado de las estaciones más cálidas. A medida que el Sol calienta el suelo, la tasa de decaimiento ambiental aumenta con rapidez, hasta que se crea una capa poco profunda con tasas de decaimiento mayores que la de enfriamiento adiabático en seco ( $9.8 \text{ K/km}$ ) (véase la figura 7-8). Esta capa es turbulenta y, a medida que el día avanza, puede adquirir una profundidad de 1 a 2 km. El vuelo de una aeronave ligera en esta capa sería muy accidentado. Si el aire está húmedo, se pueden formar nubes en muchas de las *térmicas* ascendentes que después suben a una altitud considerable, en especial si la troposfera alta es fría. Los **cúmulos**, que parecen **coliflores**, indican la presencia de estas columnas ascendentes. En condiciones bastante inestables (calor cerca del suelo, mucho frío arriba) pueden elevarse por encima del nivel de congelación. La parte superior de las nubes se extiende entonces para formar los conocidos nubarrones de tormenta con forma de yunque llamados **cumulonimbos** (véase la figura 7.12), de los cuales proceden los fuertes aguaceros. A medida que el anochecer avanza, el calentamiento solar en el nivel del suelo cesa y las condiciones vuelven a ser más estables. Las nubes dejan de crecer y se dispersan. Las tormentas eléctricas nocturnas, que son comunes en las masas de aire muy húmedas, en especial en las Grandes Llanuras de Estados Unidos, también requieren condiciones inestables, pero en este caso las pone en marcha un mecanismo diferente.

Las tasas de decaimiento ambiental negativas (esto es, un aumento de temperatura con la altura) son comunes en la noche, y en invierno pueden persistir durante todo el día. La parte superior de la capa de tasas de decaimiento negativas se conoce como una **inversión** (figura 7-8). Estas condiciones son muy estables. Por lo general hay poco viento, y los contaminantes que se emiten en la capa invertida se dispersan con lentitud. Puede haber niebla densa si el aire es húmedo. Las inversiones suelen producirse sobre las aguas de mares o lagos fríos y pueden ser arrastradas distancias cortas tierra adentro. Esto sucede en los valles costeros de California y en muchas localidades a lo largo de los litorales de los Grandes Lagos.



**Figura 7-8** Tasas de decaimiento de la temperatura en la capa límite.

Se muestra la tasa de enfriamiento adiabático en seco de 9.8 K por cada 1,000 m para aire a 10°C (283 K) y 5°C (278 K). El aire que sube del suelo se enfría con esta rapidez salvo cuando está saturado. La curva 1 muestra las condiciones representativas de las horas del mediodía con fuerte calentamiento. El aire caliente del punto *P* se eleva y se enfría a lo largo de la curva punteada 4, en tanto que la temperatura real de los alrededores, medida por sondeo efectivo (curva 1), es más baja, porque la tasa de decaimiento ambiental es mayor que la tasa adiabática en seco. Por tanto, el aire que sube tiene fuerza ascensional, porque el aire caliente es menos denso. La curva 2 muestra un ejemplo de una inversión superficial (marcada como *I*), con el aire a 220 m 4 K más caliente que en el suelo. Se produce una segunda inversión a 450 m. La curva 3 muestra una inversión mucho más fuerte a 400 m, típica del amanecer, con la temperatura en la inversión 7 K más alta que en la superficie. Más avanzada la mañana, cuando el Sol calienta el suelo y un viento agita las capas inferiores, se crea una capa poco profunda de tasa de decaimiento casi adiabático normal (curva 3a). El aire que sube del suelo en cualquiera de estos casos (curvas 2, 3 y 3a) pronto estará más frío que sus alrededores y dejará por tanto de tener fuerza ascensional. El humo, la bruma y los contaminantes quedan atrapados en esta clase de inversiones.

## 7.5 AGUA EN LA ATMÓSFERA

### 7.5.1 Humedad y precipitación

El agua tiene la propiedad especial de existir en la atmósfera en las tres fases: líquida, gaseosa y sólida. Se le llama **vapor** cuando está en fase gaseosa. Existe un límite superior para la concentración que el vapor de agua puede alcanzar, llamado **saturación**. En este punto, el vapor tiende a condensarse en formas líquidas o sólidas, siempre y cuando existan superficies idóneas en donde esto pueda suceder. El vapor saturado se condensa en pequeños núcleos higroscópicos dentro del aerosol que reciben el nombre de **núcleos de condensación**. En la atmósfera, la condensación por lo general forma agua líquida a temperaturas muy inferiores al punto de fusión del hielo puro (273.2 K); se dice entonces que las gotas están sobrenfriadas. Sólo abajo de 233 K la condensación forma siempre cristales de hielo. Las partículas de agua y de hielo son muy pequeñas (por lo común menores de 2,000 nm de diámetro) y permanecen suspendidas en forma de nubes o niebla. En el nivel del suelo el vapor también se puede condensar como rocío o helada blanca. Se da el nombre de *escarcha* al hielo transparente que se forma cuando las gotas sobrenfriadas se congelan al entrar en contacto con superficies sólidas.

La concentración del vapor de saturación sólo depende de la temperatura del vapor (o de una superficie plana de agua o hielo con la cual está en equilibrio). La presión parcial debida al agua en la atmósfera se conoce como la **presión de vapor**  $e$ , la cual siempre es menor de 40 mbar (4 kPa) y puede aproximarse a cero en el aire muy frío. La presión de vapor de saturación sobre agua,  $e_s$ , está dada con buena aproximación por

$$\log_{10} e_s (\text{mbar}) = 9.40 - \frac{2345}{T} \quad (7.8)$$

en donde  $T$  se considera como la temperatura del aire en el que está mezclado el vapor. La figura 7-9 es la curva de esta función comparada con la correspondiente para el hielo a menos de 273.2 K. Advierta que la presión de vapor es mucho menor sobre hielo que sobre agua sobrenfriada. La presión de vapor de saturación aumenta con rapidez a medida que la temperatura sube. Si se enfría aire no saturado, el vapor de agua se satura a una temperatura llamada **punto de rocío**. La condensación se inicia entonces sobre cualquier superficie idónea.

Se emplean otras medidas para expresar la humedad real del aire. Ya se ha mencionado la presión de vapor  $e$ . La **humedad relativa** es la relación  $e/e_s$ , que es la presión de vapor real dividida entre la presión de vapor de saturación a la temperatura del aire. La **razón de mezcla de humedad**  $x$  es la masa de vapor de agua mezclada con una masa unitaria de aire seco, y la **humedad específica**  $q$  es el vapor de agua contenido en una masa unitaria de aire húmedo. La **humedad absoluta**  $\sigma_w$ , o **densidad de vapor**, es la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire húmedo. Algunas fórmulas útiles son

$$q = \frac{x}{1+x} \quad (7.9)$$

$$x = \frac{q}{1-q} = \frac{0.622e}{p-e} \approx \frac{5e}{8(p-e)} \quad (7.10)$$

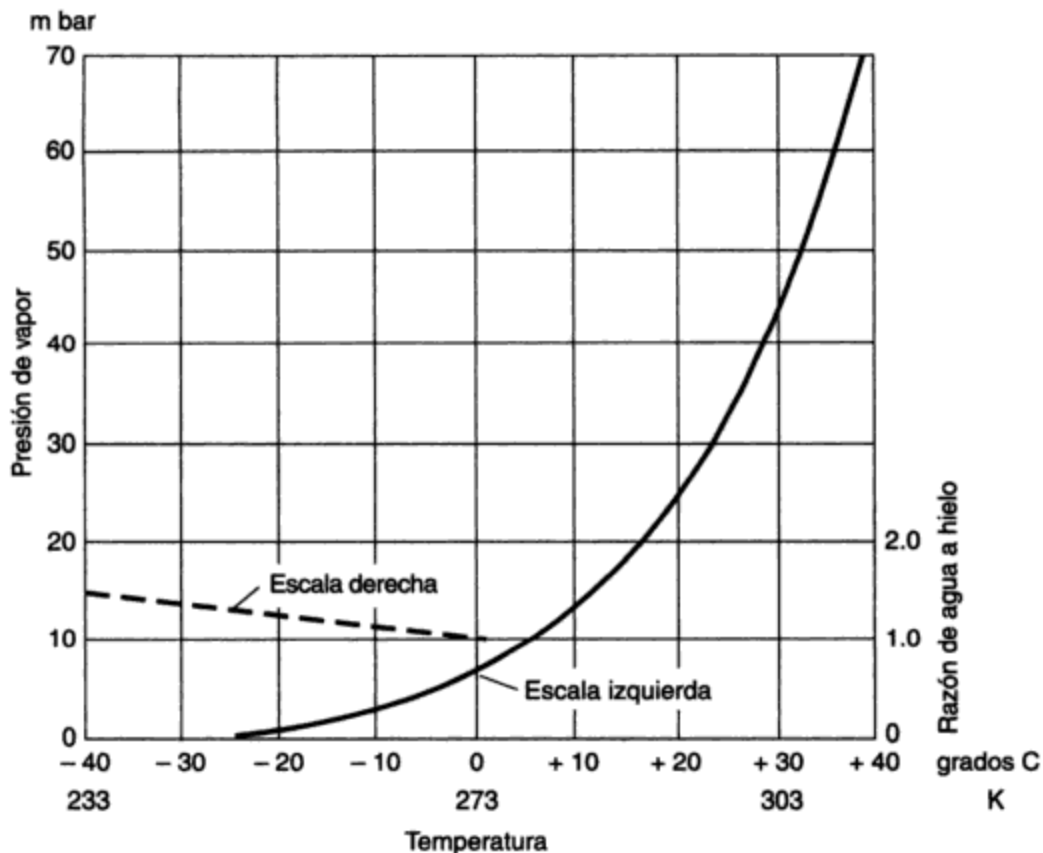
$$r = \frac{e}{e_s} \approx \frac{x}{x_s} \approx \frac{q}{q_s} \quad (7.11)$$



en donde  $p$  es la presión atmosférica en mbar y  $q$ ,  $x$  y  $r$  son todas cantidades adimensionales. No obstante,  $x$  y  $q$  se miden con provecho en g/kg, y  $r$  por lo general se da como un porcentaje de saturación (esto es, una humedad relativa de 0.7, descrita como 70%).

En virtud de que las gotitas de las nubes son numerosas, dan cabida a una mayor condensación con sólo un pequeño aumento en su radio. En estos tamaños todavía pequeños, las gotitas se mantienen en suspensión por efecto de la turbulencia del aire. Sin embargo, con frecuencia cae lluvia o nieve de nubes espesas. ¿Cómo sucede esto? Al menos hay dos explicaciones conocidas:

1. Si la temperatura de la nube es inferior a 273 K, pero mayor de 233 K, por lo común predominan las gotitas de agua sobrenfriada. Si se forman o caen en este tipo de nubes pequeños cristales de hielo, se encuentran en un medio sobresaturado con respecto al hielo (véase la figura 7-9). Por consiguiente, los cristales crecen con rapidez por condensación directa de sólido. Esto se conoce como **proceso de Bergeron-Findeisen**. Con el tiempo,



**Figura 7-9** Relación de la presión de vapor de saturación (sobre una superficie de agua plana) a la temperatura (°C y K).

La curva punteada (use la escala de la derecha) es la razón de la presión de vapor de saturación sobre agua a la presión de vapor de saturación sobre hielo a la misma temperatura. A 0°C (273 K), las dos son iguales. A -40°C (233 K), la presión de vapor de saturación sobre agua es mayor que la presión de vapor de saturación sobre hielo por un factor de 1.47.

los cristales pueden caer como nieve, en muchos casos después de fusionarse con otros o con gotitas subenfriadas que se congelan sobre ellos. Se presenta un peligro significativo para los aviones cuando estas gotitas sobrenfriadas se congelan en los bordes de entrada, como alas, hélices y puntales. Esto se conoce como *escarchado*.

2. Puesto que siempre existen diferencias de tamaño en las gotitas y los cristales, las velocidades de caída por adhesión dan origen al crecimiento de las gotitas más grandes. En circunstancias favorables, las gotitas pueden crecer hasta el punto en que caen al suelo. Las gotas de lluvia y de llovizna típicas tienen tamaños del orden de 0.5 a 2.5 mm.

La experiencia ha demostrado que los dos procesos anteriores normalmente se llevan a cabo en las nubes frías de las tormentas de lluvia y de nieve de latitudes medias y altas, puesto que se originan precipitaciones significativas en nubes que llegan sobre el nivel de congelación. No obstante, puede caer una cantidad considerable de lluvia de los cúmulos calientes de los trópicos marinos.

Toda la **precipitación** significativa (esto es, lluvia, nieve y granizo) cae de nubes formadas por elevación. El aire húmedo en ascenso se enfría de manera adiabática hasta abajo de su punto de rocío. Se reconocen dos amplias familias de nubes: (1) las que se deben a una elevación lenta y oblicua, llamadas **nubes de capa**, típicas de las tormentas ciclónicas estacionales más frías de ambos hemisferios, y (2) las que son producto de una rápida elevación convectiva de columnas de aire en condiciones inestables, llamadas **cúmulos** o **cumulonimbos**. Las dos situaciones descritas existen cuando el aire húmedo se ve obligado a subir montañas. En las figuras de la 7-10 a la 7-12 se muestran distintos tipos de nubes.

La familia de nubes de capa comprende los *estratos* (por lo común formados por enfriamiento superficial de aire húmedo), *altoestratos* o *nimboestratos* (nubes de lluvia o nieve) y *cirros*, *cirroestratos* y *cirrocúmulos* (nubes delgadas y tenues que es común observar contra el azul del cielo). Todas ellas se forman cuando el aire húmedo y caliente se eleva gradualmente (a velocidades típicas próximas a 0.1 m/s) conforme se mueve hacia el este o el noreste sobre aire más frío, por lo común en ciclones en formación. Este tipo de masas de nubes suelen hacerse lo suficientemente espesas y frías para iniciar la caída de nieve por el proceso de Bergeron-Findeisen. A medida que la nieve cae en las capas inferiores, se derrite y forma lluvia, excepto en condiciones de frío invernal. Gran parte de la prolongada lluvia y nieve de las estaciones más frías de latitudes medias y altas se forma de esta manera. Los sistemas de nubes que las producen pueden cubrir miles de decenas de kilómetros cuadrados y tener un espesor de 5 a 8 km.

El tipo de nube llamado *cúmulo*, producto de la rápida elevación de columnas pequeñas (del orden de 0.5 a 100 km<sup>2</sup> de sección transversal), varía desde las pequeñas fumaradas de cúmulos que son típicas en un día con buen tiempo, hasta enormes masas de cumulonimbos que se alcanzan hasta más de 15 km de altura. Estas nubes producen chubascos cortos y violentos, y son las nubes de lluvia predominantes en los trópicos y en el verano de latitudes medias. Las precipitaciones más fuertes suelen ir acompañadas de relámpagos y truenos. El cumulonimbo también es común sobre los océanos calientes, cuando fluye aire frío hacia el ecuador. En las tormentas más violentas de este tipo, la columna de aire ascendente puede adquirir una rotación rápida en torno a un núcleo de vórtice con muy baja presión. Estos **tornados**, como se les llama, son las tormentas más destructivas; son pequeños (de menos de 1 km de ancho), pero pueden viajar grandes distancias y no tienen relación con las tormentas ciclónicas.

Copyrighted image

**Figura 7-10** Silueta de la estatua La mano de Dios, de Carl Milles, vista contra cúmulos de buen tiempo, en Estocolmo, Suecia. (Fotografía cortesía de F. K. Hare.)

Estas nubes se forman cuando las corrientes de convección poco profundas acarrearán humedad hacia arriba, hasta el nivel de condensación, pero en ese punto las detiene una inversión.

### 7.5.2 El ciclo hidrológico

El movimiento del agua entre el aire, el mar, los lagos y ríos, la tierra, los suelos, los glaciares y los organismos vivos constituye el **ciclo hidrológico**, bosquejado en la figura 7-13. Este ciclo se usó en un capítulo anterior (figura 6-10) para ilustrar el balance de agua en una región pequeña. Aquí se muestra un balance similar en términos *globales*. Este movimiento casi se compensa. El agua es químicamente activa y forma compuestos con mucha facilidad. Hasta donde

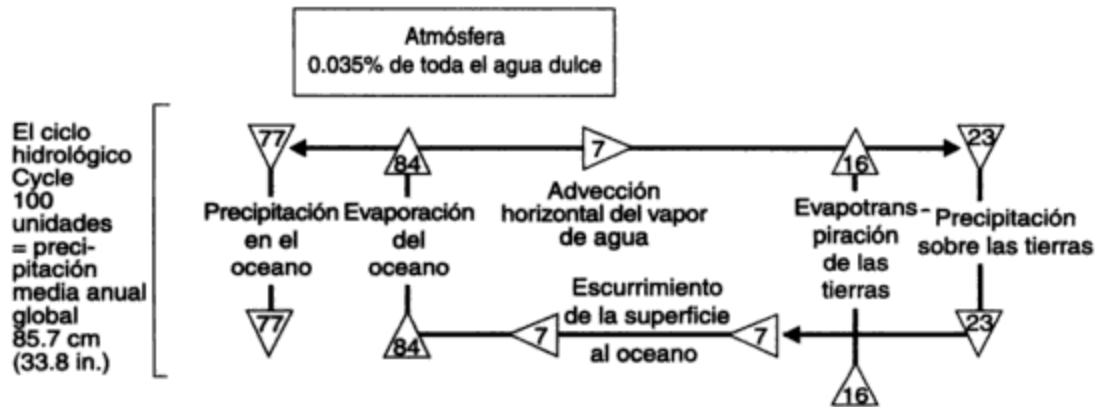
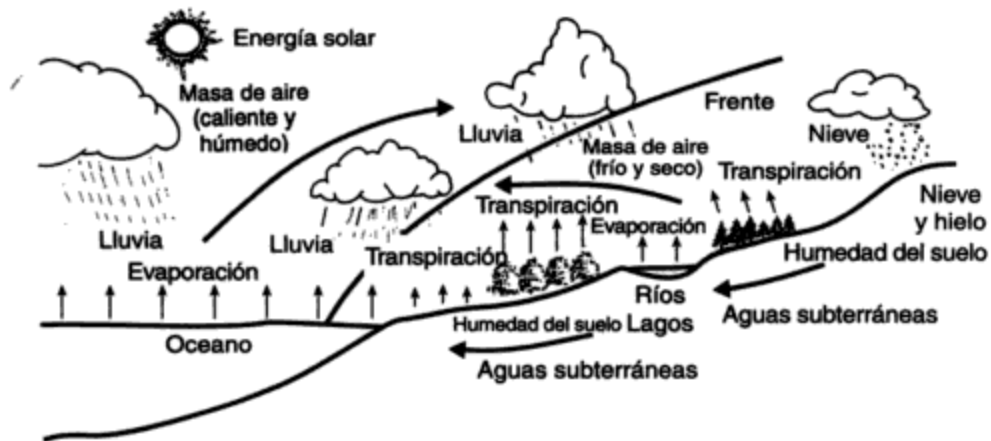
Copyrighted image

**Figura 7-11** Estratos (abajo) y altoestratos de un día invernal en la Garganta de Rakaia, Nueva Zelanda. (Fotografía cortesía de F. K. Hare.)

Copyrighted image

**Figura 7-12** Nubarrones de tormenta (cumulonimbos) de una perturbación tropical sobre el océano Pacífico, entre Hawai y Fiji. (Fotografía cortesía de J. S. Simpson y H. Riehl.)

Estos nubarrones tienen su origen en la convergencia de los vientos alisios de los dos hemisferios sobre superficies oceánicas cálidas.



<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">                 Océanos 97% de toda el agua             </div>	Ríos 0.03%	Lagos 0.3%	Bancos de hielo y glaciares 75% de toda el agua dulce	Depósitos de almacenamiento
	Humedad del suelo 0.06%			
	Aguas subterráneas (< 2500 ft) 11%			
	Aguas subterráneas (2500 – 12,500 ft) 14%			
Océanos	Continentes (Los porcentajes se refieren al total de agua dulce)			

**Figura 7-13** El ciclo hidrológico. Fuente: Adaptado de R. G. Barry y R. J. Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate* (Londres: Methuen, 1982).

Se muestra el ciclo hidrológico y el almacenamiento de agua del planeta. Los intercambios del ciclo se expresan como porcentaje de la precipitación media anual global de 85.7 cm (33.8 in.). Las cifras de porcentaje de almacenamiento de agua, atmosférica y continental, son porcentajes de toda el agua dulce. Las aguas saladas de los océanos constituyen el 97% del total.

sabemos, estos intercambios químicos liberan la misma cantidad de agua que extraen. Sin lugar a dudas, la masa principal de agua se encuentra en los océanos, los cuales cubren dos tercios de la superficie terrestre. Una pequeña parte se recicla anualmente a través de los depósitos de almacenamiento que se muestran en la figura 7-13.

La parte atmosférica del ciclo se inicia cuando ocurre evaporación. Esto sucede desde las superficies de agua abiertas y también de hielo, plantas, suelo y otras superficies humedecidas recientemente por la precipitación. La evaporación requiere:

1. *Una fuente de energía*, que es principalmente la radiación neta en la superficie en evaporación, pero también puede ser calor del suelo, el flujo térmico turbulento de la atmósfera (común cuando aire caliente se mueve sobre superficies frías), o calor de aguas oceánicas o lacustres calientes. El calor necesario para evaporar 1 kg de agua varía de  $2.50 \times 10^6$  J/kg a 273 K a  $2.43 \times 10^6$  J/kg a 303 K. Para derretir nieve a 273 K se requiere  $3.33 \times 10^5$  J/kg. Estas cantidades de calor son muy grandes. En un día ordinario gran parte de la radiación neta disponible se emplea en evaporar agua de superficies húmedas, como suelos, lagos o cultivos en crecimiento (que llevan agua hasta la superficie de sus hojas por el proceso fisiológico de la transpiración). A partir de una superficie de tierra cubierta por plantas, este último puede ser predominante y rara vez es posible separarlo de la evaporación que se produce desde el suelo o de las hojas mojadas. Es por esto que la palabra **evapotranspiración** se utiliza para designar el proceso colectivo, el cual requiere la misma energía que la evaporación.
2. *Un sumidero para el vapor producido*, el cual es tan sólo la capacidad de la atmósfera para transportarlo lejos, principalmente por difusión turbulenta. Los vientos fuertes y las tasas de decaimiento inestables favorecen una evaporación rápida.

La medición de la evapotranspiración es muy difícil. El instrumento normal es la artesa de evaporación, en la cual la pérdida de agua desde una superficie confinada se mide mecánicamente. Para suelos con césped, cultivados o base, se puede usar el lisímetro, que es un bloque de suelo aislado en el que se puede plantar pasto u otros cultivos y desde el cual se puede medir la filtración de la base. Si se conoce la precipitación que el bloque recibe y se toman en cuenta los cambios por almacenamiento, se puede calcular la evaporación o evapotranspiración. Todos estos instrumentos de medición tienen el inconveniente que, a menos que se tenga mucho cuidado, tendrán diferentes características de radiación neta y de turbulencia en relación con la exposición natural. Esto es particularmente cierto en el caso de las artesas de evaporación. Excepto en las estaciones de investigación dotadas de instrumentos refinados, el procedimiento usual consiste en apoyarse en fórmulas semiempíricas. Se puede encontrar una selección de las mismas en Hare y Thomas (1979), Mather (1974), Oke (1978) y Lins *et al.* (1990). Para una amplia gama de condiciones de superficie y periodos más o menos de un día, se puede utilizar una relación sencilla entre la radiación neta  $R_n$  y la evaporación  $E$

$$E = \frac{\alpha s R_n}{L(s + \gamma)} \quad (7.12)$$

en donde  $s = de_s/dT$  (mbar/K) de la figura 7-9

$$\gamma = 0.64 \text{ mbar/K}$$

$\alpha$  = una constante de proporcionalidad con valor aproximado a 1.0 para una amplia gama de superficies, excepto en condiciones de alta sequedad; alcanza un máximo de 1.26 sobre superficies perfectamente humedecidas

con  $E$ ,  $R_n$  y  $L$  como en la ecuación (7.3).

La fuente principal de evapotranspiración es el agua de lluvia que se ha almacenado en el suelo. Gran parte de ésta se retiene con demasiada fuerza como para extraerse con facilidad, pero todos los suelos contienen cierta proporción de agua que las plantas pueden extraer y liberar en la atmósfera por transpiración, que es el flujo de agua a través de los tejidos vegetales y su pérdida en forma de humedad por las hojas y los tallos. El sistema radicular mediante el cual las plantas toman el agua del suelo casi siempre es poco profundo, de modo que el metro superior del suelo normalmente suministra la mayor parte del agua que se evapora y se transpira. Una vez que se extrae esta agua del suelo, la evapotranspiración cesa y las plantas se secan. Un suelo recién humedecido que está saturado con agua, pero que ha drenado toda el agua sobrante, está a su *capacidad de campo*.

La precipitación y la evaporación normalmente se miden en milímetros de profundidad, es decir, equivaldría a la profundidad de lluvia o nieve derretida que se acumularía (o perdería) en una superficie plana impermeable por unidad de tiempo. La unidad SI usual es  $\text{kg/m}^2$  por unidad de tiempo, equivalente a 1 mm de lluvia para el mismo periodo. Los pluviómetros y los nivómetros simplemente reciben la precipitación a medida que cae, y la profundidad se mide y se registra en intervalos fijos.

En cualquier punto debe existir un balance de agua. La **ecuación de balance de agua** se parece mucho a la ecuación de balance térmico [ecuación (7.3)]:

$$P = N + E + \text{cambio por almacenamiento} \quad (7.13)$$

en donde  $P$  es precipitación,  $N$  es filtración y escurrimiento,  $E$  es evaporación, y el término de cambio por almacenamiento indica que se puede almacenar agua en el suelo o subsuelo vegetal o liberarse la que estaba almacenada. Todas las unidades son  $\text{kg/m}^2$  (esto es, milímetros de profundidad) por unidad de tiempo.

Observe que  $E$  está presente tanto en la ecuación de balance térmico como en la de agua. Para totales anuales es común el uso de la **razón de escurrimiento**  $C = N/P$ , la cual varía desde cero en áreas muy secas hasta 0.9 en climas muy húmedos y fríos. El escurrimiento, que es la precipitación sobrante que alcanza a llegar a las corrientes, es el tema de estudio principal de la ciencia de la **hidrología**.

## 7.6 CLIMA

### 7.6.1 Distribución en el mundo

Las figuras 7-14 y 7-15 muestran la distribución media o esperada de la precipitación y la temperatura en todo el planeta. Tenemos buenas imágenes de la distribución de la presión, la radiación solar (véase la figura 9-1), la temperatura, la precipitación, el viento, la humedad y las nubes en muchos niveles de la atmósfera, en especial abajo de 30 km (una presión de 10 mbar). Estas distribuciones tienen una larga historia. Durante los últimos 10,000 años los cambios climáticos, aunque significativos en la historia humana, no han sido grandes. Antes de eso, sin embargo, hubo muchos momentos en que el clima del mundo era más frío y seco que en la actualidad.

Copyrighted image



Copyrighted image

**Figura 7-14** Distribución mundial de la precipitación (media anual). *Fuente:* F. Möller, Petermann's Geographische Mitteilungen, 95 Jahrgang, 1951, págs. 1-7.

Precipitación media global (mm) para los periodos de diciembre a febrero y de junio a agosto.





**Figura 7-15** Distribución mundial de la temperatura (medias de enero y julio). *Fuente:* R. G. Barry y R. S. Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate* (Londres; Methuen, 1982).

Temperaturas medias al nivel del mar en enero y julio (°C). La posición aproximada del ecuador térmico se muestra con una línea punteada.

Se sabe que en los últimos dos millones de años se han producido al menos nueve fases (**eras glaciales**) durante las cuales el hielo y la nieve estaban más extendidos que ahora. Hubo otras eras glaciales en el pasado remoto, una de ellas hace 650 millones de años. Gracias a la gran cantidad de trabajo geofísico y geoquímico sobre los sedimentos de los océanos profundos, en la actualidad contamos con un conocimiento detallado de la época más reciente de las eras glaciales, el periodo Cuaternario. Puesto que este periodo se caracterizó por rápidas fluctuaciones climáticas, es natural que se plantee la pregunta: ¿puede cambiar el clima actual

Los controles fundamentales del clima son la constante solar, que influye en la temperatura de la Tierra; la composición de la atmósfera; la distribución de las tierras, mares y montañas; y la rapidez de rotación del planeta. Todos estos factores han cambiado en el transcurso de la larga historia de la Tierra, pero, con la posible excepción de la atmósfera, ahora parecen relativamente estables.

### 7.6.2 Variabilidad de los climas

No obstante la estabilidad de los factores que gobiernan el clima, tenemos indicios directos de fluctuaciones climáticas durante el último siglo, para el cual se dispone de buenos registros (Schneider, 1989). Las temperaturas del aire superficial promediadas en todo el mundo varían año con año hasta en  $\pm 0.5$  K. En el último siglo, sin embargo, se ha producido un lento calentamiento de fondo de 0.6 K (una tendencia). No obstante que estos cambios son pequeños, tienen efectos económicos considerables. También han ocurrido cambios significativos en la precipitación sobre ciertas regiones (Boden *et al.*, 1994).

Cuando se intenta interpretar el significado de estos cambios o fluctuaciones, es importante recordar que el clima es inherentemente variable. Para definirlo promediamos los valores de un elemento específico (temperatura, precipitación pluvial, etc.) a lo largo de un periodo arbitrario, por lo común de 30 años. En la práctica actual estos promedios se vuelven a calcular cada 10 años. El conjunto para 1961-1990 es de uso corriente hoy en día. Con base en este estado promedio reconocemos lo siguiente:

1. *Variaciones regulares* en diversos periodos. Las únicas que son comunes en el clima son las *diarias* (por ejemplo, días cálidos y noches frías) y las *estacionales* o *anuales* (por ejemplo, veranos calurosos e inviernos fríos). Casi todas las demás variaciones (ciclos) supuestas resultan ser espurias.
2. *Variaciones cuasiperiódicas*, a unos cuantos años de valores altos les siguen unos de valores más bajos, pero sin un periodo regular.
3. *Tendencias ascendentes o descendentes*, en las cuales el elemento aumenta o disminuye lentamente.
4. *Cambios impulsivos* de la tendencia central, en los cuales el valor medio cambia de improviso a un nuevo nivel estable.
5. *Variaciones por periodos cortos*, sin un patrón aparente, semejantes al "ruido" que ahoga una señal de radio. Estas variaciones incluyen los cambios meteorológicos conocidos pero también fenómenos como años cálidos o fríos, o húmedos y secos.

El cambio climático se produce sólo si hay una diferencia estadísticamente real entre periodos sucesivos que se promedian. Los cambios que tienen lugar *dentro* de un periodo de promedio

se describen como la *variabilidad* del clima. Una buena medición de esta variabilidad es tan importante como los valores medios. Los científicos e ingenieros que se ocupan de los problemas ambientales relacionados con el clima necesitan al menos la siguiente información:

1. Buenos promedios, como las medias mensuales y anuales de temperatura, precipitación pluvial y radiación solar.
2. Ciertas medidas de la variabilidad. Éstas pueden incluir desviaciones estándar, datos de frecuencia y valores extremos con probabilidades de repetirse cada década o cada siglo. Los datos sobre los periodos de retorno (intervalos probables entre los valores especificados) también son necesarios, en especial para el ingeniero civil y el hidrólogo.
3. Cierta estimación de tendencias *futuras* o cambios impulsivos. Esto es de especial importancia para los ingenieros civiles y los científicos especializados en agricultura, pero también afecta a los especialistas en calefacción y ventilación.

Casi todos los sistemas meteorológicos nacionales pueden proporcionar datos actualizados de estos tipos. Es más difícil obtener estimaciones de las tendencias y cambios futuros, los cuales constituyen el tema principal de la investigación moderna en climatología.

El arte de elaborar modelos climáticos se ha convertido en la clave para entender el cambio climático. La elección de la palabra “arte” es deliberada, porque los métodos van más allá de la ciencia pura. La ciencia nos permite escribir el conjunto completo de ecuaciones diferenciales que expresan las leyes y aproximaciones planteadas en las secciones precedentes, y aplicar constantes y condiciones límite apropiadas, como la aceleración de la gravedad, la velocidad de rotación de la Tierra, y el hecho de que la materia no se puede crear ni destruir. Sin embargo, el conjunto de ecuaciones resultante únicamente se puede resolver en grandes computadoras centrales, y eso sólo si es posible hacer buenas aproximaciones y elecciones acertadas en cuanto a técnica de cómputo, todo lo cual demanda el criterio y las habilidades del operador; de ahí la palabra “arte”.

Los modelos que se emplean, que suelen ser conjeturas inspiradas o deducciones de lo que podría funcionar mejor, se elaboraron originalmente para mejorar el pronóstico global del tiempo, muy necesario cuando la aviación intercontinental se convirtió en algo común. A medida que el interés en el cambio climático creció, los modelos se alteraron para hacerlos capaces de simular consecuencias a lo largo de periodos mucho más largos; dichas consecuencias constituyen en efecto el clima. Además, se utilizaron modelos más sencillos para poner a prueba hipótesis como la del efecto invernadero, los cambios de radiación que son consecuencia de la contaminación, y el transporte de contaminantes como los óxidos de azufre y de nitrógeno que causan la precipitación ácida (véase el capítulo 5; además Houghton *et al.*, 1990; IPCC, 1990; Hengeveld, 1991; Mintzer, 1994; Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 1994).

### 7.6.3 El sistema climatológico

El clima interactúa con los suelos, las rocas, las plantas, los animales, las aguas superficiales y el hielo. El **sistema climatológico** es el nombre que el climatólogo da a esta interacción. Los biólogos hablan de **ecosistemas** para referirse a la relación de los organismos vivos y las comunidades con su ambiente físico total. Cualquiera que sea el término que se use, uno debe tratar de percibir los eslabones. El intercambio, la perturbación, la recuperación y el cambio

duradero dentro de estos sistemas están en las raíces de la ciencia ambiental. Los ingenieros y científicos ambientales que olvidan que las cosas están interconectadas invitan al desastre ambiental (también se deben ver los capítulos 1 y 16).

Entre nuestro clima y los océanos existe un vínculo estrecho. Entre el mar y el aire se intercambian agua, energía, dióxido de carbono y partículas a velocidades prodigiosas. De hecho, la mayor parte de los intercambios se verifican dentro de la capa de agua próxima a la superficie del océano, de menos de 100 m de profundidad. Las aguas oceánicas más profundas están aisladas en gran medida de la atmósfera, pues les toma hasta 1,000 años intercambiar agua y materiales con la superficie del océano. Las corrientes oceánicas son impulsadas en parte por los vientos, los cuales ejercen una poderosa fuerza de arrastre. Estas corrientes transportan grandes cantidades de calor. Sin este arrastre, los contrastes de temperatura en el mundo serían mucho más grandes.

Existen vínculos similares entre el clima y los grandes glaciares continentales que cubren la superficie de Groenlandia y de la Antártida. Durante muchos milenios, gran parte de la nieve que ha caído sobre estas áreas terrestres se ha acumulado en forma de hielo glacial, el cual yace ahora con un espesor de varios kilómetros sobre sus áreas centrales. El Sol y la atmósfera son incapaces de aportar energía suficiente para derretir el hielo. La Antártida descarga casi todos sus excedentes de hielo en el océano en forma de gigantescos *icebergs* o bancos de hielo flotantes. Groenlandia pierde alrededor de la mitad de su excedente anual como agua de fusión y la otra mitad como *icebergs* que viajan a la deriva hacia Terranova. En cada una de las eras glaciales del periodo Cuaternario, capas de hielo similares cubrían Norteamérica y el norte de Europa. Los restos de las más recientes desaparecieron entre hace 6,000 y 9,000 años, pero son pocas las posibilidades de que el calentamiento del clima que se pronostica para el próximo siglo haga lo mismo para Groenlandia y la Antártida. Es poco probable que el nivel del mar suba más de 1 m en el próximo siglo, porque cualquier fusión marginal del hielo se compensará, total o parcialmente, por un aumento en las nevadas sobre las pendientes superiores de los glaciares. La fusión del hielo marino no altera el nivel del mar.

#### 7.6.4 Climas urbanos

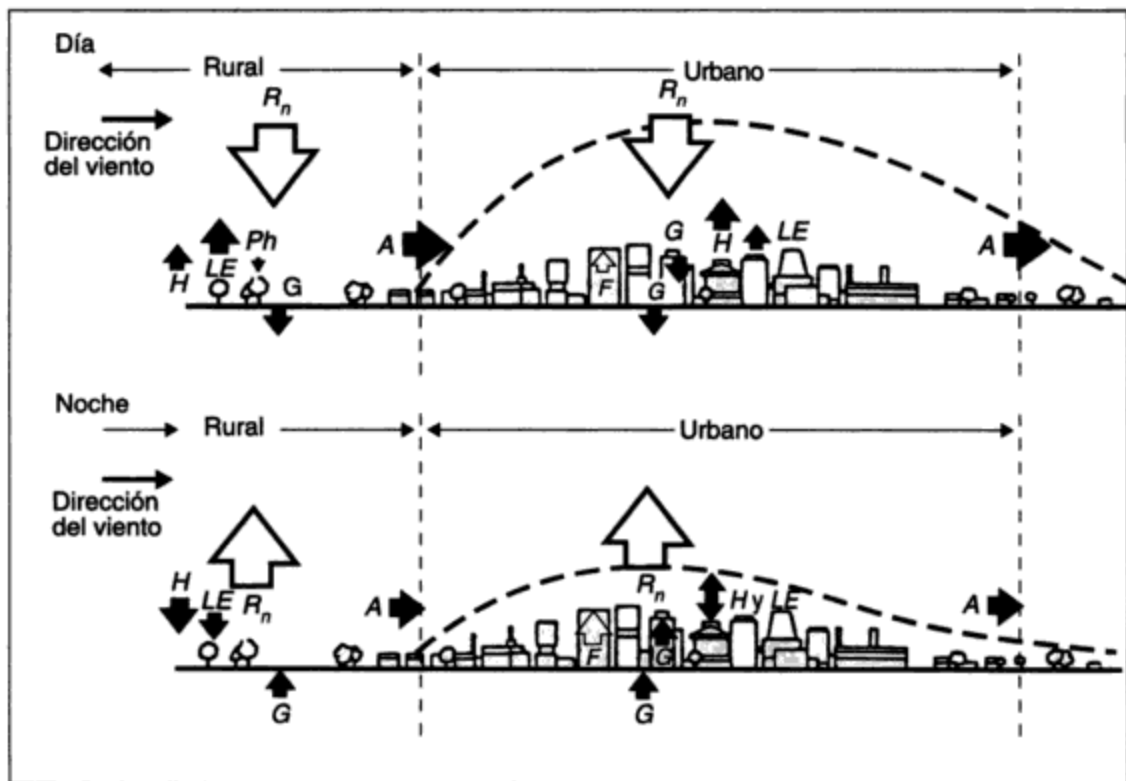
Los ingenieros hacen gran parte de su trabajo en ciudades o áreas muy industrializadas. Los climas de este tipo de zonas difieren con los de campo abierto en muchos sentidos. Además, la grave contaminación del aire (que se trata en el capítulo 13) se encuentra sobre todo en las ciudades. Para reseñas más completas véase Landsberg (1981) y Oke (1978). Diversos factores modifican los climas de las ciudades:

1. Las ciudades son más agitadas y accidentadas que el campo abierto, de modo que el viento que fluye sobre ellas se hace más turbulento por contacto con obstáculos como edificios o cables de corriente.
2. Los materiales de la superficie de las ciudades son muy diferentes del suelo o la vegetación naturales. Hay muchas estructuras altas de concreto, ladrillo o acero. La vegetación, que en la naturaleza bombea mucha agua a la atmósfera y mantiene así frescas las plantas, está ausente en gran parte del área.
3. En la ciudad los balances térmico y de agua cambian respecto al campo. Los edificios, las calles, los lotes de estacionamiento y las plantas industriales de una ciudad tienen

propiedades muy distintas en relación con el campo abierto en lo referente a (a) almacenamiento de calor, (b) almacenamiento de agua, (c) absorción de la radiación solar y (d) todos los componentes del ciclo hidrológico (esto es, evaporación, filtración, escurrimiento y almacenamiento de agua).

4. Por añadidura, las ciudades liberan gran cantidad de calor hacia la atmósfera proveniente de hornos, automóviles y otras actividades en las que se consumen combustibles.

Una consecuencia directa de estos factores es que la capa límite sobre una ciudad no se parece mucho a la que cubre el campo circundante. En la figura 7-16 se representan los efectos principales. La capa límite modificada sobre la ciudad forma una especie de domo, más alto en el día que por la noche. Durante la noche se puede producir una fuerte inversión que atrapa los contaminantes. La mayor parte de la contaminación que se produce en la ciudad permanece en este domo, aunque el viento arrastra una parte. Las diversas transferencias de agua y energía de la figura 7-16 tienen los mismos símbolos que en las ecuaciones de balance térmico y de agua, (7.3) y (7.13). Las diferencias principales son que:



**Figura 7-16** Capa límite urbana de día y de noche. Fuente: Oke (1978).

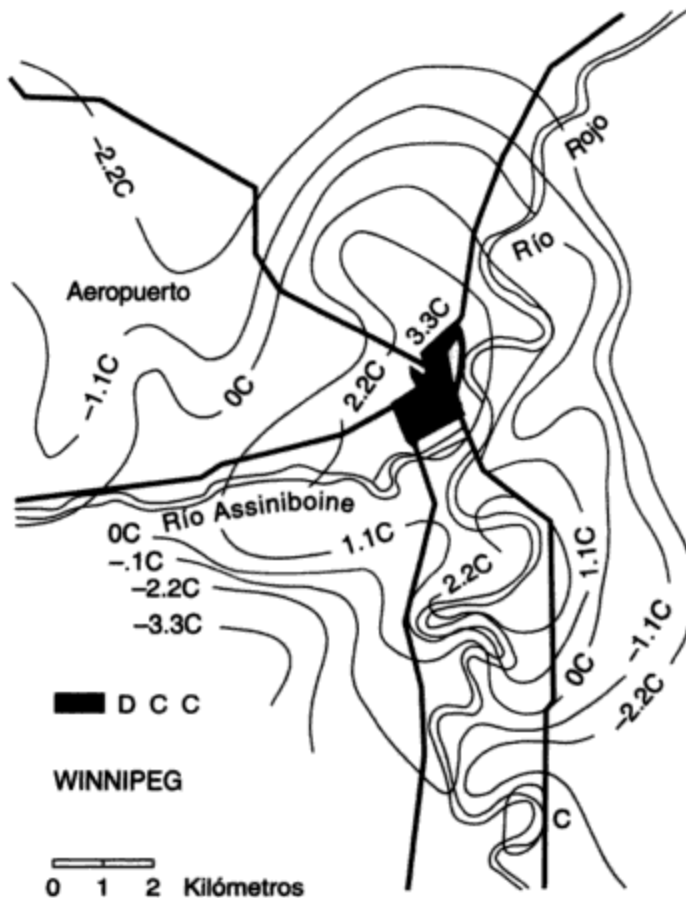
Representación esquemática de los balances térmicos urbano y rural. Las direcciones de  $H$  y de  $LE$  durante la noche son inciertas. La línea punteada indica el domo de la capa límite urbana.

$R_n$  = radiación neta;  $H$  y  $LE$  son flujos convectivos específicos de calor sensible y latente;  $G$  = flujo térmico específico hacia dentro y fuera de edificios, superficies del suelo, etc.;  $F$  = calor generado dentro de los edificios por vehículos;  $Ph$  = calor consumido en la fotosíntesis por las plantas verdes (sólo de día);  $A$  = advección. Todas las unidades son  $W/m^2$ .

1. Tanto en el día como durante la noche existe una fuente adicional de calor en la ciudad, señalada como *F*, debida al uso de combustible y energía mecánica en edificios y vehículos.
2. Las estructuras de la ciudad tienen alta capacidad de almacenamiento de calor; se calientan en el día cuando el Sol las baña, y desprenden el calor durante la noche.

El resultado es que la ciudad suele ser más calurosa que el campo. La figura 7-17 muestra, como ejemplo, la temperatura media de 12 noches en Winnipeg, Manitoba, una ciudad de 650,000 habitantes. Las temperaturas se muestran como desviaciones respecto a las que se midieron en el aeropuerto, en el límite del área construida. Sobre el distrito comercial central, las temperaturas son en promedio de 2 a 3 K más altas que las del campo abierto. Las líneas de igual diferencia de temperatura claramente siguen el perfil de la ciudad. El área cálida de la ciudad se conoce como una *isla térmica urbana*. Todas las grandes ciudades las tienen. En casos extremos, la temperatura en el centro de la ciudad durante la noche puede ser hasta más de 10 K mayor que la del campo circundante. En el sentido a favor del viento desde una ciudad, la advección por el viento (*A* en la figura 7-16) se lleva el calor y los contaminantes distribuyéndolos sobre otros asentamientos, cultivos y bosques.

Las islas térmicas se forman con mayor facilidad cuando el tiempo está en calma. Los vientos fuertes tienden a dispersarlas, y con el calor también se llevan los contaminantes. Un día ventoso proporciona a la ciudad un tiempo meteorológico similar al del campo circundante. La interferencia que causan los edificios altos hace que el viento sea más borrasco en la ciudad.



**Figura 7-17** Isla térmica urbana de Winnipeg, Manitoba. Fuente: Hare y Thomas (1979).

Calor urbano de Winnipeg con base en la desviación media respecto a la temperatura en el aeropuerto durante 12 corridas experimentales (°C). "DCC" representa un distrito comercial central.

Todos hemos observado las violentas ráfagas de viento en el centro de la ciudad, cerca de los rascacielos. Con vientos ligeros, sin embargo, los edificios tienen el efecto opuesto. Los obstáculos atrapan el aire sobre el área interior de la ciudad y el mismo permanece en los cañones urbanos. Los contaminantes se acumulan y, si se forma niebla, se combinan con las gotas de agua o los cristales de hielo para formar esmog.

A medida que las ciudades se han hecho más grandes, sus islas térmicas han crecido en intensidad. Cuanto más grande es la ciudad, más lo es también la isla térmica. Para los habitantes de las ciudades esto ha constituido un auténtico cambio climático. En París, Francia, por ejemplo, la temperatura media anual subió casi 1 K entre 1880 y 1965. La temperatura media anual en Tokio, Japón, subió 1.4 K entre 1915 y 1970. Estos efectos no son sorprendentes si recordamos que el uso de energía en una ciudad es comparable con el calentamiento radiactivo natural. La tabla 7-3 muestra la potencia utilizada por unidad de área en una selección de ciudades. Advierta que las cifras que ahí se muestran no en todos los casos corresponden a ciudades enteras. Por ejemplo, Manhattan es un distrito de la ciudad de Nueva York, y los datos de Sydney son sólo para su área interior. Observe que en Manhattan y en Moscú el calentamiento artificial supera la radiación neta anual natural (esto es, la suma de todas las entradas y salidas naturales de energía por radiación). En Manhattan la energía artificial es, de hecho, alrededor de ocho veces mayor que la fuente natural.

Por experiencia sabemos que cada ciudad es diferente a sus vecinas. Las variedades de topografía, por ejemplo, tienen efectos notables. Muchas ciudades, como Los Ángeles, Vancouver, Fairbanks y Milán, están construidas en valles u hondonadas que tienden a retener la capa límite urbana dentro de muros de tierras altas. Estas zonas tienen problemas de contaminación mucho más graves que las ciudades situadas en áreas abiertas, como Chicago, Illinois. Incluso las hondonadas poco profundas producen efectos importantes en las noches tranquilas. Londres y París son ejemplos de esto.

**TABLA 7-3 CONSUMO DE POTENCIA POR UNIDAD DE ÁREA EN UNA SELECCIÓN DE CIUDADES**

Ciudad	Población (millones)	Área (km <sup>2</sup> )	Uso de potencia por unidad de área (W/m <sup>2</sup> )
Manhattan, N. Y.	1.7	234	630
Moscú	6.4	878	127
Sydney, Australia	0.1	24	57
Berlín Occidental	2.3	233	21
Los Ángeles	7.0	3,500	21

Fuente: Landsberg (1981).

## PROBLEMAS

- 7.1. ¿Por qué es diferente la altura de la troposfera en las áreas tropicales que en las regiones nórdicas?
- 7.2. Explique cómo y por qué la temperatura cambia con la altura en (a) la troposfera; (b) la estratosfera.
- 7.3. El aire caliente puede ser tan denso como el frío. ¿Qué presión se necesita para hacer que el aire a 30°C (303 K) sea tan denso como el aire a 0°C (273 K), a una presión de 1,000 mbar?

- 7.4. La radiación solar al mediodía de un día determinado es de  $900 \text{ W/m}^2$ . La superficie es de hierba corta y su temperatura es de  $15^\circ\text{C}$  ( $288 \text{ K}$ ). La radiación descendente de onda larga de la atmósfera es el 87% de la radiación ascendente de onda larga de la superficie. Calcule el valor probable de la radiación neta.
- 7.5. Con base en la ecuación hidrostática (7.5), calcule la rapidez de disminución de la presión con la altura a una presión de 700 mbar si la temperatura es de  $-3^\circ\text{C}$  ( $270 \text{ K}$ ). (Sugerencia: Suponga que  $dz$  es una capa de 10 m de espesor.)
- 7.6. El gradiente de presión en un momento determinado es de 10 mbar por cada 1,000 km. Calcule un valor probable para la velocidad del viento a 600 m de altura sobre el suelo. [Suponga que la temperatura del aire es de  $+7^\circ\text{C}$  ( $280 \text{ K}$ ) y la presión es de 1,000 mbar; la latitud es  $30^\circ$ .]
- 7.7. Se calienta aire con una humedad relativa de 50% a  $12^\circ\text{C}$  ( $285 \text{ K}$ ), sin cambio de presión, a  $25^\circ\text{C}$  ( $298 \text{ K}$ ). ¿Cuál será su humedad específica a la nueva temperatura?
- 7.8. ¿Qué significa el concepto de variación periódica de un elemento del clima? ¿Qué ejemplos puede citar de este tipo de variación? Utilice su propia experiencia además del texto.
- 7.9. Acuda a una biblioteca y localice las principales regiones desérticas del mundo. ¿Qué puede comentar acerca de su distribución? ¿Podría sugerir alguna razón que explique su aridez?
- 7.10. Cerca del Polo Norte, las temperaturas invernales descienden rápidamente a  $-3^\circ\text{C}$  ( $238 \text{ K}$ ) y después permanecen cerca de ese nivel, no obstante que hay varios meses de oscuridad total por delante. Sugiera una explicación de por qué la temperatura no continúa descendiendo.
- 7.11. Elabore una lista de comprobación aproximada de los problemas de diseño en el campo de la ingeniería civil en los cuales es probable que los datos meteorológicos sean importantes. ¿Dónde podría obtener estos datos?
- 7.12. Suponga que se produce una larga serie de erupciones volcánicas en un periodo de varios años. ¿Cuál podría ser el efecto en el clima del planeta?

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES EMPLEADOS EN EL CAPÍTULO 7

Símbolo en español*	Significado	Unidades	Valor numérico
$a$	albedo (reflectividad fraccionaria)	adimensional	
$c_p$	calor específico del aire a presión constante	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	1.0
$e$	presión de vapor del agua	$\text{N/m}^2$ (pascal)	
$e_s$	presión de vapor de saturación del agua	$\text{N/m}^2$ (pascal)	
$E$	evaporación o evapotranspiración por unidad de tiempo	$\text{kg/m}^2$ (mm de profundidad de agua)/h	
$F$	liberación de calor por quema de combustibles en ciudades	$\text{W/m}^2$	
$G$	flujo térmico específico de suelo	$\text{W/m}^2$	
$H$	flujo térmico específico turbulento (convectivo)	$\text{W/m}^2$	
$I$	flujo específico de radiación solar	$\text{W/m}^2$	
$L$	calor latente de vaporización del agua	$\text{J/kg}$	$2.44 \times 10^6$
$M$	calor latente de fusión del hielo	$\text{J/kg}$	$3.33 \times 10^5$
$n$	distancia (horizontal)	m	
$N$	escurrimiento de agua por unidad de tiempo	$\text{kg/m}^2$ (mm de profundidad de agua)/h	
$p$	presión atmosférica	mbar (promedios en el nivel del mar)	1013.25

\*El mismo que se utilizó en inglés.



## LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES EMPLEADOS EN EL CAPÍTULO 7

Símbolo en español*	Significado	Unidades	Valor numérico
P	precipitación por unidad de tiempo	kg/m <sup>2</sup> (mm de profundidad de agua)/h	
q	humedad específica	g/kg (adimensional)	
Q	conversión fotosintética de energía	W/m <sup>2</sup>	
r	humedad relativa	porcentaje de saturación (adimensional)	
R <sub>N</sub>	flujo específico neto de radiación	W/m <sup>2</sup>	
R	constante universal de los gases (aire seco)	J/kg · K	287.0
R ↓	flujo específico de radiación de onda larga desde la atmósfera	W/m <sup>2</sup>	
s	de <sub>s</sub> /dT	mbar/K	
S	precipitación de nieve por unidad de tiempo	kg/m <sup>2</sup> (mm de profundidad de nieve)/h	
T	temperatura	K	
V	velocidad del viento	m/s	
V <sub>g</sub>	viento geostrófico	m/s	
V <sub>s</sub>	viento de superficie	m/s	
x	razón de mezcla de humedad	g/kg (adimensional)	
z	altura	m	

Símbolo griego	Significado	Unidades	Valor numérico
α	Parámetro de la ecuación 7.12	adimensional	
γ	Constante psicrométrica	mbar/K	0.64
ε	Emisividad de una superficie	adimensional	
μ	Micro	—	1/1000
φ	Latitud	grados o rad	
ρ	Densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup>	5.67 × 10 <sup>-8</sup>
ω	Velocidad de rotación de la Tierra	rad/s	7.3 × 10 <sup>-5</sup>

*Nota:* Se utiliza el sistema SI siempre que es posible. Para longitud (incluso longitud de onda) las medidas se dan en metros (m), micrómetros (mm) o nanómetros (nm). La precipitación, el escurrimiento y la evaporación se miden casi siempre en términos de profundidad acumulada (mm). La precipitación de nieve se mide normalmente en mm de nieve derretida; si se mide recién caída, se prefiere el centímetro (cm). La nieve tiene una densidad media de 0.1; por tanto, 1 cm de nieve es aproximadamente igual a 1 mm de agua de nieve derretida.

\*El mismo que se utilizó en inglés.

## REFERENCIAS

- ATMOSPHERIC ENVIRONMENT SERVICE. *Modelling the Global Climate System*, Climate Change Digest Report CCD 94-01, Toronto: Environment Canada, 1994.
- BARRY, R. G. y CHORLEY, R. S. *Atmosphere, Weather and Climate*. Londres: Methuen, 1982.
- BODEN, T. A., KAISER, D. P., SEPANSKI, R. V. y STOSS, F. W. *Trends 893: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information and Analysis Center, 1994.

- BUDYKO, M. *The Heat Balance of the Earth's Surface*, traducido por N. S. Stepanova, Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, 1958.
- HARE, F. K. y THOMAS, M. K. *Climate Canada*, 2da. ed. Toronto: Wiley, 1979.
- HENGEVELD, H. *Understanding Atmospheric Change*, SOE Report 91-2. Toronto: Environment Canada, 1991.
- HOUGHTON, J. T, JENKINS, G. J. y EPHRAUMS, J. J. (eds.). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change: The IPCC Response Strategies*. Ginebra y Nairobi: World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme, 1990.
- LANDSBERG, H. *The Urban Climate*. Nueva York: Academic Press, 1981.
- LINS, H. F., HARE, F. K. y SINGH, K. P. Influence of the atmosphere, capítulo 2 de WOLMAN, M. G. y RIGGS, H. C. (eds.). *Surface Water Hydrology*. Boulder, Colorado: The Geological Society of America, 1990.
- LIST, R. J. *Smithsonian Meteorological Tables*, 6a. edición revisada. Washington, D.C.: The Smithsonian Institution, 1951.
- MATHER, J. R. *Climatology: Fundamentals and Applications*. Nueva York: McGraw-Hill, 1974.
- MINTZER, I. M. (ed.). *Confronting Climate Change: Risks, Implications and Responses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. Londres: Methuen, 1978.
- SCHNEIDER, S. H. *Global Warming*. Nueva York: Vintage Books, 1989.
- SELLERS, W. D. *Physical Climatology*. Chicago: Chicago University Press, 1965.

# CAPÍTULO 8

---

## Microbiología y epidemiología

*Gary W. Heinke*

### 8.1 INTRODUCCIÓN

Aunque la palabra *salud* no aparece en el título, este capítulo se ocupa de ella, esto es, de la protección de la salud humana ante las influencias ambientales. La epidemiología, la ciencia que estudia las epidemias, fue la base del saneamiento ambiental y de la medicina preventiva durante el último siglo y medio, por ello, merece un breve comentario en este punto. A causa de la gran importancia de los microorganismos en las enfermedades humanas transmitidas por factores ambientales, y en virtud de su trascendencia en la ecología y en la tecnología del control ambiental, en este capítulo también se introduce la microbiología (el estudio de los microorganismos y de sus actividades).

La **microbiología** (del griego **micros**, pequeño; **bios**, vida y **logos**, estudio) es el estudio de los microorganismos y de sus actividades. La microbiología ambiental o sanitaria se ocupa de los microorganismos que comúnmente se encuentran en el agua, las aguas residuales, el aire y en algunos casos suelos, capaces de afectar la salud pública, descomponer materia orgánica o desempeñar una función útil.

La **epidemiología** (del griego **epi**, encima; **demos**, gente y **logos**, estudio) significa “el estudio de lo que ha sobrevenido a las personas”; tomado en el contexto de las enfermedades, este término es el estudio de las causas de las enfermedades en una población. El término **epidemia** describe el brote generalizado de una enfermedad infecciosa en una comu-

nidad. **Epidémico** se refiere a enfermedades que están presentes de manera continua en una población específica. Puesto que el objetivo de los estudios epidemiológicos es controlar la propagación de las enfermedades, la determinación del agente etiológico (que causa la enfermedad) y el modo de transmisión de la enfermedad son de importancia primordial para un control satisfactorio.

En tiempos recientes nos hemos dado cuenta que muchas enfermedades no infecciosas tienen su origen en las sustancias tóxicas de los residuos industriales. En esto intervienen contaminantes, tanto inorgánicos como orgánicos, y se necesitan estudios epidemiológicos de largo plazo para determinar las concentraciones y los tiempos de exposición "seguros" que son tolerables sin efectos ambientales adversos.

**Endémico** se refiere a una enfermedad que es frecuente en una población específica y está confinada a ella.

Una **epidemia** es un brote de una enfermedad infecciosa que se propaga ampliamente en un área.

La **epidemiología** es el estudio de las causas de una enfermedad en una comunidad.

La **microbiología** es el estudio de los microorganismos y de sus actividades.

## 8.2 FUNDAMENTOS DE MICROBIOLOGÍA

### 8.2.1 Clasificación de los microorganismos

La mayor parte de los seres vivos originalmente se clasificaron en dos reinos, vegetal y animal. Sin embargo, muchos microorganismos no encajaban en una u otra categoría, y en 1866 Haeckel propuso que se reconociera un tercer reino: el **protista**. Este reino incluía protozoarios, algas, hongos y bacterias (los virus eran desconocidos en 1866). Con los avances en el conocimiento de la ultraestructura celular, los protistas se subdividieron en dos categorías: los superiores (**eucariotas**), que son organismos unicelulares o multicelulares con núcleo verdadero, y los inferiores (**procariotas**), que carecen del núcleo. En los procariotas, que sólo incluyen bacterias y algas azules, el material genético de la célula (el ADN) no está organizado en estructuras reconocibles como cromosomas y no está separado del citoplasma por una membrana nuclear. Las algas azules en general se describen como bacterias azules o **cianobacterias**; así pues, *procariotas* y *bacterias* son términos sinónimos. Los protozoarios, las algas y los hongos se agrupan como protistas eucariotas. Los virus, que no son células, no se incluyen en los grupos precedentes. Con base en esta clasificación, los microorganismos se agrupan en los protistas eucariotas y procariotas, y los virus (Gaudy y Gaudy, 1980).

Las **bacterias** forman el grupo de microorganismos más importante, y son indispensables para el ciclo de nutrientes del ecosistema. Las bacterias patógenas (causantes de enfermedades) han sido objeto de la mayor atención y se estudian en la sección 8.4. Muchas otras

tienen importancia en los procesos de tratamiento de agua y de aguas residuales, en la autopurificación natural de corrientes y lagos, y en la descomposición de los materiales en rellenos sanitarios, suelos y montículos de abono. Los **virus**, más pequeños que las bacterias, también pueden causar enfermedades en plantas y animales, así como en los humanos.

Las **algas** son un grupo de microorganismos fotosintéticos semejantes a plantas. Causan problemas en el suministro de agua porque confieren sabores y olores desagradables y tapan los filtros. Sin embargo estos organismos son benéficos en los estanques de oxidación, pues suministran oxígeno para el tratamiento económico de aguas residuales. Por otra parte, un exceso de nutrientes en el agua puede dar origen a la floración de algas, las cuales, cuando se descomponen extraen el oxígeno disuelto de los lagos. El proceso de enriquecimiento de nutrientes llamado eutroficación se analiza en el capítulo 9.

Los **hongos** son protistas no fotosintéticos, unicelulares o multicelulares capaces de sobrevivir en condiciones de pH bajo. Estos organismos son útiles en el tratamiento biológico de ciertos residuos industriales y en la transformación de desechos orgánicos sólidos en abono.

Los **protozoarios** son en orden de magnitud más grandes que las bacterias y son útiles en los procesos de tratamiento biológico que se estudian en el capítulo 12.

Los **rotíferos**, organismos multicelulares que en ocasiones están presentes en el efluente de las plantas de tratamiento biológico, desempeñan una función de "limpieza" al consumir coloides orgánicos, bacterias y algas.

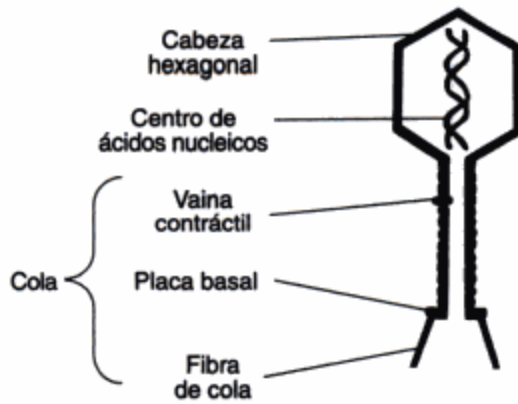
Los **crustáceos** son organismos multicelulares con un cuerpo o concha duro. Algunos son microscópicos y sirven de alimento para los peces. Se les considera indicadores de condiciones normales, sin contaminación, en aguas receptoras. Las figuras 8-1 y 8-2 muestran algunos de los microorganismos antes mencionados.

De acuerdo con su **nomenclatura microbiana**, los microorganismos reciben dos nombres para indicar su *género* y su *especie*. Por ejemplo, *Escherichia coli* es la combinación de dos nombres: *Escherichia* indica el género y *coli* la especie. El nombre genérico comienza con mayúscula y el de la especie con minúscula.

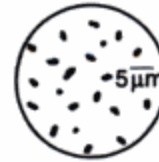
### 8.2.2 Bacterias

Las bacterias son organismos microscópicos unicelulares. Se les encuentra en el agua, las aguas residuales, el suelo, el aire, la leche, en plantas (frutos, vegetación), animales y humanos (piel, tracto intestinal). Las bacterias se reproducen por fisión binaria y se caracterizan por su forma, tamaño, estructura y disposición celular. Las bacterias individuales tienen una de tres formas: esférica (cocos), cilíndrica o con aspecto de bastón (bacilos) y espiral (espirilos). Las células bacterianas se pueden disponer en grupos tales como pares, racimos o cadenas (figura 8-1b y c). La tabla 8.1 contiene algunos ejemplos de bacterias importantes en el campo ambiental. La mayor parte de las bacterias varían en cuanto a tamaño de 0.5 a 5.0  $\mu\text{m}$  de largo y de 0.3 a 1.5  $\mu\text{m}$  de ancho. Los cocos tienen alrededor de 0.1  $\mu\text{m}$  de diámetro.

La figura 8-3 es un diagrama esquemático de una célula bacteriana representativa. Todas las bacterias tienen una pared rígida, la cual conserva la forma de la célula y protege su contenido de la presión osmótica. Si se quitara la pared celular, la célula se aplastaría o reventaría debido a la presión de su contenido. La pared ordinariamente tiene de 0.02 a 0.03  $\mu\text{m}$  de espesor y constituye del 10 al 40% del peso seco del organismo.



(a) **Virus** (Bacteriófago). Fuente: Ward's Natural Science Establishment, Inc., Rochester, N. Y., 1964.



(b) **Bacterias** *Streptococcus pneumoniae*. Uno de los agentes causales de la neumonía muestra la disposición típica de pares de células bacterianas esféricas. El tamaño varía de 0.5 a 1.25  $\mu\text{m}$  de diámetro. Fuente: M. J. Pelczar y E. C. S. Chan, *Elements of Microbiology* (Nueva York: McGraw-Hill, 1981).



(c) **Bacterias** *Salmonella typhi*. El agente causal de la tifoidea es una bacteria típica con forma de bastón (bacilos). Fuente: M. J. Pelczar y E. C. S. Chan, *Elements of Microbiology* (Nueva York: McGraw-Hill, 1981).



(d) **Algas**. Dos formas de algas de las que se sospecha causan sabores y olores en el agua potable. Fuente: Palmer (1959).



(e) **Hongos** (Micelios). Fuente: Buckman y Brady (1960).

**Figura 8-1** Virus, bacterias, algas y hongos.

Ciertas bacterias están cubiertas por una capa de sustancia viscosa llamada **cápsula** o capa mucosa. Se piensa que el material capsular se excreta desde la célula, pero a causa de la viscosidad de la mucosa, no se difunde con facilidad hacia el exterior. En ciertas bacterias patógenas la presencia de cápsulas aumenta su capacidad infecciosa. En otros casos la carencia de la cápsula ocasiona la pérdida de la capacidad para causar enfermedades. Se ha culpado a las cápsulas por la producción de lamas en algunos procesos industriales.

Muchas bacterias tienen **motilidad**, es decir, son capaces de moverse con rapidez en un líquido sacudiendo a gran velocidad uno o más de sus **flagelos**, estructuras con aspecto de látigo. Los flagelos son apéndices largos con aspecto de hilo que se encuentran sobre todo en



(a) **Protozooario *Vorticella***. Protozooario cubierto de cilios parecidos a vellos. *Fuente:* Ontario Ministry of the Environment. *Activated Sludge Process Workshop Manual*. 5a. ed. (2a. revisión). Toronto: Ministry of Government Services, Publication Centre, agosto de 1978.



(b) **Rotífero**. Animal multicelular que se alimenta de bacterias y materia orgánica. Dos hileras de cilios rodean la cabeza del organismo y parecen girar a medida que barren el alimento al interior de la cavidad oral. *Fuente:* Clark *et al.* (1977).



*Daphnia*



*Cyclops*

(c) **Crustáceos**. Organismos multicelulares microscópicos muy pequeños con conchas duras. Se alimentan de otros microorganismos y materia orgánica; a su vez sirven de alimento a peces pequeños. *Fuente:* Clark *et al.* (1977).

**Figura 8-2** Protozoarios, rotíferos y crustáceos.

los bacilos. Puede haber uno o más flagelos unidos a un extremo de la célula, o muchos de ellos distribuidos a lo largo del bacilo. Por lo general, las bacterias que carecen de flagelos no tienen motilidad. La existencia y la forma de los flagelos ayudan a distinguir entre diversos grupos de bacterias.

Inmediatamente abajo de la pared celular está la **membrana citoplásmica** semipermeable (alrededor de  $7.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  de espesor), la cual desempeña la importante función de suministrar un límite semipermeable que separa el protoplasma del ambiente externo; al mismo tiempo que permite el paso de nutrientes al interior de la célula y la salida de productos de desecho. El daño a esta membrana, causado por agentes químicos o físicos, puede ocasionar la muerte de la célula.

El protoplasma, esto es, el contenido interno de la célula, se divide en tres áreas diferentes: el citoplasma, el área nuclear y los polirribosomas. El **citoplasma** tiene aspecto granuloso, en parte debido a la abundancia de ARN. La porción fluida del citoplasma contiene

**TABLA 8-1 ALGUNAS BACTERIAS IMPORTANTES EN EL AMBIENTE**

Grupo de bacterias	Género	Importancia ambiental
Bacterias patógenas	<i>Salmonella</i>	Causa fiebre tifoidea
	<i>Shigella</i>	Causa disentería
	<i>Mycobacterium</i>	Causa tuberculosis
Bacterias indicadoras	<i>Escherichia</i>	} Contaminación fecal
	<i>Enterobacter</i>	
	<i>Streptococcus</i>	
	<i>Clostridium</i>	
Bacterias de descomposición	<i>Pseudomonas</i>	Degrada compuestos orgánicos
	<i>Flavobacterium</i>	Degrada proteínas
	<i>Zooglea</i>	Organismo formador de flóculos en plantas de lodos activados
	<i>Clostridium</i>	} Producen ácidos grasos a partir de materia orgánica en un digestor anaerobio
	<i>Micrococcus</i>	
	<i>Methanobacterium</i>	} Producen metano gaseoso a partir de ácidos grasos en un digestor anaerobio
	<i>Methanococcus</i>	
<i>Methanosarcina</i>		
Bacterias nitrificantes	<i>Nitrobacter</i>	} Oxidan compuestos nitrogenados inorgánicos
	<i>Nitrosomonas</i>	
Bacterias desnitrificantes	<i>Bacillus</i>	} Reducen nitratos y nitritos a nitrógeno gaseoso u óxido nitroso
	<i>Pseudomonas</i>	
Bacterias fijadoras de nitrógeno	<i>Azotobacter</i>	} Capaces de fijar el nitrógeno atmosférico en NH <sub>3</sub>
	<i>Beijerinckia</i>	
Bacterias sulfurosas	<i>Thiobacillus</i>	Oxida el azufre y el hierro
Bacterias reductoras de sulfatos	<i>Desulfovibrio</i>	Interviene en la corrosión de tuberías de hierro
Bacterias fotosintéticas	<i>Chlorobium</i>	} Reducen sulfuros a azufre elemental
	<i>Chromatium</i>	
Bacterias férricas	<i>Sphaerotilus</i>	Dan volumen a los lodos en las plantas de lodos activados
		<i>Leptothrix</i>

nutrientes disueltos. El **área nuclear** contiene al ADN o cromatina, que se encuentra difundido en todas las células procariontas.

El **ARN** (ácido ribonucleico) es una molécula de cadena larga y una hélice que contiene ácido fosfórico, D-ribosa (un azúcar), adenina, guanina, citosina y uracilo. Esta sustancia es indispensable para la biosíntesis de proteínas, pues ayuda a fijar el orden de los aminoácidos que componen las proteínas específicas que la célula necesita. En conjunto con las proteínas, el ARN forma partículas densamente empaquetadas llamadas **polirribosomas**. Éstos producen las enzimas, que son catalizadores orgánicos complejos, generalmente específicos para cada reacción bioquímica.

El **ADN** es una molécula de cadena muy larga y doble hélice presente en el área nuclear de todas las células. Esta sustancia contiene ácido fosfórico, 2-desoxi-D-ribosa (un azúcar), las bases púricas adenina y guanina, y las bases pirimídicas citosina y timina. Aunque el ADN de una célula bacteriana es difuso y no está contenido en una membrana nuclear, se encuentra



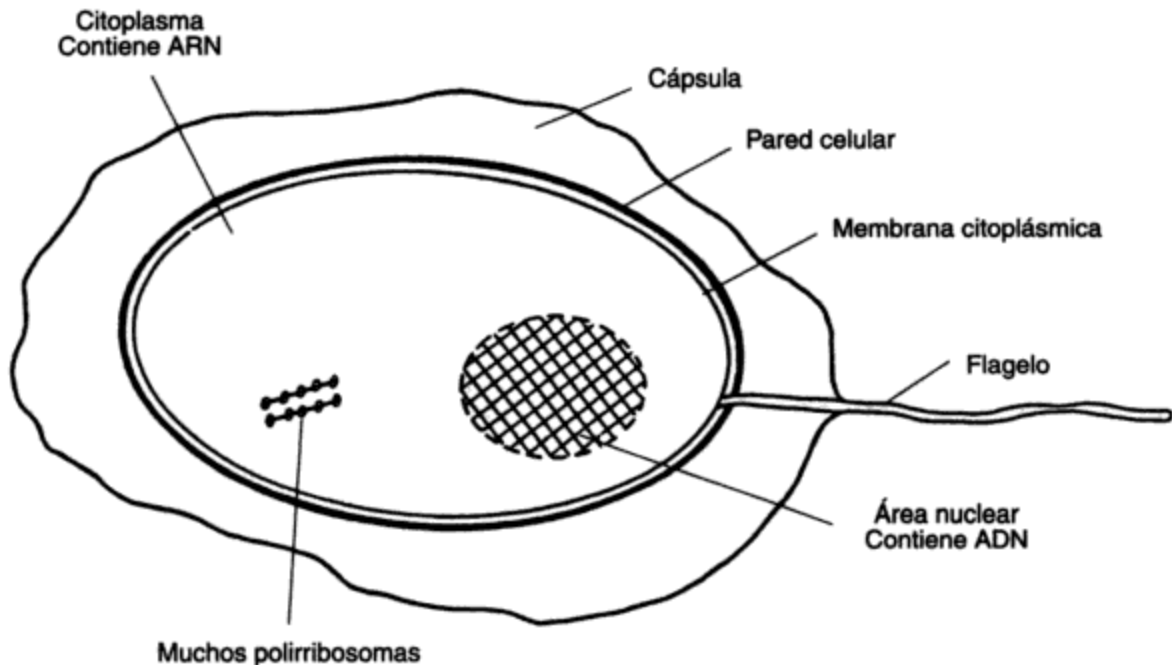


Figura 8-3 Diagrama esquemático de una célula bacteriana típica.

confinado a ciertas áreas dentro de la célula, y éstas se pueden considerar como una forma primitiva de núcleo. El ADN es el encargado de la estabilidad genética de la especie.

Ciertas bacterias (por ejemplo, *Bacillus* y *Clostridium*) forman **esporas**, las cuales representan una forma latente o en reposo de la célula y en este sentido son análogas a las semillas de las plantas. Una célula activa normal se conoce como una *célula vegetativa*. Las bacterias capaces de formar esporas pueden existir como células vegetativas por muchas generaciones. Cuando la célula se expone a condiciones de crecimiento adversas, se pueden formar esporas dentro del citoplasma. La espora puede ser más grande o más pequeña que la célula vegetativa y aparecer en el extremo de la célula o cerca del centro. Estas características sirven para señalar las bacterias formadoras de esporas.

Las esporas son muy resistentes a los ambientes químicos o físicos adversos. Las bacterias formadoras de esporas son comunes en el aire, el suelo y el agua. Su resistencia se debe a (1) una pared de espora impermeable compuesta de un complejo de ácido dipicolínico y calcio y (2) la deshidratación del contenido de la célula. En condiciones favorables al crecimiento, la espora germina y emerge una nueva célula vegetativa. Esta capacidad de supervivencia dificulta la destrucción de las bacterias formadoras de esporas, pero es una ventaja obvia para la bacteria.

### 8.2.3 Crecimiento y muerte de las bacterias

Todos los organismos vivos tienen necesidades físicas y de nutrición que deben satisfacer para sustentar su vida. Entre las especies de bacterias existen amplias variaciones en cuanto a necesidades de nutrición y a condiciones físicas que son capaces de soportar. Ciertas bacterias crecen a temperaturas inferiores a 0°C, mientras otras toleran 99°C. Algunas requieren oxígeno atmosférico, en tanto que para otras su presencia constituye un impedimento de vida.

De acuerdo con sus fuentes de energía y de carbono las bacterias se dividen en dos grandes grupos: **heterótrofos** y **autótrofos**. Las *bacterias heterótrofas* obtienen su energía y carbono de un compuesto orgánico o de materia orgánica. Las *bacterias autótrofas* necesitan dióxido de carbono como fuente de carbono y obtienen su energía de la luz solar o por oxidación de compuestos inorgánicos. Cuando los autótrofos utilizan luz solar como fuente de energía, se llaman **fotoautótrofos**, y cuando lo hacen oxidando compuestos químicos inorgánicos, se les conoce como **quimioautótrofos**.

Además de carbono, las necesidades de nutrientes incluyen nitrógeno, azufre, fósforo y trazas de elementos metálicos como magnesio, calcio y hierro. Las bacterias varían ampliamente en cuanto a la manera para obtener estos nutrientes. Algunas son capaces de "fijar" u obtener nitrógeno de la atmósfera; otras lo obtienen de fuentes inorgánicas como amoníaco o nitratos.

Ciertas bacterias son muy específicas en cuanto a sus necesidades de nutrientes, otras son capaces de utilizar diversas fuentes para cubrir sus necesidades. Por ejemplo, la *Escherichia coli* puede fabricar las vitaminas que necesita a partir de otros compuestos, pero los **lactobacilos** no crecen a menos que dispongan de nutrientes específicos de manera inmediata. Estos últimos organismos se llaman **heterótrofos exigentes**.

Muchos factores afectan el crecimiento de las bacterias. Los principales factores físicos son la temperatura, el ambiente gaseoso y el pH. Las bacterias se agrupan de acuerdo con el intervalo de temperatura dentro del cual se produce su crecimiento. Los **psicrótrofos** son bacterias capaces de crecer a temperaturas desde 0°C hasta 25 o 30°C. Los psicrótrofos que tienen una temperatura óptima de 15°C o menos y una temperatura máxima de crecimiento de alrededor de 20°C se conocen como **psicrófilos**. Los **mesófilos** crecen mejor en el intervalo de temperatura de 30 a 40°C, en tanto que los **termófilos** pueden crecer a temperaturas de hasta 99°C, con óptimos de 40°C o más.

Los gases más importantes que participan de manera directa en el crecimiento bacteriano son oxígeno para la oxidación biológica aerobia y dióxido de carbono como fuente de carbono para los autótrofos. En virtud de la importancia del oxígeno, resulta útil dividir las bacterias, con base en su necesidad de oxígeno libre (molecular), en los siguientes grupos:

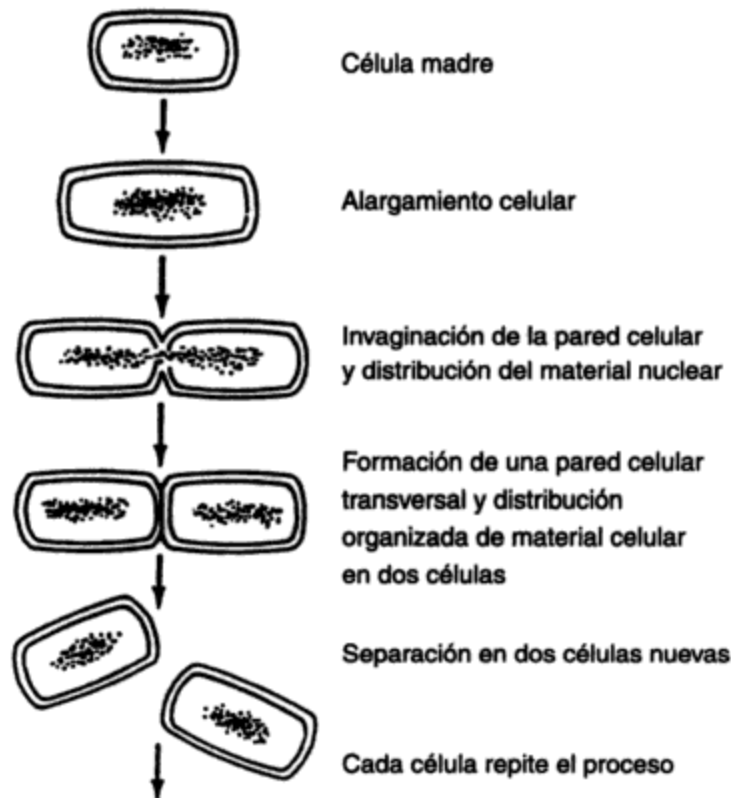
- Las bacterias aerobias requieren oxígeno libre para crecer.
- Las bacterias anaerobias pueden crecer sin oxígeno libre.
- Las bacterias facultativas pueden crecer con o sin oxígeno.
- Las bacterias microaerófilas crecen en presencia de cantidades minúsculas de oxígeno molecular.

Los adjetivos **facultativo** y **obligado** describen el grado de dependencia respecto a una condición particular. Por ejemplo, un aerobio obligado es una bacteria que no crece en presencia de oxígeno libre. Un autótrofo facultativo es un organismo que normalmente utiliza CO<sub>2</sub> como fuente de carbono, pero también crece de forma heterótrofa con compuestos orgánicos como fuente de energía.

El tercer factor importante que influye en el crecimiento bacteriano es el pH. Casi todas las bacterias muestran un crecimiento óptimo en un intervalo de pH de 6.5 a 7.5, con límites máximos de crecimiento entre 4.0 y 10.0. Las actividades metabólicas de las bacterias causan

cambios en el pH de su medio. Por consiguiente, el medio debe tener una capacidad amortiguadora para neutralizarlos como condición para que el crecimiento continúe durante un periodo largo. Otras condiciones físicas son importantes para ciertas especies de bacterias. Por ejemplo, las bacterias fotótrofas requieren luz como fuente de energía, y unas pocas bacterias requieren concentraciones de sal anormalmente altas, como las que se encuentran en lugares como el Mar Muerto o el Gran Lago Salado de Utah. Todas las bacterias necesitan humedad para crecer puesto que es preciso disolver todos los nutrientes para que penetren por la membrana celular.

La célula crece y se reproduce a medida que los nutrientes se introducen en ella y se procesan para formar nuevo material celular. El material nuclear se reproduce y se distribuye en la célula; se forma una pared celular o septo que divide la bacteria y la separa en dos células viables. El proceso reproductivo de las bacterias, la **fisión binaria**, es característica del crecimiento bacteriano (figura 8-4).



**Figura 8-4** Fisión binaria de células bacterianas. Fuente: Pelczar *et al.* (1977).

Las poblaciones bacterianas pueden alcanzar altas densidades con gran rapidez. Las células individuales se duplican con una velocidad característica de cada organismo en un conjunto determinado de condiciones. Este intervalo se conoce como tiempo de generación. Los tiempos de generación a 20°C varían desde 15 a 20 min para *Escherichia coli* hasta varias horas para otras especies (por ejemplo, 11 h para *Nitrosomonas europae*). Aunque las bacterias crecen en una amplia variedad de condiciones, el desarrollo óptimo requiere un ambiente específico para cada especie.

La rapidez de crecimiento de una población bacteriana es directamente proporcional al número de individuos presentes. Esto se expresa de forma matemática como

$$\frac{dB}{dt} = kB \quad (8.1)$$

en donde  $dB/dt$  = velocidad de crecimiento

$B$  = concentración de bacterias en el tiempo  $t$

$k$  = constante de velocidad de crecimiento de primer orden

La integración de la ecuación (8.1) da

$$\ln \frac{B}{B_0} = kt \quad (8.2)$$

en donde  $B_0$  es la concentración de la población inicial. Si  $G$  es el tiempo de generación (duplicación),  $B = 2B_0$ , y la ecuación (8.2) se puede volver a escribir como

$$k = \frac{\ln 2}{G} \quad (8.3)$$

Si sustituimos este valor de  $k$  en la ecuación (8.2), podemos expresar la población bacteriana  $B$  como función del tiempo  $t$  de la siguiente forma:

$$B = B_0 \cdot 2^{t/G} \quad (8.4)$$

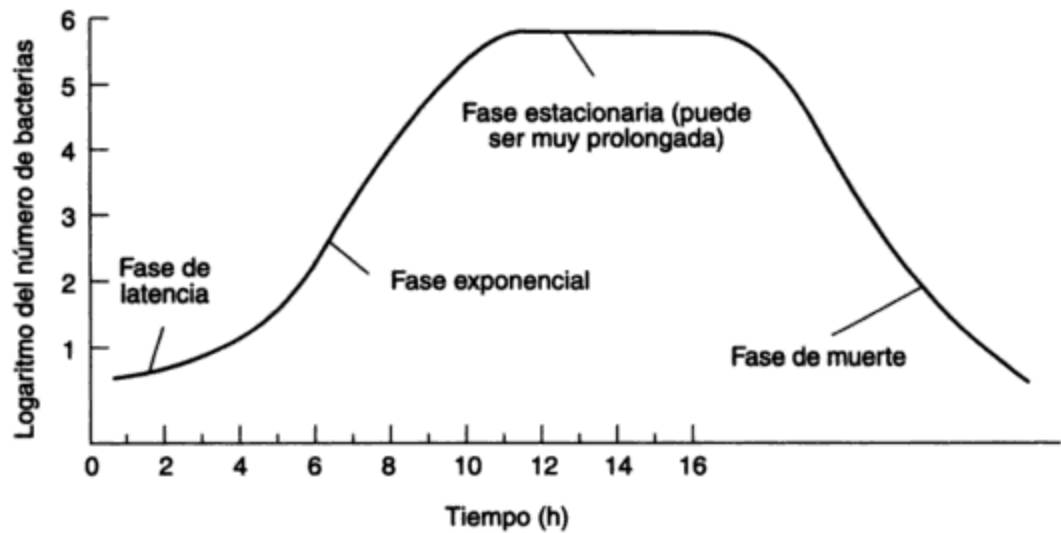
Al tomar el logaritmo de esta ecuación, obtenemos

$$\log B = \log B_0 + \frac{t}{G} \log 2 \quad (8.5)$$

Al graficar en papel semilogarítmico  $B$  en función de  $t$  obtendremos una línea recta con una pendiente de  $0.3/G$  ( $\log 2 = 0.3$ ) y una  $y$  que intercepta a  $B_0$ .

En realidad, este tipo de crecimiento logarítmico sólo es típico de una pequeña parte del patrón de crecimiento normal de una población bacteriana en un cultivo por lotes, como se muestra en la figura 8-5. Después de un periodo inicial en el que parece hay poco o ningún crecimiento, se produce uno rápido, exponencial, y posteriormente se alcanza la estabilidad en una población máxima, seguida de una fase menguante o de muerte.

Durante el periodo inicial, llamado **fase de latencia**, las células se ajustan a su nuevo medio. Puede ser que les falten ciertas enzimas o coenzimas necesarias para metabolizar los nutrientes circundantes. Por consiguiente, las células deben sintetizar estas enzimas. A medida que se forma nuevo protoplasma las células individuales aumentan de tamaño más allá de sus límites normales. Cuando este periodo de ajuste ha terminado, la célula puede dividirse y comenzar a reproducirse de manera normal. Al final de la fase de latencia ocurre una transición gradual hacia la fase de **crecimiento exponencial** o **logarítmico**, en la cual la población se duplica a intervalos regulares. En condiciones óptimas éste es el periodo de más rápido crecimiento. Durante este periodo la población bacteriana tiene la máxima uni-



**Figura 8-5** Curva representativa de crecimiento bacteriano. *Fuente:* Mitchell (1974).

formidad en términos de composición química, tasas metabólicas y otras características fisiológicas. Es obvio que esta fase de rápido crecimiento no puede continuar de manera indefinida porque la provisión de alimento es limitada, y las células comienzan a morir. Esto da por resultado una disminución de la velocidad de crecimiento hasta que la misma alcanza un valor de cero.

Cuando el número de células nuevas que se producen es igual a las que mueren, se alcanza un equilibrio dinámico, en el cual la población ya no aumenta. Ésta es la **fase estacionaria**. La razón de la interrupción de la fase de crecimiento casi siempre es el agotamiento de uno o más nutrientes.

La **fase de muerte**, o **menguante**, se alcanza cuando la tasa de mortalidad comienza a superar la velocidad de crecimiento. Además del agotamiento de nutrientes, se acumulan en el medio subproductos tóxicos del metabolismo celular, inhibiendo así el crecimiento.

En los procesos continuos de tratamiento biológico de residuos (capítulo 12), la población bacteriana que degrada la materia orgánica residual se encuentra principalmente en la fase estacionaria.

Así como se pueden crear condiciones para el crecimiento bacteriano óptimo, se emplean condiciones desfavorables para eliminar bacterias. La destrucción completa de la vida microbiana se conoce como **esterilización**. La **desinfección**, por otra parte, implica la destrucción selectiva de patógenos (organismos causantes de enfermedades). El medio más sencillo de esterilizar una pequeña cantidad de material consiste en calentarlo a una temperatura tal que daña las proteínas celulares. Los organismos vivos se destruyen a 100°C. Sin embargo, las esporas bacterianas requieren una temperatura mayor. Con vapor a una temperatura de 121°C y alrededor de 105 kPa (15 lb/in<sup>2</sup>), por lo general se consigue una esterilización completa en menos de 20 min.

Los microorganismos también se eliminan por medio de radiación de onda corta (200 a 400 nm) o por sonido de alta frecuencia. La irradiación ultravioleta de onda corta sirve para

esterilizar grandes superficies o áreas encerradas. La radiación destruye los ácidos nucleicos de las células. Las ondas ultrasónicas, con frecuencias del orden de 200,000 hertz (ciclos por segundo), en efecto rompen la pared celular de las bacterias. Por lo común, la energía ultrasónica (**sonificación**) no se emplea para controlar poblaciones microbianas, aunque es útil como método para destruir las células a fin de extraer sus constituyentes celulares.

El método de desinfección de uso más frecuente consiste en utilizar bactericidas químicos. Las sustancias oxidantes como el cloro, los compuestos de cloro, el yodo y el ozono son muy eficaces para matar microorganismos en el agua y en aguas residuales. El cloro y, en menor medida, el ozono son los agentes desinfectantes de uso más extendido. Éstos destruyen de forma permanente la célula, o partes de ella, de modo que no se puede reproducir aun después de que se elimina el bactericida. Estas sustancias actúan oxidando las enzimas y otros materiales del citoplasma. En virtud de la acción no específica del cloro y el ozono, es poco probable que se desarrollen cepas bacterianas resistentes. La rapidez de desinfección depende de la naturaleza del desinfectante, de la fisiología celular y del medio. Algunas variables importantes son la concentración del desinfectante, el tiempo de contacto entre los microorganismos y el desinfectante, la temperatura y el pH. La aplicación de la desinfección en el tratamiento de aguas se estudia en el capítulo 11.

#### 8.2.4 Virus, algas, hongos y protozoarios

Otros microorganismos de importancia para la ciencia y la ingeniería ambiental incluyen los virus, las algas, los hongos y los protozoarios.

**Virus.** Los virus más pequeños tienen un tamaño de 10 a 250 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m}$ ). En comparación, el tamaño de una bacteria pequeña, *Salmonella typhi*, es de 1,000 nm, o  $1 \mu\text{m}$ . Los virus son especiales en cuanto a que no contienen enzimas internas y por tanto no pueden crecer o metabolizar por cuenta propia. Estos organismos son parásitos obligados que infectan los tejidos de bacterias, plantas, animales, e incluso humanos. Algunos ejemplos de virus patógenos de las personas son los que causan la viruela, la hepatitis infecciosa, la influenza y la poliomielitis.

La figura 8-6 es un bosquejo de los causantes de las paperas y la influenza. En general, los virus se componen de un centro de ácidos nucleicos, ADN o ARN, rodeado de una cubierta proteica llamada **cápside**. El cual está compuesto por unidades más pequeñas llamadas **capsómeros**. Una unidad viral completa se designa como **virión**. Los virus se forman de acuerdo con reglas geométricas de simetría. Los tipos de proteínas que componen el cápside ayudan a distinguir un virus de otro. Cada grupo de virus infecta sólo un tipo específico de célula huésped, de modo que, por ejemplo, una enfermedad viral animal no se puede transmitir a los humanos.

De acuerdo con la teoría celular, los virus no son organismos vivos; sin embargo, tienen la capacidad de reproducirse o replicarse dentro de sus células huésped específicas. Puesto que en realidad no están vivos fuera de una célula huésped sobreviven largo tiempo entre una infección y otra, y sólo se les puede "matar" alterando sus estructuras moleculares.

Las algas, los hongos y los protozoarios tienen mayor complejidad y poseen estructuras más especializadas que las de los virus o las bacterias.



Paperas



Influenza

**Figura 8-6** Bosquejo de los virus de paperas y de influenza (tamaño: de 80 a 120 nm). Fuente: Pelczar *et al.* (1977).

(Sugerido por un dibujo de R. M. Chapman Jr., *Time*, 17 de noviembre de 1961.)

**Algas.** A excepción de las azules, las algas tienen un núcleo discreto rodeado por una membrana nuclear y, por tanto, se clasifican como **eucariotas**, es decir, “tienen núcleo verdadero”. La pared celular de las algas es gruesa. Por consiguiente, las algas incluyen tanto protistas superiores como inferiores. Su tamaño varía desde fitoplancton unicelular microscópico hasta grandes algas marinas multicelulares. Las algas unicelulares pueden tener forma esférica, cilíndrica, parecida a un palo o en espiral. Las colonias multicelulares pueden formar filamentos o tubos largos, o integrar masas de células individuales adheridas unas con otras (figura 8-7). Los crecimientos filamentosos pueden ramificarse o agruparse, e incluso contener células que llevan a cabo funciones especiales. Estas colonias superficialmente se parecen a las plantas superiores. Cualquiera que sea su tamaño o complejidad, todas las células algáceas contienen pigmentos fotosintéticos, por consiguiente son capaces de realizar la fotosíntesis. Los pigmentos se encuentran en cuerpos definidos llamados **plástidos**, **cloroplastos** o **cromatóforos**. Las algas son productores primarios importantes en la cadena alimenticia acuática, no obstante pueden constituir un problema en el aprovisionamiento de agua porque aportan sabores y olores, tapan tomas de agua, acortan el trayecto de los filtros y causan una alta demanda de cloro. El crecimiento excesivo de algas, conocido como **floraciones algáceas**, forma un manto de material orgánico que interfiere con el uso recreativo de las aguas. Las algas se clasifican con base en sus pigmentos. En la tabla 8-2 se muestran siete grupos generales. Los grupos I, II, IV y VII son de interés en el campo ambiental a causa de su aparición en aguas tanto limpias como contaminadas. Las otras principalmente son algas marinas.

**Hongos.** Los hongos son protistas superiores (eucariotas) no fotosintéticos y se dividen en tres grupos: **mohos**, que son hongos filamentosos; **levaduras**, los hongos no filamentosos; y las **setas**, que son hongos macroscópicos. Los hongos (figura 8-8) típicamente son aerobios y **saprófitos**, es decir, se alimentan de materia orgánica en descomposición. Estos organismos son capaces de utilizar una amplia variedad de sustancias orgánicas complejas como fuentes de alimento y son mucho más tolerantes a las condiciones ácidas que los demás microorganismos. A excepción de las levaduras, su modo de reproducción es por medio de esporas sexuales o asexuales.

Los **mohos** crecen extendiendo largas estructuras con aspecto de hilos llamadas **hifas**, las cuales forman una masa llamada **micelio** (*micelia* en plural). El micelio vegetativo penetra el sustrato para absorber los nutrientes disueltos, en tanto que el micelio reproductivo forma estructuras reproductivas (sacos de esporas, esporas, etcétera).

LEPOCINCLIS

ANABAENA

EUGLENA

SPIROGYRA

**Figura 8-7** Algunos tipos de algas presentes en el agua contaminada. *Fuente:* Palmer (1959).

Las **levaduras** son organismos unicelulares mucho más grandes que las bacterias (de 1 a 5  $\mu\text{m}$  de ancho y de 5 a 30  $\mu\text{m}$  de longitud); por lo general son células ovoides, esféricas y elipsoidales que se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza. Las levaduras se reproducen de forma asexual por fisión binaria o por gemación, y sexualmente por formación de ascosporas. A diferencia de los mohos, las levaduras son facultativas; es decir, crecen de forma tanto aerobia como anaerobia. Las levaduras se emplean en una amplia variedad de procesos fermentativos (para hacer vino, cerveza y pan) y para sintetizar ciertas vitaminas, grasas y proteínas a partir de azúcares sencillos y nitrógeno amoniacal. Otras levaduras, como *Candida*, causan graves infecciones en los humanos.

Las **setas** son formas diferenciadas de hongos. El micelio está en el suelo, y en ciertas condiciones se forman sobre él los **basidios**, estructuras que llamamos setas u hongos.



TABLA 8-2 CLASIFICACIÓN DE LAS ALGAS

División	Color	Ambiente/disposición celular/comentarios
I. Clorofitos	Verde hierba	Agua dulce; principalmente algas de aguas limpias (excepto <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> ), casi siempre coloniales, filamentosas.
II. Crisofitos	Verde amarillento	Agua limpia y fría; principalmente celulares, algunas coloniales. Las diatomeas tienen sílice en la pared celular.
III. Pirrofitos	Pardo amarillento	Principalmente marinas; 90% unicelulares, dos flagelos.
IV. Euglenofitos	Verde	Agua dulce; requieren nitrógeno orgánico; crecen como protozoarios en ausencia de luz; unicelulares, motilidad por flagelo.
V. Rodofitos	Rojo	Principalmente marinas; agua cálida muy limpia, coloniales; son comunes las hojas.
VI. Fiofitos	Pardo	Marinas; agua fría; coloniales, grandes. Ejemplo: <i>Macrocystis</i> , alga marina gigante.
VII. Cianofitos	Verde azuloso <sup>a</sup>	Agua dulce, cálida, con frecuencia contaminada; unicelulares, masas gelatinosas; sin cloroplastos ni núcleo verdadero; fijadoras de nitrógeno, suelen formar floraciones algáceas.

<sup>a</sup>Las algas azules actualmente se describen como bacterias azules o cianobacterias.

Las hifas forman un micelio en la superficie y extraen nutrientes de ella. El hongo se adhiere a las superficies nuevas por medio de estolones. Las esporas están en un esporangio en la punta de una hifa especializada llamada esporangióforo.

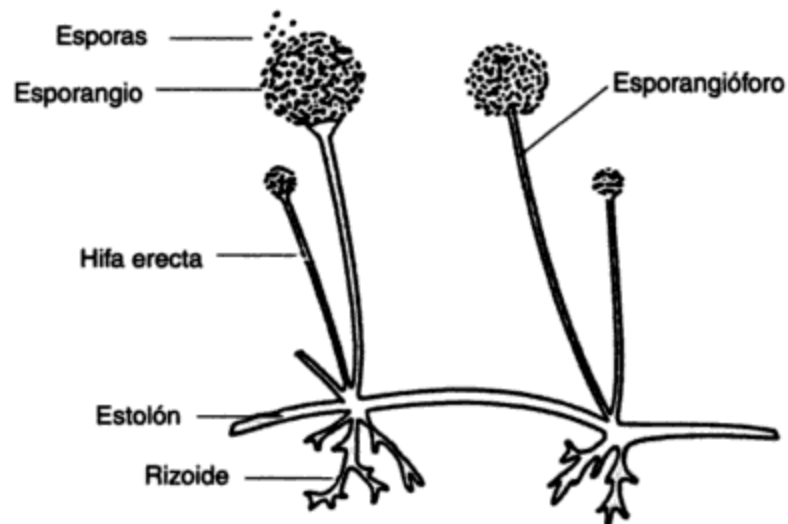


Figura 8-8 Bosquejo de un hongo. Fuente: Mitchell (1974).

Los tres grupos de hongos se distinguen con base en su estructura y método de reproducción, conforme al esquema de clasificación simplificado que se muestra en la tabla 8-3.

**TABLA 8-3** CLASIFICACIÓN DE LOS HONGOS ACUÁTICOS Y DEL SUELO

Tipo	División	Características/ejemplos
Mohos (filamentosos)	Ficomicetos Hongos imperfectos	Esporas sexuales o asexuales; <i>Mucor</i> , <i>Rhizopus</i> Ningún estadio sexual; <i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i>
Levaduras (no filamentosos)	Ascomicetos	Esporas sexuales en sacos; <i>Neurospora</i> , <i>Candida</i>
Setas (macroscópicos)	Basidiomicetos	Estadio sexual en los basidios; champiñón común

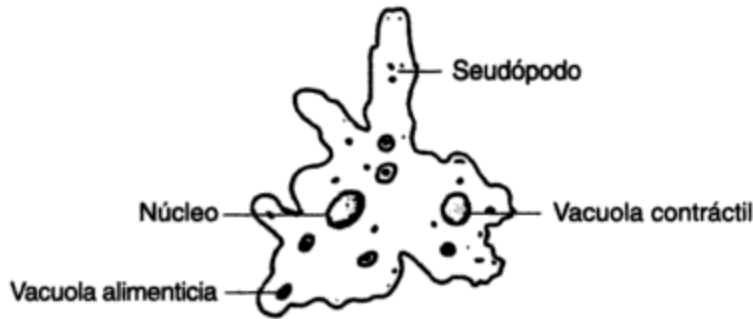
Fuente: Adaptado de Mitchell (1974).

**Protozoarios.** Los protozoarios son los organismos unicelulares más especializados. Casi todos ellos son no fotosintéticos, se reproducen asexualmente por fisión binaria y carecen de verdadera pared celular. La mayor parte de las especies tienen motilidad y se pueden clasificar con base en el medio de locomoción (véase la tabla 8-4). Su tamaño varía desde pocos hasta varios cientos de micras. Los protozoarios están ampliamente distribuidos en la naturaleza y existen en casi todos los hábitat donde hay humedad. Estos organismos sobreviven en condiciones adversas formando quistes con pared gruesa. Los protozoarios pueden ser saprófitos (obtienen alimento en forma disuelta); son depredadores de bacterias y se les encuentra dondequiera que las bacterias abundan. Algunos de ellos son parásitos capaces de causar enfermedades en animales y humanos.

**TABLA 8-4** ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DE PROTOZOARIOS COMUNES ACUÁTICOS Y DEL SUELO

I. <b>Seudópodos</b> (Sarcodina)
Motilidad por pseudópodos; movimiento amibiano fluido; <i>Amoeba</i> , <i>Entamoeba</i>
II. <b>Flagelados</b> (Mastigophora)
Motilidad por flagelos; muchos fotosintéticos; <i>Euglena</i> , <i>Volvox</i> , <i>Giardia</i>
III. <b>Ciliados</b> (Ciliophora)
Nadan libremente; motilidad por muchos cilios que se mueven al unísono; <i>Paramecium</i>
Adheridos; fijos por un pedúnculo a una superficie; <i>Vorticella</i>
IV. <b>Protozoarios parásitos</b>
(Suctoria)
Ciliados de nado libre al principio del ciclo vital, tentáculos en el estadio adulto posterior pedunculado
(Sporozoa)
Por lo común sin motilidad; rara vez viven en libertad; parásitos; <i>Plasmodium</i>

Fuente: Adaptado de Mitchell (1974).

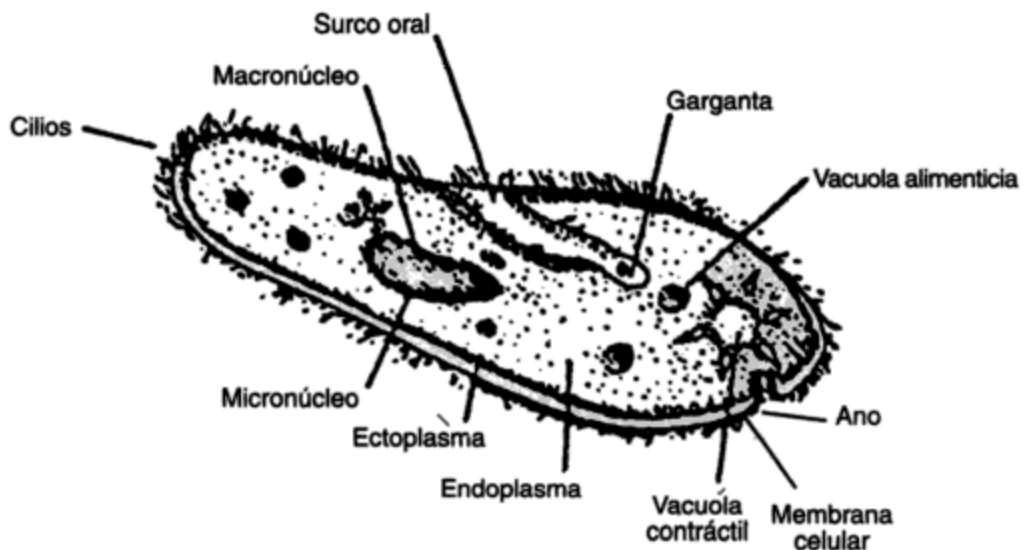


Una amiba, miembro del subphylum Sarcodina

**Figura 8-9** Bosquejo de una amiba.  
Fuente: Mitchell (1974).

La membrana celular de los sarcodinos cambia de forma continuamente. Los organismos se mueven alargando su citoplasma en busca de alimento. Estas extensiones se llaman **seudópodos**, o pies falsos, y son típicos de las **amibas** (figura 8-9). Los sarcodinos son saprófitos. *Entamoeba histolytica* es un agente patógeno común que causa disentería amibiana en los humanos.

Los mastigóforos tienen flagelos, y ciertas especies son fotosintéticas. Los organismos fotosintéticos (como *Euglena*) muestran algunas de las características de los protozoarios y de las algas. Algunos mastigóforos son parásitos. *Trypanosoma*, un parásito de la sangre, causa la enfermedad del sueño en los humanos. Los cilióforos se caracterizan por tener finos vellos (cilios) que además de conferir motilidad, facilitan la captura de alimento. *Paramecium* es un ciliado típico (figura 8-10).



**Figura 8-10** Bosquejo de un paramecio. Fuente: Mitchell (1974).

Un miembro del subphylum Ciliophora. Los cilios se usan para capturar el alimento y para la movilidad de las células.

Los protozoarios parásitos incluyen los suctorios (de nado libre) y los esporozoarios (sin motilidad). Cuatro especies de *Plasmodium*, los causantes de la malaria o paludismo en los humanos, son miembros del segundo grupo. El vector (portador) que trasmite estos parásitos a un huésped es el mosquito *Anopheles* hembra.

## 8.3 MICROBIOLOGÍA APLICADA

### 8.3.1 Microbiología de suelos y de residuos sólidos

La mayor parte de los seres vivos terrestres (plantas, animales y protistas) y de los residuos asociados con ellos tarde o temprano se incorporan al suelo, por actividad microbiana. Sin esta actividad los ciclos de nutrientes, como el del carbono o del nitrógeno, no se completarían y entonces la vida sobre la Tierra estaría en peligro.

Los suelos constituyen una capa muy delgada de material sobre la superficie terrestre. La profundidad del suelo y sus propiedades fisicoquímicas varían de acuerdo con el lugar, pero en general el suelo tiene cinco componentes principales:

1. *Partículas minerales inorgánicas*. Estas partículas, compuestas principalmente de aluminio, sílice y cantidades menores de otros minerales, varían en cuanto a tamaño desde arcillas muy pequeñas (0.002 mm) hasta granos de arena y guijarros. La proporción de estas partículas determina la retención de agua, la estructura del suelo y la disponibilidad de aire y nutrientes. Los suelos inorgánicos (compuestos en su mayor parte de partículas minerales) son los más comunes.
2. *Residuos orgánicos*. Restos vegetales y animales que forman el componente orgánico del suelo a través de diversas etapas de descomposición culminan en una sustancia estable conocida como *humus*. Los suelos orgánicos (que contienen principalmente residuos orgánicos) se encuentran en las turberas y pantanos.
3. *Agua*. El agua es necesaria para la actividad microbiana. La cantidad de agua presente en el suelo depende de varios factores que incluyen la precipitación, la estructura del suelo y la población microbiana. El agua se encuentra en los poros que existen entre las partículas de los suelos saturados o absorbida en la superficie de las partículas en los suelos secos. Diversos nutrientes se disuelven en el agua y por tanto están disponibles para los microorganismos.
4. *Gases*. Los gases, principalmente nitrógeno y oxígeno pero también dióxido de carbono (en particular cuando hay actividad biológica), ocupan los poros que no están llenos por agua. En los suelos saturados se disuelven pequeñas cantidades de gases en el agua.
5. *Sistemas biológicos*. Los sistemas radiculares de las plantas, animales pequeños y microorganismos constituyen el quinto componente del suelo. Un gramo de suelo agrícola rico puede contener 2,500 millones de bacterias, 500,000 hongos, 50,000 algas y 30,000 protozoarios.

Las bacterias y los hongos constituyen el grupo más grande de microorganismos en los suelos. Las bacterias autótrofas y heterótrofas degradan las complejas sustancias orgánicas e

inorgánicas, algunas en condiciones aeróbicas y otras en condiciones anaeróbicas. Los hongos descomponen la celulosa y otros componentes importantes de los tejidos vegetales y, como es de esperar, se les encuentra por lo general cerca de la superficie, en donde prevalecen condiciones aeróbicas.

En un suelo fértil, las actividades de las algas no son tan importantes como las de las bacterias y los hongos. Sin embargo, en los suelos muy áridos o inorgánicos y en las rocas, las algas son los productores primordiales de material orgánico. Los protozoarios también abundan dondequiera que hay bacterias y condiciones aeróbicas.

El grado y el tipo de crecimiento microbiano en el suelo depende de los mismos factores que controlan el crecimiento en los ambientes acuáticos:

- Presencia de nutrientes suficientes
- Disponibilidad de humedad y, para organismos aerobios, de aire
- Temperatura y pH idóneos

En las condiciones favorables que crean los rellenos sanitarios o la formación de abono, se pueden emplear los organismos del suelo para degradar residuos sólidos municipales. El medio más común para eliminar los residuos sólidos son los rellenos sanitarios (véase el capítulo 14). El material residual, rico en materia orgánica, se coloca en zanjas o pozos, se compacta, y cada día se cubre con una capa de suelo orgánico que suministra una población grande y diversificada de microorganismos. La actividad microbiana se verifica inicialmente en condiciones aeróbicas y más tarde en condiciones anaeróbicas. Los microorganismos facultativos o anaerobios descomponen las sustancias orgánicas complejas en ácidos orgánicos más sencillos que, posteriormente los hongos y las bacterias aerobias oxidan a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Con el tiempo la actividad aerobia se limita por falta de oxígeno una vez que el material orgánico queda enterrado y saturado de agua. El dióxido de carbono, los ácidos orgánicos, el etanol, el amoníaco y otros productos de la descomposición de materia orgánica en los rellenos sanitarios pueden causar problemas ambientales, los cuales se analizan en el capítulo 14.

Cuando la descomposición de desechos sólidos municipales se lleva a cabo en un medio aeróbico controlado, la degradación orgánica se acelera y el proceso se denomina **formación de abono**. El objetivo de este proceso es formar un producto estable rico en nutrientes que sirva para recuperar tierras o mejorar suelos. Ya sea que la formación de abono se haga de forma natural en montones largos llamados camellones, o mecánicamente con equipos especiales, la actividad biológica genera calor, el cual destruye los agentes patógenos en unos 3 días a  $60^\circ\text{C}$ . Sin embargo, la temperatura se debe mantener abajo de  $70^\circ\text{C}$  para no matar los hongos (*Mucor*, *Rhizopus*, *Penicillium* y *Aspergillus*) y las bacterias termófilas (los mismos géneros que en otros procesos de tratamiento aeróbico de residuos) que producen el abono. En la sección 14.6.2 se presentan otros datos acerca de la formación de abono.

La actividad biológica del suelo desempeña un papel en otras aplicaciones, como por ejemplo los métodos de tratamiento de aguas residuales en tierra y la utilización de lodos en terrenos agrícolas. Éstos se examinan en las secciones 12.6.1 y 12.7.3, respectivamente.

### 8.3.2 Microbiología del agua, de aguas residuales y organismos indicadores

El agua que se precipita a la superficie, ya sea en forma de lluvia, nieve, granizo o cellisca, a medida que cae arrastra partículas de polvo del aire. En los primeros minutos de precipitación el polvo, junto con los pocos microorganismos que contiene, es eliminado del aire; de ahí en adelante el agua de lluvia está relativamente libre de estos contaminantes. Al llegar a la superficie el agua que la vegetación no absorbe se filtra al suelo para convertirse en aguas subterráneas; el resto, corre hacia arroyos, estanques, ríos y lagos.

A causa de la acción filtrante del suelo, los bajos niveles de nutrientes, la baja temperatura y la falta de luz, las aguas subterráneas normalmente están libres de organismos. Empero, en ciertas áreas rocosas, en especial en las formaciones de piedra caliza, puede haber conductos subterráneos bastante grandes, y el agua que alcanza el sistema de aguas subterráneas a través de grietas o túneles puede causar contaminación microbiana en el subsuelo.

El agua de superficie recoge muchas sustancias durante su recorrido por tierras agrícolas y áreas industriales. Los terrenos agrícolas aportan nitratos, fosfatos y otros nutrientes, junto con microorganismos del suelo. El material orgánico como hojas, hierba recortada, deyecciones de aves y animales, y residuos de plantas procesadoras de alimentos, todo ello con su población microbiana asociada, también tienen acceso al agua de superficie. A menos que los contaminantes tóxicos sean excesivos, el resultado es que prácticamente todas las aguas superficiales del mundo (con dos posibles excepciones)\* sostienen una población microbiana floreciente.

Muchas formas de vida microbiana pueden existir en agua en tanto se satisfagan las necesidades físicas y nutricionales apropiadas para el crecimiento. Las bacterias aerobias y los protozoarios necesitan oxígeno disuelto para crecer. El nitrógeno y el fósforo, así como la luz, son indispensables para las algas. El número y tipo de microorganismos presentes constituyen un indicio de la calidad del agua. En el agua limpia o con un bajo contenido de nutrientes, el número total de microorganismos es limitado, pero puede haber una gran variedad de especies. A medida que el contenido de nutrimentos aumenta, también lo hace el número de microorganismos, en tanto el número de especies se reduce. En una corriente anaerobia contaminada predominan pocas especies de bacterias anaerobias o facultativas. En la tabla 8-5 se presentan las cantidades representativas de bacterias en diversas aguas.

Además del comportamiento independiente de los diversos tipos de microorganismos que se han descrito en las secciones precedentes, éstos pueden interactuar unos con otros ya sea de manera cooperativa o competitiva. Esta clase de interacción con frecuencia se produce en el ambiente, y debemos estar conscientes de estas relaciones en el diseño de sistemas de tratamiento de residuos biológicos. Los siguientes tres ejemplos ilustran el fenómeno y se describen con mayor detalle en el capítulo 12:

1. *Algas/bacterias*. Se crea una estrecha asociación entre algas (que necesitan dióxido de carbono y producen oxígeno) y bacterias aerobias (que necesitan oxígeno y producen

\* El lago Tahoe, a horcajadas en la frontera entre California y Nevada, y el lago Baikal en Rusia carecen de nutrientes, a tal grado que no contienen vida microbiana.

TABLA 8-5 CONTEOS BACTERIANOS TÍPICOS EN AGUA

Fuente	Bacterias en 100 mL	Bacterias coliformes <sup>a</sup> en 100 mL
Agua de la llave	10	0-1
Agua natural limpia	10 <sup>3</sup>	0-10 <sup>2</sup>
Agua contaminada	10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>
Aguas negras sin tratar	10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup>

<sup>a</sup>Las bacterias coliformes están presentes en las aguas negras pero se mueren con el tiempo en las aguas naturales. Su hábitat natural son los intestinos de mamíferos de sangre caliente y el suelo.

dióxido de carbono) en estanques de oxidación, pantanos, lagos y otros ambientes similares.

2. *Protozoarios/bacterias*. En el tratamiento de aguas residuales municipales por el proceso de lodos activados, las bacterias son los agentes primarios en la conversión de residuos orgánicos en productos finales estables. Al mismo tiempo, los protozoarios consumen y limitan la población bacteriana en una relación depredador/presa, con lo cual se mantiene un equilibrio dinámico en la población microbiana.
3. *Bacterias/bacterias*. La digestión anaerobia de materia orgánica pone de manifiesto la interdependencia de dos grupos de bacterias: las formadoras de ácido, que convierten la materia orgánica en ácidos orgánicos grasos (p. ej., ácido acético) y de otros tipos, y las formadoras de metano, que utilizan estos ácidos para producir metano.

**Organismos indicadores.** El agua que se utiliza para beber y bañarse puede servir como vehículo para transmitir patógenos entéricos humanos que causan enfermedades transmitidas por agua; un análisis detallado de las cuales se presenta en la sección 8.4.3. La detección de agentes patógenos en el agua es difícil, económicamente costosa y poco práctica en los análisis rutinarios del agua. En su lugar, el agua se valora empleando un sustituto, que actúa como un indicador de contaminación fecal. Puesto que los organismos no patógenos también habitan en gran número en el intestino y están siempre presentes en las heces, junto con los agentes patógenos que pudiera haber, pueden servir como indicadores de contaminación fecal.

Las principales características de un buen organismo indicador son (1) su ausencia implica la inexistencia de patógenos entéricos; (2) la densidad de los organismos indicadores está relacionada con la probabilidad de la presencia de patógenos; y (3) en el medio los organismos indicadores sobreviven un poco más que los patógenos. Es evidente que no existe un organismo ideal indicador de esta naturaleza. Sin embargo, la presencia de coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales y *Clostridium perfringens* se considera como indicio de contaminación por heces, y por muchos años se ha empleado para valorar la calidad del agua.

De los organismos indicadores, las bacterias coliformes totales son las que se usan con mayor frecuencia. Este grupo incluye, por definición, "todas las bacterias aerobias y anaerobias

facultativas, gramnegativas, no formadoras de esporas y con forma de bastón que fermentan lactosa con formación de gases antes de 48 horas a 35°C" (APHA *et al.*, 1985). El grupo de coliformes se compone de *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Citrobacter freundii* y bacterias afines.

En el agua potable no debe haber ningún tipo de coliformes, por ello el total de éstas se emplean como indicio de contaminación fecal. En el caso de corrientes contaminadas, salidas de alcantarillado y áreas de natación, el recuento de coliformes totales se hace empleando la prueba con temperatura alta ( $44.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ). La diferenciación entre coliformes totales y coliformes fecales se basa en su capacidad o incapacidad para crecer a  $44.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . *Escherichia coli* es el tipo de coliforme más frecuente y predominante en el intestino humano. Otros miembros del grupo de coliformes, por lo general presentes en el suelo y la vegetación, también pueden encontrarse en las heces, pero en número reducido. En los países tropicales *E. coli* no es la coliforme intestinal predominante, así que en este caso la prueba de coliformes totales, más que la de fecales, es la medida más útil de la contaminación.

El recuento de estreptococos fecales (EF), otro tipo de bacterias intestinales, más abundantes en los animales que en los humanos, suele hacerse en conjunto con las coliformes fecales (CF), y la razón de ambos grupos (EF/CF) se emplea para diferenciar la fuente de la contaminación. Con una razón de 4.0, o más, la contaminación se considera debida a desechos humanos, en tanto que las razones menores de 0.7 indican contaminación por desechos animales. La presencia de *C. perfringens* indica contaminación fecal remota.

El recuento de indicadores bacterianos se lleva a cabo por medio de dos métodos alternativos: la técnica de fermentación en tubos múltiples, también llamada procedimiento del número más probable, o NMP, y el método de la membrana filtrante o método MF. Los detalles de estos dos métodos se pueden consultar en la literatura (APHA *et al.*, 1985).

### 8.3.3 Microbiología del aire atmosférico y de interiores

Por su falta de humedad la atmósfera no es un medio propicio para que los microorganismos puedan vivir y crecer; no obstante, pueden sobrevivir en estado vegetativo en grados que dependen de su resistencia, principalmente al secado y en menor medida a la radiación ultravioleta. Las bacterias y hongos que forman esporas pueden existir durante un tiempo muy largo en la atmósfera. Las células vegetativas no sobreviven más de unos cuantos días en el aire, en tanto que las esporas permanecen viables por años. Ciertos protozoarios forman quistes que, como las esporas, les permiten sobrevivir en condiciones adversas por periodos largos. Cuando las condiciones son favorables, las esporas o quistes se abren y se desarrollan células vegetativas.

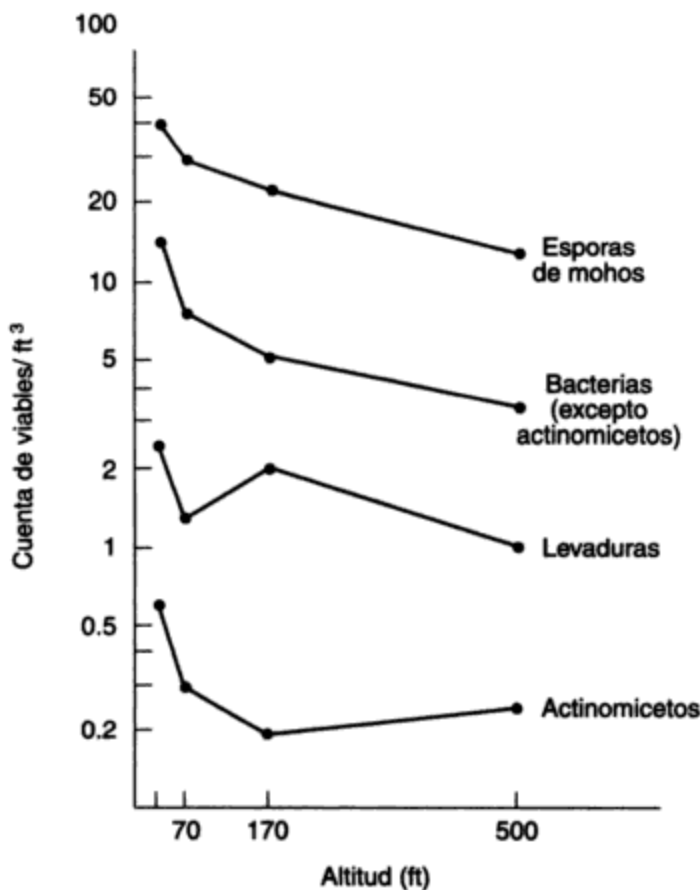
El aire es importante en microbiología porque proporciona un mecanismo de transferencia para los microorganismos cuyo alcance es mucho más amplio que el del agua. Los microorganismos constituyen una parte de la materia particulada de la atmósfera. Otras partículas son el polvo y los aerosoles líquidos, o gotas finas. Desde luego, cuanto más pequeña es la partícula más tiempo permanece suspendida en el aire. Los quistes que forman los protozoarios son relativamente pesados y se sedimentan del aire en cuestión de minutos. Por otra parte, las esporas de bacterias y hongos son muy pequeñas y se les ha encontrado a varios kilómetros de altura sobre la superficie terrestre.



Las partículas de la atmósfera provienen tanto de causas naturales como de actividades humanas. Son ejemplos de las primeras los incendios forestales, las erupciones volcánicas, los aerosoles del rocío oceánico y el polvo que recoge el viento de los campos abiertos y la vegetación. Las fuentes humanas principalmente tienen relación con la energía, como por ejemplo las partículas derivadas de la quema de combustibles para fines energéticos y de transporte, así como el polvo que crean los procesos industriales y agrícolas. El grueso de la materia particulada de la atmósfera es de origen natural, aunque las estimaciones de la contribución de la sociedad varían entre el 5 y el 45% del total (Perkins, 1974).

Las partículas de humo, el polvo industrial y el polvo de las erupciones volcánicas constituyen la porción principal de la materia particulada del aire, pero son pocos los microorganismos adheridos a estas partículas. El polvo que se genera en campos, océanos y bosques probablemente transporta esporas por toda la atmósfera baja. La figura 8-11 indica los tipos y número de los microorganismos presentes en el medio urbano en función de la altura. Se han encontrado esporas de bacterias y hongos en muestras de aire tomadas a alturas de hasta 3,000 m sobre el norte del océano Atlántico. El conocimiento de la concentración y distribución de los microorganismos en la atmósfera es limitado, pero no hay duda de que se encuentran dispersos por todo el mundo.

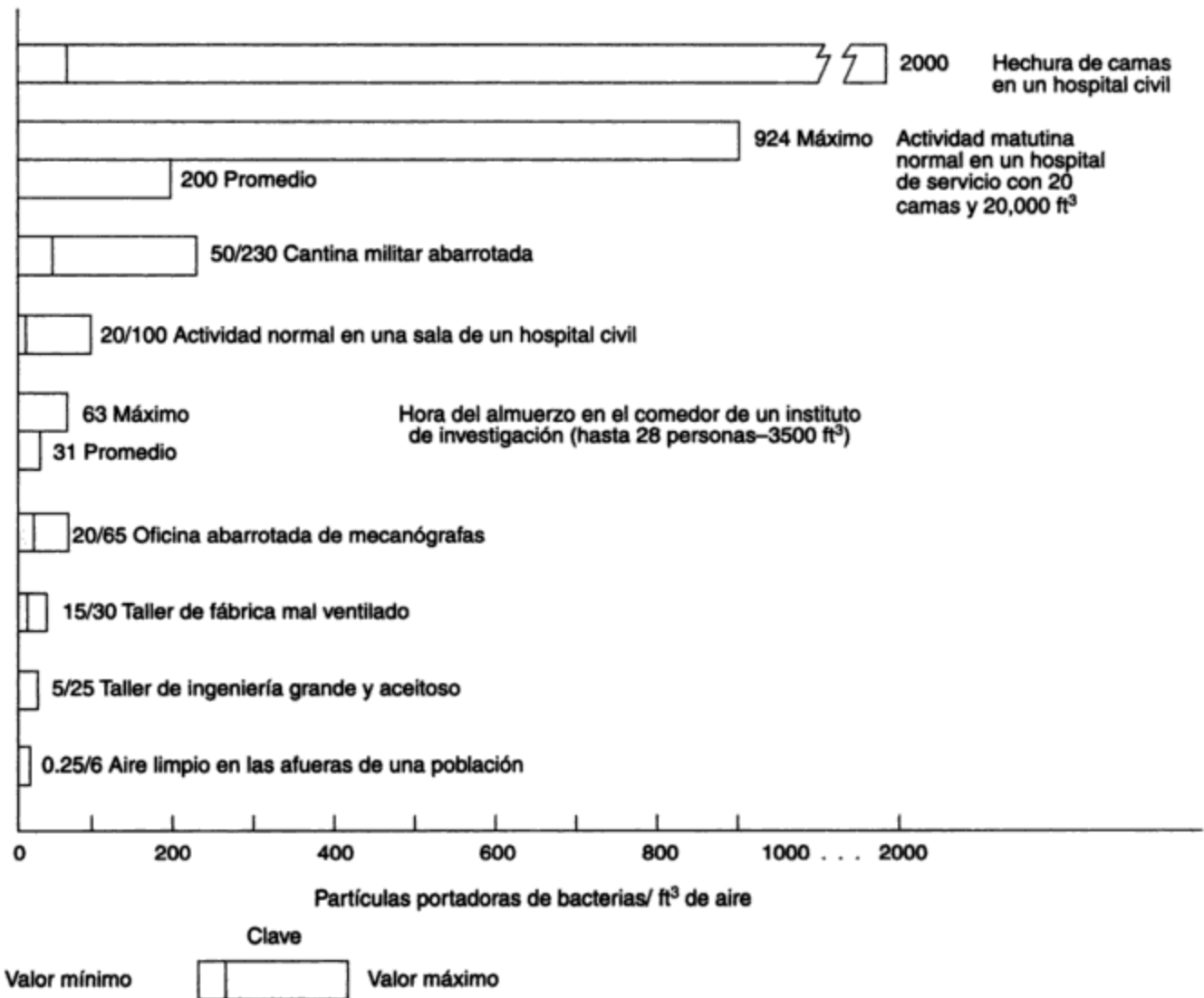
El contenido microbiano del aire de interiores tiene una trascendencia inmediata. En él influye la velocidad y los medios de ventilación, el grado de hacinamiento y el tipo de activi-



**Figura 8-11** Tipos y número de organismos a diversas altitudes en el aire urbano. Fuente: T. J. Wright, V. W. Greene y H. J. Paulus, *Journal of the Air Pollution Control Association* 19 (1969): 337.

dades que se llevan a cabo en el edificio. Al aire libre, la cantidad de aire disponible por persona es básicamente ilimitada, y la turbulencia natural del aire difunde y distribuye constantemente la materia particulada. Bajo techo, las actividades de los ocupantes generan microorganismos transportados por el aire que se distribuyen en un espacio relativamente confinado. Su eliminación depende de la eficiencia de los sistemas de ventilación y filtración. La figura 8-12 es una gráfica que muestra el contenido bacteriano de diversos ambientes interiores.

Son motivo de especial preocupación los microorganismos patógenos que causan afecciones respiratorias. La tos o el estornudo, o incluso la conversación de una persona infectada, puede emitir organismos patógenos en el aire y propagar la infección. Los efectos de los microorganismos de la atmósfera en la salud se analizan más a fondo en la sección 8.4.4.



**Figura 8-12** Contenido bacteriano típico del aire de interiores. Fuente: F. P. Ellis y U. F. Raymond, *Studies in Air Hygiene*. Medical Research Council (GB) Spec. Rep. Ser. 262, 1948; con autorización del director de la H. M. Stationery Office, Londres.

## 8.4 EPIDEMIOLOGÍA Y ENFERMEDADES

### 8.4.1 Saneamiento y salud

El conocimiento histórico que la sociedad tiene respecto a las enfermedades epidémicas, así como la batalla contra ellas está bien ilustrado en Winslow (1943). Pero también Baker (1948) proporciona un recuento que se ocupa de manera más específica de la historia de la purificación de abastecimientos públicos de agua. Feachem *et al.* (1983) presentan un recuento más reciente de los aspectos sanitarios del manejo de excrementos y aguas residuales. Sartwell (1973) es una referencia valiosa acerca de la epidemiología de las enfermedades; las secciones subsecuentes de este capítulo proceden en parte de esta fuente.

Una de las primeras teorías de la enfermedad fue la del **miasma**, que significa aire malo o insalubre. El término *malaria*, que literalmente significa "mal aire", procede de este concepto. El agente etiológico o causal de la enfermedad se consideraba como generado y residente en los miasmas. La teoría del miasma gozó de aceptación general como explicación para la causa de las enfermedades hasta que tentativamente se estableció la teoría de los gérmenes en el siglo XVII.

La Edad Media, con sus epidemias desastrosas, proporcionó muchos estudios de caso que permitieron a los científicos aprender acerca de las enfermedades. Una epidemia de lepra en el siglo VI, la peste bubónica en 1348 y la sífilis en 1500 fueron las desgracias más importantes. Para el siglo XVI Fracastoro, después de cuidadosas observaciones, había desarrollado un concepto claro de las enfermedades contagiosas; aun así, se pensaba que los medios de transmisión eran gases y no microorganismos.

Los microorganismos no fueron observados hasta que Leeuwenhoek, nacido en Holanda en el siglo XVII, ideó el primer microscopio con suficiente aumento: la ciencia de la microbiología se inició con sus observaciones de protozoarios y bacterias.

La creencia en la propagación de las enfermedades contagiosas por el aire contaminado y la observación de que las mismas eran más abundantes en las áreas sucias y atestadas de las ciudades, dieron origen al despertar sanitario de principios y mediados del siglo XIX. Las ciudades de aquellos tiempos contenían plazas públicas con montones de suciedad en descomposición, y en cuanto éstos se limpiaban, se reducía notablemente la incidencia de tifoidea, cólera y tifo. La conclusión de que el grado de saneamiento tenía algo que ver con las enfermedades tuvo como base la observación empírica y no una comprensión teórica del contagio.

En 1849 John Snow, un médico, publicó un panfleto titulado *On the Mode of Communication of Cholera* (acerca del modo de comunicación del cólera). Dos epidemias de cólera en Londres sirvieron para poner a prueba sus teorías. El autor explicaba cómo "se deben tragar cantidades minúsculas de las eyecciones y deyecciones de los pacientes de cólera", y respaldó esto con su estudio clásico de la epidemia de la bomba de Broad Street. Snow consiguió demostrar que de las 77 víctimas de cólera, 59 habían utilizado agua de una bomba sospechosa. En la zona había un hospicio que relativamente se conservó libre de la epidemia, sin embargo, rodeándole había casas en las cuales se habían producido muertes por cólera. El hospicio tenía su propio pozo, por eso es que la gente de allí no se contaminaba. Y cuando se cerró la llave del agua de la calle la epidemia terminó. Se identificó la fuente de la contaminación como un drenaje que procedía de la casa de un paciente infectado y que estaba ubicada muy cerca del pozo.

En la segunda mitad del siglo XIX, Pasteur, Lister y Koch establecieron de manera concluyente la teoría de los gérmenes. Ellos consiguieron aislar y cultivar microorganismos que pro-

ducían enfermedades específicas, según pudieron demostrar. El papel del portador (alguien que no está enfermo clínicamente pero lleva consigo la infección) y el papel del insecto huésped en ciertos padecimientos se demostraron más tarde, y también se explicó cómo se podía transmitir la enfermedad sin contacto aparente entre pacientes infectados.

En la actualidad es bien conocido el potencial del agua para propagar epidemias masivas. En los primeros años de este siglo, los intentos por controlar la fiebre tifoidea y diversas afecciones entéricas (o intestinales) dieron por resultado múltiples patentes respecto al uso de agentes oxidantes y otras técnicas de purificación del agua. La primera aplicación de la cloración en gran escala tuvo lugar en 1908 en el embalse Boonton de la planta de abastecimiento de agua de la ciudad de Jersey en Estados Unidos. A partir de 1920, las afecciones entéricas han sido erradicadas casi por completo en la mayor parte de los países desarrollados. En los países menos desarrollados, la mitad de la población todavía no dispone de abastecimiento de agua que esté protegido de forma adecuada, y el 75% carece de sistemas seguros de eliminación de desechos (Eckholm, 1977; 1982).

La tabla 8-6 compara la tasa de mortalidad con las expectativas medias de vida al nacer; esto se observa entre las regiones más avanzadas y las que están en pleno desarrollo. La tabla muestra con claridad las menores tasas de mortalidad y las mayores expectativas de vida atribuibles a la mejor salud pública, las prácticas de saneamiento y la medicina en los países desarrollados. Las estadísticas correspondientes a África y el sur de Asia son similares a las que tenían los países desarrollados hace más de cien años.

**TABLA 8-6 TASAS BRUTAS DE MORTALIDAD Y EXPECTATIVAS DE VIDA ESTIMADAS PARA LAS PRINCIPALES ÁREAS Y REGIONES DEL MUNDO, 1965-1970**

Principales áreas y regiones	Tasa bruta de mortalidad (muertes por 1,000 habitantes)	Expectativa de vida al nacer (años)
Total mundial	14	53
Regiones en vías de desarrollo	16	50
Regiones más desarrolladas	9	70
África	21	43
Asia (excepto la CEI)		
Asia oriental	14	52
Japón	7	71
Sur de Asia	17	49
Europa (excepto la CEI)	10	71
Latinoamérica	10	60
Estados Unidos y Canadá	9	70
Oceanía	10	65
CEI* (la antigua URSS)	8	70

Fuente: ONU (1973).

\*CEI: Comunidad de Estados Independientes.

### 8.4.2 Patógenos

Un **patógeno** es un agente que causa infección en un huésped vivo. Actúa como parásito dentro del huésped, ya sean individuos o células, y trastorna las actividades fisiológicas normales.

Este trastorno es lo que causa los síntomas de la enfermedad, como alta temperatura, un desajuste del proceso digestivo, un cambio en la química sanguínea y otros indicios de infección.

El término infección, por definición, significa que un agente productor de enfermedad está creciendo y multiplicándose dentro del huésped, quien puede tener o no síntomas de la enfermedad. La presencia del agente estimula al huésped a producir anticuerpos. De acuerdo con la eficacia de éstos, el resultado puede ser enfermedad, recuperación, muerte, o limitar el crecimiento del agente hasta el punto en que los síntomas de la infección no se manifiesten (esto es, el huésped está infectado sin que aparente estar enfermo).

La capacidad de un patógeno para causar daños al huésped se designa como **virulencia**. La virulencia es un concepto relativo que compara las capacidades de ataque del patógeno con la capacidad de defensa del huésped. En la virulencia influyen factores inherentes al patógeno y al huésped, así como las condiciones ambientales.

Una **infección** es una condición patológica debida al crecimiento de microorganismos en un huésped.

Un **patógeno** es un agente que causa infección en un huésped vivo.

Una **toxina** es una sustancia venenosa que producen ciertos organismos (por ejemplo, toxinas bacterianas).

La **virulencia** es la capacidad de un microorganismo para causar enfermedad.

Entre los organismos patógenos que tienen la virulencia suficiente para infectar humanos en condiciones apropiadas se cuentan ciertas especies de bacterias, virus, algas y hongos, así como protozoarios y organismos helmínticos (gusanos parásitos). La tabla 8-7 indica, para los diversos grupos de microorganismos, algunas afecciones comunes y los medios de transmisión de los patógenos.

Los patógenos virulentos causan epidemias que afectan a un número anormalmente alto de personas en un área localizada. No es necesario que el número real de personas afectadas sea grande. Por ejemplo, unos pocos casos de botulismo o envenenamiento por alimentos que se presentan de manera simultánea en la misma área podrían considerarse como una epidemia, ya que esta enfermedad es poco frecuente. En cambio, un aumento brusco en la incidencia de resfriados entre escolares en el otoño es normal y no se ve como una epidemia. Como ya explicamos, una enfermedad **endémica** es por ejemplo la **esquistosomiasis**, una infección por gusanos parásitos que es frecuente en un grupo particular, en este caso la población rural de ciertas partes de África.

Para que se produzca una epidemia deben estar presentes tres factores: un huésped infectado, cierto número de huéspedes potenciales no infectados y un mecanismo de transferencia entre ambos. Un huésped infectado implica la presencia de un patógeno virulento. El patógeno tarde o temprano acarrea su propia aniquilación, ya sea destruyendo el huésped o estimulando la producción de anticuerpos que destruyen el patógeno. Por consiguiente, para que una epidemia persista debe haber un suministro continuo de huéspedes nuevos no inmunes susceptibles de ser invadidos por los patógenos.

Todas las epidemias son autolimitantes pues llega un momento en que los factores combinados de escasez de huéspedes nuevos, una mayor distancia entre huéspedes infectados y no

TABLA 8-7 ORGANISMOS PATÓGENOS

Enfermedades	Agentes y vectores
<b>Bacterianas</b>	
Ántrax	Lana y pieles animales contaminadas; carne semicruda a infectada; inhalación de esporas arrastradas por el aire.
Botulismo	Toxina termolábil que se produce en alimentos no ácidos en empaques anaerobios; organismos del suelo y del tracto intestinal de los animales.
Brucelosis o fiebre ondulante	Contacto con cerdos, ganado, cabras y caballos infectados; el uso de leche y derivados de ella sin pasteurizar o procesar es la causa de casos y brotes esporádicos.
Cólera	Las heces o portadores de agua contaminada, leche, alimentos o incluso a través de moscas; la oleada inicial del cólera epidémico se transmite por agua.
Peste bubónica y selvática	Organismos transmitidos por pulgas de ratas y roedores silvestres; el vómito contaminado de la pulga penetra la piel durante la picadura.
Salmonelosis	Las heces de animales y personas infectadas contaminan los alimentos; los organismos se multiplican en la comida no refrigerada y suministran dosis masivas.
Shigelosis o disentería bacilar	Cuatro grupos del bacilo disentérico, <i>Shigella dysenteriae</i> , <i>S. flexneri</i> , <i>S. boydii</i> y <i>S. sonnei</i> , salen en las heces y regresan directamente a la boca o por medio del agua, los alimentos, las moscas u objetos que se ensucian con heces.
Fiebre tifoidea y paratifoidea	Las heces y la orina de ciertos casos y de portadores de agua contaminada, leche, alimentos y moscas.
<b>Por rickettsias</b>	
Tifus endémico y tifus epidémico	Las pulgas transmiten las rickettsias ya sea de rata a rata o de rata a humanos; los organismos de las heces de las pulgas penetran por picaduras y abrasiones recientes.
<b>Virales</b>	
Hepatitis infecciosa	Los brotes se han relacionado con agua, leche y alimentos contaminados, incluso mariscos.
Fiebre amarilla	Fiebre amarilla urbana de casos humanos por <i>Aedes aegypti</i> ; fiebre amarilla selvática de monos y tífes por mosquitos forestales; la presencia de <i>Aedes aegypti</i> en grandes áreas de África y el sureste asiático requiere vigilancia no obstante la ausencia de fiebre amarilla.
<b>Por protozoarios</b>	
Amibiasis o disentería amibiana	Transferencia de mano a boca, contaminación por verduras crudas, moscas, manos sucias de manipuladores de alimentos, agua.
Malaria	Tres tipos de plasmodio se transmiten de persona a persona por medio de una de las aproximadamente 20 especies del mosquito anófeles, que son vectores eficientes.
Giardiasis	Los quistes de <i>Giardia lamblia</i> de las heces de humanos contaminan el agua y causan diarrea.
Criptosporidiosis	Los ooquistes de <i>Cryptosporidium parvum</i> se expelen en las heces. Los brotes tienen relación con abastecimientos de agua contaminados.
<b>Helmínticas</b>	
Ascariasis o lombrices intestinales	El suelo contaminado con heces de personas infectadas contiene huevos embrionarios; la ingestión de estos suelos o de alimentos crudos que han tenido contacto con el suelo es la ruta de infección.
Enfermedades por anquilostomas	Penetración de la piel por larvas que se desarrollan en suelos contaminados con heces de personas infestadas.
Enfermedades por solitarias	Causadas por <i>Taenia solium</i> (cerdos) y <i>Taenia saginata</i> (ganado). Parásitos intestinales comunes entre consumidores de carne en áreas ganaderas (p. ej., partes de Estados Unidos, Canadá y México).
Esquistosomiasis	Los huevos de <i>Schistosoma mansoni</i> y <i>S. japonicum</i> salen con las heces de humanos y de <i>S. hematobium</i> con la orina para seguir su ciclo en agua a través de tipos específicos de caracoles, hasta la forma de cercaria que penetra la piel humana; los animales domésticos y los roedores silvestres albergan <i>S. japonicum</i> .

Fuente: Adaptado de Sartwell (1973), Feachem *et al.* (1983).

infectados y, quizá una reducción de la virulencia, dan origen a muy pocos brotes nuevos de la enfermedad. Por desgracia, puede haber una enorme pérdida de vidas antes de que se alcance el límite, como lo prueba la pérdida de al menos un tercio de la población de la Europa medieval en el siglo XIV a causa de la peste bubónica. En Inglaterra, alrededor de un tercio de la población de 4.5 millones pereció en un lapso de dos años y medio entre 1347 y 1350 (Ziegler, 1969).

Por qué ciertos microorganismos son más virulentos que otros es algo que no está claro aún. La mayor parte de los microorganismos no son patógenos y son **saprófitos**, esto es, organismos que viven en la materia orgánica muerta y en descomposición y se alimentan de ella. Entre los saprófitos existen pocos organismos que son **patógenos facultativos** u **oportunistas**, los cuales pueden causar enfermedades en circunstancias muy especiales. Desde luego, hay patógenos que son **parásitos obligados**, como los virus que no pueden vivir fuera de una célula huésped. La mayor parte de los patógenos puede crecer fuera de un huésped hasta que encuentra una puerta de entrada idónea para la infección.

Uno de los medios por los que los patógenos causan enfermedades es la producción de sustancias venenosas que se conocen como **toxinas**. No se ha demostrado que todos los patógenos tienen estas características, pero es claro que la producción de toxinas y su potencia son factores importantes de la virulencia de ciertos microorganismos. Las toxinas que se excretan en los alrededores se llaman **exotoxinas**; las que permanecen en el microorganismo se conocen como **endotoxinas** y no se liberan antes de que el microorganismo muera. La cantidad de exotoxina que se libera cuando la célula muere o se destruye también puede ser significativa. En general, las exotoxinas son más potentes que las endotoxinas.

En ciertos casos, se piensa que la producción de enzimas por los patógenos contribuye a su virulencia. Las enzimas pueden ayudar a propagar la enfermedad en el huésped aumentando la permeabilidad de las paredes celulares, destruyendo tejidos y células específicas, o permitiendo al patógeno resistir el ataque de los anticuerpos.

El material capsular que rodea a ciertas bacterias patógenas puede afectar su virulencia. Las cápsulas no son tóxicas, pero en apariencia protegen a los organismos patógenos del ataque de los anticuerpos. Si este material capsular se elimina, el patógeno puede perder su "patogenicidad" o su virulencia. Sin embargo, existen muchas bacterias capsuladas que no son patógenas, y la presencia o ausencia de una cápsula no afecta la virulencia de ciertos patógenos.

Cada patógeno tiene una puerta de entrada específica hacia su huésped. Los patógenos entéricos son los que causan afecciones en el tubo alimenticio o en el sistema digestivo. Los organismos que producen tifoidea, disentería, gastroenteritis y cólera son ejemplos de patógenos entéricos, los cuales deben ser ingeridos para que puedan causar infecciones. Los organismos que atacan los pulmones deben ser inhalados. Otros más deben entrar a través de abrasiones de la piel, en donde pueden producir infecciones locales o penetrar al sistema circulatorio y propagarse por el cuerpo. Muchos patógenos crecen en los cuerpos de animales o insectos, y los únicos humanos infectados en estos casos son los que son mordidos o picados por alguno de ellos.

Por lo general, el agente infeccioso entra en el huésped y sale de él por la misma ruta. Por ejemplo, los patógenos entéricos entran y salen por el sistema digestivo: entran por la boca, continúan por el canal alimenticio y salen con las heces. Los patógenos respiratorios que se inhalan se emiten por secreciones de la nariz o la garganta, o en aerosoles que se forman al estornudar o toser y que transportan los microorganismos por el aire. Los patógenos que in-

fectan la piel a través de cortaduras y abrasiones se desalojan o expulsan desde las lesiones y abscesos de la piel.

Una vez que el microorganismo sale de su huésped, se encuentra en un medio desfavorable y debe sobrevivir hasta llegar a un nuevo huésped. La figura 8-13 es una representación de diversos mecanismos de transferencia. La mayor parte de las enfermedades se propagan de manera indirecta, por alimentos, agua o partículas suspendidas en el aire contaminados, o por picaduras de insectos u otros huéspedes intermediarios infectados (llamados *vectores*). En el resto de esta sección examinaremos las enfermedades que transmiten el agua, el aire, los insectos y los roedores, pues son de interés primordial en el campo ambiental.

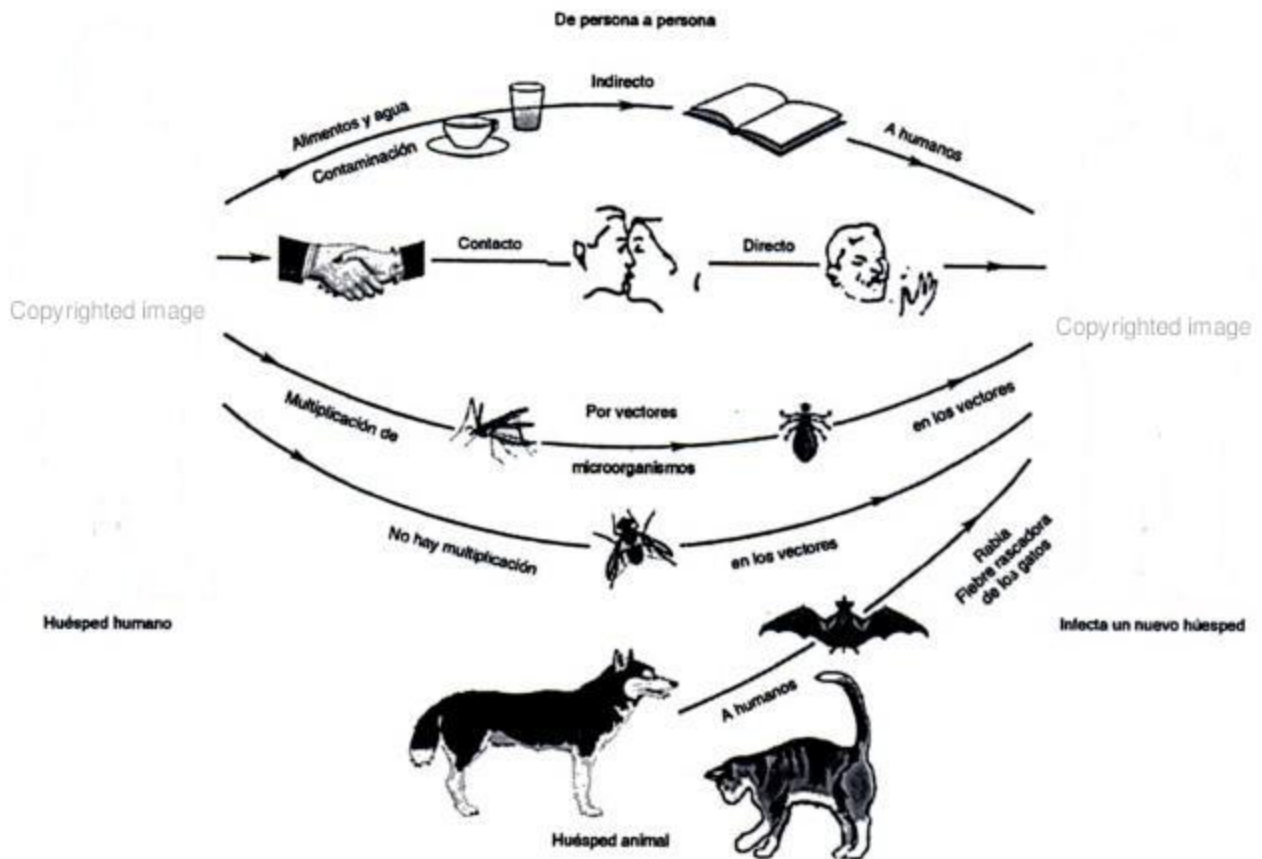


Figura 8-13 Trasmisión de enfermedades. Fuente: Pelczar et al. (1977).

La transmisión de microorganismos patógenos de persona a persona ocurre en una gran variedad de formas, que van desde el contacto directo hasta el contacto con objetos contaminados pasando por los vectores intermedios. Los animales también pueden transmitir los agentes patógenos a los humanos.

### 8.4.3 Enfermedades transmitidas a través del agua. Calidad del agua

La mayor parte de las enfermedades transmitidas a través del agua son de origen intestinal. La materia fecal de huéspedes o portadores infectados puede introducirse de diversas maneras en



un sistema de abastecimiento de agua o en un área de natación. La más común es por descarga directa de aguas negras, sin tratamiento, en el agua receptora. Los retretes de fosa ubicados demasiado cerca de un pozo o arroyo también pueden ser fuente de contaminación. Se ha rastreado el origen de brotes específicos de enfermedades a interconexiones entre tuberías de agua y alcantarillado, a rupturas en cañerías de acueducto, y a contaminación de sistemas de abastecimiento de agua durante inundaciones o fallas temporales de una planta de tratamiento de aguas negras.

Los organismos patógenos son incapaces de crecer en el agua, pero pueden sobrevivir en ella por varios días. Los patógenos capaces de formar esporas o quistes tienen la capacidad de existir fuera de un huésped durante un tiempo mucho más largo. Por ejemplo, las esporas de *Clostridium tetani*, el patógeno que causa la infección de tétanos, sobrevive durante años en la naturaleza.

Algunos tipos comunes de enfermedades de transmisión por agua son la salmonelosis, la shigelosis, el cólera, la hepatitis infecciosa, la amibiasis, la giardiasis y la esquistosomiasis. En muchas partes del mundo periódicamente se producen epidemias de todas estas enfermedades, pero son poco frecuentes en Estados Unidos porque la mayor parte de la población cuenta con sistemas adecuados de abastecimiento de agua y eliminación de aguas residuales.

**Salmonelosis.** En los humanos se presentan tres formas de salmonelosis: gastroenteritis aguda, septicemia (envenenamiento de la sangre) y fiebres entéricas. La causa de estas complicaciones son diversas especies de *Salmonella*. Los síntomas comunes de gastroenteritis son diarrea y espasmos abdominales, seguidos de fiebre que dura entre 1 y 4 días. Estos síntomas pueden ser severos, pero las tasas de mortalidad son bajas. La especie que comúnmente se aísla de los pacientes con gastroenteritis por salmonela es *S. typhimurium*. Durante una septicemia, algunas bacterias se propagan al bazo, los riñones, el corazón y los pulmones, y se pueden formar lesiones en estos órganos. La fiebre tifoidea (una fiebre entérica) causada por *S. typhi*, sólo se presenta en los humanos. Una vez que se ingieren, las bacterias causan una infección generalizada, y luego de un periodo de incubación de 10 a 14 días se presenta una fiebre (40°C) que persiste varias semanas. Acompañan a la fiebre dolor abdominal y trastornos intestinales. Alrededor del 3% de los pacientes de tifoidea se convierten a la postre en portadores crónicos de la enfermedad, los cuales se recuperan de los síntomas pero continúan albergando los microorganismos. Por lo general, *S. typhi* sobrevive menos de una semana en la naturaleza pero subsiste mucho más tiempo en agua muy fría o hielo. El cloranfenicol es eficaz en el tratamiento de la salmonelosis.

**Shigelosis.** La shigelosis también se llama **disentería bacilar** o diarrea aguda. Al igual que la fiebre tifoidea, es una afección asociada a higiene deficiente, hacinamiento excesivo y abastecimiento de agua riesgoso. Varias especies del género *Shigella* son patógenas para los humanos. La shigelosis se caracteriza por espasmos abdominales, diarrea y fiebre después de un periodo de incubación de 1 a 4 días. Los antibióticos como las tetraciclinas y el cloranfenicol o la ampicilina son eficaces en el tratamiento de la disentería bacilar. No se ha tenido tanto éxito en la prevención de infecciones por shigelas como en el control de la fiebre tifoidea.

**Cólera.** Los humanos adquieren el cólera por ingestión de las bacterias conocidas como *Vibrio cholerae* (también *V. comma*), las cuales pueden estar presentes en agua o alimentos contaminados. Las bacterias ingeridas se multiplican en el intestino delgado y, después de

2 a 5 días, causan espasmos abdominales, náusea, vómito y diarrea abundante que puede ocasionar deshidratación, *shock* y la muerte. El cólera es endémico en el estado de Bengala de la India y en Bangladesh, en donde se informa de varios miles de casos cada año. Las áreas donde el cólera permanece endémico son típicamente tierras de cultivo bajas sometidas a inundaciones periódicas con clima húmedo y caluroso y alta densidad de población. Desde principios de este siglo el cólera ha quedado confinado principalmente al sureste asiático, con incursiones ocasionales en áreas vecinas. Los brotes recientes de cólera no son identificables positivamente como transmitidos por agua, porque existen muchos otros mecanismos por contacto directo e indirecto. Las prácticas adecuadas de saneamiento desempeñan un papel importante en el control del cólera. Las sulfonamidas y los antibióticos son útiles en el tratamiento de esta enfermedad.

**Hepatitis infecciosa.** Se ha demostrado que una enfermedad viral, la hepatitis infecciosa, se ha transmitido por agua en varias epidemias. Los síntomas típicos de la enfermedad son fiebre, pérdida de apetito y de energía, dolor de cabeza y dolores de espalda. Después de pocos días puede ser que la fiebre ceda y se presente ictericia (tinte amarillento en la piel). La enfermedad pocas veces es mortal, y se sospecha que probablemente hay una gran proporción de personas infectadas que no muestran síntomas clínicos pero son portadoras y pueden transmitir la enfermedad. En 1955-56 hubo un gran brote de hepatitis infecciosa transmitida por agua en Nueva Delhi, la India, como resultado de la contaminación del sistema de abastecimiento de aguas negras en la ciudad. Es sorprendente que no se presentó un aumento en las infecciones bacterianas entéricas, como fiebre tifoidea, durante el mismo periodo. Esto sugiere que la dosis de cloro y el tiempo de contacto suministrados en la planta de tratamiento de aguas fueron suficientes para destruir las bacterias, mas no los virus. Los virus son lo suficientemente pequeños para atravesar casi todos los filtros de arena y se ha demostrado que resisten la cloración (véase el capítulo 11). Muchos virus sobreviven fuera de un huésped durante periodos prolongados. Por estas razones es muy importante impedir la contaminación de los suministros de agua y no depender de una purificación posterior. Otras afecciones virales que pueden ser transmitidas por agua son la gastroenteritis y la poliomielitis epidémicas. Los problemas de aislamiento y cultivo de los virus dificultan la determinación concluyente del mecanismo de transferencia en cualquier situación específica.

**Amibiasis.** La amibiasis también recibe el nombre de *disentería amibiana*. Sus síntomas son espasmos estomacales y diarrea. El organismo causal es el protozooario *Entamoeba histolytica*, cuyo hábitat normal es el colon o intestino grueso. Este organismo es relativamente pequeño, se alimenta de bacterias y restos de células, y produce quistes que pasan a las heces y propagan la infección. En condiciones que todavía no se conocen bien, los protozoarios penetran los tejidos del huésped, se hacen patógenos, crecen a un tamaño mucho mayor y continúan reproduciéndose. Otras amibas permanecen pequeñas después de la división y se enquistan. Cuando los quistes se exponen a un ambiente externo y después se ingieren, son capaces de regresar a una condición vegetativa (activa).

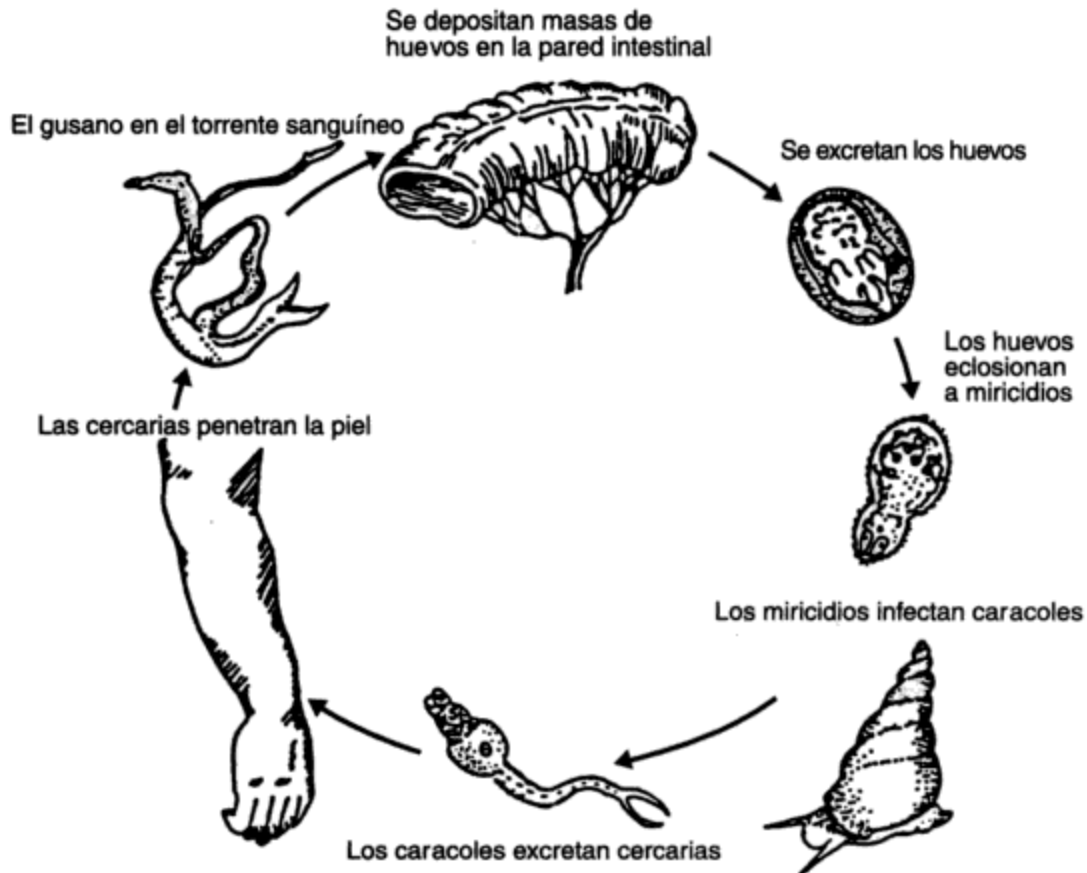
Aunque no son tan resistentes a las condiciones adversas como las esporas de los hongos, los quistes soportan la cloración normal del agua potable; no obstante, los mata el secado o la exposición a la radiación ultravioleta del Sol. En agua, los quistes sobreviven más tiempo a temperaturas bajas; son capaces de sobrevivir más de un mes en hielo, pero sólo de 1 a 2 días a 34°C. Aunque es endémica en las áreas tropicales calurosas, también se han producido graves brotes de amibiasis en áreas templadas.

**Giardiasis.** La causa de la giardiasis es *Giardia lamblia*, un protozoo flagelado del intestino delgado. Los síntomas característicos son espasmos abdominales, diarrea, fatiga, anorexia y náusea. La duración media de la enfermedad aguda suele ser de 2 a 3 meses. Una persona infectada puede excretar más de  $10^6$  quistes por gramo de heces. Los quistes son ovoides, refráctiles, y alcanzan un tamaño de 8 a 14  $\mu\text{m}$  por 6 a 10  $\mu\text{m}$ . Después de pasar a través de las heces al ambiente externo, los quistes pueden sobrevivir durante meses y contaminar alimentos y agua. La mayor parte de los brotes de giardiasis de transmisión por agua en Estados Unidos se asocian con pequeñas fuentes de suministro de agua y áreas recreativas, en donde el único tratamiento es la cloración. Los quistes de *Giardia* no se destruyen por cloración con las dosis y tiempos de contacto que se emplean comúnmente en las plantas de tratamiento de agua, ni se eliminan con eficacia por infiltración rápida en arena, a menos que vaya precedida de coagulación y floculación (capítulo 11).

**Criptosporidiosis.** La criptosporidiosis, una afección gastrointestinal en humanos y animales, es causada por *Cryptosporidium*, un parásito protozoo entérico. Los síntomas de esta enfermedad (diarrea, dolor abdominal, náusea y vómito) persisten de 8 a 30 días. Es mucho más seria que la giardiasis y no existe tratamiento para la enfermedad. Los ooquistes (huevecillos) de *Cryptosporidium*, con un tamaño de 3 a 5  $\mu\text{m}$ , de forma esférica u ovoide, se vierten en las heces de mamíferos infectados y se transmiten por la ruta fecal/oral. Los *Cryptosporidium* se encuentran ampliamente distribuidos en el medio acuático (Lechevallier *et al.*, 1990). En los abastecimientos de aguas de superficie de Estados Unidos, se encontró que alrededor del 80% contenía *Cryptosporidium* (Okun, 1993). Varios brotes confirmados de criptosporidiosis que se produjeron en Estados Unidos, Canadá e Inglaterra estuvieron asociados con plantas de tratamiento de agua ubicadas en ríos que recibían desagüe agrícola, una fuente común de *Cryptosporidium*. El brote de criptosporidiosis durante 1993 en Milwaukee, Wisconsin, afectó alrededor de 30,000 personas (Parmelee, 1993), de las cuales murieron 47 (Gooderham, 1993). También en este caso se consideró que el desagüe agrícola fue la fuente de contaminación.

A causa de su gruesa pared celular, los ooquistes de *Cryptosporidium* son resistentes a la inactivación por los desinfectantes ordinarios del agua potable, cloro y dióxido de carbono. El ozono, un agente oxidante más fuerte, parece más promisorio, pero de momento la eliminación física de los ooquistes por coagulación, floculación, sedimentación y filtración es el medio más idóneo de control.

**Esquistosomiasis.** También conocida como *bilharziosis*, la esquistosomiasis tiene como causa los trematodos de la sangre, que son gusanos parásitos del género *Schistosoma*. Se trata de una enfermedad crónica, endémica en África, Sudamérica y partes de Asia, que afecta a millones de personas. Los síntomas son agrandamiento del hígado, presencia de diarrea y anemia. Los esquistosomas no son estrictamente microorganismos, y no se transmiten de manera forzosa por la ruta fecal/oral. El ciclo de vida del *Schistosoma* se muestra en la figura 8-14. El parásito deposita los huevecillos en el intestino de la persona afectada, de donde salen finalmente a través de las heces. Los huevecillos eclosionan en agua a miricidios pequeños y móviles. Éstos en pocas horas deben encontrar un caracol huésped, pues de lo contrario mueren. Después de un periodo de incubación, los caracoles infectados excretan cercarias, ca-



**Figura 8-14** Ciclo vital de los esquistosomas. Fuente: Mitchell (1974). [Con autorización de R. D. Barnes, *Invertebrate Zoology*, 3a. ed. (Filadelfia: W. B. Saunders, 1974).]

paces de sobrevivir de 2 a 3 días en agua. Las cercarias se adhieren a la piel humana y penetran hasta el torrente sanguíneo y después al hígado, donde maduran hasta convertirse en adultos. Aunque se conoce el ciclo vital y los métodos de control, la enfermedad va en aumento actualmente en las áreas endémicas. La falta de un saneamiento adecuado es el obstáculo principal para su control. Por desgracia, el aumento en el número de sistemas de irrigación y embalses de agua asociados a proyectos hidroeléctricos que suministran la energía necesaria para el desarrollo de los países tropicales también da origen a un incremento en el número y la propagación de los caracoles vectores. El control de la población de caracoles con veneno es eficaz sólo en parte, porque suele ser letal para otras formas de vida acuática. Una forma leve de esquistosomiasis, conocida como comezón del nadador, se presenta en ocasiones en algunas partes de Canadá y Estados Unidos.

**Calidad del agua.** Como se explicó en la sección 8.3.2, resulta poco práctico detectar, diferenciar o hacer el recuento de los organismos patógenos que pueden estar presentes en el agua y en las aguas residuales. Por consiguiente, para vigilar la calidad del agua ésta se prueba en busca de organismos indicadores que están presentes cuando hay contaminación fecal. El grupo de coliformes es el indicador bacteriano más común de contaminación fecal, y la mayor parte de los países han establecido normas (requisitos legales) o pautas (objetivos o me-

tas) para limitar la densidad media geométrica de bacterias coliformes totales o fecales en el agua que se utiliza para distintos propósitos. Los siguientes son valores representativos:

Uso del agua	Coliformes máximas permisibles en 100 mL	
	Totales	Fecales
Agua potable	1	0
Abastecimiento de agua sin tratar	5,000	500
Recreativo	1,000	100
Aguas residuales tratadas	—	200

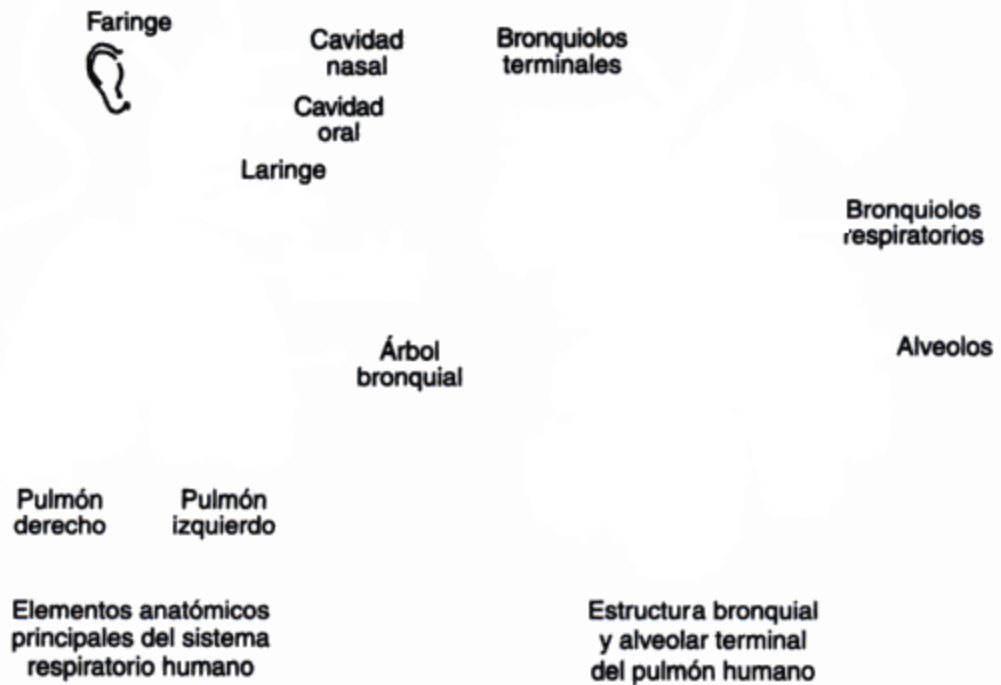
Las normas y pautas de calidad del agua para sistemas de abastecimiento de agua y aguas receptoras de efluentes se examinan con detalle en los capítulos 11 y 12.

#### 8.4.4 Enfermedades transmitidas a través del aire

Las enfermedades respiratorias como la tuberculosis pulmonar (bacteriana), la influenza (viral) y la micosis pulmonar (fúngica) se transmiten por aire. Los microorganismos patógenos de los pulmones, senos nasales y bronquiolos salen del huésped por la boca y la nariz. Al toser, estornudar y hablar se producen aerosoles o gotas finas que pueden contener estos organismos. La saliva y las descargas nasales se transfieren de las manos a objetos intermedios (por ejemplo, ropa de cama). El método de transferencia por aerosol se designa como *contacto directo*, y el que se transmite por un agente secundario como *contacto indirecto*. Las gotas que se expulsan al toser o estornudar recorren una distancia corta a través del aire, de modo que para ser infectadas directamente las personas necesitan estar en contacto con un individuo infectado. Las gotas que caen sobre objetos intermedios se secan dejando un núcleo seco que puede tener patógenos adheridos.

Las infecciones de transmisión por aire son las que contagian los patógenos que portan los minúsculos núcleos de las gotas, los cuales se suspenden de nuevo y después el aire los hace circular, el polvo los acarrea, o vuelven a circular a través de sistemas de ventilación inadecuados. Estas partículas se introducen en el cuerpo por el sistema respiratorio (figura 8-15). La parte superior de éste está integrada por la cavidad nasal, la tráquea y el árbol bronquial, que en cada pulmón es la ramificación de la tráquea en tubos cada vez más pequeños. Este sistema básicamente funciona como una vía para que el aire llegue a los pulmones. El sistema respiratorio inferior se compone de los bronquiolos, extremos muy pequeños (aproximadamente 0.05 cm de diámetro) de los tubos bronquiales, y los alveolos, racimos de pequeños sacos de aire en el extremo de cada bronquiolo y que tienen el tamaño aproximado de una cabeza de alfiler. En un pulmón sano hay varios cientos de millones de alveolos, los cuales proporcionan un área superficial interior próxima a 56 m<sup>2</sup> (600 ft<sup>2</sup>).

Las únicas partículas capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior son aquellas cuyo tamaño está entre 0.1 y 1.0 µm, intervalo que corresponde al que abarca desde virus y esporas fúngicas hasta células bacterianas individuales. Los mecanismos de defensa del sistema respiratorio superior eliminan las partículas más grandes, en tanto, las más pequeñas se exhalan. Las infecciones cuya puerta de entrada son los alveolos o los bronquiolos necesariamente son de transmisión por aire, pues sólo pueden penetrar en el pulmón al estar suspendidas



**Figura 8-15** Sistema respiratorio humano. Fuente: Perkins (1974).

en la corriente de aire. Son ejemplos de infecciones respiratorias inferiores la tuberculosis pulmonar, la micosis pulmonar y las formas neumónicas de la peste.

Conforme el aire es aspirado hacia los pulmones, debe habérselas con un cierto número de giros abruptos en el sistema respiratorio superior. Las partículas más grandes no pueden dar vuelta en las esquinas y por tanto chocan contra las paredes recubiertas de los senos, la tráquea y el árbol bronquial, las cuales son la puerta de entrada para las enfermedades del sistema respiratorio superior como la difteria, la influenza y las afecciones respiratorias virales agudas, así como para enfermedades contagiosas agudas como el sarampión y las paperas. Las partículas grandes alcanzan su portal de entrada con más facilidad que las partículas causantes de infecciones del sistema respiratorio inferior y, por tanto, es más difícil clasificarlas como infecciones de transmisión por aire. Por ejemplo, los patógenos que se depositan en la boca podrían alcanzar el sistema respiratorio superior. Sin embargo, el mecanismo de transmisión por aire es sin duda importante.

La tuberculosis pulmonar es la más significativa de las enfermedades de transmisión por aire. Esta afección es todavía una de las causas principales de incapacidad y muerte en todo el mundo. Se informa de más de un millón de casos nuevos cada año. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que esto sólo representa el 10% del número real de casos y que la tuberculosis causa de 2 a 3 millones de muertes anuales. Al igual que muchas enfermedades contagiosas, está más extendida en áreas con un nivel de vida bajo. El agente causal, el bacilo tuberculoso (*Mycobacterium tuberculosis*), es una bacteria con forma de bastón que no tiene esporas. Sus necesidades de crecimiento son relativamente simples, pero crece con gran lentitud, con un tiempo de generación de 18 a 24 h. Los bacilos se destruyen por exposición a la luz solar directa, al calor y a los desinfectantes; son más resistentes a los agentes químicos y

antibacterianos, como la penicilina, que la mayor parte de los organismos patógenos. Su tiempo de supervivencia en el ambiente depende de la naturaleza de las secreciones que los contienen. Las bacterias son resistentes al secado y por tanto permanecen viables en los núcleos de las gotas, como ya se ha señalado. La enfermedad de los legionarios es otra afección respiratoria cuya causa es una pequeña bacteria neumónica que se trasmite a través de sistemas de ventilación contaminados.

La micosis pulmonar es una afección fúngica de los bronquiolos y los alveolos. El crecimiento de los hongos destruye estas estructuras y reduce por tanto la capacidad de los pulmones. Esto puede ocasionar asfixia, pero por lo común el esfuerzo que se exige al corazón es excesivo y éste falla antes de que se alcance la etapa de asfixia. Otras infecciones de transmisión por aire de naturaleza especializada son las de las heridas quirúrgicas y las del personal de laboratorio que trabaja con organismos patógenos. El enorme éxito que en cirugía se ha tenido para reprimir las infecciones por medio de técnicas estrictamente asépticas indica que la infección se trasmite por aire. No obstante, el control de enfermedades de transmisión por aire (o sospechosas de serlo) por medio de la limitación del número de bacterias o partículas de polvo en el aire en general no ha sido satisfactorio. En experimentos realizados en hospitales, una reducción del 50 al 75% en el número de bacterias presentes en el aire no dio por resultado una disminución significativa en las infecciones. Parece ser que, para un control eficaz, se debe impedir el acceso de los microorganismos a la atmósfera. La contención de la enfermedad, por tanto, depende de un diagnóstico temprano seguido del tratamiento médico apropiado y el aislamiento completo del paciente o la fuente de infección.

#### 8.4.5 Enfermedades transmitidas a través de insectos y roedores

El torrente sanguíneo es la puerta de entrada y de salida para varios patógenos. Las picaduras de insectos facilitan la entrada de los microorganismos a través de la piel del huésped. Entre los insectos que han sido incriminados están los mosquitos, las moscas de la arena, las moscas tse-tsé, las garrapatas, las pulgas y los piojos. Algunos de ellos son específicos del vector (esto es, una especie determinada de insecto transfiere un patógeno particular a un huésped humano).

Los ciclos epidemiológicos básicos en las enfermedades de transmisión por insectos son dos. El más sencillo es un ciclo de los insectos a los humanos y de regreso a los insectos, proceso ilustrado en la figura 8-16. El insecto debe ser de preferencia uno que toma su alimento de humanos, y debe tener una alta susceptibilidad y poder infeccioso para adquirir la enfermedad. La capacidad de satisfacer estas condiciones es relativamente poco frecuente, pero cuando los requisitos se cumplen, los brotes de la enfermedad pueden ser explosivos. Son ejemplos de esto el paludismo y la tripanosomiasis (enfermedad del sueño)\*, que son infecciones de protozoarios procedentes, respectivamente, del mosquito *Anopheles* hembra y la mosca tse-tsé.

Una de las peores enfermedades infecciosas en términos del número de casos anual es el paludismo. El organismo causal es una de cuatro especies de protozoarios parásitos (del género *Plasmodium*) que destruye los glóbulos rojos del huésped. Los humanos son los reservorios primarios en las áreas del mundo en donde el paludismo es hiperendémico (esto es, donde la población adulta se ha hecho inmune por transmisión continua de la enfermedad y actúa simplemente como un reservorio del protozoario).

\*Una afección viral (encefalitis viral) común en Manitoba, Canadá, también se llama *enfermedad del sueño*.

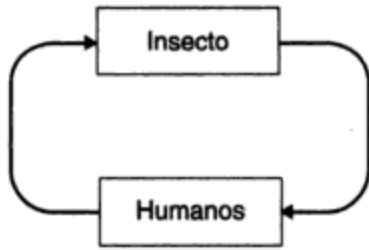


Figura 8-16 Ciclo insecto/ser humano de las enfermedades de transmisión por insectos.

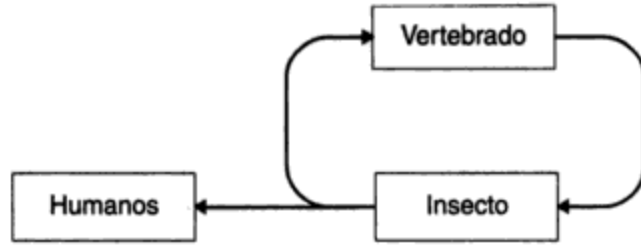


Figura 8-17 Ciclo insecto/vertebrado inferior de las enfermedades de transmisión por roedores.

El ciclo epidemiológico más común se ilustra en la figura 8-17 y comprende un ciclo de insecto a vertebrado inferior y de regreso al insecto, y con los humanos se presenta como una infección tangencial ocasional. La infección de humanos es casi siempre un callejón sin salida en el ciclo (la fiebre amarilla urbana es una excepción). Son ejemplos de enfermedades que afectan a los humanos la fiebre amarilla (viral) y la peste bubónica (bacteriana). Los mamíferos y las aves actúan como reservorios de los patógenos.

La fiebre amarilla, una infección viral que se trasmite por insectos, prácticamente ha sido eliminada de muchos países en donde alguna vez fue endémica; no obstante, todavía existe en las Antillas y en partes de África. El ciclo básico de reservorios incluye mosquitos del género *Aedes* y monos. Existe una especie urbana, *Aedes aegypti*, que es antropofílica (de preferencia pica a los humanos). Si uno o más de estos mosquitos se alimenta de una persona infectada, se puede iniciar una epidemia urbana de fiebre amarilla.

La peste es en realidad una enfermedad de las ratas, y los humanos se infectan sólo de manera tangencial. Las pulgas la transmiten de una rata a otra. Se solía observar (pero el significado de esto no se comprendía) que inmediatamente antes del brote de peste se producía una epidemia entre la población de ratas. Cuando una pulga infectada muerde a un humano, se desarrolla la peste bubónica. Los bacilos causantes suelen estar presentes en los esputos salivales de las personas infectadas y se propaga de una persona a otra por contacto directo o por una infección transmitida por vía aérea en zonas de hacinamiento.

Las epidemias de peste tuvieron un profundo efecto en la sociedad europea en el siglo XIV. Se calcula que un tercio de la población falleció de peste negra, una variante de la peste bubónica. La peste es poco frecuente en la actualidad, aunque persiste en regiones como Vietnam del Sur, donde se presenta todavía un número significativo de casos. Los roedores silvestres como las ardillas, los gerbos, las marmotas y los cobayos silvestres también son reservorios de la peste y podrían infectar la población de ratas, con la consecuente amenaza para la población humana.

**Rickettsia** es un término general que se aplica a un pequeño grupo de microorganismos que por tamaño y características se ubican entre las bacterias y los virus. Este grupo se incluye aquí en función de su importancia epidemiológica como causa del tifus y de afecciones similares a él. De las enfermedades causadas por rickettsias, el grupo del tifus ha causado muchos padecimientos y sufrimientos en el pasado. Son dos los organismos que causan las fiebres tíficas: *Rickettsia prowazekii*, responsable del tifus epidémico y en condiciones naturales sólo infecta humanos y al piojo del cuerpo humano, y *Rickettsia typhi*, común en las ratas, las cuales transmiten sus pulgas ocasionalmente a los humanos. Las rickettsias son parásitos intracelulares



obligados de pulgas, piojos, ácaros y garrapatas, y suelen ser patógenas para los humanos. Estos pequeños microorganismos carentes de motilidad se observan como formas esféricas aproximadas a 0.3  $\mu\text{m}$  de largo. Las rickettsias son susceptibles a la desinfección química y las destruye el calor y la deshidratación. Los antibióticos como las tetraciclinas y el cloranfenicol son eficaces contra el tifus epidémico en humanos.

El control de las enfermedades que se transmiten por insectos se inicia mediante el control del organismo vector. Al rociar con plaguicidas las habitaciones de las viviendas infectadas se aísla al huésped del organismo vector. El drenado de pantanos afecta la capacidad de los mosquitos para reproducirse. Si el ciclo epidemiológico se rompe efectivamente, la enfermedad se puede controlar. Por desgracia, en los países en vías de desarrollo la falta de fondos suficientes dificulta la erradicación de los organismos vectores. El problema se agrava aún más por el clima tropical, que favorece la incubación eficaz de microorganismos dentro de los organismos vectores. En la actualidad, la estrategia de la Organización Mundial de la Salud en los países en vías de desarrollo es el control de estas enfermedades y no su erradicación total. La meta consiste en aumentar poco a poco el nivel general de salud pública en toda una región por medio de educación y planeación integral, así como por la aplicación de técnicas de control.

## 8.5 ENFERMEDADES NO INFECCIOSAS

En los países desarrollados las enfermedades infecciosas parasitarias se han controlado y en ciertas áreas prácticamente se han erradicado. Esto se debe a la eliminación sanitaria de los residuos, la desinfección del abastecimiento de agua, el mayor cuidado y limpieza en la preparación de alimentos y los avances médicos en cuanto a fármacos, antibióticos, inmunización y diagnóstico temprano de personas infectadas. En estos mismos países se ha producido un aumento en la proporción de muertes debidas a padecimientos degenerativos o enfermedades no infecciosas como cáncer, afecciones del corazón y del sistema circulatorio, bronquitis y enfisema.

Parte de la razón del cambio hacia enfermedades no infecciosas es que la mayoría de la población es senil y la incidencia de muertes debidas a estas enfermedades aumenta con la edad. La tabla 8-8 muestra la distribución porcentual de las muertes por causa en dos poblaciones modelo en un estudio de la ONU sobre tendencias de mortalidad mundiales. El modelo A es típico de los países en vías de desarrollo, con una estructura de edades joven (aproximadamente el 45% menores de 15 años) y una expectativa media de vida de 50 años. El modelo B es representativo de los países desarrollados, con una estructura de edades relativamente vieja (sólo el 20% menores de 15 años) y una expectativa media de vida al nacer de 70 años.

Aunque es difícil probarlo, se piensa que con el tiempo la contaminación del aire y del agua con sustancias químicas, inorgánicas y orgánicas, contribuye a estas afecciones degenerativas. Se han producido episodios bien documentados de fuerte contaminación del agua y del aire que sin duda han dado origen a un incremento en las enfermedades no infecciosas. El envenenamiento por mercurio de la bahía de Minimata en Japón en la década de 1950 y los episodios de contaminación del aire en Londres en diciembre de 1952 constituyen terribles recordatorios de los efectos que la contaminación puede tener en los humanos. En el primer caso, los compuestos de metilmercurio de efluentes industriales vertidos en la bahía de Minimata de Japón se concentraron en peces que fueron consumidos por los residentes. Entre 1953 y 1960, se registraron 111 muertes de envenenamiento por mercurio. En el segundo caso, en

**TABLA 8-8** DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE MUERTES POR CAUSA

Causa de muerte	Modelo A: estructura de edades: joven, expectativa de vida: 50 años	Modelo B: estructura de edades: vieja, expectativa de vida: 70 años
Todas las causas	100.0	100.0
Enfermedades infecciosas y parasitarias	34.1	6.5
Cáncer	5.6	16.4
Afecciones cardíacas y circulatorias	18.7	46.5
Violencia	4.3	5.2
Todas las demás	37.3	25.4

Fuente: Adaptado de ONU (1973).

Londres una inversión térmica y la masa de aire estático resultante causaron una acumulación de humo y SO<sub>2</sub> de hasta cinco veces los niveles normales durante más o menos 5 días. Se considera que esta incidencia causó entre 1,500 y 4,000 muertes, principalmente a quienes ya padecían afecciones respiratorias.

En términos generales, es imposible atribuir un efecto particular sobre la salud a un determinado contaminante del agua o de la atmósfera. Los efectos en la salud de los animales como consecuencia de la administración de dosis grandes de un contaminante específico se pueden determinar en el laboratorio. En el ambiente, los contaminantes están presentes en concentraciones muy pequeñas y en combinación con un número demasiado grande de otros factores como para que sea posible atribuir efectos particulares a una sola causa. Es difícil ser mucho más específico de lo que la observación nos permite; quienes viven en ambientes urbanos más contaminados tienen una mayor incidencia a enfermedades no infecciosas que las personas que habitan en ambientes rurales más limpios.

Los efectos en la salud como consecuencia de la exposición a ciertas sustancias químicas inorgánicas y orgánicas no se conocen. Esto es particularmente cierto en el caso de la exposición de largo plazo a concentraciones bajas de contaminantes tóxicos y peligrosos. Los estudios epidemiológicos por lo general se restringen a personas que han estado expuestas a niveles relativamente altos de contaminantes específicos en el lugar de trabajo. Tomar los resultados de estos estudios y extrapolarlos a la población general puede ser útil para fijar límites permisibles de exposición. No obstante, son necesarias más investigaciones para alcanzar un entendimiento adecuado de la cuestión de los "límites seguros". En lo que resta de este capítulo se analizan 15 de los contaminantes más comunes que afectan la salud. Estas sustancias se presentan en orden alfabético y se agrupan como orgánicas o inorgánicas. Bajo cada uno de los títulos que siguen se resume el conocimiento disponible según Kruss y Valeriotto (1979). Las tablas 8-9 y 8-10 proporcionan un resumen de estos contaminantes, sus fuentes, su presencia en el ambiente y sus efectos más importantes en la salud.

### 8.5.1 Contaminantes inorgánicos

El **arsénico** es un subproducto de la fundición del cobre y el plomo así como de la tostación de menas de oro, plata y cobalto. Esta sustancia es un contaminante que primordialmente se transporta por aire, aunque puede contaminar cuerpos de agua y acumularse en los peces; tam-

bién es un componente de ciertos insecticidas y fungicidas agrícolas. El efecto principal en la salud es el envenenamiento por arsénico de los trabajadores de la industria minera del oro y de los trabajadores agrícolas que manejan materiales que contienen arsénico. Un síntoma es la parálisis de los miembros inferiores, aunque el envenenamiento agudo incluye trastornos gástricos e intestinales. Se considera como un carcinógeno potencial que contribuye al cáncer pulmonar relacionado con la ocupación.

El **asbesto** se utiliza en la producción de losetas de asbesto-cemento, balatas de frenos y juntas, así como en la manufactura de forros y textiles incombustibles. Quienes trabajan de manera directa en la extracción del mineral y en la manufactura de sus productos sufren la mayor parte de los efectos adversos, pero los consumidores también están expuestos con regularidad debido a la gran variedad de productos de asbesto de uso cotidiano. En forma de fibras, el asbesto es un contaminante transportado por el aire, y la inhalación de estas fibras durante un periodo prolongado puede ocasionar neumoconiosis, o asbestosis, que es una severa proliferación de cicatrices en los pulmones. Además de forzar al corazón a trabajar más duramente, la formación de cicatrices puede complicar otras afecciones respiratorias existentes. Las muertes por asbestosis suelen ser consecuencia de insuficiencia cardíaca. El asbesto en general se considera como carcinógeno. El cáncer de pulmón en las personas expuestas al "polvo" de asbesto se presenta con una frecuencia de más del doble de la que se observa en la población normal. Esto ha dado origen a la preocupación pública respecto a la presencia de fibras en el aire provenientes de productos hechos con este mineral. Las fibras también pueden estar presentes en abastecimientos de agua si se fabrican productos de asbesto en las cercanías, y en las bebidas procesadas (refrescos, cerveza y vino) cuando se utilizan filtros de asbesto para eliminar impurezas. No hay indicios de que la ingestión de fibras de asbesto sea nociva para los humanos.

El **cadmio** es un metal tóxico para la mayor parte de las especies, se libera en el ambiente desde ciertas industrias (de galvanoplastia, fabricantes de baterías, etc.) en cantidades suficientes para justificar su clasificación como contaminante. Como consecuencia de estas descargas industriales, se le encuentra comúnmente en lodos de aguas negras municipales en concentraciones mayores a los valores normales de fondo. Los efectos más significativos en la salud se observan en los trabajadores expuestos a emanaciones de cadmio. La exposición a las emanaciones, de las cuales se sospecha que son carcinógenas, puede causar degeneración de las articulaciones. El cadmio se incorpora en todos los niveles de la cadena alimenticia, desde los microorganismos hasta los humanos. El consumo de vegetales de hoja, pescado, mariscos y agua potable es el método usual de entrada de cadmio al cuerpo humano. En Japón se registraron más de 230 casos de envenenamiento por cadmio entre 1962 y 1977 como consecuencia de la ingestión de alimentos contaminados. Se averiguó que la fuente del metal era el desagüe de desechos de minas.

El **plomo** puede estar presente en los alimentos y el agua que consumimos, y también en el aire que respiramos. Hasta el advenimiento del combustible sin plomo la combustión de gasolina era la fuente principal de contaminación por plomo en la atmósfera (la cual se analiza más a fondo en el capítulo 13). Los suministros de agua sin tratamiento se pueden contaminar con plomo a causa de las descargas de plantas de tratamiento de aguas negras y al desagüe agrícola. Los sistemas de distribución de agua también pueden contener altas concentraciones de plomo debido al uso de soldadura de plomo en las cañerías de acueducto y de tubos de plomo para conductos de agua dentro de las construcciones, los cuales eran de uso común en el pasado. El problema es más grave en el caso del agua suave, ya que tiene una mayor tendencia a disolver el plomo. Aunque la mayor parte del plomo que se ingiere se excreta, y el 60% del inhalado se exhala, el plomo se acumula poco a poco en el cuerpo. Los síntomas iniciales de envenenamiento son dolor estomacal y debilidad física. Los estadios finales incluso

pueden llevar a un colapso del sistema nervioso central. El envenenamiento con plomo parece ser más frecuente en los niños, debido a su mayor capacidad para absorber plomo y a su tendencia durante los primeros años a chupar las cunas y los juguetes, los cuales pudieron haber sido pintados con pintura a base de plomo antes de que se prohibiera para estos usos.

El envenenamiento por **mercurio** ya se mencionó en relación con el desastre de la bahía de Minamata en Japón. Se utilizan compuestos inorgánicos de mercurio en la producción de componentes eléctricos como interruptores, y en la industria de cloro/álcali para la producción de cloro e hidróxido de sodio. Se emplean compuestos orgánicos de mercurio como algicidas y fungicidas en la industria de pulpa y papel y en la agricultura. El envenenamiento por metilmercurio (el compuesto orgánico más común) se caracteriza por adormecimiento, problemas del habla y pérdida de coordinación motora, hasta llegar a parálisis, deformidad, estado de coma y la muerte. El envenenamiento por mercurio inorgánico (en especial con vapores) produce daños al sistema nervioso y posiblemente problemas psicóticos. La exposición al mercurio puede ocurrir a través de la cadena alimenticia o en el lugar de trabajo. Una dieta constante de mariscos de una fuente contaminada plantea un riesgo considerable para el consumidor. El mercurio liberado en décadas pasadas todavía está presente en los sedimentos del fondo de lagos y ríos, y continuará siendo una fuente de contaminación en el futuro.

Los **nitratos** y **nitritos** son derivados del uso excesivo de fertilizantes, pueden ocasionar una contaminación significativa por nitratos de aguas superficiales y subterráneas. El estiércol del ganado, los terrenos donde el mismo se alimenta y los criaderos de aves de corral también tienen un alto contenido de nitratos. El cuerpo humano es capaz de reducir los nitratos a nitritos en el sistema digestivo. Los nitritos plantean dos amenazas distintas para la salud humana. Primero, oxidan la hemoglobina (que contiene  $\text{Fe}^{+2}$ ) a metahemoglobina (que contiene  $\text{Fe}^{+3}$ ), la cual es incapaz de transportar oxígeno en el torrente sanguíneo. Esta enfermedad, conocida como *metahemoglobinemia* o *enfermedad del bebé azul*, es especialmente dañina para los niños pequeños porque son muy susceptibles a la asfixia por metahemoglobinemia. Segundo, los nitritos se combinan con diversas aminas en el conducto gastrointestinal para formar nitrosaminas, muchas de las cuales se sabe que son carcinógenas. Se ha expresado preocupación por el uso de nitritos en carnes curadas (tocino, carnes preparadas, salchichas, etc.) para retardar el crecimiento bacteriano y prevenir el botulismo. Desafortunadamente, no se ha encontrado un sustituto químico adecuado de los nitritos.

El **dióxido de azufre** se emite principalmente cuando se quema carbón o petróleo con un alto contenido de azufre. En condiciones atmosféricas apropiadas (que crean masas de aire estático durante varios días) el  $\text{SO}_2$  se puede acumular hasta alcanzar concentraciones letales. Esto sucedió en Londres en 1952 y en el Valle del Mosa en Bélgica en 1930. Han ocurrido incidentes similares en Nueva York y Pensilvania. Las concentraciones altas de  $\text{SO}_2$ , en especial cuando están acompañadas de partículas de humo, producen irritación del sistema respiratorio. Los individuos afectados en gran parte son personas ancianas con problemas respiratorios crónicos. La contribución de las emisiones de  $\text{SO}_2$  al problema de la lluvia ácida se analizó en el capítulo 5 y se describe con detalle en el capítulo 13.

La **materia particulada** con un tamaño específico de alrededor de  $0.1 \mu\text{m}$  (el tamaño de las partículas de humo de los cigarrillos) puede penetrar profundamente en los pulmones y depositarse ahí. Cuanto mayor es la cantidad de material extraño en los pulmones, menos eficiente es el sistema respiratorio y más duro debe trabajar el corazón. Se piensa que esta acumulación de partículas da origen a padecimientos cardiacos y respiratorios crónicos, como enfisema y bronquitis. Para empeorar las cosas, los efectos sinérgicos de las partículas y los contaminantes gaseo-

**TABLA 8-9 CONTAMINANTES INORGÁNICOS COMUNES QUE CAUSAN ENFERMEDADES NO INFECCIOSAS**

Contaminante inorgánico	Fuente principal	Esfera más afectada	Efectos primarios en la salud
Arsénico	Beneficio de menas, refinación Plaguicidas	Aire, agua	Envenenamiento por arsénico (trastornos gastrointestinales, parálisis de miembros inferiores)
Asbesto	Aplicaciones resistentes al calor y la flama	Aire	Asbestosis (formación de cicatrices en los pulmones) Carcinógeno
Cadmio	Talleres de galvanoplastia, fabricantes de baterías	Aire, alimentos, agua	Emanaciones de cadmio, dolor en articulaciones, afecciones pulmonares y renales Posiblemente carcinógeno, teratogénico
Plomo	Gasolina con plomo, baterías, soldadura, protección contra radiación	Aire, alimentos, agua	Daña el sistema nervioso y la síntesis de glóbulos rojos de la sangre Depende de la exposición
Mercurio	Forma inorgánica Artículos eléctricos Industria de cloro/álcali Forma orgánica Algicidas Fungicidas	Agua, alimentos	Inorgánico: trastornos del sistema nervioso central, posible psicosis Orgánico: adormecimiento, dificultades para hablar, parálisis, deformidad, muerte
Nitratos	Desagüe agrícola	Alimentos, agua	NO <sub>3</sub> se reduce a NO <sub>2</sub> (en el cuerpo)
Nitritos	Conservadores de carnes		NO <sub>2</sub> + aminos → nitrosaminas NO <sub>2</sub> + Fe <sup>+2</sup> → metahemoglobinemia
Dióxido de azufre	Quema de combustibles que contienen azufre	Aire	Irritación del sistema respiratorio Precursor de lluvia ácida, que es muy destructiva
Particulados	Humo de combustión Polvo, polen, etcétera	Aire	Puede dar origen a padecimientos cardiacos, respiratorios (enfisema, bronquitis) Los efectos en la salud son más notorios si los particulados están en combinación con otros contaminantes (p. ej., SO <sub>2</sub> )

sos, como la combinación de SO<sub>2</sub> y partículas de humo, son mayores que la suma de sus efectos individuales.

### 8.5.2 Contaminantes orgánicos

Numerosas sustancias químicas orgánicas manufacturadas se consideran como una amenaza potencial para la salud de muchas especies, incluso los humanos. De éstas, el DDT, el fenitrotión y el Mirex se crearon como plaguicidas. Otros, como los PCB (*polychlorinated biphenyls*; bifenilos policlorados) se produjeron para usos benignos, como agentes de enfriamiento en transformadores eléctricos, pero a través de escapes accidentales llegan al entorno. Los indicios epidemiológicos en contra de estos productos químicos varían, pero si se toma en cuenta que son venenosos y que de alguna manera han estado vinculados con el cáncer u otras afec-

ciones degenerativas, la alarma del público por la posibilidad de estar expuesto a ellos sin saberlo no carece de fundamento.

El **DDT** (*diclorodifeniltricloroetano*) se ha utilizado extensamente en todo el mundo. La Organización Mundial de la Salud calcula que su eficacia en el control del mosquito *Anopheles* liberó a mil millones de personas del riesgo de contraer paludismo en las décadas de 1950 y 1960, con lo cual se impidieron millones de muertes. Sin embargo, el DDT es un compuesto químico muy estable y persistente que permanece en el ambiente durante años. Esta sustancia es relativamente insoluble en agua, pero se disuelve con facilidad en grasas y aceites y se bioacumula en los tejidos grasos de muchas especies, entre ellas los humanos. La concentración media de DDT en los humanos varía desde 1 ppm, en países con poco uso de DDT, hasta 27 ppm en la India, donde se ha utilizado extensamente. La exposición al rocío o por ingestión plantea riesgos para la salud. Los síntomas de envenenamiento por DDT incluyen trastornos nerviosos y reducciones anormales en el conteo de glóbulos blancos en la sangre. No se ha informado de fallecimientos atribuibles de manera directa al DDT, pero existe preocupación acerca de los efectos a largo plazo de las concentraciones bajas.

Aunque el término **dioxina** representa una familia de sustancias químicas, es el nombre común que se aplica a uno de los compuestos químicos elaborados más letales que jamás se hayan fabricado. (Técnicamente, es más apropiado describirlo como TCDD, o 2, 3, 7, 8-tetraclorodibenzo-para-dioxina.) La dioxina se forma como impureza en la manufactura de diversas sustancias químicas y plaguicidas con una base de triclorofenol. También se liberan en la atmósfera pequeñas cantidades cuando se queman plásticos; de ahí la preocupación por la incineración de residuos sólidos municipales.

Entre los productos contaminantes más destacados está el hexaclorofeno, un germicida que se emplea para el control del acné, la limpieza de bebés recién nacidos y la desinfección (ha sido prohibida su venta como fármaco sin receta médica), y el 2, 4, 5-T, o ácido triclorofenoxiacético, un herbicida actualmente prohibido en Estados Unidos y Canadá, pero que se utilizó extensamente en la guerra de Vietnam combinado en proporción de 50:50 con 2, 4-D (para crear el defoliante llamado Agente Naranja). Los síntomas asociados con la exposición incluyen cambios en casi todos los órganos internos, cloroacné, trastornos nerviosos y la muerte cuando la exposición es a concentraciones suficientemente altas. La dioxina es un teratógeno confirmado (causa defectos congénitos) y se sospecha que es carcinógena. En Seveso, Italia, en 1976, la falla de un equipo dio por resultado la emisión de entre 1 y 5 kg de dioxina en la atmósfera. Antes de que se evacuara la población, muchos animales murieron y las personas enfermaron de cloroacné. Actualmente los residentes del área siguen sometidos a vigilancia a largo plazo para determinar los efectos permanentes, en su caso, de la exposición breve a altas concentraciones de dioxina.

En los últimos años las cataratas del Niágara, en Nueva York, han adquirido mala fama a causa de las fugas de dioxina de antiguas descargas químicas en el río Niágara, las cuales crean una contaminación potencial del abastecimiento de agua de 5 millones de estadounidenses y canadienses. Incluso el rocío de las cataratas del Niágara contribuye a la contaminación, pues emite de manera continua sustancias orgánicas volátiles con pequeñas cantidades de dioxinas en la atmósfera (McLachlan, 1987). En 1983, Times Beach, Missouri (una comunidad de 2,000 habitantes) fue declarada por la Environmental Protection Agency de EUA como inhabitable a causa de la dioxina. Sus habitantes fueron reubicados a un costo de más de 30 millones de dólares. Se determinó que la fuente de la dioxina era aceite residual contaminado que se había utilizado como antipolvo en caminos locales y propiedades privadas. Con el aceite se habían mezclado residuos líquidos de una fábrica que antes producía hexaclorofeno.

El **fenitrotión** es un insecticida que se utiliza en el este de Canadá para el control del gusano de las yemas del abeto. Esta sustancia tiene una velocidad de descomposición bastante grande en el ambiente y es de baja toxicidad para los mamíferos; es además objeto de muchos debates médicos en relación con su papel en la iniciación del síndrome de Reye, una enfermedad que causa convulsiones, daño cerebral y hasta la muerte después de la recuperación de una infección viral de poca importancia. La causa del síndrome de Reye se desconoce, pero algunos investigadores sospechan que el insecticida podría ser un factor que contribuye al mismo.

El **mirex**, otro hidrocarburo clorado fabricado por el hombre, ha sido hallado en concentraciones bajas en cuerpos de agua y en diversas especies de peces y aves acuáticas. El mirex se desarrolló como insecticida (para el control de la hormiga ígnea en el sur de Estados Unidos) y se utiliza además como retardante de fuego en plásticos y para generar humo en ejercicios militares. Aunque no existen casos documentados de envenenamiento por mirex en humanos, existe preocupación por la salud de las personas cuya dieta incluye cantidades importantes de peces y otros mariscos contaminados con él. El mirex es tóxico para muchos organismos, desde algas hasta mamíferos, y su uso se ha restringido debido a su toxicidad hacia especies que no se pretende destruir.

Los **PCB** (*polychlorinated byphenils*; bifenilos policlorados) son químicamente inertes, solubles en agua, y no se descomponen a las temperaturas normales. En consecuencia, los PCB tienen varios usos industriales (por ejemplo, como fluido dieléctrico para condensadores y transformadores industriales y como fluido en aplicaciones hidráulicas y de transferencia de calor). Su gran estabilidad hace que perduren en el ambiente. Estos compuestos tienen relación con el DDT pero son aún más estables. Se ha demostrado que los PCB causan cáncer en las ratas, y se teme que se pudiera desarrollar en los trabajadores expuestos al líquido o a los vapores de los incendios de transformadores, pero no hay pruebas que vinculen los PCB con el cáncer en humanos. Los PCB causan afecciones en la piel (como cloroacné), dolores de cabeza y trastornos virales. Se descubrió una epidemia de efectos relacionados con los PCB en Kyushu, Japón, en 1968, la cual se atribuyó originalmente a una fuga en el sistema de calentamiento de un fabricante de aceite de arroz. Aunque se encontró que muestras del aceite contenían de 2,000 a 3,000 ppm de un PCB, más tarde se determinó que el origen del incidente radicaba en las dioxinas (Dennis, 1989). La contaminación por PCB es casi siempre accidental, y su uso se ha restringido en muchos países.

Los **trihalometanos**, de los cuales el cloroformo es el ejemplo más común, se producen en las plantas de tratamiento de agua y de aguas residuales cuando los compuestos orgánicos naturales se combinan con el cloro que se agrega para desinfectar. El **cloroformo** se ha empleado como anestésico durante muchos años, pero ahora se sospecha que es carcinógeno, aunque no se han establecido sus efectos a concentraciones bajas. Las concentraciones de cloroformo que se encuentran en los sistemas de abastecimiento de agua clorada normalmente son muy bajas y dependen del contenido orgánico total del agua sujeta a tratamiento. En la actualidad se está investigando mucho acerca de la trascendencia y el control de los trihalometanos.

### 8.5.3 Límites seguros

Idealmente, nos gustaría fijar límites "seguros" para la concentración de todos los contaminantes inorgánicos y orgánicos que causan enfermedades no infecciosas. Desde luego, no existen niveles seguros, sólo niveles aceptables de riesgo. Incluso esto es difícil y en ciertos casos

**TABLA 8-10** CONTAMINANTES ORGÁNICOS COMUNES QUE CAUSAN ENFERMEDADES NO INFECCIOSAS

Contaminante orgánico	Fuente principal	Esfera más afectada	Efectos primarios en la salud
DDT	Aplicación como plaguicida en todo el mundo	Agua, cadena alimenticia	Se bioacumula en tejidos grasos Produce trastornos nerviosos Reducción en la cuenta de glóbulos blancos Persiste en el ambiente
Dioxina (específicamente TCDD)	Impureza de manufactura de triclorofenoles que se utilizan en diversos biocidas Emitida por aplicación o accidente	Agua, cadena alimenticia	Extremadamente tóxica en forma concentrada, daños a riñones, hígado y sistema nervioso Potente teratógeno Posible carcinógeno
Fenitrotión	Rocío insecticida en cultivos, terrenos forestales	Agua, aire	Sólo es tóxico para mamíferos en dosis grandes Puede ser en parte causa de la iniciación del síndrome de Reye en niños
Mirex	Insecticidas, retardante de flama en plásticos	Agua, cadena alimenticia	Biológicamente activo, persistente Su toxicidad varía con la especie Se bioacumula en la cadena alimenticia
PCB	Dieléctrico, transferencia de calor y fluido hidráulico	Cadena alimenticia	Persistente en el ambiente Probable carcinógeno, la exposición produce cloroacné, dolores de cabeza, trastornos visuales
Cloroformo	Se usó en el pasado como anestésico En la actualidad en bienes de consumo, productos farmacéuticos, plaguicidas Se puede producir durante la cloración de abastecimientos de agua	Alimentos, agua	Toxicidad aguda en concentraciones altas Daños al hígado y al corazón Carcinógeno para los roedores
Trihalometanos (incluye el cloroformo)	Se produce accidentalmente en agua como consecuencia de ciertas sustancias orgánicas (ácidos húmicos, etc.) y cloración	Agua	Posibles carcinógenos

imposible de determinar. El establecimiento de pautas para la concentración de contaminantes, ya sea en aire, suelos, agua o alimentos, constituye un reto para investigadores, ingenieros y administradores por igual. La epidemiología de muchas enfermedades no infecciosas es muy compleja. Los efectos de los elementos o compuestos previamente analizados se pueden intensificar o reducir en presencia de otras sustancias químicas. Debido a su complejidad y a las innumerables preguntas sin respuesta en relación con los efectos de estos contaminantes, los encargados de establecer las normas deben pecar de precavidos y fijar límites tan bajos como sea posible para reducir al mínimo el riesgo al cual se expone el público en general y el ambiente natural.

**PROBLEMAS**

- 8.1. Describa y compare las necesidades de nutrición de las bacterias autótrofas y heterótrofas.
- 8.2. Dibuje una célula bacteriana típica en la que describa sus principales componentes y sus funciones.



- 8.3. (a) Dibuje la curva de crecimiento y muerte para un cultivo bacteriano. Rotule los ejes y todas las fases de la curva, y explique brevemente el diagrama.  
(b) ¿Qué comparación se puede hacer entre la curva de crecimiento y muerte del cultivo bacteriano y una gráfica que muestre el crecimiento de la población humana mundial? ¿Nos enseña alguna lección esta comparación?
- 8.4. Un cultivo discontinuo de 100 bacterias unicelulares ha crecido a partir de una sola bacteria en 2 h por crecimiento exponencial. Suponiendo un crecimiento exponencial continuo, ¿de cuántas bacterias se compondrá el cultivo una hora después?
- 8.5. ¿Por qué es difícil eliminar los virus de un sistema de abastecimiento de agua?
- 8.6. ¿Cuáles son las diferencias fundamentales entre las algas, los hongos y las bacterias?
- 8.7. ¿Cuáles son las razones para estudiar el abastecimiento y tratamiento de agua para uso doméstico de forma simultánea con el tratamiento y eliminación de aguas residuales?
- 8.8. Cite y describa otro ejemplo de comportamiento cooperativo entre microorganismos que sea similar a los casos señalados en la sección 8.3.2.
- 8.9. ¿Por qué la filtración del agua sin cloración es parcialmente eficaz para el control de las bacterias patógenas?
- 8.10. Describa dos métodos capaces de hacer posible el control de la propagación de la esquistosomiasis en África rural.
- 8.11. Compare las contribuciones relativas de un sistema de abastecimiento de agua tratada y de la recolección y tratamiento de desechos humanos para el control de las enfermedades epidémicas en los países en vías de desarrollo. Si los recursos son insuficientes para ambos sistemas, ¿se debe dar prioridad a uno de ellos a expensas del otro? Explique.
- 8.12. ¿Cuáles son los factores que afectan la virulencia de una enfermedad específica?
- 8.13. Durante la epidemia de una enfermedad contagiosa, ¿por qué no todo el mundo se infecta?
- 8.14. Mencione cuatro de los mecanismos de transferencia de enfermedades entre humanos.
- 8.15. ¿Cuándo es más probable que una persona se enferme por beber agua de una corriente contaminada, en invierno o en verano? Proporcione los detalles de su razonamiento.
- 8.16. Mencione tres enfermedades de transmisión por agua y describa sus síntomas y los organismos causales de las mismas.
- 8.17. ¿Cuáles son los requisitos para que un organismo pueda fungir como indicador?
- 8.18. ¿Qué son los coliformes? ¿Por qué se considera la *Escherichia coli* como indicadora de contaminación? ¿Por qué los resultados de la prueba de coliformes se consideran como presuntos?
- 8.19. ¿Por qué es menos probable que una persona contraiga una infección de transmisión aérea estando al aire libre en lugar de estar en interiores?
- 8.20. ¿Cuáles son las diferencias entre las enfermedades infecciosas de transmisión por aire y las enfermedades causadas por la contaminación?
- 8.21. Nombre dos infecciones de transmisión por aire, sus síntomas y sus organismos causales.
- 8.22. ¿Cómo se produce un brote de peste bubónica? ¿Cómo continúa propagándose el brote? ¿Cómo se puede controlar?
- 8.23. Describa las condiciones necesarias para que una enfermedad de transmisión por insectos se convierta en una epidemia.
- 8.24. ¿Qué métodos existen para controlar las enfermedades de transmisión por insectos?
- 8.25. ¿Se debe discontinuar por completo el uso del insecticida DDT? Indique las razones de su respuesta.
- 8.26. ¿Por qué existe tanta preocupación y controversia respecto a las cantidades de dioxina, mirex y otras sustancias químicas orgánicas presentes en fuentes de abastecimiento de agua?
- 8.27. ¿Cómo explica el incremento en la proporción de muertes debidas a enfermedades no infecciosas en Estados Unidos a lo largo del último siglo?

- 8.28.** En el mundo se está produciendo un resurgimiento de la tuberculosis y de otras enfermedades infecciosas (cólera, paludismo, etc.) de las que en un tiempo se pensó que estaban erradicadas. Se ha culpado a la complacencia de los gobiernos, a la deforestación, a nuevas cepas microbianas mutantes, a condiciones insalubres y a otros factores. Examine una de estas enfermedades en una localidad donde se haya producido un brote y señale el agente causal, las razones de la epidemia y sus recomendaciones respecto a lo que se podría hacer y quién debe encargarse de ello.
- 8.29.** La criptosporidiosis y otras enfermedades de las que nunca se había oído hablar antes [por ejemplo, el síndrome urémico hemolítico (SUH) y el síndrome de inmuno deficiencia adquirida (SIDA)] se están presentando en proporciones epidémicas. Elija una localidad donde sea frecuente una de estas nuevas enfermedades, señale el agente patógeno que la causa, los síntomas de la enfermedad y los vectores que intervienen; sugiera soluciones posibles.
- 8.30.** El mercurio es uno de los metales pesados más tóxicos, causante de enfermedades no infecciosas; en dosis pequeñas daña el sistema nervioso y los riñones; en dosis grandes causa el estado de coma y la muerte. El mercurio ha constituido un problema importante en aguas supuestamente prístinas, como las de algunos lagos del norte de Ontario, Canadá, los Everglades de Florida, el abastecimiento de agua de Boston, Massachusetts, y ciertos lagos del noreste de Estados Unidos, donde su concentración puede aumentar un millón de veces, de ppb en el agua a ppm en los peces debido a bioacumulación. Elija un área donde la contaminación por mercurio es un problema y sugiera cuáles fuentes naturales o industriales podrían estar contribuyendo al mismo.

## REFERENCIAS

- APHA, AWWA y WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16a. ed. Washington, D.C.: (American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Federation), 1985.
- BAKER, M. N. *The Quest for Pure Water*. Vol. 1. Nueva York: American Water Works Association, 1948.
- BUCKMAN, O. H. y BRADY, N.C. *The Nature and Properties of Soils*, 6a. ed. Nueva York: Macmillan, 1960.
- CLARK, J. W., VIESSMAN, W. y HAMMER, M.J. *Water Supply and Pollution Control*, 3ra. ed. Nueva York: IEP, 1977.
- COMMONER, B. *The Closing Circle*. Nueva York: Alfred A. Knopf, 1971; Nueva York: Bantam, 1972.
- DENNIS, P. "How Dangerous are PCBs—Really?" *The Globe and Mail*. Toronto, 4 de octubre de 1989, pág. A7.
- ECKHOLM, E. P. *Down to Earth: Environment and Human Needs*. Nueva York: W.W. Norton, 1982.
- ECKHOLM, E. P. *The Picture of Health: Environmental Sources of Disease*. Nueva York: W.W. Norton, 1977.
- FEACHEM, R. G., BRADLEY, D. J., GARELICK, H. y MARA, D. D. *Sanitation and Disease: Health Aspects of Excreta and Wastewater Management*. Washington, D.C.: publicado para el Banco Mundial por Wiley, 1983.
- GAUDY, A. F., Jr. y GAUDY, E. T. *Microbiology for Environmental Scientists and Engineers*. Nueva York: McGraw-Hill, 1980.
- GOODERHAM, M. "By Filter or Faucet We Aren't Safe from Water-Borne Bugs." *The Globe and Mail*, Toronto, 9 de octubre de 1993, pág. D8.
- KRUUS, P. y VALERIOTO, I. M. *Controversial Chemicals*. Montreal: Multiscience Publication, 1989.

- LECHEVALLIER, M. W., TROK, T. M., BURNS, M. O. y LEE, R. G. "Comparison of the Zinc Sulfate and Immunofluorescence Techniques for Detecting *Giardia* and *Cryptosporidium* in Water". *Journal of the American Water Works Association*, 82 (1990): 75.
- McLACHLAN, M. S. "A Model of the Fate of Organic Chemicals in the Niagara River". M.A.Sc. thesis, Universidad de Toronto, 1987.
- MITCHELL, R. *Introduction to Environmental Microbiology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1974.
- OKUN, D. A. "More on *Cryptosporidium*", AWWA, *Opflow*, 19(10), octubre (1993): 1-12.
- PALMER, C. M. *Algae in Water Supplies: An Illustrated Manual on the Identification, Significance and Control of Algae in Water Supplies*. Public Health Service Publication 657. Washington, D.C.: U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1959.
- PARMELEE, M. A. "Milwaukee Takes Steps to Ensure Water Quality". AWWA, *Main Stream*, 37(5) (1993): 1.
- PELCZAR, M. J., Jr., REID, R. D. y CHAN, E. C. S. *Microbiology*, 4a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1977.
- PERKINS, H. C. *Air Pollution*. Nueva York: McGraw-Hill, 1974.
- SARTWELL, P. E. (ed.) *Maxy-Rosenau Preventive Medicine and Public Health*, 10a. ed. Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1973.
- U.N. *The Determinants and Consequences of Population Trends*. Nueva York: United Nations, 1973.
- WINSLOW, C. E. *The Conquest of Epidemic Disease*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1943.
- ZIEGLER, P. *The Black Death*. Londres: Penguin Books, 1969.

# CAPÍTULO 9

---

## Ecología

*Thomas C. Hutchinson*

### 9.1 CONCEPTOS INTRODUCTORIOS

El término *ecología* proviene del griego *oikos*, que significa casa, combinado con *logos*, “el estudio de”. Así pues, literalmente ecología es el estudio de la casa (la Tierra). Para nuestros fines, definiremos **ecología** como la relación entre los organismos y su ambiente. En este caso, se considera como *ambiente* el entorno físico y químico de aire, suelo y agua, así como el ámbito biológico. El alcance de los estudios ecológicos es muy amplio; son ejemplos de los mismos una investigación de la química de los suelos a los que una especie vegetal determinada está restringida, un estudio de la relación entre el número de huevos que un ave canora pone y la cantidad de alimento disponible para los polluelos, y los cambios que ocurren en un lago o río cuando se vierten en él aguas negras no tratadas.

El ambiente fisicoquímico **abiótico** (no viviente) y las asociaciones **bióticas** (vivientes) de plantas, animales y microbios forman en conjunto sistemas ecológicos interdependientes o **ecosistemas**. Los ecosistemas pueden ser grandes o pequeños, y contener un número muy grande de especies o unas pocas; suelen definirse con base en los tipos de vegetación dominantes en ellos y poseen una cierta unidad propia reconocible. Son ejemplos de ecosistemas que ocupan grandes porciones de la superficie terrestre las selvas tropicales húmedas, los bosques de coníferas boreales, los bosques de caducifolios o de maderas duras, los ecosistemas de tundra y alpinos, los pastizales de pradera, los desiertos de cactus, las marismas saladas, los arrecifes de coral, los pan-

tanos y ciénagas, los lagos, la plataforma continental marina y el oceano abierto. Los límites en torno a un ecosistema definido en general son poco claros y puede existir una considerable heterogeneidad en los ecosistemas en gran escala como los que hemos enumerado. También puede haber ecosistemas pequeños dentro de uno de los tipos principales. Un pequeño estanque en la cima de una montaña dentro de un medio predominantemente alpino sería un ejemplo de esta naturaleza. Dentro de cada ecosistema existe dependencia de una especie respecto a otras. Además los ecosistemas están controlados por el clima y son una consecuencia del mismo.

Los dos factores primordiales que mantienen íntegro el ecosistema y en funcionamiento como un todo interdependiente son la necesidad de nutrientes y la necesidad de energía. Si bien los nutrientes dentro de un ecosistema crean ciclos a través de todos sus componentes con pérdidas desde el sistema y aportaciones al mismo muy limitadas, la energía de la radiación que llega del Sol prácticamente pasa por el sistema de manera unidireccional.

La **ecología** es el estudio de las interrelaciones entre plantas y animales y de las interacciones entre los organismos vivos y su ambiente físico.

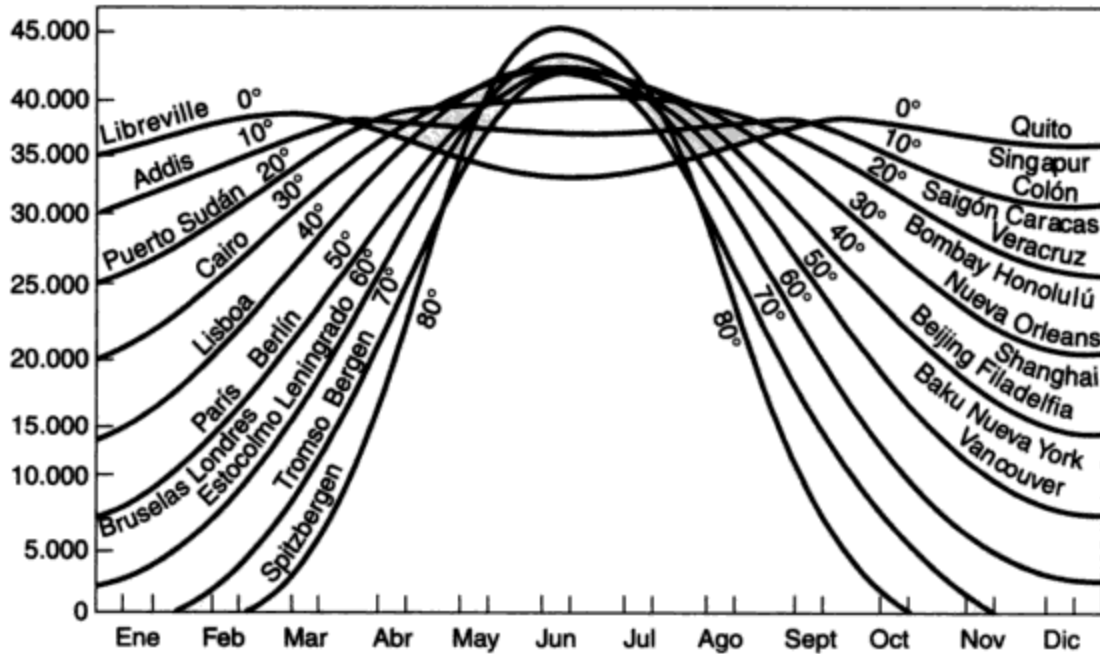
Un **ecosistema** es un grupo de plantas o animales, junto con la parte del ambiente físico con el cual interactúan. Un ecosistema se define como casi autosuficiente, de modo que la materia que entra y sale de él es poca en comparación con las cantidades que se reciclan internamente en un intercambio continuo de los elementos indispensables para la vida.

**Biota** es el conjunto de todos los elementos vivos de un ecosistema o un área determinada.

## 9.2 FLUJO DE LA ENERGÍA DE LOS ECOSISTEMAS

Esta sección en gran medida se apoya en la exposición que hace E. J. Kormondy en el capítulo 2 de su libro *Concepts of Ecology* (1969). Toda la actividad biológica depende de que las plantas verdes utilicen de manera satisfactoria la energía que originalmente procede del Sol. En este proceso la energía radiante del Sol primero se transforma en energía química y después en energía mecánica (calor) por medio del metabolismo celular.

El Sol puede considerarse como una bomba de hidrógeno en explosión continua, con una temperatura y composición tales que el hidrógeno se transmuta en helio, con la liberación concomitante de una cantidad considerable de energía en forma de ondas electromagnéticas. Si bien éstas van desde rayos de onda corta, x y gama, hasta ondas de radio de onda larga, alrededor del 99% de la energía total está en la región de longitudes de onda de 0.2 a 0.4  $\mu\text{m}$  (esto es, la región del ultravioleta al infrarrojo). Aproximadamente el 50% de esta energía corresponde a la región visible del espectro (de 0.38 a 0.77  $\mu\text{m}$ ) y en parte se utiliza durante la fotosíntesis. Puesto que la Tierra constituye un blanco muy pequeño en el sistema solar, sólo alrededor de un cincuentamillonésimo de la gigantesca producción de energía del Sol alcanza la atmósfera exterior de la Tierra (a 190 km sobre la superficie terrestre), y lo hace a un régimen constante. Este régimen se designa como el **flujo solar específico** o **constante solar**, definido como la cantidad de energía radiante de todas las longitudes de onda que atraviesa una unidad de área o superficie por unidad de tiempo. Este valor se calcula en aproximadamente  $1.4 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{s}$ , lo que da un ingreso total de energía de  $5.5 \times 10^{21} \text{ kJ}$  ( $1.5 \times 10^{18} \text{ kWh}$ ) (véase

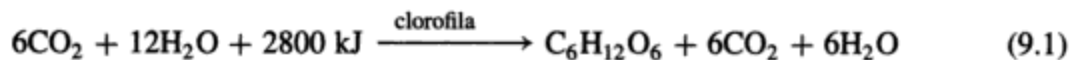


**Figura 9-1** Totales de radiación solar que se reciben por día sobre una superficie horizontal para distintas latitudes geográficas en diferentes épocas del año y con base en un valor de la constante solar de 81.2 kJ/m<sup>2</sup> · min. Fuente: Gates (1962).

Nota: Cifras originales en unidades de g · cal/cm<sup>2</sup> · año con base en un valor de constante solar de 1.94 g · cal/cm<sup>2</sup> · año. Conversión hecha por el autor. (1 g · cal = 4.1855 J; 1 J = 1 W · s.)

la sección 7.3). En virtud de que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es elíptica, el flujo específico en cualquier localidad concreta varía de manera estacional con la latitud. El flujo específico en un lugar determinado también varía durante el día a causa de la rotación de la Tierra (figura 9-1).

El proceso por medio del cual las plantas con clorofila utilizan la energía solar para convertir dióxido de carbono y agua en azúcares se llama *fotosíntesis*. Su ecuación general es



La actividad fotosintética y las tasas de fijación de dióxido de carbono en carbohidratos vegetales se puede calcular de diversas maneras, midiendo la velocidad de eliminación de CO<sub>2</sub> y de producción de O<sub>2</sub> y también la velocidad de acumulación de compuestos fotosintéticos intermedios.

Los términos ecológicos que se utilizan para explicar estas actividades se definen en el cuadro de la página 306.

### 9.2.1 Estimaciones de producción primaria

El término **productor primario** (que se ocupa de la **producción primaria**) se emplea para designar cualquier organismo autótrofo capaz de utilizar directamente la energía radiante del Sol. Esto incluye los organismos fotosintéticos. Transeau (1926) calculó la producción primaria en

Un **autótrofo**\* es un organismo que obtiene su carbono celular de una fuente inorgánica ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3$ ) y su energía *del Sol* (en realidad se trata de un *fotoautótrofo*, distinto de un quimioautótrofo, que obtiene su energía de la oxidación de compuestos químicos inorgánicos).

Un **heterótrofo**\* es un organismo que obtiene su carbono celular y su energía de materia orgánica.

Un **quimiótrofo**\* es un organismo que obtiene su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos sencillos, como  $\text{FeS}$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , y su carbono celular de materia inorgánica u orgánica. Los quimiótrofos son relativamente insignificantes en las relaciones energéticas de un ecosistema, pero desempeñan un papel significativo en el movimiento de los nutrientes minerales en el ecosistema.

La **cadena alimenticia** es un patrón idealizado de flujo de energía en un ecosistema natural. En la cadena alimenticia clásica, las plantas sirven de alimento sólo a consumidores primarios, los consumidores primarios sólo a consumidores secundarios, y así sucesivamente.

La **red alimenticia** es el patrón real de consumo de alimentos en un ecosistema natural. Un organismo determinado puede nutrirse desde muchos niveles tróficos, con lo cual da origen a una serie compleja y entrelazada de transferencias de energía.

**Productividad** es la tasa de fijación de energía en tejidos. La productividad primaria es la fijación de energía por las plantas; la productividad secundaria corresponde a niveles tróficos más altos.

Los **niveles tróficos** son niveles de alimentación. Una planta que obtiene su energía directamente del Sol ocupa el primer nivel trófico (autótrofo). El organismo que la consume ocupa el segundo nivel trófico (herbívoro), y el que se alimenta de éste ocupa el tercer nivel (carnívoro).

La **transpiración** es la evaporación controlada de agua de la superficie de tejidos foliares.

\*En ecología la fuente de energía es la base principal para la diferenciación de los organismos, mientras que en microbiología (véase la sección 8.2.3) suele ponerse énfasis en la fuente de carbono.

un campo sembrado de maíz del oeste medio de EUA con base en una cosecha estimada de 10,000 plantas por cada 0.405 ha, que en conjunto pesan 6,000 kg, así como en el análisis químico de este material. Transeau calculó que las plantas de maíz contenían 2,674 kg de carbono, el cual se había incorporado como  $\text{CO}_2$  por fotosíntesis. Esto equivale a 6,687 kg de glucosa. Pero además, las plantas debieron consumir algo de glucosa en la respiración para autoconservarse ellas mismas. Transeau estimó esto en 2,045 kg de glucosa, para dar una producción bruta de 8,732 kg en total. Un kilogramo de glucosa requiere una aportación de energía de  $15.7 \times 10^3$  kJ. Por consiguiente, se han utilizado  $138.1 \times 10^6$  kJ en actividades metabólicas y respiratorias. Otra necesidad de energía en las plantas es la **transpiración**, es decir la evaporación biológicamente controlada por las plantas mediante la cual se absorben agua y nutrientes del suelo y se transportan hasta las hojas de la planta. Entonces el agua se evapora a

**TABLA 9-1 PRESUPUESTO DE ENERGÍA DE UN ACRE DE MAÍZ (0.405 HECTÁREAS) DURANTE UNA TEMPORADA DE CRECIMIENTO DE 100 DÍAS**

	Glucosa (kg)	Kilojoules (millones)	Energía solar utilizada (%)
Radiación solar incidente	—	8550	100.0
Utilización biológica:			
Producción neta ( <i>PN</i> )	6687	105.9	1.2
Respiración ( <i>R</i> )	2045	32.2	0.4
Producción bruta ( <i>PB</i> )	8732	138.1	1.6
<i>PB</i> = ( <i>PN</i> + <i>R</i> )			
Energía utilizada en la transpiración	—	3808	44.5
Energía no utilizada	—	4604	53.9

Fuente: Transeau (1926).

través de pequeños poros de las hojas que se abren o se cierran para controlar la pérdida de agua. Quizá es sorprendente el dato de que la eficiencia de utilización de energía por el campo de maíz es sólo de 1.6% (tabla 9-1); esto es, únicamente el 1.6% de la energía total disponible se incorpora en los carbohidratos por fotosíntesis. Matemáticamente,

$$\frac{\text{producción bruta}}{\text{radiación solar}} \times 100 = \frac{138 \times 10^6 \text{ kJ}}{8.55 \times 10^9 \text{ kJ}} \times 100 = 1.6\% \quad (9.2)$$

La mayor parte de los ecosistemas naturales operan con una eficiencia global entre 0.1 y 2% en la naturaleza, mientras que los sistemas agrícolas óptimos alcanzan valores máximos de 3%. Los sistemas de oceano abierto, que cubren la mayor parte de la superficie terrestre, se acercan más a la tasa de conversión de 0.1%, aunque hay información reciente que sugiere que la productividad de los oceanos en buena medida puede haber sido subestimada.

Otro factor interesante en la conversión de energía es la eficiencia con la cual los autótrofos utilizan la energía que han incorporado. Esta utilización en realidad es la diferencia entre la producción bruta y la producción neta expresada como porcentaje. Para el ejemplo de Transeau, ésta es

$$\frac{\text{energía de respiración}}{\text{energía de producción bruta}} \times 100 = \frac{32.2 \times 10^6 \text{ kJ}}{138.1 \times 10^6 \text{ kJ}} \times 100 = 23.4\% \quad (9.3)$$

En otras palabras, aunque sólo el 1.6% de la energía total se utilizó en la producción de carbohidratos, las plantas de maíz son muy eficientes para convertir la energía capturada en biomasa al utilizar el 76.6% de ella ( $105.9/138.1 \times 100\%$ ).

En los sistemas acuáticos, la captura de energía es considerablemente menos eficiente que en los sistemas terrestres. En la tabla 9-2 se muestran los datos para dos lagos de agua dulce. Juday (1940) encontró que sólo el 0.36% del flujo solar específico para el lago Mendota, en Wisconsin, se incorporaba en la producción bruta en el nivel autótrofo. El fitoplancton utilizaba más del 90% de esta energía asimilada, en tanto que las plantas que crecen adheridas al lodo del fondo del estanque empleaban menos del 10%.

El lago ácido Cedar Bog de Minnesota, con sus aguas pardas manchadas de *humus*, es cuatro veces menos eficiente que el lago Mendota porque sus aguas coloreadas no transmiten tan bien



**TABLA 9-2 PRESUPUESTO ANUAL DE ENERGÍA DEL LAGO MENDOTA, WISCONSIN Y DEL LAGO CEDAR BOG, MINNESOTA**

	kJ/m <sup>2</sup> · año	Energía solar utilizada (%)
<b>Lago Mendota, Wisconsin</b>		
Radiación solar incidente	4,975,390	100.0
Utilización por las plantas		
Fitoplancton		
Producción neta (PN)	12,515	
Respiración (R)	4,185	
Producción bruta (PB)	16,700	
Plantas que viven en el fondo		
Producción neta (PN)	920	
Respiración (R)	290	
Producción bruta (PB)	1,210	
Producción bruta por autótrofos	17,910	0.36
<b>Lago Cedar Bog, Minnesota</b>		
Radiación solar incidente	4,975,390	100.0
Utilización por las plantas		
Producción neta (PN)	3,690	
Respiración (R)	970	
Producción bruta (PB)	4,660	0.10

Fuente: Lago Mendota: Juday (1940); lago Cedar Bog: Lindeman (1942).

la luz como las aguas más transparentes de este último lago. Lindeman (1942) encontró que la producción bruta, incluidas las pérdidas por pastoreo y descomposición, tenía una eficiencia de 0.10%. El mantenimiento respiratorio consumía el 21% de esta cantidad. Esta diferencia en la captura primaria de energía en gran medida se debe a la poca penetración de la luz hasta la profundidad en donde las plantas crecen. Puesto que la luz se mide en la superficie del agua, el 0.10% (lago Cedar Bog) es la eficiencia de conversión fotosintética global de la energía. Si la medición de la radiación se hiciera en el agua a la profundidad en donde están las plantas, la eficiencia subiría a cerca de 1 y 3%, respectivamente, para los dos ejemplos de la tabla. Estos valores son más cercanos a los correspondientes a los sistemas terrestres.

### 9.2.2 Comparación de la productividad primaria en diferentes ecosistemas del mundo

En la tabla 9-3 se muestran valores representativos de productividad en diferentes ecosistemas del mundo. La producción bruta está controlada por factores, como la respiración, la existencia de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), y diversas variables climáticas, de manera destacada: el suministro de luz, la duración de la temporada de crecimiento, la temperatura y la provisión de agua. Algunas de estas importantes restricciones saltan a la vista al analizar la tabla 9-3. Es conveniente examinar con cuidado esta información, porque nos dice mucho acerca del potencial mundial de producción de alimentos y de las diferencias principales entre los ecosistemas. Con base en la tabla 9-3, el ecosistema más productivo en términos de la tasa

TABLA 9-3 PRODUCCIÓN PRIMARIA DE LA TIERRA

Tipo de ecosistema	Área (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Límites normales de productividad primaria neta (g secos/m <sup>2</sup> · año)	Media	Producción primaria neta (10 <sup>9</sup> ton secas/ año)
Selva tropical húmeda	24.5	1000-3500	2000	49.4
Bosque templado	12.0	600-2500	1250	14.9
Bosque boreal	12.0	400-2000	800	9.6
Bosque y terrenos de arbustos	8.5	250-1200	700	6.0
Sabana	15.0	200-2000	900	13.5
Pastizal templado	9.0	200-1500	600	5.4
Tundra y alpino	8.0	10-400	140	1.1
Desierto y semidesierto	42.0	0-250	40	1.7
Tierras cultivadas	14.0	100-3500	650	9.1
Pantano y ciénaga	2.0	800-3500	2000	4.0
Lago y corriente	2.0	100-1500	250	0.5
<b>Total continental</b>	<b>149.0</b>		<b>773</b>	<b>115.2</b>
Oceano abierto	332.0	2-400	125	41.5
Plataforma continental, flujo ascendente	27.0	200-1000	360	9.8
Lechos de algas, arrecifes, estuarios	2.0	500-4000	1800	3.7
<b>Total marina</b>	<b>361.0</b>		<b>152</b>	<b>55.0</b>
<b>Total mundial</b>	<b>510.0</b>		<b>333</b>	<b>170.2</b>

Fuente: Westlake (1963), modificado y expandido de Whittaker (1961).

de producción anual es la selva tropical húmeda. Quizá resulta sorprendente el hecho de que los pantanos y ciénagas en promedio son igualmente productivos, aunque el área que ocupan es mucho menor. Esta alta productividad de los pantanos se debe a su elevado contenido de nutrientes, en tanto que la elevada productividad de la selva tropical se debe a las altas temperaturas, al crecimiento continuo (no hay una estación de letargo) y a la abundante precipitación pluvial. La restricción principal en los trópicos es la provisión de nutrientes. La tala inmoderada de esta clase de bosques es, como ya se ha visto en muchas partes del mundo, muy peligrosa porque la erosión del suelo en estas áreas donde hay tanta precipitación pluvial puede ser devastadora, y gran parte del contenido de nutrientes del ecosistema está en los árboles mismos y por tanto se pierde con la madera que se corta.

La temperatura es la restricción más importante en la reducción de la productividad anual al pasar de las regiones tropicales a las templadas y de ahí a las árticas (de tundra y alpinas). También intervienen la intensidad de la luz y la duración de la temporada de crecimiento. El efecto del abastecimiento de agua se puede ver comparando la productividad de los pastizales templados (600 g secos/m<sup>2</sup> · año) con la del desierto (40 g secos/m<sup>2</sup> · año). La mayor productividad de los estuarios (1,800 g secos/m<sup>2</sup> · año) se debe al alto nivel nutricional de estas áreas (por ejemplo, los deltas del Mississippi, del Nilo y de otros ríos).

Al examinar la productividad primaria neta mundial, los factores fundamentales son el área de la superficie terrestre ocupada por los diferentes ecosistemas y la productividad primaria neta por unidad de área. Existen enormes áreas desérticas y semidesérticas, cuya productividad es

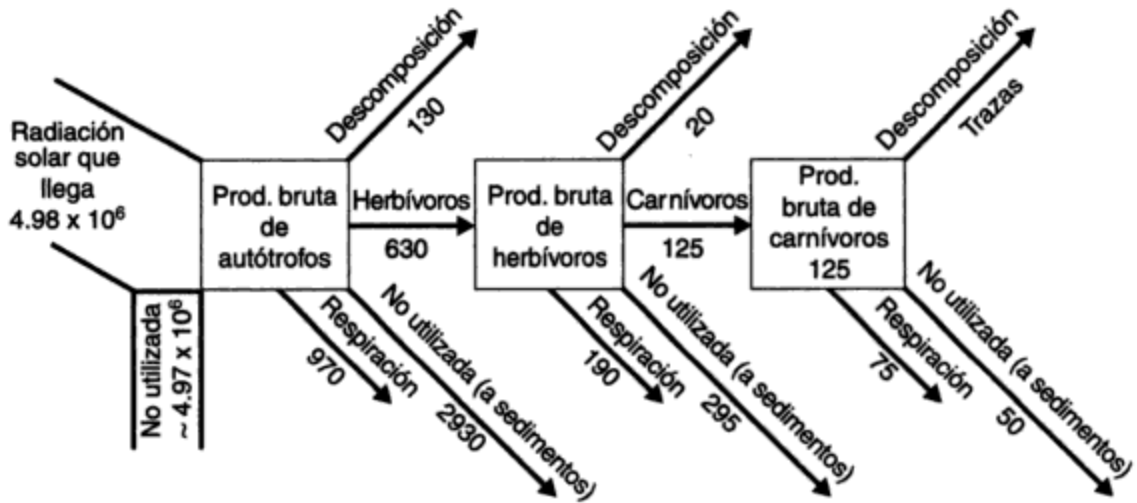
baja. Así, sus 42 millones de  $\text{km}^2$  producen un total anual de sólo  $1.7 \times 10^9$  toneladas secas, en tanto que los 24.5 millones de  $\text{km}^2$  de selvas tropicales húmedas rinden aproximadamente  $49.4 \times 10^9$  toneladas secas. La agricultura mundial produce alrededor de  $9.1 \times 10^9$  toneladas, gran parte de las cuales son, por supuesto, las partes no comestibles de los cultivos, además de que una buena proporción se pierde a causa de enfermedades, plagas, almacenamiento y descomposición. El rendimiento terrestre total es casi  $115 \times 10^9$  toneladas de materia seca al año, en tanto que los océanos, con una superficie dos y media veces mayor, sólo producen  $55 \times 10^9$  toneladas anuales de materia seca. Así pues, no es realista considerar que los océanos constituyen una provisión enorme y no explotada de alimentos para el pronosticado crecimiento de la población mundial. De hecho, la mayor parte de las pesquerías ya se han sobrexplotado y es necesario volver a abastecerles. En la actualidad la Antártida es una excepción, pero el krill, un crustáceo sorprendentemente abundante, está siendo capturado sin restricción alguna por barcas pesqueras japonesas y rusas, de modo que el excedente puede no durar mucho tiempo.

Vale la pena destacar otro punto. Puesto que se libera oxígeno en proporciones estequiométricas en relación con la utilización de dióxido de carbono en la fotosíntesis, se concluye que la tierra, con casi el doble de productividad que los océanos, genera alrededor de dos veces más  $\text{O}_2$  que los océanos. Una gran proporción del oxígeno que proviene de la vegetación se produce en las regiones tropicales. Por consiguiente, es de suponer que la destrucción de plantas verdes en los océanos y en áreas terrestres tropicales tenga consecuencias de largo plazo en los niveles atmosféricos de oxígeno, así como la quema de combustibles fósiles y la destrucción de los bosques están causando una acumulación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera (véase el capítulo 5). No obstante, se produce un reabastecimiento de oxígeno de magnitud aún desconocida como consecuencia de la reducción de óxidos de hierro por las bacterias (Stumm y Morgan, 1981).

### 9.2.3 Flujo de energía en los ecosistemas más allá de los productores primarios

Es necesario entender de qué manera la transformación inicial de la energía radiante que se recibe por los productores primarios mantiene de hecho a todos los organismos del ecosistema, no sólo a las plantas verdes. En el ejemplo de lago Cedar Bog estudiado por Lindeman, la producción bruta fue de  $4,660 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$ , mientras que se consumieron  $970 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$  en las actividades metabólicas necesarias para mantener a los productores primarios y permitir su reproducción. La figura 9-2 indica que los herbívoros consumen  $630 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$  de los  $4,660 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$ . Esto equivale a un 17% utilizado por los consumidores primarios de la producción autótrofa neta. Sólo  $125 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$  de  $440 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{año}$ , o el 28.4%, de esta energía herbívora disponible es utilizada efectivamente por los carnívoros. Aunque éste es un uso más eficiente de los recursos que la que tiene lugar en el nivel de transferencia autótrofo/herbívoro, deja espacio todavía para una explotación mayor.

En el nivel del carnívoro, alrededor del 60% de la ingesta de energía se consume en actividad metabólica, en tanto que el resto pasa a formar parte del sedimento. De esta manera, el porcentaje de energía disponible empleado para la actividad metabólica aumenta a lo largo de la serie trófica, autótrofo  $\rightarrow$  herbívoro  $\rightarrow$  carnívoro, en el caso del lago Cedar Bog del 17 al 28% y de ahí al 60%. Esto es característico de muchas cadenas alimenticias. Una de las razones principales es que los herbívoros tienen que moverse en busca de las plantas verdes de las cuales se alimentan, en tanto que los carnívoros requieren un gasto de energía aún mayor para la búsqueda y captura de los herbívoros.



**Figura 9-2** Destino de la energía que incorporan los carnívoros en el lago Cedar Bog, Minnesota, en kilojoules por metro cuadrado por año. Fuente: Lindeman (1942).

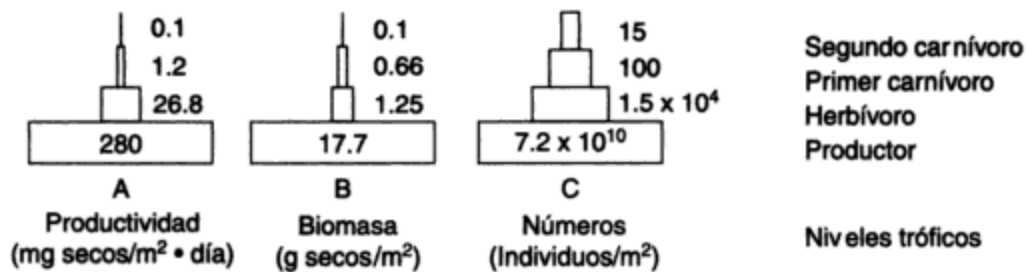
Nota: Conversión del original en  $g \cdot cal/cm^2 \cdot año$  a  $kJ/m^2 \cdot año$  por el autor. ( $g \cdot cal/cm^2 \cdot año \times 41.855 = kJ/m^2 \cdot año$ .)

### 9.3 CADENA ALIMENTICIA Y NIVELES TRÓFICOS

La secuencia de consumo desde los autótrofos hasta los carnívoros representa la cadena alimenticia, en la cual cada eslabón depende del inmediato anterior para su provisión de alimento (energía). Estas posiciones a lo largo de cadenas alimenticias se conocen como **niveles tróficos**. En muchos casos los límites entre los niveles no son definidos. Muchos animales encuentran alimento idóneo en cuanto a tamaño y otras características en varios niveles tróficos. Para describir la trama de los diversos niveles tróficos con sus interconexiones suele emplearse el término **red alimenticia**.

Cuando se examina el flujo y la utilización de la energía en la cadena alimenticia, se hace evidente que el movimiento de energía en el ecosistema sólo es en un sentido, es decir, unidireccional. A medida que avanza progresivamente por los diversos niveles tróficos, ya no está disponible para el nivel anterior. Las relaciones entre los diversos niveles tróficos se puede expresar como se muestra en la figura 9-3. Éstas se conocen como **pirámides de productividad**. Las pirámides sirven para representar varias de las otras relaciones existentes en un ecosistema [por ejemplo, biomasa (materia orgánica total) y número de organismos].

En virtud de que, por lo general, cada carnívoro necesita alimentarse con un gran número de herbívoros para subsistir, y cada uno de éstos para su sustento debe consumir una cantidad de autótrofos equivalente a varias veces su propia biomasa, las sustancias que no son biodegradables por naturaleza, cuando entran en una cadena alimenticia, se bioacumulan en cada nivel trófico sucesivo. Esto ha dado origen a muchos de los bien conocidos problemas ambientales de los últimos 20 o 30 años. El ejemplo mejor conocido es la bioacumulación de plaguicidas orgánicos como los hidrocarburos clorados, que incluyen el DDT (tabla 9-4). La concentración de DDT puede aumentar muchos miles de veces en los tejidos grasos de



**Figura 9-3** Pirámide de comunidades para un estanque experimental. Fuente: Whittaker (1961).

La productividad se estimó con base en la tasa de incorporación de fósforo en un estanque poco profundo con bajo contenido de nutrientes. El cuarto nivel trófico se estimó como una fracción de carnívoros que se alimentan de los niveles segundo y tercero. El ancho de los escalones que representa el número de organismos se

**TABLA 9-4** EJEMPLOS DE FACTORES DE CONCENTRACIÓN DEBIDOS A LA ACUMULACIÓN EN LA CADENA ALIMENTICIA DE CONTAMINANTES DE DIVERSAS CLASES<sup>a</sup>

Factores de concentración en la biota para diversos niveles de cadmio en agua (con base en el peso seco)				
Nivel de cadmio en el agua (mg/L) <sup>b</sup> :	0.01	0.0025	0.05	0.010
Helecho flotante	21,000	25,000	31,000	31,000
Lenteja de agua	120,000	155,000	140,000	48,000
Jacinto de agua				
Raíces	42,000	50,000	27,000	17,000
Hojas	7,000	7,000	7,000	4,000
Zooplacton	—	2,600	16,600	6,000
Caracoles				
Tejidos	22,000	22,000	6,000	19,000
Concha	800	2,000	400	1,000
Peces	600	600	2,600	700
Sedimento	10	36	11	25

Acumulación de DDT en la cadena alimenticia en un lago de California		
Cadena alimenticia	DDT (ppm)	Factor de concentración (F. C.)
Agua	0.00005	1
Plancton	0.04	800
Charal plateado	0.094	18,800
Lucio (pez depredador)	1.33	26,600
Golondrina de mar (se alimenta de peces y animales pequeños)	3.91	78,200
Gaviota arenquera (carroñera)	6.00	120,000
Mergo (pato que se alimenta de peces)	22.8	460,000

<sup>a</sup>Los números que se muestran son factores de concentración (F. C.) a diversos niveles de concentración de contaminantes.

<sup>b</sup>La columna del extremo izquierdo (titulada "0.01") es de un estudio, y las otras tres son de un segundo estudio.

Fuente: Hunt y Bishoff (1960).

carnívoros como la lechuza, el halcón peregrino, el quebrantahuesos, el lucio, el sollo y la lubina, así como en aves que se alimentan de peces como el pelícano pardo, el somorgujo y el alcatraz. El DDT entra en los cuerpos de agua con el drenaje de terrenos agrícolas, acarreado por viento cuando se rocía, y debido a adiciones deliberadas de insecticidas a los mismos cuerpos para matar jefenes y mosquitos. Se han producido reducciones drásticas en el número de muchas aves de presa que se alimentan de vida acuática como consecuencia de esta bioacumulación, porque uno de los efectos del DDT (y de los hidrocarburos clorados en general) es la interferencia con el metabolismo del calcio. Esto da origen al adelgazamiento del cascarón de los huevos, los cuales se rompen con facilidad. Otros ejemplos de efectos adversos de bioacumulación en cadenas alimenticias tienen su origen en el uso de mercurio como aditivo fungicida para semillas, el cual ingieren luego las aves que se alimentan de granos, como el faisán y el urogallo, y en varios casos se ha acumulado hasta niveles letales.

Puesto que se encuentran en los extremos de las cadenas alimenticias de las cuales dependen, los humanos también podemos ser receptores de las acumulaciones de sustancias químicas tóxicas en los alimentos que ingerimos. El procesamiento de los alimentos y el control de calidad son indispensables para salvaguardar nuestra salud y evitar esta clase de situaciones. Un ejemplo de acción de salvaguarda fue la prohibición de la pesca en los Grandes Lagos y en otros lagos de la misma área a principios de la década de 1970 a causa del excesivo contenido de mercurio en los peces.

## 9.4 CICLOS DE NUTRIENTES

El abastecimiento de nutrientes distintos del  $\text{CO}_2$  para un ecosistema procede principalmente del suelo, pero también en menor medida del aire, la lluvia y la nieve, y en forma de polvo. La provisión de muchos nutrientes es limitada porque son escasos en el suelo y en otras fuentes. Los nutrientes se reciclan de tal manera que se incorporan en plantas y animales, o bien quedan disponibles para que los productores los asimilen por la descomposición de restos de organismos muertos. Las rutas de las fuentes a los sumideros y de regreso a las fuentes se llaman **ciclos elementales**, y difieren para los diversos elementos. Examinaremos brevemente los tres ciclos de nutrientes más importantes: carbono, nitrógeno y fósforo.

### 9.4.1 Ciclo del carbono

El carbono es necesario en grandes cantidades como bloque básico de construcción de toda la materia orgánica. La fuente última de carbono es el dióxido de carbono, el cual se transforma en compuestos orgánicos por la fotosíntesis. En la naturaleza, el movimiento del carbono es de la reserva de dióxido de carbono atmosférico a las plantas verdes y de ahí a los consumidores, y continúa a los organismos microbianos que descomponen la materia orgánica. Las algas y las bacterias autótrofas también incorporan o fijan carbono del  $\text{CO}_2$  atmosférico para producir carbohidratos y otras sustancias orgánicas complejas. Éstas se distribuyen a través de la cadena alimenticia y constituyen los tejidos de la materia viva. Los combustibles fósiles, las rocas de carbonatos y el dióxido de carbono disuelto en los océanos son importantes reservas adicionales de carbono, aunque los dos primeros no son accesibles de manera natural para las plantas y los

animales. Estas fuentes "ligadas" de carbono quedan disponibles cuando el  $\text{CO}_2$  se libera durante la quema de combustibles fósiles y por la acción del  $\text{CO}_2$  (producto de la descomposición microbiana) que transforma los carbonatos insolubles en bicarbonatos solubles.

El retorno del dióxido de carbono a la reserva atmosférica se verifica de diversas maneras. Quizá la más conocida es a través de los procesos respiratorios de los humanos y los animales. Sin embargo, con mucho, las cantidades más grandes de dióxido de carbono regresan a la atmósfera por la actividad de grupos de bacterias y hongos, los cuales utilizan materia orgánica muerta como fuente de alimento. Estos microorganismos oxidan la materia muerta, ya sea de forma directa o en varias etapas, obteniendo  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  como productos finales, con lo cual completan el ciclo. Otras fuentes que devuelven  $\text{CO}_2$  a la atmósfera son los incendios forestales y la quema de combustibles fósiles y otra materia orgánica. La quema de turba seca, carbón o petróleo es un ejemplo de la utilización de una biomasa fotosintética antigua como fuente de energía térmica. El carbono se oxida a dióxido de carbono en cada caso.

El componente geológico del ciclo del carbono comprende (1) la acumulación, descomposición lenta y compactación del material vegetal para formar turba, carbón y petróleo, y (2) la acumulación y compactación de conchas de animales y esqueletos microscópicos de diatomeas para formar rocas de carbonatos. El carbonato de calcio también se precipita en aguas dulces cuando las algas extraen  $\text{CO}_2$  del agua, con lo cual aumenta su pH. Cuando se mezclan con arcilla, estos depósitos forman margas, que con el tiempo se compactan y forman piedra caliza. Enormes depósitos de carbón y gran parte de la piedra caliza se sedimentaron durante el periodo carbonífero, cuando predominaban en la Tierra aguas poco profundas y climas cálidos. Como se explicó en el capítulo 6, el dióxido de carbono también se difunde dentro y fuera del agua, en la cual se disuelve para formar ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).<sup>\*</sup> Éste se disocia por una serie de reacciones para formar un ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y un ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), después de esto se vuelve a disociar para formar un ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y un ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Todas las reacciones son reversibles y dependen de los gradientes de difusión y del pH.

La descarga de aguas residuales domésticas y desechos industriales orgánicos aporta grandes cantidades de carbono a las aguas receptoras. La necesidad de reducir la materia orgánica en ellas es una de las razones principales por las que se hace el tratamiento de aguas residuales (véase el capítulo 12). En la figura 9-4 se muestra un cuadro de conjunto del ciclo del carbono. Los puntos más importantes que conviene recordar son: (1) todas las plantas verdes terrestres obtienen su carbono del dióxido de carbono gaseoso, (2) las plantas acuáticas lo adquieren de bicarbonatos y (3) los complejos de carbono que se forman en (1) y (2) son devueltos a sus formas originales por la descomposición microbiana.

### 9.4.2 Ciclo del nitrógeno

Otro ciclo de nutriente importante es el del nitrógeno, el cual se muestra de forma esquematizada en la figura 9-5. El nitrógeno es un elemento de importancia crítica para todas las formas de vida. Las proteínas, que son componentes de todas las células, en promedio contienen 16% de nitrógeno en peso. Otras sustancias nitrogenadas complejas de importancia para la vida son los ácidos nucleicos y los aminoazúcares. Sin un suministro continuo de nitrógeno, la vida en la Tierra dejaría de existir.

<sup>\*</sup>El  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ha sido definido por Stumm y Morgan (1981) como  $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{ac}) + \text{H}_2\text{CO}_3$ , en donde  $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  es verdaderamente ácido carbónico en su forma predominante.

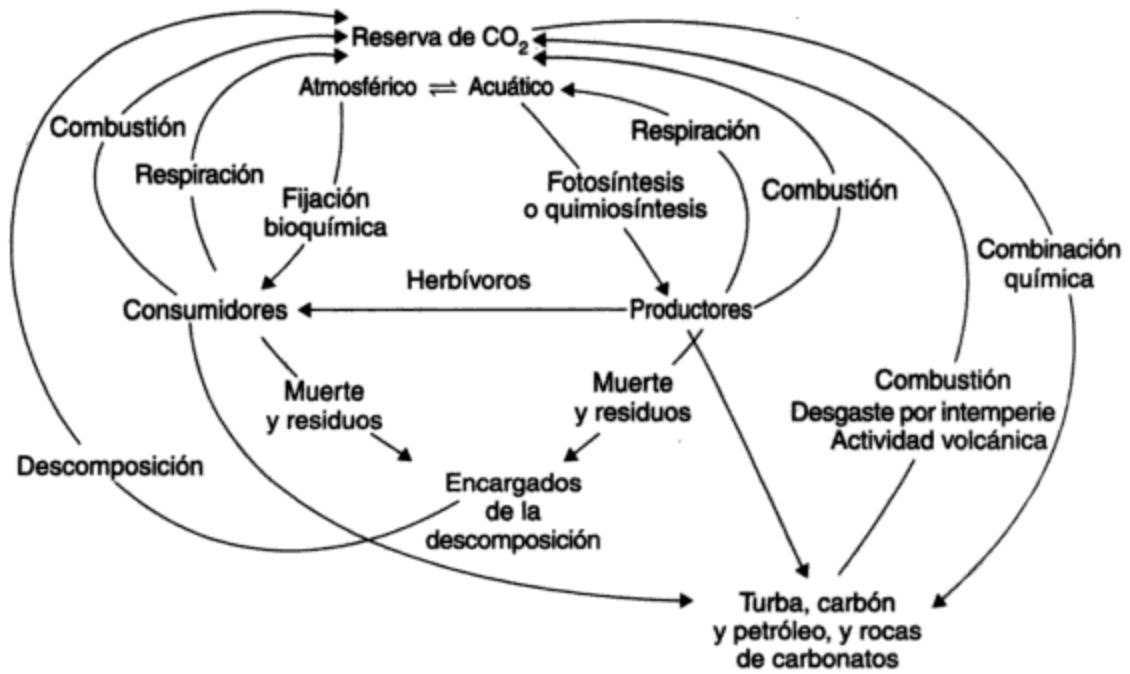


Figura 9-4 Ciclo del carbono. Fuente: Kormondy (1969).

El ciclo del nitrógeno se parece un poco al ciclo del carbono, aunque con algunas diferencias críticas. No obstante que el 79% de la atmósfera del planeta es nitrógeno elemental (N<sub>2</sub>), este gas inerte no está disponible en absoluto para ser asimilado por la mayor parte de las plantas y los animales. Son relativamente pocos los microbios capaces de “fijar” el nitrógeno atmosférico inorgánico en la forma orgánica. Esta fijación microbiológica alcanza en promedio de 140 a 700 mg/m<sup>2</sup> · año. En áreas agrícolas muy fértiles puede ser de más de 20,000 mg/m<sup>2</sup> · año.

Se sabe de diversas bacterias, hongos y algas azules capaces de fijar nitrógeno. Este proceso implica la incorporación directa de nitrógeno atmosférico en el “cuerpo” orgánico del organismo fijador. Los fijadores de nitrógeno tan sólo constituyen una porción muy pequeña de estos grupos en conjunto, y se les puede dividir en (1) **fijadores de nitrógeno simbióticos**, que son principalmente bacterias y están asociadas a las raíces de las leguminosas (miembros de la familia del guisante y el frijol) y algunas otras plantas fanerógamas, y (2) **fijadores de nitrógeno de vida libre**. El género *Rhizobium* incluye las bacterias que habitan los nódulos que se forman en las raíces de los miembros de la familia del guisante y el frijol. Estas bacterias están presentes en el suelo infectando las finas raíces a medida que las plantas recién nacidas crecen. La raíz produce un nódulo especial que aloja los rhizobios, en los cuales las bacterias transforman el nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) en los constituyentes nitrogenados orgánicos de sus propias células. Puesto que las células bacterianas mueren con gran rapidez, este nitrógeno queda disponible para las plantas superiores. Los cultivos de trébol y de frijol aportan nitrógeno a los suelos en los cuales crecen y eliminan la necesidad de aplicar costosos fertilizantes. En muchos países se está realizando un gran esfuerzo científico para encontrar bacterias capaces de formar una asociación similar con los cultivos de cereales. Los fijadores



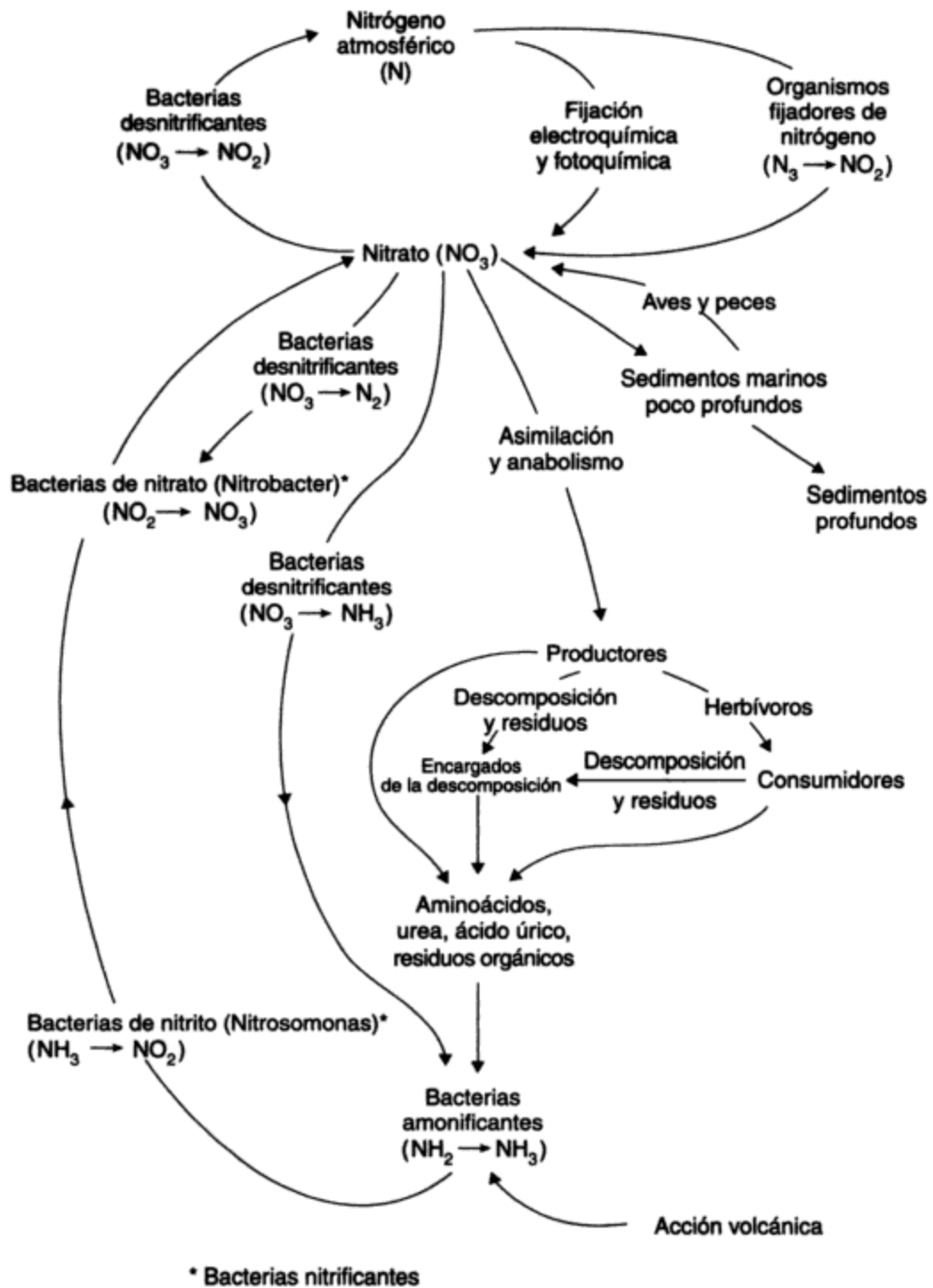


Figura 9-5 Ciclo del nitrógeno. Fuente: Kormondy (1969).

de nitrógeno simbióticos\* parecen estar confinados a los ecosistemas terrestres y no se han encontrado en hábitats acuáticos, con la única excepción de un gusano marino que ataca la madera sumergida.

Entre los fijadores de nitrógeno no simbióticos se encuentran bacterias aerobias y anaerobias de vida libre, así como cianobacterias. Éstas se encuentran en los suelos y en aguas tanto marinas como dulces, y contribuyen de manera sustancial al contenido de nitrógeno de estos ambientes. Una fuente adicional (aunque de poca magnitud) de nitrógeno atmosférico para suelos y aguas son las tormentas eléctricas en las cuales se verifican conversiones electroquímicas del nitrógeno.

El nitrógeno se introduce en la cadena alimenticia de productor/consumidor cuando las plantas la absorben de la solución del suelo ya sea en forma de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) o como ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Las *bacterias desnitrificantes* del suelo también pueden convertir el nitrito en amoniaco, en especial las bacterias y los hongos de los suelos anegados. Esta conversión también se produce en condiciones de escasez de oxígeno en los lagos. El proceso se llama **desnitrificación**. Las bacterias **nitrificantes** utilizan el nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3$ ) como fuente de energía para sintetizar su protoplasma. Este proceso se produce con lentitud, si acaso, en condiciones ácidas. Primero, el amoniaco se convierte en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), por obra de bacterias del género *Nitrosomonas*, y éste se transforma en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por la acción de otro género, *Nitrobacter* (figura 9-5). Este proceso en dos etapas se llama **nitrificación**. Ambos grupos de bacterias obtienen su energía de este proceso de oxidación y más tarde utilizan una parte para convertir  $\text{CO}_2$  en carbono celular. Por último, una vez que el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ha sido asimilado y transformado por las plantas superiores y los microbios en forma de proteína y ácidos nucleicos, se metaboliza y se devuelve a la parte principal del ciclo en forma de productos residuales (esto es, como nitrógeno inorgánico inanimado). Muchas bacterias y hongos heterótrofos del suelo y del agua utilizan este material rico en nitrógeno, lo transforman y lo liberan como amoniaco inorgánico en un proceso llamado **amonificación**. Otras partes del ciclo implican la emisión, de vuelta en la atmósfera, de nitrógeno y óxidos nítricos gaseosos, aunque la importancia de las mismas es limitada (figura 9-5).

Como ya se ha señalado, el nitrógeno se introduce en el ambiente acuático por la descarga de aguas residuales domésticas y residuos industriales orgánicos. Los componentes principales son nitrógeno orgánico (proteínas) y amoniaco. En el proceso de tratamiento éstos se pueden oxidar parcialmente a nitritos y nitratos. La descarga de cantidades excesivas de compuestos nitrogenados en ríos y lagos puede dar por resultado un crecimiento excesivo y perjudicial de algas y plantas macrofitas (véase la sección 9.6).

### 9.4.3 Ciclo del fósforo

El ciclo del fósforo, en particular en el sistema acuático, es de especial interés para los científicos e ingenieros ambientalistas. El fósforo, un elemento indispensable para el crecimiento, con mucha frecuencia se encuentra en cantidades limitadas en ríos y lagos, en tanto que el carbono y el nitrógeno están disponibles en mayor abundancia. Por consiguiente, el crecimiento excesivo de algas y hierbas acuáticas en ríos y lagos en muchos casos se puede reducir o impedir limitando sólo la provisión de fósforo. Por tanto, el fósforo es un **factor limitante**.

\*En una relación simbiótica, dos organismos disímiles viven juntos con ventaja para ambos.

El fósforo está presente en los suelos y rocas como fosfato de calcio [ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ] y como hidroxiapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ]. Puesto que la roca fosfórica es sólo ligeramente soluble, por lixiviación se disuelven cantidades muy pequeñas, lo cual origina concentraciones tan bajas como 0.001 ppm. Puesto que todos los procesos vitales necesitan fósforo, el sistema biológico reduce aún más la concentración del mismo en las aguas naturales. En virtud de los cambios estacionales en la producción vegetal y animal, y debido a la mayor entrada de fósforo en las aguas naturales por el desagüe de las fuentes, la concentración de fósforo en el agua varía notablemente a lo largo del año.

La aportación de fósforo por actividades humanas puede ser mayor que la de fuentes naturales. Las aguas negras domésticas contienen fósforo de las heces y de los detergentes comerciales, en los cuales se utilizan fosfatos (como agentes humectantes), aunque en gran medida esta última contribución se ha reducido en muchos lugares a causa de la legislación. El desagüe de áreas agrícolas que han recibido fertilizantes (que normalmente contienen nitrógeno, fósforo y potasio) pueden ser otra fuente importante. Por consiguiente, el fósforo soluble puede alcanzar concentraciones altas en ciertas aguas contaminadas. Este fósforo, fácilmente disponible, en muchos casos da origen al crecimiento de organismos perjudiciales, como las algas filamentosas que causan problemas de sabor y olor al agua y obstruyen los filtros de las plantas de tratamiento. El problema general de la eutroficación de los lagos se analiza en la sección 9.6.

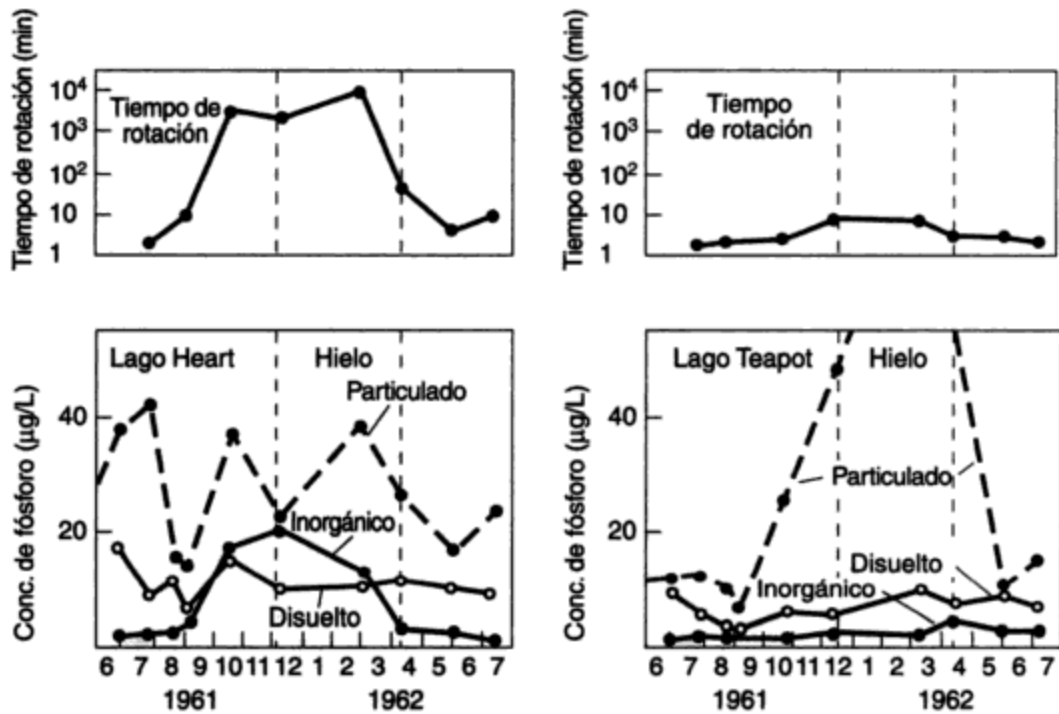
El fósforo es un componente de los ácidos nucleicos, los fosfolípidos y también de numerosos compuestos fosforilados. Se ha observado que la proporción de fósforo respecto a otros elementos en los organismos tiende a ser considerablemente mayor que en fuentes externas como el suelo o el agua, lo cual indica que la provisión de fósforo es de importancia crítica para el crecimiento biológico en los lagos. Para su nutrición las plantas y las bacterias necesitan fósforo en forma de fosfato (disuelto), generalmente como ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ). Estos organismos lo asimilan de manera directa, y convierten en su protoplasma el  $\text{PO}_4$  en la forma orgánica (insoluble). La descomposición de estos organismos disuelve y libera (mineraliza) el fósforo para su nueva utilización. No obstante, en los lagos gran parte del fosfato es extraído del agua por el sedimento, y más tarde eliminado de la circulación estacional. En la figura 9-6 se muestra un ciclo de fósforo simplificado. Las flechas continuas representan flujos importantes; las punteadas indican movimientos de "mucha menor importancia".

Tanto las células muertas como las vivas contienen fósforo orgánico particulado, y una parte del fósforo inorgánico disuelto en el agua procede de este material orgánico por excreción y descomposición. Rigler (1964) encontró que predominan dos patrones de cambio del fósforo: (1) el fósforo inorgánico es bajo durante gran parte del año, pero aumenta de diciembre a abril (a causa de la limitada actividad biológica); y (2) el fósforo orgánico particulado no muestra patrones estacionales consistentes, aunque se produce un aumento pequeño en invierno. El fitoplancton de las aguas lacustres asimila el fósforo inorgánico de manera muy activa en primavera, por lo cual se produce un rápido descenso en la concentración de fósforo disuelto. Esto se ilustra en la figura 9-7 para cuatro de los lagos estudiados. Las tres formas de fósforo que se indican son particulado (orgánico), disuelto ( $\text{PO}_4$ ) e inorgánico (polifosfatos), los cuales tarde o temprano se descomponen (hidrolizan) en el agua a  $\text{PO}_4$ .

El fósforo en condiciones oxidantes queda ligado a los sedimentos (como ocurre en el otoño durante el mezclado en los lagos) y se libera en la columna de agua de nuevo en las condiciones



**Figura 9-6** Ciclo del fósforo. *Fuente:* Adaptado de Odum (1971), *Fundamentals of Ecology*, 3ra. ed., con autorización de W. B. Saunders, Co.



**Figura 9-7** Cambios estacionales en el tiempo de rotación del fósforo inorgánico y cantidades de las tres formas del fósforo en dos lagos de Ontario. *Fuente:* Rigler (1964).

anóxicas (de poco oxígeno) invernales de estancamiento (véase la sección 9.5). La distribución veraniega de estos componentes parece ser estática, pero las células vegetales y animales están muriendo y siendo reemplazadas por otras nuevas de manera continua. Usando el isótopo radiactivo fósforo 32, Rigler consiguió demostrar que el fósforo 32 se renueva, o se vuelve a utilizar, con notable rapidez y eficiencia. Durante el verano el tiempo medio de rotación varía entre 0.9 y 7.5 min. A medida que la estación avanza y llega el otoño y el invierno, ocurre un sorprendente alargamiento del tiempo de rotación hasta que se alcanza el máximo que se presenta bajo la cubierta de hielo y nieve. En los dos extremos, Rigler encontró que la rotación en invierno era de 7 min en un lago (sólo 3.5 veces más largo que en verano) y de 10,000 min (7 días) en otro, lo cual de hecho era más representativo del resto de los lagos estudiados. Es esta rápida y continua rotación del fósforo lo que permite que las poblaciones de fitoplancton se expandan con rapidez en primavera, aunque la escasez efectiva de fósforo en muchas aguas significa que es un nutriente limitante, y las adiciones del mismo son asimiladas con prontitud por las algas, que crecen entonces en abundancia.

## 9.5 ELEMENTOS DE LIMNOLOGÍA

El estudio de las características físicas, químicas y biológicas de los ríos y lagos (esto es, del agua dulce) se llama **limnología**. Su contraparte, que se ocupa de los océanos, mucho mayores desde el punto de vista geográfico, se llama **oceanografía**. Es importante que quienes tienen que ver con el uso y la protección de los recursos acuíferos, incluso en actividades afines tales como irrigación, eliminación de residuos y erosión de las costas, entiendan cómo trabajan los sistemas de agua dulce. Se dispone de excelente información acerca de estos aspectos prácticos de la limnología en Ruttner (1965) y Wetzel (1975).

Algunas definiciones importantes relacionadas con la limnología son las siguientes:

Un **organismo bentónico** es una planta o animal que vive cerca de o en el fondo de un lago, río, arroyo u océano.

El **epilimnio** es la capa superior de agua de un lago.

La **zona eufótica** es el volumen superficial de agua del océano o un lago profundo que recibe suficiente luz para promover la fotosíntesis.

El **hipolimnio** es la capa inferior de agua de un lago o estanque, la cual permanece a una temperatura constante durante el verano.

La **limnología** es el estudio de las características físicas, químicas y biológicas de los ríos y lagos (esto es, del agua dulce).

El **plancton** es el conjunto de los pequeños organismos que flotan libremente y viven en un cuerpo de agua; el término fitoplancton se refiere a las especies vegetales (algas), y el de zooplancton a las especies animales (crustáceos, rotíferos, protozoarios) que se alimentan de otras formas de plancton.

El **metalimnio** es la capa intermedia de agua de un lago en donde se produce la termoclinal (la temperatura y el contenido de oxígeno decaen rápidamente con la profundidad).

### 9.5.1 Cantidad y calidad del agua

Un ecosistema, un lago o río, por sí mismo es una unidad más bien artificial en cuanto a que muchas de sus características están determinadas por la naturaleza, las dimensiones y la forma del terreno que la rodea y por las aguas de drenaje que se introducen en ella. La unidad ecológica, por tanto, es el lago o río junto con su **cuenca colectora**. Esta última también se conoce como **área de captación** u **hoya tributaria**. La cantidad de agua que entra a un lago o río está determinada por la abundancia de la precipitación que cae en la cuenca colectora, tanto de lluvia como de nieve (en las montañas la niebla y los estratos interceptados pueden ser una importante fuente adicional de precipitación), por el tamaño de la cuenca colectora, y por la naturaleza de la vegetación y del suelo que rodean el cuerpo de agua. Los suelos profundos de turba orgánica con vegetación de ciénaga sobre ellos pueden actuar como una esponja, de modo que gran parte de la precipitación pluvial que se produce en un periodo corto se retiene en la hoya tributaria; mientras que una cantidad de lluvia similar sobre una cuenca dura de roca granítica, con vegetación escasa y una cubierta de suelo poco profunda, en gran parte podría desaguar e introducirse al lago o río pocas horas después de ocurrida la precipitación.

La calidad de las aguas superficiales es afectada por la atmósfera a través de la cual la lluvia cae, por la naturaleza del suelo y de la vegetación sobre la cual el agua de superficie escurre, y por el grado de actividad humana en la cuenca. La composición de las aguas que se introducen en ríos y lagos puede cambiar a causa de gases industriales que son arrastrados desde fuentes distantes y se disuelven en el agua de lluvia que cae sobre el área de captación (véase el capítulo 5). Las migraciones de aves pueden tener un efecto considerable en la calidad del agua de los lagos que se encuentran a su paso; por ejemplo, las aves acuáticas pueden aportar sales y nutrientes con sus excretaciones. El desagüe de áreas muy boscosas es rico en materia orgánica y de color amarillo pardusco debido a los ácidos húmicos. El desagüe de terrenos estériles deforestados puede ser muy turbio a causa de una fuerte carga de sedimentos que es producto de la erosión del suelo. Las actividades de utilización de las tierras por las personas en la hoya tributaria también puede ser de gran importancia. Las labores agrícolas influyen sustancialmente en los niveles de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y bacterias que entran en un cuerpo de agua. La minería incrementa la concentración de metales en el agua, así como la acidez de la misma (por el drenaje ácido de las minas). El efecto de las descargas de aguas negras y residuos industriales en la calidad del agua puede ser grave, en particular por lo que toca al contenido orgánico.

### 9.5.2 Comunidades bióticas

Los organismos que viven suspendidos en la columna de agua se llaman **plancton**. En aguas que se mueven velozmente éstos no tienen tiempo para formar poblaciones significativas, pero en las pendientes más bajas y suaves de la cuenca, a medida que el flujo disminuye y el volumen y profundidad del agua aumentan, comienzan a crecer poblaciones vegetales y animales características que se designan como **fitoplancton** y **zooplancton**, respectivamente. El fitoplancton es un grupo variado de algas verdes microscópicas que pertenecen a una docena de grupos diferentes, predominando las algas verdes unicelulares. Las desmidiáceas y las algas azules forman poblaciones enormes en condiciones favorables y causan **floraciones algáceas** que colorean el agua y producen olores y sabores característicos difíciles de eliminar en las plantas de purificación. El número de células puede llegar hasta  $8 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$ . Entre los otros grupos están las bellamente esculpidas células de las diatomeas con sus esqueletos de si-

licio, las algas verde amarillentas, las euglenoides y los dinoflagelados (véase la sección 8.2.4). En aguas marinas las algas pardas y rojas son de gran importancia, pero en aguas dulces tienen muy pocos representantes. En la figura 9-8 se muestran algunos ejemplos de fitoplancton de agua dulce.

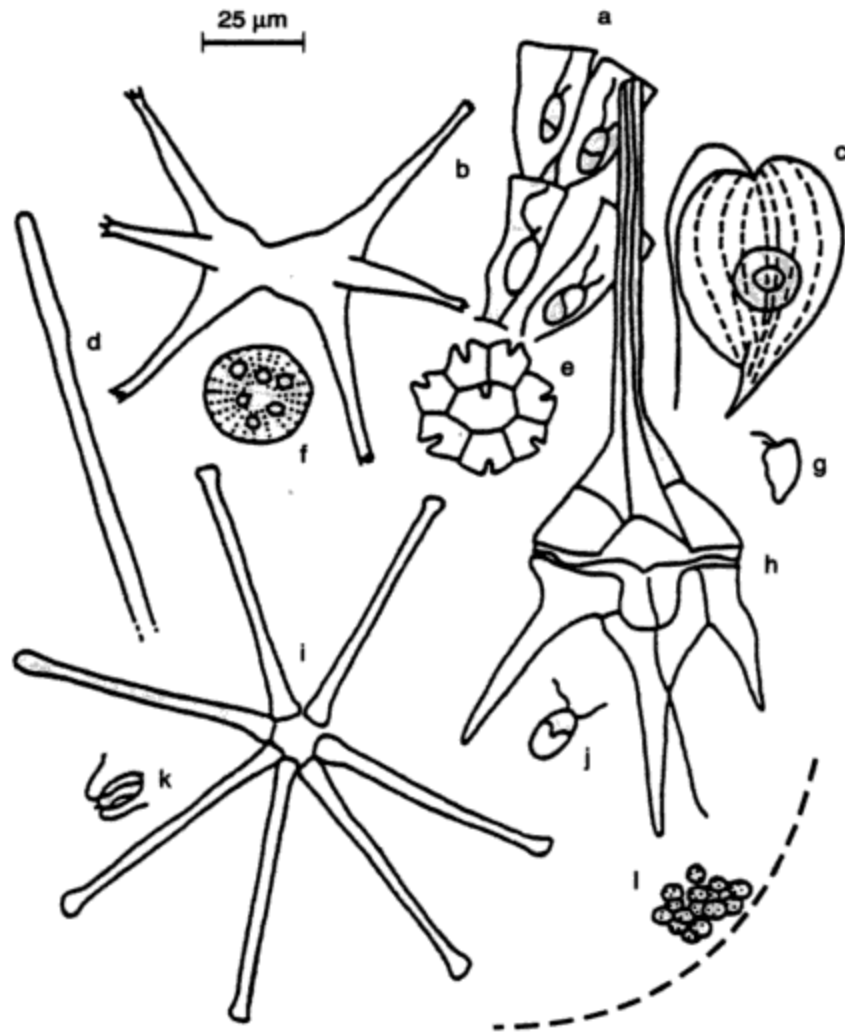
En agua dulce, el zooplancton principalmente incluye pequeños crustáceos (de la familia del cangrejo y el camarón) y rotíferos. Muchos de éstos filtran grandes volúmenes de agua cada día, de los cuales extraen fitoplancton y zooplancton más pequeño (protozoarios) así como bacterias y materia orgánica muerta. Otros son carnívoros más activos que buscan presas y las sujetan, muerden y desgarran. El zooplancton varía de tamaño desde alrededor de 70 hasta 3,000  $\mu\text{m}$ . Algunas especies tienen mecanismos de flotación específicos en los que intervienen gotas de aceite o vejigas de aire. Casi todas son muy móviles y poseen grupos de cilios (estructuras vellosas) o flagelos (estructuras pequeñas que parecen látigos), o, en las formas más grandes, patas natatorias. Estos organismos son capaces de perseguir a su presa y cambiar de posición en la columna de agua para incrementar al máximo sus terrenos de alimentación o para evitar a los depredadores. Algunos muestran notables migraciones diurnas de varios metros diarios, alimentándose de noche en las aguas superiores y hundiéndose a las profundidades más oscuras en el día. Ciertas larvas de insectos y crías de peces forman parte de este mundo flotante y se alimentan de fitoplancton y zooplancton. A su vez, pueden unirse al ecosistema peces, reptiles, aves y mamíferos comedores de peces.

A medida que el flujo de agua decae en las partes bajas del área de captación, es posible que se depositen sedimentos en el fondo, los cuales proporcionan un medio en donde pueden arraigarse plantas acuáticas más grandes (**macrófitos**) y un hábitat para invertebrados bentónicos (que viven en el fondo) que habitan en el lodo (figura 9-9). Estos últimos perforan el rico depósito de sedimentos, arcilla y materia orgánica, y se alimentan de la nueva provisión de alimentos en la superficie del lodo. Los gusanos oligoquetos (la familia de las lombrices de tierra) acuáticos, los quironómidos (larvas de jejenes) y moluscos bivalvos como mejillones y almejas de agua dulce viven en estos lodos bentónicos. Del agua emergen lechos de juncos que, junto con los macrófitos sumergidos, suministran un hábitat físico para una gran diversidad de invertebrados y peces, y una reserva de alimento para aves acuáticas, algas y bacterias.

En el caso de un río, a medida que éste aumenta de tamaño y el flujo decae aún más, se asemeja a un lago poco profundo en cuanto a su biota. Las partículas de arena, sedimentos y arcilla se acumulan; en especial los dos últimos se hunden con gran lentitud en el agua. También se acumulan de manera estacional las células muertas de algas y zooplancton junto con el polen que trae la lluvia primaveral y las heces de miríadas de zooplancton y peces de las aguas superiores. Los bajos niveles de oxígeno reducen la rapidez de descomposición de este material orgánico. En estas condiciones anóxicas se pueden formar precipitados de hierro, manganeso y fosfatos, los cuales se incorporan en los sedimentos. Los nutrientes que se agregan a las capas superiores de sedimentos se pueden liberar de nuevo hacia la columna de agua y suministrar parte de la abundancia primaveral de fósforo disponible, como se explicó en la sección 9.4. Una vez que los nutrientes están sepultados bajo unos pocos milímetros de sedimento, quedan aislados y en efecto perdidos para la columna de agua y su biota.

### 9.5.3 Luz en los lagos

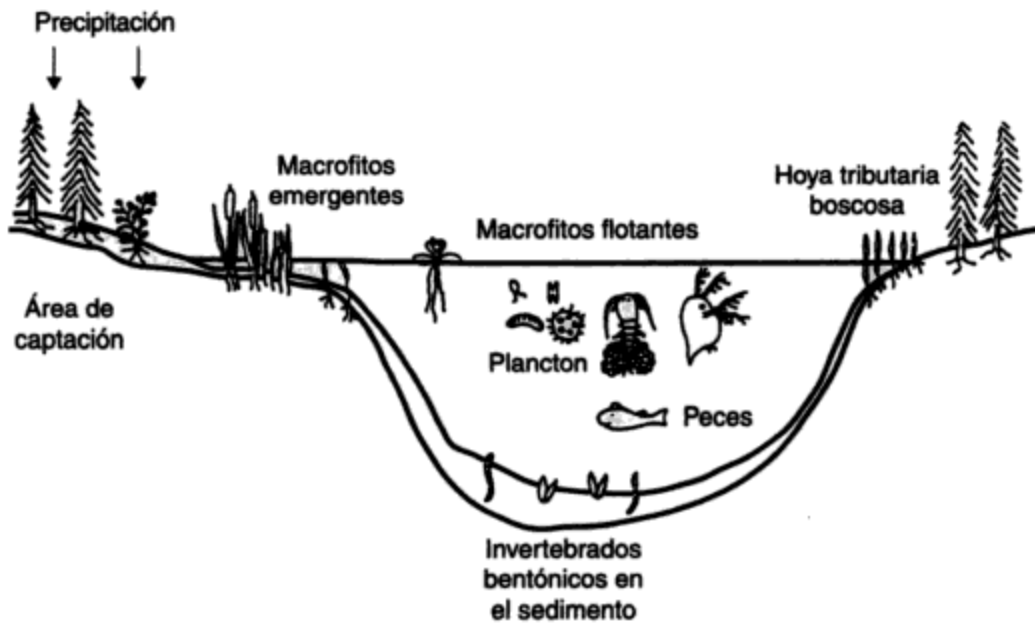
La cantidad de luz disponible a diferentes profundidades en los lagos (o en los ríos muy grandes) es importante para la ecología del lago. El agua misma, las sustancias disueltas y la



Cianofitos (algas azules) - (d) *Oscillatoria*, (i) *Microcystis*;  
 Crisofitos (algas amarillo-verdosas o doradas) - (a) *Dinobryon*;  
 Clorofitos (algas verdes) - (e) *Pediastrum*, (b) *Staurostrum* (miembro de un grupo llamado desmidiáceas, ahora situado estrictamente en los carofitos), (j) *Chlamydomonas*;  
 Bacilariofitos (diatomeas) - (f) *Cyclotella*, (l) *Asterionella*;  
 Euglenofitos (euglenoides) - *Phacus*;  
 Criptofitos (criptomónadas) - (g) *Rhodomonas*;  
 Pirrofitos (dinoflagelados) - (h) *Ceratium*;  
 Haptofitos - (k) *Prymnesium*;  
*Microcystis* (i) es un alga muy grande, de la cual un diagrama de la colonia entera ocuparía toda esta página. Se muestran sólo unas pocas células.

**Figura 9-8** Algunas algas de fitoplancton típicas de aguas dulces, dibujadas a escala (1 cm = 25 µm). Fuente: Moss (1980). Véase en la tabla 8-2 un sistema de clasificación simplificado.



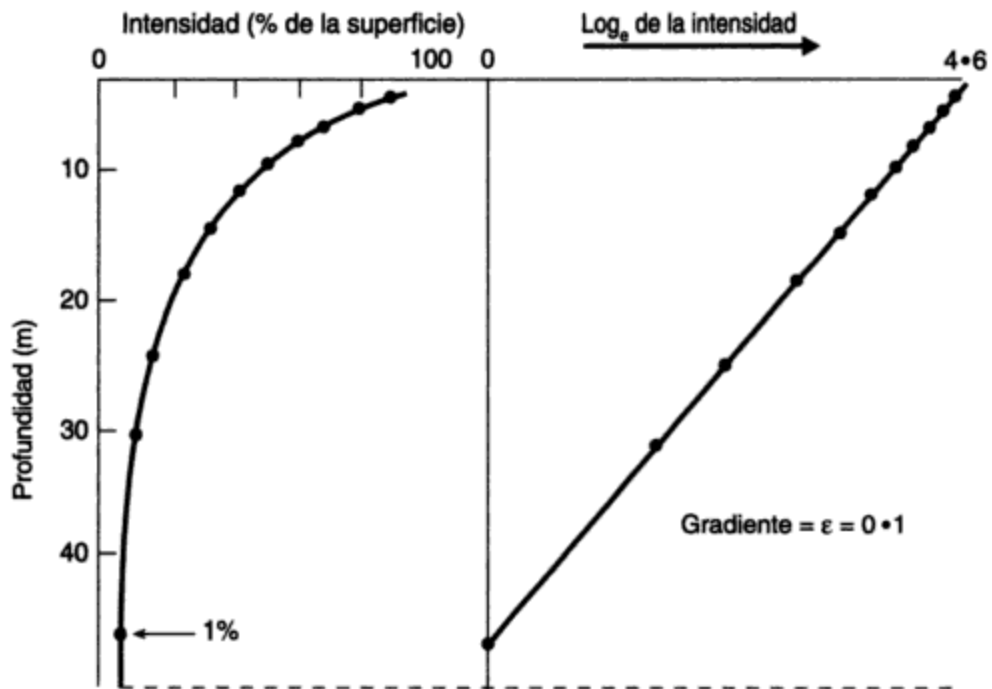


**Figura 9-9** Diagrama de un lago (o río grande), con biota en las aguas poco profundas, en los lodos bentónicos y en la columna de agua (no se ha dibujado a escala).

materia particulada absorben luz visible. Las longitudes de onda más altas y más bajas (rojos y azules) se absorben mejor, de modo que, por debajo de unos pocos metros de profundidad, la luz se compone principalmente de las longitudes de onda verdes y amarillas. Los materiales orgánicos absorben con gran eficacia la luz roja y azul. En cada incremento sucesivo de profundidad del agua, la luz de una longitud de onda determinada se reduce en una proporción fija (figura 9-10). En teoría, la luz nunca se extingue de manera total, pero antes de que alcance niveles visualmente indetectables decae hasta alrededor del 1% de la intensidad en la superficie. Esto tiene un significado convencional porque describe de manera aproximada el nivel en donde la fotosíntesis algácea se reduce hasta el punto de que apenas iguala la respiración. A esto se le llama el **punto de compensación**. Abajo de él no puede haber crecimiento de algas, y arriba está la **zona eufótica**, en la cual las células de fitoplancton prosperan. En ocasiones el fondo de un lago está en la zona eufótica, en cuyo caso lo cubren juncos acuáticos arraigados. En los lagos muy transparentes esto puede corresponder a una gran profundidad (de 20 a 50 m), con un máximo teórico de alrededor de 200 m. En la mayor parte de los cuerpos de agua del planeta, la productividad primaria está confinada a menos de la mitad de la masa de agua, y en ciertos lagos más profundos la zona eufótica puede ser una delgada capa superficial bajo la cual yace un enorme mundo oscuro. Este mundo no carece de vida pues lo habitan, o penetran en él por periodos breves, zooplancton, bacterias, hongos, peces e invertebrados.

#### 9.5.4 Temperatura y estratificación vertical de los lagos

En las corrientes de flujo turbulento, en las cuales las aguas se mezclan de manera continua, no se crean gradientes de temperatura en los meses de verano. En los ríos profundos de movi-



**Figura 9-10** Absorción de luz en una columna de agua uniforme. Fuente: Moss (1980).

El panel de la izquierda muestra la intensidad de la luz como un porcentaje de la que se observa en la superficie (después de descontar las pérdidas por reflexión). El panel de la derecha muestra los mismos datos con las intensidades de luz como logaritmos naturales. El gradiente es el coeficiente de extinción.

miento lento, y en especial en los lagos, el agua de la superficie en el verano tiende a calentarse con mayor rapidez que el agua que está abajo de ella. Cuando los vientos y las corrientes son insuficientes para mezclar de arriba hacia abajo las aguas del lago, lo cual es común en los cuerpos de agua más profundos, se crea un marcado gradiente de temperatura. La radiación térmica se absorbe en muy alta proporción en los 1 o 2 metros superiores de agua. Esta capa más cálida se llama **epilimnio**, y la capa inferior más densa y fría que llega hasta el fondo del lago es el **hipolimnio** (figura 9-11). Entre ambas se encuentra una capa de transición llamada **metalimnio**. En esta zona de transición, la temperatura varía con gran rapidez en un cambio corto de profundidad. La presencia de este rápido cambio vertical de temperatura con formación de estratificación se conoce como **termoclinal**.

La estratificación térmica y el mezclado estacional afectan de manera directa la productividad de un lago. Los lagos de la zona templada se estratifican térmicamente durante el invierno y el verano (figura 9-11) y circulan en primavera y otoño. En el invierno la superficie está cubierta por hielo a cerca de 0°C, en tanto que el agua más densa a 4°C (con más precisión, 3.94°C, temperatura a la cual la densidad del agua es máxima) se hunde hacia el fondo. La baja temperatura y la reducida penetración de la luz inhiben la productividad biológica. Durante el verano, a medida que las aguas superficiales se calientan y los vientos primaverales se calman, se forma una capa de agua superficial menos densa. Este epilimnio se mezcla de manera continua durante el verano y favorece el crecimiento del fitoplancton.

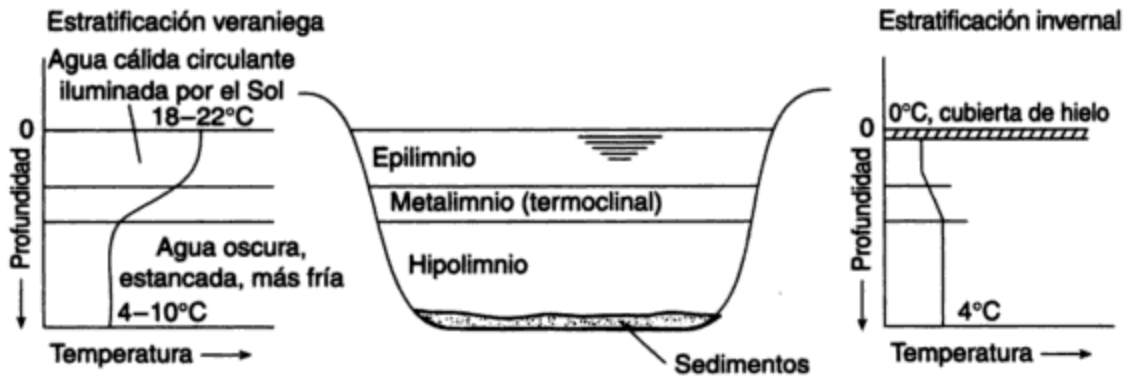


Figura 9-11 Estratificación térmica de un lago profundo.

La estratificación térmica también influye en la calidad del agua. El epilimnio sustenta un abundante crecimiento de algas mientras que el contenido de oxígeno disuelto del hipolimnio de los lagos eutróficos disminuye. Como resultado de la anaerobiosis los sedimentos del fondo pueden desprender ácido sulfídrico, compuestos orgánicos odoríferos y hierro reducido. Durante la estratificación térmica el agua aprovisionada de gran calidad se encuentra exactamente debajo de la termoclinal.

## 9.6 EUTROFICACIÓN

### 9.6.1 El problema

La palabra **eutroficación** procede de dos palabras griegas: *eu*, que significa “bueno” o “bien”, y *trophos*, “alimento”; así pues, **eutrófico** se puede traducir como “rico en nutrientes (alimentos)”. Todos los lagos experimentan un enriquecimiento natural con el paso del tiempo. Se acarrean sedimentos hacia ellos desde la hoya tributaria circundante y se extraen de los mismos los nutrientes solubles. Esta **eutroficación natural** es, desde el punto de vista humano, un proceso lento pues suele verificarse a lo largo de miles de años. La descarga de aguas negras no tratadas y de residuos agrícolas o industriales apresura el proceso en alto grado, lo cual suele describirse como una **eutroficación cultural**. Los lagos en los que el nivel de nutrientes es particularmente alto, se caracterizan por abundante vegetación litoral (que habita en la costa), frecuente estancamiento veraniego con floraciones algáceas y ausencia de peces de aguas frías; se describen como **eutróficos** y el lago Erie es de este tipo. Los lagos con bajos niveles de nutrientes se designan como **oligotróficos** (*oligo* significa “pequeño” o “con deficiencia de”); el lago Superior es uno de ellos. Los lagos con niveles intermedios de nutrientes se llaman **mesotróficos**.

La **eutroficación** es el proceso natural de enriquecimiento de nutrientes que se lleva a cabo en un cuerpo de agua. El crecimiento biológico resultante, principalmente de algas, muere en el epilimnio y se sedimenta al pasar al hipolimnio, en donde se descompone y agota el oxígeno del agua.

La eutroficación es uno de los problemas de calidad del agua más significativos y de alcance mundial. Los problemas más importantes que origina la eutroficación excesiva son:

- El efecto perjudicial en la industria de la pesca comercial y deportiva debido a cambios en las especies de peces presentes en los lagos, cuya causa principal son los bajos niveles de oxígeno de las aguas inferiores.
- El efecto en la recreación y el turismo debido al crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas que vuelven el agua y las playas no idóneas para fines recreativos. Las algas filamentosas se depositan en las playas durante las tormentas y dejan montones de materia orgánica maloliente y en descomposición.
- Abundantes floraciones algáceas que confieren a las fuentes de abastecimiento de agua un sabor y olor desagradable y obstruyen las tomas y los filtros de las plantas de tratamiento.

Así pues, es preferible un lago biológicamente pobre a uno fértil desde el punto de vista del uso del agua y la recreación. Esto parece una paradoja, puesto que en ciertas partes de la biosfera estamos haciendo todo lo posible por aumentar la fertilidad a fin de producir más alimentos, en tanto que en otras, procuramos impedir la fertilidad a toda costa. En el caso de la tierra, producir más alimentos en función de una mayor fertilidad no daña el suelo. En cambio, la fertilización excesiva de los lagos y las algas resultantes deteriora, en las primeras etapas, la calidad de los peces que estamos intentando producir y, con el tiempo y en casos extremos, destruir toda la vida acuática.

### 9.6.2 Cambios fisicoquímicos y biológicos

La importancia del fósforo y del nitrógeno en el proceso de eutroficación no se reconoció de manera generalizada hasta principios de la década de 1960. Por consiguiente, existe relativamente poca información de largo plazo que pueda ser disponible sobre los lagos en relación con estos dos elementos. Se han documentado los cambios en la composición química a lo largo de un periodo grande, pero no necesariamente para estos elementos de importancia tan crítica. La figura 9-12 proporciona información acerca de diversos cambios químicos en el lago Erie a lo largo de un periodo de 70 años.

Se han llevado a cabo trabajos pioneros en varios lagos de Wisconsin para establecer los niveles de concentración de fósforo y nitrógeno abajo de los cuales no es probable que ocurra un crecimiento perjudicial. Los límites superiores de concentración de 0.3 mg/L de nitrógeno inorgánico y de 0.02 mg/L de fósforo como ortofosfato en el momento de la rotación primaveral del lago se consideraron apropiados en esa época, pero ahora se ha encontrado que valores entre un tercio y la mitad de los anteriores estimulan el crecimiento algáceo cuando están disponibles todos los demás nutrientes (véase la sección 12.3.1).

Los niveles de nutrientes en aumento en un lago cambian el número y tipo de biota presente en el mismo. Los lagos oligotróficos normalmente tienen agua transparente y contienen poca biomasa. La productividad anual también es baja. Al mismo tiempo, contienen una gran diversidad de especies de plantas y animales. A medida que se produce el enriquecimiento de nutrientes, la tendencia es hacia más biomasa, una mayor tasa de producción y reducciones o cambios en la diversidad de las especies. Se producen grandes incrementos en la producción de algas, y en su momento las algas y el zooplancton bentónicos aumentan. La composición del plancton puede

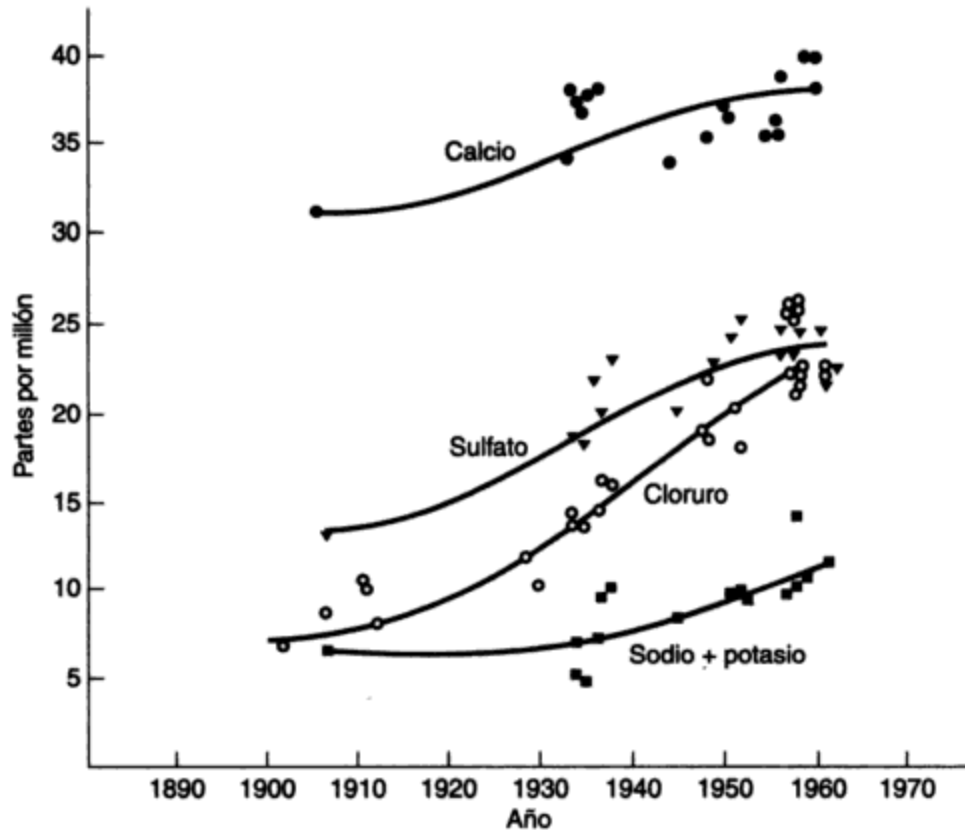


Figura 9-12 Cambios químicos en el lago Erie, 1890-1960. Fuente: Beeton (1965).

cambiar, del número inicialmente exiguo de diatomeas a un crecimiento denso de desmidiáceas, el cual reduce la penetración de la luz. Por último, las algas verdes llegan a dominar la columna de agua. Durante estas floraciones algáceas la densidad celular puede llegar a ser de 10,000 a 100,000 células por mililitro.

Conforme algunas algas mueren, ya sea por agotamiento de ciertos nutrientes indispensables o por otras razones, se convierten en alimento para las bacterias. La descomposición bacteriana de las algas y las bacterias muertas consumen el oxígeno disuelto y dejan el agua bajo la superficie enlamada con deficiencia de oxígeno, por tanto también la dejan incapaz de sustentar las especies a las que más valor da la gente. La trucha y la lobina son reemplazadas por peces corrientes como rémoras, carpa, rueda, perca amarilla y eperlano. Este último grupo es mucho menos valioso para la pesca comercial y deportiva, y por ello causa una pérdida económica para quienes viven de eso.

### 9.6.3 Control de la eutroficación

Se ha demostrado en el lago Washington de Seattle que la eutroficación cultural se puede revertir si se reduce de manera sustancial la afluencia de nutrientes. Antes de adoptar medidas correctivas, es indispensable hacer un reconocimiento cuantitativo de las fuentes de nitrógeno y fósforo, así como estudios limnológicos para establecer sus niveles tróficos y determinar si la mayoría de sus nutrientes proceden de fuentes puntuales o difusas. Las fuentes puntuales, como las descargas de aguas residuales municipales, se pueden controlar por eliminación en tierra, desviación alrededor del lago o eliminación de nutrientes de las aguas residuales antes

de su descarga en aguas de superficie. Las cargas de fuentes no puntuales, como el desagüe agrícola, se reducen a través de técnicas de administración de la tierra que impiden la erosión del suelo y evitan el uso excesivo de fertilizantes. Puesto que los métodos de tratamiento convencionales reducen el fósforo en menos del 20% y el nitrógeno en aproximadamente el 30%, puede ser necesaria una eliminación complementaria en la planta para proteger las aguas receptoras. El agua residual típica tratada biológicamente contiene alrededor de 8 mg/L de fósforo y 30 mg/L de nitrógeno (véase la tabla 12-1). Por lo común se pone énfasis en la eliminación del fósforo porque se considera que el fosfato es el factor que controla el enriquecimiento en la mayor parte de los lagos.

Es posible utilizar varios controles temporales para detener o reducir los efectos perjudiciales en los lagos y embalses eutróficos. El control químico por aplicación de sulfato de cobre, un algicida, es eficaz durante un corto tiempo. La recolección de hierbas acuáticas es factible en áreas cercanas a la costa (por ejemplo, el sistema del canal de Trent y los lagos Kawartha en Ontario). Donde el agotamiento del oxígeno constituye un problema serio, la aireación y mezclado mecánicos pueden ser de utilidad. Estos métodos se deben considerar sólo como medidas provisionales, puesto que no controlan la entrada sino aminoran sus consecuencias.

#### 9.6.4 Estudio de caso: Los Grandes Lagos

El sistema de los Grandes Lagos (figura 9-13) es un buen ejemplo de cooperación internacional entre Estados Unidos y Canadá para impedir el deterioro ulterior de la calidad del agua y, si es posible, revertir la tendencia de eutroficación. El grave deterioro de los muy extensos Grandes Lagos inferiores es un claro recordatorio del daño involuntario que una gran población industrializada puede causar a la calidad del agua en un breve periodo, y del enorme y costoso esfuerzo que se necesita para revertir esta tendencia. Los Grandes Lagos, con un litoral de 10,500 km, un área de 248,000 km<sup>2</sup> y un volumen de 25,000 km<sup>3</sup>, contienen el 95% de la provisión de agua de superficie de Estados Unidos y casi el 20% de la provisión mundial (WEF 1993). Más de 40 millones de personas viven en su cuenca y hoyas tributarias, y descargan sus residuos y subproductos industriales en los Grandes Lagos. Los efectos relativos en los lagos están determinados en una medida muy considerable por la población humana a lo largo del litoral y las dimensiones del lago. En la tabla 9-5 se proporcionan algunos de los datos morfométricos.

**TABLA 9-5 DATOS MORFOMÉTRICOS PARA LOS GRANDES LAGOS DEL SAN LORENZO**

Lago	Área (km <sup>2</sup> )	Profundidad máxima (m)	Profundidad media (m)	Volumen (km <sup>3</sup> )	Ribera (km)	Tiempo de residencia hidráulica (años)
Superior	83,300	397	145	12,000	3,000	190
Hurón	59,510	223	76	4,600	2,700	40
Michigan	57,850	265	99	5,760	2,210	36.5
Erie	28,280	60	21	540	1,200	3
Ontario	18,760	225	91	1,720	1,380	8

Fuente: Datos deducidos de Hutchinson (1957).

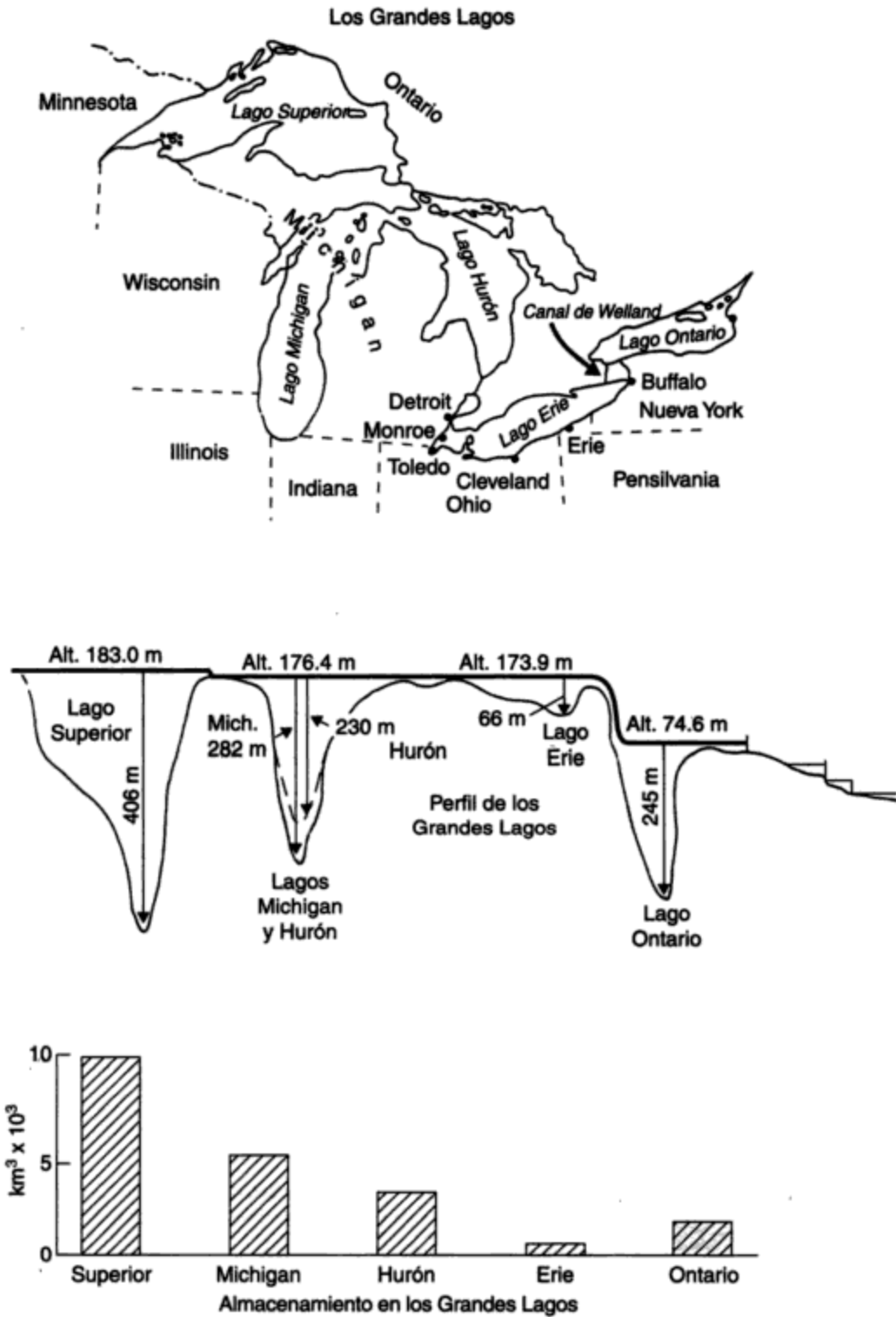


Figura 9-13 Los Grandes Lagos. Fuente: U.S. Department of the Interior (1968).

El lago Superior es, con mucho, el más grande y menos contaminado de los Grandes Lagos y tiene la densidad de población más pequeña en su hoya tributaria. Además, se calcula que se necesitan más de 190 años para reemplazar totalmente su agua. El lago Erie, en cambio, es mucho más pequeño y poco profundo, con una población estimada de 15 millones en su cuenca colectora. El reemplazo del agua es mucho más rápido que en los otros Grandes Lagos, de modo que los beneficios de una reducción en la contaminación que entra en él se manifestarían más pronto. Sin embargo, es importante reconocer que si el problema de contaminación está asociado con los sedimentos más que con la columna de agua misma, se trata de una característica permanente. En los lagos Erie, Michigan y Ontario la presencia de mercurio, PCB y dioxinas tiene una relación sustancial con los sedimentos que se encuentran inmediatamente corriente abajo de las descargas industriales específicas.

El desagüe agrícola hacia los lagos afecta la calidad de los lagos Michigan, Erie y Ontario, y ha sido un factor importante en los problemas de algas de los dos primeros, en donde tanto fósforo como nitrógeno han estado entrando en las aguas del lago procedentes de las granjas de la hoya tributaria. Los problemas de mayores concentraciones de sales, como los cloruros que se emplean para salar los caminos en el invierno (por ejemplo, en los lagos Erie y Ontario), y los sulfatos de industrias importantes son motivo de creciente preocupación.

El uso de los lagos para natación, paseos en bote, pesca y otros deportes acuáticos, así como para la construcción de casas de campo es muy importante para el público. Por desgracia, muchas playas, en especial en los alrededores de Cleveland y Detroit, están muy contaminadas, y las playas de Toronto han sido señaladas como peligrosas para nadar desde 1983, lo cual ha sido motivo de fuertes protestas públicas. El cierre de playas se asocia con recuentos bacterianos excesivos de coliformes fecales, los cuales indican niveles potencialmente peligrosos de bacterias patógenas.

Los Grandes Lagos proveen vitales rutas de navegación hacia y desde los principales centros de comercio. Esto ha sido un factor fundamental en el florecimiento de ciudades y pueblos alrededor de los Grandes Lagos, y ha estimulado el desarrollo del canal de Welland y más tarde del sistema St. Lawrence Seaway, los cuales a su vez han motivado el comercio internacional.

Los Grandes Lagos y los ríos que desaguan en ellos se han usado en muchos casos como tiraderos de residuos de la industria y de poblaciones urbanas. La demanda de agua para satisfacer las necesidades domésticas e industriales ha aumentado de manera considerable. Las plantas de energía eléctrica, en especial las nucleares, crean enormes demandas de un suministro constante de agua de enfriamiento. Ciertos materiales indeseables que se han vertido en el pasado han creado en efecto peligros de incendio y para la navegación. De hecho, algunos de los ríos que desaguan en el lago Erie oficialmente han sido declarados con riesgo de incendiarse. El río Cuyahoga se incendió en 1969, y el Buffalo ha tenido al menos tres incendios debido a descargas de hidrocarburos desde entonces. La figura 9-14 muestra los aumentos que se han producido en una amplia gama de elementos en cada uno de los Grandes Lagos desde aproximadamente 1900 (Beeton, 1965).

La decadencia de la industria pesquera comercial a lo largo de los últimos 30 años ha sido muy notable en toda la región inferior de los Grandes Lagos. Cuando el Canal de Welland abrió la zona a los buques al proporcionar un desvío en torno a las cataratas del Niágara, también abrió un camino para que la lamprea de mar entrara en los Grandes Lagos desde el Atlántico. La lamprea es un pez parásito que se adhiere al cuerpo de la trucha lacustre y a otros peces, entre ellos salmón, leucisco, lucio azul y rémoras. Este pez hace agujeros en las infortunadas



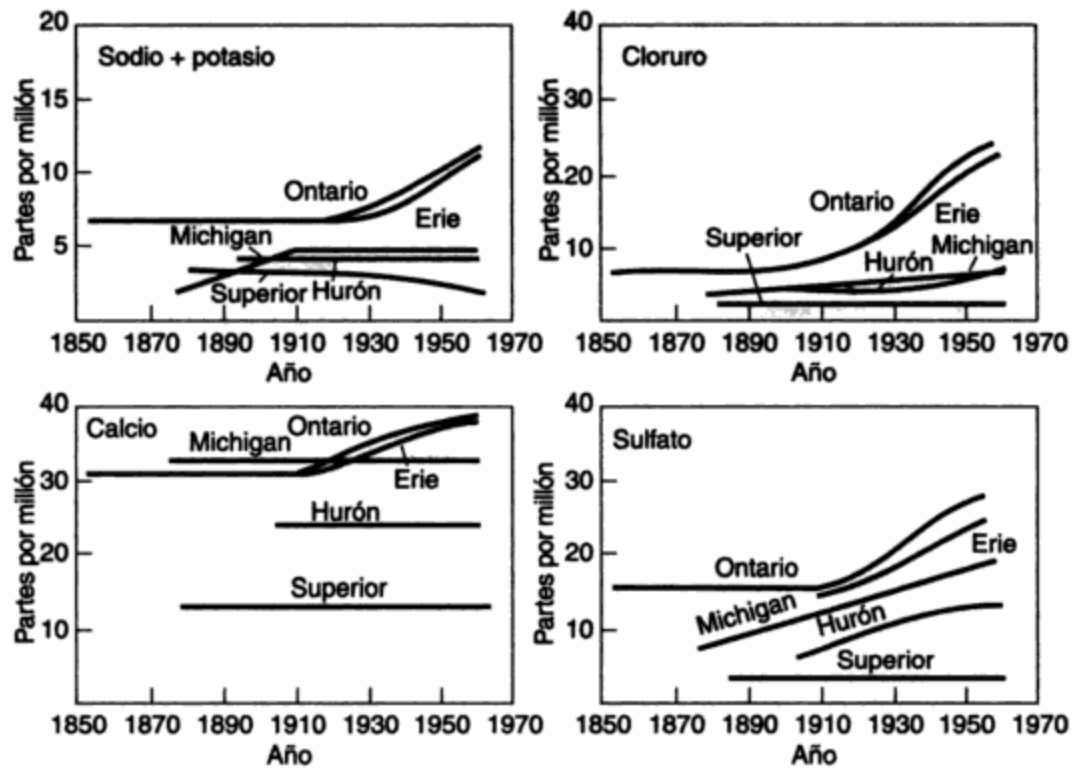
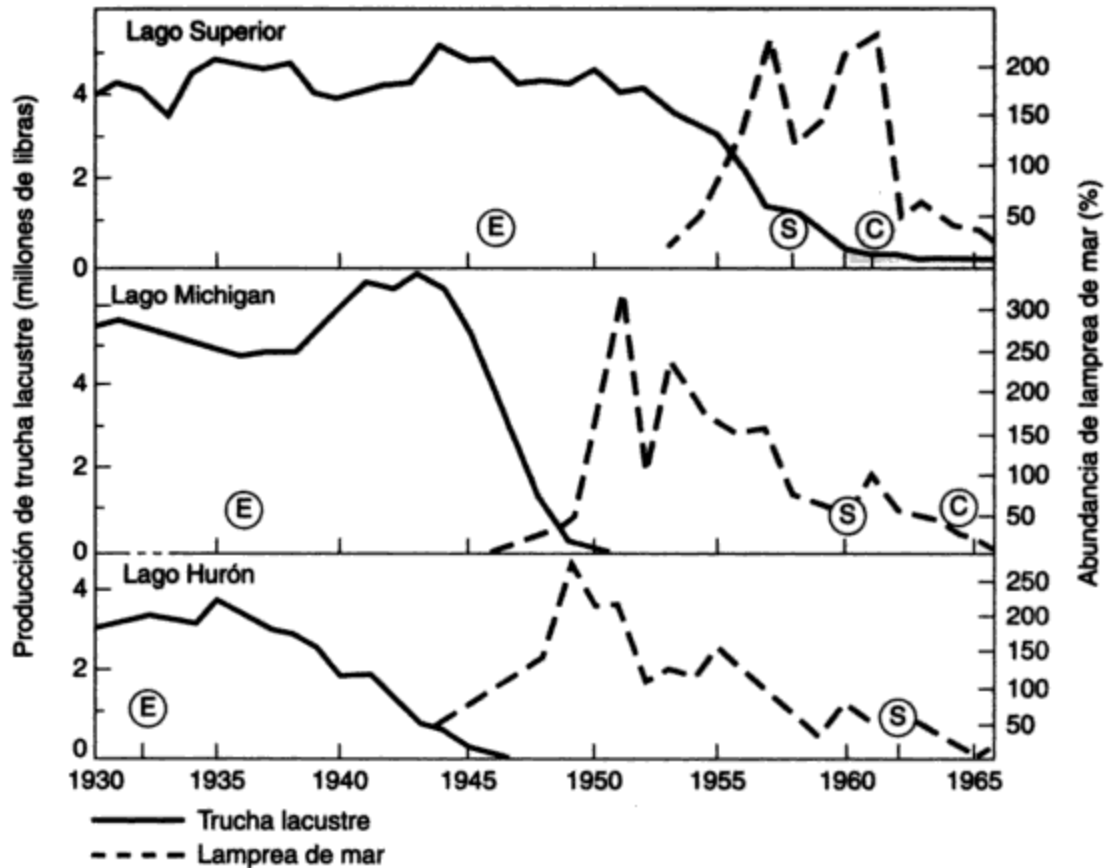


Figura 9-14 Cambios en las características de las aguas de los Grandes Lagos.

Datos del lago Erie, 1958; lago Hurón, 1956; Lago Michigan, 1954, 1955, 1966; lago Ontario, 1961; lago Superior, 1952, 1953, 1961, 1962 del Laboratorio Biológico de Ann Arbor, U.S. Bureau of Commercial Fisheries. Todos los lagos, Great Lakes Water Quality Board (1982).

víctimas y chupa sus fluidos corporales, hasta finalmente provocarles la muerte. Su entrada en los Grandes Lagos ha sido un desastre que en realidad nadie habría podido prever. En los lagos Superior, Michigan y Hurón la lamprea ha eliminado casi por completo las poblaciones de trucha lacustre (figura 9-15). El arenque estadounidense es un pez pequeño que también ha invadido los lagos a través del canal y se ha convertido en un problema, pues se alimenta de los huevecillos de otros peces y compite con sus crías por el alimento. El arenque estadounidense no era un problema hasta que la lamprea de mar eliminó los peces más grandes para los cuales constituía su presa natural. Beeton (1965) proporciona un recuento detallado de los muchos cambios asociados que se han producido en la biota, en especial los cambios en el fitoplancton, la propagación de algas perjudiciales como las *Cladophora*, y la disminución en la cantidad de muchas larvas de insectos que necesitan aguas limpias y bien oxigenadas para sobrevivir. Desde principios de la década de 1990 los graves problemas que han surgido a raíz de la invasión de los Grandes Lagos por mejillones cebra, en especial su adhesión a las tomas de agua y la restricción de las mismas, se han convertido en motivo de creciente preocupación.

Aunque en lo que se acaba de exponer el énfasis está en la tierra y el agua como fuentes de nutrientes, es importante darse cuenta que la sedimentación atmosférica es un contribuyente significativo de fósforo y nitrógeno para los Grandes Lagos. Más del 30% de la carga de fósforo en el lago Michigan, por ejemplo, procede de la atmósfera.



**Figura 9-15** Producción de trucha lacustre y abundancia de la lamprea de mar en los lagos Superior, Michigan y Hurón. Fuente: Smith (1971). Reproducido con autorización del *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 25 (4) (1968): 667-693.

(E) señala el primer registro de lamprea de mar, (S) es el inicio del control químico, y (C) es la conclusión de la serie inicial de tratamientos químicos.

Por último, es necesario subrayar que fue en gran medida a causa de las protestas públicas en la región de los Grandes Lagos acerca del estado contaminado y eutrófico de los lagos Erie, Michigan y Ontario, que se introdujo en Canadá la prohibición del fósforo en los detergentes a principios de la década de 1970. Esto, aunado al tratamiento obligatorio de las aguas residuales, ha conseguido una mejoría significativa de la calidad del agua de los Grandes Lagos inferiores. El lago Erie, en particular, está recuperando la salud.

### 9.6.5 Un nuevo desafío: los estuarios costeros

Las mejoras a los Grandes Lagos no han sido igualadas en los estuarios costeros y bahías de Estados Unidos, la mayor parte de los cuales sufren una creciente carga de nutrientes. Algunos ejemplos entre los 127 estuarios de Estados Unidos han sido descritos por Cone (1994).

- **Bahía de Peconic** (en el extremo oriental de Long Island). Las floraciones de color café que han aparecido todos los veranos desde 1980 han eliminado, de manera indirecta, las vieiras de la bahía. Se sospecha que la causa son las plantas de aguas negras de la ciudad de Nueva York.

- *Cayos de Florida*. Los lechos de coral están muriendo y la industria del camarón se ha venido abajo como consecuencia del exceso de nutrientes.
- *Bahía de Chesapeake*. En el estuario más grande de Estados Unidos (drena una cuarta parte del litoral oriental) la industria de las ostras ha decaído un 90% desde 1960 a causa de la acumulación de nutrientes, pesca excesiva y enfermedades.
- *Bahía de Waquoit* (cerca de Cape Cod, Massachusetts). La bahía está cubierta por una espesa capa de algas, y las ostras y vieiras que alguna vez fueron abundantes están desapareciendo.

Las fuentes de contaminación con nutrientes son diversas, e incluyen las siguientes:

- Plantas de aguas negras que carecen de medios para eliminación de nutrientes
- Desagüe agrícola de terrenos fertilizados en exceso
- Emisiones vehiculares que aportan óxidos de nitrógeno a la atmósfera

Es evidente la necesidad que existe de fortalecer en Estados Unidos la *Clean Water Act* (Ley para el agua limpia) para corregir el problema de sobrecarga de nutrientes. Sin embargo, la legislación es sólo una parte de la solución, y las consideraciones financieras serán el principal obstáculo para las medidas de limpieza eficaces, a menos que "alguien más" pague.

## PROBLEMAS

- 9.1. Cite tres ejemplos de ecosistemas grandes diversificados y señale los factores que amenazan su existencia.
- 9.2. Defina los términos siguientes, empleando ejemplos cuando sea necesario:
  - (a) Autótrofo y heterótrofo
  - (b) Productor primario
  - (c) Nivel trófico
  - (d) Bioacumulación en cadenas alimenticias
  - (e) Desnitrificación
- 9.3. Las tasas de productividad anual difieren de forma muy amplia entre los distintos ecosistemas. Comente acerca de esto y especule respecto a los principales factores climáticos que controlan estas diferencias.
- 9.4. El flujo de energía dentro de un ecosistema es unidireccional y depende de una aportación solar continua, en tanto que el flujo de nutrientes es cíclico. Comente acerca de esto y explique cómo es que crea restricciones.
- 9.5. Se ha dicho que la eficiencia relativa de utilización de energía en los animales es mayor que en las plantas. ¿Es verdad esto? ¿Cuáles son los factores fundamentales subyacentes a esta situación?
- 9.6. El uso respiratorio de la energía en diferentes niveles tróficos de distintos ecosistemas varía en alto grado. Analice esta afirmación usando los datos proporcionados para el lago Cedar Bog, así como para un campo de maíz y una marisma salada.
- 9.7. Describa el reciclaje del nitrógeno en los ecosistemas y su papel en el abastecimiento de nitrógeno para las plantas superiores.
- 9.8. Dibuje un ciclo de nutriente simplificado para:

- (a) Carbono: mostrando la oxidación, la descomposición y la fotosíntesis como se llevan a cabo en el suelo de los bosques
  - (b) Fósforo: indicando los procesos entre el fósforo particulado y el disuelto como se verifican en los lagos
  - (c) Nitrógeno: mostrando la nitrificación, la desnitrificación, la asimilación y la desaminación, así como los compuestos que se forman en cada etapa, según se llevan a cabo en los terrenos agrícolas
- 9.9. ¿Cuál es el significado de los siguientes términos?
- (a) Cuenca colectora
  - (b) Macrofitos
  - (c) Zooplancton
  - (d) Floraciones algáceas
  - (e) Organismos bentónicos
  - (f) Zona eufótica
  - (g) Oligotrófico
  - (h) Termoclinal
  - (i) Hipolimnio
- 9.10. Describa la formación de una termoclinal en lagos de diferente latitud y cómo varía en cuanto a persistencia.
- 9.11. Explique cómo se produce la estratificación térmica y el mezclado estacional, por qué estos fenómenos son importantes para las consideraciones de calidad del agua, y a qué nivel se debe situar una toma de un sistema de abastecimiento de agua.
- 9.12. ¿Por qué es importante la temperatura de 3.94°C para entender los cambios estacionales en los lagos?
- 9.13. Se ha demostrado que el fósforo tiene una rotación muy rápida en los lagos. ¿En qué sentido es esto pertinente para los problemas potenciales en relación con la eutroficación y las floraciones algáceas?
- 9.14. La eutroficación se ha convertido en un problema muy serio en muchos lagos de Europa, Estados Unidos y Canadá. ¿Qué es, por qué se considera un problema, y cómo se puede resolver?
- 9.15. Los Grandes Lagos inferiores han experimentado en los últimos 60 años profundos cambios en sus pesquerías. ¿Cuáles son estos cambios y por qué se han producido?

## REFERENCIAS

- BEETON, A. M. "Eutrophication of the St. Lawrence Great Lakes". *Limnology and Oceanography* 10 (1965): 240-254.
- CONE, M. "Algae Blooms Bursting Out All Over". *Los Angeles Times*, como se informó en el *Toronto Star*, 28 de mayo de 1994.
- GATES, D. M. *Energy Exchange in the Biosphere*. Nueva York: Harper & Row, 1962.
- GREAT LAKES WATER QUALITY BOARD. *Report to the International Joint Commission: 1982 Report on Great Lakes Water Quality*. Windsor, Ontario: International Joint Commissions, 1982.
- HUNT, E. G. y BISCHOFF, A. I., "Inimical Effects on Wildlife of Periodic DDT Application to Clear Lake". *California Fish and Game* 46 (1960): 91-106.
- HUTCHINSON, G. E. *A Treatise on Limnology*, vol. 1. Nueva York: Wiley, 1957.
- JUDAY, C. "The Annual Energy Budget of an Inland Lake". *Ecology* 21 (1940): 438-450.
- KORMONDY, E. J. *Concepts of Ecology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1969.

- LINDEMAN, R. L. "The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology". *Ecology* 23 (1942): 399-418.
- MOSS, B. *Ecology of Freshwaters*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1980.
- ODUM, E. P. *Fundamentals of Ecology*, 3ra. ed. Filadelfia: W. B. Saunders, 1971.
- RIGLER, F. H. "The Phosphorus Fractions and the Turnover Time of Inorganic Phosphorus in Different Types of Lakes". *Limnology and Oceanography* 9 (1964): 511-518.
- RUTTNER, F. *Fundamentals of Limnology*. 3ra. ed. Traducido por D. G. Frey y F. E. J. Fry. Toronto: University of Toronto Press, 1965.
- SMITH, S. H. "Species Succession and Fishery Exploitation in the Great Lakes". En *Man's Impact on the Environment*, T. R. Detwyler (ed.) Nueva York: McGraw-Hill, 1971.
- STUMM, W. y MORGAN, J. J. *Aquatic Chemistry*, 2da. ed. Nueva York: Wiley-Interscience, 1981.
- TRANSEAU, E. N. "The Accumulation of Energy by Plants". *Ohio Journal of Science* 26 (1926): 1-10.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. *Proceedings, Progress Evaluation Meeting, Pollution of Lake Erie and Its Tributaries*. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Federal Pollution Control Administration, 1968.
- WEF (Water Environment Federation). "The Great Lakes". *Federation Highlights* 30 (9). Septiembre (1993).
- WESTLAKE, D. F. "Comparisons of Plant Productivity". *Biological Reviews* 38 (1963): 385-425.
- WETZEL, R. G. *Limnology*. Filadelfia: W. B. Saunders, 1975.
- WHITTAKER, R. H. "Experiments with Radiophosphorus Tracers in Aquarium Microcosms". *Ecological Monographs* 31 (1961): 157-175.

## TERCERA PARTE

---

### Tecnología y control

# CAPÍTULO 10

---

## Recursos hidráulicos

*J. Glynn Henry*

### 10.1 INTRODUCCIÓN

La administración de los recursos hidráulicos en Estados Unidos y Canadá ha evolucionado, de su meta original de proveer agua a un costo mínimo para promover el desarrollo, al enfoque contemporáneo en el cual se examina un amplio espectro de objetivos. Los beneficios, desde el control de las crecidas hasta el disfrute estético del ambiente, se evalúan ahora en términos de necesidades y actividades humanas. La aplicación de este concepto amplificado debe tener como base el conocimiento de los múltiples factores que influyen en las decisiones. Estos factores y su influencia en la administración de los recursos hidráulicos se describen en este capítulo. La información técnica fundamental acerca de las cantidades globales de agua disponibles y los requisitos para diversos usos antecede a un análisis de las alternativas de administración. Se explica también la necesidad de contar con datos adecuados y el papel del análisis de sistemas en la evaluación de las consecuencias ambientales de estas alternativas.

Se describen los elementos de la planeación satisfactoria, entre ellos la flexibilidad, los métodos para medir los beneficios (en especial los de carácter no económico) y la utilización de la participación del público. Asimismo se expone la importancia de estos requisitos y las sugerencias para ponerlos en práctica. En las secciones subsecuentes del capítulo nos ocupamos de la legislación que afecta la administración del agua, con énfasis en los organismos que intervienen y sus áreas de jurisdicción. Las consideraciones económicas y políticas son otras preocupaciones importantes que se tratan.

Las técnicas para mejorar la administración de nuestros recursos hidráulicos avanzaron en grado considerable durante la década de 1970. El reto de hoy es la aplicación de estos nuevos métodos a situaciones prácticas. Se utilizan dos estudios de caso para ilustrar este enfoque. El primer ejemplo es el controvertido Canal Periférico de California. Además de las especiales consideraciones económicas y de ingeniería que implica, este proyecto demuestra en una escala grandiosa, las inevitables y a menudo conflictivas interrelaciones entre niveles del gobierno, intereses empresariales, el público en general y la protección ambiental. La hoya tributaria de Occoquan en Virginia es el segundo estudio de caso, el cual ilustra la importancia de la planeación del uso de la tierra y la vigilancia de la calidad del agua en el control de la eutrofización en un embalse gigantesco de agua. Al final del capítulo se proporcionan ejemplos adicionales de problemas relacionados con la administración de los recursos hidráulicos.

## 10.2 ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS

### 10.2.1 Importancia del agua

Los recursos hidráulicos han tenido una importancia crítica para la sociedad humana desde que las personas descubrieron que podían producir alimentos cultivando plantas. Las ciudades y pueblos que surgieron desde el este de Egipto hasta Mesopotamia (Iraq en nuestros días) luego de la revolución agrícola que tuvo lugar alrededor del año 3500 a. C. requerían una provisión disponible de agua para sus necesidades domésticas y agrícolas. Con el tiempo, el agua corriente impulsó máquinas que cortaban madera, molían granos y suministraban potencia motriz para muchos procesos industriales. La abundancia del agua la hacía ideal como disolvente universal para limpiar y arrastrar todo tipo de residuos de las actividades humanas. Hasta hace poco tiempo el enfoque del suministro de agua para cualquier propósito era sencillo: o bien ubicarse cerca del agua, como lo hicieron muchas ciudades, o almacenar y transportarse en ella hasta el lugar donde se necesitaba. Una vez utilizada, el agua se descargaba por lo general en el cuerpo de agua más próximo, en muchos casos en la misma fuente de la cual procedía. El suministro a bajo costo de grandes cantidades de agua fue uno de los cimientos de la sociedad moderna.

El crecimiento exponencial de la población y la expansión industrial crearon la necesidad de suministrar y distribuir agua en mayores cantidades. Esta necesidad se satisfizo construyendo presas, embalses, desviaciones de ríos, tuberías y acueductos para llevar agua desde fuentes más distantes y no contaminadas. La aplicación generalizada de la tecnología moderna a la provisión de agua en abundancia para usos municipales, industriales y agrícolas sin restricción, sin incentivos que alienten su reutilización o conservación, ha incrementado en alto grado la competencia para fuentes limitadas de agua fácilmente accesible. Ciertas actividades, como las grandes extracciones de agua para fines mineros o agrícolas, que antes no afectaban a otros usuarios del agua, ahora inciden de manera directa en la provisión de agua municipal de ciudades que están a cientos de kilómetros de distancia. Además de los problemas técnicos que implica la satisfacción de las necesidades de agua, existen crecientes preocupaciones ambientales que es preciso atender. Las inquietudes acerca de los efectos de largo plazo del uso del agua y la pérdida de la misma para fines estéticos y recreativos suelen hallarse en conflicto con el objetivo de mantener un suministro de agua a bajo costo.

### 10.2.2 Necesidad de control

El efecto obvio que los diversos usuarios del agua tienen unos respecto a otros es el problema que propicia la escasez de agua para todos. Los efectos indirectos, menos obvios, incluyen los que causa la contaminación por eliminación de residuos y desagüe de superficies, los cambios en la vida acuática y la creciente salinidad de la corriente. Por ejemplo, el desagüe de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes de las tierras cultivadas puede afectar la cadena alimenticia acuática en la medida suficiente para causar la pérdida de la pesca deportiva local, o para estimular el crecimiento explosivo de algas de aspecto desagradable, el cual puede a su vez ensuciar la provisión de agua para los usuarios municipales e industriales. Las prácticas agrícolas que serían necesarias para detener este impacto negativo requerirían cambios en la práctica del uso de la tierra que sería difícil y costoso poner en vigor. Esta red o sistema de interacciones entre usuarios del agua caracteriza la complejidad de los problemas que se presentan cuando se intenta conciliar varios usos de un mismo suministro de agua. Con la diversidad de necesidades y los efectos interrelacionados del uso del agua, no es difícil ver cómo es que surgen cuestiones complicadas en relación con el derecho legal para la obtención de agua con cierta calidad.

En el pasado, los **derechos ribereños**, esto es, los derechos de quienes habitan "en la ribera del río", tenían que ver con la cantidad de agua que por ley una persona podía reclamar por la propiedad privada de las tierras colindantes. La conciencia creciente que se tiene del agua como un recurso común al que otras personas (ajenas a los propietarios ribereños) tienen derecho ha puesto en relieve las deficiencias de estas leyes respecto al uso de este líquido. La falta de soluciones para los difíciles problemas de tipo legal, económico y social que plantean las interacciones del uso múltiple del agua puede tener consecuencias graves. Quienes detentan los derechos de grandes volúmenes de agua a precios demasiado bajos o subsidiados tienden a utilizar cantidades excesivas y carecen de incentivos para conservar el agua o restaurar su calidad después de usarla. Este despilfarro perjudica a quienes tienen que pagar un precio más alto por agua que quizá sea de calidad inferior; impone una carga adicional a los contribuyentes y limita la disponibilidad de agua para el futuro desarrollo. La ubicación geográfica de las hoyas tributarias en muchos casos traspone fronteras nacionales y de jurisdicción, lo cual complica la aplicación de las políticas que intentan normar el uso del agua.

Los políticos y demás personas encargadas de formular políticas deben reconocer las limitaciones que plantea la comprensión intuitiva que presentan los complejos procesos físicos, biológicos y sociales que intervienen en la administración de los recursos hidráulicos. Ingenieros, biólogos, sociólogos, geógrafos y muchos otros especialistas participan muy de cerca en la investigación y pronóstico de todos los aspectos de la administración de los recursos hidráulicos, y cada uno ataca el problema desde un punto de vista diferente. Normalmente se necesita una descripción o modelo matemático para entender de manera cuantitativa las diversas relaciones de un sistema de recursos hidráulicos, uno que dé cabida a la complejidad de interacción entre las partes del sistema sin que se requiera una cantidad poco práctica de datos precisos. Una vez obtenido esto, los proyectos propuestos como presas o acueductos se pueden juzgar con base en los beneficios y costos previstos. Para conseguir esto es necesario cuantificar de alguna manera cosas tales como el disfrute estético, el uso recreativo y la calidad de vida en términos económicos, o al menos comunes y cuantificables, a fin de comparar estos beneficios con el costo que implica su obtención, del mismo modo como se hace con los beneficios económicos. Debemos estar conscientes de que el precio promedio del agua que cobran los servicios públicos probablemente se encuentra fijado por el precedente de cargos histórica-



mente bajos y puede no representar su verdadero valor en el mercado. El valor real de mercado debe reconocer no sólo el costo de entregar el agua, sino además el costo ulterior que implica recuperarla, restaurar su calidad y devolverla para su nuevo uso.

Las diversas opciones para la creación de recursos hidráulicos pueden beneficiar de manera desigual a diferentes grupos de usuarios de agua. Los proyectos importantes como presas y embalses, ya sea que formen parte de un plan de abastecimiento de agua, control de crecidas, generación de energía eléctrica o recreación, pueden servir para muchos fines, no siempre compatibles. A causa de la magnitud de los gastos y de los efectos ambientales de largo plazo que los proyectos implican, por lo común es necesario el apoyo del gobierno. En consecuencia, muchas de las decisiones fundamentales en esta clase de proyectos son de naturaleza política. Las decisiones sanas para esta clase de desarrollos de recursos hidráulicos exigen la participación no sólo de especialistas y de quienes proponen el desarrollo, sino además de un público bien informado.

### **10.2.3 Objetivos de la administración de los recursos hidráulicos**

En la naturaleza los recursos hidráulicos rara vez existen cuando y donde se les necesita. La erosión, las inundaciones y la sequía también afectan la disponibilidad y la calidad del agua para su uso, y cada año originan pérdidas de propiedades y, en el caso de las inundaciones y la sequía, de vidas humanas. No obstante, cuando se controlan de manera apropiada para corregir estos inconvenientes y reducir las fluctuaciones, los recursos hidráulicos atraen la industria regional y proporcionan medios recreativos, junto con una multitud de beneficios directos e indirectos consecuentes. La sana administración de los recursos hidráulicos requiere tanto del control del flujo de agua, como del entendimiento de la necesidad de coexistencia de todo tipo de usuarios dentro de una hoya tributaria determinada. El objetivo general de la administración de los recursos hidráulicos es, por tanto, aumentar al máximo los beneficios derivados de la utilización y el control de los recursos hidráulicos. Los proyectos pueden tener varios objetivos y es preciso establecer la importancia relativa de cada uno. En esta evaluación influye la cantidad de agua que se debe suministrar o controlar, la necesidad de proteger o mejorar su calidad, y el costo de proporcionar los beneficios potenciales a los diversos usuarios.

Uno de los primeros ejemplos de este estilo integral de administración de recursos hidráulicos es la red de presas hidroeléctricas y estructuras de control del agua construidas en el valle del río Tennessee en Estados Unidos antes de la Segunda Guerra Mundial. Además del hecho de que el país entero se hallaba en medio de una depresión económica, la gente de esta región había sufrido mucho como consecuencia de inundaciones que desplazaron a miles de residentes y erosionaron terrenos arables que habían sido despojados de su vegetación a causa de prácticas no controladas de explotación maderera y minera a cielo abierto. Se creó la Tennessee Valley Authority (TVA; Autoridad del valle del Tennessee) para supervisar el desarrollo del río de una manera favorable para los intereses públicos, no para los privados. Además, se pusieron en marcha prácticas reformadas para el uso de la tierra y mejores métodos de irrigación para impedir el azolvamiento de las estructuras de las presas. La disponibilidad de energía eléctrica a bajo costo alentó a la industria a ubicarse en los alrededores. El extraordinario aumento que se produjo en la calidad de vida de la región demostró la validez del concepto de una planeación unificada del río, y aún hoy permanece como ejemplo de primera clase de la administración progresista de los recursos hidráulicos.

Las técnicas para la planeación apropiada de los recursos hidráulicos dependen de la disponibilidad de datos adecuados. También es importante conocer los organismos que intervienen, sus áreas de jurisdicción y la legislación que los gobierna. Las consideraciones económicas y políticas son tan significativas como las decisiones de ingeniería para una planeación satisfactoria de los recursos hidráulicos. En consecuencia, cada uno de estos factores es parte del proceso de toma de decisiones.

## 10.3 CONSIDERACIONES TECNOLÓGICAS

### 10.3.1 Propiedades del agua

El agua es el componente químico más abundante en la biosfera y quizá también el más importante. Casi toda la vida en la Tierra, incluso la humana, utiliza agua como medio fundamental para el funcionamiento metabólico. La eliminación y dilución de la mayor parte de los desechos naturales y de origen humano están a cargo del agua casi en su totalidad. El agua posee varias propiedades físicas peculiares que son la causa directa de la evolución de nuestro ambiente y de la vida que funciona dentro de él. Su capacidad para conducir (conductividad térmica) y almacenar calor (capacidad calorífica) no tiene igual en alguna otra sustancia. El agua tiene un calor de evaporación muy grande: mientras que bastan sólo 0.239 J (1 caloría) para elevar 1°C la temperatura de 1 gramo de agua líquida (o 1 Btu para elevar la temperatura de 1 libra de agua 1°F), se necesitan 540 veces más energía para evaporarlo. Cuando el agua se congela desprende 335 kJ/kg (144 Btu/lb). Cada día la energía solar extrae aproximadamente 1,230 km<sup>3</sup> (300 mi<sup>3</sup>) de agua de los mares, lagos, ríos y suelos por evaporación y de las plantas por transpiración (Miller, 1992). La inmensa provisión de energía solar calienta los cuerpos de agua, mientras que el vapor de agua de la atmósfera mueve el motor meteorológico del planeta que redistribuye esta energía solar y modera nuestro clima (esto se analizó en detalle en el capítulo 7).

#### Ejemplo 10.1

Calcule en joules y en barriles de petróleo, equivalentes a energía, la cantidad de energía solar que se emplea diariamente para evaporar agua de la superficie terrestre. Un barril de petróleo (159 L o 42 gal) rinde aproximadamente  $6.7 \times 10^9$  J ( $6.4 \times 10^6$  Btu).

#### Solución

La cantidad de agua que se evapora diariamente es

$$\begin{aligned} &= 1250 \text{ km}^3 \text{ (300 mi}^3\text{)} \\ &= 1250 \text{ km}^3 \times \frac{10^9 \text{ m}^3}{\text{km}^3} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 1250 \times 10^{12} \text{ L (3.3} \times 10^{14} \text{ gal)} \end{aligned}$$

La energía solar que se utiliza cada día para evaporar agua es

$$\begin{aligned} &= 1250 \times 10^{12} \text{ kg} \times 540 \times \frac{239 \text{ J}}{\text{kg}} \\ &= 1.61 \times 10^{20} \text{ J (1.52} \times 10^{17} \text{ Btu)} \end{aligned}$$

La entrada diaria de energía solar en barriles de petróleo equivalentes para evaporar agua es

$$= 1.61 \times 10^{20} \text{ J} / 6.7 \times 10^9 \text{ J/barriles}$$

$$= 24 \text{ millones de barriles de petróleo}$$

*Comentario:* Con base en la información del capítulo 3 podemos demostrar que la energía solar que se emplea para evaporar agua de la superficie acuática del planeta es 4,000 veces más grande que la energía que se consume por la utilización cotidiana de petróleo en el mundo.

El medio en el que se desarrolla la vida acuática está protegido contra cambios repentinos de temperatura por el hecho de que se necesita mucho calor para elevar la temperatura del agua. Sólo dos sustancias son más densas en su estado líquido que en su sólido; el agua y el mercurio. Si la situación fuera al revés, los lagos y ríos se congelarían del fondo hacia arriba matando casi toda la vida acuática que contienen.

La energía solar mueve cantidades inmensas de agua a través de la ecosfera en un sistema cerrado que se conoce como el **ciclo hidrológico**. Este ciclo se analizó en el capítulo 6 (figura 6-10) en relación con los balances de masa, y también en el 7 (figura 7-13) con referencia al clima global. La segunda figura representa, de forma simplificada, de dónde proceden las fuentes de superficie y del subsuelo. La lluvia que cae en la tierra llena los poros del suelo de manera muy parecida a como el agua satura una esponja. Si la tasa de precipitación pluvial excede la velocidad con la cual el agua se filtra hacia abajo a través del suelo, el agua forma charcos y riachuelos que en último término contribuyen al desagüe superficial de arroyos y ríos y moldean nuestra topografía por erosión. La figura 10-1 muestra cómo el agua comienza en un momento dado a fluir en sentido horizontal a medida que los poros del suelo y las grietas de las rocas se llenan. El límite que se forma, llamado **nivel freático**, se puede encontrar inmediatamente abajo de la superficie del suelo en las áreas de precipitación más intensa y hasta cientos de metros de profundidad en las áreas secas. Los pozos que se perforan en estas combinaciones de agua, suelo y estructuras de roca, llamadas **acuíferos**, constituyen una fuente importante de agua para los municipios y las áreas rurales donde sería demasiado costoso desarrollar fuentes de abastecimiento de superficie.

### 10.3.2 Precipitación anual

Aunque nos referimos a los ríos y pozos como fuentes de agua, éstos dependen para su reabastecimiento de la precipitación en forma de lluvia, cellisca o nieve. Por tanto, la cantidad de precipitación y la de agua disponible están relacionadas de manera estrecha. La figura 10-2 muestra la distribución media anual de la precipitación en Canadá y su vecino limítrofe Estados Unidos. Las localidades con la misma precipitación anual están unidas por líneas llamadas **isopletas**. Las isopletas indican mínimos de 250 mm (10 in) de precipitación anual en el suroeste árido de Estados Unidos y en el norte de Canadá, y máximos desde 1,500 mm (60 in) en la costa este del continente hasta 2,500 mm (100 in) en las regiones húmedas de la costa oeste.

Los valores de precipitación anual son de escasa utilidad directa para estimar cantidades de agua, pero indican cuáles regiones tienen probabilidad de sufrir escasez de agua y ser por tanto áridas, y cuáles disfrutan quizá de una provisión abundante de agua. La tabla 10-1 proporciona información acerca de la precipitación anual en una selección de lugares del mundo. La distribución desigual de la precipitación pluvial en todo el mundo se aprecia con claridad

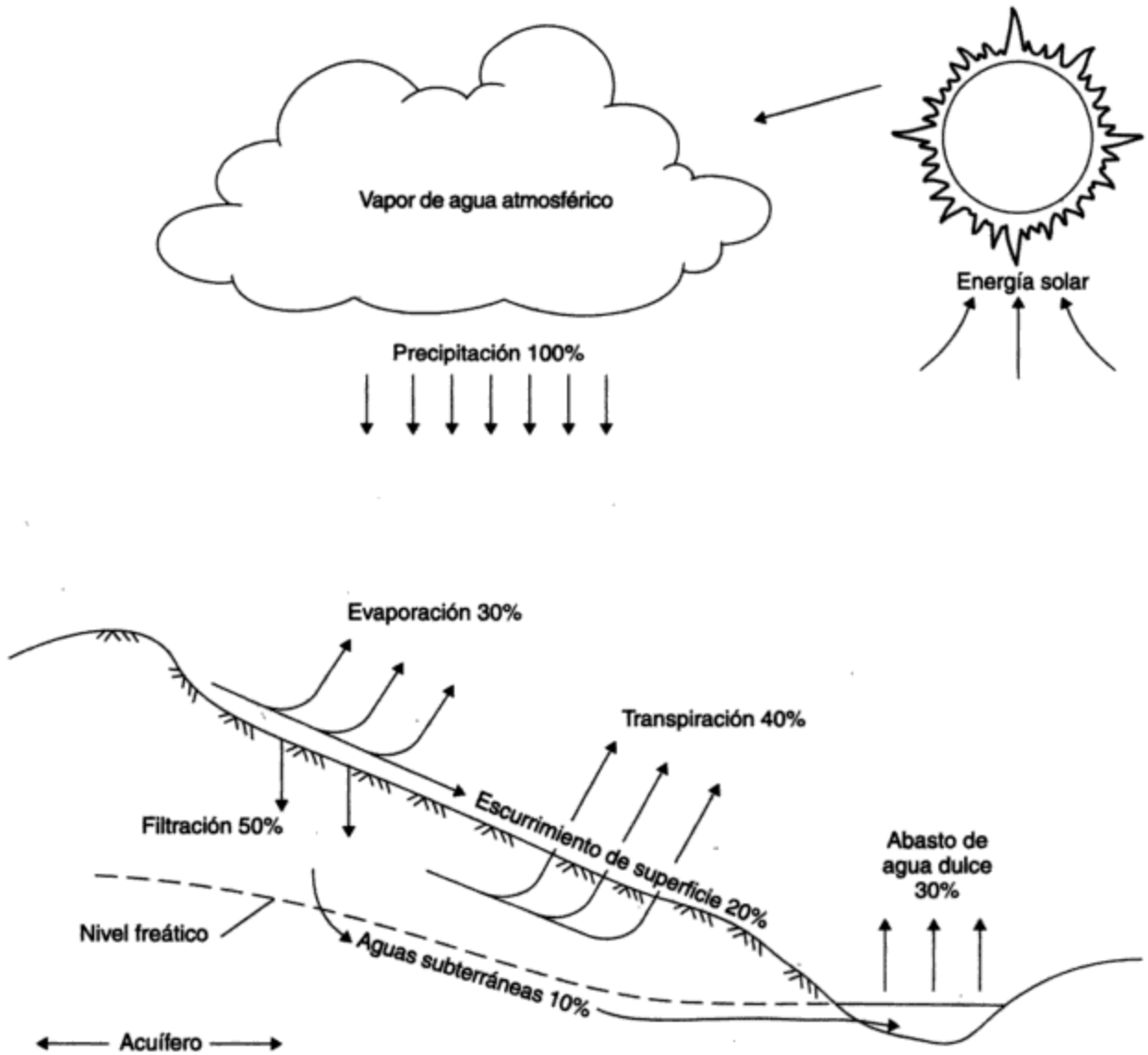
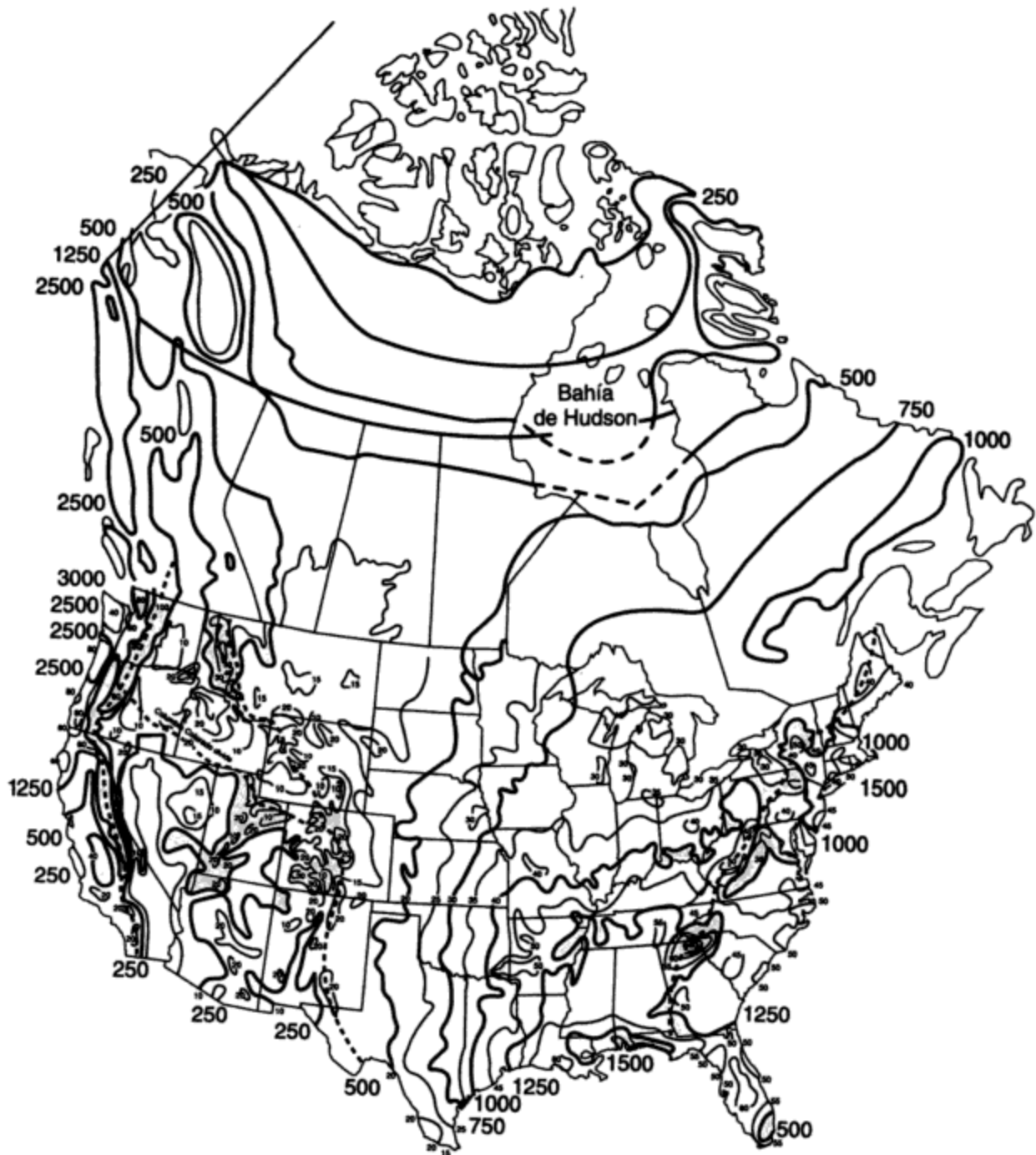


Figura 10-1 El ciclo hidrológico. Fuente: McGauhey (1968).

en estas cifras. Las localidades áridas como Los Ángeles y Las Vegas en Estados Unidos y El Cairo en Egipto se encuentran en un extremo, y las áreas húmedas como Buena Vista en Colombia y Cherrapunji en la India se hallan en el otro.

### 10.3.3 Cantidad de agua disponible

Como se indicó en la figura 10-3, el agua en todas sus formas constituye una provisión fija aproximada de  $1.36 \times 10^{18} \text{ m}^3$  (360 trillones de galones) (van der Leeden *et al.*, 1990). Esta suma astronómica hace difícil entender por qué existe escasez en muchos lugares. Sin embargo, cuando consideramos el agua que está realmente disponible para usarse, la cantidad se reduce de forma drástica. Aproximadamente el 97.2% de la provisión mundial de agua se en-

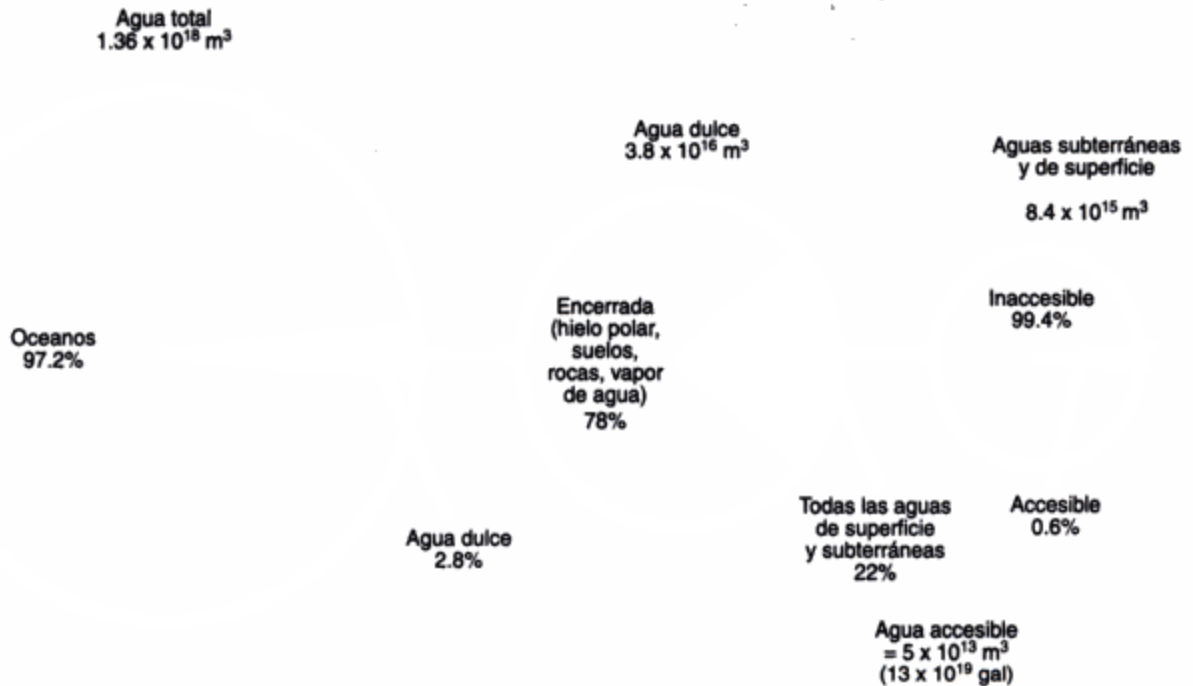


**Figura 10-2** Precipitación anual en milímetros para Canadá y su vecino limítrofe Estados Unidos. *Fuente:* Adaptado de Canadá, Department of Fisheries and the Environment, Atmospheric Environment Service (1941-1970); U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1899-1938).

**TABLA 10-1 PRECIPITACIÓN ANUAL EN UNA SELECCIÓN DE LOCALIDADES DEL MUNDO**

Pais	Localidad	mm año	in (pulg) año
Canadá	Vancouver, B.C.	1,460	57.4
	Calgary, Alta	425	16.7
	Toronto, Ont.	820	32.2
	Montreal, P.Q.	1,035	40.8
	Halifax, N.S.	1,415	55.7
Estados Unidos	Seattle, WA	985	38.8
	Los Ángeles, CA	375	14.8
	Las Vegas, NV	95	4.2
	Chicago, IL	845	33.3
	Nueva Orleans, LA	1,515	59.7
	Nueva York, NY	1,120	44.1
	Miami, FL	1,465	57.6
México	Ciudad de México	585	23.0
Costa Rica	San José	1,800	70.8
Bahamas	Nassau	1,180	46.4
Argentina	Buenos Aires	950	37.4
Brasil	Río de Janeiro	1,080	42.6
Chile	Santiago	360	14.2
Colombia	Buena Vista	8,690	342.0
Checoslovaquia	Praga	490	19.3
Dinamarca	Copenhague	590	23.3
Francia	París	565	22.3
Alemania	Berlín	585	23.1
Grecia	Atenas	400	15.8
Italia	Roma	750	29.5
Polonia	Varsovia	560	22.0
Suecia	Estocolmo	570	22.4
Inglaterra	Londres	580	22.9
Rusia	Moscú	630	24.8
Etiopía	Addis Abeba	1,235	48.7
Kenia	Nairobi	960	37.7
Marruecos	Casablanca	405	15.9
Nigeria	Lagos	1,835	72.3
Sudáfrica	Ciudad del Cabo	510	20.0
Sudán	Khartoum	160	6.2
Egipto	El Cairo	30	1.1
China	Shanghai	1,145	45.0
Japón	Tokio	1,565	61.6
Indonesia	Yakarta	1,800	70.8
Singapur	Singapur	2,415	95.0
India	Cherrapunji	10,800	425.1
India	Nueva Delhi	640	25.2
Arabia Saudita	Er Riad	80	3.2
Australia	Sidney	1,180	46.5

Fuente: van der Leeden *et al.* (1990).



**Figura 10-3** Las fuentes de agua como porcentajes del abasto total. *Fuente:* van der Leeden *et al.* (1990).

cuentra en los océanos. El 2.8% restante es agua dulce, pero más del 75% de esta cantidad está encerrada en los bancos de hielo polares, en el suelo y en formaciones rocosas, y en la atmósfera, lo cual deja menos del 25% disponible como agua superficial y subterránea. Desafortunadamente, el acceso a más del 99% de estas aguas de superficie y subterráneas no es fácil, y dependemos del 0.6% que está disponible (alrededor del 0.004% de la cantidad original) para abastecernos de agua. La figura 10-3 muestra estas relaciones por medio de un diagrama. Para apreciar la cantidad relativa de agua disponible para usarse, suponga que la provisión total de agua del planeta está representada por un recipiente de 4 L. La cantidad total de aguas subterráneas sería menor de 40 mL. Después de quitar el agua que está a una profundidad demasiado grande, o bastante lejos o muy contaminada, nos quedaría una sola gota. Ésta representa alrededor de 10 millones de litros por persona (cerca de 2.6 millones de galones) para una población mundial de 5,000 millones. El ritmo al cual se puede utilizar esta provisión en apariencia abundante de agua dulce está limitado por la rapidez con la cual el agua se mueve por las diferentes partes del ciclo hidrológico. El tiempo para reponer (esto es, reemplazar totalmente) el agua varía desde más o menos 2 semanas en la atmósfera hasta 10 a 100 años en los lagos, según su profundidad (Miller, 1992). Es difícil estimar qué proporción del presupuesto total de agua está disponible sobre una base de continuidad. Si consideramos sólo el agua que participa anualmente en el ciclo hidrológico, esta precipitación (y una cantidad igual de evaporación) se calcula en  $420,000 \text{ km}^3/\text{año}$ , de los cuales el 25% cae en tierra (van der Leeden *et al.*, 1990). Si el 30% de este total (véase la figura 10-1) estuviera disponible para una población mundial de 5,000 millones, la provisión de agua dulce en litros per cápita por día sería de

$$25\% \text{ de } 30\% \times \frac{420,000 \text{ km}^3/\text{año} \times 10^{12} \text{ L/km}^3}{365 \text{ días/año} \times 5 \times 10^9 \text{ persona}} = 17,300 \text{ L/persona} \cdot \text{día}$$

Incluso esta cantidad representa una cifra irreal para muchas áreas a causa de una distribución desigual del agua accesible, de una demanda en rápido aumento, y de la contaminación de las fuentes de agua cercanas a las áreas urbanas. Estos tres factores combinados limitan el uso per cápita en el mundo a más o menos 35 L/persona · día (véase el capítulo 11). Desde luego, sólo una parte de esta cantidad procede de precipitación; gran parte de ella es agua previamente utilizada que tiene la pureza suficiente para usarse de nuevo sin pasar por el ciclo hidrológico.

En muchas áreas del mundo actual se está extrayendo más agua para utilizarla que la que repone la precipitación pluvial. Éstas son principalmente regiones donde llueve poco y la población urbana es relativamente densa. Varias naciones del Medio Oriente, Australia, el norte de México y el suroeste de Estados Unidos están experimentando escasez de agua. Para el año 2000 muchas otras partes de Estados Unidos, México, Rusia, China, Polonia, África y partes de la India sufrirán también de escasez crónica de agua (Miller, 1992). La severidad del problema, en particular a la luz de los esfuerzos que realizan en la actualidad los países en vías de desarrollo para mejorar su nivel de vida, fue señalada por la declaración de la ONU respecto a que en los ochenta sería la “Década Internacional del Abastecimiento y la Salubridad del Agua”. Aunque la escasez es un problema en países tanto desarrollados como en vías de desarrollo, las razones que la causan son fundamentalmente diferentes. Los países desarrollados disponen de la tecnología y la organización para la administración del agua necesarias para sostener un nivel de vida mayor con base en una tasa muy alta de utilización de agua. Su problema es que la extracción está aumentando a tal grado que incluso estos medios no son capaces de estar a la altura de la demanda. Por otra parte los países menos desarrollados carecen de las instalaciones para tratar y distribuir de manera apropiada los recursos hidráulicos a su alcance. Este hecho, aunado a la población en aumento, ha dado origen a una grave escasez de agua en muchos países en desarrollo.

**Pregunta:** ¿Por qué es engañoso afirmar que “para el año 2000 nos quedaremos sin agua”?

#### 10.3.4 Uso del agua

Es importante distinguir entre el uso del agua consuntivo y el no consuntivo. El primero es aquel que impide que el agua esté disponible para uso ulterior, ya sea debido a evaporación, contaminación extrema o filtración bajo tierra, a menos que el ciclo hidrológico la devuelva en forma de lluvia. El uso no consuntivo del agua la deja disponible (después de un tratamiento, si es necesario) para nuevo uso sin pasar por el ciclo hidrológico (Viessman y Hammer, 1993). Con base en esto, la agricultura, en virtud de la evaporación y de la filtración del agua que se utiliza en los cultivos, genera casi el 90% del agua no disponible para uso ulterior en el mundo. La figura 10-4 muestra las magnitudes relativas de diversos usos del agua en Estados Unidos. El agua que viaja muchos kilómetros en canales abiertos y se dispersa en grandes áreas de campo es muy susceptible a las pérdidas por evaporación y filtración antes de alcanzar



las raíces de los cultivos. El agua que se filtra en los campos irrigados se puede usar de nuevo pocas veces a causa de la carga en aumento de sales disueltas que recoge al atravesar el suelo. Por otra parte, los usos no consuntivos del agua la dejan suficientemente limpia, después de su purificación por procesos naturales o mecánicos, para ser utilizada de nuevo. Los usos industriales y termoeléctricos dan cuenta de alrededor del 55% de toda la extracción de agua. El 97% de este uso es no consuntivo, porque el agua se utiliza para enfriar maquinaria una sola vez antes de descargarse. El volumen restante de agua industrial se consume en enfriadores evaporativos o está demasiado contaminada con productos químicos industriales para ser recuperada. El agua para uso doméstico constituye alrededor del 10% de la extracción total. Los contaminantes de las aguas residuales municipales equivalen a menos del 0.5% de su masa, de modo que la purificación para nuevo uso es técnicamente factible. El resultado final de nuestro uso total es que alrededor del 70% de toda el agua extraída se devuelve a la porción de aguas superficiales del ciclo hidrológico donde, a menos que trastorne demasiado los sistemas naturales, se rejuvenece en parte por la acción de procesos naturales. El agua que se muestra como devuelta en la figura 10-4 puede no ser apropiada para usarse de nuevo en forma directa para fines recreativos o como suministro de agua municipal y de irrigación sin algún tratamiento.

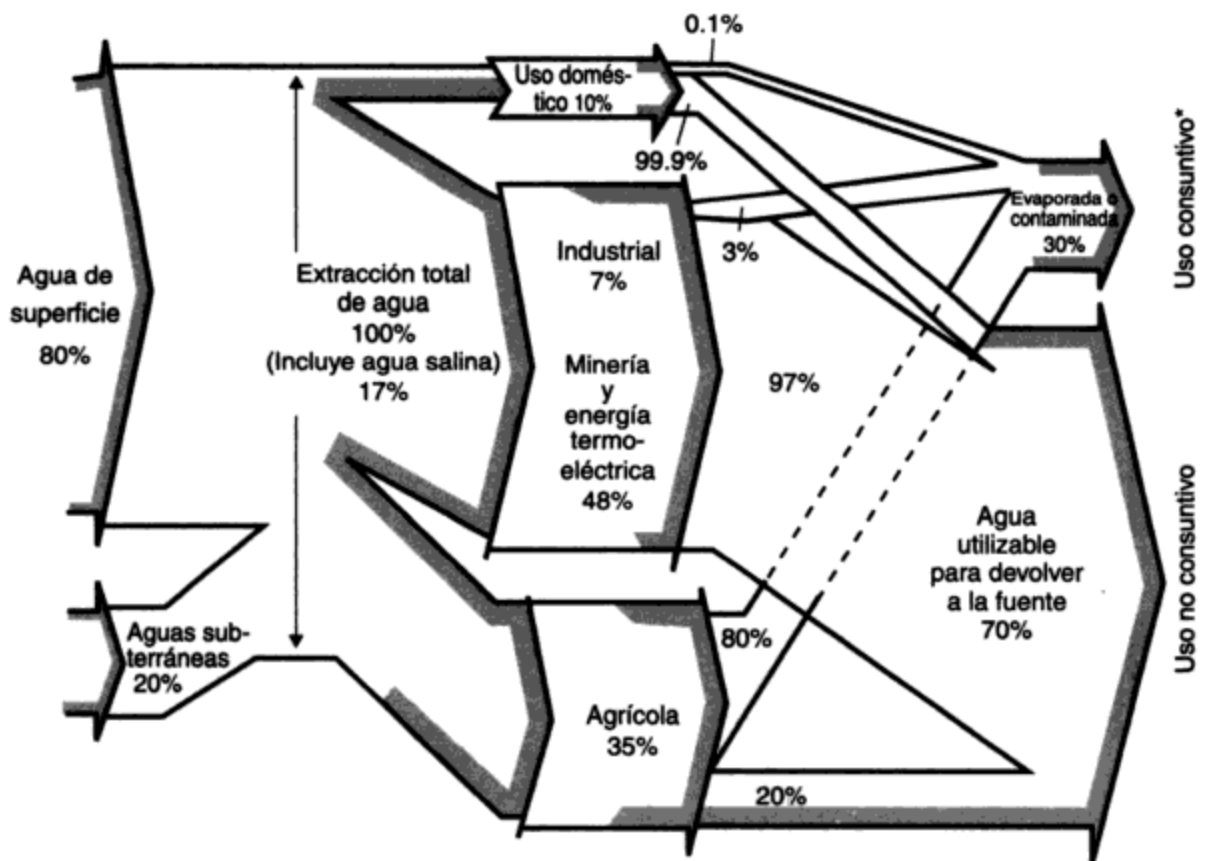


Figura 10-4 Uso del agua en Estados Unidos en 1990. Fuente: Adaptado de USGS (1992).

Incluye el agua que se pierde en el transporte por evaporación y filtración, equivalente al 7% de todas las extracciones de agua en 1990.

**Ejemplo 10.2**

California tiene aproximadamente 8.7 millones de acres (3.5 millones de hectáreas) de tierras de irrigación; sin embargo, los cultivos sólo absorben el 38% del agua que se suministra, mientras que el resto se pierde por evaporación y filtración. Para mitigar este problema, los investigadores están experimentando un producto químico que reduce las pérdidas por evaporación en los embalses y canales de irrigación mediante la formación de una capa monomolecular sobre los cuerpos de agua al aire libre.

- (a) Suponiendo que cada acre de tierra irrigada requiere 4 acre · ft de agua por año (1 acre · ft = 1 acre cubierto hasta una profundidad de 1 pie), calcule el número de acre · ft que se ahorrarían en un año si estos métodos químicos redujeran las pérdidas consuntivas en 1%.
- (b) Si una familia promedio de cuatro personas necesita un máximo de 1 acre · ft/año, calcule el tamaño de una ciudad residencial que se podría abastecer con el agua ahorrada.

**Solución**

- (a) Pérdida consuntiva actual = 62% del agua utilizada. El *agua ahorrada* por una reducción del 1% en las pérdidas consuntivas es

$$1\% \times \frac{8.7 \times 10^6 \text{ acre} \times 4 \text{ acre} \cdot \text{ft}}{\text{año} \cdot \text{acre}} \times 0.62 = 2.16 \times 10^5 \text{ acre} \cdot \text{ft/año}$$

- (b) La *población* que se podría abastecer por la reducción en las pérdidas es

$$\frac{2.16 \times 10^5 \text{ acre} \cdot \text{ft/año}}{1 \text{ acre} \cdot \text{ft}/4 \text{ personas} \cdot \text{año}} = 864,000 \text{ personas}$$

Como ya hemos insinuado, el carácter reutilizable de los recursos hidráulicos hace que las estimaciones de los promedios nacionales o regionales de uso de agua sean engañosas. Los promedios erróneamente sugieren que las tasas individuales de uso de agua se pueden sumar y comparar con las cifras de precipitación pluvial o flujo fluvial total. Además, el uso de agua total puede ser mayor que el presupuesto total cuando el agua utilizada se devuelve y sirve como fuente de abastecimiento. Así pues, para estimar el uso total de agua en una cuenca colectora o región se debe tomar en cuenta el agua disponible para uso repetido y el alcance del reciclado.

**Problema:** La utilización de la palabra *consuntivo* para describir el uso del agua puede ser vago y ocasionar confusión. Sugiera uno o más términos que podrían servir para distinguir con más precisión los distintos tipos de uso del agua.

**10.3.5 Opciones para satisfacer la demanda de agua**

La creciente demanda de agua ha llevado a muchos países, incluso a Estados Unidos y Canadá, que en conjunto contienen alrededor del 30% de la provisión de agua dulce del mundo, a examinar formas de suministrar el agua indispensable conservando las reservas para uso futuro. Se pueden identificar dos enfoques principales, de los cuales se muestran ejemplos en la figura 10-5. El primero consiste en emplear grandes proyectos de ingeniería para obtener más agua de diversos sistemas dulces antes de que éstos desagüen en el océano. Ésta es una solución conocida como **tipo de suministro**. El segundo se basa en un mayor reciclado del agua por utilización de sistemas de purificación, tanto construidos como naturales, antes de que el agua

Copyrighted image

(a)

Copyrighted image

**Figura 10-5** Opciones para satisfacer la demanda de agua.

[Fotografías cortesía de (a) B. J. Adams y (b) J. G. Henry.]

(a) Las presas (una opción de suministro) que almacenan agua para diversos fines, incluso el abasto de agua, pueden crear problemas, como el crecimiento excesivo de algas que aquí se muestra. (b) Las plantas de recuperación de agua (una opción de reutilización), como la planta del arroyo de San José en el condado de Los Ángeles, restauran el agua contaminada para usos como la recarga de aguas subterráneas y el riego de campos de golf.

se pierda por evaporación o regrese a la reserva oceánica. Este enfoque se describe como **tipo de reutilización**, el cual, en efecto, vuelve a recircular el agua como un subciclo del ciclo hidrológico global que se muestra en la figura 10-1. Este segundo enfoque se hará más indispensable a medida que las fuentes de agua dulce se hagan más inaccesibles.

### Opciones de suministro

1. Las presas y embalses son los medios más antiguos para controlar el flujo de agua. Sus beneficios son la igualación y control del flujo de las corrientes, la generación de energía eléctrica, el control de crecidas y sequías y la recreación. Por otro lado, los problemas incluyen el azolvamiento de los embalses con el tiempo, mayores pérdidas por evaporación debido a la gran área superficial y la reducción de los flujos en los deltas de los ríos en áreas costeras, la cual permite la entrada de agua salada.

2. Las desviaciones de corrientes de agua de un área a otra se están empleando en mayor proporción, en especial en California, a partir de la importante desviación del río Colorado en 1931 para abastecer la ciudad de Los Ángeles. Los beneficios de un suministro abundante de agua para el desarrollo doméstico e industrial son obvios. Las desventajas de estos proyectos de gran envergadura son: su costo, las pérdidas por evaporación y la tendencia a causar acumulación de sales y deterioro de suelos por un drenaje inadecuado de los proyectos de irrigación.

3. Las aguas subterráneas contienen el 97% de toda el agua dulce de Estados Unidos y abastecen alrededor del 20% de las necesidades del país. Esta fuente por lo general es de mejor calidad que el agua superficial y se puede extraer para su uso en áreas alejadas de las redes municipales de distribución. La extracción de aguas subterráneas se debe limitar a la rapidez con la cual se recarga el acuífero; de lo contrario, el nivel freático de agua subterránea bajará, se reducirá la cantidad disponible y aumentará el costo de su extracción. La recarga de acuíferos relativamente poco profundos se hace con bastante facilidad, pero las reservas profundas en áreas secas pueden requerir cientos de años para recargarse y por tanto son, en términos prácticos, no renovables.

4. La desalinización es objeto de una atención cada vez mayor conforme los países áridos informan de éxitos en ciertas aplicaciones. La *osmosis inversa* (OI), que obliga el paso del agua a través de una membrana semipermeable que deja pasar el agua pero retiene las sales disueltas, es el más práctico de varios métodos de desalinización, entre ellos la destilación convencional. Las unidades de OI son costosas y consumen una cantidad relativamente grande de energía, pero a medida que su uso se incrementa serán más económicas para la purificación del agua.

5. El uso de *icebergs* como fuente de abastecimiento de agua para ciudades costeras áridas es objeto de atención de tiempo en tiempo. Entre los problemas aún no resueltos se cuentan los efectos ambientales, la fusión durante el tránsito y los métodos para fundir el hielo y llevar el agua a tierra.

6. La reubicación de la población lejos de las áreas donde hay escasez de agua o que ya soportan tantos usuarios como es posible es una alternativa obvia. Esta opción será objeto de mayor atención a medida que el costo del agua aumente y se pongan en práctica el reciclado y la conservación.

### Opciones de reutilización

1. Un mejor tratamiento para permitir una mayor reutilización de aguas que se han contaminado será un elemento vital en las futuras políticas de recursos hidráulicos. Cuando no se puede recurrir a nuevas fuentes, el aumento en el número de veces que el agua se reutiliza antes de su regreso al ciclo hidrológico será el único medio de satisfacer la demanda a largo plazo, puesto que la cantidad total de agua disponible es fija.

2. La reducción de la evaporación de superficies acuáticas tiene el potencial de disminuir de manera significativa el consumo de agua en la agricultura, el mayor usuario individual de recursos hidráulicos.

3. Las técnicas de conservación de agua podrían tener una eficacia inmediata para ampliar los recursos de agua dulce. Incluso medidas relativamente sencillas, como la instalación de accesorios especiales en grifos y duchas, permiten ahorrar una buena cantidad de agua. La mayor parte del equipo industrial que utiliza agua fue proyectado bajo el supuesto de una abundante provisión de agua. Por consiguiente, un diseño eficiente reduciría de manera drástica las necesidades industriales de agua. No todas las técnicas de conservación son de naturaleza técnica. Los cambios en las actitudes sociales y económicas en relación con el abastecimiento y distribución de agua dulce también desempeñan un papel importante en la conservación del agua.

#### 10.3.6 Cuantificación de los efectos ecológicos y sociales

El agua unifica los sistemas físicos (como la atmósfera, los suelos y las rocas) con los sistemas vivos, lo cual también es un factor importante en la sociedad humana, pues afecta la forma en que las personas se relacionan unas con otras por medio de una intrincada red de leyes, derechos, servicios y actividades. El uso de reservas limitadas de agua por cualquier segmento de la sociedad afecta a las demás personas y organismos vivos. Esta relación entre los usuarios del agua es obvia en ciertos casos. Por ejemplo, la captura que consigue un pescador depende del grado de utilización de métodos idóneos para el tratamiento de aguas residuales en una fábrica cercana de pulpa y papel que descarga grandes cantidades de su efluente. Otras situaciones, como la dependencia de un ambiente de estuario respecto al flujo del río, pueden no ser tan obvias. El área del delta de la bahía de San Francisco en California tiene una ecología marina que sostiene una gran población de salmones en virtud del carácter de la cadena alimenticia, producto del delicado equilibrio entre la acción de lavado del agua dulce del río Sacramento y el flujo hacia tierra de una capa subyacente de agua de mar. La reducción del flujo de agua dulce hacia el mar a causa de proyectos de desviación corriente arriba podría alterar este equilibrio natural lo suficiente para poner en peligro la captura anual de 2,700 toneladas de salmón del área del delta (Seckler, 1971).

Los proyectos que alteran los patrones de flujo de los ríos a fin de controlar y suministrar recursos hidráulicos muy necesarios se deben proyectar y ejecutar tomando en cuenta sus consecuencias ambientales y sociales. Esto no quiere decir que los proyectos de recursos hidráulicos no se deben emprender hasta que esta clase de conflictos se eliminen, sino que se deben considerar todos los factores antes de optar por un camino determinado. Para proyectar una estructura de control de agua, como una presa, es necesario recolectar datos precisos y tomar numerosas decisiones. ¿Cuánta agua tendrá que retener la presa? ¿Con qué rapidez reducirá la sedimentación de acarreos fluviales la capacidad del embalse? ¿Cuándo se debe dejar salir

agua para controlar las crecidas o aumentar las corrientes, o para fines recreativos? ¿Estimulará el agua represada un crecimiento indeseable de plantas? ¿Cuál es el beneficio que se espera de las instalaciones recreativas, y de qué manera afectará a los residentes locales el hecho de sumergir terrenos en los embalses? Éstas y muchas otras cuestiones raras veces se examinaban con minuciosidad hasta hace poco tiempo, porque se suponía que la capacidad del medio para absorber estos cambios era suficiente para cualquier proyecto hecho por seres humanos. No obstante, proyectos como el de la presa de Aswan en Egipto, la cual destruyó la industria sardinera del país, creó erosión corriente abajo y fomentó la propagación de enfermedades, nos han enseñado que las cosas no son así. Existe la necesidad de integrar datos de diversos estudios, de tal manera que sea posible tomar decisiones más racionales. Los modelos de computadora que representan, así sea de manera aproximada, la relación entre las múltiples actividades naturales y económicas, son en la actualidad objeto de mucha atención por tres razones. La primera es que estos modelos, aunque tienen limitaciones, se ejecutan con rapidez para evaluar los posibles efectos acumulativos que las variaciones de corto y de largo plazo de las características de un río pueden tener en los beneficios previstos de cualquier propuesta de control de aguas. En la medida en que sus relaciones son cuantificables, también es posible crear, como herramientas de estudio, modelos de los subsistemas naturales y sociales que afectan y son afectados por los proyectos propuestos. En la segunda razón para utilizar modelos tiene que ver la probabilidad. Con mucha frecuencia los datos fundamentales para fines de diseño sólo se pueden estimar dentro de ciertos límites de probabilidad. Los registros del flujo de los ríos y de la precipitación pluvial pueden no ser adecuados para determinar el tamaño del complejo necesario para reducir la probabilidad de una inundación hasta niveles socialmente aceptables. Las complejidades que implica equilibrar las pérdidas por inundación contra los costos de construcción, sin dejar de tomar en cuenta la probabilidad de que ocurran crecidas, es una tarea que requiere el uso de modelos de computadora. La tercera razón, y quizá la decisiva, es que las múltiples y variadas consideraciones e interacciones que intervienen en la planeación de proyectos de recursos hidráulicos de largo plazo se están haciendo tan numerosas, y los

Copyrighted image

**Figura 10-6** Planta generadora, presa y embalse de Stewartville sobre el río Madawaska en Ontario, Canadá. *Fuente:* Ontario Hydro.

efectos de un diseño deficiente tan costosos, que la intuición sin la ayuda de las computadoras en la evaluación de proyectos, es poco confiable. No obstante, los modelos de computadora requieren un cuidadoso escrutinio e interpretación para que resulten provechosos en el proceso de toma de decisiones. Los datos sólidos son los cimientos de los modelos matemáticos, y aunque la recolección e interpretación de esta información puede consumir mucho tiempo, es indispensable que esto se haga para que las decisiones apoyadas por resultados numéricos resistan la crítica de los opositores preocupados y bien informados.

**Pregunta:** La presa que se muestra en la figura 10-6 se construyó a través de un río para suministrar energía hidroeléctrica. Con base en una presa para la cual se disponga de información como ejemplo, describa los cambios benéficos (físicos, sociales y económicos) que la presa ha creado. ¿Qué efectos dañinos ha causado? En cada caso, cuantifique las respuestas.

## 10.4 NECESIDADES DE PLANEACIÓN

### 10.4.1 Propósito de la planeación

En la planeación (el proceso que precede a la ejecución de un proyecto) se establecen y se examinan en forma crítica los objetivos, y se evalúan los medios para poner en práctica el plan y los resultados del mismo. En la actualidad, su propósito primordial es informar a quienes toman una decisión respecto a las consecuencias de sus acciones. Hasta hace poco tiempo, la mayor parte de la planeación de recursos hidráulicos se orientaba hacia el suministro de energía hidroeléctrica y agua para la expansión industrial, urbana y agrícola en función de los beneficios económicos que aportaban. Sin embargo, como el público sabe muy bien, ahora estos beneficios suelen estar acompañados por la degradación del ambiente y la pérdida del agua para su disfrute recreativo o estético.

Los conflictos entre quienes compiten por el agua se han hecho más visibles, en parte a causa del poder de los medios para informar y provocar la respuesta de los ciudadanos preocupados, y en parte porque la calidad del agua se ha convertido en un factor crítico inseparable de los problemas de la cantidad de agua. Las metas de muchos grupos fuertes con intereses especiales, cada uno con derecho a reservas de agua limitadas, suelen hallarse en conflicto. Por ejemplo, los fabricantes que descargan agua "usada" sin tratamiento pueden perjudicar la calidad del agua, la cual es necesario conservar para usos recreativos que sostienen una industria turística local. La reducción de la contaminación, el control de las crecidas, la recuperación de tierras y la conservación se deben tomar en cuenta en forma simultánea para planear la administración del agua. El reto para la persona encargada de la planeación consiste en encontrar un compromiso aceptable entre las necesidades en competencia y en utilizar los recursos hidráulicos de manera eficiente.

La confusión en cuanto al propósito de la planeación ha ocasionado cierta resistencia a una aplicación más amplia de sus técnicas. Planear no es sólo diseñar e implementar un proyecto preconcebido, ni implica el control estatal de las actividades humanas. La planeación debe proporcionar una percepción de los problemas y alternativas para que todas las partes involucradas, en particular los representantes electos, puedan tomar decisiones inteligentes. Muchas personas piensan que la planeación se puede aplicar fácilmente para resolver problemas específicos según se necesite. Se supone que si se emplean suficientes personas competentes y se gasta el dinero necesario, surgirá el camino apropiado para actuar. Es poco probable que

esto suceda. En realidad, la planeación de recursos hidráulicos es un vistazo, con ciertas bases, hacia el futuro de un complejo sistema dinámico. Los factores económicos, políticos, sociales y tecnológicos desempeñan un papel tanto en la creación como en la resolución de los problemas. La incertidumbre es inevitable en la determinación de parámetros tan importantes como el nivel de la industria que se debe abastecer, los tiempos y la magnitud de los flujos de agua, y el compromiso político para llevar a efecto el plan. Los estudios de planeación pueden verificarse a lo largo de varios años, durante los cuales es preciso volver a evaluar la situación de manera constante para dar respuesta adecuada a las condiciones cambiantes.

#### **10.4.2 Etapas del proceso de planeación**

Aunque cada situación de planeación es especial (según el proyecto, la región, quién toma las decisiones, los medios para tomarlas y las consecuencias de las mismas), existen similitudes suficientes entre los planes satisfactorios para identificar una estructura general del procedimiento. La figura 10-7 muestra las etapas del proceso de planeación, sugeridas por Environment Canada (1975), que son comunes a muchas situaciones de planeación.

En el análisis siguiente de este modelo es importante darse cuenta de que la planeación es un proceso social. Tratar la interacción entre personas como un ejercicio analítico no produce resultados significativos. La planeación es, en esencia, un proceso racional para determinar el camino más apropiado ante un conjunto de circunstancias determinado. Para la exposición que sigue, las etapas del proceso de planeación se han agrupado en tres categorías: formulación, evaluación y adopción.

#### **10.4.3 Formulación del estudio**

En la elaboración de un plan se deben considerar las etapas 1a hasta la 1d que se bosquejan en la figura 10-7. La necesidad de planear debe ser evidente por lo expuesto en la sección 10.4.1. Tomar conciencia de la necesidad de planear es la primera etapa del proceso. Suele ser difícil, en particular cuando se trata de sistemas naturales como los ríos, apreciar de qué manera los cambios en ciertos componentes de un sistema afectan a otros componentes. Un ligero descenso en el contenido de oxígeno disuelto del agua del río, un cambio de temperatura, una alteración del flujo, o pequeñas adiciones de materiales tóxicos pueden iniciar una reacción en cadena que afecta a muchas especies acuáticas. A menos que se reconozca esa interdependencia, no se podrán alcanzar todos los beneficios de la planeación.

La segunda etapa, en donde se establece cuál es el grupo de personas que llevará a cabo la planeación, es muy importante ya que aquí es cuando se adoptarán los supuestos fundamentales acerca del efecto del proyecto, por lo tanto aquí es donde se selecciona al equipo de expertos que elaborará el informe final. Si, por ejemplo, se percibe que un problema requiere sólo especialistas en ingeniería cuando, de hecho, se afecta la administración de las tierras, el comportamiento social y los patrones de transporte, estos elementos vitales se descuidarán en el plan. El asesor principal debe ser capaz de aportar la diversidad de elementos necesarios para tratar con todas las personas que participan en el plan o que son afectadas por el mismo, entre ellas la autoridad que aprueba, el organismo patrocinador, los beneficiarios, los terratenientes, otros asesores y los grupos de interés público.

Los objetivos que se fijan para el estudio deben ser comprendidos con claridad por todas las partes, de modo que el trabajo subsecuente sólo se encamine a lograr lo que el estudio se propone hacer. Fijar objetivos no es una tarea fácil. Se deben examinar los programas de los



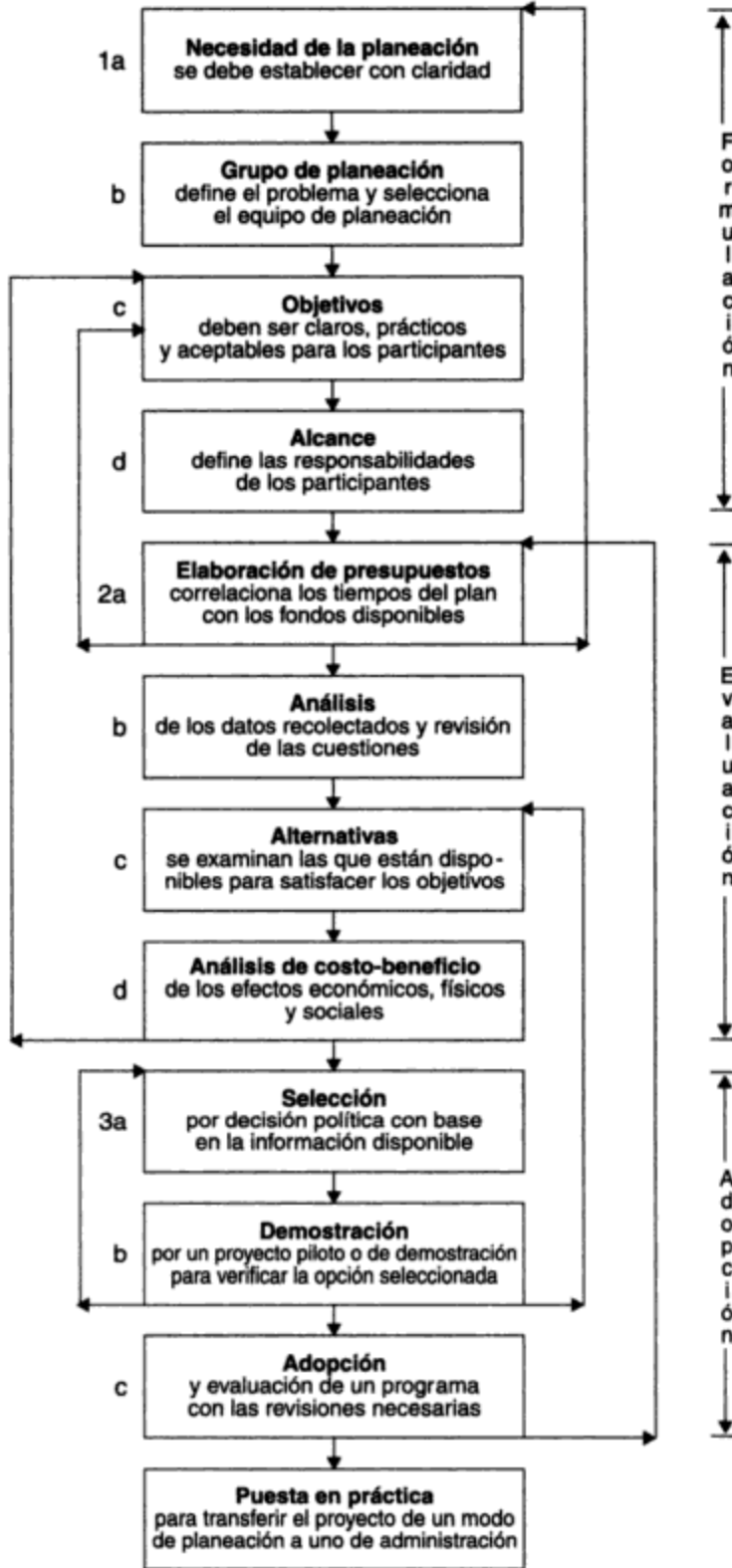


Figura 10-7 Bosquejo del proceso de planeación. Fuente: Adaptado de Environment Canada (1975).

organismos gubernamentales con intereses afines para asegurar que más adelante no se presentarán problemas de jurisdicción y duplicación de esfuerzos. Una dificultad en la planeación integral de los recursos hidráulicos es que la unidad lógica geográfica e hidrológica de estudio (la cuenca colectora) en muchos casos cruza fronteras jurisdiccionales de todo tipo, desde locales hasta internacionales. La gente que planea también debe estar consciente de la tendencia que existe ante el surgimiento de conflictos entre varios puntos de vista razonables. El intento por dar cabida a los deseos de todos los usuarios del agua puede causar que se fijen objetivos demasiado altos para ser asequibles o demasiado vagos para ser de utilidad en la evaluación de propuestas en una etapa posterior. El único método que permite asegurar el mantenimiento de metas prácticas es la revisión constante de las mismas a la luz de las consultas públicas y privadas a medida que el proceso de planeación avanza. En muchos casos, la reacción negativa del público hacia la planeación se puede entender y vencer si se reconoce el natural recelo que se genera cuando los puntos de vista de las personas afectadas no parecen estar representados. La eficacia de los esfuerzos de planeación mejora notablemente si todas las partes, ya sean públicas, administrativas o técnicas, se identifican con las metas del proyecto y con las razones por las cuales se eligieron las mismas.

Crear un buen estudio de planeación es similar a un contrato, en cuanto a que se define con claridad lo que se espera de cada participante. Esta etapa es además un elemento fundamental en el proceso porque exige un diálogo extenso entre las partes, incluso el público, para determinar la profundidad de estudio que requiere cada disciplina componente para alcanzar los objetivos enunciados. En este punto se puede pedir a diversos organismos y asesores que presenten puntos de vista específicos que establezcan el alcance global del empeño.

#### **10.4.4 Evaluación de alternativas y de sus efectos**

La evaluación de las alternativas abarca cuatro etapas: elaboración de presupuestos, análisis, enfoques alternativos y finalmente el análisis de costo-beneficio. La elaboración de presupuestos, es decir, el proceso de fijar programas y calcular los costos del esfuerzo de planeación, puede ser una experiencia aleccionadora cuando se encuentra que las metas idealistas que se fijaron previamente tienen un costo prohibitivo. Esto sucede con frecuencia porque la necesidad de datos casi siempre sobrepasa los fondos disponibles. Por lo común se requieren compromisos e ingenio en la síntesis de los datos. La programación es importante porque al mismo tiempo gobierna y es gobernada por el tiempo necesario para reunir datos de campo elementales. Algunos datos se pueden obtener sólo en ciertas épocas del año, por lo cual se requiere que un programa de proyecto sea una serie detallada de intervalos de tiempo en los cuales determinadas actividades deben tener prioridad, pues de lo contrario se retrasarían otras etapas aumentando los costos. Es probable que durante la programación se encuentren obstáculos que no son superables por medio de nuevas proposiciones o metas. En este caso la propuesta se debe revisar con respecto al tiempo necesario para cada estudio, y será forzoso redactar nuevas prioridades y programas. Así, el asesor principal puede otorgar contratos realistas para el estudio conforme lo demandan las disposiciones de planeación.

El análisis de los problemas requiere la recolección de los datos químicos, físicos, sociales, biológicos y económicos pertinentes. Los primeros datos indicarán dónde se debe hacer trabajo adicional para reunir y afinar la información, de modo que permita aclarar y analizar más a fondo los problemas con las personas involucradas. En muchos casos se presentan percepciones variables respecto a lo que en realidad son las cuestiones, aun cuando la recolección de datos está en sus etapas finales. Quienes planean no deben pasar por alto, ni aparentar que

lo hacen, cualquier inquietud que pueda expresar alguna de las partes afectadas. El hecho de no considerar las objeciones serias (como ha sido común) puede dar origen, con el apoyo de los medios de comunicación, a una oposición tan fuerte que los objetivos del plan original ya no sean aceptables desde el punto de vista político. Muchos estudios no se han llevado a la práctica a causa de esta falta de flexibilidad. Un ejemplo canadiense es la propuesta de transferir agua del norte al sur de Alberta para aliviar la escasez de irrigación en el sur. El proyecto no se ha puesto en práctica a causa de preocupaciones ambientales, limitaciones financieras, beneficios dudosos y una reacción política negativa (Smith, 1981).

La generación de alternativas sigue al análisis de los datos. Las cuestiones que ahora se han definido se investigan, con un énfasis especial en la satisfacción de los requisitos de los organismos reguladores participantes. Por ejemplo, la regulación del flujo de los ríos y los programas de descarga de residuos están relacionados en virtud de los problemas de contaminación que se asocian con la descarga de residuos en los ríos con flujos bajos. Puede haber alternativas para cualquiera de los sistemas humanos, físicos y biológicos que gobiernan el uso del agua. El enfoque de ingeniería, que considera las permutaciones de presas, las desviaciones u otras obras para alcanzar una cierta meta, es sólo una de las posibilidades. Las opciones de administración del agua, por ejemplo, pueden enfocarse hacia un mejor control de las crecidas por reglamentación de los terrenos de aluvión. Las alternativas institucionales pueden implicar la creación o modificación de organismos proyectados para vigilar y responder ante el abuso de los recursos hidráulicos por una parte a expensas de otra. El escalonamiento, esto es, la implantación de un programa en pequeños segmentos a lo largo del tiempo, es otro enfoque digno de estudio. El punto principal es que se deben estudiar todos los enfoques presentes y futuros para que no se favorezca una alternativa por falta de información o consideración de otra.

El análisis de costo-beneficio, aplicado por primera vez en Estados Unidos en 1930 (Phelps *et al.*, 1978), tuvo gran éxito en términos de la cuantificación de los beneficios tangibles (esto es, económicos) y los costos en términos de dinero, y de la selección, dentro de los límites presupuestarios, de la mejor opción: la que ofrece la mayor proporción costo/beneficio. Sin embargo, ahora la gente que planea conoce la importancia de evaluar las propuestas en términos de objetivos múltiples que confieren suficiente importancia a conceptos intangibles (como el mejoramiento social y la calidad ambiental natural), además de los factores económicos. El análisis de costo-beneficio ha sido adaptado para incluir beneficios intangibles (no económicos) empleando una computadora para simular las relaciones técnicas, biológicas y sociales que intervienen en un proyecto. De esta manera, las entradas (costos) y las salidas (beneficios) se comparan para llegar a una relación similar a la simple proporción costo/beneficio económica. La simulación por computadora se ha convertido en una herramienta cada vez más eficaz e indispensable para encontrar la solución óptima en una propuesta de objetivos múltiples sujeta a restricciones financieras y físicas específicas.

Las computadoras digitales son ideales para elaborar modelos de la naturaleza dinámica de los sistemas de recursos hidráulicos, esto en virtud de su capacidad para ejecutar con rapidez los miles de cálculos que se necesitan para representar el estado del modelo durante cada incremento de tiempo. La limitación más seria de este método de evaluación es que, para que sea posible hacer comparaciones, todas las entradas y salidas se deben expresar en términos económicos. Los economistas y científicos sociales han buscado un medio que les permita medir la calidad ambiental natural y el mejoramiento social desde el advenimiento de interés público, lo cual se logra por la inclusión de estos intangibles en los tradicionales procedimientos de evaluación. Las técnicas monetarias han intentado asignar un valor, en dinero, a los bene-

ficios relacionados con los recursos hidráulicos en términos de la cantidad que los consumidores estarían dispuestos a pagar por ellos en una hipotética economía de libre mercado. El problema más importante ha sido la incapacidad para evaluar de manera objetiva estos beneficios para la comunidad en un sistema económico que depende de la propiedad individual para fijar los valores de mercado. También es problemático el hecho de que en los proyectos del pasado muchos recursos recreativos y estéticos se han suministrado sin costo, con lo cual se deprime el “valor” de mercado que se puede asignar de manera realista a estos beneficios.

Entre las diversas formas para estimar el valor de beneficios intangibles, la *clasificación* es una técnica factible. En este método, se pide a observadores imparciales que califiquen, en una escala apropiada, su opinión de los valores de los diferentes activos individuales y comunitarios, de forma muy parecida a como los estudiantes llenan las evaluaciones de cursos en la universidad. Con base en la clasificación relativa, se asignan valores monetarios a elementos intangibles correlacionando éstos con los beneficios de costo conocido.

Las técnicas de evaluación que ahora se encuentran en una etapa temprana se harán sin duda más refinadas en el futuro. No obstante, si hemos de habérmolas de manera eficaz con las complejidades de la administración de los recursos hidráulicos, será necesaria por parte de los ciudadanos una mayor comprensión y aceptación de los nuevos enfoques y también más participación en el proceso.

Los siguientes ejemplos ilustran de manera simplificada las diferencias que puede haber en la comparación de dos alternativas por análisis de costo-beneficio, en función de que se incluyan o no los beneficios recreativos.

**Ejemplo 10.3**

Una autoridad que lleva a cabo la planeación para una pequeña cuenca fluvial ha propuesto dos alternativas para una presa de control de crecidas, cada una con una vida útil esperada de 40 años. Calcule la proporción costo/beneficio para cada alternativa con base en los datos siguientes:

Presupuesto anual para presas (sin beneficios recreativos)	Alternativa	
	A	B
Pago anual sobre costo de construcción	\$10,487	\$41,950
Reducción anual media esperada en demandas por daños causados debido a las crecidas	\$18,000	\$60,000
Costos anuales de mantenimiento	\$ 2,500	\$ 5,000

**Solución**

	Alternativa	
	A	B
Beneficios totales de las presas	\$18,000	\$60,000
Costos totales de las presas	\$12,987	\$46,950
Costo/beneficio	1.37	1.28

La alternativa A, que devuelve \$1.37 en beneficios por cada dólar gastado, parece ser la mejor opción.

**Ejemplo 10.4**

Se han planteado objeciones en relación con el hecho de que la recreación no se incluyó en el análisis del ejemplo 10.3. Una manera de asignar un valor en dinero a los beneficios esperados de esta opción consiste en examinar los precios que se cobran en un proyecto similar que opera durante 100 días al 70% de su capacidad:

Presupuesto anual adicional (para instalaciones recreativas)	Alternativa	
	A	B
Pago anual adicional sobre costo de construcción	\$3,200	\$ 7,100
Costo anual de mantenimiento adicional	\$6,000	\$10,000
Derechos de estacionamiento diarios estimados por persona	\$ 1.00	\$ 2.00
Capacidad de estacionamiento (personas) por día	60	200

**Solución**

$$\text{Beneficios recreativos anuales para la alternativa A} = 70 \times 60 \times \$1.00 = 4,200$$

$$\text{Beneficios recreativos anuales para la alternativa B} = 70 \times 200 \times \$2.00 = 28,000$$

	Alternativa	
	A	B
<b>Beneficios totales anuales del proyecto</b>		
De presas (véase el ejemplo 10.3)	\$18,000	\$60,000
De instalaciones recreativas (véase arriba)	\$ 4,200	\$28,000
	<u>\$22,200</u>	<u>\$88,000</u>
<b>Costos totales anuales del proyecto</b>		
Para presas (véase el ejemplo 10.3)	\$12,987	\$46,950
Para instalaciones recreativas:		
Capital	\$ 3,200	\$ 7,100
Mantenimiento	\$ 6,000	\$10,000
	<u>\$22,187</u>	<u>\$64,050</u>
<b>Costo/beneficio</b>	1.00	1.37

La alternativa B, que devuelve \$1.37 en beneficios por cada dólar gastado, parece ser ahora la mejor alternativa.

**Problema:** Los pronósticos de beneficios como los que se hicieron para las instalaciones recreativas en el ejemplo 10.4 suelen estar sujetos a amplias variaciones. En consecuencia, casi todos los cálculos de costo-beneficio incluyen un análisis de "sensibilidad" para ver los efectos que tendrían cosas tales como las tasas de interés, los costos del proyecto o los beneficios previstos en la proporción costo/beneficio final. En el ejemplo 10.4, suponga que el proyecto se retrasa 5 años y que esto aumenta los costos de construcción y mantenimiento en 10% y las tasas de interés de 4 a 6 1/2% anual. ¿Cuáles son las proporciones costo/beneficio

resultantes si se supone que los beneficios previstos no cambian? ¿Se podría justificar todavía uno u otro proyecto?

#### **10.4.5 Adopción de un plan**

El avance a lo largo de las etapas descritas en la figura 10-7 exige conciliar muchas opiniones antes de encontrar una solución aceptable. La selección del "mejor" plan y la adopción final de un programa comprenden una decisión política en la cual se deben considerar muchos factores (por ejemplo, condiciones económicas, nivel de desempleo, otras prioridades, etc.). La persona que planea no debe elegir una alternativa; esto es prerrogativa de las partes que encargaron el estudio para elegir entre las opciones que han sido presentadas. No obstante, quien planea es quizá el que mejor reconoce el riesgo que implica pronosticar la respuesta de un sistema dinámico, y él es quien debe predecir las consecuencias de la decisión que se tome, cualquiera que ésta sea.

La figura 10-7 muestra con claridad la necesidad de iteración en la planeación. A menos que el proceso conserve la flexibilidad necesaria para examinar y volver a definir sus acciones a medida que se pone al descubierto nueva información, las conclusiones de la planeación pueden quedar invalidadas, y esto ocasionaría el distanciamiento de las personas cuyo apoyo es necesario para que el plan tenga éxito. Por lo general se requiere uno o más ciclos del proceso de planeación para proporcionar por igual a quienes planean y al público el discernimiento indispensable para tomar decisiones sensatas.

La planeación no termina con la selección de una alternativa. Por el contrario, la opción se puede poner a prueba mediante estudios piloto que lleven a una posible reevaluación del programa, o el proceso de planeación puede pasar al modo de puesta en práctica. Es durante la etapa de puesta en práctica que se atacarán los problemas o consecuencias de los cambios provocados por el proyecto mismo o por los nuevos acontecimientos que se produzcan en la cuenca colectora. La administración ininterrumpida de los recursos hidráulicos por vigilancia continua y acciones de seguimiento será necesaria para conservar la confianza del público en el plan.

### **10.5 CONTROLES LEGISLATIVOS**

En Estados Unidos y Canadá, así como en Europa, el control primario de los recursos hidráulicos está en manos de instituciones y organismos creados por los gobiernos, tanto federales como estatales (o provinciales), bajo su encomienda de servir al interés público. Instituciones federales como el U.S. Power and Resources Service (Servicio de energía y recursos de EUA, antes Bureau of Reclamation) o el Canadian Inland Waters Directorate (Dirección de aguas costeras de Canadá) y organismos estatales o provinciales como los departamentos de recursos hidráulicos o de recursos naturales, están facultados por el gobierno para planear y controlar el uso del agua. En situaciones específicas estas instituciones suelen delegar autoridad a otros organismos, como comisiones para la administración del agua, consejos de planeación y autoridades de conservación. Ya se ha mencionado el problema de la confusión jurisdiccional, en cuanto a su relación con la naturaleza omnipresente de los recursos hidráulicos. A esto se debe agregar la reticencia natural de muchas autoridades y consejos para la planeación del agua a renunciar al control de programas en los cuales han invertido un tiempo y esfuerzo considerables. Las situaciones de este tipo son inevitables porque ahora existen mecanismos legislativos para la creación de autoridades encargadas de la planeación que, si bien representan con mayor aproximación

las fronteras hidrológicas, en muchos casos dan origen a conflictos con los organismos existentes encargados de la administración del agua.

Para una persona que planea exitosamente los recursos hidráulicos, es prerequisite el ejercicio de considerable diplomacia, en especial cuando se trata de aguas internacionales. Nada sustituye al conocimiento de cómo enmarcar el proceso de planeación dentro del contexto de los muchos organismos que tarde o temprano habrán de participar. Esto requiere una exhaustiva noción de las autoridades existentes, de las herramientas legislativas que ellas utilizan para cumplir su propósito, y de las razones históricas de su existencia. La descripción de los diversos niveles de jurisdicción queda fuera del alcance de este libro; sin embargo, un breve bosquejo de las instituciones fundamentales y de su relación mutua nos proporcionará cierta perspectiva de su importancia en la administración de los recursos hidráulicos. La figura 10-8 indica los elementos principales de los sistemas estadounidenses y canadienses.

En Canadá, la división de la autoridad sobre los recursos hidráulicos entre los tres niveles de gobierno (federal, provincial y municipal) se especificó en la British North American Act (BNA; Ley británica-norteamericana), ahora incorporada en la Constitución canadiense de 1982. El gobierno federal tiene derechos legislativos sobre las aguas navegables, las pesquerías, las aguas de parques nacionales y terrenos federales, y las aguas en las que existen fronteras internacionales. El gobierno federal también comparte la jurisdicción sobre las empresas de irrigación y cualesquiera otras de recursos hidráulicos acordadas con las provincias. Las provincias han sido designadas por la constitución como únicos propietarios de los recursos hidráulicos comprendidos dentro de sus límites, con las excepciones que ya se han señalado. Esto confiere a las provincias el derecho a administrar, desarrollar, otorgar licencias y reglamentar los recursos hidráulicos para cualquier propósito público mediante el uso de los poderes legislativos que prevé la constitución. Los municipios están sujetos a supervisión provincial y en general se les asigna la responsabilidad por el abastecimiento público de agua y el tratamiento de aguas residuales. Ontario ha tenido éxito en la organización de los municipios en autoridades regionales de conservación para poner en práctica planes integrales de administración de recursos hidráulicos.

La Canada Water Act (Ley para el agua de Canadá) de 1970 fue aprobada para permitir al gobierno federal trabajar más de cerca con las autoridades provinciales de recursos hidráulicos a fin de facilitar una forma más flexible de planeación y financiamiento de proyectos hidráulicos de largo plazo en cuencas fluviales. De acuerdo con esta ley, se pueden formar consejos capaces de planear las cuencas fluviales cuando las autoridades federales y provinciales están de acuerdo en que son necesarios. Estos consejos están facultados para solicitar asesoría a la gente que planea respecto a los medios para utilizar los recursos hidráulicos con más eficiencia. Se fomenta el establecimiento de un programa extenso de vigilancia y presentación de informes a fin de mantener a todas las partes informadas acerca del trabajo que se lleva a cabo. En la mayor parte de estos proyectos, la reglamentación del uso del agua se expresa en términos de la calidad del agua, no de su cantidad (Environment Canada, 1975).

La situación en Estados Unidos difiere de la de Canadá en diversos aspectos. En este país los poderes federales abarcan una gama mucho más amplia de usos del agua. La defensa, las negociaciones de tratados, los impuestos y cualquier proyecto que sea para bien del país son actividades federales legítimas en lo tocante a recursos hidráulicos. El gobierno federal, al amparo de la U.S. Water Resources Planning Act (Ley para la planeación de los recursos hidráulicos de EUA) de 1965, tiene derecho a desempeñar tres papeles importantes en el desarrollo de los recursos hidráulicos dentro del país. Primero, el gobierno federal puede, a través del Water Resources Council (Consejo de recursos hidráulicos), formular y hacer cumplir normas y procedimientos

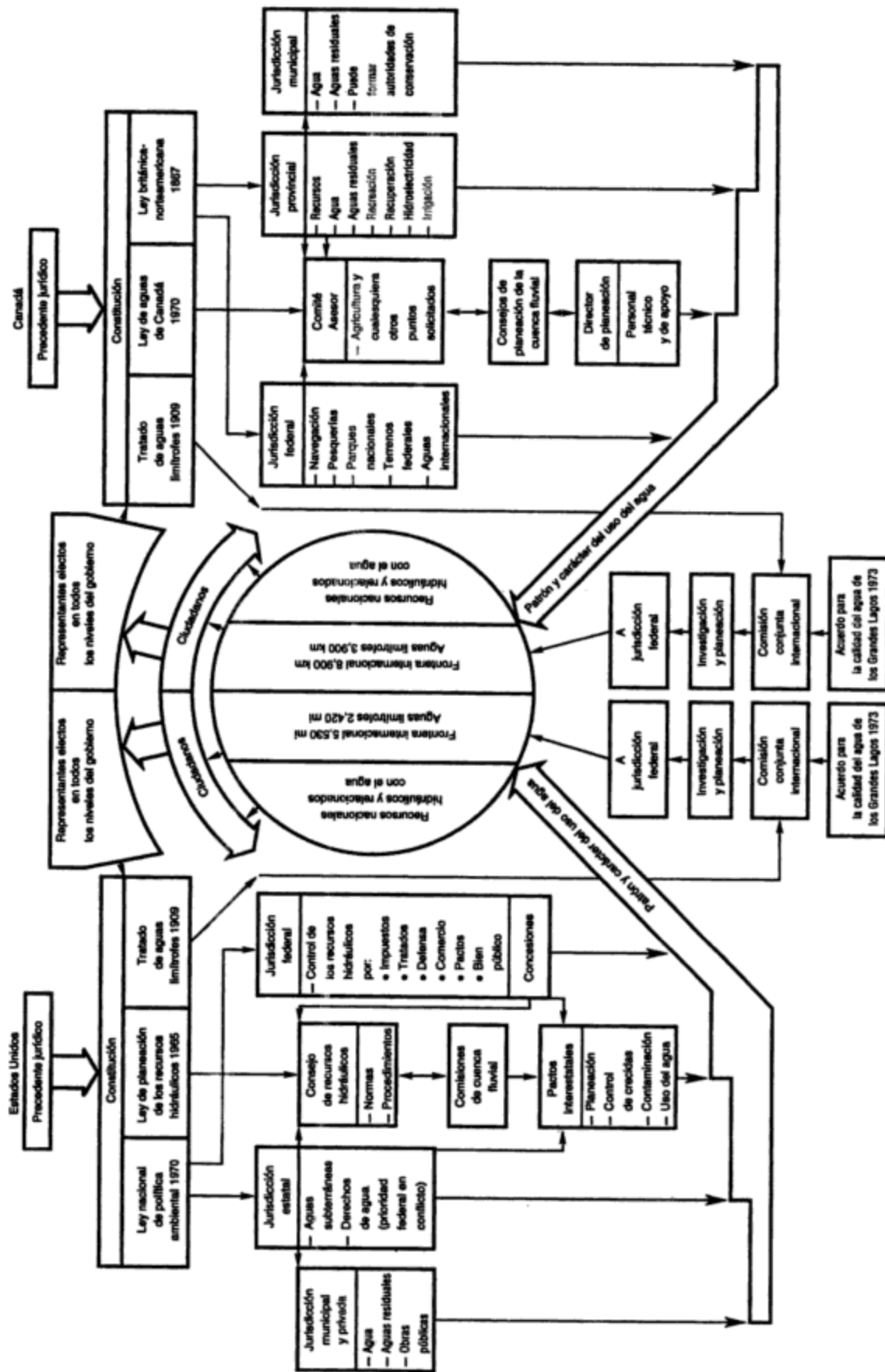


Figura 10-8 Control legislativo de los recursos hídricos en Estados Unidos y Canadá. Fuente: Adaptado de Environment Canada (1975).



que deben utilizar todos los organismos federales en la elaboración y evaluación de proyectos de recursos hidráulicos. Segundo, el gobierno financia programas estatales e interestatales de administración de aguas de cuencas fluviales. Puesto que anualmente se asignan grandes sumas para este propósito, el gobierno federal puede ejercer una influencia considerable para determinar cuáles proyectos se llevarán a cabo y en qué condiciones. Tercero, de manera similar a la función del gobierno federal canadiense, el de EUA prevé la creación de comisiones de cuencas fluviales para coordinar la planeación de proyectos de recursos hidráulicos.

Además de estos tres arreglos que se permiten bajo la Water Resources Planning Act, otro tipo de acuerdo, llamado **pacto**, suele utilizarse cuando las necesidades administrativas de un sistema hidráulico interestatal van más allá de las limitaciones financieras y jurisdiccionales de los estados individuales. Bajo el pacto, en caso de que existan intereses federales y estatales que se traslapen en un área de jurisdicción de recursos hidráulicos, las necesidades federales tienen prioridad. Las actividades del estado en la administración de recursos hidráulicos son, en primer término, el arbitraje de los derechos sobre las aguas y la distribución de los recursos hidráulicos, tanto aguas de superficie como subterráneas, a través de su poder sobre los derechos de propiedad individuales. Los municipios, cuya autoridad depende de los estados, en general administran el abastecimiento de agua, el tratamiento de aguas residuales y las obras públicas locales.

Gran Bretaña y Francia están muy orientadas hacia las técnicas integrales de administración del agua. En consecuencia, ambos países se apoyan en autoridades de cuenca fluvial que fungen como unidades de planeación e implantación, las cuales operan de manera congruente con la política gubernamental de recursos hidráulicos. En Gran Bretaña las autoridades fluviales reglamentan la extracción y la descarga de agua mediante el pago de derechos. En Francia, la administración de todos los aspectos de los recursos hidráulicos se facilita por los extensos poderes que se confieren a las autoridades de las cuencas fluviales. Los cargos a usuarios también son un aspecto fundamental de su sistema regulador (Environment Canada, 1975).

La administración de los recursos hidráulicos que se comparten con otras naciones ha probado ser difícil en el marco usual de las jurisdicciones de recursos hidráulicos. Las instituciones que se han creado especialmente para manejar este problema han tenido mucho más éxito en este sentido. De los 8,900 km de frontera entre Canadá y Estados Unidos, 3,900 km están sobre agua. Este hecho llevó a un reconocimiento temprano de la necesidad de trabajar de manera conjunta. El Boundary Waters Treaty (Tratado de aguas limítrofes) de 1909 autorizó la creación de la International Joint Commission (Comisión conjunta internacional). Este organismo asesor, que incluía miembros de ambos países, fue facultado para coordinar y negociar todos los programas de recursos hidráulicos para aguas compartidas por ambas naciones. La posterior ratificación del Canada-U.S. Great Lakes Water Quality Agreement of 1972 (Acuerdo para la calidad del agua en los Grandes Lagos de Canadá y EUA de 1972) reconoció la importancia inmediata que ambos países, con grandes poblaciones centradas en torno a los Grandes Lagos inferiores, daban a los problemas de contaminación de aguas limítrofes. En las enmiendas de 1987 al acuerdo, se puso énfasis en la eliminación de sustancias químicas persistentes, tóxicas y bioacumulativas mediante la prohibición o el cese gradual de su producción, uso, almacenamiento y eliminación.

## 10.6 INFLUENCIAS POLÍTICAS

### 10.6.1 Grupos de presión

Aunque una planeación exhaustiva y una legislación integral son ingredientes indispensables para el desarrollo ordenado de los recursos hidráulicos, otras influencias suelen ser más impor-

tantes para determinar qué es lo que se construye a final de cuentas. La figura 10-8 ilustra la medida en la cual la planeación está controlada por otras dependencias y organismos gubernamentales. De igual importancia en el proceso de toma de decisiones son los grupos con intereses especiales, como los de ambientalistas, de contribuyentes, las organizaciones empresariales y los grupos de acción pública. Éstos, organizados para atraer atención hacia sus inquietudes particulares, solicitan apoyo político para oponerse a (o promover) proyectos de desarrollo de recursos. Pocos proyectos de recursos hidráulicos se llevan adelante en la actualidad sin un debate animado entre aquellos cuyos intereses, muchas veces en conflicto, están involucrados en él. Este tipo de intercambios ayudan a aclarar los problemas, aunque no necesariamente para la satisfacción de todos.

El proceso político tiene como base algo más que el debate público y la enumeración de las preferencias. Los grandes intereses empresariales están muy conscientes de las mayores oportunidades de desarrollo asociadas con los proyectos hidráulicos. Sus puntos de vista, respaldados por un intenso cabildeo político y contribuciones a quienes los apoyan, se presentan de manera convincente. Por otra parte, los ambientalistas apremian a los políticos para que consideren inquietudes no económicas que suelen estar en conflicto con las necesidades públicas o privadas de agua a bajo costo. También el público puede ejercer una presión considerable a través de sus representantes electos. Por lo general se considera que estos conflictos se producen entre las grandes empresas y los ambientalistas, o entre el público y el gobierno. Esta idea se fomenta en virtud de la tendencia de los medios de comunicación a simplificar las cuestiones complejas. De hecho, sucede con frecuencia que segmentos de grupos similares se encuentran en lados opuestos de cuestiones que son objeto de disputa. Éste fue sin duda el caso en California cuando se dio el debate sobre el Canal Periférico. Este proyecto, cuyo propósito es desviar agua hacia el sur de los ríos Sacramento y San Joaquín antes de que desagüen en el área del delta de la bahía de San Francisco, se analiza en la sección 10.8.

Aquellos que proponen proyectos de recursos hidráulicos deben explorar todas las vías posibles para resolver las objeciones a las propuestas. El último recurso, la acción judicial, origina prolongadas y costosas demoras, lo cual puede ser precisamente lo que intentan conseguir los opositores.

### 10.6.2 Políticas administrativas

De los factores que determinan el alcance del trabajo por hacer, el costo es quizá el más significativo. El hecho de que existen dificultades para aplicar el análisis económico tradicional a beneficios como el control de crecidas y la calidad del ambiente no significa que las fuerzas económicas no influyan. Esto quiere decir que las relaciones económicas no se entienden con la claridad suficiente para predecir los efectos económicos de estos proyectos. Rara vez se cobra el costo real de suministrar, almacenar, controlar y tratar el agua. La tabla 10-2 proporciona cierta idea de los precios que se cobran por el agua que surten los servicios públicos y las autoridades hidráulicas en Estados Unidos y Canadá. El subsidio de los servicios de recursos hidráulicos es el medio principal de que se vale el gobierno para asegurar que el agua estará disponible cuando y donde se necesite. Por tanto, el grado en el cual se subsidian los beneficios del agua refleja la política social y económica. La tabla 10-3 ilustra la relación entre las tarifas para el agua hidroeléctrica, municipal y de irrigación y los costos reales de la maquinación atribuible a estos usos en el Proyecto del Valle Central de California. Las proporciones costo/beneficio indican que el agua para uso municipal e hidroeléctrico cuesta, respectivamente, alrededor de tres y dos veces el costo promedio de producción. El efecto de esta asignación de costos es el subsidio a las granjas, las cuales pagan menos del 25% del costo promedio.

**TABLA 10-2 CARGOS REPRESENTATIVOS POR AGUA EN ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ, 1990**

Uso	Cargo típico (dólares de EUA)		
	por acre·ft	por 1000 gal	por 1000 m <sup>3</sup>
Doméstico	\$400.00–800.00	\$1.20–2.40	\$320.00–640.00
Industrial	200.00–400.00	0.60–1.20	160.00–320.00
Irrigación	20.00–40.00	0.06–0.12	16.00–32.00

Fuente: Adaptado de Environment Canada (1989); AWWA (1987); Hundley (1992).

**TABLA 10-3 ASIGNACIÓN DE BENEFICIOS Y COSTOS DE RECURSOS HIDRÁULICOS: PROYECTO DEL VALLE CENTRAL, CALIFORNIA**

Participantes	Capacidad del proyecto (% de uso)	Costo no subsidiado (% de participación)	Costos del proyecto (% de participación)	Proporción costo/beneficio <sup>a</sup>
Residenciales, comerciales, industriales	3	10	8.7	0.34
Energía hidroeléctrica	34	73	63.5	0.54
Granjas irrigadas	63	17	14.8	4.26
Gobierno federal	0		13.0	0
Total	100	100	100	

<sup>a</sup>Costo/beneficio = % de uso de la capacidad del proyecto/% de participación de los costos del proyecto.

Fuente: Adaptado de Taylor (1971, p. 121).

### Ejemplo 10.5

Con base en los valores promedio para los cargos típicos por agua que se muestran en la tabla 10-2 y el porcentaje de uso de la capacidad del proyecto que se indica en la 10-3, determine (a) cuál sería el cargo promedio a los usuarios si todos ellos pagaran la misma tarifa (no se tome en cuenta el 13% de subsidio gubernamental) y (b) el subsidio, en porcentaje, que proporcionan para el agua de irrigación los demás usuarios.

**Solución** Suponga una cantidad conveniente de uso de agua de, por ejemplo, 100,000 unidades (m<sup>3</sup> o gal). En ese caso tenemos la siguiente tabla:

Uso del agua	Uso del agua %	Costos unitarios (\$)		Costos (\$) por participación de:	
		por 1000 m <sup>3</sup>	por 1000 gal	100,000 m <sup>3</sup>	100,000 gal
Municipal	3	\$480.00	\$1.80	\$ 1,440.00	\$ 5.40
Hidroeléctrico	34	240.00	0.90	8,160.00	30.60
Irrigación	63	24.00	0.90	1,512.00	5.67
Total	100			11,112.00	41.67

(a) El costo promedio del agua para los usuarios es

$$\text{\$111.12 por } 1000 \text{ m}^3 = \text{\$0.42 por } 1000 \text{ gal}$$

(b) El porcentaje de subsidio para el agua de irrigación es

$$\frac{\text{\$111.12} - \text{\$24.00}}{\text{\$111.12}} \times 100 = 78.4\%$$

Existen dos problemas con el programa de subsidios de California: no ha alentado el uso eficiente del agua necesaria en un estado que se aproxima al límite de sus recursos hidráulicos, y ha permitido a quienes tienen grandes propiedades de tierras poco rentables, obtener fuertes utilidades por el uso de agua de irrigación subsidiada para elevar el valor de los terrenos y producir cultivos valiosos. Esta transformación de los recursos públicos en riqueza privada de unas pocas agroempresas grandes fue prevista y restringida por la National Reclamation Act (Ley nacional de recuperación) de 1902. La ley limitó el uso de recursos hidráulicos estatales subsidiados a propietarios que residían en 65 ha (160 acres) o menos de tierra. Sin embargo, en 1982 el intenso cabildeo promovido por las agroempresas convenció a la legislatura de California a elevar la limitación de tamaño a 390 ha (960 acres), con lo cual se aumentó el subsidio obtenido por los grandes intereses agrícolas. Cuando el impuesto predial se utiliza para financiar parte del costo de un proyecto hidráulico, el subsidio para los usuarios del agua de irrigación es aún mayor. La razón de esto es que las áreas con altos avalúos catastrales y una pequeña proporción del uso total de agua (las regiones urbanas) pagan una porción desproporcionadamente grande de los costos en comparación con las granjas con bajo impuesto predial y gran uso de agua. El ejemplo siguiente ilustra las sumas que están en juego.

**Ejemplo 10.6**

En California los “distritos” de aguas locales adquieren el agua de los proyectos hidráulicos federales y estatales para su ulterior distribución a los usuarios individuales de la misma. Si el 60% de los costos de los proyectos se cargan al catastro general y a otras fuentes, y el resto se cobra directamente a los usuarios, estime el subsidio público total efectivo por acre de tierra irrigada si un acre requiere 4 acre · ft (1,234 m<sup>3</sup>) por año. Suponga que los cargos directos se distribuyen en la proporción que se muestra en la tabla 10-3 y que el distrito cobra al irrigador \$30.00/acre · ft (\$24.00/1,000 m<sup>3</sup>).

¿Qué aumento en el subsidio ganó una agroempresa con 960 acres cuando el límite de propiedad de tierras especificado en la Ley de recuperación de 1902 se elevó de 160 a 960 acres?

**Solución** El cargo anual por acre a los granjeros por el agua estatal utilizada en irrigación es

$$\frac{4 \text{ acre} \cdot \text{ft}}{\text{acre} \cdot \text{año}} \times \frac{\text{\$30}}{\text{acre} \cdot \text{ft}} = \text{\$120.00 por acre/año}$$

El costo anual para el estado por el suministro de agua de irrigación si los usuarios pagan el 14.8% (tabla 10-3) es

$$\frac{\text{\$120.00}}{\text{acre}} \times \frac{1}{0.148} \times \frac{1}{0.40} = \text{\$2027.00 por acre/año}$$

de modo que el subsidio es

$$\text{\$2027.00} - \text{\$120.00} = \text{\$1907.00 por acre/año}$$

El aumento en el subsidio anual para una agroempresa propietaria de 960 acres de tierras sería de

$$(960 - 160 \text{ acres}) \times \$1907.00/\text{acre} = \$1,525,600.00 \text{ por año}$$

*Nota:* Para simplificar, los gastos y subsidios estimados para los irrigadores, como se calcularon, no toman en cuenta el impuesto predial. El costo del agua para los irrigadores aumentaría, por tanto, en los pagos por agua con base en el avalúo catastral, y los subsidios que se muestran se reducirían en una cantidad similar. Los cambios serían relativamente pequeños.

Los gobiernos y sus organismos son los únicos participantes en el desarrollo de recursos hidráulicos que pueden imponer una perspectiva de largo plazo en cuanto a calidad y cantidad del agua. La preocupación de los usuarios privados se limita a los gastos que prometen un rápido rendimiento. Este punto de vista es incompatible con las décadas que suelen ser necesarias para formular e implantar políticas de uso de agua. El hecho de que el personal de los organismos reguladores del gobierno está constituido por empleados civiles y no por funcionarios electos permite establecer políticas de largo plazo y evitar decisiones basadas en el oportunismo político para obtener ganancias de corto plazo.

## 10.7 DESAFÍOS FUTUROS

El agua dulce es un recurso renovable limitado. La creciente demanda de agua limpia y segura por parte del público, la industria y la agricultura nos ha hecho tomar conciencia de que las prácticas del pasado, que suponían una provisión infinita de agua a bajo costo, ya no pueden continuar. La actividad humana ha afectado la cantidad y la calidad de todos los cuerpos de agua de la Tierra. El futuro uso provechoso del agua dependerá de nuestra determinación para emplear nuevos métodos sociales, técnicos, económicos y políticos en el manejo de la administración de los recursos hidráulicos. La razón por la cual estas técnicas son tan necesarias en la actualidad es que hemos alcanzado un punto en muchas áreas donde la demanda de agua supera la provisión disponible. La oportunidad de contribuir a la prosperidad y el bienestar de muchos millones de personas mediante la adquisición de mejores habilidades administrativas es un reto emocionante para quienes participan en el desarrollo de recursos hidráulicos.

Los desafíos futuros en los aspectos técnicos de la administración de los recursos hidráulicos son múltiples. Nuestro conocimiento del ciclo hidrológico se limita a entender las rutas principales de movimiento del agua, y todavía somos incapaces de predecir con alguna exactitud la calidad y cantidad en diferentes puntos del ciclo. Los hidrólogos apenas comienzan a examinar la compleja relación entre los patrones de precipitación pluvial y de desagüe. Con base en abundantes datos de campo, los geólogos estudian el movimiento del agua a través de suelos y rocas porosas para que esta información acerca del comportamiento de las aguas subterráneas se pueda incorporar a los programas de planeación hidráulica. Meteorólogos, limnólogos, biólogos y muchos científicos más están contribuyendo a nuestro conocimiento sobre los sistemas naturales que relacionan a los humanos con su medio. Una mejor comprensión de los fenómenos naturales permitirá tomar decisiones más inteligentes en la administración de los recursos hidráulicos. A medida que las demandas de agua crecen, la cantidad fija de agua dulce disponible para el ciclo hidrológico obligará, tarde o temprano, a realizar grandes esfuerzos para reciclar y volver a utilizar las aguas residuales municipales e industriales. La conservación es otra forma de utilizar de manera más eficiente los recursos hidráulicos limitados. Por ejemplo, la reducción de las pérdidas excesivas por evaporación de los embalses y

acueductos por medio de películas superficiales y cubiertas de membrana resulta práctica en ocasiones. La irrigación por medio de sistemas de rociadores reduce las grandes pérdidas por filtración asociadas con el método de irrigación de cresta y surco que se ha utilizado durante 5,000 años. El método de "goteo", ideado en Israel en la década de 1950, emplea tuberías perforadas que se instalan arriba o abajo de la superficie del suelo. Al llevar el agua de forma directa a la zona radicular, las pérdidas de agua se reducen, del 50 o 60% que se pierde por los métodos convencionales, a tal vez el 15 o 25%. En 1985 se estimaba que 1 millón de acres (405,000 hectáreas, alrededor del 1% del área irrigada total) se regaban por goteo en Estados Unidos. El uso urbano del agua también se puede restringir por diversas técnicas, como la medición de los servicios de agua, cargos mayores por uso, costos unitarios crecientes al aumentar la cantidad, uso obligatorio de accesorios de ahorro, así como la educación del público. La conservación por todos los medios posibles debe ser parte de la política de administración del agua, ya que su uso eficiente es importante.

La desalinización es una de las opciones técnicas en la planeación de los recursos hidráulicos que cada vez más se convierte en una realidad económica. Ideada originalmente para extraer agua pura del mar, su uso potencial es ahora más amplio. Los métodos tradicionales de desalinización empleaban la destilación, en la cual la ebullición y ulterior condensación del vapor dejaba la sal y otras impurezas como residuos. El enorme consumo de energía para el calentamiento provoca que el proceso sea demasiado costoso (hasta 10 veces el costo de la mayor parte del agua municipal) y limita su aplicación a los países con abundante provisión de energía, en particular las naciones del Golfo Pérsico, que son ricas en petróleo. Los recientes desarrollos en la ósmosis inversa (OI), un proceso menos costoso en el cual la presión obliga al agua a pasar a través de una membrana permeable y deja atrás las impurezas orgánicas e inorgánicas, ha reducido los costos en más del 50%. Esto ha abierto la posibilidad de utilizar OI para purificar muchos tipos de agua contaminada, como las reservas de agua subterránea que se han vuelto salobres debido a la intromisión de agua salada, o aguas residuales industriales que son necesarias para complementar un suministro inadecuado de agua dulce. La planta de OI más grande del mundo, de 72.4 mgd (millones de galones por día) o 274,000 m<sup>3</sup>/día, cerca de Yuma, Arizona, se construyó para reducir la salinidad del agua de drenaje de 3,000 mg/L a 285 mg/L a fin de que el agua se pueda devolver al río Colorado para su reutilización en México (Applegate, 1986). En 1990 la ósmosis inversa constituía el 31% de la capacidad total mundial de desalinización, que es de alrededor de 3,500 mgd o  $13.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día (Brandt *et al.*, 1993). La desalinización puede ayudar a rectificar el desequilibrio entre la distribución geográfica desigual de los recursos de agua dulce y el deseo de desarrollar más tierras en áreas donde el agua es escasa.

La controversia en torno a los desarrollos para uso de aguas ha afectado en gran medida el proceso de planeación. Hace una generación no se oía hablar de la investigación exhaustiva y las consultas en apariencia interminables que se exigen ahora para los proyectos de recursos hidráulicos. El reto más grande para la gente encargada de la planeación de estos recursos es la creación de un método aceptable para evaluar propuestas alternativas, tomando en consideración las múltiples funciones económicas y no económicas que estos proyectos deben desempeñar ahora. Los métodos deben permitir una interpretación amplia de la planeación de cuencas pluviales que incluya todos los aspectos de mejoramiento social, crecimiento económico y calidad del ambiente natural. Para equilibrar estos objetivos múltiples a fin de maximizar el disfrute social general puede ser necesario que un beneficio no se optimice o que se pierdan otros. La educación del público en las opciones específicas, compensaciones y limitaciones del

proyecto es indispensable para dar cabida a sus preferencias en la planeación. La misma gente encargada de planear ha sido culpable de presentar recomendaciones y políticas demasiado generales para ser aplicadas por municipios e industrias con una disponibilidad de fondos limitada. La planeación que no se lleva a la práctica, por la razón que sea, ha fracasado en su propósito. El análisis de costo-beneficio debe reducir todos los factores que intervienen en un proyecto a términos de dólares. Sin embargo, la inflación y el fluctuante costo del dinero dificultan la evaluación de los proyectos de largo plazo. La planeación puede reducir esta incertidumbre por medio de un cuidadoso trabajo escalonado en etapas a fin de mantener la máxima flexibilidad para permitir modificar el proyecto en el futuro.

Los procedimientos empleados por los diversos organismos para evaluar los proyectos de recursos hidráulicos todavía están en evolución. Si se va a desarrollar un enfoque estandarizado, o incluso si ello es deseable, es algo incierto. Sin duda alguna los métodos serán más complicados. Los controles legislativos del uso del agua han evolucionado a partir de precedentes constitucionales y legales. En ocasiones éstos son inadecuados para manejar los problemas contemporáneos de los recursos hidráulicos que implican desviación de corrientes, control de la contaminación del agua, conflictos de jurisdicción y otras dificultades similares. La formación de una autoridad única responsable de una cuenca colectora completa ha resuelto algunos de los problemas, aunque no todos. Cuando la jurisdicción de un organismo cruza fronteras políticas, ya sea de manera local, nacional o internacional, es de esperar que ocurran controversias. El éxito de los grandes proyectos de recursos hidráulicos del futuro dependerá de la estrecha cooperación entre el organismo patrocinador, los representantes electos, los medios de comunicación, el público y otros participantes. El fomento de esta armonía es responsabilidad de quienes planean, ya que tendrán que conocer a la perfección las estructuras jurídicas y políticas en las cuales deben operar. El hecho de no generar una actitud cooperativa puede no sólo debilitar el apoyo al proyecto, sino incluso generar una fuerte oposición hacia su puesta en práctica.

Los economistas han tenido dificultades para determinar cargos equitativos por los recursos hidráulicos. A diferencia de la mayor parte de los servicios públicos, cuyo valor se basa en lo que la gente está dispuesta a pagar, el agua, al menos en los países desarrollados, se ha visto como un producto gratuito y, a causa de su abundancia, de poco valor. Los gobiernos han reforzado esta actitud con su política de subsidiar el abastecimiento como un instrumento para alentar el desarrollo. En el sureste asiático el problema del financiamiento de los proyectos hidráulicos es aún más difícil porque la gente cree que el agua es un regalo de Dios y es gratuita para todos. En Egipto en 1985, costaba alrededor de 10 centavos de dólar purificar y entregar 1 m<sup>3</sup> de agua del Nilo; el cargo que se hacía al propietario de una vivienda era de más o menos 1 centavo.

La determinación de lo que las personas deben o están dispuestas a pagar por el agua y los beneficios asociados con ella con base en lo que han pagado en el pasado no es realista. Quizá los científicos sociales que se ocupan de problemas de recursos hidráulicos serán capaces de sugerir una base lógica para cargar los costos. Hasta entonces, es probable que las tarifas se continúen fijando de conformidad con los inadecuados cargos anteriores.

Se necesitan, de manera urgente, mejores técnicas de administración del agua en los países en vías de desarrollo para reemplazar las actuales prácticas ineficientes y riesgosas. Responder por qué deben hacer esto si los países desarrollados hasta hace poco tiempo seguían el mismo camino dañino para el medio, no es difícil de explicar. Sin duda las necesidades de ambos mundos son diferentes. En los países en vías de desarrollo, donde alrededor del 80% de todas las enfermedades se atribuyen a un abastecimiento inadecuado de agua, la justificación de

una administración apropiada debe tener como base no el disfrute estético ni los beneficios recreativos, sino las mejoras necesarias al abastecimiento y saneamiento del agua para reducir las enfermedades y proteger la salud pública, al mismo tiempo que, de ser posible, se estimula la producción de alimentos y el desarrollo industrial. Es claro que, en virtud de su predicamento, los países en desarrollo tienen una necesidad mayor de la administración eficaz del agua que las naciones desarrolladas. Al modificar los aspectos institucionales y tecnológicos de las modernas técnicas de administración para los recursos del agua, con la intención de favorecer las diferencias prioritarias entre los países desarrollados, es necesario que todos esos métodos sean usados. El nombre que se le da a este tipo de enfoque es *tecnología apropiada*.

A medida que la incidencia de reservas de agua contaminadas, escasez y daños por inundación se multiplique de manera inexorable en el futuro, la necesidad de la administración de los recursos hidráulicos se hará más evidente. Al igual que la energía, el abastecimiento adecuado de agua limpia es indispensable para la forma de vida moderna. Nuestra respuesta en los años por venir gobernará, en gran medida, la calidad de la vida para las generaciones futuras. El éxito en esta área dependerá no tanto de los avances tecnológicos como de las mejoras a nuestras instituciones sociales, políticas y económicas, que han quedado muy atrás respecto al progreso científico.

## 10.8 ESTUDIO DE CASOS

Los problemas que plantea la administración de los recursos hidráulicos rara vez son tan simples como los que se describen en los ejemplos del 10.1 al 10.4. La mayor parte de ellos son complejos y específicos de la localidad, e intervienen en ellos grupos con intereses especiales cuyos objetivos causan conflictos. Se han seleccionado dos casos para ilustrar algunas de las dificultades que presenta la puesta en práctica de proyectos de recursos hidráulicos. El primero, el Canal Periférico, tipifica los conflictos sociales que pueden surgir respecto al uso del agua como consecuencia del intento por aumentar el abasto cambiando la dirección de flujos de agua de superficie. La información que se presenta se basa en los informes de Seckler (1971), Phelps *et al.* (1978), Baker (1980) y Hundley (1992). El segundo caso muestra cómo se aplicó la planeación del uso de la tierra para resolver problemas de calidad del agua en la hoya tributaria de Occoquan, así como la importancia de los programas de vigilancia de la calidad del agua. Se utilizaron las referencias siguientes: AWWARF (1991), FCOCP (1982) y Randall *et al.* (1977).

### 10.8.1 El Canal Periférico

California abarca un área de 411,000 km<sup>2</sup> (100 millones de acres) que se extiende alrededor de 1,500 km hacia el norte a lo largo de la costa del Pacífico, desde México hasta Oregon. Su producto bruto supera al de todas las naciones del mundo excepto tres (Hundley, 1992). En Estados Unidos California es líder en cuanto a agricultura, manufactura y población (29,760,000 en 1990). Uno de cada 10 estadounidenses vive en California, en gran parte en ciudades que circundan las metrópolis costeras de Los Ángeles, San Diego y San Francisco. El estado tiene como límites, al este la cadena montañosa de Sierra Nevada y al oeste el Océano Pacífico y las Montañas Costeras. La mayor parte de la precipitación pluvial se produce al norte de la latitud de San Francisco durante el invierno y la primavera. Sin embargo, el 75% del uso del agua tiene lugar en los dos tercios inferiores del estado durante el verano y el otoño. Una de las razones principales por las cuales la región de Los Ángeles se ha convertido en el centro de la actividad industrial de California y en una de las áreas metropolitanas más grandes del país es



el abasto de agua que recibe de la red estatal de embalses y acueductos que almacenan y transportan agua del norte húmedo al sur árido. De los 500 mm (2 pies) de precipitación anual que caen en California, el estado utiliza aproximadamente el 25%, o 50 millones de acres-pie (USGS, 1992). Alrededor del 68% de esto proviene de fuentes de superficie y el 32% se obtiene de aguas subterráneas.

La agricultura, que da cuenta del 81% del uso de agua dulce, siempre ha sido una industria importante en California. Los primeros colonizadores encontraron que el suelo era muy fértil, capaz de permitir el crecimiento de todo tipo de frutas y verduras cuando se irrigaba. A causa de la importancia del agua, las instituciones y leyes que gobiernan su uso han sido en muchas ocasiones objeto de debate público. Durante las décadas de 1920 y 1930 los agricultores del valle de San Joaquín, siguiendo el ejemplo de San Francisco y Los Ángeles, decidieron que las aguas de los ríos Sacramento y San Joaquín se podían almacenar y trasladar hacia el sur por medio de una serie de canales y estaciones de bombeo. Aunque la legislatura estatal aprobó el financiamiento, la Gran Depresión se interpuso y obligó al gobierno federal a hacerse cargo del Central Valley Project (CVP, Proyecto del Valle Central). Se construyeron entonces la presa de Shasta en el río Sacramento, la presa de Friant en el San Joaquín y varios acueductos. Estas obras daban servicio a los usuarios del área del delta y también a los agricultores del Valle Central (véase la figura 10-9).

El U.S. Bureau of Reclamation (ahora el U.S. Water and Power Resources Service (Servicio de recursos hidráulicos y eléctricos) era el encargado de administrar el CVP, incluso de hacer respetar la Ley federal de recuperación de 1902, la cual limitaba el tamaño de las granjas que recibían agua subsidiada a 160 acres (se aumentó a 960 acres en 1982). La demanda de más agua por la floreciente población de posguerra de Los Ángeles y por grandes agroempresas que buscaban esquivar la ley de 1902 indujo al estado a proponer la adquisición del CVP del gobierno federal. Después de rechazar el precio que pedían las autoridades federales, California propuso represar el río Feather como un importante centro de almacenamiento para otra serie de acueductos que se extendían hacia el sur. Este plan, llamado State Water Project (SWP; Proyecto hidráulico estatal) fue aprobado por un margen reducido en 1960 a pesar de las objeciones de la gente del norte, quienes estaban inquietas por los grandes embalses que se estaban construyendo para beneficio de los granjeros y las ciudades del sur. El Department of Water Resources (DWR; Departamento de recursos hidráulicos) de California se creó para planear la operación no lucrativa del SWP. En la actualidad, las emisiones de agua del embalse de Oroville viajan por el río Feather hasta el delta del Sacramento/San Joaquín, atraviesan el delta donde surten a la ciudad de San Francisco y a los agricultores del área del delta, y después se bombean hacia el sur a lo largo de 640 kilómetros hasta una altura de 1 km más arriba del delta. En total, 23 presas y embalses, 9 acueductos, 22 estaciones de bombeo y 8 plantas de energía eléctrica componen este proyecto de 23,000 millones de dólares. El 90% de los derechos de agua en California se adquieren por medios jurídicos, o adjudicativos. El uso de agua adjudicativo está gobernado por leyes que exigen que el uso sea "razonable y benéfico". Los usos ribereños, aunque comprenden sólo el 10% de todo el uso de agua en el estado, por lo general tienen preferencia sobre los usos adjudicativos. Los organismos regionales no lucrativos de distribución que se conocen como **distritos de aguas**, de los cuales hay aproximadamente 1,000 dispersos por todo el estado, ejercitan sus derechos adjudicativos estableciendo contratos de entrega de agua con el SWP o el CVP federal. Los ingresos del distrito por concepto de esta agua son típicamente del 55% por cuotas de agua, 25% por impuestos a la propiedad y 20% de otras fuentes, aunque algunos distritos financian proyectos hidráulicos exclusivamente con los cargos por consumo de agua, en tanto que otros utilizan sólo el impuesto predial (Phelps *et al.*, 1978).



Figura 10-9 Principales proyectos hidráulicos en California.

El propósito del Canal Periférico propuesto, de 400 pies (120 m de ancho) y 43 mi (69 km) de largo, era el de permitir que el agua procedente del norte pudiera circunvalar el delta en el este y el sur a fin de aumentar la proporción de agua disponible para bombearse al CVP federal y al SWP de California. Propuesto por primera vez a mediados de 1960, este proyecto ha generado una acalorada controversia desde entonces. Se hicieron y perdieron carreras políticas con base en el proyecto, se formaron alianzas en ambos lados, y el cabildeo fue intenso.

Entre la gente que proponía el proyecto se contaba el DWR de California, los agricultores del valle de San Joaquín, el Metropolitan Water District (MDW; Distrito metropolitano de aguas) del sur de California (conocido como "Met") e intereses corporativos del sur. El DWR insistía en que para que el SWP pudiera satisfacer sus obligaciones contractuales futuras debía aumentar las entregas de agua de 2,900,000 acre · ft a 4,200,000 acre · ft, 700,000 acre · ft de los cuales

se esperaba que fueran aportados por el Canal Periférico. Aunque 31 distritos tienen derecho sobre esta agua estatal, dos de los del Met, que surte a 12 millones de personas de 131 comunidades de todo el sur de California, y un distrito de aguas del valle de San Joaquín conocido como la Kern County Water Agency (Agencia del agua para el condado de Kern), constituyen el 75% de la demanda. Estas dos organizaciones también apoyaron con entusiasmo el proyecto del canal. Ellas sostenían, con ayuda de estudios económicos y de ingeniería, que la continuidad del desarrollo de California y de su modo de vida dependían del aumento en los flujos de agua desde el área despoblada de la parte norte del estado.

Los críticos del plan no estaban de acuerdo. El uso del agua en California, argüían, era muy ineficiente bajo el sistema actual, el cual vinculaba de manera automática los derechos sobre el agua con el uso de la tierra. No había incentivos para que el agricultor utilizara menos agua bajo una política estatal que fijaba los precios para el agua nueva, incluyendo en el cálculo del costo promedio los costos de proyectos anteriores más económicos. Estas personas recomendaron un programa de precios más realista, llamado **fijación de precios marginales**, para reflejar el costo real de suministrar más agua por medio de la construcción de instalaciones mucho más costosas que otros proyectos más antiguos (Phelps *et al.*, 1978). El uso eficiente se alentaría incrementando las cuotas que se pagan por el agua a fin de que el impuesto predial, que todos los terratenientes pagan ya sea que utilicen agua o no, no se empleara para subsidiar el uso de agua. Otra propuesta fue permitir a los propietarios de derechos de agua vender ésta a otros usuarios dispuestos a pagar más por ella, con lo cual se crearía un "mercado" de agua que beneficiaría de manera automática al usuario más eficiente. Otras personas, no necesariamente partidarias del Canal Periférico, rechazaron esta idea diciendo que la enorme cantidad de capital privado generado por este uso de agua pública de bajo costo daría por resultado una redistribución inaceptable de la riqueza dentro de la sociedad, la cual anularía los beneficios de un mayor rendimiento. La eficacia del uso no regulado de las aguas subterráneas también se convirtió en tema de debate. Los terratenientes han considerado de manera tradicional las aguas subterráneas como un recurso que pueden utilizar sin restricción. No obstante, el agotamiento de las aguas subterráneas disponibles ha hecho necesaria la recarga de los acuíferos con aguas de superficie que es propiedad del estado. El costo de esto lo pagan muchos contribuyentes quienes, en efecto, subsidian las extracciones excesivas de aguas subterráneas. En consecuencia, la presión para una mejor administración del uso y recarga de aguas subterráneas ha aumentado de manera constante.

Las diferencias regionales crearon alianzas poco usuales entre diversos usuarios. Algunas grandes agroempresas del área de San Joaquín unieron sus fuerzas a las de los agricultores del área del delta para oponerse al canal, pues temían que el mismo redujese los flujos de agua dulce y permitiera que el agua salada penetrase más arriba en los canales en el verano y el otoño, cuando los flujos fluviales eran más bajos. Estos flujos reducidos también podrán ser incapaces de diluir en grado suficiente las aguas residuales municipales y el desagüe de irrigación cargado de sales para evitar problemas ambientales. Los agricultores del área del delta, quienes en el pasado se oponían a pagar por el agua de alta calidad que traía el SWP, diciendo que ellos no habían solicitado el proyecto, ahora buscaban contratos de agua y legislación sobre la calidad del agua para reducir al mínimo el efecto del Canal Periférico. El Fish and Wildlife Service (Servicio de pesca y vida silvestre) y el Marine Fisheries Service (Servicio de pesquerías marinas) de EUA se unieron a los ecologistas en su oposición al plan. Ellos afirmaban que el sensible entorno estuarino del delta, descrito por Goldman (1971), sería dañado por la reducción de los flujos de agua dulce que en la actualidad diluyen la contaminación y arrastran los residuos más adentro del mar.

Se temía un cierto grado de eutroficación (similar al que se produjo en el lago Erie) para el delta y la bahía de San Francisco. Los ecologistas predicen una reducción en los tipos de vida que sea capaz de soportar, además de muchas otras actividades, a la valiosa industria de la pesca.

A los residentes del norte del estado les preocupaba que el Canal Periférico hiciera posible la desviación de más ríos del norte, con lo que se evitarían las restricciones de agua y se alentaría el derroche (AWWA, 1982). La controversia que se generó en todo el estado causó que el Water and Power Resources Service de EUA redujese su estimación de los beneficios, inicialmente alta, y la participación federal en el proyecto, que en un momento dado estuvo asegurada, y que ahora parecía incierta.

Lo que sucedió fue que el referéndum para construir el Canal Periférico fue derrotado sin lugar a dudas (Proposición 9, junio de 1982), al igual que una votación posterior (Proposición 13, noviembre de 1982) que habría requerido que los distritos de aguas desarrollaran un programa de conservación para 1985. En intentos subsecuentes por llevar agua alrededor del delta del Sacramento/San Joaquín a las granjas y ciudades del sur, se siguen proponiendo (con fuerte oposición) nuevos proyectos de ley para el agua en la legislatura estatal.

En virtud de los costos prohibitivos de los nuevos proyectos hidráulicos masivos es posible que la planeación futura de los recursos hidráulicos tenga que encaminarse hacia la consecución de una distribución más equitativa y económicamente justificable del agua. En 1992 la industria agrícola consumió más del 80% del agua de California, pero sólo aportó alrededor del 2.5% a la economía estatal de 735 mil millones de dólares. Una reducción del 10% en el uso agrícola del agua satisfaría las necesidades urbanas del estado para los próximos 20 años (Vaux y Howitt). Desafortunadamente, las granjas (o ciudades) no han adoptado de forma extensa programas de conservación excepto cuando fueron obligadas a ello por los distritos de aguas durante la sequía de 1987-1991. Los subsidios masivos para el agua agrícola, que distribuyen de manera desigual los beneficios de proyectos de agua financiados con fondos públicos, todavía son blanco de críticas. En 1991, los agricultores pagaban entre \$22 y \$47 por acre · ft por el agua, en tanto que, por la misma agua, el Distrito Metropolitano de Aguas pagaba \$233 por acre · ft. Por añadidura, gran parte del agua subsidiada se utiliza para cultivos que están de más, como el arroz y el algodón, y que sin embargo tienen derecho a subsidios gubernamentales adicionales en forma de programas de apoyo a los precios. La limitación de superficie para las granjas que reciben agua subsidiada ha sido pasada por alto por las agroempresas (mediante la creación de "lagunas" o espacios vacíos en las reglas o especificaciones), con la consecuente concentración de la industria agrícola. Alrededor del 80% de las tierras de cultivo de California corresponde a propiedades de 1,000 acres (405 ha) o más, y el 10% de las granjas generan el 75% de la producción y el ingreso (Hundley, 1992). Es evidente que la poca seriedad de la limitación de superficie ha invalidado dos metas importantes de la Ley de recuperación: fomentar la granja familiar e impedir que los grandes terratenientes y especuladores se beneficien a expensas del gobierno.

No obstante, la gente encargada de la planeación de aguas se resiste a depender de manera exclusiva de medidas de conservación y de una redistribución de los recursos hidráulicos para satisfacer las demandas futuras. Se buscan constantemente fuentes adicionales de agua dulce. El Departamento de recursos hidráulicos de California, por ejemplo, está considerando el uso de programas de "banca de agua" para aumentar el abasto de agua del estado. La banca de agua consiste en desviar los flujos excesivos del delta durante los periodos de flujo elevado (principalmente el desagüe invernal) en instalaciones para almacenamiento al sur del Delta. Los excedentes de flujo en promedio son de 3 millones de acre · ft (3,700 km<sup>3</sup>), pero pueden alcanzar hasta 25 millones de acre · ft (30,800 km<sup>3</sup>) por año (Arora y Barnes, 1991). Los acuíferos

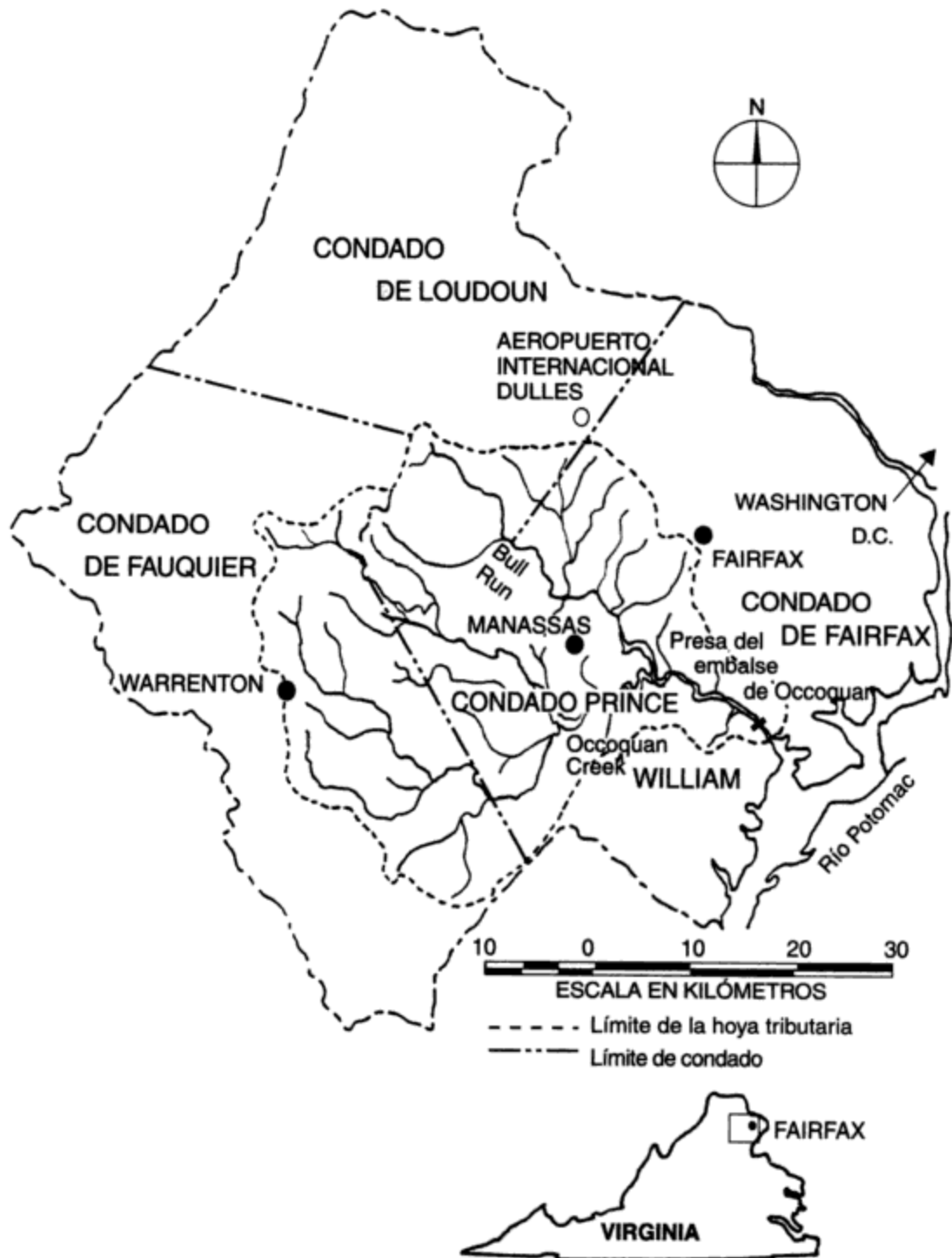
de California tienen una capacidad utilizable que se calcula en 140 millones de acre · ft (172,600 km<sup>3</sup>, cuatro veces la capacidad de los embalses de superficie), y su uso para el almacenamiento de agua va en aumento. A diferencia de los embalses de superficie, los acuíferos no se azolvan ni pierden grandes cantidades de agua por evaporación. Otra fuente de agua que podría desempeñar un papel fundamental en el futuro son las aguas residuales recicladas o recuperadas, las cuales podrían suministrar para el año 2000 hasta 800,000 acre · ft (986 km<sup>3</sup>) de agua adicional por año. Los costos de recuperación de aguas residuales en promedio son de \$500 a \$700/acre · ft (\$0.40 a \$0.57/m<sup>3</sup>) (Hundley, 1992). Luego de la sequía de 1989-1991, se renovó el interés por la desalinización de agua de mar, y a pesar de su costo (\$1,600 por acre · ft o \$1.30 por m<sup>3</sup> en 1992) varias comunidades costeras, entre ellas Santa Bárbara, la isla de San Nicolás y la isla de Santa Catalina, han adoptado este enfoque.

Es evidente que la controversia respecto a los recursos hidráulicos de California está lejos de haber concluido. No es probable que las leyes e instituciones relacionadas con el agua permanezcan intactas. Las amplias implicaciones económicas y sociales que plantea el debate sobre el Canal Periférico serán sin duda parte de toda planeación futura de recursos hidráulicos en California.

### 10.8.2 La hoya tributaria de Occoquan

Alrededor del 75% de las 580 mi<sup>2</sup> (1,500 km<sup>2</sup>) de la hoya tributaria de Occoquan del norte de Virginia no están urbanizadas. Sin embargo, la cuenca está situada cerca de la periferia sur del área metropolitana de Washington, D.C., y ciertas áreas están experimentando un desarrollo urbano muy rápido. Las dos hoyas secundarias más grandes, Occoquan Creek en el sur y Bull Run en el norte, abarcan el 50 y el 29%, respectivamente, del área total de la cuenca (véase la figura 10-10). La mayor parte del uso de la tierra en el área de Occoquan Creek es agrícola, en tanto que la hoya secundaria de Bull Run es en gran medida urbana y contiene porciones de los condados en rápido crecimiento de Fairfax y Prince William. En 1957 se construyó una gran presa sobre el arroyo, justo antes del punto donde éste desagua en el río Potomac, para crear una represa de 11,000 millones de galones ( $4.2 \times 10^7$  m<sup>3</sup>). El embalse de Occoquan suministra alrededor de la mitad del agua que abastece la Autoridad de aguas del condado de Fairfax, la cual da servicio a cerca de 700,000 personas, la mayoría de las cuales habitan en el condado de Fairfax. La otra fuente de la Autoridad de aguas, una toma sobre el río Potomac, no está disponible durante los años de sequía porque el Potomac no cuenta con grandes represas de almacenamiento.

A finales de la década de 1960 la calidad del agua en el embalse de Occoquan comenzó a deteriorarse a causa de una creciente eutroficación. Las floraciones algáceas perjudiciales, la desoxigenación del hipolimnio, las muertes de peces y los problemas de sabor y olor en el agua se estaban convirtiendo en algo común. La carga excesiva de nutrientes algáceos en la hoya tributaria estaba afectando seriamente el ecosistema además de generar costos de tratamiento de aguas más elevados a causa de los problemas de obstrucción de filtros y desinfección. En el informe de un asesor se concluyó que la fuente principal de fósforo en el embalse era el efluente de 11 pequeñas plantas de tratamiento de aguas negras (PTAN) en la hoya secundaria de Bull Run. Con base en ese estudio, el State Water Control Board (SWCB; Consejo estatal de control de aguas) en 1971 ordenó a los cuatro condados y las dos ciudades (Fairfax y Manassas) de la hoya tributaria reemplazar las 11 PTAN pequeñas por una sola que fuera regional y muy moderna, proyectada para eliminar el 99% del fósforo afluente. El SWCB también estableció el Occoquan Watershed Monitoring Laboratory (OWML; Laboratorio de vigilancia de la hoya de Occoquan) a fin de observar las tendencias de largo plazo en la calidad del agua



**Figura 10-10** Ubicación de la hoya tributaria de Occoquan, Virginia.

en toda la cuenca y para evaluar la eficacia de la nueva PTAN en cuanto a la reducción del aporte de fósforo al embalse. El OWML es financiado de manera conjunta por dos autoridades de aguas y los condados y ciudades de la hoya tributaria. Sin embargo, una universidad local se encarga de administrar el laboratorio y por tanto, en teoría, éste es capaz de funcionar con objetividad como un tercero independiente. Desde una red de estaciones de muestreo automatizadas, ubicadas en cada uno de los tributarios principales, se vigilan las cargas de contaminantes de diversas fuentes. Se analizan veinticinco parámetros de calidad del agua en cada muestra; la frecuencia de muestreo para casi todos los parámetros es diaria o semanal.

Los informes diarios del OWML indicaron que durante la década de 1970, antes de la construcción de la nueva planta regional, la calidad del agua continuó empeorando a pesar de las medidas que se tomaron en las 11 PTAN para mejorar sus tasas de eliminación de fósforo. La concentración de clorofila *a*, un compuesto que se utiliza extensamente como indicador de eutroficación, excedía con frecuencia el nivel crítico de 25 µg/L. A menudo se observaba que los niveles de fósforo eran superiores a 0.01 mg/L, suficientes para inducir floraciones algáceas. Motivados por estas observaciones, el OWML y la Northern Virginia Planning District Commission (Comisión distrital de planeación de Virginia del Norte) comenzaron a llevar a cabo estudios de campo cuyo objetivo era cuantificar las fuentes, nunca antes registradas, de nutrientes en el desagüe de aguas pluviales (es decir, fuentes no puntuales). Estos estudios pusieron de manifiesto que las fuentes no puntuales de fósforo y nitrógeno eran mucho más significativas de lo que se pensaba y que los usos urbanos de la tierra explicarían la mayor parte de las cargas futuras de fósforo. En un estudio, en el cual se aplicó un régimen especial de muestreo para medir la carga total de contaminantes en el desagüe, se encontró que el desagüe de aguas pluviales contenía el 90 y el 85% de la carga total de fósforo y de nitrógeno, respectivamente. No fue una sorpresa el hecho de que el nivel de mejoramiento de la calidad del agua en el embalse después del arranque de la PTAN regional en 1978 fuera menor de lo previsto.

Al comprender que se necesitaban medidas de protección a la hoya más apropiadas, el condado de Fairfax comenzó a evaluar los controles de uso de la tierra como medio para reducir la contaminación del desagüe urbano. En 1982, el condado autorizó el estudio de la cuenca de Occoquan para evaluar la eficacia de diferentes combinaciones de usos de la tierra y otras *prácticas óptimas de administración* (POA). Las POA se definen en términos generales como cualquier estructura (como estanques de retención o zanjas de infiltración) o actividad (como el barrido de calles o los programas de educación pública) que se utiliza para impedir o reducir la contaminación de fuentes no puntuales. La meta del condado era impedir el deterioro ulterior de la calidad del agua de Occoquan causado por actividades urbanas y agrícolas dentro del condado de Fairfax. Se emplearon modelos hidrológicos para simular el nivel de desagüe de fósforo, de descarga de este elemento en el embalse, y la respuesta en cuanto a calidad del agua a las cargas de fósforo. Después se hicieron predicciones de los efectos en la calidad del agua como consecuencia de combinaciones de cinco escenarios diferentes de uso de la tierra y tres opciones de POA. Con base en los resultados de estas simulaciones se hicieron dos recomendaciones principales, las cuales se pusieron en práctica más adelante:

1. Aproximadamente dos tercios del área de estudio de 100 mi<sup>2</sup> (260 km<sup>2</sup>, la porción de la hoya tributaria perteneciente al condado de Fairfax) se debería zonificar para uso no urbano, con un tamaño de lote mínimo de 5 acres (2 ha). Los usos no urbanos permisibles incluyen el residencial, espacios verdes, parques y posiblemente agricultura, siempre y cuando se apliquen suficientes POA agrícolas para asegurar que las tasas de carga de contaminantes no sean mayores que las correspondientes al uso residencial en lotes de 5 acres.

- 10.2.** El bombeo excesivo de pozos de agua dulce en áreas costeras puede causar la intrusión de agua salada (densidad 1.025). Según Masters (1974), por cada caída de 1 m en el nivel freático de las aguas subterráneas la interfaz de agua salada/agua dulce puede elevarse 12 m. Use un dibujo para explicar este fenómeno.
- 10.3.** Se utilizan aproximadamente 100,000 gal de agua en la producción de un automóvil. ¿Cuánto tendría que aumentar el costo del agua para este propósito de modo que el costo de producción de un automóvil para el fabricante, que es de \$10,000, aumente el 1%? Compare esto con el aumento en las tarifas de agua industrial necesario para producir el mismo incremento en el costo de producción de un periódico, que es de 20 centavos. Suponga que la producción de un periódico requiere 200 gal de agua y que el costo del agua industrial es de \$1.00 por 1,000 gal.
- 10.4.** La desalinización parece ser la clave para que podamos utilizar la inmensa provisión de agua de los océanos. Explique por qué es poco probable que la desalinización (incluso si los costos se redujeran al nivel de los de la mayor parte de los suministros de agua municipal) alguna vez se pueda emplear de manera generalizada en la irrigación, que es el uso más común del agua en el mundo. Tome en cuenta que el agua de mar contiene de 18,000 a 35,000 mg/L de sal.
- 10.5.** No obstante los miles de millones de dólares que se han invertido en mejoras para el control de las crecidas (presas, embalses, etc.) a lo largo de los últimos 40 años, los costos anuales de los daños por inundación no parecen estar disminuyendo. ¿Qué razones puede usted sugerir para explicar esta anomalía? Suponga que las condiciones meteorológicas han permanecido constantes (véase también la sección 4.5).
- 10.6.** El reciclaje de aguas residuales municipales es técnicamente (y a veces económicamente) factible para la mayor parte de los municipios. ¿Por qué su uso no es más común?
- 10.7.** Es casi seguro que nos veremos en la necesidad de aumentar la eficiencia del uso del agua. Ciertas personas piensan que eso sucederá sólo cuando se adopte un enfoque de "mercado libre" (en contraposición a uno de subsidio gubernamental) y también al abasto y distribución de agua. Enumere los argumentos principales a favor y en contra de este concepto de "mercado de agua" en el cual los derechos de uso se venderían al mejor postor, del mismo modo como se venden los derechos mineros o de explotación maderera.
- 10.8.** En la mayoría de los casos, los individuos que extraen agua de acuíferos no pagan cargos, a excepción de los gastos que implica el bombeo. Sin embargo, las altas tasas de extracción pueden hacer que baje el nivel freático lo suficiente para incrementar de manera significativa los costos de bombeo para otros usuarios de aguas subterráneas en el área. Por ejemplo, suponga que un agricultor con 65 hectáreas calcula que, si aumenta su bombeo lo suficiente para incrementar sus ingresos brutos anuales en \$200 por hectárea, el nivel freático bajará 30 cm/año. Si el costo de esta tasa de bombeo más elevada para esta granja es de \$30 por metro de elevación adicional, calcule por cuánto tiempo su relación costo/beneficio continuará siendo menor que la unidad. ¿Por cuánto tiempo será rentable el bombeo si el granjero además tiene que pagar un recargo para cubrir la mitad de los costos de bombeo adicionales, los cuales están aumentando a un ritmo de \$2.75 por año y por hectárea en 20 granjas vecinas, cada una de 65 ha de superficie?
- 10.9.** ¿Cuáles serían los cargos para los tres usuarios principales de California si los montos se igualaran y se retirara el subsidio federal del 13%? Traduzca esto a un porcentaje de aumento o de reducción respecto a los cargos actuales por agua. Utilice las cifras de la tabla 10-2 para determinar los costos actuales en cada categoría.
- 10.10.** Suponga que la autoridad del distrito de aguas del ejemplo 10.6 decide que los irrigadores deben pagar el 100% en vez del 40% del costo del agua proveniente de proyectos federales.  
 (a) ¿Cuánto más tendría que pagar una granja de 65 ha (160 acres) por su consumo anual de agua?  
 (b) ¿Cuál sería el costo adicional si el costo total del proyecto se cargara a los usuarios a la misma tasa y no se dispusiera del subsidio federal del 13%?
- 10.11.** El norte de California dispone de agua abundante durante la fusión de la nieve en primavera. Parte de este desagüe se almacena, otra porción causa crecidas, pero la mayor parte va directamente al



oceano sin utilizarse. El sur de California, que tiene recursos de agua limitados (pero la mayor parte de los votantes), ha experimentado episodios de escasez de agua a lo largo de su historia, de los cuales dos de los más graves han sido las sequías de 1976-1977 y de 1989-1991. El Canal Periférico era una solución (véase la sección 10.8) para suministrar agua a las áreas secas del sur, pero fue archivado después de que los votantes lo rechazaron. Ahora, las agroempresas están presionando al Gobernador para que reconsidere el canal u otras alternativas. Suponga que, como asesor ambiental del gobernador, se le ha solicitado a usted su opinión acerca de si se debe reconsiderar el Canal Periférico y cuáles son sus recomendaciones respecto a una política hidráulica estatal (de corto y de largo plazo). Su memorándum al gobernador no debe exceder de tres páginas mecanografiadas y debe:

- Tomar en cuenta las necesidades de los ciudadanos y la continuidad de la prosperidad del estado.
- Describir los supuestos que sirven de base a su propuesta.
- Indicar sus puntos de vista en relación con los controles (legislativos, económicos), la participación del público y la protección de los derechos que tienen los usuarios del agua.

## REFERENCIAS

- APPLEGATE, R. "World's Largest RO Desalting Facility". *Waterworld News* 2(3), mayo-junio (1986): 17-19.
- ARORA, S. K. y BARNES, G. W. "Analysis of Water Banking Projects as Additions to the California State Water Project". En *Water Resources, Planning and Management and Urban Water Resources*. Nueva York: American Society of Civil Engineers, 1991.
- AWWA (American Water Works Association). "42 Mile Canal Splits California Electorate". *Mainstream* 16(5), mayo (1982): 3-5.
- AWWA (American Water Works Association). "U.S. Water Rates". *Mainstream*, septiembre (1987): 5.
- AWWARF (American Water Works Association Research Foundation). "Effective Watershed Management for Surface Water Supplies." Denver, American Water Works Association, 1991.
- BAKER, L. B. "U.S. Aides Tread Water on Peripheral Canal". *Sacramento Bee*, 16 de marzo de 1980.
- BRANDT, D. C., LEITNER, G. F. y LEITNER, W. E. "Reverse Osmosis Membranes State of the Art". En *Reverse Osmosis: Membrane Technology Water Chemistry and Industrial Applications*, Z. Amjad (ed.) Nueva York, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- ENVIRONMENT CANADA. *Monograph on Comprehensive River Basin Planning*. Ottawa: Information Canada, 1975.
- ENVIRONMENT CANADA. *Municipal Water Rates in Canada*. Ottawa: Ministry of Supply and Services, 1989.
- FCOCP (Fairfax County Office of Comprehensive Planning). *Occoquan Basin Study Summary*. Condado de Fairfax, Va: Office of Comprehensive Planning, marzo de 1982.
- GOLDMAN, C. R. "Ecological Implications of Reduced Freshwater Flows on the San Francisco Bay-Delta System". *California Water*, D. Seckler (ed.) Berkeley: University of California Press, 1971, p. 121.
- HUNDLEY, N., JR. *The Great Thirst: Californians and Water, 1970's-1990's*. Berkeley: University of California Press, 1992.
- MASTERS, G. M. *Introduction to Environmental Science and Technology*, Nueva York, Wiley, 1974.
- MCGAUHEY, P. H. *Engineering Management of Water Quality*. Nueva York: McGraw-Hill, 1968.

- MILLER, G. T. *Living in the Environment*. Belmont, Calif.: Wadsworth, 1975; 2da. ed., 1979; 3ra. ed., 1982; 7a. ed., 1992.
- PHELPS, C. E., GRAUBARD, M. H., JAQUETTE, D. L., LIPSON, A. J., MOORE, N. Y., SHISKO, R. y WETZEL, B. *Effective Water Use in California: Executive Summary*. Santa Mónica, Calif.: Rand Corporation, 1978.
- RANDALL, L. W., GRIZZARD, T. J. y HOEN, R. C. *Progress in Water Technology*, 9(5/6) (1977): 151-156.
- SECKLER, D. (ed.) *California Water*. Berkeley: University of California Press, 1971.
- SMITH, D. "Alberta Dream That Won't Die". *Toronto Star*, diciembre 26 de 1981.
- TAYLOR, P. S. "The 160 Acre Law". En *California Water*, D. Seckler (ed.) Berkeley: University of California Press, 1971, pág. 121.
- USGS (U.S. Geological Survey). *Estimated Use of Water in the United States in 1990*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1992.
- VAN DER LEEDEN, F., TROISE, F. L. y TODD, D. K. *The Water Encyclopedia*, 2da. ed. Chelsea, Mich.: Lewis Publishers, 1990.
- VAUX, H., y HOWITT, R. "Managing Water Scarcity: An Evaluation of Interregional Transfers". *Water Resources Research* 20 (1984): 785-792.
- VISSMAN, W. JR. y HAMMER, M. J. *Water Supply and Pollution Control*, 5a. ed. Nueva York; Harper-Collins, 1993.

# CAPÍTULO 11

---

## Abastecimiento de agua

*Gary W. Heinke*

### 11.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo nos ocuparemos de las cuestiones relacionadas con la cantidad y la calidad de agua que se requiere para satisfacer las diversas necesidades de la sociedad: la selección de fuentes alternativas de agua, los medios para mejorar la calidad del agua que no ha sido tratada aplicando métodos adecuados, y el transporte y distribución del agua, con especial énfasis en el abasto público. El agua para irrigación, para abasto público y para la industria se debe extraer de la fuente. Los usos del agua que no implican extracción de la fuente incluyen el transporte, la recreación y la pesca. Cada uno de estos plantea diferentes restricciones a la calidad del agua.

La **irrigación**, con mucho el uso extractivo del agua de mayor magnitud, hace posible la agricultura en muchas áreas que de otro modo no podrían sustentar cultivos.

El **abasto público de agua** se refiere al agua limpia y segura para uso en hogares, escuelas, lugares de trabajo en hospitales, actividades comerciales y algunas industriales, limpieza de calles y protección contra incendios. El agua para beber, para la higiene personal y para fines sanitarios es de importancia capital para la salud y el bienestar de la sociedad.

La **industria** depende en alto grado de un abastecimiento adecuado de agua que se utiliza como componente de productos (por ejemplo, en bebidas), o de manera indirecta en el control del proceso de producción, como en el enfriamiento de máquinas que generan calor.

El **transporte** en barco ha sido desde tiempos antiguos un medio práctico y conveniente para trasladar personas y productos. El transporte por agua todavía es la forma de desplazamiento más económica en esta era de aviones, ferrocarriles y automóviles. La contaminación de aguas superficiales causada por las embarcaciones se ha convertido en un problema importante, y se han introducido normas para impedirla.

La **recreación** tiene alta prioridad en términos de los beneficios que la sociedad obtiene de una fuente de agua no contaminada. La natación y el baño, en particular, dependen de la disponibilidad de agua limpia. La contaminación de las aguas superficiales afecta de manera directa la propagación de los peces y demás flora y fauna acuáticas.

## 11.2 REQUERIMIENTOS EN LA CANTIDAD DE AGUA

### 11.2.1 Demanda de agua

La demanda total de agua sobre un sistema de abastecimiento de agua municipal es la suma de todas las demandas individuales (por limpieza de inodoros, riego de prados, enfriamiento industrial, lavado de calles, etc.) durante un periodo determinado. La demanda no es constante, sino que varía durante el día y de acuerdo con la estación. Las variaciones disminuyen a medida que aumenta el periodo a lo largo del cual medimos la demanda, de cada hora a cada día, cada mes o cada año. En consecuencia, la demanda de agua en una comunidad particular se especifica normalmente en términos de la **demanda media diaria**, la cual se define como sigue:

$$\text{demanda media diaria (en la comunidad)} = \frac{\text{uso total de agua en 1 año (volumen)}}{365 \text{ días (tiempo)}} \quad (11.1)$$

Las unidades son de m<sup>3</sup>/d o millones de m<sup>3</sup>/d, o galones por día (gpd), o millones de galones por día (mgd).

Es conveniente expresar la tasa de demanda por persona:

$$\text{demanda media diaria (por persona)} = \frac{\text{demanda media diaria en la comunidad}}{\text{población de mediados de año en la comunidad}} \quad (11.2)$$

En este caso las unidades pueden ser litros por persona (per cápita) por día (lpd) o galones por persona por día (gpd).

La tabla 11-1 proporciona información del consumo medio diario de agua per cápita para diversos usos en las ciudades estadounidenses y canadienses. Los datos representan un promedio de las tasas reales de utilización en varias ciudades y de distintas referencias. Se producen amplias variaciones respecto a estas cifras promedio, las cuales principalmente dependen del grado de actividad industrial y comercial y del clima de la ciudad. El consumo de agua ha aumentado a un ritmo de  $\frac{1}{2}$  a 1% por año en las últimas dos décadas. En la categoría de "otros" se incluyen usos como el combate a incendios, el lavado de calles y el agua que se pierde por fugas en uniones de tuberías.

En el hogar, el uso del sanitario y el baño con agua caliente o fría son los dos usos individuales más grandes del agua, casi equivalentes al 80% del uso doméstico total. El agua para

**TABLA 11-1 USO DE AGUA EN LAS CIUDADES ESTADOUNIDENSES**

Uso	Consumo medio diario por persona <sup>a</sup>		Porcentaje del uso total
	lpd	gpd	
Doméstico	300	79	45
Comercial	100	26	15
Industrial	160	44	25
Otros	100	26	15
<b>TOTAL</b>	<b>660</b>	<b>175</b>	<b>100</b>

<sup>a</sup>El consumo en las pequeñas comunidades residenciales y en las grandes ciudades industrializadas puede variar desde -50% a +50%, con estas cantidades.

Fuente: Adaptado de Steel y McGhee (1991).

beber y el uso en la cocina constituyen alrededor del 10%, y el 10% restante es para lavar la ropa, limpiar la casa y el automóvil y regar el jardín.

El consumo de agua en otros países desarrollados es en general más bajo que en Estados Unidos y Canadá. En los países subdesarrollados el consumo de agua puede ser mucho menor. La cantidad de agua que se utiliza depende de la existencia de un sistema hidráulico público; de la capacidad de éste para entregar agua; de si el agua se transporta por tuberías, camiones o a mano; de la disponibilidad de plomería en la vivienda; de la existencia de usuarios industriales; del clima; y también de las condiciones sociales y económicas en general.

En la tabla 11-2 se muestran los resultados de un estudio realizado por el Banco Mundial en 1976 sobre el uso de agua en las áreas rurales de los países en vías de desarrollo. En las ciudades del mundo en desarrollo, en particular en las áreas de negocios y residenciales más ricas, es normal la instalación de sistemas hidráulicos completos, por lo tanto el consumo de agua se aproxima más bien a las cifras correspondientes a Estados Unidos y Canadá.

**TABLA 11-2 USO DE AGUA EN ÁREAS RURALES DEL MUNDO EN VÍAS DE DESARROLLO**

Región	Consumo medio diario de agua por persona (lpd)	
	Mínimo	Máximo
África	15	35
Sureste asiático	30	70
Pacífico occidental	30	95
Mediterráneo oriental	40	85
Latinoamérica y el Caribe	70	190
Intervalo normal	35	90

Fuente: Banco Mundial, *Village Water Supply*, Sector Policy Paper (Washington, D.C.: World Bank, 1976).

La tabla 11-3 proporciona cifras de consumo de agua para algunas industrias seleccionadas. Aquellas que requieren grandes cantidades de agua suelen desarrollar su propio abasto y no utilizan agua de proceso tomada del sistema público.

**TABLA 11-3 USO DE AGUA INDUSTRIAL**

Industria/producto	Uso del agua	
	Litros/unidad	Galones/unidad
Refinación de petróleo	18,000/tonelada	770/bbl
Papel	160,000/tonelada	39,000/ton
Acero	150,000/tonelada	35,000/ton
Termoelectricidad	300/kWh	80/kWh
Tejidos de lana	580,000/tonelada	140,000/ton

*Fuente:* Linsley y Franzini (1992); conversión al SI por los autores.

El consumo de agua en una comunidad específica varía en función de diversos factores. Por ejemplo, las condiciones climáticas influyen en actividades como el riego de prados, el baño y el acondicionamiento de aire. Además, el uso de agua tiende a aumentar en proporción directa con la posición económica y el nivel de vida de las personas que la utilizan. El grado y tipo de actividad industrial puede aumentar de manera significativa las necesidades de agua, y el precio también puede ser un factor de consumo de agua, en particular en donde el abasto es escaso y por consiguiente costoso. Muchos otros factores, como la presencia o ausencia de alcantarillas, la calidad del agua, la presión en la tubería maestra, y el control de fugas, afectan también el uso de agua.

### 11.2.2 Fluctuaciones en el uso del agua

Las demandas que se plantean a un sistema hidráulico varían no sólo de un año a otro y con las estaciones, sino además día con día y hora con hora. En la figura 11-1 se muestra un ejemplo de variación de corto plazo en la demanda residencial de agua durante el verano y el invierno. Observe que durante las primeras horas de las tardes de verano se puede producir un aumento considerable en el consumo de agua debido al riego de prados. Es práctica común expresar las fluctuaciones como fracciones de la demanda media diaria. De esta manera, los registros de demanda de agua en áreas similares se pueden analizar estadísticamente para obtener relaciones como las que se muestran en la tabla 11-4.

**TABLA 11-4 VARIACIONES DE LA DEMANDA**

Tasa media diaria	
Anual	1.0
En verano	1.25
En invierno	0.80
Tasa máxima diaria	1.5 (intervalo, 1.2-2.0)
Tasa máxima por hora	2.5 (intervalo, 1.5-3.5)

*Fuente:* Adaptado de Viessman y Hammer (1993).

- (e) el flujo de diseño para la red de distribución por tubería es el valor que sea mayor entre (1) la suma de la demanda diaria máxima y el flujo para incendio, o (2) la tasa máxima por hora. Tenemos que

$$(1) 99.0 \times 10^6 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{1,440 \text{ min}} + 35.4 \times 10^3 \text{ L/min} = 68,800 + 35,400$$

$$= 104,200 \text{ L/min} = 6.25 \times 10^6 \text{ L/h}$$

$$(2) \text{ De (c), tasa máxima por hora} = 6.87 \times 10^6 \text{ L/h.}$$

Por tanto, la capacidad de la tubería debe ser de  $6.87 \times 10^6 \text{ L/h}$ .

### Ejemplo 11.2

Se va a construir una acerería que produce 1,000 ton de acero por día cerca de una ciudad de 100,000 habitantes que se describió en el ejemplo 11.1. La obra está ubicada adyacente a un gran río, del cual la ciudad obtiene su abasto de agua. Calcule la cantidad de agua procesada que requiere la acerería diariamente y compárela con las necesidades de la ciudad.

**Solución** Con base en la tabla 11-3, 1 ton de acero requiere 35,000 gal de agua. Por consiguiente, la demanda diaria de la acerería será de  $35,000 \times 1,000 = 35 \text{ mgd}$ . Puesto que se calculó que la demanda media diaria de la ciudad es de  $66 \times 10^6 \text{ L/día}$ , o  $17.4 \text{ mgd}$ , la acerería necesitará alrededor de dos veces más agua para proceso que la ciudad entera. Es obvio que debe construir su propio sistema hidráulico.

## 11.3 NECESIDADES DE CALIDAD DEL AGUA

### 11.3.1 Estándares de calidad del agua

El agua contiene diversas sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella. Desde el momento en que se condensa en forma de lluvia, el agua disuelve los componentes químicos de sus alrededores a medida que cae a través de la atmósfera, corre sobre la superficie del suelo y se filtra a través del mismo. Además, el agua contiene organismos vivos que reaccionan con sus elementos físicos y químicos. Por estas razones suele ser necesario tratarla a fin de hacerla adecuada para su uso. El agua que contiene ciertas sustancias químicas u organismos microscópicos puede ser perjudicial para determinados procesos industriales y al mismo tiempo perfectamente idónea para otros. Los microorganismos causantes de enfermedades (patógenos) del agua la hacen peligrosa para consumo humano. Las aguas subterráneas de áreas con piedra caliza pueden tener un alto contenido de bicarbonato de calcio (dureza) y requerir ablandamiento previo a su uso.

Los requisitos para la calidad del agua se establecen de acuerdo con el uso al que se destina la misma. Por lo común su calidad se juzga como el grado en el cual el agua se ajusta a los estándares físicos, químicos y biológicos que fija el usuario. La calidad no es tan fácil de medir como la cantidad de agua en virtud de las múltiples pruebas que se necesitan para verificar que se alcanzan estos estándares. Es importante conocer los requisitos de calidad para cada uso a fin de determinar si se requiere un tratamiento del agua y, de ser así, qué procesos se deben aplicar para alcanzar la calidad deseada. Los estándares de calidad del agua también son fundamentales para vigilar los procesos de tratamiento.

El agua se evalúa en cuanto a calidad en términos de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas. Es necesario que las pruebas que se utilizan para analizarla en relación con cada una de estas propiedades produzcan resultados congruentes y tengan aceptación universal, a fin de que sean posibles las comparaciones significativas con los estándares de calidad del agua. Los *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Los estándares de métodos para la examinación de aguas y aguas residuales) (APHA *et al.*, 1992) constituyen un compendio de métodos analíticos que se siguen en Estados Unidos y Canadá para evaluar la calidad del agua. La tabla 11-5 presenta una lista de los límites permisibles fijados por Estados Unidos, Canadá y la Organización Mundial de la Salud para diversos contaminantes del agua potable. Las sustancias químicas que se enumeran bajo el título de "estética" se han limitado, como se indica, porque causan sabores, olores o colores indeseables y (a menos que se encuentren en gran exceso) rara vez constituyen una amenaza para la salud. Los límites sugeridos se pueden exceder en ciertas áreas en donde el tratamiento es difícil y los usuarios del agua se han acostumbrado a un sabor u olor específico. De las características que se enumeran bajo la categoría "salud" se sabe que afectan de manera adversa a los humanos; el hecho de que se excedan los límites especificados puede ser razón suficiente para rechazar el abasto de agua.

Los estándares de la EPA de Estados Unidos para el agua potable están sujetos a revisión y expansión continuas. En enero de 1994 existían 84 estándares primarios (6 microbiológicos, 17 para sustancias químicas inorgánicas y 61 para sustancias químicas orgánicas sintéticas) y 15 estándares secundarios. La tabla 15-1 muestra todos los estándares primarios de parámetros biológicos y sustancias químicas inorgánicas, y una selección de sustancias químicas de la categoría orgánica, así como todos los estándares secundarios (en enero de 1994). De acuerdo con la enmienda de 1986 a la Safe Drinking Water Act (Ley para el agua potable segura), la EPA está obligada a promulgar estándares para 25 contaminantes nuevos cada tres años. Como reflejo del énfasis actual en las sustancias tóxicas en el control de la contaminación del agua, los nuevos estándares para el agua potable se concentrarán probablemente en sustancias químicas orgánicas sintéticas y radionúclidos.

### 11.3.2 Características físicas

En el abasto público de agua se tiene especial cuidado con los sabores, olores, colores y también con la turbidez del agua, en parte porque dan mal sabor al agua potable, pero también a causa de su uso en la elaboración de bebidas, el procesamiento de alimentos y la fabricación de textiles. Los sabores y olores se deben a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición. Las mediciones de los mismos se hacen con base en la dilución necesaria para reducirlos a un nivel apenas detectable por observación humana. El color del agua se debe a la presencia de minerales como hierro y manganeso, materia orgánica, y residuos coloridos de las industrias. El color en el agua doméstica puede manchar los accesorios y opacar la ropa. Las pruebas se llevan a cabo por comparación con un conjunto estándar de concentraciones de una sustancia química que produce un color similar al que presenta el agua. La turbidez, además de que es objetable desde el punto de vista estético, causa preocupación en cuanto a la salud porque las partículas en cuestión pueden albergar agentes patógenos. El agua con suficientes partículas de arcilla en suspensión (10 unidades de turbidez) se aprecia turbia a la vista. Las fuentes de agua superficial varían en cuanto a turbidez desde 10 hasta 1,000 unidades; los ríos muy opacos pueden tener hasta 10,000 unidades de turbidez. Las mediciones de turbidez se basan en las propiedades ópticas de la suspensión que causan que la luz se disperse o se absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. Los resultados se comparan después con los que se obtienen de una suspensión estándar.



### 11.3.3 Características químicas

Los múltiples compuestos químicos disueltos en el agua pueden ser de origen natural o industrial y ser benéficos o dañinos de acuerdo con su composición y concentración. Por ejemplo, las cantidades pequeñas de hierro y manganeso no sólo causan color, también se oxidan para formar depósitos de hidróxido férrico y óxido de manganeso en tuberías maestras de agua y equipos industriales. Estos depósitos reducen la capacidad de los tubos y su extracción es costosa.

Las aguas duras se consideran en general como aquellas que requieren cantidades considerables de jabón para producir espuma, y que también forman incrustaciones en tuberías de agua caliente, calentadores, calderas y otras unidades en las cuales la temperatura del agua se incrementa materialmente. La dureza del agua se expresa en miligramos equivalentes de carbonato de calcio por litro. Los bicarbonatos de calcio y de magnesio se precipitan como carbonatos insolubles cuando el dióxido de carbono se expulsa por ebullición. Esta dureza "temporal", llamada **dureza carbónica**, se debe limitar en los casos en que causa formación de incrustaciones en calderas y equipos industriales. Los sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y de magnesio no se eliminan por ebullición. Estas sales causan **dureza no carbónica**, la cual se describe a veces como dureza "permanente".

Los compuestos orgánicos sintéticos, que son productos o subproductos de sustancias químicas que se utilizan en la agricultura y en la industria (por ejemplo, DDT), se pueden acumular hasta niveles tóxicos en el agua y en los organismos vivos. Las técnicas de medición han avanzado mucho más que nuestra capacidad para establecer la correlación entre los compuestos orgánicos sintéticos actualmente en uso y la salud humana. La mayor parte de los gobiernos han fijado límites arbitrarios para las más peligrosas de estas sustancias químicas hasta disponer de un conocimiento más completo en esta área. Las características microbiológicas del agua se estudiaron con detalle en el capítulo 8.

## 11.4 FUENTES DE AGUA

La calidad y la cantidad del agua procedente de aguas superficiales y subterráneas, las dos fuentes principales, experimentan la influencia de la geografía, el clima y las actividades humanas. Las aguas subterráneas normalmente se pueden utilizar con poco o ningún tratamiento. El agua superficial, por otra parte, suele necesitar tratamientos extensos, en especial si está contaminada. En las regiones áridas del mundo la falta de aguas subterráneas o superficiales puede hacer necesaria la desalinización de agua de mar y la recuperación de aguas residuales tratadas. Estos tratamientos son costosos, pero se produce agua de calidad adecuada para cualquier propósito.

### 11.4.1 Aguas subterráneas

Las **aguas subterráneas** son aquellas que se han filtrado desde la superficie de la tierra hacia abajo por los poros del suelo. Las formaciones de suelo y roca que se han saturado de líquido se conocen como depósitos de agua subterránea, o **acuíferos**. El agua normalmente se extrae de estos depósitos por medio de pozos. El tamaño de los poros del suelo, la viscosidad del agua y otros factores se combinan para limitar la velocidad a la cual el agua se mueve a través del

### 11.4.3 Agua de mar

El agua de mar, disponible en cantidad casi ilimitada, se puede transformar en agua dulce por diversos procesos. No obstante, los costos de conversión (sin contar los de eliminación del residuo de sal que se genera) son quizá de dos a cinco veces más altos que los del tratamiento del agua dulce. **Desalinización** es el término general que se emplea para describir la extracción de las sales disueltas en el agua. La destilación, que es la técnica de desalinización más antigua, depende de la evaporación y condensación del agua. El proceso consume mucha energía, pero el uso de la energía solar para evaporar el agua puede resultar práctica en países con abundante luz solar. Otro método, el de congelación, reduce la temperatura del agua hasta que se pueden separar de la salmuera cristales de hielo libres de sal. La electrodiálisis implica el movimiento forzado de iones con carga a través de membranas permeables a los cationes o los aniones, esto por aplicación de un potencial eléctrico a una celda que contiene agua mineralizada. La ósmosis inversa emplea membranas que son permeables sólo al agua; sin embargo, en este caso la fuerza impulsora es la presión que suministran las bombas. Este proceso parece promisorio porque los costos energéticos son inferiores a los de otras tecnologías. En la actualidad se utilizan ampliamente plantas desalinizadoras para el abastecimiento de agua municipal en el Medio Oriente. El uso futuro tendrá lugar en las áreas con escasez extrema de agua dulce, en particular para usos industriales.

### 11.4.4 Aguas residuales recicladas

Las **aguas residuales recicladas** (o recuperadas) son aquellas que han recibido el tratamiento suficiente para volver a ser utilizadas directamente en la industria y en la agricultura, y para ciertas aplicaciones municipales limitadas. Estas operaciones de reciclado o de circuito cerrado pueden ofrecer la única alternativa en áreas donde es imposible obtener suficiente agua dulce. Los sólidos en suspensión, las sustancias orgánicas biodegradables y las bacterias se pueden eliminar o degradar por aplicación de los procesos normales de tratamiento de aguas residuales, pero el color, las sales inorgánicas de magnesio, sodio y calcio, los compuestos orgánicos sintéticos como los plaguicidas, y otras sustancias tóxicas se deben eliminar por medio de técnicas avanzadas similares a las que se emplean para la desalinización. El carbón activado es eficaz para extraer muchos contaminantes orgánicos porque tiene un área superficial muy grande ( $\approx 1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) capaz de capturar y adsorber impurezas del agua. Permitir que el agua se limpie a sí misma por filtración a través del suelo es otra técnica que elimina impurezas del agua y tiene amplia aplicación en la recarga de reservas de aguas subterráneas. En la actualidad, el uso de aguas residuales recicladas como fuente de agua se practica principalmente en el Medio Oriente, en Sudáfrica y en regiones áridas de Estados Unidos.

## 11.5 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

### 11.5.1 Plantas de tratamiento de agua

Uno de los grandes logros de la tecnología moderna ha sido la reducción drástica de las enfermedades de transmisión por agua como el cólera y la fiebre tifoidea. Estas afecciones ya no constituyen los grandes peligros para la salud pública que fueron en una época. La clave de este avance fue el reconocimiento de que la contaminación del abasto público de agua con

desechos humanos era la fuente principal de infección y se podía eliminar tratando el agua de manera más eficaz y eliminando los residuos de una forma más apropiada. La filtración del agua potable fue utilizada en 1802 por Paisley, en Escocia, y por los vendedores de agua de Londres, Inglaterra, en 1828. En Estados Unidos, la ciudad de Poughkeepsie, Nueva York, practicó por primera vez la filtración del agua potable en 1872. A principios de este siglo, ciertas mejoras a la tecnología para hacer segura el agua para uso público se habían generalizado en Europa, Estados Unidos y Canadá.

Las actuales plantas de tratamiento de agua se proyectan para suministrar de manera continua agua que satisface los estándares de agua potable en la llave. Para conseguir esto intervienen cuatro consideraciones principales: selección de fuentes, protección de la calidad del agua, métodos de tratamiento por aplicar y prevención de la contaminación. Entre las precauciones comunes para impedir la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales se cuentan la prohibición de descarga de alcantarillados sanitarios y pluviales cerca del embalse de agua, la instalación de cercas para impedir la contaminación por uso recreativo, y las restricciones a la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en áreas que drenan al embalse. Instituir reglamentos que se ocupen con amplitud de la protección de la fuente puede ser difícil porque en un proyecto específico pueden participar varias jurisdicciones, desde locales hasta federales. Por consiguiente, una considerable cooperación política es un requisito previo para la creación de muchos sistemas de abastecimiento de agua en gran escala que ofrezcan seguridad.

Las principales operaciones unitarias que intervienen en el tratamiento de aguas superficiales son las de tamizado, coagulación/floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Las operaciones de tratamiento de agua llevan a cabo una o más de tres tareas fundamentales: separación de sustancias **particuladas** como arena y arcilla, materia orgánica, bacterias y algas; extracción de sustancias **disueltas** como las que causan color y dureza; extracción o destrucción de **bacterias y virus patógenos**. La selección de los procesos de tratamiento depende del tipo de fuente de agua y de la calidad que se desea. La figura 11-3 muestra un bosquejo de (a) una planta típica de tratamiento de aguas superficiales, y (b) una planta de tratamiento de aguas subterráneas. En la primera el agua fluye por gravedad a través de una estructura y un tubo de toma, los tamices quitan los objetos más grandes, como peces, palos y hojas, y unas bombas de carga baja suben el agua que entra hasta el nivel de la planta de tratamiento. De este punto en adelante, el agua recorre la planta por gravedad.

En ocasiones, el agua sin tratamiento y de baja turbidez se trata por sedimentación simple (sin aditivos químicos) para retirar las partículas más grandes, y después la filtración para eliminar las pocas partículas que no se sedimentaron. Sin embargo, por lo común las partículas del agua sin tratamiento son demasiado pequeñas para separarse en un tiempo razonablemente breve sólo por sedimentación y filtración simple. A fin de remediar esto se agrega un producto químico para coagular/flocular las partículas pequeñas, llamadas **coloides**, en otras más grandes susceptibles de asentarse en tanques de sedimentación o separarse de manera directa en un filtro. Cuando una sedimentación antecede a la filtración, los filtros pueden operar por periodos más largos, o a velocidades mayores, antes de que sea necesario lavarlos a contracorriente. El agua clarificada que se toma de la parte superior de los tanques de sedimentación se lleva a los filtros, donde todas las partículas residuales en suspensión se separan por colado, asentamiento y adhesión a la arena u otro material filtrante a medida que el agua fluye por los pequeños poros del lecho del filtro. La filtración del agua coagulada/floculada *sin* previa sedimentación (llamada *filtración directa*) es eficaz para aguas de baja a moderada turbidez (de 5 a 20 unidades) y de hecho constituye la práctica en muchas de las recientes plantas de tratamiento de agua.

ducir al mínimo el daño físico que podría causar el hielo. En un lago, esta toma se localiza aguas adentro a una distancia suficiente para minimizar los efectos de contaminación por la vegetación de la costa o las descargas de residuos; en los ríos se sitúa en un área protegida. En el punto de admisión se colocan tamices burdos constituidos por barras verticales separadas por una distancia aproximada de 25 mm (1 in o pulg) o más para excluir los objetos más grandes. El agua fluye entonces por gravedad a lo largo del tubo de toma hasta la estación de bombeo de carga baja, esto lo hace a una velocidad suficiente para impedir la sedimentación de partículas en el tubo. Inmediatamente al frente de las bombas de carga baja, que elevan el agua hasta el nivel de la planta, se colocan tamices de barras de limpieza mecánica y tamices finos (de 6 mm o  $\frac{1}{4}$  in de separación). Estos tamices finos también se utilizan en la base de los pozos de aguas subterráneas para excluir las partículas de tierra más grandes que podrían dañar las bombas y obstruir las tuberías.

La **sedimentación**, la forma de tratamiento de agua y de aguas residuales más antigua y de uso más extendido, emplea el asentamiento por gravedad para separar las partículas del agua (véase el capítulo 6). Es un método relativamente sencillo y económico que se puede aplicar en estanques redondos, cuadrados o rectangulares. Como ya hemos señalado, la sedimentación se puede hacer después de una coagulación/floculación (para aguas muy turbias) u omitirse por completo (con aguas de turbidez moderada). Las partículas suspendidas en las aguas de superficie varían en cuanto a tamaño: de  $10^{-1}$  a  $10^{-7}$  mm de diámetro, que es el tamaño de la arena fina y de las pequeñas partículas de arcilla, respectivamente. La turbidez o nebulosidad del agua se debe a las partículas mayores de  $10^{-4}$  mm, en tanto que las de menos de  $10^{-4}$  mm contribuyen al color y sabor del agua. Este tipo de partículas muy pequeñas se pueden considerar, para fines de tratamiento, como disueltas y no como particuladas.

El agua que contiene materia particulada fluye con lentitud a través de un tanque de sedimentación, y de esta manera se retiene el tiempo suficiente para que las partículas más grandes se asienten en el fondo antes de que el agua clarificada salga del tanque por un vertedero en el extremo de salida. Las partículas que se han sedimentado en el fondo del tanque se extraen de forma manual o por medio de raspadores mecánicos para descargarse en una alcantarilla, devolverse a la fuente de agua si ello es permisible, o almacenarse en el local con vistas a su posterior tratamiento o eliminación. Se sedimentan partículas cada vez más pequeñas a medida que se incrementa el tiempo de retención utilizando tanques más grandes. La separación de partículas muy pequeñas por sedimentación simple sería poco práctica debido al alto costo de construcción de un tanque de sedimentación del tamaño suficiente para permitir el tiempo de sedimentación necesario. El tiempo de retención típico es de 3 h en tanques de 3 a 5 m de profundidad. Las partículas demasiado pequeñas para sedimentarse en este tiempo se deben eliminar por filtración o por otros métodos.

La **coagulación/floculación** es un procedimiento químico y físico por el cual las partículas que son demasiado pequeñas para separarse por sedimentación simple se desestabilizan y se aglomeran para acelerar su asentamiento. Un porcentaje significativo de partículas en suspensión en el agua es tan pequeño que su sedimentación hasta el fondo del tanque tomaría días o semanas. Estas partículas coloidales nunca se asentarían por sedimentación simple.

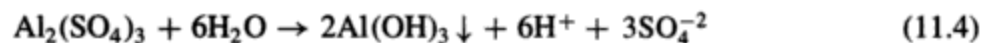
La **coagulación** es un proceso químico que se utiliza para desestabilizar partículas coloidales. El mecanismo exacto no se conoce bien, pero el concepto general consiste en agregar un producto químico que aporta iones con carga positiva al agua que contiene coloides con carga negativa. Las reacciones que se producen reducen la tendencia de los coloides a repelerse entre sí. Se requiere un mezclado rápido de alrededor de 30 segundos para dispersar el coagulante. En seguida, se

lleva a cabo un mezclado suave de la suspensión, llamado **floculación**, a fin de favorecer el contacto entre partículas. Esto se consigue por mezclado mecánico mediante el uso de paletas que giran lentamente dentro del tanque de coagulación/floculación, o por mezclado hidráulico, el cual se produce cuando el flujo se dirige por encima y alrededor de los deflectores del tanque. El tiempo de retención en el tanque de coagulación/floculación varía por lo común entre 20 y 40 minutos en tanques de 3 a 4 m de profundidad. Por medio del proceso químico y físico combinado de coagulación/floculación, las partículas coloidales que no se asientan por sedimentación simple se aglomeran para formar sólidos más grandes llamados *flóculos*. Éstos tienen aspecto de grumos esponjosos de forma irregular y son capaces de atrapar las partículas pequeñas no coaguladas al asentarse en el fondo. El sulfato de aluminio (alumbre) es el coagulante más común, pero se pueden utilizar también polímeros orgánicos, solos o en combinación con el alumbre, para mejorar la floculación. La suspensión de flóculos se transfiere con cuidado de los tanques de coagulación/floculación a tanques de sedimentación, o directamente a filtros donde se separan los flóculos. En la figura 11-4 se muestra un corte transversal de un tanque de coagulación/floculación y sedimentación.

La química de la coagulación es compleja, pero el proceso se puede ilustrar por medio de ecuaciones simplificadas. Los cationes con carga positiva que se necesitan para coagular los coloides con carga negativa pueden ser aportados por sales metálicas, de las cuales las sales de aluminio y hierro son las más comunes.

Se considera que el proceso de coagulación con alumbre para filtros,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3\text{H}_2\text{O}$  (el coagulante normal para tratamiento de agua), se verifica en las tres etapas siguientes:

1. El alumbre se ioniza en el agua y produce iones  $\text{Al}^{+3}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ . Algunos de los iones  $\text{Al}(\text{OH})_3$  neutralizan la carga negativa de los coloides, pero
2. La mayor parte de los iones  $\text{Al}^{+3}$  se combinan con iones  $\text{OH}^-$  (del agua) para formar  $\text{Al}(\text{OH})_3$  coloidal, el cual adsorbe iones positivos de la solución:

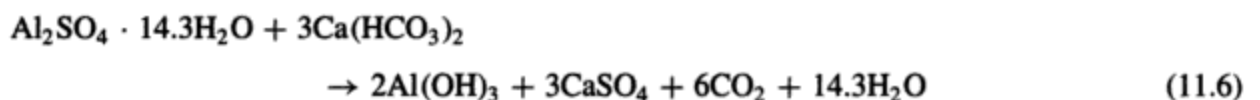


3. Entonces, el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  en solución con carga positiva ayuda a neutralizar los coloides negativos, y el exceso es neutralizado por el  $\text{SO}_4^{-2}$  para producir un precipitado de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y sulfatos adsorbidos.

Observe que el exceso de iones  $\text{H}^+$  que se forma en la etapa 2 tiende a deprimir el pH, lo cual detendría la formación del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  puesto que depende del pH. Normalmente, el exceso de iones  $\text{H}^+$  es neutralizado por la alcalinidad ( $\text{HCO}_3^-$ ) presente en el agua de acuerdo con la ecuación



La reacción global que combina las ecuaciones (11.4) y (11.5) es



la cual nos indica que 600 partes de alumbre para filtros han consumido 300 partes de alcalinidad (expresada como  $\text{CaCO}_3$ , como se señaló en la sección 6.3.3).

El efecto químico global es una disminución del pH del agua, una conversión de parte de la dureza de calcio [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ] en dureza de sulfato ( $\text{CaSO}_4$ ), y la producción de  $\text{CO}_2$ . Si la

alcalinidad presente en el agua es insuficiente para que esta reacción se lleve a cabo, se debe aumentar el pH adicionando cal  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , carbonato de sodio  $(\text{Na}_2\text{CO}_3)$  o sosa  $(\text{NaOH})$ . El pH óptimo para la coagulación con alumbre es aproximadamente 6. La coagulación no requiere mucho control adicional del pH, porque la introducción del alumbre reduce el pH de las aguas superficiales, que casi siempre son neutras, a un valor aceptable.

Normalmente no es posible conseguir una transparencia adecuada de las aguas superficiales por sedimentación simple o con la combinación de coagulación/floculación y sedimentación. Por consiguiente, estos procesos unitarios van seguidos de **filtración** en prácticamente todas las plantas de tratamiento de agua. La filtración es un proceso en donde el agua pasa a través de un lecho filtrante compuesto originalmente de arena fina dispuesta sobre una capa de grava de soporte. En la actualidad son comunes otros medios filtrantes y soportes. Los mecanismos que intervienen en la filtración incluyen el colado de las partículas de mayor tamaño que los poros, la floculación, que se produce cuando las partículas entran en contacto más estrecho dentro del filtro, y la sedimentación de las partículas en los poros del filtro. Con el tiempo, los poros del filtro, en particular los de la superficie, se obstruyen y se hace necesario limpiar el filtro mediante un lavado a contracorriente.

Se emplean dos tipos de filtros: el de arena lento y el de arena rápido. Los **filtros de arena lentos** se utilizaron por primera vez en Gran Bretaña en el siglo XIX. Éstos procesan agua a una velocidad de 3 a 4  $\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$  (menos de 0.1  $\text{gpm}/\text{ft}^2$ ). El agua de río o lago se bombea al interior de grandes filtros de arena lentos al aire libre, con o sin una previa sedimentación simple, según la calidad del agua sin tratar. El espesor del lecho de filtración es aproximadamente de 0.6 a 1.2 m, con desagües que transportan el agua filtrada al depósito de almacenamiento. Cuando los poros del filtro se obstruyen en grado excesivo, es necesario interrumpir la aplicación de agua y retirar de forma manual las capas superiores de arena para limpiar el filtro. Los filtros de arena lentos requieren grandes áreas de terreno y mucha mano de obra a causa de la frecuente limpieza necesaria para producir cantidades suficientes de agua. Aunque los filtros de arena lentos pasaron de moda con la introducción de los filtros de arena rápidos, al inicio del presente siglo en Europa y Estados Unidos, ofrecen un medio práctico de filtración de agua para pequeñas comunidades y municipios en países en vías de desarrollo, en particular donde el clima es más favorable que en el norte de Estados Unidos o en Canadá. En comparación con los filtros de arena rápidos, su construcción es más económica, su operación más sencilla, y eliminan mejor las bacterias, lo cual es una consideración importante si otros medios de desinfección son poco confiables.

Los **filtros de arena rápidos** procesan agua a una velocidad de 80 a 160  $\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$  (de 2 a 4  $\text{gpm}/\text{ft}^2$ ) (Rich, 1961) o más, es decir unas 40 veces mayor que la de los filtros de arena lentos. El medio filtrante también es una capa de arena fina o de antracita y otros materiales que se sostienen sobre una capa de grava u otra estructura de soporte. La figura 11-5a muestra un corte transversal de un lecho filtrante de arena, y la figura 11-5b representa un lecho filtrante de arena y antracita. La figura 11-6 es un corte transversal de un filtro de arena rápido representativo, el cual muestra la caja del filtro, el lecho y los accesorios. Estos filtros se alojan ordinariamente en un edificio para proteger el agua de la intemperie y de posibles fuentes de contaminación. El agua clarificada de los tanques de sedimentación o de floculación fluye al interior de la caja del filtro y recorre por gravedad el lecho filtrante hasta los desagües inferiores, los cuales conducen a depósitos de almacenamiento para el agua tratada. La velocidad a la cual el agua atraviesa un filtro disminuye poco a poco a medida que se acumulan partículas en los granos del filtro y se reduce el tamaño de los poros. Para conseguir un gasto uniforme, se

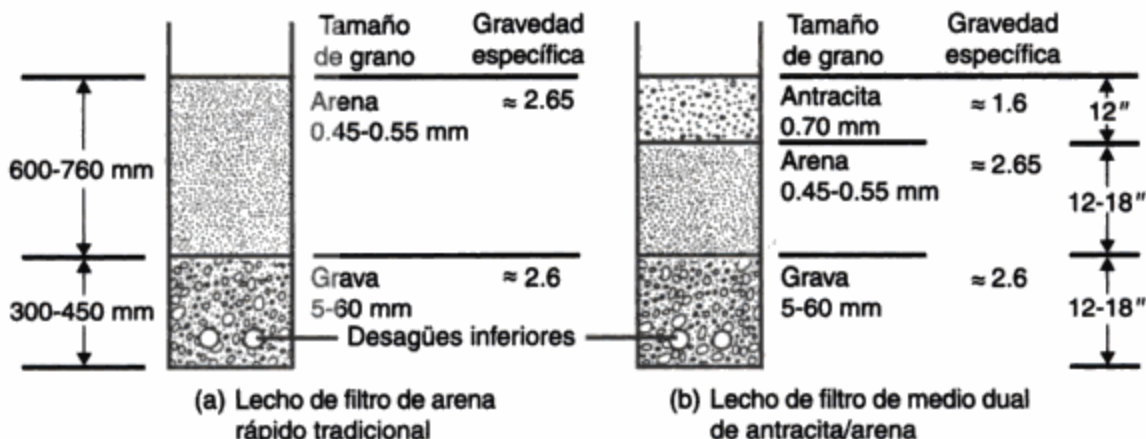


Figura 11-5 Construcción de un lecho de filtro.

Nota: La dificultad que presentan los filtros de arena es que se produce obstrucción en las capas superiores de arena fina. La antracita (carbón), puesto que tiene un diámetro de partícula mayor y es más ligera que la arena, permanece sobre la misma y consigue que una mayor proporción del filtro sea eficaz para eliminar sólidos en suspensión.

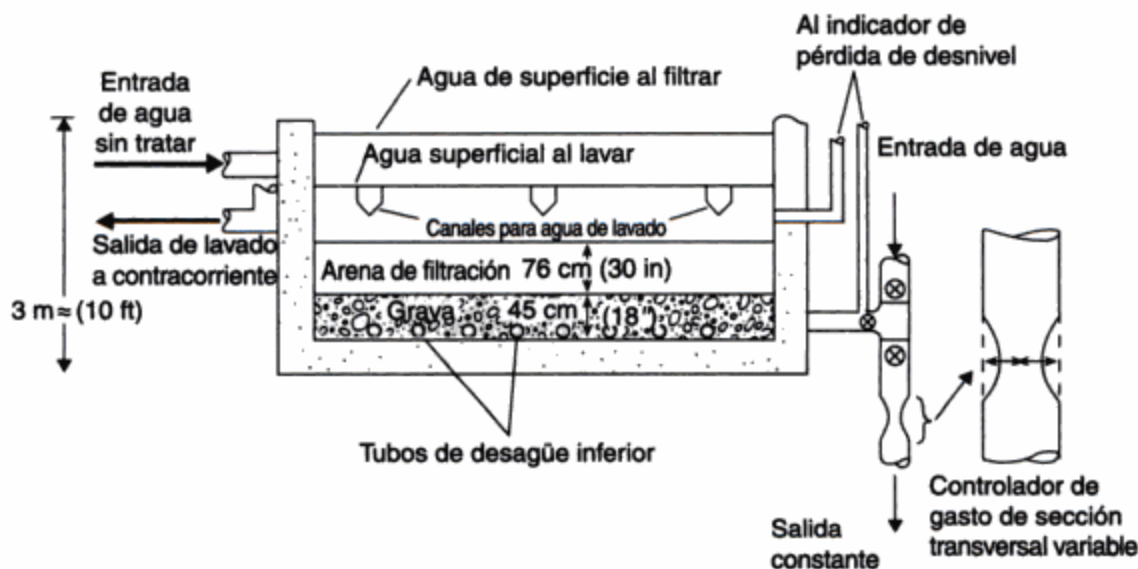


Figura 11-6 Corte transversal de un filtro de arena rápido. Fuente: Adaptado de Linsley y Franzini (1992).

utiliza un controlador externo del gasto (alguna forma de restricción ajustable en el tubo de salida) para mantener aproximadamente constante la pérdida total de desnivel a través del filtro y, en consecuencia, el flujo. La profundidad de 2.5 a 3.0 m de la caja del filtro limita el desnivel disponible para forzar el paso del agua por el lecho filtrante. Cuando se excede el límite de pérdida de desnivel, el filtro se limpia por medio de una operación que se conoce como *lavado a contracorriente*. Se bombea agua a presión a través de los tubos y desagües inferiores y hacia arriba, a través del filtro. Este flujo inverso expande el lecho filtrante hasta en un 50% y permite eliminar las partículas de suciedad más ligeras con el agua de lavado que rebosa hacia

los canales destinados a la misma y se vierte en la alcantarilla. Cuando no se dispone de alcantarilla, el agua de lavado se trata localmente y, si es necesario, los sólidos se llevan a otro lugar para eliminarlos.

La rapidez del lavado a contracorriente se debe controlar para impedir que los granos de arena o de antracita sean arrastrados por el agua de lavado. El lavado a contracorriente toma de 10 a 15 min y se efectúa de manera tradicional una vez al día, o con mayor frecuencia si es necesario. El agua que se emplea para el lavado es por lo general el 4% del agua producida. Cuando se interrumpe la operación de lavado a contracorriente, el medio filtrante se sedimenta en su lugar para quedar como estaba antes del lavado, puesto que, de acuerdo con la ley de Stokes [véase la ecuación (6.7)], las partículas más grandes (o más densas) se sedimentan con mayor rapidez que las partículas más pequeñas (o más ligeras).

Para instalaciones municipales pequeñas, aplicaciones industriales y sistemas de albercas, suelen utilizarse **filtros de presión**. Éstos son recipientes cerrados, casi siempre cilíndricos, que contienen material filtrante a través del cual se fuerza el paso de agua por presión, no por gravedad, como en el caso de los filtros de arena rápidos.

La eficacia relativa de las operaciones de tratamiento estudiadas hasta este punto es en términos generales como sigue. El agua lacustre turbia, hasta 100 TU (unidades de turbidez), se reduce por coagulación/floculación y sedimentación a aproximadamente 10 TU. La filtración disminuye aún más la turbidez hasta menos de 1 TU. Una regla práctica general es que la turbidez se reduce en un orden de magnitud por cada proceso. Las aguas de río muy turbias (1,000 TU) requieren una sedimentación previa antes de someterse a los procesos descritos. Por otra parte, el agua lacustre que se extrae en invierno puede tener una turbidez de menos de 10 TU, y es posible que no sea necesaria la coagulación/floculación.

### Ejemplo 11.3

La figura 11-7 es un plano de una planta de tratamiento de agua propuesta para la ciudad de 100,000 habitantes del ejemplo 11.1. El tiempo de retención para la coagulación/floculación es de 25 min, y el tanque (A) tiene una profundidad de 3.7 m. El tiempo de retención en el tanque de sedimentación (B) es de 2 h, y la profundidad del tanque es de 5.0 m. El gasto a través de los filtros (C) es de 110 L/min · m<sup>2</sup>. Seleccione las dimensiones apropiadas para las unidades. Los tres conjuntos paralelos de tanques proporcionan flexibilidad de operación.

**Solución** La rapidez de procesamiento que se requiere es la tasa diaria máxima para la ciudad del ejemplo 11.2, o  $99 \times 10^6$  L/día. Cada tanque maneja un tercio de este flujo, o  $33 \times 10^6$  L/día (22,916 L/min). En consecuencia, la capacidad que se requiere para el tanque de coagulación/floculación es de

$$\begin{aligned} 25 \text{ min} \times \frac{22,916 \text{ L}}{\text{min}} &= 572.9 \times 10^3 \text{ L} \\ &= 572.9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

De modo que el ancho del tanque de coagulación/floculación (A) es

$$\frac{572.9}{18 \times 3.7} = 8.6 \text{ m}$$

La capacidad necesaria del tanque de sedimentación (B) es

$$120 \text{ min} \times \frac{22,916 \text{ L}}{\text{min}} = 2749.9 \times 10^3 \text{ L} = 2749.9 \text{ m}^3$$

Por tanto, la longitud del tanque de sedimentación (B) es



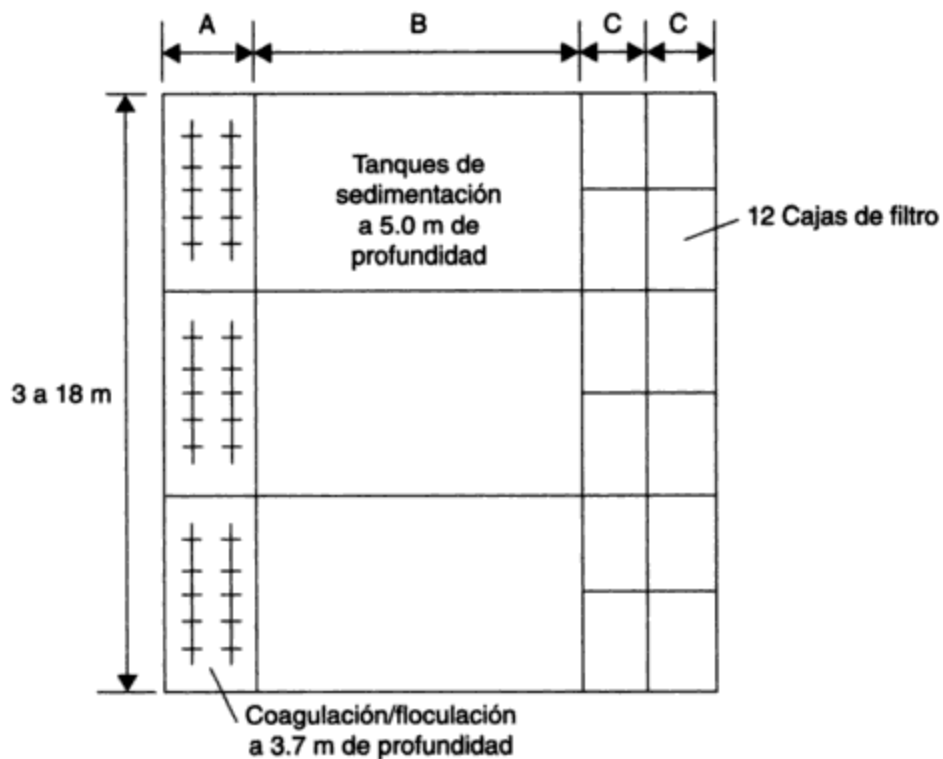


Figura 11-7

$$\frac{2749.9}{18 \times 5.0} = 30.6 \text{ m}$$

Cada filtro maneja un doceavo del gasto total, o 5,729 L/min. Por tanto, el área necesaria en cada filtro es

$$\frac{5729}{110.0} = 52.1 \text{ m}^2$$

y la longitud de cada caja de filtro (C) es

$$\frac{52.1}{9.0} = 5.9 \text{ m}$$

*Comentario:* En la práctica se acostumbra prever la satisfacción de la máxima demanda diaria con cualquiera de las unidades fuera de servicio. En este caso probablemente se construiría un cuarto conjunto de tanques en paralelo. Como alternativa, cada uno de los tres conjuntos de tanques se pudo haber proyectado para dar cabida al 50% de la máxima demanda diaria. La disposición de las unidades es compacta y simétrica por varias razones:

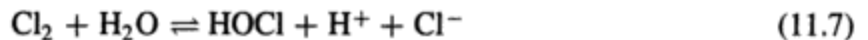
- Para asegurar un flujo uniforme con el menor número de cambios de dirección y por tanto la menor turbulencia posible
- Para permitir la construcción económica de paredes comunes y simplificar la inclusión de la planta en un edificio

- Para permitir la fácil interrupción de una corriente en paralelo para su mantenimiento mientras las otras unidades abastecen la demanda
- Para facilitar la futura expansión de la planta

### 11.5.3 Desinfección

Para asegurar que el agua está libre de bacterias perjudiciales es necesario **desinfectarla**. La **cloración** es el método más común para desinfectar el abasto público de agua. Se agregan cantidades suficientes de cloro gaseoso o hipocloritos al agua tratada para matar las bacterias patógenas. La cloración es un método de desinfección confiable, relativamente económico y fácil de aplicar. Otros desinfectantes incluyen cloraminas, dióxido de cloro, otros halógenos, ozono, luz ultravioleta y alta temperatura. La ozonización, extensamente utilizada en Francia, está ganando aceptación en Estados Unidos y Canadá, en especial como alternativa de la precloración cuando están presentes sustancias orgánicas naturales. Aunque es eficaz, el ozono no deja un residuo duradero que permita una desinfección a largo plazo. La planta de filtración de  $2,000 \times 10^6$  L/día (600 mgd) de Los Ángeles contiene uno de los sistemas municipales de desinfección por ozono más grandes del mundo, pero el agua se somete a la cloración de todos modos antes de su distribución.

El cloro gaseoso se hidroliza en agua de forma casi completa para formar ácido hipocloroso:



El ácido hipocloroso, HOCl, se disocia en iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y iones hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ) en la reacción reversible siguiente:



El cloro reduce el pH del agua a causa de los iones hidrógeno que se producen en las reacciones anteriores. El pH del agua es muy importante para determinar el grado en el que el ácido hipocloroso se disocia para producir iones hipoclorito. El ácido hipocloroso, que es el agente desinfectante primario, predomina a un pH menor de 7.5 y es alrededor de 80 veces más eficaz que el ion hipoclorito que predomina con un pH mayor de 7.5. El HClO y el  $\text{ClO}^-$  se describen como el **cloro libre disponible**, en el sentido utilizable para la desinfección. Las cualidades desinfectantes del ácido hipocloroso aumentan en grado considerable a niveles de pH bajos en virtud de la mayor proporción de HClO presente.

Cuando se adiciona al agua, el cloro, un elemento muy reactivo, oxida la materia orgánica y la inorgánica por igual. Por consiguiente, no todo el cloro que se agrega al agua da por resultado la producción de cloro libre disponible. La cantidad de cloro que reacciona con los compuestos inorgánicos ( $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_3$ ) y las impurezas orgánicas se conoce como la **demanda de cloro**, y es necesario satisfacerla para que se forme cloro libre disponible. La aplicación de cloro al agua hasta el punto en que hay cloro libre residual disponible se llama **cloración hasta el punto de cambio**.

La reacción del cloro con las impurezas nitrogenadas como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es de especial interés porque se producen cloraminas. Las cloraminas son eficaces como desinfectantes, pero en menor grado que el cloro libre disponible; sin embargo, persisten durante más tiempo en el agua tratada que el cloro libre disponible y sirven como protección contra una posible contaminación en el sistema de distribución, causada por construcción o mantenimiento inadecuado.

**Solución**

- (a) Sabemos que se deben adicionar al menos 1.2 mg de cloro a cada litro para superar la demanda de cloro de 1 mg/L y producir una concentración de cloro libre disponible de 0.2 mg/L. Puesto que la planta de tratamiento debe ser capaz de operar al gasto máximo diario podemos hacer el cálculo siguiente para determinar la cantidad de cloro necesaria

$$\frac{\text{kg cloro}}{\text{día}} = \frac{\text{L}}{\text{d}} (\text{para máximo diario}) \times \frac{1.2 \text{ mg cloro}}{\text{L}} \times \frac{\text{kg}}{1 \times 10^6 \text{ mg}}$$

$$= 99.0 \times 10^6 \text{ L/día} \times 1.2 \text{ mg/L} \times \frac{1}{10^6} \text{ kg/mg}$$

$$= 118.8 \text{ kg de cloro se deben agregar diariamente (a la máxima producción)}$$

- (b) Si suponemos un tiempo mínimo de contacto de 30 min, entonces

$$\text{la capacidad necesaria del tanque de contacto} = \text{gasto} \times \text{tiempo de contacto}$$

$$= 99.0 \times 10^6 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{1440 \text{ min}} 30 \text{ min}$$

$$= 2.063 \times 10^6 \text{L}$$

$$= 2063 \text{ m}^3$$

El tiempo de contacto en las plantas de tratamiento de agua ordinariamente lo proporciona una gran cámara de almacenamiento llamada *pozo de aguas claras* o *depósito de agua clarificada*. La función primordial del pozo de aguas claras es aislar la planta respecto a la fluctuación por horas de la demanda de agua municipal, pero también sirve para permitir el tiempo de contacto suficiente para que la concentración de cloro libre disponible se estabilice en el valor correcto antes de que el agua se bombee a los usuarios.

La **ozonización** es la desinfección de agua por adición de ozono ( $\text{O}_3$ ), el cual es un poderoso oxidante de impurezas inorgánicas y orgánicas. Sus ventajas respecto al cloro son: es eficaz contra *Cryptosporidium*, no deja sabores ni olores y, a diferencia del cloro, parece ser que no reacciona con las sustancias orgánicas naturales para formar compuestos peligrosos para los humanos. La ozonización se aplica extensamente en Europa, en particular en Francia, donde muchos municipios lo utilizan para desinfectar el agua potable pública. En Estados Unidos y Canadá, a excepción de las ciudades de Montreal y Los Ángeles, la desinfección con ozono se limita a unas cuantas plantas pequeñas. Es probable que esto cambie en el futuro. Las desventajas del ozono son que (1) no se puede transportar con facilidad y por ende se debe generar localmente, (2) no proporciona un residuo combinado como las cloraminas como protección contra la infección en los sistemas de distribución, y (3) todavía es muy costoso.

**11.5.4 Eliminación de sustancias disueltas**

Varias de las operaciones unitarias que hemos analizado hasta este punto son parcialmente eficaces para eliminar sustancias disueltas objetables. Por ejemplo, el color del agua que causa la materia coloidal o disuelta se reduce por coagulación/floculación. En general, los procesos convencionales no tienen como objetivo la eliminación de sustancias disueltas o gases. Si éstos constituyen un problema, se dispone de otras operaciones unitarias.

La **aireación** se utiliza para eliminar las cantidades excesivas de hierro y manganeso de las aguas subterráneas. Estas sustancias causan problemas de sabor y color, interfieren con el lavado de la ropa, manchan los accesorios de plomería y favorecen el crecimiento de bacterias férricas en tuberías maestras. Al burbujear aire en el agua, o al crear contacto entre el aire y el agua por aspersión, el hierro o manganeso disuelto ( $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ) se oxida a una forma menos soluble ( $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+4}$ ) que se precipita y se puede separar en un tanque de sedimentación o un filtro. La aireación elimina también los olores que causa el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) gaseoso.

El **ablandamiento** del agua es un proceso que quita la dureza, causada por la presencia de iones metálicos divalentes, principalmente  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ . La dureza del agua es consecuencia del contacto con los suelos y rocas, en particular la piedra caliza, en presencia de  $\text{CO}_2$ . Como se señaló en la sección 11.3.3, las concentraciones de dureza tanto carbónica como no carbónica se expresan como  $\text{CaCO}_3$ .

Rara vez es necesario el ablandamiento para aguas de superficie (donde una dureza mayor de 200 mg/L es poco común), pero en ocasiones es deseable para las aguas subterráneas (donde se observan con cierta frecuencia durezas superiores a los 1,500 mg/L). El agua dura es aceptable para consumo humano, pero puede no ser adecuada para uso industrial en razón de los problemas de formación de incrustaciones que causa en las calderas. El ablandamiento con cal-carbonato y el intercambio de iones son dos de los métodos disponibles para ablandar el agua dura. En el **ablandamiento con cal-carbonato**, la cal ( $\text{CaO}$ ) que se agrega al agua se hidrata a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el cual elimina la dureza carbónica convirtiendo el  $\text{CaHCO}_3$  soluble en  $\text{CaCO}_3$  insoluble, y el  $\text{MgHCO}_3$  soluble en  $\text{CaCO}_3$  insoluble y  $\text{MgCO}_3$  soluble. Este  $\text{MgCO}_3$  soluble se precipita después como  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaCO}_3$  con la adición de más cal. La dureza no carbónica (por ejemplo,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$  solubles) se precipita como  $\text{CaCO}_3$  agregando carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Con el **intercambio de iones**, el agua dura se fuerza a través de una resina de intercambio iónico como la zeolita, la cual extrae de manera preferente los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  del agua y libera iones  $\text{Na}^+$ , los cuales forman sales solubles.

El **carbón activado** es un material muy adsorbente que se utiliza en el tratamiento de agua para extraer contaminantes orgánicos. El carbón activado se produce en un proceso de dos etapas. Primero, un material base idóneo, como madera, turba, materia vegetal o hueso, se carboniza calentándolo en ausencia de aire. Después, el material carbonizado se activa calentándolo en presencia de aire,  $\text{CO}_2$  o vapor de agua para quemar los alquitranes que contiene y aumentar el tamaño de sus poros. La adsorción de gases, líquidos y sólidos por el carbón activado está influida por la temperatura y el pH del agua, así como por la complejidad de las sustancias orgánicas que se extraen. El carbón activado en polvo se puede agregar al agua inmediatamente después de las bombas de carga baja o en cualquier punto adelante de los filtros. Este material principalmente se ha utilizado para extraer sustancias orgánicas que causan sabores y olores. Sin embargo, a medida que crece la preocupación por la presencia de compuestos orgánicos tóxicos en nuestro abasto de agua, el papel de carbón activado granulado (fabricado a partir de antracita) habrá de adquirir mayor importancia.

En la **ósmosis inversa** (OI) el agua dulce se fuerza a través de una membrana semipermeable en sentido opuesto al que se presenta en la ósmosis natural. Puesto que la membrana quita las sales disueltas, la aplicación principal de la OI se ha dado en la desalinización. Sin embargo, el proceso también elimina materiales orgánicos, bacterias y virus, y su aplicación en el tratamiento del agua va en aumento.

canal. Se pueden utilizar materiales como concreto, caucho de butilo y telas sintéticas para forrar los canales abiertos. Se construyen **tuberías** cuando las condiciones topográficas obligan a descartar el uso de canales abiertos. Colocados arriba o abajo del suelo, estos conductos suelen trabajar mejor cuando se someten a altas presiones de operación, así que se construyen con tubos de concreto reforzado, acero, acero forrado de cemento o hierro colado. Para un funcionamiento confiable se requiere la instalación de un sistema de válvulas de retención, equipo para control de oleadas, juntas de expansión, puertos de inspección, bombas y muchos otros accesorios. Los aumentos masivos de presión causados por cambios repentinos en el flujo se conocen como oleadas hidráulicas y se deben reducir al mínimo y controlar para evitar daños costosos a las tuberías. Se utilizan **túneles** cuando no resulta práctico abrir zanjas para una tubería.

### 11.6.2 Distribución

Un sistema de distribución de agua debe ser capaz de entregar ya sea el flujo máximo por hora o la demanda diaria máxima más las necesidades para incendio (lo que sea mayor) en cualquier punto del municipio. Se necesitan tuberías maestras de al menos 150 mm (6 in) de diámetro para hacer esto en áreas residenciales. El patrón de tuberías maestras de distribución, la disposición de las calles, la topografía y el tamaño de las tuberías, todo ello afecta el costo y la confiabilidad del sistema. La figura 11-8 es un ejemplo de un sistema de distribución de rejilla que continúa surtiendo a la mayor parte de los usuarios del agua por al menos una ruta diferente en caso de falla de una tubería. Las válvulas de cierre en las uniones de la rejilla pueden aislar cada segmento de tubería para fines de mantenimiento o reparación sin interrumpir el servicio a otras partes. Ésta es una característica importante para la confiabilidad del sistema, en especial en caso de incendio. Las tarifas de seguros contra incendio que se manejan en los municipios se basan en gran medida en la disponibilidad de una presión y gasto mínimos en las tomas de agua para incendios, al mismo tiempo que el sistema satisface las necesidades de los usuarios normales.

La presión del agua en la red de distribución varía entre 130 y 260 kPa (20 a 40 lb/in<sup>2</sup>) en áreas residenciales con edificios de no más de cuatro pisos de altura y de 400 a 500 kPa (60

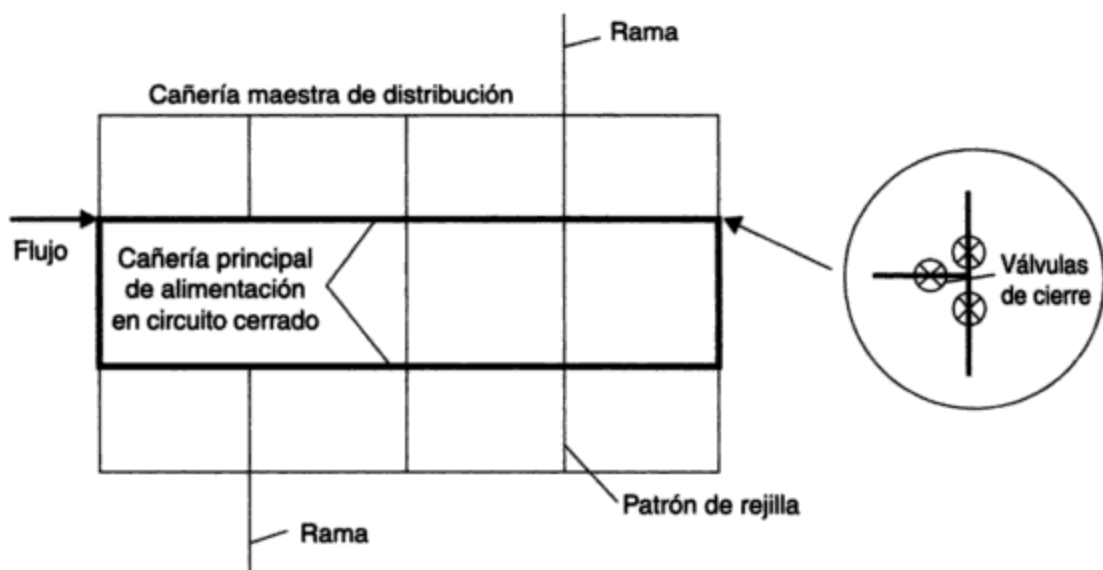
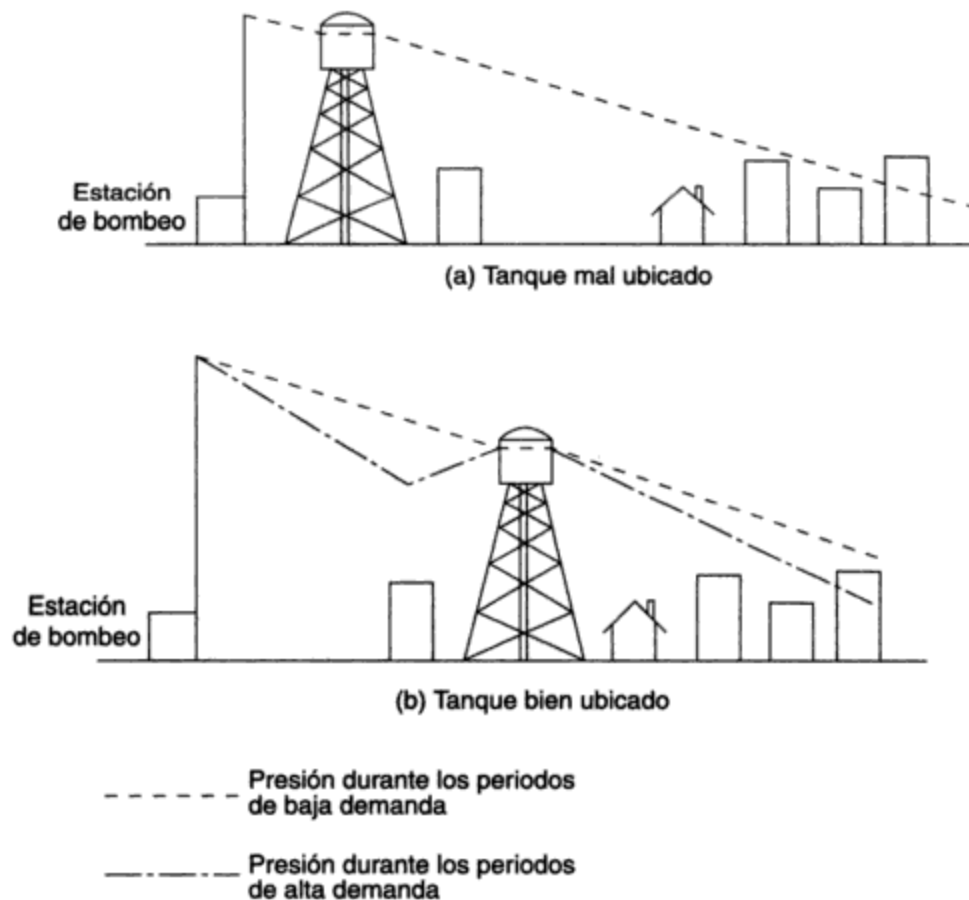


Figura 11-8 Configuración de un sistema de distribución.

nas reguladoras y tanques elevados (Hammer, 1986). Los depósitos de superficie se ubican en donde proporcionan suficiente presión de agua, ya sea por altura natural en una colina o por medio de bombas. Por lo general estos depósitos están cubiertos para evitar su contaminación. Las columnas reguladoras son básicamente tanques cilíndricos altos cuya parte superior constituye el almacenamiento útil para producir la carga de presión necesaria y cuya sección inferior sirve para sostener la estructura. Las columnas reguladoras de más de 15 m de altura no son económicas, y arriba de esta altura los tanques elevados de almacenamiento se convierten en la opción preferente.

La demanda de agua residencial varía de acuerdo con patrones razonablemente predecibles a lo largo del día. Las bombas de carga alta de la planta de tratamiento no se proyectan normalmente para satisfacer estos cambios de demanda. En cambio, la práctica común consiste en bombear agua al sistema de distribución a un régimen constante durante un periodo determinado y permitir que un depósito suministre agua adicional si la demanda supera a este régimen o que reciba agua si la demanda es menor que el régimen de bombeo. Los depósitos que operan de esta manera se conocen como *depósitos flotantes*; esto es, desempeñan su función reguladora sólo por presión hidrostática. En las grandes ciudades los depósitos pueden estar ubicados en el centro de varias áreas de distribución. La figura 11-10 ilustra cómo la ubicación



**Figura 11-10** Efecto de la ubicación del depósito de almacenamiento de agua en la distribución de la presión. Fuente: Adaptado de Linsley y Franzini (1992).

Copyrighted image

**Figura 11-11** Tanques elevados de almacenamiento de agua. (Fotografías cortesía de R. V. Anderson Associates Limited.)

Es común el uso de tanques de agua elevados, ya sea de acero o de concreto, para proporcionar una reserva compensadora en los sistemas de distribución de agua. (a) La ciudad canadiense Welland (50,000 habitantes) maneja la demanda variable de agua en una parte de la ciudad con un tanque de acero de  $5700\text{-m}^3$  ( $1.5 \times 10^6$  gal) de 39 m (129 ft) de altura, sostenido sobre 12 patas ajustables que permiten un asentamiento diferencial inicial. (b) La ciudad de A Kharji (100,000 habitantes) Arabia Saudita almacena  $800\text{ m}^3$  ( $2.1 \times 10^6$  gal) de agua de pozo en un tanque de concreto de 116 m (380 ft) de altura en conjunto. La estructura incluye un restaurante giratorio con 400 asientos.

de un depósito afecta su capacidad para compensar las presiones de operación en todo el sistema de distribución. Observe cómo el alto uso de agua y las pérdidas por fricción concomitantes aumentan la pendiente del perfil de presión de modo que el agua comienza a fluir del depósito al área circundante. Una vez que la demanda disminuye, la pendiente del perfil hidráulico de la bomba al tanque también lo hace y permite que el agua entre al tanque y reabastezca la reserva. En años recientes la popularidad de los tanques elevados ha menguado, en parte a causa de su mayor costo y en parte debido a la disponibilidad de bombas de velocidad variable y controles de costo relativamente bajo que hacen posible el ajuste de los regímenes de bombeo de acuerdo con las fluctuaciones de la demanda. La figura 11-11 muestra ejemplos de tanques elevados de almacenamiento de agua.

Además de la selección del tipo y ubicación del almacenamiento, es necesario determinar las dimensiones de la reserva. Este parámetro depende de la población (demanda de agua) y del propósito del almacenamiento. Los volúmenes para los tres propósitos (compensación de flujos, protección contra incendios y necesidades de emergencia) se calculan por separado de acuerdo con el periodo a lo largo del cual se les puede necesitar.

La **reserva de compensación**, llamada también *reserva de operación*, se emplea para satisfacer las demandas variables de agua al mismo tiempo que se mantiene una presión adecuada en el sistema. Cuando se dispone de información sobre la demanda de agua, el volumen de la reserva se puede calcular o encontrar por medios gráficos (a partir de un diagrama de masa, por ejemplo). Si no se dispone de información, la reserva de operación se toma como del 15 al 25% del consumo diario máximo.

La **reserva para incendios** se calcula como el producto del flujo para incendio por la duración del mismo. Los tiempos de duración de flujos para incendio que sugiere la National Fire Protection Association (NFPA; Asociación nacional para la protección contra los incendios) de EUA se muestran en la tabla 11-7. La capacidad de flujo para incendio se puede aumentar o reducir de acuerdo con la confiabilidad de la fuente de suministro de agua. Por ejemplo, un municipio puede aumentar su capacidad de almacenamiento para incendios si se utiliza una fuente de agua como un pozo individual.

**TABLA 11-7 DURACIÓN DEL FLUJO NECESARIO PARA INCENDIO**

Flujo necesario para incendio		
Millones de galones por día	Litros por segundo	Duración (h)
3.60 o menos	160 o más	2
4.32	190	3
5.04	220	3
5.76	250	4
6.48	280	4
7.20	320	5
7.92	350	5
8.64	380	6
10.08	440	7
11.52	500	8
12.96	570	9
14.40 o menos	630 o más	10

*Fuente:* Adaptado de National Fire Protection Association, *Fire Protection Handbook*, 17a. ed. (Boston, 1991). Conversión de las unidades SI por los autores.

La Insurance Advisory Organization (Organización para la asesoría de seguros) de EUA sugiere una **reserva para emergencias** hasta cinco veces la demanda diaria máxima, a fin de suministrar agua durante paros por mantenimiento o reparación del sistema. Esto rara vez se hace en la práctica, y la reserva para emergencias por lo común se estima en un cuarto o un tercio de la suma de las necesidades de operación y de capacidad para combate de incendios.

La suma de los tres volúmenes para compensación, incendios y emergencias es la capacidad de almacenamiento que se tiene en un sistema de suministro de agua municipal, la cual equivale normalmente al consumo promedio de un día.

#### **Ejemplo 11.5**

Calcule la capacidad de almacenamiento necesaria para la ciudad industrial/comercial/residencial mixta de 100,000 habitantes que se utilizó en el ejemplo 11.1



- 11.3.** Una pequeña comunidad de 1,000 habitantes, ubicada en el ártico canadiense, dispone de un sistema de abastecimiento de agua por camiones que tiene un lago cercano (a 3 km de la aldea) como fuente de agua. Hay 200 casas, un hotel, un hospital, una escuela, un dispensario y dos almacenes generales en la comunidad. El sistema total de caminos del pueblo tiene 2 km de longitud. Cada casa está equipada con un tanque de almacenamiento de agua de 1,000 L de capacidad, con tanques más grandes en los otros establecimientos. El consumo medio de agua es de 40 lpd. Es muy común que las tormentas invernales impidan que los camiones se trasladen al lago hasta por 3 días. Con base en esta información, determine (a) el tamaño del depósito de almacenamiento de la aldea; (b) el número de camiones que se requieren, si cada uno tiene un tanque de 4,000 L. Los camiones también tienen por objeto proporcionar protección contra incendios. Haga las suposiciones que considere necesarias para resolver este ejercicio e indique las razones de cada una.
- 11.4.** Un pozo se va a utilizar para abastecer de agua a una aldea de 5,000 habitantes. Se dispone del siguiente análisis químico de una muestra de agua:

Constituyente	mg/L
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	50
CaCO <sub>3</sub>	220
Cloruros (Cl)	200
Hierro (Fe)	1.8
Plomo (Pb)	0.01
Manganeso (Mn)	0.1
Nitrógeno de nitratos (como N)	4.0

- Recomiende un proceso de tratamiento para el abasto del pozo y dibuje un diagrama del tipo parecido al de la figura 11-3b.
- 11.5.** Una presedimentación reduce la concentración de sólidos en suspensión del agua de río de 500 mg/L a 200 mg/L. ¿Cuántas libras de sólidos secos representa esta cantidad por millón de galones? Si la densidad relativa de estos sólidos es de 2.60 y el sedimento que se extrae tiene una concentración de sólidos de 2%, ¿qué volumen de sedimento es necesario retirar cada semana con un flujo de diseño de 4 mgd?
- 11.6.** ¿Qué es la turbidez, cómo se mide, qué problemas causa en un sistema de abastecimiento de agua y qué procesos se utilizan para eliminarla?
- 11.7.** La planta de tratamiento de agua para la ciudad de 100,000 habitantes del ejemplo 11.3 se abastece a través de una toma fluvial. Normalmente, la turbidez del agua es de 50 TU. Tres o cuatro veces al año las fuertes lluvias causan que la turbidez aumente a 500 TU. Además, se sabe que la planta de tratamiento de aguas negras de una población cercana río arriba descarga aguas negras parcialmente tratadas en esas ocasiones a causa del alto régimen de desagüe que fluye por las tuberías combinadas de aguas pluviales y aguas negras que alimentan la planta. Con su configuración actual la planta no es capaz de suministrar la calidad necesaria de agua potable durante estos periodos, y varios ciudadanos prominentes han comenzado a quejarse. Analice las estrategias posibles para usted como ingeniero de obras hidráulicas de la población.
- 11.8.** Suele adicionarse fluoruro al agua potable municipal como ayuda para prevenir la caries dental. Un exceso de flúor en el agua potable causa fluorosis (manchas en los dientes). Si la dosificación apropiada para la comunidad es de 0.8 mg/L, calcule la cantidad de flúor que necesita la ciudad del ejemplo 11.1.
- 11.9.** Defina la coagulación y la floculación y explique cómo separan estos procesos los coloides del agua.

- 11.10. La figura 11-5a muestra la construcción de un lecho de filtro de arena rápido. Uno se podría preguntar por qué no se coloca encima una capa de partículas de grava de mayor tamaño para filtrar primero las partículas en suspensión más grandes, antes de que las partículas de arena más finas se utilicen para filtrar partículas en suspensión pequeñas. En otras palabras, se podría emplear un filtro más parecido al de la figura 11-3b. Explique por qué no se hace esto.
- 11.11. La figura 11-5b muestra un lecho de filtro de antracita/arena. Las partículas de antracita son más grandes que las de arena. ¿Cómo es posible que el filtro regrese al esquema apropiado de "arreglo según tamaño" después del lavado a contracorriente?
- 11.12. ¿Por qué la filtración del agua sin cloración es eficaz para controlar las bacterias patógenas pero no los virus patógenos?
- 11.13. El tiempo de retención nominal de los tanques de sedimentación del ejemplo 11.3 es de 2 h. El efluente del tanque intermedio es más turbio que el de cada uno de los otros dos tanques. Suponga que a usted se le pide investigar cuál podría ser el problema y si es posible sugerir un remedio. ¿Qué haría?
- 11.14. La cloración es el método usual para desinfectar el agua en Estados Unidos y Canadá.
- Mencione los dos parámetros que controlan el grado de desinfección.
  - ¿Por qué es necesario tomar medidas para evitar una dosis excesiva de cloro?
  - ¿Por qué la presencia de amoníaco en el agua reduce la eficiencia bactericida de cloro? ¿Por qué, entonces, ciertas plantas agregan amoníaco al agua clorada?
  - ¿Por qué la coagulación con alumbre previa a la cloración aumenta la eficiencia de desinfección del agua por el cloro?
  - Suponga que la desinfección con cloro sigue una cinética de reacción de primer orden. En una muestra de agua clorada que contiene 1.0 mg/L de cloro, la concentración inicial de bacterias viables es de 100,000/mL. Al final de un tiempo de contacto de 5 min el número de bacterias viables ha disminuido a 10/mL. ¿Qué efecto tendría un tiempo de contacto de 10 min en el recuento de bacterias?
- 11.15. Una nueva comunidad residencial del oeste medio de Estados Unidos, que se abastece de pozos privados, está considerando una fuente de suministro de aguas subterráneas (figura 11-12). Si se espera que la población alcance un máximo de 5,000 personas determine lo siguiente (haga las suposiciones necesarias y exponga su razonamiento).
- ¿Cuál es la capacidad mínima del pozo que se requiere para suministrar agua de forma adecuada a la población (en gpm y L/min)?
  - Los reglamentos de los seguros contra incendio demandan la existencia de reservas suficientes para fines de combate de incendios. Calcule el volumen total necesario de un depósito para incendio en la ubicación A o B (en galones y en litros).

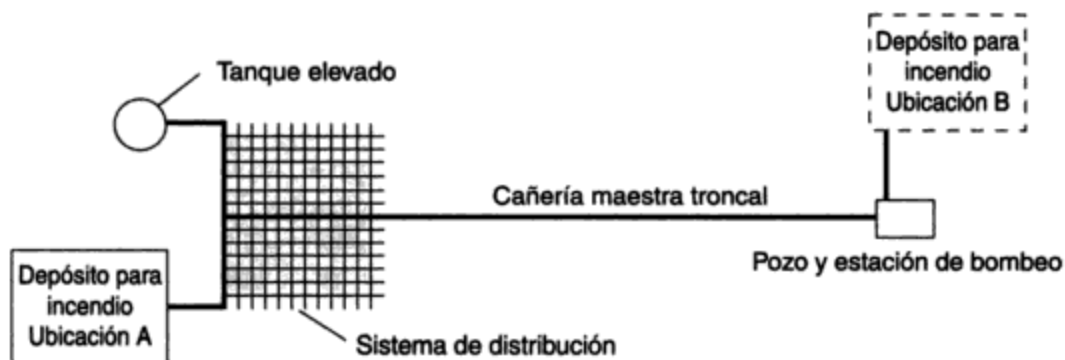


Figura 11-12

- (c) ¿Cuál debe ser la capacidad, en gpm y L/min, de la cañería maestra troncal si el depósito para incendio está en la ubicación A? ¿Si está en la ubicación B?
- (d) Suponiendo que la población utilizara un tanque elevado para suministrar toda el agua que se requiere durante la noche (de 10 P.M. a 6 A.M.), ¿cuál debe ser la capacidad del tanque elevado (en galones y en litros)? Suponga que durante este periodo el consumo de agua por hora es un tercio del consumo medio por hora.
- 11.16.** Usted ha tenido la suerte de conseguir un empleo de verano en la Organización Mundial de la Salud. Su tarea es actuar como asesor de los estudiantes de ingeniería y su jefe es el alcalde de una pequeña aldea de Centroamérica, ubicada en las llanuras costeras tropicales. En la aldea habitan 200 familias, o alrededor de 1,500 personas. La mayoría de las familias acarrear su agua en cubetas desde un arroyo cercano. La distancia media de acarreo es de 500 m. Alrededor del 25% de las familias adquieren agua de un vendedor local a 4 centavos de dólar por galón. Cinco de las familias más pudientes tienen pozos privados en sus propiedades. Los servicios sanitarios en toda la aldea son excusados externos. El alcalde le informa a usted que se han producido incidentes de diversas clases de enfermedades, cuya causa ha sido la situación sanitaria local, y le pide sugerencias para mejorar la situación. (Cortesía de W. M. McLellon, Florida Technological University.)
- (a) Al evaluar los costos y beneficios, ¿qué factores debe usted tomar en cuenta para determinar si se debe emprender un proyecto comunitario de suministro de agua?
- (b) Sugiera dos (o más) sistemas de diferentes niveles de refinamiento (y costo).
- (c) ¿Qué recursos y servicios debe movilizar y mantener la aldea para que el suministro de agua comunitario sea una empresa satisfactoria?
- 11.17.** Una fuente de aprovisionamiento de agua que suministra un máximo de  $1,000 \text{ m}^3/\text{día}$  a una población contiene  $100 \mu\text{g}$  de sustancias orgánicas tóxicas/L que los procesos de tratamiento convencionales no consiguen eliminar. Por fortuna, estas sustancias orgánicas son muy solubles en zorbitol líquido (DR = 1.5), por lo cual la concentración de las sustancias orgánicas tóxicas en zorbitol es 100 veces mayor que en agua. Si se utilizan  $5 \text{ m}^3/\text{día}$  de zorbitol, determine la concentración de sustancias orgánicas tóxicas que se alcanzaría en el agua de la población en (a) un mezclador-sedimentador de una sola etapa (figura 11-13a); (b) un sistema de mezclador-sedimentador a contracorriente de dos etapas (figura 11-13b), suponiendo que el mezclado es total en todos los casos.

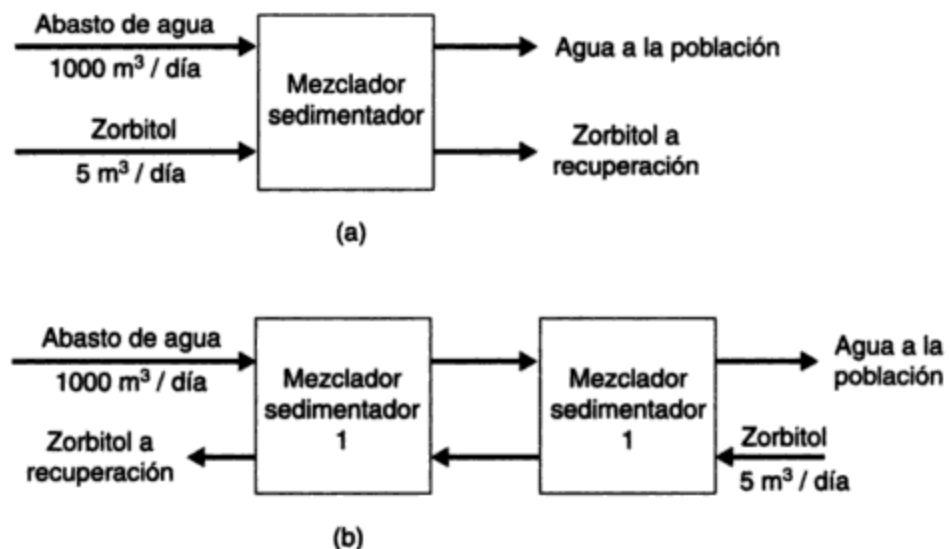


Figura 11-13

**REFERENCIAS**

- APHA, AWWA y WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18a. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Federation, 1992.
- GLEICK, P. D. (ed.) *Water in Crisis*. Nueva York: Oxford University Press, 1993.
- HAMMER, M. J. *Water and WasteWater Technology*, 2da. ed. Nueva York: Wiley, 1986.
- INSURANCE SERVICES OFFICE. *Guide for Determination of Required Fire Flow*. Nueva York: Insurance Services Office, 1974.
- LINSLEY, R. K. y FRANZINI, J. B. *Water Resources Engineering*, 4a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1992.
- LOWRY, E. F. "Breaking the Cost Barrier to Household Water Service". *Journal of the American Water Works Association*, diciembre (1980): 672-677.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, *Fire Protection Handbook*, 17a. ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1991.
- NHW (Minister of National Health and Welfare Canada). *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*, 5a. ed. Ottawa: Canada Communication Group, 1993.
- RICH, L. G. *Unit Operations of Sanitary Engineering*. Nueva York: Wiley, 1961.
- SOLLEY, W. B., CHASE, E. B. y MANN, W. B. IV. "Estimated Use of Water in the United States en 1980". *U.S. Geological Survey Circular 1001*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1983.
- STEEL, E. W. y MCGHEE, T. J. *Water Supply and Sewerage*, 6a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1991.
- U.S. EPA. *Drinking Water Regulations and Health Advisories*. Washington, D.C.: Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, 1993.
- VISSMAN, W., JR. y HAMMER, M. J. *Water Supply and Pollution Control*, 5a. ed. Nueva York: Harper & Row, 1993.
- WHO. *Guidelines for Drinking Water Quality*. Ginebra: World Health Organization, 1984.

# CAPÍTULO 12

---

## Contaminación del agua

*J. Glynn Henry*

### 12.1 INTRODUCCIÓN

Como hemos señalado en el capítulo 8, la correlación entre el agua contaminada y las enfermedades quedó firmemente establecida con la epidemia de cólera de 1854 en Londres, Inglaterra. La protección de la salud pública, que fue el propósito original del control de la contaminación, es todavía el objetivo primordial en muchas áreas. No obstante, la conservación de los recursos hidráulicos, la protección de las áreas de pesca y el mantenimiento de las aguas recreativas son preocupaciones adicionales en la actualidad. Los problemas de contaminación del agua se intensificaron después de la Segunda Guerra Mundial, cuando se produjeron aumentos espectaculares en la densidad urbana y la industrialización. La preocupación respecto a la contaminación del agua alcanzó un máximo a mediados de la década de 1970. En Estados Unidos, donde el control nacional está a cargo del gobierno federal, la Public Law (Ley pública) 92-500 (1972) constituyó el reconocimiento oficial de esta inquietud. En Canadá, donde el control de la contaminación es una responsabilidad provincial, Ontario, a través de la Water Resources Act (Ley de recursos hidráulicos, 1970), fue la provincia más activa en inducir a los municipios a entrar en acción. La situación fue similar en Gran Bretaña, Europa, Japón y otros países industrializados, en donde la urbanización y la industrialización crecientes se vieron acompañadas de graves problemas de contaminación del agua. En las regiones menos desarrolladas, los desperdicios de las poblaciones en pleno crecimiento constituyen una amenaza para la salud pública y ponen en peligro el uso ininterrumpido de reservas de agua en muchos casos insuficientes.

*Contaminación del agua* es un término poco preciso que nada nos dice acerca del tipo de material contaminante ni de su fuente. El modo de atacar el problema de los residuos depende de si los contaminantes demandan oxígeno, favorecen el crecimiento de algas, son infecciosos, tóxicos o simplemente de aspecto desagradable. La contaminación de nuestros recursos hidráulicos puede ser consecuencia directa del desagüe de aguas negras o de descargas industriales (*fuentes puntuales*), o indirecta de la contaminación del aire o de desagües agrícolas o urbanos (*fuentes no puntuales*).

Este capítulo se ocupa principalmente de las fuentes puntuales; proporciona información respecto a los orígenes, cantidades y características de las aguas residuales y también presenta los efectos de los contaminantes en el ambiente acuático. Se revisa el uso de estándares para corrientes, y por otro lado los objetivos de calidad del agua para controlar la contaminación; también se evalúan las características de los sistemas de alcantarillado combinados e independientes. Se explican los principios del tratamiento de aguas y los métodos disponibles para instalaciones tanto grandes como pequeñas. Los sistemas que se analizan van desde complejos municipales que emplean combinaciones de métodos físicos, biológicos y químicos hasta unidades idóneas para satisfacer las necesidades de una sola familia.

Los controles jurídicos y económicos son otras medidas que se emplean para controlar la contaminación del agua. Multas, recargos, incentivos financieros, acuerdos de subdivisión y reglamentos para el uso de alcantarillas son algunas de las herramientas disponibles. Se describen éstas y también las tendencias actuales en el control de la contaminación. Los principios que se examinan en el capítulo se ilustran por medio de ejemplos.

## 12.2 AGUAS RESIDUALES

Las *aguas residuales* municipales, también llamadas *aguas negras*, son una mezcla compleja que contiene agua (por lo común más de 99%) mezclada con contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos. La concentración de estos contaminantes normalmente es muy pequeña, y se expresa en mg/L, esto es, miligramos de contaminante por litro de la mezcla. Ésta es una relación de peso/volumen que se emplea para indicar concentraciones de componentes en agua, aguas residuales, desperdicios industriales y otras soluciones diluidas. Puesto que la densidad relativa (DR) de estas soluciones diluidas es similar a la del agua, las concentraciones también se pueden considerar relaciones de peso/peso, como mg/kg o ppm (partes por millón). Sin embargo, cuando la DR de la mezcla no es 1.0, mg/L y ppm no son términos indistintos.

### 12.2.1 Componentes

**Microorganismos.** Dondequiera que hay alimento adecuado, suficiente humedad y una temperatura idónea, los microorganismos prosperan. Las aguas negras proporcionan un ambiente ideal para una inmensa colección de microbios, sobre todo bacterias, más algunos virus y protozoarios. Como se mencionó en el capítulo 8, la mayor parte de los microorganismos de las aguas residuales son inofensivos y se pueden emplear en procesos biológicos para transformar materia orgánica en productos finales estables. No obstante, las aguas negras también pueden contener patógenos (organismos causantes de enfermedades) provenientes de los excrementos de personas con enfermedades infecciosas susceptibles de transmitirse en el agua contaminada. Enfermedades bacterianas de transmisión por agua como el cólera, la tifoidea y la tuberculosis, o enfermedades virales como la hepatitis infecciosa, y la disentería causada por protozoarios, rara

Además de estos componentes químicos, la concentración de gases disueltos, en especial de oxígeno, y la concentración de iones hidrógeno (expresada como pH) son otros parámetros de interés en las aguas residuales.

**Materia orgánica.** Las proteínas y carbohidratos constituyen el 90% de la materia orgánica de las aguas negras domésticas. Las fuentes de estos contaminantes biodegradables incluyen los excrementos y orina humanos, los residuos de alimentos de los fregaderos, el polvo y la suciedad procedente del baño y del lavado de ropa, más varios jabones, detergentes y otros productos de limpieza.

Se utilizan diversos parámetros como medida de la concentración orgánica de las aguas residuales. Un método se basa en la cantidad de carbono orgánico (carbono orgánico total, o COT) presente en los residuos. El COT se determina midiendo la cantidad de  $\text{CO}_2$  que se produce cuando el carbono orgánico de la muestra se oxida por medio de un oxidante fuerte y comparándolo con la cantidad que genera un estándar de COT conocido. En la figura 12-1 se muestra un instrumento que mide el COT.

Copyrighted image

**Figura 12-1** Analizador de carbono orgánico total.

Modelo actual de analizador automático en el cual se utiliza la oxidación química para determinar el COT en agua y en aguas residuales.

En su mayoría, los otros métodos comunes se basan en la cantidad de oxígeno que se necesita para convertir el material oxidable en productos finales estables. Puesto que el oxígeno que se consume es proporcional al material oxidable presente, sirve como una medida relativa de la concentración de las aguas residuales. Los dos métodos de uso más frecuente para determinar las necesidades de oxígeno de las aguas residuales son las pruebas de DQO y DBO. La *de-*

*manda química de oxígeno (DQO)* de las aguas residuales es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente las sustancias orgánicas presentes; la *demanda bioquímica de oxígeno (DBO)* es la cantidad medida de oxígeno que requieren microorganismos aclimatados para degradar biológicamente la materia orgánica de las aguas residuales.

La DBO es el parámetro más importante en el control de la contaminación del agua. Este dato se utiliza como una medida de la contaminación orgánica, como una base para estimar el oxígeno necesario para los procesos biológicos y como un indicador del rendimiento de los procesos.

### 12.2.2 Medición de la DBO

La cantidad de materia orgánica que contiene el agua o las aguas residuales se puede medir de forma directa (como COT, por ejemplo), pero esto no nos dice si las sustancias orgánicas son, en términos biológicos, degradables o no. Para medir la cantidad de materia orgánica biodegradable se utiliza un método indirecto en el cual se mide la cantidad de oxígeno que consume una población microbiana en crecimiento para convertir (oxidar) la materia orgánica en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en un sistema cerrado. El oxígeno que se consume, o DBO, es proporcional a la materia orgánica transformada, y por tanto la DBO es una medida relativa de la materia orgánica biológicamente degradable presente en el sistema. Puesto que la oxidación biológica continúa indefinidamente, la prueba de la DBO última se ha limitado de manera arbitraria a 20 días, cuando se ha consumido quizá el 95% o más del oxígeno necesario. No obstante, incluso este periodo es demasiado largo para que la medición de la DBO sea útil, por lo cual una prueba de 5 días, la  $\text{DBO}_5$ , que se lleva a cabo a  $20^\circ\text{C}$ , se ha convertido en la norma. La velocidad de la reacción de la DBO depende del tipo de residuos presentes y de la temperatura; se supone que varía directamente con la cantidad de materia orgánica (carbono orgánico) presente (una reacción de primer orden).

En la figura 12-2 se muestra una gráfica de  $L$ , la DBO carbonosa restante, en función del tiempo  $t$ . Puesto que la cantidad de oxígeno consumido en función del tiempo representa la cantidad de materia orgánica oxidada, la curva  $L_0 - L$  muestra la materia orgánica carbonosa oxidada en el tiempo  $t$ . Las ecuaciones correspondientes a  $L$  y  $L_0 - L$ , que se muestran como líneas continuas en la figura, son

$$L = L_0(10^{-kt}) \quad (12.1)$$

y

$$L_0 - L = L_0(1 - 10^{-kt}) \quad (12.2)$$

donde  $L$  = carbonosa restante en el tiempo  $t = t$   
( $\text{O}_2$  necesario para oxidar la materia orgánica carbonosa restante)

$L_0$  = demanda carbonosa de oxígeno última (esto es, DBO última;  
 $\text{O}_2$  necesario para oxidar la materia orgánica carbonosa presente al principio)

$L_0 - L$  = demanda carbonosa de oxígeno (esto es, DBO satisfecha;  
 $\text{O}_2$  utilizado para oxidar la materia orgánica carbonosa en el tiempo  $t = t$ )

$t$  = tiempo (días)

$k$  = constante de velocidad (base 10) ( $\text{día}^{-1}$ )



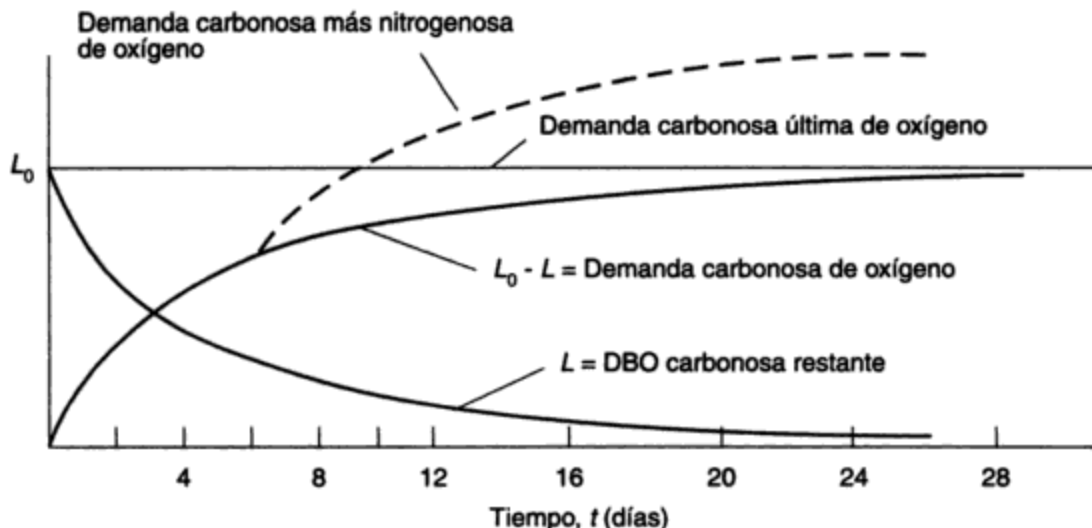


Figura 12-2 Curvas de DBO a 20°C.

Las curvas  $L$  y  $L_0 - L$  indican la oxidación del carbono (DBO carbonosa) de la materia orgánica a  $\text{CO}_2$  y agua. Sin embargo, después de 5 a 10 días los compuestos nitrogenados comienzan a ser oxidados. La línea punteada de la figura indica el efecto en la demanda de oxígeno cuando el nitrógeno presente en los residuos se oxida en la conversión (nitrificación) del amoníaco en nitratos. Este ejercicio de la DBO en una segunda etapa se puede inhibir en la prueba de DBO con la adición de agentes químicos apropiados. En la tabla 12-2 se presentan valores representativos de la constante de velocidad  $k$  (base 10) a 20°C para la oxidación carbonosa.

TABLA 12-2 CONSTANTES DE VELOCIDAD DE ELIMINACIÓN DE DBO

Fuente de contaminación orgánica	Rapidez de cambio $k$ de DBO por día (base 10)
Agua fluvial	0.10
Aguas negras domésticas	0.17
Solución de glucosa	0.25

Fuente: C. N. Sawyer y P. L. McCarty. *Chemistry for Environmental Engineers*, 3ra ed. (Nueva York: McGraw-Hill, 1978).

La constante de velocidad  $k$  de la tabla es aplicable a 20°C. Para otras temperaturas, se puede utilizar una versión simplificada de la expresión de van't Hoff-Arrhenius para modificar  $k$ :

$$\frac{k_T}{k_{20}} = \theta^{(T-20)} \quad (12.3)$$

en donde  $\theta = 1.047$  y  $T$  es la temperatura (°C). El valor del coeficiente de temperatura adimensional  $\theta$  también depende de la temperatura, aunque para temperaturas entre 10 y 25°C el cambio de  $\theta$  es pequeño y se puede despreciar.

### 12.2.3 Aguas residuales municipales

Los residuos que excretan los humanos se conocen como **aguas negras sanitarias**. Las aguas residuales de áreas residenciales, que se describen como **aguas negras domésticas**, incluyen residuos provenientes de cocinas, baños, lavado de ropa y drenaje de pisos. Éstas, junto con los residuos líquidos de los establecimientos comerciales e industriales, se designan como **aguas residuales municipales**. Éstas normalmente se recogen en un sistema de alcantarillado público (alcantarillas, registros, estaciones de bombeo, etc.) y se envían a los centros de tratamiento para su eliminación sin peligro.

La cantidad de aguas residuales municipales por lo común se determina a partir del uso de agua. Puesto que el agua es consumida por los humanos, se utiliza en productos industriales, se emplea como medio de enfriamiento, y es necesaria para actividades como el riego de prados y el lavado de las calles; sólo del 70 al 90% del agua suministrada llega a las alcantarillas. No obstante, suele suponerse que la pérdida de agua se compensa por infiltración (fugas de aguas subterráneas hacia el sistema de alcantarillado a través de uniones defectuosas) o con aguas pluviales, que entran al sistema de alcantarillas sanitarias por conexiones ilícitas (bajadas pluviales de los techos y sumideros de caminos) o por las aberturas de los registros.

En Estados Unidos, el uso de agua municipal y el flujo de aguas residuales resultante varían desde alrededor de 280 L (75 gal) per cápita por día en el caso de municipios residenciales pequeños hasta más de 900 lpd (240 gpd) en las grandes ciudades industrializadas (véase también la tabla 11-1). Estos promedios diarios se basan en cantidades anuales. Sin embargo, los flujos varían día con día. De los municipios más grandes (500,000 habitantes) a los más pequeños (10,000 habitantes), los flujos, como porcentaje del promedio diario anual, pueden variar desde máximos de 150 a 200% por día y de 200 a 300% por hora, hasta mínimos de 70 a 50% por día y 50 a 30% por hora, en donde los extremos de cada caso (el segundo valor) se aplican al municipio más pequeño. La calidad de las aguas residuales municipales varía con la proporción de contribuyentes residenciales, comerciales e industriales y con la naturaleza de los residuos industriales que el sistema recibe. La concentración de contaminantes en las aguas negras de áreas residenciales se puede estimar con base en la contribución diaria *per cápita* si se conoce el uso de agua. En la tabla 12-3 se indican los valores típicos.

**TABLA 12-3** CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS NEGRAS DOMÉSTICAS CON BASE EN CONTRIBUCIONES TÍPICAS *PER CÁPITA* A LAS AGUAS RESIDUALES

	Parámetro <sup>a</sup>								
	DBO <sub>5</sub>	SS	SD	DQO	COT	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>
<i>Per cápita</i>									
g/día	76	90	180	128	54	1.6	4.0	16	0
lb/día	0.17	0.20	0.40	0.28	0.12	0.003	0.009	0.035	0
Concentración									
(mg/L) <sup>b</sup>	190	225	450	320	135	4.0	10	40	0

<sup>a</sup>DQO, estimada suponiendo que DBO<sub>5</sub>/DQO = 0.6; COT, estimado suponiendo que DBO<sub>5</sub>/COT = 1.4.

<sup>b</sup>Con base en un flujo de 400 lpd de aguas residuales; P<sub>1</sub>, fósforo de residuos de origen humano como P; P<sub>2</sub>, fósforo total (con detergentes a base de PO<sub>4</sub>) como P; N<sub>1</sub>, nitrógeno por Kjeldahl (orgánico + NH<sub>3</sub>) como N; N<sub>2</sub>, nitrógeno de nitratos como N.

Fuente: Los valores se basan, en parte, en Metcalf y Eddy (1979, 1991).

De la precipitación pluvial total por año en el mundo, quizá dos tercios se pierden por evaporación y transpiración, y el resto queda almacenado como aguas superficiales y aguas subterráneas. Incluso durante las tormentas, no toda el agua de lluvia se convierte en desagüe. La proporción que lo hace varía alrededor del 20% en parques y prados hasta el 100% en techos y áreas pavimentadas. Un valor medio global para un municipio puede estar entre el 30 y el 50% durante las tormentas intensas. El ejemplo 12.1 compara la cantidad de agua pluvial con el volumen de aguas residuales municipales de una comunidad principalmente residencial.

El desagüe de agua pluvial, en particular en las ciudades, contiene aceite, grasa, polvo y otros particulados procedentes de caminos, hojas de árboles, recortes de hierba de prados y parques, así como precipitación de contaminantes del aire. La concentración de estos contaminantes es más alta cuando los mismos son arrastrados inicialmente al sistema de alcantarillas durante las primeras etapas de la precipitación, y después disminuye conforme la lluvia continúa.

La tabla 12-4 muestra valores representativos de contaminantes en los tres tipos de aguas residuales con los cuales un municipio debe tratar. Cualquiera de ellos puede ser una importante causa de preocupación la mayor parte del tiempo o sólo ser un problema ocasional, de acuerdo con los volúmenes relativos y las características de cada tipo de aguas residuales. El ejemplo 12.2 ilustra el uso que se puede dar a la información que contiene la tabla 12-4 para estimar las características de las aguas residuales cuando el muestreo en campo no resulta práctico.

### Ejemplo 12.1

Un municipio con una población de 10,000 personas en un área de 200 ha (494 acres) utiliza agua a un régimen promedio de 400 lpd (105 gpd). La precipitación pluvial anual es de 900 mm (36 in) por año, y la intensidad máxima de precipitación durante una tormenta fuerte que se produce, en promedio, una vez cada dos años es de 25 mm (1 in) por hora cuando toda el área contribuye al desagüe. Compare el desagüe de agua pluvial con el flujo medio de aguas negras sanitarias (a) sobre una base anual y (b) durante una tormenta fuerte.

(a) **Base anual:** el flujo sanitario (que se supone igual al uso de agua) es

$$Q = 10,000 \times \frac{400}{10^3} \times 365 = 1.46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \quad (386 \times 10^6 \text{ gal/año})$$

Para este caso se supone que el desagüe pluvial es el 20% de la precipitación. Por tanto,

$$Q = 200 \text{ ha} \times 10^4 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \times \frac{900 \text{ mm/año}}{10^3 \text{ mm/m}} \times 0.2 = 0.36 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \quad (95.1 \times 10^6 \text{ gal/año})$$

Por consiguiente,

$$\frac{\text{desagüe pluvial}}{\text{flujo sanitario}} = \frac{0.36}{1.46} \times \frac{10^6}{10^6} \times 100 = 25\% \text{ sobre una base anual}$$

(b) **Durante la tormenta:** el flujo sanitario (que se supone igual al uso de agua) es

$$Q = \frac{10,000 \times 400}{24 \times 60} = 2,777 \text{ L/min} \quad (734 \text{ gpm})$$

Se supone que el desagüe pluvial es un tercio de la precipitación. Por tanto

$$Q = 200 \text{ ha} \times \frac{10^4 \text{ m}^2}{\text{ha}} \times \frac{25 \text{ mm/h}}{60 \text{ min/h}} \times \frac{1}{3} = 277,777 \text{ L/min} \quad (73,400 \text{ gpm})$$

TABLA 12-4 VALORES REPRESENTATIVOS DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES<sup>a</sup>

Tipo de aguas residuales	Municipal (R + C + I)			Industrial (de proceso)			Agua pluvial (desagüe anual)
	Pequeña	Mediana	Grande	Alimentos	Carnes	Recubrimiento con metales	
Volumen (L) /cápita/día	400	500	600	—	—	—	—
/tonelada/producto	—	—	—	10,000	12,000	—	—
% de desagüe	—	—	—	0	—	—	—
MPN (10 <sup>6</sup> /100 mL)	100	80	70	—	—	0	30/35/45
DBO <sub>5</sub>	190	240	300	1,200	640	0	0.008
DQO	320	400	500	—	—	0	14
COT	135	170	215	—	—	—	100
Sólidos en susp.	225	300	350	700	300	0	—
Sólidos disueltos	450	600	700	—	200	—	170
N total	40	30	25	0	3	0	3.5
P total	10	8	7	0	—	0	0.35
pH	7.0	7.0	7.0	—	7.0	4 o 10	—
Cobre	0.14	0.17	0.27	0.29	0.09	6	0.46
Cadmio	0.003	0.010	0.016	0.006	0.011	1	0.025
Cromo	0.04	0.08	0.16	0.15	0.15	11	0.16
Níquel	0.01	0.06	0.11	0.11	0.07	12	0.15
Plomo	0.05	0.1	0.2	—	—	—	—
Zinc	0.19	0.29	0.38	1.08	0.43	9	1.6

<sup>a</sup>Las concentraciones de los componentes están en mg/L. Los valores de todos los parámetros pueden variar ampliamente respecto a los señalados.

Pequeña: comunidad residencial (R) pequeña

Mediana: municipalidad diversificada de tamaño medio, áreas residenciales (R), comerciales (C) e industriales (I) con alcantarillas separadas

Grande: ciudad grande industrializada (R + C + I) con alcantarillas combinadas

Residuos de alimentos: Fábrica enlatadora: encurtidos, betabels, tomates, peras

Procesamiento de carnes: Planta de aves de corral sin recuperación de estiércol ni sangre

Taller de recubrimiento con metales: Los residuos son ácidos (baños crómicos), alcalinos (baños de cianuro), y < 2,000 m<sup>3</sup>/día (la mayor parte de las plantas)

Fábrica textil: Fibra de algodón hilada procesada en artículos de algodón, almidonados

Fuentes: Adaptado en parte de P. G. Collins, y J. W. Ridgway, *Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers* 106(EE-1) (1980); L. A. Klein et al., *Journal of the Water Pollution Control Federation* 46(12) (1974); N. L. Nemerow, *Industrial Water Pollution*, Reading, Mass: Addison-Wesley, 1978; I. Polls y R. Lanyon, *Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers* 106(EE-1) (1980); y D. H. Waller y Z. Novak, *Journal of the Water Pollution Control Federation* 53(3) (1981).

Por consiguiente,

$$\frac{\text{desagüe fluvial}}{\text{flujo sanitario}} = \frac{277,777}{2,777} = \frac{100}{1}$$

durante una tormenta con una intensidad de 25 min (1 in) por hora.

**Ejemplo 12.2**

Una municipalidad pequeña de 9,000 personas tiene dos industrias: una enlatadora que produce 4,000 toneladas de tomates enteros y otros productos enlatados a lo largo de una temporada de 7 meses, y una fábrica textil que produce 2,000 kg de artículos de algodón por día. Estime la DBO<sub>5</sub> y el contenido de SS de las aguas residuales municipales (a) con y (b) sin estas industrias abastecidas por el sistema municipal. (c) Determine el equivalente de población (EP) de la enlatadora en términos de DBO<sub>5</sub>.

**Solución** Con base en la información que se proporciona y la de la tabla 12-4, podemos estructurar la siguiente tabla:

Parámetro	Residencial	Enlatadora	Textil	Total
Cantidad	9000 personas	$\frac{4000 \text{ toneladas}}{210 \text{ días}}$	$\frac{2 \text{ toneladas}}{\text{día}}$	—
Vol. unitario	400 Lpcd	10,000 L/tonelada	100,000 L/tonelada	—
Volumen	3600 m <sup>3</sup> /día	200 m <sup>3</sup> /día	200 m <sup>3</sup> /día	4000 m <sup>3</sup> /día
DBO <sub>5</sub>	190 mg/L	1200 mg/L	400 mg/L	$\frac{(190 \times 3.6) + (1200 \times 0.2) + (400 \times 0.2)}{3.6 + 0.2 + 0.2} = 250 \text{ mg/L}$
SS	225 mg/L	700 mg/L	100 mg/L	$\frac{(225 \times 3.6) + (700 \times 0.2) + (100 \times 0.2)}{3.6 + 0.2 + 0.2} = 240 \text{ mg/L}$

Tenemos entonces que:

(a) Industrias incluidas:  $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{día}$ ,  $DBO_5 = 250 \text{ mg/L}$ ,  $SS = 240 \text{ mg/L}$

(b) Industrias excluidas:  $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{día}$ ,  $DBO_5 = 190 \text{ mg/L}$ ,  $SS = 225 \text{ mg/L}$

(c) EP de la enlatadora:  $PE = \frac{200 \text{ m}^3/\text{día} \times 1200 \text{ mg DBO}_5/\text{L}}{76 \text{ g DBO}_5/\text{cápita} \cdot \text{día}} \times \frac{10^3 \text{ L}}{\text{m}^3} \frac{10^{-3} \text{ g}}{\text{mg}} = 3160 \text{ personas}$

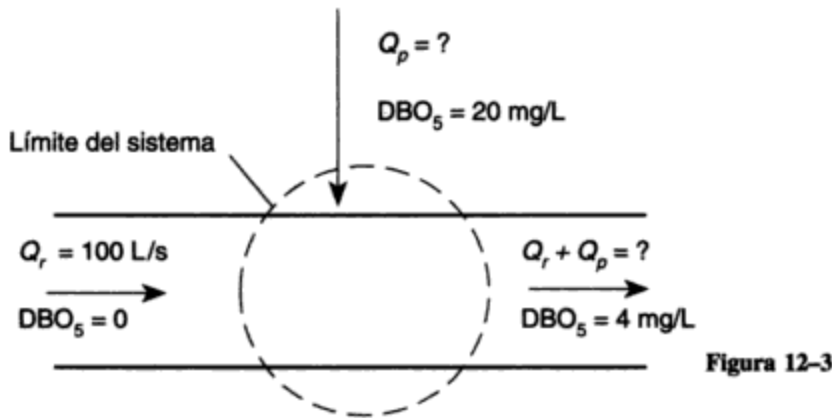
**12.3 CONTAMINACIÓN DE AGUAS RECEPTORAS**

**12.3.1 Efectos de los contaminantes**

El agua se contamina cuando la descarga de residuos perjudica la calidad del agua o perturba el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes que causan problemas comprenden organismos causantes de enfermedades (patógenos), materia orgánica, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color, espuma, calor y materiales radiactivos. La descarga de contaminantes específicos no es la única causa de contaminación del agua. La construcción de presas, embalses y desviaciones de ríos también puede degradar seriamente la calidad del agua. Estas últimas influencias se analizaron en el capítulo 10.

ser mayor de 4 mg/L? Suponga que no hay contaminación río arriba y que el abasto de agua municipal no proviene del río.

**Solución** Suponiendo una mezcla completa y eligiendo 1 s como intervalo de tiempo conveniente, escriba un balance de materia sobre la DBO<sub>5</sub> (figura 12-3).



$$\text{DBO}_{\text{río corriente arriba}} + \text{DBO}_{\text{residuos}} = \text{DBO}_{\text{río corriente abajo}}$$

$$Q_r \times 0 + Q_p \times 20 = (Q_r + Q_p) 4$$

$$Q_p = \frac{4Q_r}{16} = 25 \text{ L/s}$$

$$\text{Población a 400 Lpcd} = \frac{25 \times 60 \times 60 \times 24}{400} = 5,400 \text{ personas}$$

### 12.3.3 Necesidad de control de la contaminación

Se ha dicho en muchas ocasiones, y en parte sólo en broma, que la solución a la contaminación es la dilución. Para contaminantes convencionales como DBO, SS y fósforo, esta afirmación tiene lógica. Cuando se descargan cantidades pequeñas de aguas negras en ríos o cuerpos de agua relativamente grandes, los incidentes de abasto de agua contaminada o peligros para la salud pública son poco frecuentes. La razón de esto es la dilución de los contaminantes y la purificación natural que se lleva a cabo. Al aumentar la población, estos factores mitigantes pierden eficacia y, tarde o temprano, se hace necesaria alguna forma de tratamiento de aguas residuales. Al principio, un tratamiento parcial (primario), por lo común consistente en tamizado y sedimentación, basta para impedir los indicios más obvios de la contaminación; sin embargo, al continuar la urbanización, puede ser necesario un tratamiento adicional (secundario) por métodos biológicos. La eficiencia del tratamiento necesario se puede correlacionar con la capacidad asimilativa de las aguas receptoras, esto es, con su capacidad para aceptar materia orgánica, nitrógeno y otros contaminantes sin que se creen problemas. Esto se determina con base en estudios de campo.

La necesidad del tratamiento de las aguas residuales surge en todos los países. En las regiones menos desarrolladas, el tratamiento de los residuos domésticos para la protección de la salud pública todavía constituye la preocupación principal. Por ejemplo, en grandes áreas de la India, África y Sudamérica, los residuos sin tratamiento se introducen en aguas receptoras que son utilizadas directamente por grandes poblaciones para propósitos de lavado, baño y como agua potable. En la mayor parte de los países desarrollados la necesidad está cambiando, de las

consideraciones tan sólo de salud pública, al control de la eutroficación, la protección de la vida acuática y la preocupación por las sustancias químicas presentes en el ambiente.

Los métodos de tratamiento en un país o región varían con la densidad de población y el estado de desarrollo tecnológico. Las comunidades rurales escasamente pobladas pueden emplear procesos de tratamiento sencillos a fin de reducir la concentración de DBO, SS y patógenos en las aguas negras domésticas. Sin embargo, en los centros urbanos, a medida que aumenta la complejidad de los residuos municipales e industriales y se incrementa la necesidad de proteger las aguas receptoras, los métodos de tratamiento deben ser más refinados y eficientes.

## 12.4 RECOLECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES

### 12.4.1 Los primeros sistemas

Los restos de las atarjeas (canales de mampostería para conducir el agua) de la civilización minoica del 3000 a.C. se pueden ver todavía en la isla griega de Creta. Estas alcantarillas conducían desagüe de precipitación pluvial, agua de los baños y quizá otros residuos del palacio. No obstante estos inicios tan tempranos, el uso de alcantarillas no se generalizó hasta los tiempos de los romanos, cuando se instalaron tubos principalmente para desalojar el agua de lluvia de las calles, pues pocas casas o edificios tenían atarjeas. Prácticamente no hubo más avances hasta mediados del siglo XIX, cuando se inició la descarga de residuos de origen humano en alcantarillas. Los “desagües de agua pluvial” se utilizaban de esta manera en parte por razones de comodidad y estética, pero también, algo más importante, porque las personas finalmente habían tomado conciencia de que las aguas negras y los residuos domésticos, si no se eliminaban, podían contaminar el agua y causar enfermedades. La construcción de este tipo de sistema combinado (esto es, alcantarillas que transportan tanto agua pluvial como residuos de origen humano) continuó hasta muy avanzado el siglo XX. Durante este periodo, a medida que los sistemas de alcantarillado aumentaron en extensión, la concentración de los desperdicios en las salidas originaba condiciones de aspecto desagradable, depósitos de sólidos y malos olores, todo lo cual obligó a proporcionar diversos grados de tratamiento a las aguas residuales. A lo largo de los años, los problemas que presentan las alcantarillas combinadas (depósito de sólidos, olor, inundación de sótanos y otros) dieron origen al concepto de alcantarillas separadas: un sistema para aguas pluviales y otro para residuos sanitarios. Ésta es la práctica que se prefiere en la actualidad, aunque se puede argumentar, con cierta justificación, que todo el drenaje requiere tratamiento y que la mejor manera de llevarlo a cabo es con un sistema combinado.

### 12.4.2 Sistemas actuales

Los sistemas actuales de recolección de aguas de alcantarillado en las áreas más nuevas normalmente consisten en alcantarillas de agua pluvial y sanitarias independientes, y en alcantarillas combinadas en las secciones más antiguas de las ciudades.

**Alcantarillas sanitarias.** Las alcantarillas sanitarias transportan las aguas negras domésticas, los residuos líquidos comerciales e industriales y las aportaciones indeseables de infiltración y aguas pluviales. Puesto que las descargas de aguas negras de viviendas, edificios y fábricas se pueden producir de forma simultánea, el diseño de las alcantarillas sanitarias debe

permitir el manejo del flujo máximo. La *fórmula de Harmon* es una de varias, con base en la población, que se utilizan para estimar la proporción de gasto máximo a gasto promedio:

$$\frac{\text{gasto máximo}}{\text{gasto promedio}} = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (12.4)$$

en donde  $P$  es la población en miles de habitantes. Los intervalos típicos de variación del flujo se indicaron en la sección 12.2.3.

En algunos municipios se instalan unidades de eliminación de fregadero que se colocan con el propósito de macerar los residuos orgánicos domésticos (alimentos) a fin de que los mismos se arrastren a la alcantarilla sanitaria en vez de recolectarse con la basura municipal. La comodidad para los propietarios de las viviendas y la posibilidad de una recolección de basura menos frecuente se compensan con el costo de la unidad y el mayor costo de tratamiento de los SS y la carga orgánica adicionales que se descargan a las alcantarillas y a los centros de tratamiento municipales. En los lugares donde se utiliza este tipo de unidades de eliminación, los aumentos de SS y DBO en las aguas negras se han calculado en alrededor de 30% en caso de que todas las viviendas cuenten con estas unidades (Metcalf y Eddy, 1991).

**Colectores de agua de lluvia.** Los colectores de agua de lluvia reciben el desagüe de agua pluvial de caminos, techos, prados y otras superficies. Se dispone de diversos métodos para estimar los regímenes o volúmenes de desagüe. Todos ellos parten de una tormenta de frecuencia específica (de 2 a 100 años) y de información sobre una tormenta real (o representativa), o de curvas que correlacionan la intensidad de precipitación pluvial con la duración de las tormentas. Las frecuencias de tormenta típicas que se utilizan para fines de diseño son de 2 a 5 años para áreas residenciales, de 10 a 25 para distritos comerciales y de alto valor, y de 50 a 100 para sistemas de drenaje de gran magnitud.

Los sistemas para agua de lluvia pueden ser parciales con tubos relativamente pequeños que sólo proporcionan drenaje de caminos y no están conectados a los desagües de los edificios. Puesto que estos colectores no están acoplados a los edificios, se pueden sobrecargar (rebosar) sin inundar los sótanos, con lo cual las molestias son mínimas. Por otra parte, los sistemas para aguas pluviales completos que proporcionan tanto drenaje de caminos como conexiones pluviales con los edificios deben tener tubos más grandes proyectados con menos probabilidad de sobrecarga, a fin de evitar el retorno del agua de lluvia cerca del estribo de los sótanos.

Los edificios con sótanos se protegen contra niveles altos de aguas subterráneas mediante la instalación de tubos de drenaje perforados o de uniones abiertas colocados en una zanja de grava alrededor del estribo de los sótanos. El agua no contaminada que recogen estos desagües de cimentación se puede descargar entonces a (1) una alcantarilla pluvial o combinada si es poco probable un retorno del agua (una práctica común en las ciudades grandes), (2) una alcantarilla sanitaria o un sumidero de sótano (típico de los municipios más pequeñas), o (3) un colector de desagüe de sótano independiente (limitado a instalaciones ocasionales en donde se puede instalar una tercera alcantarilla de calle con una salida libre).

Como ya hemos mencionado (véase la tabla 12-4), el desagüe puede contener concentraciones altas de contaminantes. La creciente conciencia pública de la contaminación causada por el agua de lluvia ha obligado a considerar mejores métodos de recolección y tratamiento del desagüe. Los primeros enfoques consistieron en sedimentación, filtración y cloración, pero de manera más reciente el énfasis se ha desplazado del tratamiento a la reducción y retención del desagüe pluvial por estancamiento, regulación del flujo y uso de pavimento poroso.



**Alcantarillas combinadas.** Las alcantarillas combinadas desempeñan las funciones de colectores sanitarios y pluviales y son comunes en las secciones más antiguas de casi todos los municipios. Puesto que estas alcantarillas transportan residuos sanitarios y están conectadas a los drenajes de piso de los sótanos, cualquier sobrecarga podría causar un retorno de aguas negras sanitarias al interior de los sótanos. En consecuencia, estos sistemas deben ser capaces de aceptar grandes tormentas (que en promedio se repiten a intervalos de 25 a 50 años) sin sobrecargarse, al mismo tiempo que reciben el flujo sanitario. Puesto que en comparación con el flujo máximo de agua de lluvia el volumen de las aguas negras sanitarias es insignificante, normalmente no es necesario tomarlo en cuenta en el diseño.

### 12.4.3 Contaminación causada por derrames de alcantarillas combinadas

Durante el tiempo seco o árido todo el flujo de las alcantarillas combinadas va hacia la planta de tratamiento. Cuando llueve, la planta debe ser capaz de aceptar de  $1\frac{1}{2}$  a 3 veces el flujo de tiempo seco (FTS), pero el exceso de agua de lluvia, combinado ahora con aguas residuales municipales, se debe descargar en las aguas receptoras sin un tratamiento adecuado. En una ciudad en donde todo el drenaje sanitario se recoge para un tratamiento secundario (eliminación del 90% de DBO y SS), la contaminación (en términos de DBO y SS) que causan los derrames de alcantarillas combinadas sin tratamiento puede ser mayor que el de las aguas negras sanitarias tratadas (Prasad *et al.*, 1980). La mayor parte de las soluciones para este problema son costosas, y ninguna es plenamente satisfactoria. Se han utilizado dos enfoques básicos: o cierto grado de separación o, el almacenamiento de alguna fracción del flujo excesivo para su tratamiento ulterior.

La separación completa del agua de lluvia de las aguas residuales municipales en general ha sido considerada como la mejor solución a largo plazo. Desafortunadamente para muchas ciudades esta solución es poco práctica desde el punto de vista económico. Washington, D.C. es una de las pocas ciudades grandes que ha adoptado este método.

La separación, una alternativa menos costosa, es otro enfoque. Toronto está poniendo en práctica este plan en algunas secciones antiguas de la ciudad, con un costo de aproximadamente la mitad del correspondiente a la separación total. Las nuevas alcantarillas proporcionan drenaje de caminos y crean capacidad de almacenamiento de reserva en las alcantarillas combinadas ya existentes. Esta capacidad de reserva sirve para reducir la frecuencia de los derrames en el sistema de alcantarillas combinadas a menos de la mitad del número de incidentes previos, y también se puede utilizar para permitir la reurbanización de áreas de viviendas de baja densidad con unidades de apartamentos de alta densidad, las cuales desde luego crean mayores flujos de aguas negras sanitarias.

La retención de aguas pluviales durante los periodos de desagüe máximo con frecuencia se emplea para reducir los derrames en las alcantarillas combinadas. Para el almacenamiento se aprovecha capacidad no utilizada de las alcantarillas, tanques, embalses o incluso los techos de los edificios. El almacenamiento puede ser en línea o en paralelo, esto es, como parte del sistema de alcantarillado o independiente del mismo, y también puede ser al nivel del piso, arriba o abajo del mismo.

No es algo obvio si la separación de las aguas pluviales del desagüe sanitario o el almacenamiento (y tratamiento ulterior) de los derrames de las alcantarillas combinadas es una mejor manera de controlar la contaminación. Hay quienes sostienen que el objetivo debe ser la separación total del desagüe sanitario y las aguas pluviales, porque de este modo se reduce al mínimo el riesgo de que los residuos sanitarios retornen a los sótanos o se derramen en aguas

receptoras. Del otro lado están quienes argumentan que el agua de lluvia está tan contaminada que requiere tratamiento, y que esto se consigue con más eficacia controlando y tratando el derrame de las alcantarillas combinadas que ya existen en las ciudades más antiguas. Es evidente que ninguno de los enfoques es la respuesta apropiada en todos los casos. Desde un punto de vista teórico, la mejor solución sería contar con sistemas pluviales y sanitarios independientes, que tuvieran un control y tratamiento de los flujos procedentes de ambos si es necesario. Las consideraciones prácticas, que incluyen factores políticos y económicos, influyen en gran medida en el tipo de sistema de recolección de aguas negras que se utiliza. Para determinar la mejor solución en cada localidad se requiere una investigación específica.

Para impedir la contaminación del canal de Welland por los derrames de alcantarillas combinadas, se construyó un depósito de retención de agua de lluvia de 45,000 m<sup>3</sup> (12 × 10<sup>6</sup> gal) como una alternativa más económica que la instalación de alcantarillas independientes (figura 12-4). Las dos celdas interconectadas, una forrada de concreto para facilitar su limpieza y la otra con pasto, dan cabida a una tormenta de frecuencia bianual. Después de la tormenta, el contenido del depósito se desagua por control remoto hacia la planta de tratamiento de aguas en donde se procesa.

Copyrighted image

**Figura 12-4** Depósito para retención de aguas pluviales.

(Fotografía cortesía de R. V. Anderson Associates, Ltd.)

tes de su tiempo teórico de descarga. Este concepto proporciona una base útil para el diseño de estanques de sedimentación.

En teoría, todas las partículas con velocidad de sedimentación  $u_t$  igual o mayor que una velocidad de sedimentación específica  $u_0 (= Q/A)$  se separan totalmente; en tanto las partículas con  $u_t < u_0$  se separan en proporción a la relación entre la velocidad de sedimentación de la partícula y la velocidad elegida. Así pues,

$$\text{proporción separada} = \frac{u_t}{u_0} = \frac{u_t}{Q/A} \quad (12.6)$$

La ecuación (12.6) muestra que, tal vez al contrario de lo que dice la intuición, la proporción de partículas que se separan en un tanque de sedimentación ideal es independiente de la profundidad del tanque: para un flujo dado  $Q$ , varía sólo con el área superficial  $A$  del tanque. Por supuesto, desde un punto de vista práctico, la profundidad debe ser suficiente para permitir la recolección y extracción de lodos y para limitar la velocidad de arrastre horizontal del líquido.

#### Ejemplo 12.4

¿Qué proporción de partículas esféricas de arena de 0.01 mm de diámetro, con densidad relativa (DR) = 2.65, se separará teóricamente en un estanque de sedimentación ideal con flujo horizontal de 3 m de profundidad y con un área de superficie de 900 m<sup>2</sup>, si el flujo es de 80,000 m<sup>3</sup>/día y la temperatura del agua es de 20°C ( $\mu = 1.0 \times 10^{-3}$  kg/m·s y  $\rho = 1,000$  kg/m<sup>3</sup>)?

**Solución** De la ley de Stokes [ecuación (6.7)]

$$u_t = \frac{g}{18} \frac{\rho_s - \rho}{\mu} d_p^2 = \frac{9.81}{18} \left( \frac{2,650 - (1,000)}{1 \times 10^{-3}} \right) (1 \times 10^{-5})^2 = 90 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

El régimen de derrame es

$$u_0 = \frac{Q}{A} = \frac{80,000 \text{ m}^3/\text{día}}{900 \text{ m}^2 \times (60 \times 60 \times 24) \text{ s/día}} = 102.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

La separación es

$$\frac{u_t}{u_0} = \frac{90 \times 10^{-6}}{102.9 \times 10^{-6}} \times 100 = 87.5\%$$

Advierta que en este estanque de sedimentación ideal la profundidad decrece de trascendencia. Por lo tanto, los tanques desarenadores basados en sedimentación por gravedad se construyen en forma de estanques muy poco profundos.

**Sedimentación no ideal.** En la exposición precedente sobre los tanques de sedimentación supusimos un flujo uniforme (flujo de tapón) no perturbado por corrientes arremolinadas ni vientos, y lodos que permanecen sedimentados. De hecho, a causa de turbulencias (en particular en la entrada y la salida del tanque), formación de cortocircuitos en el flujo, puntos muertos en el tanque y el movimiento de los recolectores de lodos, la sedimentación ideal no existe en la práctica. Además, y a diferencia de los particulados (turbidez) presentes en los procesos de tratamiento de agua y de la arenilla que hemos descrito, la mayor parte de los sólidos en suspensión que se busca separar de las aguas residuales ordinariamente no son partículas discretas que se sedimentan a una velocidad constante. En las aguas negras los particulados tienden a ser floculentos, y cuando las partículas de mayor tamaño y más rápida sedimentación

alcanzan a las más pequeñas, se aglutinan para formar coágulos más grandes durante la sedimentación. En los casos en los que la sedimentación ideal no es aplicable, es posible aplicar a las aguas residuales pruebas de sedimentación en columna para establecer los criterios de diseño. Cuando no resulta práctico hacer las pruebas de sedimentación, se aplican diversos criterios de regímenes de derrame para el diseño de tanques de sedimentación, según el tipo de residuo sujeto a tratamiento.

**Aplicaciones de procesos físicos.** La retención de las aguas negras sin tratar de 5 a 15 min en tanques o canales desarenadores separa alrededor del 99% del material que se clasifica como arenilla. Con la sedimentación de las aguas negras sin tratar se elimina del 40 al 60% de los SS del líquido que entra y el 30% de la DBO<sub>5</sub> (contenida en el lodo sedimentado) si se permite al menos 1 h de retención para un flujo máximo y el régimen de derrame no es mayor de 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · día (2,500 gpd/ft<sup>2</sup>). Se deben aplicar criterios más conservadores (40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · día) (1,000 gpd/ft<sup>2</sup>) para la sedimentación de flóculos biológicos más ligeros (Metcalf y Eddy, 1991).

Los tanques de sedimentación, también llamados *clarificadores*, pueden ser circulares, rectangulares o en ocasiones cuadrados. Los tanques redondos (de 10 a 50 m de diámetro) tienen menos partes móviles sumergidas, por lo cual los costos de mantenimiento deben ser inferiores. Las unidades rectangulares (hasta 50 m de longitud), como la que se muestra en la figura 12-7, permiten una construcción más económica con paredes comunes y se dice que son más eficientes desde el punto de vista hidráulico. La ventaja de una forma respecto a otra no se ha demostrado de manera concluyente, de modo que uno u otro tipo puede anteceder al tratamiento biológico. Ambos tienen mecanismos raspadores para retirar los sólidos que flotan (espuma) y los que se sedimentan (lodos primarios o crudos).

Otras operaciones unitarias físicas que se aplican al tratamiento de aguas residuales son las siguientes:

- Tamizado para quitar los objetos grandes y quizá molienda para reducir el tamaño de partícula. Estas operaciones anteceden a la sedimentación.
- Filtración en medios granulares (por gravedad o por presión) para separar los SS del efluente.
- Flotación o centrifugación para espesar los lodos.

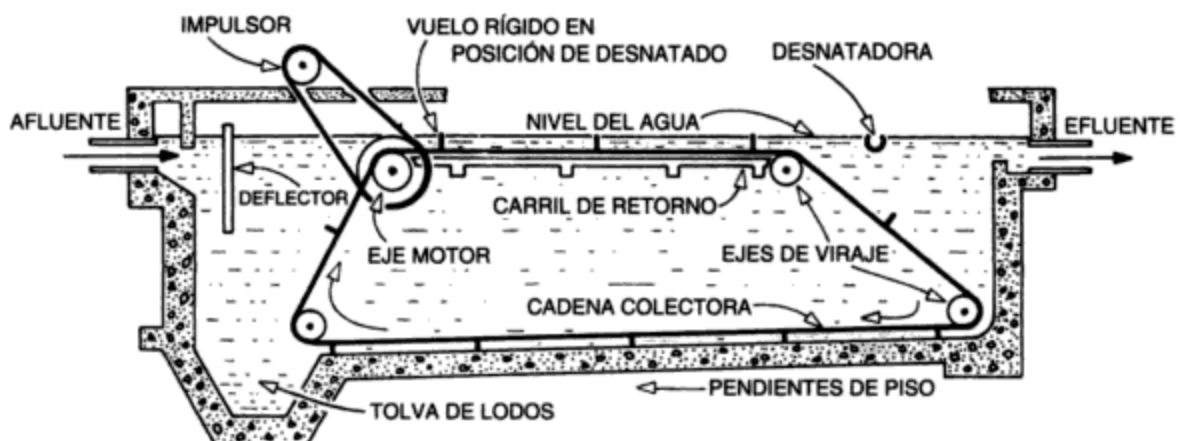
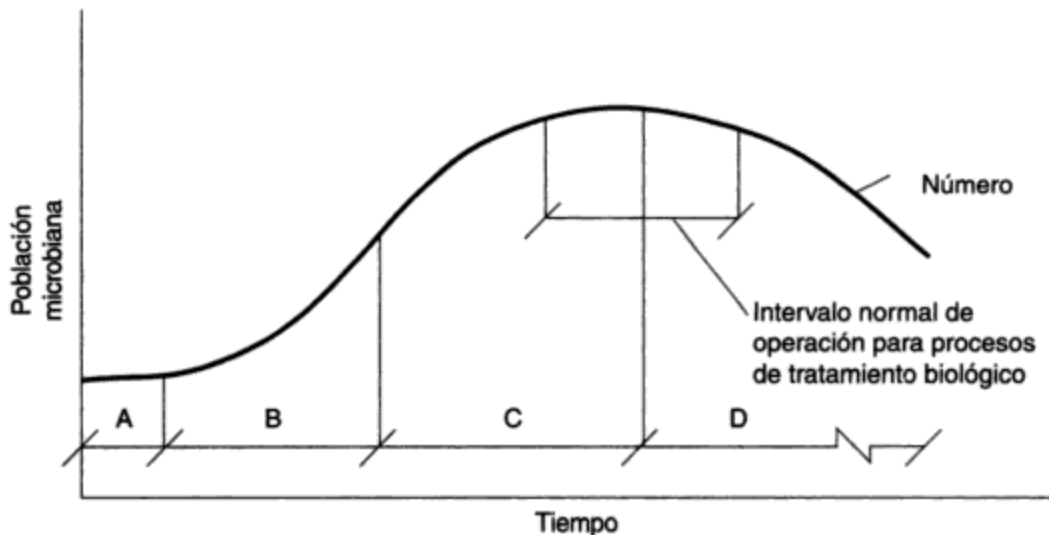


Figura 12-7 Tanque de sedimentación rectangular para clarificación primaria. Fuente: *Water Pollution Control Federation Manual of Practice*, núm. 11, 1976.

**Procesos biológicos.** La mayor parte de los componentes orgánicos de las aguas residuales sirven como alimento (sustrato) que proporciona energía para el crecimiento microbiano. Éste es el principio que se utiliza en el tratamiento biológico de los residuos, en donde ciertos microorganismos, principalmente bacterias (con la ayuda de protozoarios), transforman el sustrato orgánico en dióxido de carbono, agua y células nuevas. Los microorganismos pueden ser *aerobios* (necesitan oxígeno libre), *anaerobios* (no requieren oxígeno libre) o *facultativos* (crecen con o sin oxígeno). Los procesos en los cuales los microorganismos utilizan oxígeno combinado (del  $\text{NO}_3$  para la desnitrificación, por ejemplo) suelen describirse como *anóxicos*, no como anaerobios. La población microbiana puede mantenerse en el líquido como crecimiento en suspensión, el cual se designa como *sólidos en suspensión en licor mixto* (SSLM) o *sólidos volátiles en suspensión en licor mixto* (SVSLM), o puede estar adherida a algún medio en un proceso de película fija. Estas dos posibilidades se describen con más detalle en la sección 12.7. La rapidez del crecimiento microbiano varía de manera directa con la cantidad de sustrato disponible. En un cultivo discontinuo y cuando el alimento no es limitante la población microbiana, después de un periodo de latencia inicial, crece con rapidez a una velocidad logarítmica. A medida que el alimento desaparece, el crecimiento se retarda hasta que, en un punto determinado, se detiene y el número de células que se producen se equilibra con el número de células que mueren. Cuando el sustrato se ha agotado, el número de microorganismos mengua conforme las células viejas se descomponen (se lisan) y liberan sus nutrientes para ser utilizados por microorganismos nuevos. Estas cuatro fases, que se designan como de latencia (A), de crecimiento logarítmico (B), de crecimiento menguante (C) y endógena (de autoxidación) (D), se muestran en el esquema de la figura 12-8.

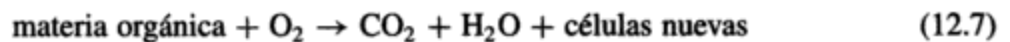


- Clave: A Fase de latencia  
 B Fase de crecimiento logarítmico  
 C Fase de crecimiento menguante  
 D Fase endógena

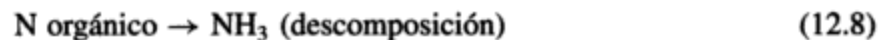
**Figura 12-8** Crecimiento microbiano en un cultivo discontinuo. Fuente: Adaptado de Clark et al. (1977).

En un proceso biológico continuo, el sistema opera normalmente en un punto determinado de la curva de crecimiento hacia el final de la fase de crecimiento menguante o en la fase endógena, en donde las células utilizan su propio protoplasma para obtener energía. La utilización de la fase de crecimiento logarítmico en el tratamiento de aguas residuales no ha resultado práctico, porque la eliminación del sustrato es incompleta y no se ha encontrado un medio económico para separar la población microbiana del líquido.

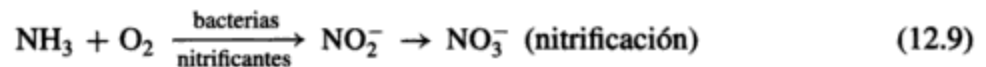
**Procesos aerobios/anóxicos.** En los procesos aerobios (en presencia de oxígeno) las bacterias heterótrofas (las que obtienen carbono de compuestos orgánicos) oxidan alrededor de un tercio de la materia orgánica coloidal y disuelta a productos finales estables ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) y transforman los dos tercios restantes en nuevas células microbianas susceptibles de eliminarse de las aguas residuales por sedimentación. La conversión biológica global se verifica como una secuencia, con la oxidación del material carbonoso como primera etapa:



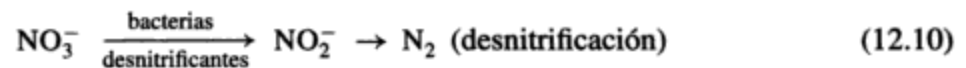
En condiciones aeróbicas ininterrumpidas, las bacterias autótrofas (las que obtienen carbono de compuestos inorgánicos) convierten entonces el nitrógeno de los compuestos orgánicos en nitratos de acuerdo con las siguientes ecuaciones simplificadas:



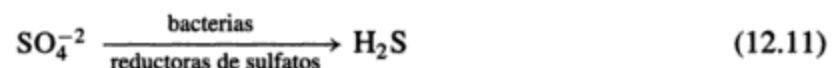
y



No se producen más cambios en los nitratos a menos que el proceso se torne anóxico (esto es, sólo hay oxígeno combinado). En estas condiciones, las bacterias heterótrofas transforman los nitratos en nitrógeno gaseoso inodoro:



En condiciones anóxicas ininterrumpidas, los sulfatos presentes se reducen a sulfuro de hidrógeno gaseoso, de olor característico, de acuerdo con la siguiente ecuación descriptiva:



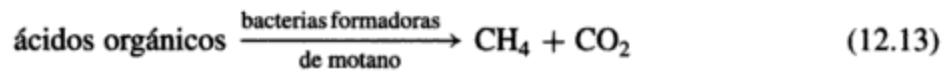
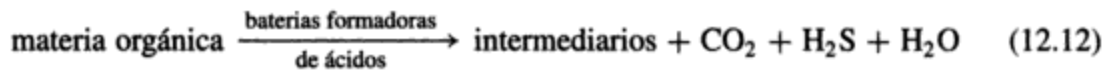
Las reacciones precedentes que se verifican de manera natural se utilizan en diversos procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales. En todos los casos los nutrientes indispensables para el crecimiento bacteriano deben estar presentes en los residuos o se deben adicionar. A diferencia de las aguas residuales municipales, que contienen los ingredientes necesarios, muchos residuos industriales, incluso los que proceden de industrias de pulpa y papel, enlatadoras y procesadoras de carnes, requieren la adición de nitrógeno o fósforo (como sales de amonio o fosfatos) para que se produzca el crecimiento biológico.

Desde que se reconoció la importancia del tratamiento de las aguas residuales, los municipios y las industrias han dependido casi de manera exclusiva de procesos biológicos aerobios, no de los anaerobios, para el tratamiento de sus residuos orgánicos líquidos. El tratamiento aerobio

ha predominado en virtud de su sencillez, su estabilidad, la eficiente y rápida conversión de los contaminantes orgánicos en células microbianas, y su operación relativamente libre de olores.

Aunque todos los procesos de oxidación biológica aerobia emplean microorganismos para transformar los contaminantes orgánicos, los métodos que sirven para llevar a cabo esta conversión son variados y numerosos. Estos métodos se analizan en la sección 12.7.

**Procesos anaerobios.** En los procesos biológicos anaerobios (esto es, en ausencia de oxígeno) dos grupos de bacterias heterótrofas, en un proceso de licuefacción/gasificación en dos etapas, convierten más del 90% de la materia orgánica presente primero en intermediarios (productos finales parcialmente estabilizados que incluyen ácidos orgánicos y alcoholes) y después en metano y dióxido de carbono gaseosos:



El proceso se aplica de manera universal en los digestores anaerobios calientes, en donde los lodos primarios y biológicos se mantienen durante unos 30 días a 35°C para reducir su volumen (alrededor del 30%) y su capacidad de putrefacción, con lo cual se simplifica su eliminación, por lo común en terrenos agrícolas.

Dos ventajas importantes de los procesos anaerobios respecto a los aerobios es que suministran energía útil en forma de metano y que la producción de lodos es de sólo el 10% de la que tiene lugar en los procesos aerobios para transformar la misma cantidad de materia orgánica. Esto representa una ventaja en el tratamiento de residuos muy concentrados, en donde el manejo de grandes volúmenes de lodos sería un problema.

**Procesos químicos.** Muchos procesos químicos, que incluyen oxidación, reducción, precipitación y neutralización, son de uso común para el tratamiento de aguas residuales industriales. Para las aguas residuales municipales la precipitación y la desinfección son los únicos procesos que encuentran amplia aplicación.

El tratamiento químico, solo o combinado con otros procesos, suele ser necesario para residuos que no son susceptibles de tratamiento por medios biológicos. Son ejemplos de esto la oxidación (con SO<sub>2</sub>) del cianuro tóxico a cianato, que es manejable, o del cromo hexavalente a la forma trivalente no tóxica en la eliminación de residuos de procesos de recubrimiento con metales. Los procesos químicos son útiles además en el tratamiento de residuos municipales, en donde la concentración de fósforo se reduce y se mejora la separación de sólidos por precipitación de estos contaminantes con sales metálicas.

La desinfección del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, generalmente por cloración, es deseable cuando existe un riesgo potencial para la salud. Sin embargo, la incertidumbre en cuanto a la existencia de un riesgo ha dado origen a una amplia variedad de prácticas. Algunas autoridades de Estados Unidos y Canadá exigen que se clore el efluente de aguas residuales durante todo el año. Suele especificarse un remanente de 0.5 mg/L después de un tiempo de contacto de 15 a 30 min. En ciertas áreas esta definición empírica de la cloración ha sido reemplazada por el requisito de que las coliformes totales no sean más de 200 en 100 mL en el efluente final. En casi todas las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

una dosificación media de cloro de 6 a 9 mg/L al efluente secundario y un tiempo de contacto de al menos 30 min en condiciones de flujo máximo permite alcanzar estos objetivos y conseguir una destrucción adecuada de los patógenos (WEF/ASCE, 1992). La cloración de aguas residuales es una práctica norteamericana. En otras jurisdicciones, entre ellas Gran Bretaña y todos los países de Europa occidental, la desinfección de aguas residuales es poco frecuente. Se considera que la dudosa protección de la salud pública no justifica el costo y las posibles desventajas de la desinfección.

El cloro es el producto químico más económico y de uso más frecuente para la desinfección de aguas residuales, aunque, por desgracia, produce ciertos efectos colaterales indeseables. La materia orgánica presente se combina con el cloro para formar trihalometanos y otras sustancias orgánicas cloradas, algunas de las cuales son **carcinógenos** (capaces de causar cáncer) conocidos, o se sospecha que lo son. El temor es que estos compuestos orgánicos clorados constituyan un peligro potencial para el abasto de agua. Otra preocupación es la toxicidad de los residuos de cloro para la vida acuática. Concentraciones tan pequeñas como 0.023 mg/L pueden ser muy tóxicas para ciertas especies de peces (White, 1992). Cuando la desinfección es necesaria para la protección de la salud pública pero la toxicidad de los restos de cloro es inaceptable, el efluente se deberá desclorar o se tendrán que considerar alternativas de la cloración. La desinfección por radiación ultravioleta (UV) ofrece la ventaja de que no deja residuos químicos, pero no es muy eficaz para efluentes turbios y, como casi todas las alternativas de la cloración, es relativamente costosa. La desinfección con ozono, que se ha empleado históricamente en el tratamiento del agua, se aplica ahora en unas 40 plantas de tratamiento de aguas negras en Estados Unidos. Se ha informado que, cuando se aplica antes de la cloración, la ozonización reduce la probabilidad de formación de trihalometanos porque destruye los precursores de ácidos húmicos (White, 1992).

No hemos descrito aquí todos los procesos físicos, biológicos y químicos disponibles, ni son necesarios todos los procesos mencionados en cada planta de tratamiento de aguas residuales. Las unidades básicas de una planta municipal típica, como se muestra en la figura 12-5, podrían ser tanques de sedimentación primaria precedidos por tamizado y separación de arenilla, unidades de tratamiento secundario para oxidación y sedimentación, digestores anaerobios de lodos y equipo para cloración. En la tabla 12-6 se proporciona información acerca de las mismas.

### Ejemplo 12.5

Una municipalidad con áreas industriales y comerciales diversificadas debe proporcionar clarificación primaria para un flujo medio de aguas residuales de 20,000 m<sup>3</sup>/día.

- (a) Si se utilizan tanques primarios circulares de 3 m de profundidad, ¿cuál es el volumen total que se necesita? ¿Cuántos tanques, y de qué diámetro, se deben instalar?
- (b) ¿Qué volumen de lodos primarios se producirá cada día?

**Solución** (a) En ausencia de datos de pruebas de sedimentación, el tamaño de los clarificadores se puede determinar con base en el tiempo de retención y el régimen de derrame. Si  $Q_{\text{promedio}} = 20,000 \text{ m}^3/\text{día}$ , el equivalente de población (para un municipio de tamaño mediano use 500 lpd, de la tabla 12-4) está dado por

$$PE = \frac{20,000 \times 1,000}{500} = 40,000 \text{ personas}$$



hasta plantas complejas y automatizadas de tratamiento de aguas residuales. En situaciones específicas varios métodos de tratamiento pueden ser igualmente idóneos. En consecuencia, la elección final se basa sólo en parte en el análisis de ingeniería. En la decisión influyen muchos factores intangibles, como la preferencia local, la experiencia del asesor y el historial del proceso. En las tres secciones siguientes se describen las características de los métodos de tratamiento más comunes.

## 12.6 MÉTODOS DE TRATAMIENTO CON BASE EN TERRENOS

Los métodos de tratamiento de aguas residuales incluyen sistemas de aplicación a terrenos en los cuales las aguas residuales se rocían o se distribuyen en la tierra y sistemas de captación en los cuales las aguas residuales se retienen en pantanos, estanques o lagunas. Los métodos con base en terrenos requieren áreas grandes para almacenar o tratar las aguas residuales, para la descarga del efluente cuando no se dispone de una salida apropiada, y para aislar el predio de los usos de las tierras vecinas. Los regímenes de carga hidráulica y orgánica para estos sistemas por lo común se basan en requisitos de área de terreno, y esto proporciona una forma conveniente de comparar los diversos procesos. Sus ventajas respecto a las plantas de tratamiento de aguas residuales son su sencillez y, en la mayor parte de los casos, sus menores costos de capital y de operación. En estos sistemas relativamente poco controlados los procesos físicos, biológicos y químicos no se separan y, de hecho, pueden ocurrir al mismo tiempo. La sedimentación o filtración separa físicamente la materia particulada mientras las bacterias (que se encuentran en el suelo, adheridas a las plantas o en los estanques) oxidan la materia orgánica, y el crecimiento vegetal y microbiano asimila el nitrógeno y el fósforo. El percolado (también llamado lixiviación) puede facilitar la adsorción de iones inorgánicos, como los de fósforo, y de muchos de los metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) por el suelo. Otros contaminantes inorgánicos se extraen de las aguas residuales por intercambio iónico en el suelo. El número de patógenos se reduce por muerte natural de los mismos y por efecto de los rayos ultravioleta de la luz solar.

### 12.6.1 Sistemas de aplicación a terrenos

La aplicación de aguas negras a terrenos no es nueva. Se aplicaban aguas sin tratar que provenían de alcantarillado a terrenos agrícolas en las afueras de Edimburgo, Escocia, hace más de 250 años (no para eliminarlas, pues no se reconocía que constituyeran un peligro para la salud, sino porque eran benéficas para los cultivos). Desde 1983, la ciudad de Melbourne, Australia, ha descargado sus residuos en una granja de aguas negras para su tratamiento y eliminación. No obstante su larga historia de éxito, el tratamiento de aguas negras en terrenos no ha sido aceptado en Estados Unidos a excepción de unos pocos casos a causa de la preocupación acerca de los patógenos presentes en los residuos. Históricamente el enfoque ha consistido en alentar la aplicación del efluente secundario a terrenos aprobando privilegios de construcción a las comunidades que emplean o tienen intención de emplear el tratamiento en terrenos. El objetivo ha sido reducir las descargas de residuos en aguas superficiales al mismo tiempo que se utiliza el contenido nutritivo en los cultivos y se alienta el uso de efluentes para irrigación y recarga de aguas subterráneas. La mejor comprensión de los procesos de aplicación en terrenos ha dado por resultado un aumento en su utilización para el tratamiento de efluentes primarios y, en ciertos casos, de aguas negras sin tratar y tamizadas. El nivel de tratamiento previo a la aplicación que se requiere depende del tipo de

sistema que se emplea, la clase de cultivo (en su caso), el uso al que se destina el cultivo, el grado de contacto del público con las aguas residuales aplicadas y el método de aplicación. En la mayor parte de los casos se requiere como mínimo una sedimentación primaria para separar los sólidos de mayor tamaño que tienden a obstruir los sistemas de distribución.

**Sistemas de infiltración lenta.** El uso de sistemas de infiltración lenta (irrigación por aspersión), que es el proceso de aplicación en terrenos más popular que existe, implica la aplicación intermitente de efluente secundario (por lo general) a cultivos, vegetación o terrenos forestales. El efluente se aplica por medio de rociadores o tubos con aberturas, y después se cuela a través del suelo hacia las aguas del subsuelo o se pierde por evapotranspiración. Durante el percolado la filtración, la conversión biológica y la adsorción contribuyen a eliminar los contaminantes. Los sistemas de régimen lento suelen clasificarse de acuerdo con su objetivo primario de diseño (por ejemplo, tratamiento de aguas residuales o irrigación de cultivos).

Los sistemas de régimen lento proporcionan un alto nivel de tratamiento en virtud de las tasas de aplicación relativamente bajas y la presencia de vegetación, así como de un ecosistema de suelo activo (Metcalf y Eddy, 1991). El efluente primario es aceptable para el tratamiento de régimen lento sólo cuando el acceso público al predio está controlado y los cultivos no se utilizan para consumo humano directo; en otras circunstancias, es preferible un tratamiento secundario, por lo común en estanques de oxidación o lagunas aireadas, aunado a desinfección para reducir el riesgo que representan los patógenos para la salud. Por lo general, para la eliminación durante todo el año en suelos de porosidad moderada, los sistemas de irrigación por aspersión requieren más o menos 1 ha por cada 22 kg de DBO<sub>5</sub> aplicada (1 acre por cada 20 lb).

**Sistemas de infiltración rápida.** Estos sistemas requieren suelos muy permeables en los cuales las aguas residuales se aplican a regímenes de carga elevados en estanques poco profundos y sin vegetación. El percolado se utiliza para recarga de aguas subterráneas o se recupera por medio de desagües inferiores o pozos de recuperación para su tratamiento ulterior o su eliminación. Para mantener regímenes máximos de carga hidráulica, casi siempre se recomienda un pretratamiento secundario o terciario (que reduce el contenido de sólidos en suspensión) a fin de reducir al mínimo el taponamiento del suelo. La infiltración rápida es el sistema de tratamiento natural que más se adapta a climas fríos, pero no ofrece el potencial de tratamiento de la aplicación a régimen lento (Metcalf y Eddy, 1991).

**Flujo por tierra.** En este sistema se aplican aguas residuales previamente tratadas a terrenos más o menos impermeables con una pendiente de 2 a 8%, de modo que se produce un desagüe considerable (como flujo laminar) que después se recoge. La sedimentación y la conversión biológica por acción de una capa de limo bacteriano son los mecanismos de tratamiento principales. Para aguas residuales municipales se recomienda un tratamiento primario previo a la aplicación. El flujo por tierra también se ha utilizado para tratar aguas residuales de alta concentración derivadas del procesamiento de alimentos y como una etapa de refinación para eliminar nitrógeno y trazas de metales de efluentes secundarios. Por lo general es necesario almacenar las aguas residuales durante ciertos periodos cuando la temperatura media diaria desciende a menos de 0°C (32°F).

### 12.6.2 Sistemas de embalse

Las aguas residuales se pueden retener en embalses que van desde pantanos naturales a estanques de oxidación hasta complejas lagunas aireadas.

**Pantanos.** Los pantanos naturales o artificiales como ciénagas o marismas, con su vegetación (principalmente espadañas, carrizos y juncos), proporcionan un microentorno ideal para la sedimentación, filtración, adsorción y descomposición bacteriana de los componentes de aguas residuales. Puesto que los pantanos naturales por lo general se consideran como aguas receptoras, las descargas que se hacen en ellos deben satisfacer los requisitos reglamentarios aplicables, por lo cual están limitados al tratamiento de efluentes secundarios o terciarios. Los pantanos construidos, no obstante, tienen una aplicación mucho más amplia, y se han utilizado para tratar efluente primario, aguas residuales industriales, desagüe ácido de minas, lixiviado de rellenos de tierras y desagüe urbano. En un diseño representativo, las aguas residuales aplicadas de manera continua fluyen con libertad por estanques o canales en paralelo con suelos relativamente impermeables en el fondo, vegetación emergente y profundidades de agua de 0.1 a 0.6 m (0.33 a 2 ft). Aunque la eliminación de nutrientes tiende a ser muy variable, los pantanos por lo general son eficaces para eliminar metales pesados, lo cual los hace ideales para el tratamiento de desagüe de caminos, que suele contener niveles altos de plomo, cobre y zinc. Cuando los pantanos también suministran cultivos útiles o especies acuáticas, el proceso se conoce como **acuicultura**. La crianza de peces en estanques de residuos ha sido practicada desde el tiempo de los romanos, en particular por lo japoneses, quienes han utilizado extensamente la acuicultura en este sistema de reciclado de “desperdicios a peces y a humanos”. En Estados Unidos se están investigando las aplicaciones comerciales del concepto (Hammer, 1989).

**Estanques o lagunas de oxidación.** Un estanque o laguna de oxidación (también se podría llamar *estanque de estabilización*) es una pileta de tierra poco profunda (de 1 a 2 m) que se utiliza para el tratamiento biológico de diversos efluentes municipales e industriales. Las condiciones del estanque varían de aeróbicas a facultativas (en parte aeróbicas, en parte anaeróbicas), y hasta anaeróbicas; esto depende del suministro de aireación complementaria, de la profundidad del estanque y del grado de mezcla natural o inducida. Mantener condiciones totalmente aeróbicas en un estanque de oxidación fotosintético no mezclado sólo es posible si se tratan residuos orgánicos solubles poco concentrados. Así pues, para fines prácticos casi todos los estanques son facultativos. En este tipo de estanques, los sólidos sedimentables retenidos sufren descomposición aerobia en el fondo del estanque, en tanto que los residuos orgánicos solubles son transformados en  $\text{CO}_2$  y agua por las bacterias aerobias de los niveles superiores. Las algas fotosintéticas utilizan el  $\text{CO}_2$  y producen oxígeno para las bacterias (una relación simbiótica). Los estanques facultativos se disponen normalmente en serie para reducir la formación de cortocircuitos y, cuando se aplican cargas altas de DBO, se puede proporcionar aireación complementaria, quizá a través de tubos de aire difuso, para reducir los olores y manejar una carga mayor. Por desgracia, es difícil eliminar las algas de los estanques de oxidación ya que tienden a escapar con el efluente, con lo cual en ocasiones provocan que la DBO y los sólidos en suspensión del efluente excedan los límites de descarga (WEF/ASCE, 1992). Además de los problemas con las algas, los estanques de estabilización experimentan una reducción de la eficiencia de tratamiento cuando el tiempo es frío y están bajo una cubierta de hielo, además de que se desprenden olores cuando el hielo se rompe.

Se pueden utilizar lagunas anaerobias dos o tres veces más profundas que los estanques de oxidación cuando no existen objeciones a la descomposición anaerobia. Estos estanques sólo proporcionan una estabilización parcial de los residuos y por tanto suelen utilizarse en serie con estanques facultativos para proporcionar un tratamiento completo. Vale la pena tomarlas en cuenta en localidades remotas donde los olores no constituyen un problema y en especial donde los residuos son muy concentrados ( $\text{DBO}_5 > 1,000 \text{ mg/L}$ ), porque la producción de lodos es mucho menor que la que se tiene en condiciones aeróbicas.

**TABLA 12-7 PARÁMETROS COMPARATIVOS DE DISEÑO PARA MÉTODOS DE TRATAMIENTO CON BASE EN TERRENOS<sup>a</sup>**

<b>PROCESO DE APLICACIÓN EN TERRENOS<sup>b</sup></b>	<b>Área ha/10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> · día (acres/mgd)</b>	<b>Hidráulica cm/d (ft/año)</b>	<b>Días de almacenamiento (típicos)</b>	<b>Comentarios</b>
Irrigación por aspersión	18-60 (170-560)	0.2-0.6 (2.0-6.7)	60-200	Se necesita tratamiento previo
Infiltración rápida	0.4-6.0 (3.7-56)	2-25 (20-300)	5-20	Se necesita suelo permeable (> 25 mm (1 in)/h)
Flujo por tierra	0.6-5.0 (5.6-47)	2-15 (24-186)	60-150	Suelo impermeable, pendiente de 2 a 8% (< 15 mm (0.6 in)/h)

<b>PROCESO DE EMBALSE<sup>c</sup></b>	<b>Profundidad m (ft)</b>	<b>Orgánica kg DBO/ha · día (lb DBO/acre · día)</b>	<b>Días de retención (± 50%)</b>	<b>Comentarios</b>
Pantanos	0.5 (1.6)	11-75 (10-70)	12	No hay control del proceso
Estanque de oxidación (facultativo)	1.5 (5.0)	11-55 (10-50)	100	O <sub>2</sub> de algas y la atmósfera
Estanque de oxidación (aireado)	1.5 (5.0)	55-200 (50-180)	20	Se suministra aire complementario
Laguna anaerobia	4.5 (15.0)	220-550 (200-500)	30	Tratamiento parcial de residuos muy concentrados
Laguna aireada	3.0 (10.0)	110-330 (100-300)	4	Alto costo de operación

<sup>a</sup>Los criterios son aplicables en climas templados para aguas residuales con una DBO<sub>5</sub> de 200 mg/L. Los organismos reguladores pueden permitir valores más altos en climas más cálidos, localidades aisladas o con residuos fácilmente degradables.

$$\begin{aligned}
 m \times 3.281 &= ft & m^2 \times 10^4 &= ha \\
 cm/día \times 11.975 &= ft/año & ha \times 2.471 &= acre \\
 ha/10^3 m^3 \cdot día \times 9.355 &= acres/mgd & kg/ha \cdot día \times 0.892 &= lb/acre \cdot día
 \end{aligned}$$

<sup>b</sup>Para procesos de aplicación en terrenos, los regímenes de carga hidráulica son promedios anuales. Los regímenes intermitentes de aplicación reales podrían ser mucho mayores.

<sup>c</sup>Para procesos de embalse, los regímenes de carga orgánica son promedios anuales para afluentes continuos variables (esto es, sin almacenamiento).

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (1991); WEF/ASCE (1992); Ontario Ministry of the Environment (1984).

**Ejemplo 12.6 (continuación)**

*Comentario:* Un estanque de oxidación facultativo quizá podría manejar esta carga (véase la tabla 12-7) de forma más económica que los demás procesos indicados. La irrigación por aspersión sin un tratamiento (secundario) previo no se debe utilizar para residuos que podrían contener patógenos. Además, el área de terreno disponible es demasiado pequeña, y se tendría que proporcionar capacidad de almacenamiento de varios días para cuando la aspersión no sea práctica.

El flujo por tierra y el tratamiento en pantanos son otras posibilidades; sin embargo, puesto que no existen las condiciones naturales para los procesos (terreno inclinado, suelo impermeable, o una ciénaga), el costo de crear estas condiciones impediría que fuesen competitivas contra un estanque de oxidación.

De las demás alternativas, las lagunas anaerobias se descartan en virtud del tratamiento intermedio (parcial) que se da y los problemas de olores. Las lagunas aireadas no son necesarias en esta situación, pero se pueden considerar en el futuro si el estanque de oxidación llega a sobrecargarse. Un tanque séptico y un sistema de tabique (se estudia más adelante) sería una posibilidad, pero para una instalación tan grande como ésta es probable que sea más costoso que el estanque. Se podría considerar un estanque de oxidación facultativo con dos celdas. Una de ellas sería suficiente para la temporada baja. Con una berma de 4 m entre las celdas, las dimensiones de cada una serían de 72 m × 148 m × 2 m de profundidad. La figura 12-10 es una vista aérea de un pequeño estanque de oxidación de 2.5 ha (6 acres) que da servicio a un hospital.

Copyrighted image

**Figura 12-10** Estanque de oxidación. Hospital Ontario, Goderich, Ontario, Canadá. (Fotografía cortesía de Northway Map Technology Ltd., Don Mills, Ontario.)

## 12.7 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Si los sistemas sencillos son imprácticos o inadecuados, el tratamiento se debe llevar a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales. Dotada de mecanización y control, la planta puede satisfacer los requisitos para efluentes o agua en un espacio más pequeño, en menos tiempo, y quizá en donde el terreno es caro, a un menor costo que los sistemas equivalentes de tratamiento con base en terrenos. Se utilizan procesos físicos, biológicos y químicos, pero en una planta es más probable que se verifiquen en unidades por separado. Los componentes fundamentales de una planta convencional, como se describió en la sección 12.5.2, proporcionan clarificación, tratamiento secundario (biológico), desinfección y procesamiento de lodos. La clarificación primaria y, en Estados Unidos, la desinfección con base en los principios que hemos descrito, son comunes a casi todas las plantas de tratamiento de aguas residuales. No es necesario explicar más a fondo estos procesos, los cuales no varían de forma significativa de una planta a otra. Es en los otros dos componentes que puede haber amplias variaciones en cuanto al diseño del proceso.

En la fase secundaria, en la cual se eliminan los sólidos y la DBO restantes, el tratamiento biológico se lleva a cabo en un sistema de crecimiento en suspensión o por un proceso de película fija. En el primero, los microorganismos se mantienen en suspensión en las aguas residuales por medio de dispositivos de mezcla o de aireación. Estos dispositivos deben satisfacer los requisitos de mezcla y de transferencia de oxígeno. Con los sistemas de crecimiento adherido, los microorganismos activos crecen en la superficie de roca, plástico u otro medio con el cual los residuos se ponen en contacto.

### 12.7.1 Sistemas de crecimiento en suspensión

**Lodos activados convencionales.** La aplicación de uso más extendido del crecimiento en suspensión es el proceso de lodos activados convencionales. Los microorganismos se mantienen en suspensión durante 4 u 8 h en un tanque de aireación (véase la figura 12-11a) por medio de mezcladores mecánicos o aire difuso, y su concentración en el tanque se mantiene por el retorno continuo de los flóculos biológicos sedimentados de un tanque de sedimentación secundaria al tanque de aireación. Arden y Lockett, en 1914, dieron a la suspensión floculenta que se sedimenta y se devuelve para "resembrar" el tanque de aireación el nombre de *lodos activados*, supuestamente porque encontraron que, al devolver estos sólidos, la oxidación del sustrato se aceleraba o activaba (Arden y Lockett, 1914). El contenido del tanque de aireación se describe como el *licor mixto*, y los sólidos se designan como *sólidos en suspensión en licor mixto* (SSLM). Estos últimos incluyen material inerte además de células microbianas vivas y muertas. No es fácil determinar la proporción viva o activa, y por lo común se supone que la porción volátil de los sólidos (SVSLM), que constituye el 80% de los SSLM, representa la masa activa. En la figura 12-2 se muestra un diagrama de flujo para el proceso de lodos activados convencionales (LAC).

Al igual que los tanques primarios, los tanques finales pueden ser rectangulares o circulares, y en ocasiones cuadrados, pero proporcionan tiempos de retención más largos (2 h) y regímenes de derrame más bajos (de 30 a 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · día) en condiciones de gasto máximo (véase la figura 12-11b). La carga de sólidos (SSLM) que llega del tanque de aireación es una consideración de diseño adicional, y son comunes los valores de 6 a 9 kg de SSLM por m<sup>2</sup> de área de superficie del tanque de sedimentación por hora (1.25 a 1.875 lb/ft<sup>2</sup> · h) al régimen de derrame máximo del tanque (Metcalf y Eddy, 1991).

De los flóculos biológicos que se sedimentan en los tanques finales (también llamados **clarificadores secundarios**), entre el 25 y el 40% se devuelve al tanque de aireación. El resto, llamado **lodos activados por residuos**, debe recibir un tratamiento adicional. En las plantas de tamaño pequeño y mediano los lodos activados por residuos se devuelven a los tanques primarios para sedimentarlos con los lodos primarios (lo que da por resultado una reducción del 40% en el régimen de derrame permisible del tanque primario). En las plantas más grandes los lodos activados por residuos de los tanques finales se espesan por sedimentación gravitatoria o flotación con aire disuelto antes de su digestión con los lodos primarios.

Se han desarrollado muchas variantes del proceso de lodos activados. Las diferencias de tiempo de aireación, concentración de SSLM, tiempo de retención de los sólidos y carga son algunas de las características distintivas de los procesos que los hacen más idóneos para una aplicación que para otra.

**Aireación prolongada.** El diagrama de flujo del proceso de aireación prolongada es similar al correspondiente a los lodos activados convencionales (LAC), aunque sin tanques primarios. La aireación prolongada es de 24 h (contra 6 h para LAC), la cual confiere estabilidad

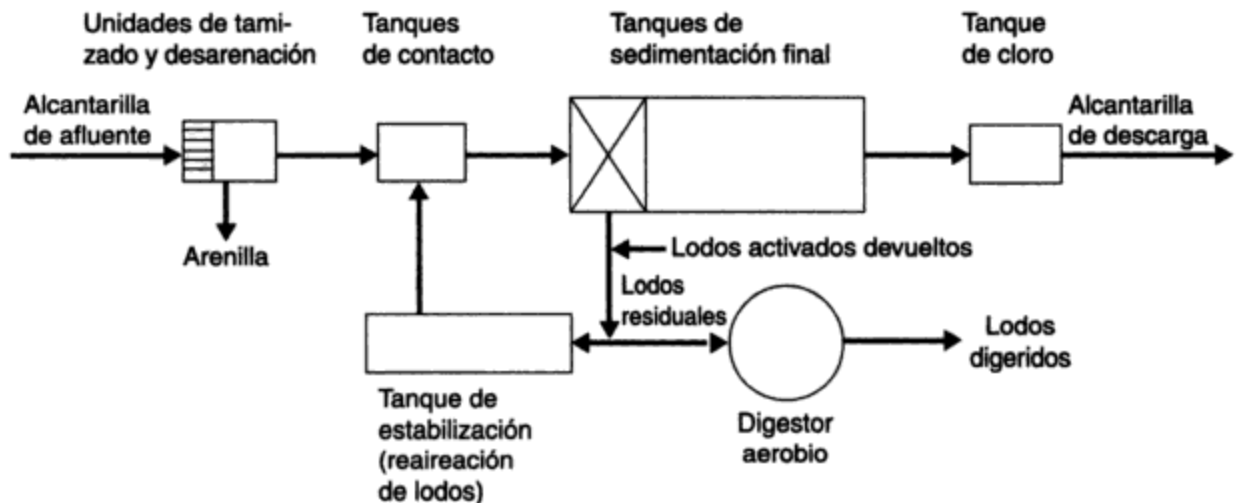


Figura 12-13 Diagrama de flujo del proceso de estabilización por contacto.

llevado a cabo en general por digestión aerobia. Los altos costos energéticos de la aireación limitan este enfoque a las plantas más pequeñas (de menos de 4,000 m<sup>3</sup>/día).

**Lodos activados con oxígeno.** El proceso de lodos activados con oxígeno, en el cual se utiliza oxígeno puro en vez de aire en tanques cubiertos, fue desarrollado por la Union Carbide a finales de la década de 1960. Este proceso tiene ciertas ventajas en relación con los lodos activados con aire: puede operar con cargas más grandes, con lo cual se reduce el tamaño de los tanques de aireación, y es capaz de aceptar fluctuaciones más amplias en cuanto a carga y residuos más concentrados que los lodos activados con aire (Parker y Merrill, 1976). El control de proceso de las necesidades de oxígeno por medio de sensores de presión es sencillo y confiable. Cuando es necesario un régimen elevado de transferencia de oxígeno, como ocurre con los residuos muy concentrados, el sistema aventaja a los lodos activados con aire, cuya capacidad de transferencia es limitada. Otra situación en la cual el sistema de oxígeno tiene más posibilidades de ofrecer una ventaja económica se presenta cuando el control de olores es importante y se tiene intención de cubrir los tanques de aireación. Además, el control de olores es bastante más sencillo porque el volumen de gas que se debe desahogar es sólo alrededor de 1% del correspondiente a lodos activados con aire. No obstante, el alto costo del suministro de oxígeno y las habilidades necesarias para aplicar el proceso impiden que éste sea competitivo con los LAC, excepto en plantas grandes.

**Reactores secuenciales discontinuos (RSD).** En un sistema de crecimiento en suspensión en RSD (sistema RSD), la aireación y la clarificación se verifican en secuencia en el mismo tanque. Se usaron sistemas similares de llenado y extracción durante unos seis años antes de 1920, hasta que los sistemas continuos los reemplazaron. Hasta que se desarrollaron sistemas automáticos de control confiables, en la década de 1980, el concepto no era competitivo con los métodos tradicionales. Como se practica ahora, el ciclo de operación de un RSD incluye cinco etapas: llenado, reacción (con mezcla y aireación), sedimentación, decantación e inactividad. Casi todas las instalaciones de RSD comprenden al menos dos reactores idénticos, los cuales reciben afluente de manera alternada y pueden proporcionar así un tratamiento continuo. Los lodos se sacan del reactor durante las fases de decantación o inactividad, cuando el volu-

men de lodos sedimentados alcanza cierto nivel. Los costos de construcción y operación de los RSD son aproximadamente 20% menores que los de las plantas de lodos activados convencionales, debido principalmente al hecho de que no se requiere sedimentación secundaria ni bombeo para devolver lodos activados (U.S. EPA, 1986). Tampoco se requiere tratamiento primario en la mayoría de los casos. Las ventajas principales de los RSD son su flexibilidad y su eficiencia. Se da cabida a grandes fluctuaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas modificando el volumen del reactor, el nivel de oxígeno disuelto y las concentraciones de SSLM, ajustes que son difíciles, si no imposibles, en los sistemas convencionales. Se han observado tasas más altas de crecimiento microbiano, y por tanto una oxidación más rápida de la materia orgánica, en los RSD. La clarificación también tiende a ser más rápida en virtud de las condiciones estáticas de sedimentación (durante la sedimentación no hay corrientes de entrada o de salida, o equipo de extracción de lodos en movimiento). En 1990 había alrededor de 150 sistemas de RSD en Estados Unidos (sobre todo en plantas pequeñas), pero su uso está aumentando de manera significativa en aplicaciones tanto municipales como industriales.

### 12.7.2 Cinética del crecimiento en suspensión

La cinética de reacción química que se presentó en el capítulo 6 se aplica de forma modificada a las reacciones biológicas de los sistemas de crecimiento en suspensión. Estas relaciones, acopladas con balances de masa en torno al sistema de aireación, proporcionan un medio para evaluar y proyectar procesos.

**Tipo de reactor.** Los tanques de aireación se proyectan para operar como sistemas de flujo de tapón o de mezcla completa. La teoría de reactores (capítulo 6) indica que para una reacción de primer orden el flujo de tapón, en virtud de la conversión más eficiente del sustrato, sería preferible a un reactor de mezcla completa. En las plantas grandes una serie de tanques de aireación, largos y estrechos con mezcla longitudinal limitada, consigue una aproximación a las condiciones de flujo de tapón. Por otra parte, es más fácil buscar la mezcla completa en las plantas pequeñas con tanques cuadrados que operan en paralelo. Incluso estos dos extremos se encuentran en un punto intermedio entre un RTFT ideal y un RTCM ideal. Como se indicó en la sección 6.6.4, la diferencia de rendimiento entre los dos reactores ideales disminuye para las reacciones de orden inferior a uno; cuando el orden es cero no hay diferencia. Además, en la práctica no se manifiesta una diferencia significativa de rendimiento entre los dos tipos de reactores, y no está claro si esto es atribuible a que el reactor no es ideal, a que el orden de la reacción es inferior a uno, a los generosos volúmenes de tanque que se proveen, o a cualquier combinación de estos factores.

**Cinética de proceso.** Los parámetros aplicables a los sistemas de crecimiento en suspensión son la velocidad de eliminación de sustrato  $q$ , la tasa de crecimiento específico  $\mu$ , el tiempo medio de residencia de células  $\theta_c$  y el régimen de carga orgánica  $A/M$ . Examinémoslos y analicemos algunos ejemplos de su aplicación al diseño de procesos.

**Cinética de proceso: velocidad de eliminación de sustrato  $q$ .** En las reacciones químicas (capítulo 6) la velocidad  $r$  de conversión o eliminación del sustrato es una función de la concentración de sustrato  $A$ . Matemáticamente,

$$r = -k_r[A]^n \quad (\text{mg/L} \cdot \text{t}) \quad (12.14)$$



donde, cuando  $n = 0$  (orden cero),  $k_r$  está en  $\text{mg/L} \cdot \text{t}$   
 cuando  $n = 1$  (primer orden),  $k_r$  está en  $1/\text{t}$   
 cuando  $n = 2$  (segundo orden),  $k_r$  está en  $\text{L}/\text{mg} \cdot \text{t}$

En los procesos biológicos, la velocidad  $q$  de conversión del sustrato (materia orgánica) también es función de  $[X]$ , así como la concentración de sólidos biológicos presentes, y la concentración del sustrato orgánico (se omiten los corchetes que indican la concentración de  $S$ ). Matemáticamente,

$$q = k_q S^n \quad \left( \frac{\text{mg de sustrato convertido/t}}{\text{mg de sólidos presentes}} \right) \quad (12.15)$$

en donde  $S =$  concentración de sustrato orgánico presente  
 $q =$  velocidad específica de conversión del sustrato  $= r/[X]$   
 $[X] =$  concentración de sólidos biológicos presentes como SVSLM

y en donde,

cuando  $n = 0$  (orden cero),  $k_q$  está en  $1/\text{t}$   
 cuando  $n = 1$  (primer orden),  $k_q$  está en  $\text{L}/\text{mg} \cdot \text{t}$   
 cuando  $n = 2$  (segundo orden),  $k_q$  está en  $(\text{L}/\text{mg})^2/\text{t}$

Es obvio que, para evitar confusión, es necesario indicar con claridad las unidades de los coeficientes de eliminación de sustrato.

Para aplicar las ecuaciones cinéticas integradas de la tabla 6-6 a sistemas de crecimiento en suspensión, el coeficiente de eliminación  $k_r$  se debe multiplicar por la concentración de sólidos biológicos  $[X]$ . Por ejemplo, en una reacción de primer orden en un RTCM, la ecuación se transforma en

$$[X]k_q t = \frac{[A_0] - [A]}{[A]} \quad (12.16)$$

### Ejemplo 12.7

Para una reacción de primer orden y un coeficiente de velocidad de eliminación de sustrato  $k_q = 0.025 \text{ L}/\text{mg} \cdot \text{día}$ , ¿qué tiempo de retención hidráulica se necesita en un RTCM para eliminar 90% de la DBO en aguas negras domésticas?

**Solución** Suponga que  $\text{SVSLM} = [X] = 2,000 \text{ mg/L}$  (intervalo de 1,000 a 3,000). Entonces, de  $k_q t [X] = [A_0]/[A] - 1$  (tabla 6-6),

$$0.025t \times 2,000 = \frac{100}{10} - 1$$

$$t = 0.167 \text{ día} = 4 \text{ h}$$

**La velocidad de eliminación de sustrato  $q$ .** También se puede deducir con base en la definición de  $q$  indicada en la ecuación (12.15), esto es,

$$q = \frac{\text{mg de sustrato convertido/t}}{\text{mg de sólidos presentes}}$$

a partir de lo cual podemos escribir

$$q = \frac{S_0 - S}{[X]V} Q \quad (12.17)$$

en donde  $[X]$  = concentración de sólidos en el tanque de aireación como SVSLM

$V$  = volumen del tanque de *aireación*

$Q$  = flujo al interior del tanque de aireación

y puesto que  $V/Q$  es el tiempo de retención hidráulica  $t$  en el tanque de aireación, se concluye que

$$q = \frac{S_0 - S}{[X]t} \quad (12.18)$$

### Exjemplo 12.8

Si un tanque de aireación con tiempo de retención de 4 h y concentración de SVSLM de 2,000 mg/L reduce la  $DBO_5$  de 200 a 20 mg/L, ¿qué concentración de sólidos  $[X]$  sería necesaria para una reducción de 95% en la  $DBO_5$ ? ¿Cuál es la velocidad específica de eliminación de sustrato en cada caso?

**Solución** Suponiendo una reacción de primer orden, entonces, de

$$k_q t [X] = \frac{S_0 - S}{S}$$

obtenemos

$$k_q = \frac{200 - 20}{20} \times \frac{24}{4 \times 2,000} = 0.027 \frac{\text{L}}{\text{mg} \cdot \text{día}}$$

Por tanto, de la ecuación (12.15),

$$q = k_q S = 0.027 \times 20 = 0.54 \text{ por día}$$

o de la ecuación (12.18),

$$q = \frac{S_0 - S}{[X]t} = \frac{180}{2,000} \times \frac{24}{4} = 0.54 \text{ por día}$$

Para encontrar la concentración de sólidos  $[X]$  para una reducción del 95% en la  $DBO_5$  empleamos

$$k_q t [X] = \frac{200 - 10}{10}$$

de modo que

$$[X] = \frac{19}{0.027} \times \frac{24}{4} = 4,222 \text{ mg/L}$$

y

$$q = k_q S = 0.027 \times 10 = 0.27 \text{ por día}$$

**Cinética de proceso: tasa específica de crecimiento  $\mu$ .** La velocidad  $dx/dt$  a la cual se producen sólidos biológicos es proporcional a la velocidad de utilización del sustrato  $dS/dt$ , y podemos escribir

$$\frac{dX}{dt} = Y \frac{dS}{dt}$$

o

$$\mu = Yq \quad (12.19)$$

en donde  $\mu$  = tasa específica de crecimiento por día

$q$  = velocidad específica de eliminación de sustrato por día

$$Y = \frac{\text{mg de sólidos biológicos producidos}}{\text{mg de sustrato convertido}} = \text{rendimiento}$$

### Ejemplo 12.9

Para una tasa específica de crecimiento de 1.0 por hora (base  $e$ ), ¿qué masa de microorganismos estará presente después de 1 h si en un principio había 100 mg?

**Solución** Suponiendo una reacción de primer orden podemos escribir

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

en donde  $X$  es el número total de células presentes. Despejando  $dX/X$  e integrando obtenemos

$$\int_{100}^x \frac{dX}{X} = \int_0^t \mu dt$$

de modo que

$$\ln x - \ln 100 = \mu t$$

$$x = e^{5.61} = 272 \text{ mg}$$

*Comentario:* Para utilizar una tasa específica de crecimiento debemos conocer o suponer un orden de reacción y saber si la tasa exponencial se basa en el logaritmo natural (base  $e$ ), común (base 10) u otro logaritmo. Cualquiera de ellos se puede usar para graficar el logaritmo de la cantidad en función del tiempo. Cada línea tendría la misma pendiente constante, pero el cambio de la cantidad con el tiempo dependería de cuál logaritmo se graficó para determinar  $\mu$ .

En este ejemplo, la tasa específica de crecimiento  $\mu$  se expresó en día<sup>-1</sup> y la velocidad de esta reacción de primer orden es de hecho un aumento de 1 por hora en el valor del logaritmo natural de las cantidades en cuestión. La tasa fraccionaria de incremento es

$$\frac{X_2 - X_1}{X_1} = \frac{272 - 100}{100} = \frac{1.72 \text{ mg de células producidas/día}}{\text{mg de células presentes}}$$

Con base en estudios con cultivos puros se ha encontrado que la tasa específica de crecimiento  $\mu$  para microorganismos sigue una reacción de tipo de saturación de la forma

$$\mu = \mu_m \frac{S}{k_s + S} \quad (12.20)$$

normalmente es satisfactorio, pero no se debe olvidar el supuesto simplificador en el cual se basa.

Si, por otra parte, suponemos que el crecimiento de los microorganismos en un sistema de crecimiento en suspensión sigue una reacción de tipo de saturación, entonces para la aplicación de la tasa específica de crecimiento  $\mu$  al diseño de procesos se requiere información respecto a los valores de  $k_s$ ,  $\mu_m$  y  $Y$ . Aunque por lo común éstos se desconocen, se pueden estimar, con base en pruebas de laboratorio, si el residuo específico por tratar está disponible y si los resultados del modelo de laboratorio son representativos del comportamiento en gran escala. Tomando en cuenta estas condiciones, este enfoque es más útil para evaluar una planta ya existente que para proyectar una nueva. Para una planta nueva el tiempo de retención de sólidos y la carga orgánica, como se describen más adelante, son los parámetros que normalmente se utilizan para el diseño de procesos.

**Cinética de proceso: tiempo medio de residencia de células  $\theta_c$ .** El *tiempo medio de residencia de células*  $\theta_c$ , que también se conoce como *tiempo de retención de sólidos* o *edad de los lodos*, es el tiempo en días que los sólidos biológicos permanecen en el sistema, es decir,

$$\theta_c = \frac{\text{masa de sólidos en el sistema}}{\text{masa de células producidas/día}} \quad (12.22)$$

Cuando el sistema opera en estado estacionario, la masa de células producidas es igual a la masa de células que mueren. Si despreciamos la pequeña cantidad de sólidos biológicos que se pierden en el efluente, la cantidad de células que mueren es  $Q_m[X]_r$ , en donde  $Q_m$  es la rapidez con la cual los lodos (sólidos biológicos) se destruyen y  $[X]_r$  es la concentración de sólidos biológicos como SS o SVS en el flujo de retorno. Además,

$$\theta_c = \frac{X}{Q_m[X]_r} \quad (12.23)$$

en donde  $X$  son los sólidos biológicos totales como SS o SVS en el tanque de aireación. Y puesto que

$$\mu = \frac{\text{masa de células producidas/día}}{\text{masa de células en el sistema}} = \frac{Q_m[X]_r}{X}$$

se concluye que

$$\theta_c = \frac{1}{\mu} \quad (12.24)$$

Por tanto, de

$$\mu = Yq \quad (12.19)$$

obtenemos

$$\theta_c = \frac{1}{Yq} \quad (12.25)$$

**Cinética de proceso: régimen de carga orgánica A/M.** En una época los tanques de aireación se proyectaban con base en tiempos de retención hidráulica que iban desde menos de 4 h hasta más de 24 h, y una carga orgánica (como DBO<sub>5</sub>) de 0.5 a 1.6 kg de DBO<sub>5</sub> por día por m<sup>3</sup> de capacidad de aireación (30 a 100 lb/día por 1,000 ft<sup>3</sup>), según el tipo de proceso elegido. La debilidad de estos procedimientos era que no se consideraba el efecto de la concentración de sólidos biológicos en los tanques de aireación. Para corregir esta deficiencia, se introdujo la carga expresada como una relación de alimento/microorganismos (A/M), que es la razón de la DBO<sub>5</sub> aplicada por día a los tanques de aireación dividida entre los SVSLM sujetos a aireación. Se supone que los SVSLM representan la masa activa de microorganismos presentes.

**Resumen.** Las características principales, entre ellas la relación A/M, para los cuatro sistemas de crecimiento en suspensión precedentes, se resumen en la tabla 12-8. El uso de esta información se ilustra en los ejemplos 12.10 y 12.11.

**TABLA 12-8 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE CRECIMIENTO EN SUSPENSIÓN**

Proceso	A/M <sup>a</sup> (día <sup>-1</sup> )	SVSLM <sup>b</sup> (mg/L)	Retención (h)	Comentarios
Lodos activados convencionales	0.3	2,000	6	Se altera por cargas de choque, útil para residuos "normales"
Aireación prolongada	0.1	4,000	24	Estable, simple, operación costosa, propicio para plantas pequeñas
Estabilización por contacto <sup>c</sup>	0.4 (tc + te)	(tc) 2,000 (te) 6,000	(tc) ½ (te) 4	Sistema estable y confiable para residuos con alto contenido de particulados
Lodos activados con oxígeno	0.8	6,000	2	Complejo, control sencillo de olores, bueno para residuos muy concentrados

$$^a \frac{A}{M} = \frac{\text{kg DBO}_5 \text{ aplicados/día}}{\text{kg SVSLM en el sistema}} \text{ y } \frac{\text{SVSLM}}{\text{SSLM}} = 0.7 \text{ a } 0.9.$$

<sup>b</sup>Son variaciones comunes de ± 50% en el SVSLM.

<sup>c</sup>Estabilización por contacto: (tc), tanque de contacto; (te), tanque de estabilización.

**Ejemplo 12.10**

Una planta de lodos activados convencionales trata 100,000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales municipales con SS y DBO<sub>5</sub> de 225 y 200 mg/L, respectivamente. Si la concentración de SSLM en los tanques de aireación de 24,000 m<sup>3</sup> de capacidad es de 1,800 mg/L, ¿tiene la planta una sobrecarga orgánica? Si es así, ¿cómo se podría rectificar la situación?

**Solución** La DBO<sub>5</sub> afluente es

$$\frac{100 \times 10^6 \times 200}{10^6} = 20,000 \text{ kg/día}$$

Suponga una eliminación de DBO del 30% en los tanques primarios (tabla 12-6). Entonces, el régimen de entrada de  $\text{DBO}_5$  en los tanques de aireación es de 14,000 kg/día y los SSLM totales sujetos a aireación son

$$\frac{24,000 \times 10^3 \times 1,800}{10^6} = 43,200 \text{ kg}$$

Suponga que el 80% de los SSLM son volátiles (véase la nota al pie de la tabla 12-8). Entonces, los SVSLM totales sujetos a aireación son  $0.8 \times 43,200 = 34,560 \text{ kg}$ , y

$$\frac{A}{M} = \frac{14,000}{34,560} = 0.4 \text{ kg DBO}_5/\text{kg SVSLM} \cdot \text{día}$$

*Comentario:* de acuerdo con la tabla 12-8, la carga orgánica en los tanques de aireación es mayor que la deseable. Esto se podría corregir por medio de una de las opciones siguientes, las cuales se listan en orden de dificultad y costo crecientes:

- Aumentar los SSLM en el tanque de aireación (a 2,300 mg/L) en los tanques de aireación devolviendo más flóculos orgánicos.
- Aumentar la eliminación de DBO en los tanques primarios incorporando precipitación química (no se estudia en este libro).
- Modificar la planta para utilizar procesos más rápidos como la estabilización por contacto.
- Expandir la planta.

### Ejemplo 12.11

Una planta de lodos activados de 1,000  $\text{m}^3/\text{día}$  fue proyectada para una  $A/M$  de  $0.3 \text{ día}^{-1}$  y una reducción de  $\text{DBO}_5$  de 150 mg/L a 15 mg/L por medio del sistema de aireación. Si la concentración de SVSLM de 2,000 mg/L se puede aumentar a 1% en el tanque de sedimentación final y se recicla a los tanques de aireación a un régimen medio de 258  $\text{m}^3/\text{día}$ , determine:

- El volumen del tanque de aireación  $V$  y el tiempo de retención hidráulica  $t$
- La masa de lodos activados por extraer del sistema cada día
- $\mu$ ,  $q$ ,  $Y$  y  $\theta$ .

**Solución** Como en casi todos los problemas de esta naturaleza, el primer paso consiste en hacer un dibujo que muestre toda la información pertinente, dada y requerida (figura 12-15).

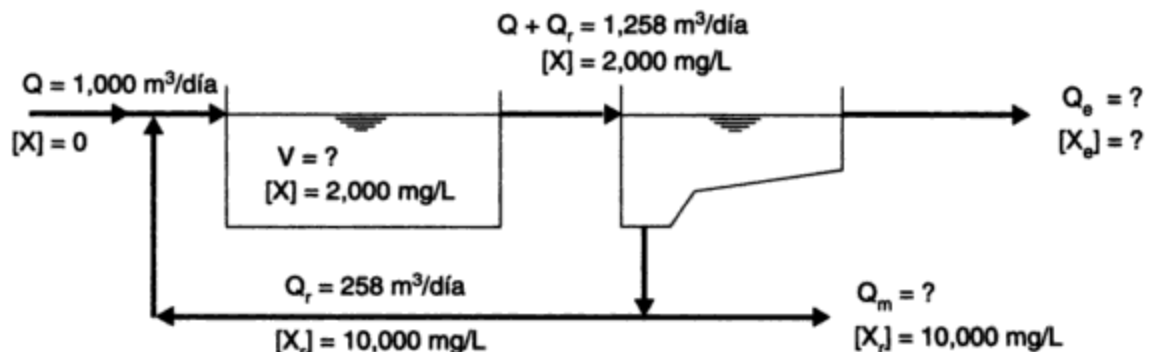


Figura 12-15

(a) Con base en

$$\frac{A}{M} = 0.3 \text{ día}^{-1} = \frac{150 \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ m}^3/\text{día}}{2,000 \text{ mg/L} \times V \text{ m}^3}$$

encontramos que  $V = 250 \text{ m}^3$ , y puesto que  $t = V/Q$  se concluye que

$$t = \frac{250 \text{ m}^3}{1,000 \text{ m}^3/\text{día}} \times \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} = 6 \text{ h}$$

(b) Con base en un balance de masa de los microorganismos (sólidos) que entran y salen del tanque de aireación, obtenemos

$$\text{entrada} = Q_r[X_r] = 258 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{10^3 \text{ L}}{\text{m}^3} \times 10,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} = 2,580 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$\text{salida} = (Q + Q_r)[X] + \mu[X]V \text{ (sólidos producidos)}$$

$$= 1,258 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 2,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{10^3 \text{ L}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} + \mu[X]V$$

$$= 2,516 \text{ kg} + \mu[X]V$$

La masa de lodos activados por extraer del sistema cada día es

$$\mu[X]V = 2,580 - 2,516 = 64 \text{ kg/día}$$

$$(c) \quad \mu = \frac{\text{masa de sólidos volátiles producidos por día}}{\text{masa de sólidos volátiles en el sistema}}$$

$$= \frac{64 \times 10^6 \text{ mg/día}}{2,000 \text{ mg/L} \times 250 \times 10^3 \text{ L}} = 0.128 \text{ por día}$$

$$q = \frac{\text{sustrato orgánico extraído por día}}{\text{sólidos volátiles en el sistema}}$$

$$= \frac{(150 - 15) \text{ mg/L} \times 1,000 \text{ m}^3/\text{día}}{2,000 \text{ mg/L} \times 250 \text{ m}^3} = 0.27 \text{ por día}$$

$Y =$  rendimiento

$$= \frac{\mu}{q} = \frac{0.128}{0.27} = 0.47 \frac{\text{g VSS producido}}{\text{g BOD}_5 \text{ satisfecha}}$$

$\theta_c =$  edad de los lodos

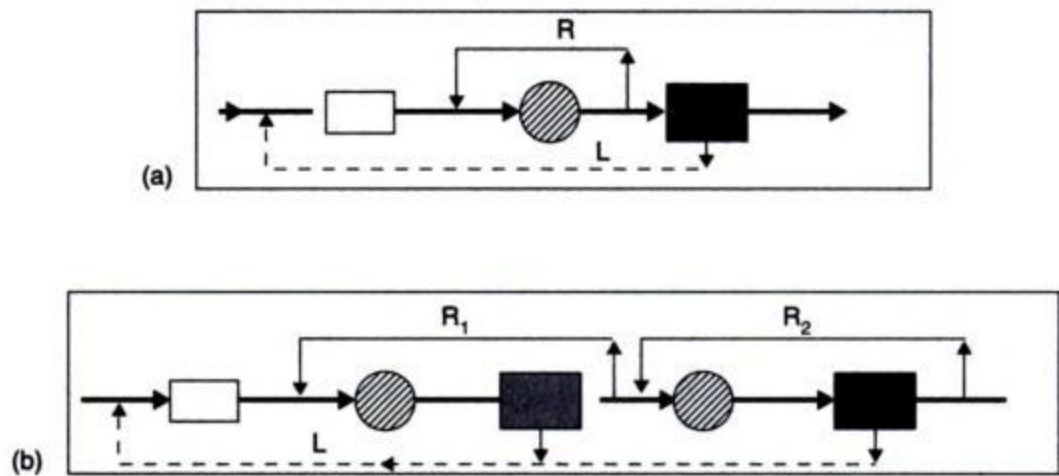
$$= \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0.128} = 7.8 \text{ días}$$

*Comentario:* En este ejemplo los valores elegidos proporcionan resultados razonables. Sin embargo, las plantas en operación no se comportan de una forma tan predecible. En su rendimiento influyen muchos parámetros que no hemos considerado. Por ejemplo, el valor de 0.47 calculado

Copyrighted image

**Figura 12-16** Sistema de crecimiento adherido. (Fotografía cortesía de J. G. Henry.)

Un filtro percolador convencional relleno de roca donde las aguas negras sedimentadas se distribuyen de manera uniforme por medio de un distribuidor rotatorio accionado en forma hidráulica.



**LEYENDA**

L Lodos devueltos

Clarificador primario

Clarificador intermedio

R Flujo recirculado

Filtro percolador

Clarificador final

**Figura 12-17** Configuraciones representativas de filtros percoladores: (a) de una etapa; (b) de dos etapas.



velocidades menores y mejor controladas. Los primeros filtros percoladores tenían de 1.5 a 2.0 m de profundidad y consistían en 50 a 100 mm de un medio de listones de piedra o madera, pero la tendencia ahora es hacia lechos más profundos, contruidos de módulos apilables de un medio plástico. En los filtros percoladores de **torre biológica** se utilizan lechos de plástico hasta 12 m (40 ft) de profundidad para tratar grandes flujos de aguas residuales muy concentradas. Los medios de plástico son más costosos que los de piedra, aunque por lo general más eficaces porque (1) tienen un área de superficie de 80 a 160 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (24 a 48 ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>) contra 65 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (20 ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>) para los de roca, por lo cual aceptan más biomasa, y (2) un porcentaje mucho mayor de espacio vacío (de 90 a 95% contra 50% en los de roca), el cual permite cargas hidráulicas mayores y mejor transferencia de oxígeno (WEF/ASCE, 1992).

Para fines de ventilación, en los diseños más antiguos de filtros percoladores se utilizaba el flujo de aire natural a través del filtro causado por las diferencias de temperatura y humedad entre el aire ambiental y el aire del filtro. Sin embargo, cuando las diferencias de temperatura son de menos de 3 a 5°C (5 a 9°F), el tiro puede ser insuficiente para suministrar el oxígeno necesario. Por otra parte, cuando las temperaturas ambientales son muy bajas, la ventilación excesiva reduce considerablemente la temperatura del filtro y por tanto hace más lenta la oxidación bioquímica. Los sistemas de ventilación forzada con cubiertas sobre los lechos filtrantes aseguran un suministro adecuado de oxígeno y mejor control de la temperatura, razón por la cual son comunes en los diseños más recientes. En comparación con las plantas de lodos activados convencionales, los filtros percoladores son más idóneos para el manejo de cargas orgánicas e hidráulicas súbitas, su operación es más económica y sencilla, y producen menos sólidos biológicos. Aunque la eficiencia de eliminación de la DBO tiende a ser menor, el mejor diseño y el tamaño más adecuado de los clarificadores secundarios, además de las mejoras ya mencionadas, han aumentado de manera significativa la calidad del efluente de los filtros percoladores. No obstante, la construcción de estos filtros es más costosa y, según el diseño, el proceso puede ser más sensible a la temperatura que los lodos activados.

**Contactador biológico rotatorio (CBR).** Concebido por primera vez en 1900, el concepto del CBR se popularizó para sistemas pequeños en la década de 1960 en Europa, cuando se pudo disponer de poliestireno de bajo costo. En Estados Unidos existen ahora más de 600 instalaciones, el 70% de las cuales se utilizan para eliminar DBO carbonosa y el 25% para eliminación de DBO carbonosa y nitrogenosa (es decir, para nitrificación). Una unidad de CBR moderna se compone de una serie de discos de polietileno de alta densidad, diámetro grande y empaque compacto sobre un eje horizontal, con alrededor del 40% del área superficial del medio sumergida en aguas residuales en un tanque de concreto. El eje se hace girar, ya sea de manera mecánica o por medio de burbujas de aire que aporta una unidad de aireación, a una velocidad de 1 a 2 rpm.

La película de biomasa adherida a la superficie del medio está en contacto, alternativamente, con aguas residuales para adsorber material orgánico y con la atmósfera para el suministro de oxígeno. Al igual que los filtros percoladores, los CBR casi siempre están precedidos por un clarificador primario y van seguidos de uno secundario, el cual separa la biomasa desprendida. Una consideración de diseño importante es la disposición en etapas de las unidades individuales de CBR en una serie de celdas independientes, por lo común tres o cuatro, para el tratamiento secundario. Aunque en cada etapa el mezclado es total, el patrón de flujo global es de flujo de tapón, de modo que la primera etapa tiene la carga orgánica y la demanda de oxígeno más grandes. En consecuencia, la mayor parte de la eliminación de DBO se verifica durante la primera etapa, en tanto que la nitrificación, de haberla, se produce sólo en la etapa final.

**Solución** Suponga que el flujo de aguas residuales es de 400 lpd (tabla 12-4). El flujo medio de aguas residuales municipales es entonces

$$\frac{12,000 \times 400}{10^3} = 4,800 \text{ m}^3/\text{día}$$

Así pues, el flujo hacia cada filtro es de 4,800 m<sup>3</sup>/día, incluido el 100% de recirculación. Suponga que la DBO afluente es de 190 mg/L (tabla 12-4). Entonces, la carga de DBO<sub>5</sub> afluente a la planta es

$$\frac{4,800 \times 10^3 \times 190}{10^6} = 912 \text{ kg/día}$$

Suponga una eliminación de 30% de la DBO en los primarios (tabla 12-6). Entonces, la carga de DBO en cada filtro es  $\frac{1}{3} \times 0.70 \times 912 = 319 \text{ kg/día}$ .

**Tamaño de los filtros con base en la carga de DBO.** Suponga que la carga de DBO por diseño es de 0.560 kg/m · día (tabla 12-9). Entonces, tenemos que

$$\text{volumen del filtro} = \text{área} \times \text{profundidad} = \frac{\pi d^2}{4} \times 2 \text{ m}$$

y

$$\text{carga unitaria de DBO} = \frac{319 \text{ kg/día}}{[(\pi d^2 / 4) \times 2] \text{ m}^3} = 0.560 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{día}$$

de donde

$$d = 19 \text{ m.}$$

**Tamaño de los filtros con base en la carga hidráulica.** Suponga una carga hidráulica por diseño de 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·día (tabla 12-9). Tenemos entonces que

$$\text{área del filtro} = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\text{carga hidráulica unitaria} = \frac{4,800 \text{ m}^3/\text{día}}{(\pi d^2 / 4) \text{ m}^2} = 20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$$

de donde

$$d = 17.5 \text{ m.}$$

**Comentario:** Así pues, los dos filtros de 20 m de diámetro tienen sin duda el tamaño suficiente para las cargas de DBO e hidráulica normales. En la práctica también se debe considerar lo que sucede cuando se presentan cargas mayores que las normales o cuando un filtro está fuera de servicio. Las posibilidades son: hacer más grandes los dos filtros, incluir un tercero o permitir una sobrecarga temporal.

#### 12.7.4 Procesamiento de lodos

**Tipos y cantidades de lodos.** El procesamiento de lodos y la eliminación de los residuos son las áreas que más se descuidan en el tratamiento de aguas residuales. Estas actividades tienen que ver con menos del 1% del volumen total de desperdicios, pero consumen hasta el 50% de los costos de capital y de operación. Los lodos crudos de los tanques primarios, junto con los lodos biológicos de los tanques finales, se deben concentrar y estabilizar antes de deshacerse de ellos en terrenos. La digestión aerobia o anaerobia es el método usual para conseguir esto, y puede ser suficiente y no requerirse más desecación u oxidación antes de la

eliminación final. Cuando el objetivo es producir un producto susceptible de venderse para uso doméstico o agrícola, los lodos, que ahora se describen como *biosólidos* (cuando tienen potencial de uso benéfico), se pueden estabilizar por conversión en abono, por lo común junto con desperdicios sólidos municipales o agrícolas (sección 14.6.2). Si los lodos se van a incinerar, los mismos se desecan pero no se transforman en abono, porque la estabilización reduce el contenido volátil y por tanto el valor calórico de los lodos. En general, la selección de un tren de procesamiento de lodos depende en gran medida del método de eliminación o uso final.

Las cantidades de lodos por procesar varían con el tipo de proceso de tratamiento de aguas residuales que se emplea. El volumen de lodos que se produce por sedimentación gravitatoria se puede determinar si se conoce el porcentaje de separación de SS y la concentración del material sedimentado. Las cantidades que se producen por procesos biológicos aerobios depende de la carga de DBO. Para sistemas de película fija como los filtros percoladores, el excedente de producción de lodos biológicos por lo común es entre 0.3 y 0.5 g SVS/g de DBO<sub>5</sub> aplicada, en donde el valor más bajo corresponde a cargas de DBO ligeras y el mayor a cargas más fuertes. Con procesos de crecimiento en suspensión, como los lodos activados, el excedente de lodos producidos varía con la relación *A/M* que se utiliza. El rendimiento neto de SVS varía desde cerca de 0.3 g SVS/g de DBO<sub>5</sub> aplicada en el caso de plantas de aireación prolongada (baja *A/M*) hasta aproximadamente 0.45 para plantas de lodos activados que operan con una relación *A/M* alta (Viessman y Hammer, 1993).

En la digestión anaerobia el crecimiento microbiano está limitado por la pequeña cantidad de sustrato adecuado disponible y es de alrededor de un décimo del que se produce en los procesos aerobios.

**Digestión anaerobia.** Los costos energéticos en aumento y la necesidad de conservar la energía han desalentado el uso de la digestión aerobia en las plantas que procesan más de 4,000 m<sup>3</sup>/día (alrededor de 1 mgd) y han despertado un nuevo interés en el proceso aerobio. Como se mencionó en la sección 12.5.2, la digestión anaerobia se verifica en dos fases. En la primera etapa la hidrólisis (licuefacción) de la materia orgánica y su conversión biológica en ácidos orgánicos se lleva a cabo con rapidez. En la segunda, las bacterias productoras de metano de crecimiento lento y sensibles al entorno utilizan los ácidos orgánicos para producir un gas compuesto de alrededor de dos tercios de metano y un tercio de CO<sub>2</sub>, con trazas de H<sub>2</sub>S. Cualquier choque que experimenten las bacterias por exceso de ácido, oxígeno o sustancias tóxicas, o por valores extremos de pH ( $7 \pm 0.3$ ) o temperatura ( $33^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ ), altera el proceso y hace que fracase y se torne ácido o se "agrie".

Con un solo tanque de digestión, se deben de llevar a cabo de manera conjunta el mezclado para favorecer la digestión, la sedimentación para separar y espesar los lodos, y el almacenamiento de lodos digeridos. Este arreglo poco eficiente, llamado **digestión convencional** o **en una etapa**, limita las cargas al digestor (con base en los SVS) a alrededor de 0.5 kg/m<sup>3</sup> (30 lb por 1,000 ft<sup>3</sup>) por día. Cuando se separa el mezclado de las funciones de espesado y almacenamiento, las cargas pueden ser de 1.6 kg SVS/m<sup>3</sup> (100 lb por 1,000 ft<sup>3</sup>) de capacidad del digestor primario por día, y se aplica entonces el término *digestión rápida*. La reducción en el contenido de SVS sería de alrededor del 50% en ambos casos.

### Ejemplo 12.13

Para una planta de lodos activados convencionales que trata 2,000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales municipales, determine el tamaño de:

por tanto, el diámetro es

$$\sqrt{\frac{532 \times 4}{\pi \times 7}} = 9.8 \text{ m}$$

**Desecación e incineración de lodos.** En Estados Unidos la tendencia hacia la incineración, que había crecido rápidamente durante la década de 1970, se interrumpió al aumentar el costo de los combustibles. De hecho, algunos estados han dejado de utilizar incineradores de lodos para ahorrar combustible. Es costosa la incineración de lodos que están demasiado húmedos para arder por sí solos y que no cuentan con combustible complementario. El problema surge porque se necesita una torta con más de 30% de sólidos para una combustión que se mantiene por sí sola (autógena), y los filtros de vacío y las centrifugas (los dos dispositivos de desecación de uso más extendido) por lo general desecan los lodos sólo hasta un contenido de sólidos de 18 a 20%. La respuesta obvia al dilema, cuando la eliminación en terrenos no es posible y se necesita una incineración que se mantenga por sí misma, es la adición de material combustible a los lodos o el uso de métodos de desecación más eficientes.

Por fortuna, ahora se cuenta con dispositivos de desecación más eficientes y de más de una docena de fabricantes y proveedores de filtros de bandas a presión y filtros de placas y también marcos a presión. Los filtros de bandas comprimen los lodos entre bandas porosas en movimiento para forzar la salida del agua. Los filtros de placas y marcos utilizan una presión muy alta para forzar el paso del agua a través de un medio poroso fijo. Ambos métodos son más eficientes que los filtros a vacío o las centrifugas tradicionales. Los filtros de bandas están reemplazando con rapidez a los filtros al vacío, o incluso se están instalando dichos filtros para desecar aún más la torta de los filtros al vacío. Las necesidades energéticas de estas unidades son de una sexta parte de las que requieren los filtros al vacío.

**Ejemplo 12.14**

Si la concentración de sólidos de los lodos digeridos se pudiera aumentar de 6 a 12% por espesado, ¿qué porcentaje de reducción de volumen se obtendría? Suponga que los lodos digeridos contienen 60% de sólidos fijos y 40% de sólidos volátiles (con base en el peso seco) que tienen densidades relativas de 2.4 y 1.0, respectivamente.

**Solución** Considere un peso de 100 kg de lodos húmedos antes del espesado. Podemos hacer un balance de masa entre la cantidad de lodos y sus componentes en cada etapa, sin olvidar que la cantidad de sólidos permanece constante y sólo se reduce el contenido de agua. Podemos escribir

$$\text{lodos} = \text{sólidos} + \text{líquido}$$

antes y después del espesado. Los cálculos para la etapa inicial son los siguientes:

**Antes del espesado:**

Cantidad	Lodos	Sólidos		Líquido
En peso		6 kg (6%)		
		Fijos 60%	Volátiles 40%	
	100 kg	3.6 kg	2.4 kg	94 kg
En volumen				
$\left(\frac{\text{peso}}{\text{DR}}\right)$	$\frac{100}{\text{DR}}$ L	$\frac{3.6}{2.4}$ L	$\frac{2.4}{1.0}$ L	$\frac{94}{1.0}$ L

$$\frac{12 - 6}{12} \times 100 = 50\%$$

que es un valor suficientemente preciso para casi todos los cálculos de volumen de lodos.

### 12.7.5 Eliminación de los residuos

**Aplicación de biosólidos en terrenos.** Para plantas de tratamiento pequeñas y medianas, la aplicación de biosólidos en terrenos es la opción más popular de uso y eliminación. Los biosólidos estabilizados se pueden aplicar a tierras agrícolas, áreas forestales y terrenos perturbados como antiguos centros mineros para recuperación de tierras. La capacidad de asimilación de nitrógeno del suelo y de los cultivos de recubrimiento suele ser la base para determinar la cantidad de lodos digeridos que se puede aplicar. No obstante, se fijan además limitaciones respecto a diversos metales pesados, de los cuales el cadmio es motivo de especial preocupación ya que es donde se van a cultivar vegetales frondosos. Las tasas de aplicación que permite el Ontario Ministry of the Environment (Ministerio del Ambiente de Ontario) se basan en apariencia en el contenido de nitrógeno disponible ( $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$ ). Sin embargo, los lodos se rechazan como no idóneos para eliminación en terrenos si su proporción nitrógeno/metales es inferior a los valores estipulados.

El método más sencillo para recolectar y aplicar los lodos utiliza camiones cisterna de 4 a 8 m<sup>3</sup> de capacidad (1,000 a 2,000 gal) equipados con un múltiple de tubería para distribuir los lodos líquidos sobre los terrenos agrícolas. Las tasas de aplicación varían ampliamente con el contenido de nitrógeno y de metales pesados del residuo y con las características del predio (clima, suelo, cultivo de recubrimiento). Las tasas de aplicación para lodos digeridos de plantas municipales (que llevan a cabo el tratamiento de lodos activados) varían desde 2 hasta 70 toneladas secas/ha · año (0.9 a 31 ton/acre · año), en donde una tasa típica es de 11 toneladas/ha · año (5 ton/acre · año) (Metcalf y Eddy, 1991). En el ejemplo 12.15 se describen cálculos simplificados para estimar las cantidades aproximadas de lodos que son producto del tratamiento de aguas residuales municipales.

#### Ejemplo 12.15

Una planta de lodos activados convencionales que da servicio a una población de 5,000 habitantes se deshace de sus lodos digeridos de manera anaeróbica en terrenos de cultivo relativamente impermeables. ¿Cuántos camiones cisterna (de 3.8 m<sup>3</sup> de capacidad) se requieren cada semana para acarrear los lodos digeridos líquidos? ¿Qué área de tierra (sin contar las zonas de amortiguamiento) se requiere para la eliminación de estos lodos líquidos?

#### Solución

##### Supuestos:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Aguas negras<br>(tabla 12-4)                        | SS = 225 mg/L (70% volátiles, tabla 12-6)<br>DBO <sub>5</sub> = 190 mg/L<br>(Excedente de lodos activados devuelto al primario)                                |
| 2. Asentamiento primario<br>(tabla 12-6)               | SS = 50% de separación<br>DBO <sub>5</sub> = 30% de eliminación  |
| 3. Excedente de lodos<br>activados<br>(sección 12.7.4) | = 0.4 g de SVS producidos por g de DBO <sub>5</sub> aplicada<br>(80% volátiles; véase la tabla 12-6, "Sedimentación final", o la nota al pie de la tabla 12-8) |

mación de biosólidos en abono, que produce un acondicionador de suelos comercializable, está adquiriendo popularidad porque es un medio económico y flexible de reutilizar los nutrientes y la materia orgánica de los lodos (véase también la sección 14.6.2). Aproximadamente 150 municipios de todo Estados Unidos están distribuyendo y comercializando biosólidos transformados en abono (WEF/ASCE, 1992). Entre las tecnologías que están surgiendo para usos benéficos adicionales de los biosólidos se cuentan la conversión en alimento para animales, biotabiques, cemento, aceite y agregados para caminos, pero es poco probable que alguno de ellos tenga un efecto importante en el manejo de los biosólidos.

### 12.7.6 Problemas de olor

Prácticamente todos los procesos de tratamiento de residuos domésticos e industriales en un momento dado desprenden olores desagradables, e incluso las plantas que operan correctamente no escapan del todo a este problema. En la mayor parte de los casos los olores están confinados a las inmediaciones de las unidades de proceso, y los operadores deben preocuparse sólo por los olores que escapan fuera de los límites de la planta. En muchos casos esto depende de la topografía y de los vientos predominantes.

Probablemente la causa más común de olores es la formación de condiciones aeróbicas. A excepción del proceso de digestión anaerobia y de las zonas anaeróbicas necesarias para la desnitrificación, se deben evitar condiciones anaeróbicas. Los depósitos de lodos y las capas de lama, ricas en bacterias anaerobias reductoras de sulfatos, son la causa principal de producción de  $H_2S$  en las alcantarillas. Esta clase de depósitos, si se permite su formación, producen olores en cualquier tanque, incluso en los de aireación, donde se pueden presentar condiciones anaeróbicas debido a un mezclado deficiente. El prolongado tiempo de retención de las alcantarillas interceptoras, en especial las que tienen pendiente llana, permite que comience la degradación aerobia de la materia orgánica antes que las aguas residuales lleguen a la planta de tratamiento; éste es el origen del olor característico de las aguas residuales "sépticas".

Las autoridades locales experimentan cada vez más presión para reducir o eliminar los olores de sus plantas de tratamiento. Las soluciones casi nunca son obvias, y pueden ir desde sencillos cambios de operación y de proceso, o adiciones químicas, hasta costosos dispositivos para el control de olores, como depuradores de aire y equipos de adsorción. Cada situación es diferente, y en muchos casos no se puede determinar cuál es la mejor solución hasta que surge el problema.

## 12.8 INSTALACIONES DE TRATAMIENTO *IN SITU*

En una época, antes de que se generalizara el uso de alcantarillas, era necesario tratar y eliminar las aguas residuales en su punto de origen. Incluso ahora, para muchas comunidades pequeñas los sistemas locales pueden ser preferibles a un complejo municipal, esto desde el punto de vista del costo global y el control de la contaminación. En la actualidad, alrededor del 25% de todas las unidades habitacionales de Estados Unidos se deshacen de sus aguas residuales empleando sistemas locales de tratamiento y eliminación (United States EPA, 1980). Este porcentaje ha permanecido relativamente constante a lo largo de los últimos 30 años, no obstante la copiosa construcción de alcantarillas en las décadas de 1960 y 1970. Con frecuencia los centros vacacionales, centros de servicios, campamentos e instituciones aisladas no tienen acceso a alcantarillas municipales y se ven obligados a depender de instalaciones locales. Las opciones para sistemas pequeños van desde retretes de foso y excusados que no requieren agua, hasta tanques sépticos y

unidades en paquete. Las características de estas opciones se describen en el resto de esta sección. Gran parte de esta información se ha resumido de un informe de Ross *et al.* (1980).

### 12.8.1 Sistemas sin agua

Cuando no se dispone de agua a presión o las condiciones del suelo no son idóneas para la eliminación de efluentes, las opciones para el tratamiento *in situ* se limitan a retretes o excusados que no utilizan agua. Siempre y cuando la contaminación de aguas de superficie o subterráneas no constituya un problema, un retrete colocado sobre un foso excavado en la tierra es la solución más sencilla y económica. Cuando el foso se llena, el retrete se reubica. Si la contaminación del abasto de agua es un problema potencial, entonces se utilizan fosos impermeables y los residuos que se recogen se bombean al exterior con regularidad. Ambos tipos de retretes se utilizan ampliamente para terrenos de campamento, parques y áreas recreativas sin servicios.

Diversos tipos de excusados que no utilizan agua, como unidades formadoras de abono, químicas e incineradoras, constituyen un enfoque menos primitivo que los retretes para instalaciones pequeñas y uso unifamiliar. Los excusados formadores de abono son un invento reciente en el cual los desperdicios, secados hasta un contenido crítico de humedad por evaporación, se fermentan en condiciones aeróbicas a una temperatura controlada y con ventilación forzada. Los excusados químicos estabilizan la materia orgánica y destruyen las bacterias con soluciones cáusticas fuertes que se deben retirar y reemplazar con regularidad. Los excusados incineradores utilizan electricidad, petróleo o gas para oxidar las sustancias orgánicas por completo hasta una ceniza seca inerte que se debe retirar periódicamente. Varias versiones patentadas de estos tres tipos de unidades están disponibles en el comercio para instalaciones pequeñas.

### 12.8.2 Tanques sépticos

Un sistema de tanque séptico, que es el método más común de tratamiento y eliminación de aguas residuales *in situ*, se puede proyectar para una pequeña familia o una institución grande. El tanque de concreto, fibra de vidrio o acero recubierto (figura 12-18) por lo común se localiza abajo del nivel del suelo, pero es accesible desde el mismo. El tanque proporciona un tiempo de retención de los residuos de al menos 24 h en uno o dos compartimientos, con lo cual permite que los sólidos pesados (lodos) se sedimenten en el fondo del tanque y que el aceite y la grasa (la nata) suban a la superficie. Estos sólidos, que sufren sólo una ligera compactación y descomposición anaerobia, se acumulan y deben extraerse a intervalos de tres a cinco años para mantener la capacidad de almacenamiento del tanque y la calidad del efluente. En casi todos los municipios el encargado de proporcionar los planes y criterios de diseño (que el propietario de vivienda está obligado a seguir) es el funcionario médico de salubridad.

El efluente líquido, con concentraciones de DBO y SS de alrededor de 175 y 75 mg/L, respectivamente, se descarga entonces, de preferencia por medio de un sifón dosificador intermitente, a un sistema de eliminación en el subsuelo. Este sistema puede consistir en alcantarillas abiertas de loseta colocadas en zanjas llenas de grava o piedra triturada que permite filtración hacia abajo y evaporación y transpiración hacia arriba. La longitud de la zanja necesaria (de 0.5 m de ancho) varía desde 10 hasta 50 m/m<sup>3</sup> de residuos aplicados por día para suelos de poco a muy permeables. Por ejemplo, para eliminar 2,500 L/día de efluente de tanque séptico en un suelo de permeabilidad moderada, sería necesaria una longitud de zanja total de 50 m con base en 20 m de zanja/m<sup>3</sup> de residuos por día. La longitud de cada zanja no debe exceder de 30 o 35 m.

**TABLA 12-10 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES *IN SITU***

Sistema	Aplicación	Necesidad <sup>a</sup>		Ventaja	Desventajas
		A	E		
<b>Sistemas sin agua</b>					
(se utilizan donde la eliminación de efluentes es indeseable)					
Retrete	Terrenos de campamento, áreas recreativas	No	No	Bajo costo, poco mantenimiento	Pueden poner en peligro el abasto de agua (a menos que los residuos se recolecten)
Excusado formador de abono	Residencias unifamiliares (UF)	No	Sí	Evita contaminación de aguas subterráneas	Se altera por cargas súbitas (el contenido de humedad de los residuos es crítico)
Excusado químico	Residencias uni o multifamiliares	No	No	Evita contaminación de aguas subterráneas	Los productos químicos son costosos, los residuos se deben acarrear
Excusado incinerador	Residencias unifamiliares	No	Sí	El residuo es ceniza inerte	Olores, altos costos de energía
<b>Sistemas productores de efluentes</b>					
[se usan donde la eliminación de efluentes en sistemas de subsuelo (o en corrientes receptoras) es posible]					
Tanque séptico	De residencia UF a institución	Sí	No	Sistema sencillo y confiable	Es necesario eliminar sólidos
Planta en paquete	De residencia UF a institución	Sí	Sí	Efluente de alta calidad	Es necesario eliminar sólidos, el mantenimiento es costoso

<sup>a</sup>A, se necesita suministro de agua (con sobrepresión); E, se necesita suministro de energía.

Fuente: Adaptado en parte de Ross *et al.* (1980).

## 12.9 PAPEL DEL GOBIERNO Y DEL PÚBLICO EN EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

A pesar de la conveniencia y la plusvalía que aportan los sistemas de alcantarillado municipales, los contribuyentes suelen oponerse a su implantación. Incluso cuando los beneficios o las necesidades son obvios, por lo general las autoridades se ven forzadas a proporcionar algún aliciente jurídico o económico para implantar el proyecto y controlarlo una vez que entra en operación. El pago de incentivos, la reglamentación directa y los estatutos municipales son algunas de las herramientas disponibles para mejorar la calidad del ambiente. La conciencia del público respecto a los problemas ambientales puede ser otro medio eficaz para estimular las medidas correctivas. La siguiente es una breve descripción de los medios de que disponen los municipios para el control de la contaminación.

### 12.9.1 Subsidios gubernamentales

Los municipios (o también llamados municipalidades en Estados Unidos) han recibido subsidios gubernamentales en forma de préstamos a largo plazo y de bajo costo, así como donaciones directas. En Canadá, la Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC, Corporación canadiense para la vivienda y el otorgamiento de hipotecas) proporcionó fondos durante las décadas de 1960 y 1970 que cubrían dos terceras partes del costo de los proyectos de control de la contaminación. De esta cantidad, se perdonó el 25% y el resto se reembolsó a lo largo de 25 años a una tasa de interés baja fija. En Estados Unidos los municipios han dispuesto desde 1973 de donaciones federales que cubren hasta el 75% del costo de las plantas de tratamiento de aguas re-



- 200 mg/L, o (2) aguas residuales con tratamiento previo en un filtro preliminar (que reduce la  $\text{DBO}_5$  del effluente de la fábrica de 400 a 200 mg/L) y pagar su parte proporcional (con base en su contribución de  $\text{DBO}_5$ ) de sólo los costos totales de operación, pero sin la aplicación del recargo. Determine cuál alternativa debe elegir la fábrica con base en la información siguiente:
- Para que los filtros preliminares eliminen el 50% de la  $\text{DBO}_5$  se pueden utilizar cargas equivalentes a dos veces (hidráulicas) y tres veces (de  $\text{DBO}_5$ ) las correspondientes a torres biológicas (tabla 12-9).
  - Para un sistema de filtros preliminares de 20 pies de profundidad, incluida la clarificación final y el acarreo de lodos, suponga costos de capital y de operación de 500 y \$25 por año por pie cúbico de volumen de filtro, respectivamente. No se requiere sedimentación primaria puesto que los residuos textiles tienen pocos SS (100 mg/L).
- 12.22. La sustitución de filtros de vacío por filtros de bandas en una planta de tratamiento de aguas residuales da por resultado un aumento en la concentración de sólidos de los lodos de 15 a 25% con base en el peso seco. Si se supone que los lodos (también con base en el peso seco) contienen 20% de sólidos fijos y 80% de sólidos volátiles cuya densidad relativa es de 2.5 y 1.0, respectivamente, ¿qué reducción en el volumen de lodos se consigue con el cambio de método de filtración?
- 12.23. Suponga que a la planta del problema 12.19 se le incorpora un tratamiento secundario. Determine:
- (a) La capacidad de dos tanques de aireación si el tiempo de retención debe ser de al menos 4 h; la  $A/M$  no debe ser mayor de 0.3/día y se desea mantener una concentración de SSLM de 1,800 mg/L.
  - (b) El diámetro de dos tanques finales circulares de 4 m de profundidad que manejan un flujo máximo de 1.75 veces el flujo medio diario (sin contar la recirculación).
  - (c) La carga (kg SVS/ $\text{m}^3 \cdot \text{día}$ ) para el digestor original si sólo es necesario proveer capacidad de almacenamiento de lodos para 3 meses en vez de 4.
- 12.24. Los experimentos que se han llevado a cabo con residuos de cloro combinados han mostrado que su velocidad de descomposición sigue una ecuación de velocidad de primer orden ( $N_t = N_0 e^{-kt}$ ), y se produce una reducción del 20% del residuo combinado en 8 h. Si una planta de tratamiento de aguas residuales descarga 3,000  $\text{m}^3/\text{día}$  de effluente, el cual contiene 2 mg/L de cloramina (como  $\text{Cl}_2$ ), en una corriente con un flujo medio de 27,000  $\text{m}^3/\text{día}$ , río arriba respecto a la planta, ¿cuánto tiempo será necesario después de la descarga para que las aguas receptoras sean aceptables para las truchas? [Las concentraciones de cloramina mayores de 2  $\mu\text{g}/\text{L}$  (como  $\text{Cl}_2$ ) son dañinas para las truchas.]
- 12.25. Señale tres tipos comunes de bacterias autótrofas que son importantes en los sistemas o plantas de tratamiento de agua y de aguas residuales, y explique la razón de su importancia.
- 12.26. En Estados Unidos los biosólidos de "calidad excepcional" se pueden utilizar casi sin restricciones, siempre y cuando se cumplan ciertos requisitos. Para satisfacer los límites de reducción de patógenos para bacterias de *Salmonella* sp. y coliformes fecales, los biosólidos se deben procesar por uno de seis métodos de tratamiento aprobados. Para reducir la atracción de vectores (moscas, pulgas, ratones) se debe seguir una de ocho opciones permisibles. Con base en los estándares federales de Estados Unidos (US EPA 1993) o cualquier guía o resumen de los mismos (p. ej., WaterWorld, vol 11:2 1995),
- (a) Seleccione el método de reducción de patógenos que, en su opinión, tiene más posibilidades de convertirse en el más popular e indique las razones de su selección.
  - (b) Elija una de las ocho opciones para la reducción de atracción de vectores y explique cómo se podría aplicar la misma en un sistema en gran escala.

# CAPÍTULO 13

---

## Contaminación del aire

*William J. Moroz*

### 13.1 LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN PERSPECTIVA

#### 13.1.1 Introducción

Los **contaminantes del aire** son sustancias que, cuando están presentes en la atmósfera, afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana; dañan materiales, o interfieren con el disfrute de la vida y el uso de propiedades. En este capítulo nos ocuparemos principalmente de las fuentes urbanas e industriales de contaminantes atmosféricos, sus efectos y los métodos para su control. En ciertos casos no controlamos las emisiones de manera apropiada. Debemos depender entonces de su dispersión y de los subsecuentes procesos naturales de limpieza de la atmósfera para evitar concentraciones excesivas de contaminantes, las cuales causarían efectos indeseables.

En todo el mundo, se ha puesto énfasis en el control de las concentraciones atmosféricas ambientales de contaminantes a niveles en los cuales no se observan efectos en la salud. En Estados Unidos los niveles establecidos para proteger la salud humana se describen como estándares primarios de calidad del aire. Los estándares secundarios se establecen con base en los efectos que ocurren en plantas y animales o también en el daño a materiales.

El control de la contaminación del aire no siempre es fácil, porque no es práctico eliminar todas las emisiones de un contaminante específico. Por otra parte, es razonable esperar un control de las emisiones hasta el nivel más bajo posible congruente con la tecnología disponible y den-

tro de los límites de un costo razonable. En la práctica suelen establecerse límites o estándares de control en lugar de estándares de calidad del aire ambiental, porque para un organismo de control es más fácil hacerlos respetar, aunque en realidad son deseables los segundos.

### 13.1.2 Episodios de contaminación del aire

La ciencia y la tecnología del control de la contaminación del aire tiene una antigüedad de sólo unas cuantas décadas, y nuestros conocimientos se están desarrollando con gran rapidez. Por ejemplo, la mayor parte de los instrumentos que se utilizan en la actualidad para medir la calidad del aire se crearon en la última década. No obstante los cambios que se han producido en las características de los contaminantes, es ventajoso hacer un breve repaso histórico de la contaminación del aire y de las acciones de control. A continuación se presenta una lista de algunos de los episodios de contaminación del aire que se han registrado, con énfasis en los que han tenido una influencia mayor en las actividades de control y en lo que se aprendió de cada incidente. Como es natural, la historia de la contaminación industrial del aire es más extensa en Inglaterra, donde se desarrolló la primera sociedad industrial. Al leer esta lista, es recomendable tratar de recordar la forma de vida de las personas en la época del incidente, cuántas industrias y qué clases de ellas existían, qué tan grande pudo haber sido cada establecimiento industrial y cuáles eran los sistemas de transporte y de energía que se utilizaban.

- |           |   |
|-----------|---|
| 852       | Londres, Inglaterra. Quejas de aire impuro debido a la quema ineficiente del carbón en parrillas abiertas con fines de calefacción.   |
| 1100-1200 | Londres, Inglaterra. Se aprobaron varias leyes del Parlamento en relación con la contaminación del aire.  |
| 1661      | Londres, Inglaterra. Un erudito, llamado John Evelyn, escribió un largo informe sobre la contaminación del aire en Londres. Evelyn propuso la zonificación de las actividades domésticas, comerciales e industriales, con cinturones verdes alrededor de ellas y ubicación de las fuentes más intensas en lugares situados a favor de los vientos predominantes. Esta persona se adelantó mucho a su tiempo, y sus análisis y recomendaciones no encontraron eco. |
| 1864      | Se interpuso la primera demanda relacionada con la contaminación del aire en St. Louis, Missouri.   |
| 1873      | Los registros médicos ingleses indican un "exceso de fallecimientos" asociado con periodos de mucho esmog.  |
| 1880      | Londres, Inglaterra. Se informó de un aumento del 27% en la mortalidad durante un periodo de 2 semanas.   |
| 1891      | Londres, Inglaterra. Un exceso de 1,484 fallecimientos se atribuyó a la contaminación del aire.   |
| 1922      | Londres, Inglaterra. Se informó de un aumento de 11.8% en los decesos durante un periodo de niebla intensa.   |
| 1939      | Londres, Inglaterra. Se informó de un exceso de 1,300 muertes durante un periodo de 4 días de niebla intensa.   |
| 1926      | El Public Health Service (Servicio de salud pública) de EUA hizo observaciones de carga de partículas en siete ciudades importantes (Buffalo, Nueva Orleans, Baltimore, Detroit, Los Ángeles, San Francisco y Washington). Se identificó a éstas como ciudades de clase I con una "precipitación" de 3,600 µg de partículas por metro cúbico de aire. En 1971 la EPA de EUA estableció el estándar primario de calidad del aire para la mate-                     |

- ria particulada total en suspensión (MPTS) en  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como media geométrica anual que no debe ser excedida, y una concentración en 24 h de  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que no debe excederse más de una vez por año. El 1 de julio de 1987 se fijaron nuevos estándares utilizando un nuevo indicador, el  $\text{PM}_{10}$  [partículas con diámetro aerodinámico menor de  $10 \mu\text{m}$  (es decir, partículas respirables)]. Estos estándares  $\text{PM}_{10}$  especifican una media aritmética anual no mayor de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un número esperado de concentraciones de 24 h mayores de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de no más de una por año. La instrumentación que se utilizó en el estudio de 1926 era muy diferente a la que se utiliza en la actualidad, de modo que las observaciones de calidad no son comparables de manera directa, pero vale la pena destacar la reducción en la carga de partículas.
- 1930 Se informó de una "epidemia" en el valle del Mosa, en Bélgica. Se informó de 63 decesos, y unas 8,000 personas enfermaron durante un periodo de intenso smog.
- 1948 Donora, Pensilvania. Se produjo un episodio grave de contaminación del aire del 25 al 31 de octubre en una comunidad de unos 14,000 habitantes. El espeso humo y niebla no se disipó durante el día. Los vientos eran ligeros y las montañas restringían el transporte horizontal de contaminantes. Además, una inversión redujo la dispersión vertical de los contaminantes del valle. Entre las industrias primarias había hornos de coque, altos hornos, acererías, plantas de ácido sulfúrico, una fundidora de zinc, una planta de fertilizantes y plantas generadoras de energía eléctrica. Había un intenso tráfico de trenes y barcos alimentados con carbón. El episodio de Donora se investigó extensamente (U.S. PHS., 1949). Se llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones:
1. Alrededor del 43% de la población se vio afectada. 20 personas murieron, 1,440 sufrieron efectos graves, 2,322 experimentaron efectos moderados y para 2,148 los efectos fueron leves. Los efectos sobre la salud se clasificaron como graves si la persona no podía respirar acostada; moderados si la respiración era difícil o se informaba de opresión en el pecho, tos, vómito o diarrea; y leves si sólo se informaba de ardor en los ojos, flujo nasal, garganta irritada, tos seca, dolor de cabeza o mareo.
  2. Las afecciones no hicieron distinción entre género, raza o situación ocupacional.
  3. Hubo notables variaciones en el porcentaje de personas afectadas en cada grupo de edad. El suceso afectó al 60% de las personas de más de 65 años y al 50% de todos los adultos, pero sólo al 16% de los niños menores de 6 años.
  4. Alrededor del 90% de las personas afectadas informaron de síntomas respiratorios, y el 34% informó de síntomas gastrointestinales (estomacales).
  5. Las personas más severamente afectadas fueron las que tenían antecedentes de problemas respiratorios o cardíacos.
  6. La reconstrucción de los sucesos y las estimaciones de la calidad del aire indicaron que ningún contaminante individual causó los efectos observados.
- 1952 Londres, Inglaterra. La cantidad de 4,000 fallecimientos se atribuyó a la contaminación del aire durante un periodo de 4 días. La concentración máxima de dióxido de azufre medida fue de 1.34 ppm ( $3,510 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y se observaron con frecuencia concentraciones de hasta 1 ppm ( $2,620 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En comparación, los estándares primarios de calidad del aire para el  $\text{SO}_2$  en Estados Unidos son en la actualidad de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.03 ppm) para la media aritmética anual,  $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.14 ppm) para la media de 24 h, y  $1,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.50 ppm) para una media de 3 h. Los estándares anual y de 24 h tienen relación con la salud y por tanto son estándares primarios.
- 1956 Se aprobó la British Clean Air Act (Ley británica para el aire limpio).
- 1963 Se aprobó la U.S. Clean Air Act (Ley para el aire limpio de EUA).
- 1970 Se estableció la EPA de EUA.
- 1971 Se aprobó la Canadian Clean Air Act (Ley para el aire limpio canadiense).

No obstante la implantación de leyes para el control de la contaminación del aire, se han producido episodios adicionales de contaminación grave en Nueva York, Pittsburgh, Birmingham, Los Ángeles y San Francisco en Estados Unidos, Toronto en Canadá, varias ciudades de Gran Bretaña y Europa, Tokio en Japón, y otras áreas muy industrializadas del mundo. Los problemas de contaminación del aire en Los Ángeles fueron de un tipo diferente, y son tan importantes que se examinan por separado en la siguiente sección.

Todos estos episodios han tenido efectos significativos en la salud. Además, han ocurrido incidentes de graves daños a cultivos, bosques y materiales, y los costos han sido sustanciales. Con base en la experiencia adquirida en los episodios descritos en la lista anterior, al principio se ponía énfasis de manera casi exclusiva en el control de las concentraciones de dióxido de azufre, partículas y óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

### 13.1.3 El smog de Los Ángeles

Durante la década de 1940 la contaminación del aire en Los Ángeles se hizo tan problemática que los ciudadanos exigieron acciones para limpiar la atmósfera. Se observó que se formaban grietas en los neumáticos de caucho después de un año y que ciertos tejidos sintéticos envejecían y cambiaban de color con gran rapidez. El síntoma más evidente era una reducción de la visibilidad que se iniciaba antes del mediodía y continuaba a lo largo del día a pesar de las brisas constantes provenientes del océano. Se aprobaron leyes para limitar las emisiones de dióxido de azufre, partículas y óxidos de nitrógeno, y se hicieron respetar de manera estricta. Aunque se advirtió cierta mejoría en la calidad del aire, los síntomas más objetables, como la irritación de ojos, nariz y garganta, no cambiaron en grado significativo. Estos síntomas eran diferentes de los que se experimentaban en otras localidades, y era evidente que otros contaminantes estaban activos.

Hacia finales de la década un especialista en fotoquímica llamado Haagen-Smit postuló que los contaminantes causantes en primer término del smog de Los Ángeles no se emitieron directamente de fuente alguna (Haagen-Smit, 1952). Este científico especuló que se formaron contaminantes secundarios en la atmósfera como resultado de reacciones químicas en las que participaban los contaminantes primarios.\* Investigaciones subsecuentes confirmaron que el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) se disocia cuando recibe energía radiante intensa y de longitud de onda corta del Sol, y que una serie de reacciones fotoquímicas dan origen a la formación de ozono ( $\text{O}_3$ ), un poderoso oxidante. La serie de reacciones químicas se describe de manera simplista como sigue (el oxígeno molecular,  $\text{O}_2$ , está presente en la atmósfera):



En estas ecuaciones  $h$  representa una aportación de radiación de longitud de onda corta y  $M$  representa una molécula que actúa más o menos como un catalizador, aunque también puede

\* Los términos *contaminantes primarios* (los que emiten una fuente identificable) y *contaminantes secundarios* (los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas) son comunes en la literatura actual sobre la contaminación del aire.

para afectar el desempeño de las personas expuestas a ella durante periodos prolongados, como los agentes de tránsito y los empleados de lotes de estacionamiento y talleres mecánicos.

La identificación subjetiva de los efectos de la contaminación del aire condujo a la identificación de los siguientes contaminantes principales (que en ocasiones se describen como *contaminantes de criterio*): partículas, dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (que por lo común se miden como  $\text{NO}_2$ ), compuestos orgánicos volátiles (los cuales suelen medirse en la atmósfera como hidrocarburos que no provienen del metano, porque el metano es relativamente poco reactivo en la formación de esmog fotoquímico), y ozono (un término que comprende otros oxidantes, NPA y otros compuestos). Estos contaminantes son los más comunes y omnipresentes en los centros urbanos, que es donde la población se concentra. En la actualidad sabemos que cuando se observa un efecto de contaminación del aire, es necesario tomar en cuenta muchos otros contaminantes además de los principales. Por ejemplo, el ozono solo en el aire no produce la irritación de ojos y garganta que se observa cuando existe el esmog fotoquímico; es evidente que otras sustancias químicas contribuyen a ello.

## 13.2 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

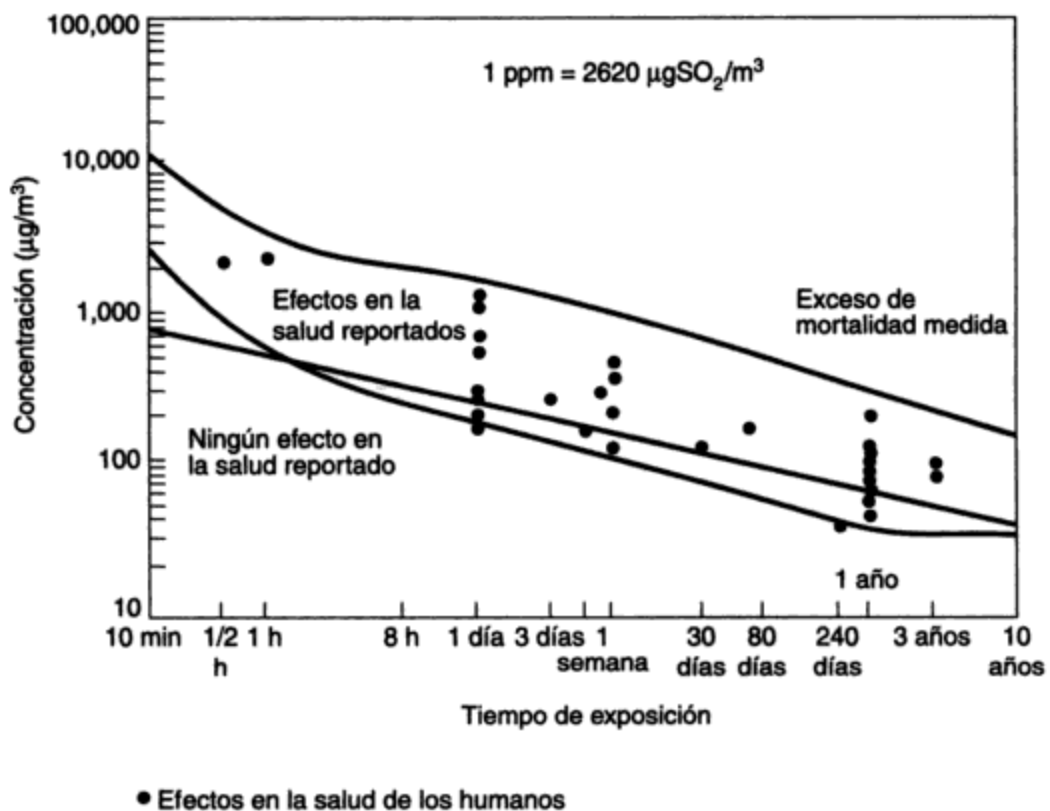
En las siguientes secciones examinaremos unos pocos ejemplos de los efectos de la contaminación del aire. Todos ellos identifican impactos locales, observables o mensurables, porque es muy difícil establecer correlaciones directas entre contaminantes específicos y efectos de exposiciones a largo plazo o a grandes distancias. Una descripción más completa llenaría varios libros. Uno de los efectos locales más evidentes de las partículas en la atmósfera es una reducción de la visibilidad. Hace sólo unas cuantas décadas era claramente visible la suciedad causada por el hollín y el humo en casi todos los centros urbanos. Un ejemplo de un costo oculto de la contaminación del aire es que la reducción de la visibilidad hace más lento el tráfico aéreo y crea la necesidad de sistemas de aterrizaje guiados por instrumentos.

En los episodios de contaminación del aire que hemos citado, la presencia local de gases era objetable a causa de su olor, su sabor o sus obvios efectos corrosivos o químicos. En la actualidad estas graves molestias sensoriales se presentan en pocos casos. No obstante, persisten efectos sutiles en la salud, como irritación de ojos o nariz o dificultades para respirar. En casos extremos los efectos alcanzan el cerebro (CO) y el estómago (varios contaminantes solos o combinados). Los daños a la vegetación por exposición crónica a contaminantes atmosféricos puede ser uno de los síntomas precursores más evidentes que permiten identificar la contaminación crónica del aire.

### 13.2.1 Efectos en la salud

Los efectos en la salud eran la consideración dominante en los primeros episodios de la contaminación del aire por razones obvias. Aunque con frecuencia no se podía identificar el contaminante (o grupo de ellos) específico que generaba los efectos observados, se disponía de información suficiente para implicar a ciertos contaminantes como contribuyentes significativos. Las investigaciones iniciales encaminadas a correlacionar las concentraciones y los efectos se enfocaron en estos contaminantes que se podían identificar con claridad.

Como se expuso en el capítulo 8, el sistema respiratorio superior humano (nasofaríngeo) es muy eficiente para filtrar las partículas grandes del aire que respiramos. No obstante, las

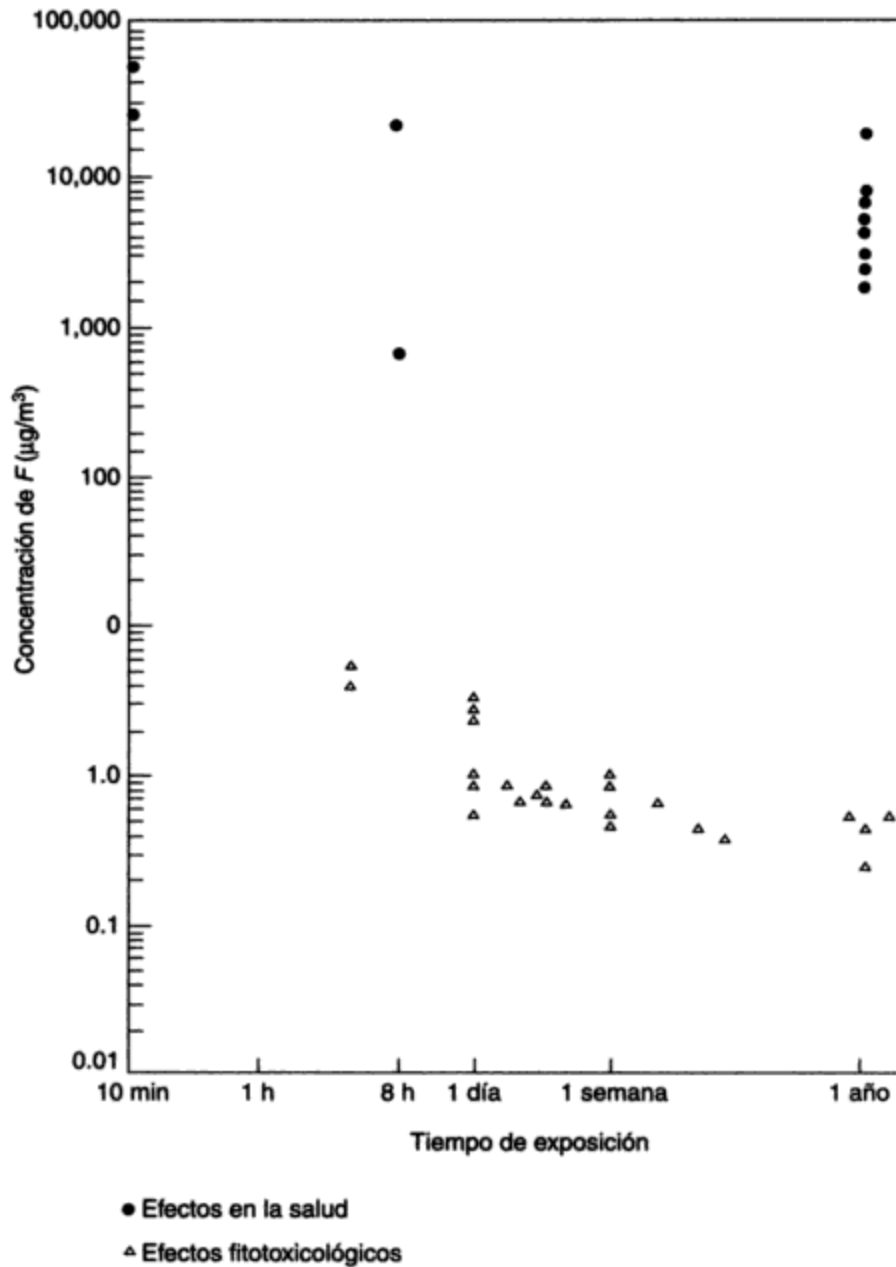


**Figura 13-2** Efectos del  $\text{SO}_2$  en la salud. Fuente: W. J. Moroz (compilado de varias fuentes).

exposición al dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y al flúor (F) gaseosos. Los efectos del monóxido de carbono en la salud son detectables con claridad al 4% de carboxihemoglobina (COHb) en la sangre, y posiblemente hasta al 2.5% de COHb.

La siguiente descripción de los efectos en la salud causados por la exposición a los principales contaminantes ha sido resumida del U.S. EPA Report 450-R-92-001 (1992).

- **Materia particulada** (incluye sólidos y líquidos). Los efectos principales en la salud que son causa de preocupación incluyen los efectos en la respiración y el sistema respiratorio, el agravamiento de afecciones respiratorias y cardiovasculares ya existentes, la alteración de los sistemas de defensa del organismo contra materiales extraños, daños al tejido pulmonar, carcinogénesis y mortalidad prematura. Las personas con afecciones pulmonares o cardiovasculares crónicas obstructivas, influenza o asma, los ancianos y los niños son los más sensibles.
- **Dióxido de azufre** (gas incoloro; umbral de sabor 0.3 ppm; umbral de olor 0.5 ppm). Los efectos principales en la salud incluyen efectos en la respiración, afecciones respiratorias, debilitamiento de las defensas pulmonares, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares ya existentes, y muerte. Entre las personas sensibles están los asmáticos y quienes padecen enfermedades pulmonares crónicas o afecciones cardiovasculares. Los ancianos y los niños son los más afectados.



**Figura 13-3** Efectos en la salud y fitotoxicológicos del flúor. *Fuente:* W. J. Moroz (compilado de varias fuentes).

- *Monóxido de carbono* (gas incoloro, insípido e inodoro a concentraciones atmosféricas). La amenaza para la salud que representa el monóxido de carbono es mayor para quienes padecen afecciones cardiovasculares porque reduce el aporte de oxígeno a órganos y tejidos. A concentraciones altas el monóxido de carbono menoscaba la percepción visual, la destreza manual y la capacidad mental.



La tabla 13-1 proporciona los estándares ambientales de calidad del aire que hace cumplir la Environmental Protection Agency de EUA y la provincia de Ontario en Canadá para varios contaminantes atmosféricos. La tabla 13-2 muestra observaciones de calidad del aire en la dirección del viento respecto a una ciudad muy industrializada de Canadá y en una localidad rural del centro de Ontario. En la tabla 13-3 se indican los factores de conversión de ppm a  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para los contaminantes más comunes.

**TABLA 13-1 ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE AMBIENTAL PARA UNA SELECCIÓN DE CONTAMINANTES, 1992**

Las concentraciones están en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ppm)<sup>a</sup>

Contaminante	Jurisdicción		
	EPA de EUA <sup>b</sup>		Ontario, Canadá <sup>c</sup>
	Primario	Secundario	Máximo deseable
MPTS (materia particulada total en suspensión)	NE	NE	60—MGA 120—24 h
PM <sub>10</sub>	50—MAA 150—24 h	50—MAA 150—24 h	NE
Dióxido de azufre	80(0.03)—MAA 365(0.14)—24 h	1300(0.50)—3 h	54(0.02)—MAA 260(0.10)—24 h 650(0.25)—1 h
CO	10,000(9)—8 h <sup>d</sup> 40,000(35)—1 h <sup>d</sup>	NE	14,450(13)—8 h 34,285(30)—1 h
Óxidos de nitrógeno (como NO <sub>2</sub> )	100(0.053)—MAA	NE	125(0.10)—24 h 250(0.20)—1 h
Oxidantes (como O <sub>3</sub> )	235(0.12)—1 h/día <sup>d, e</sup>	NE	157(0.08)—1 h
Plomo	1.5—máx trimestral/año <sup>f, g</sup>	NE	2.0—MG de 30 días <sup>g</sup> 5.0—24 h <sup>g</sup>
Fluoruros			40 a 100 cm <sup>2</sup> /30 días <sup>h</sup> temporada de crecimiento; 80 a 100 cm <sup>2</sup> /30 días temporada sin crecimiento

<sup>a</sup>MAA, media aritmética anual; MGA, media geométrica anual; NE, no hay estándar; PM<sub>10</sub>, materia particulada con diámetro aerodinámico  $\leq 10 \mu\text{m}$ , esto es, partículas respirables.

<sup>b</sup>Los estándares primarios definen los niveles de calidad del aire que protegen la salud pública. Los estándares secundarios protegen el bienestar público. En Estados Unidos, y en casi todos los demás países, los estándares de emisiones se hacen respetar por ley para alcanzar los estándares de calidad del aire. En Ontario, se hacen respetar los propios estándares de calidad del aire, no las emisiones.

<sup>c</sup>Especificados como criterios ("una concentración máxima deseable en el aire ambiental").

<sup>d</sup>No deberá excederse más de una vez al año.

<sup>e</sup>Promedio diario máximo de 1 hora.

<sup>f</sup>Promedio trimestral máximo en el año.

<sup>g</sup>Medido en MPTS.

<sup>h</sup>Medidos con papel filtro impregnado de cal expuesto al aire ambiental durante 30 días.

Cuando la calidad del aire que se observa es más mala que los estándares de calidad del aire adoptados, se llevan a cabo programas vigorosos de control para la contaminación del aire para reducir las emisiones de contaminantes. Los programas de control pueden incluir reglas para controlar la calidad de los combustibles, obligatoriedad de normas de control de emisiones, pavimentación de caminos para reducir el arrastre de polvo hacia la atmósfera, y muchas técnicas más.

### 13.3 FUENTES DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE

#### 13.3.1 Identificación de contaminantes del aire

Por definición, los contaminantes tienen un efecto observable o detectable. Sin embargo, no siempre es fácil identificar los efectos y en muchos casos los efectos observados no se pueden correlacionar de manera directa con contaminantes específicos. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos no se identificaron como contaminantes primarios principales hasta que se comprendió que eran los precursores del ozono y el NPA del smog fotoquímico.

En las últimas dos décadas los métodos de identificación de fuentes de contaminación del aire han cambiado, de sencillas técnicas sensoriales con base en aspecto, olor y sabor, a técnicas objetivas que permiten cuantificar o medir la calidad del aire. En la actualidad, con pocas excepciones, si los contaminantes son detectables por los sentidos, o si se pueden observar efectos directos, se considera que las fuentes están contribuyendo a una "afrenta grave" a la atmósfera. La afrenta grave era más fácil de detectar cuando provenía de fuentes industriales, por lo común relacionada con la quema de combustibles fósiles en los primeros días del control de la contaminación del aire, porque los contaminantes se emitían desde una chimenea a un nivel alto donde era fácil verlos e identificarlos. A medida que las técnicas de identificación y medición mejoraron, se hizo evidente que las emisiones de fuentes industriales de contaminación del aire con frecuencia eran superadas por las emisiones de fuentes domésticas, comerciales, agrícolas y relacionadas con el transporte. Por ejemplo, son pocas las fuentes industriales fuertes de contaminación del aire en el corazón de Denver, Los Ángeles o Toronto, pero en general la calidad del aire se deteriora hacia el centro de la ciudad.

En las siguientes secciones se identifican unas pocas fuentes genéricas de contaminantes. Las tablas 13-4 y 13-5 presentan las emisiones totales nacionales de los contaminantes más importantes de una selección de grupos de fuentes en Estados Unidos y Canadá, respectivamente. Observe que la distribución de las emisiones de categorías de fuentes similares en los dos países es muy diferente. La diferencia en las emisiones totales es consecuencia de variedad en cuanto a actividades industriales, tamaño y distribución de la población, áreas boscosas, fuentes de energía y otros factores. Un estudio de las aportaciones relativas de cada una de las distintas fuentes a cada uno de los contaminantes principales es muy informativo. Los analistas de la contaminación del aire deben identificar todas las fuentes que existen en una región y elaborar una lista de contaminantes en orden de importancia para crear un programa de control de la contaminación del aire para la región o área en cuestión.

**TABLA 13-4 EMISIONES NACIONALES DE LOS CONTAMINANTES PRIMARIOS DEL AIRE, ESTADOS UNIDOS, 1991 (10<sup>6</sup> TONELADAS MÉTRICAS/AÑO, EXCEPTO PARA PLOMO, QUE ES 10<sup>3</sup> TONELADAS MÉTRICAS/AÑO)**

Clase de fuente	PM <sub>10</sub>	Materia particulada total	Óxidos de azufre <sup>a</sup>	Óxidos de nitrógeno <sup>b</sup>	COV	Monóxido de carbono	Plomo
Transporte	1.51	1.57	0.99	7.26	5.08	43.49	1.62
Quema de combustibles	1.10	1.94	16.55	10.59	0.67	4.68	0.45
Procesos industriales	1.84	2.55	3.16	0.60	7.86	4.69	2.21
Eliminación de residuos sólidos	0.26	0.34	0.02	0.10	0.69	2.06	0.69
Diversas	0.73	1.01	0.01	0.21	2.59	7.18	0
<b>TOTAL</b>	<b>5.45</b>	<b>7.41</b>	<b>20.73</b>	<b>18.76</b>	<b>16.89</b>	<b>62.10</b>	<b>4.97</b>
% de reducción desde 1982	3 <sup>c</sup>	3	2	8	13	31	90

<sup>a</sup>Expresados como SO<sub>2</sub>.<sup>b</sup>Expresados como NO<sub>2</sub>.<sup>c</sup>Las emisiones de PM<sub>10</sub> no se estimaron para Estados Unidos hasta 1985. Hubo una reducción de 3% en las emisiones de PM<sub>10</sub> de 1985 a 1991. Hubo un aumento de 1% de PM<sub>10</sub> si se comparan los estimados de emisiones de 1990 y 1991, pero ningún incremento en las emisiones de particulados totales durante este periodo.Fuente: *National Air Quality and Emissions Trend Report*, 1991; U.S. EPA Report 450-R-92-001, octubre de 1992.**TABLA 13-5 EMISIONES NACIONALES DE CONTAMINANTES PRIMARIOS, CANADÁ, 1985 (10<sup>6</sup> TONELADAS/AÑO)**

Clase de fuente	Materia particulada total	Dióxido de azufre	Óxidos de nitrógeno	COV	Monóxido de carbono
Transporte	0.11	0.09	1.25	0.87	7.16
Quema de combustibles	0.38	1.02	0.59	0.16	1.26
Procesos industriales	0.91	2.57	0.09	0.26	0.77
Eliminación de residuos sólidos	0.04	0.002	0.01	0.02	0.43
Diversas	0.27	N.D. <sup>a</sup>	0.02	0.49	1.15
<b>TOTAL</b>	<b>1.71</b>	<b>3.69</b>	<b>1.96</b>	<b>1.80</b>	<b>10.78</b>
% de reducción del total desde 1978 <sup>b</sup>	25.6	16.1	(8.9)		(10.0)

<sup>a</sup>N.D., no hay datos.<sup>b</sup>Los porcentajes entre paréntesis representan un aumento. Los COV no se informaban en 1978.Fuente: *Canadian Emissions Inventory of Common Air Contaminants*, 1985; Environment Canada Report EPS 5/AP/3, marzo de 1990.

en donde  $\rho$  para aire a 20°C y presión atmosférica es de 1.2 kg/m<sup>3</sup> y  $\mu$  para aire a 20°C y presión atmosférica es de  $1.81 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ . Por tanto

$$u_t = \frac{9.81 \times (70 \times 10^{-6})^2 \times (1600 - 1.2)}{18 \times 1.81 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.237 \text{ m/s}$$

y el tiempo de caída de la partícula es

$$t = \frac{10^4}{0.237} = 4.22 \times 10^4 \text{ s}$$

Durante esta caída, la partícula viaja en sentido horizontal

$$4.22 \times 10^4 \times 15 = 6.33 \times 10^5 \text{ m}$$

$$= 633 \text{ km}$$

Observe que para partículas que caen en un gas, la densidad del mismo se puede despreciar en la determinación de la velocidad de caída de Stokes. En la erupción real del monte de Santa Helena, la línea central de la columna estaba a una altura de unas 12 millas (19.3 km), y algunas de las partículas pequeñas de la columna, efectivamente, circundaron el planeta.

La radiactividad natural de fondo que se tiene de la atmósfera es consecuencia del bombardeo de las moléculas gaseosas de las capas superiores de la atmósfera por la radiación cósmica ionizante del Sol y de las emisiones del radón y el torón de la corteza terrestre. La radiación cósmica es más intensa al norte y al sur de los 50° de latitud debido a la desviación de las partículas solares por la acción del campo magnético de la Tierra. El escape de gases radiactivos es más lento a través de una cubierta de nieve o hielo. La radiación que procede de fuentes de superficie y de la atmósfera superior se distribuye en toda la atmósfera por efecto de la circulación global, pero la radiactividad atmosférica aumenta hacia arriba y cerca de las fuentes geológicas más poderosas. La tabla 13-6 indica la exposición relativa de una persona a la radiación cósmica y terrestre en una selección de localidades.

**TABLA 13-6 EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN (MILIREM/AÑO) EN VARIAS LOCALIDADES**

Fuente de radiación	Pensilvania	Texas	Colorado <sup>a</sup>
Cósmica	45	45	120
Terrestre			
Interna	55 <sup>b</sup>	30	105
Externa	25	25	25
Total	125 <sup>b</sup>	100	250 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Estos datos son para la exposición a unos 5,000 ft (1,525 m) de altitud.

<sup>b</sup>Estos valores varían en un factor de al menos 2 en una localidad específica.

Fuente: W. J. Moroz (combinado de varias fuentes).

El polvo y las partículas de arena que se arrastran durante los periodos de mucho viento pueden ser transportadas a grandes distancias y dan origen a concentraciones muy altas de

partículas durante periodos breves en localidades remotas. Los incendios forestales son fuentes fenomenales de partículas, CO y CO<sub>2</sub>, y los bosques vivos lo son de COV muy reactivos. Esta fuente es tan intensa que es detectable por el olfato y la vista, y las emisiones se producen sobre áreas muy amplias. Muchos piensan que estas emisiones son la causa de la bruma azulosa que se observa sobre regiones de bosques muy espesos.

### 13.3.3 Fuentes domésticas

En las áreas residenciales las actividades domésticas son la causa principal de la emisión de contaminantes. Las siguientes son unas cuantas actividades y tipos de contaminantes que se emiten:

Actividad	Contaminantes emitidos
Calentamiento de espacios	CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , hollín, humo (si se queman combustibles fósiles en la residencia)
Cocina	Grasas (como sólidos, líquidos y vapores), partículas, olores
Limpieza	Vapores de disolventes, polvo, pelusa, propelentes de latas de aerosol
Jardinería	Plaguicidas, fertilizantes (algunos pueden ser muy tóxicos)
Pintura	Principalmente vapores de disolventes
Lavado de ropa	Partículas de detergente y de jabón, pelusa

Antes de la revolución industrial, el fuego doméstico era la fuente de contaminación más importante en Londres, Inglaterra. El problema se amplificaba por el hecho de que las emisiones provenían de chimeneas bajas y los hogares son sistemas de combustión y calefacción notoriamente ineficientes. Los hornos domésticos modernos son mucho mejores, pero los contaminantes se siguen emitiendo desde chimeneas bajas. La quema de leña para calentamiento de espacios es una fuente particularmente intensa de PM<sub>10</sub>. En Klamath Falls, Oregon, en enero de 1988, se midió una concentración de PM<sub>10</sub> en 24 h de 792 µg/m<sup>3</sup>. Esta carga, extremadamente alta de partículas, se debió sobre todo a la emisión proveniente de estufas de leña y hogares residenciales durante una fuerte inversión nocturna. En 1991 se adoptó un programa obligatorio para dejar de quemar leña cuando se prevén periodos de concentraciones poco saludables de PM<sub>10</sub>.

Se pueden mejorar las emisiones domésticas que origina el calentamiento de espacios utilizando sistemas de calefacción distrital y calefacción eléctrica que transfieren las emisiones a un lugar diferente, donde se pueden instalar chimeneas altas y sistemas de control de emisiones. El ejemplo 13.3 indica la importancia de las emisiones derivadas de actividades de limpieza y pintura, muchas de las cuales se llevan a cabo en el hogar.

Otra fuente de contaminación del aire, derivada de actividades domésticas y comerciales, se asocia con la eliminación de residuos sólidos. En el pasado, la quema de hojas, los incineradores de patio y los tiraderos al aire libre eran fuentes comunes de emisiones de partículas y de gases. En la actualidad estas actividades o fuentes están prohibidas en la mayor parte de las comunidades, y los residuos sólidos se eliminan en operaciones de relleno sanitario o por combustión en incineradores municipales grandes y eficientes. En los rellenos sanitarios antiguos la descomposición de los desperdicios a lo largo de muchos años libera metano gaseoso (un hidrocarburo) en la atmósfera, y el ácido sulfídrico que liberan los materiales orgánicos y de

otro tipo en descomposición también suele ser detectable por el olfato en las cercanías de rellenos antiguos. Hoy en día, los gases que se generan en muchas operaciones de relleno sanitario se recogen para recuperar el metano, el cual se utiliza como combustible.

### 13.3.4 Fuentes comerciales

Las fuentes comerciales de contaminación del aire incluyen las industrias de servicios públicos. Como ejemplo, considere la limpieza en seco de la ropa; casi todo el disolvente que se utiliza en el proceso se evapora hacia la atmósfera. Las emisiones por lavado en seco van desde 15.9 kg de disolvente perdido por 100 kg de ropa lavada en máquinas lavadoras pequeñas no controladas hasta menos de 10 kg de disolvente perdido por 100 kg de ropa lavada en máquinas industriales grandes. El disolvente que se utiliza en casi todas las máquinas pequeñas de limpieza doméstica y comercial es el percloroetileno, un hidrocarburo clorado; en las máquinas industriales más grandes se utilizan hidrocarburos sencillos a causa de su menor costo. En la actualidad existen más de 20,000 centros de lavado en Estados Unidos. En Chicago se estimó que el uso de disolventes era la fuente de un tercio de los COV atmosféricos (Cadle *et al.*, 1993).

Otros establecimientos o actividades comerciales que liberan contaminantes en la atmósfera incluyen restaurantes, hoteles, escuelas, la imprenta y la aplicación de pintura. La preparación de alimentos origina la eliminación de 0.5 a 1 kg de residuos sólidos alimenticios. Se producen alrededor de 5 kg de residuos sólidos por cama de hospital diarios y 4 kg de residuos por grupo escolar. La cantidad de plástico de la cual es necesario deshacerse a causa de estas actividades continúa en aumento. Muchos de estos plásticos son hidrocarburos clorados que cuando se queman desprenden cloro, el cual se hidroliza rápidamente en la atmósfera a ácido clorhídrico, un contaminante muy corrosivo que también daña la vegetación sensible a concentraciones muy bajas y contribuye a la lluvia ácida.

#### Ejemplo 13.3

Suponga que el consumo urbano medio anual de pintura y recubrimientos a base de aceite (HC) es alrededor de  $\frac{1}{2}$  gal para todos los fines (consumo doméstico, comercial e industrial). Cada galón de pintura contiene 6 lb de medio hidrocarbonado para el pigmento. En EUA el consumo medio anual nacional de disolventes para lavado en seco (suponga que todos son hidrocarburos) es de aproximadamente 2 lb per cápita.

Estime el total de hidrocarburos que se descargan en una región urbana de 2.3 millones de habitantes (la población del área metropolitana de Toronto, Canadá) a causa de la evaporación de pintura y disolventes para lavado en seco, suponiendo que los promedios son representativos y se emiten localmente. Compare esta cifra con la cantidad de HC que descargan los automóviles controlados (ejemplo 13.1).

**Solución** La evaporación de HC de la pintura y los materiales de recubrimiento utilizados es de  $2.3 \times 10^6 \times 0.5 \times 6 = 6.9 \times 10^6$  lb/año =  $3.1 \times 10^5$  kg/año =  $8.6 \times 10^3$  kg/día = 8.6 toneladas/día. La evaporación de HC de los disolventes de limpieza utilizados es de  $2.3 \times 10^6 \times 2 = 4.6 \times 10^6$  lb/año = 5.7 toneladas/día. Del ejemplo 13.1, para una ciudad de 2.3 millones, la emisión de HC de los automóviles es de 57.6 toneladas/día.

Se desprenden cantidades sustanciales de HC de las pinturas y los disolventes, y actualmente se está poniendo un énfasis considerable en el uso de pinturas, técnicas de aplicación de pintura y disolventes de limpieza que reduzcan la cantidad de hidrocarburos que se emiten.

gobiernos de Canadá y Estados Unidos prohibir de inmediato el uso de DDT, dieldrín, toxafeno, mifex y hexaclorobenceno, y buscar la prohibición internacional de su producción, uso y eliminación inadecuada (IJC, 1994). En Europa también se ha expresado una fuerte preocupación acerca de los peligros ambientales que los plaguicidas representan, y se espera que se llegue a acuerdos internacionales para controlar en el planeta el impacto de los plaguicidas.

### 13.3.6 Fuentes industriales

Las fuentes industriales de contaminación del aire son las más notorias porque en general las emisiones se descargan por una sola chimenea o conducto. Cuando un contaminante industrial específico es la principal sustancia indeseable en una comunidad, su origen se puede hallar con base en el conocimiento de los procesos industriales que se utilizan. En los párrafos siguientes examinaremos algunas de las fuentes de contaminantes industriales que se presentan con más frecuencia en los problemas de contaminación del aire.

Cualquier operación de combustión a alta temperatura produce óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Entre las fuentes de proceso están las plantas de fabricación de fertilizantes y explosivos.

Los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) principalmente se emiten como  $\text{SO}_2$  en la combustión de combustóleo y carbón en fuentes estacionarias. El azufre del gas natural normalmente se elimina en el pozo para que el gas se pueda utilizar en aplicaciones domésticas. Se emite una cantidad muy pequeña de  $\text{SO}_x$  en la combustión de gasolina y combustibles *diesel*. Las fuentes de combustión también emiten pequeñas cantidades de  $\text{SO}_3$ . La refinación de minerales sulfurados genera cantidades muy grandes de  $\text{SO}_2$ . En Canadá, las fundidoras no ferrosas son una fuente predominante de  $\text{SO}_2$ . Las refinerías de petróleo también son fuentes importantes de  $\text{SO}_2$ . Los óxidos de azufre reaccionan con el agua atmosférica para formar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en cuestión de horas. El trióxido de azufre también se combina con óxidos de la atmósfera para formar aerosoles sulfúricos, los cuales pueden llegar a constituir del 5 al 20% de la materia particulada total en suspensión (MPTS). Estos compuestos se transportan a grandes distancias y son constituyentes importantes de la precipitación ácida.

Se emite sulfuro de hidrógeno en grandes cantidades en las fábricas de papel, las plantas de limpieza y procesamiento de gas natural, las refinerías de petróleo y ciertas plantas que fabrican fibras sintéticas (por ejemplo, rayón). El  $\text{H}_2\text{S}$  se oxida en cuestión de horas en la atmósfera para formar  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . La mayor parte de estas emisiones son controlables actualmente.

Se emite monóxido de carbono en concentraciones altas en la producción de hierro colado y en otros procesos metalúrgicos donde es deseable reducir al mínimo la presencia de oxígeno. Se libera a concentraciones muy bajas en las instalaciones estacionarias de quema de combustibles, pero las cantidades que se generan no dejan de ser sustanciales en virtud de la cantidad de combustible que se quema. Las emisiones industriales de CO son de menor cuantía que las emisiones de los automóviles tanto en Canadá como en Estados Unidos.

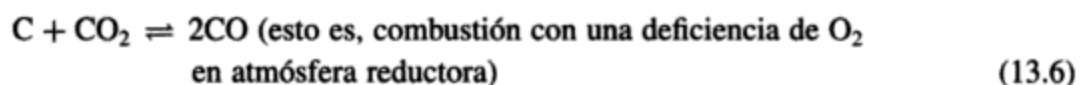
Se desprenden grandes cantidades de compuestos orgánicos volátiles de una multitud de procesos industriales que por lo general tienen relación con las industrias del petróleo y del gas natural, o con industrias que utilizan sus productos. Estos compuestos pueden hallarse en forma de vapor, líquido o partículas, como en el caso de las operaciones de pavimentación con asfalto. Las emisiones de COV que provienen de las industrias de las pinturas, las que fabrican el material para los techos y las de limpieza han sido debidamente anotadas. Las emisiones de COV en las plantas que fabrican plásticos, la mayor parte de los cuales utiliza derivados de petróleo

Los molinos de alimentos, granos y cereales generan grandes cantidades de partículas durante el secado, descascarado y desgrane, tamizado, molienda y procesamiento de los granos. Más del 50% de las partículas de estas fuentes son mayores de 250  $\mu\text{m}$  y se recolectan sin dificultad. Las partículas presentes en la atmósfera de los molinos representan un serio peligro de explosión, por lo que en general se mantienen buenas condiciones de orden y limpieza. El aire interno de los edificios se controla expulsando las partículas no recolectadas hacia la atmósfera.

Las operaciones de labrado de madera como el corte, el pulido y el limado desprenden partículas grandes, las cuales, aunque estéticamente indeseables, son de tamaño mayor al respirable y se recolectan sin dificultad y con gran eficiencia.

Como ejemplo específico de la industria de metales no ferrosos, considere el beneficio (fundición) primario del plomo. Por lo general, el plomo (Pb) se encuentra en forma de sulfuro en el mineral, el cual contiene pequeñas cantidades de cobre, hierro, zinc y trazas de otros elementos. El material normalmente se concentra en la mina, de mineral de 3 a 8% de Pb a concentrado de mineral que contiene de 55 a 70% de Pb y de 13 a 19% de azufre libre no combinado (S) en peso. El procesamiento comprende tres etapas principales a partir del concentrado:

1. En la etapa de sinterización, el Pb y el S concentrados se oxidan para producir PbO como sinterizado y  $\text{SO}_2$  gaseoso en una operación autógena que se verifica a unos 1,000°C. Las máquinas de sinterización pueden ser de tiro ascendente o descendente; se prefiere el tiro ascendente porque se obtiene un sinterizado más limpio y duro, y porque la corriente de  $\text{SO}_2$  gaseoso se puede mantener a concentraciones mayores para la ulterior desulfuración del gas de combustión. Se crean además partículas susceptibles de emitirse.
2. En la etapa de reducción el PbO se reduce (se quita oxígeno) para formar Pb fundido (plomo de obra) en un alto horno. Las reacciones químicas son las siguientes:



Los contaminantes gaseosos que se generan son por tanto  $\text{CO}_2$ , CO y  $\text{SO}_2$ . En esta etapa también se crean partículas pequeñas. El plomo de obra se procesa adicionalmente enfriándolo entre 370 y 340°C y tratándolo para eliminar impurezas en un horno de reverbero.

3. La refinación se lleva a cabo en marmitas de hierro colado a una temperatura elevada para separar antimonio, estaño, arsénico, metales preciosos, zinc, bismuto y trazas de otros metales. El producto final consiste en lingotes de Pb de 99.99 a 99.999% de pureza.

En la tabla 13-9 se muestran los factores de emisión y la distribución de tamaño de partícula representativos de una máquina sinterizadora de tiro ascendente para operaciones de procesamiento de plomo sin controles.



**TABLA 13-9 FACTORES DE EMISIÓN Y DISTRIBUCIONES DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS QUE SON REPRESENTATIVOS PARA LAS OPERACIONES DE PROCESAMIENTO DE PLOMO SIN CONTROLES**

Proceso	Factores de Emisión lb/ton (kg/tonelada métrica)	
	Partículas	Dióxido de azufre <sup>a</sup>
Trituración del mineral	2 (1)	—
Sinterización <sup>b</sup>	213 (106.5)	550 (275)
Alto horno	361 (180.5)	45 (22.5)
Horno de reverbero para impurezas	20 (10)	—
Manejo de materiales	5 (2.5)	—

<sup>a</sup>Sólo alrededor de la mitad del azufre del concentrado se emite como SO<sub>2</sub>; el resto se queda en la escoria.

<sup>b</sup>La distribución del tamaño de partícula de las máquinas sinterizadora de tiro ascendente es:

Tamaño (μm)	Porcentaje en peso
20-40	15-45
10-20	9-30
5-10	4-19
5	1-10

Fuente: Part B, AP42, U.S. EPA Compilation of Emission Factors, 4a. ed., septiembre de 1990.

La mayor parte de las partículas que salen del alto horno tienen dimensiones inferiores a una micra (92% < 4 μm). Estas partículas se aglomeran con facilidad, y los aglomerados son cohesivos pero difíciles de humectar; forman puentes y arcos en las tolvas y su manejo no es fácil. Se genera un poco de NO<sub>x</sub> en todos los procesos a temperaturas altas.

El beneficio del plomo es de hecho un proceso químico. Más aún, si mantuviéramos un balance de materiales sobre todos los elementos traza del mineral original, identificaríamos una multitud de otras emisiones químicas que son demasiado variadas para analizarlas aquí.

#### Ejemplo 13.4

Una máquina sinterizadora de plomo que procesa 100 ton/día de sinterizado con un contenido de 6% de S elimina el 80% del S del mineral como SO<sub>2</sub> (figura 13-4). Los gases que escapan de la máquina se procesan en una planta de absorción para ácido sulfúrico de una sola etapa, donde el 96% del SO<sub>2</sub> se transforma en ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El remanente de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> como bruma de ácido sulfúrico es de alrededor del 2%. Un precipitador electrostático (PES) en seguida de la planta de ácido elimina el 99.5% de la bruma. La planta de ácido (que actúa como lavador) y el PES en combinación eliminan el 99.9% de las partículas sólidas que se emiten desde la máquina sinterizadora. Calcule la masa de SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y partículas sólidas que se emiten a la atmósfera al día. Los pesos moleculares son los siguientes: S = 32, SO<sub>2</sub> = 64, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 98.

**Solución** La tasa diaria de oxidación de S a SO<sub>2</sub> es de  $0.06 \times 100 \times 2,000 \times 0.8 = 9,600$  lb/día. La tasa de producción de SO<sub>2</sub> en la planta de sinterización es de  $9,600 \times (64/32) = 19,200$  lb/día, y la tasa de producción de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es de  $0.96 \times 19,200 \times (98/64) = 28,224$  lb/día. La tasa de

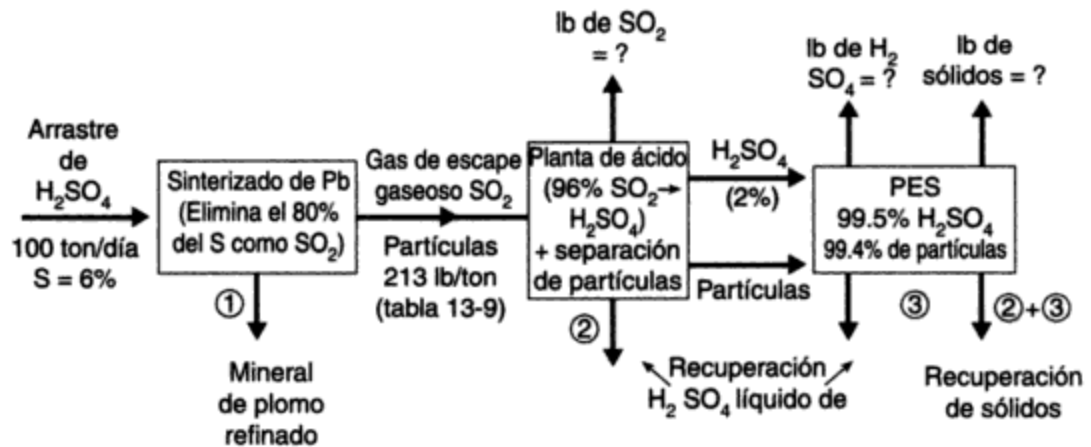


Figura 13-4

emisión de SO<sub>2</sub> por día es de  $0.04 \times 19,200 = 768$  lb/día, y el remanente de bruma de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que alcanza el PES es de  $0.02 \times 28,224 = 565$  lb/día. La tasa de descarga de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a la atmósfera es de  $0.005 \times 565 = 2.82$  lb/día  $\approx 3$  lb/día.

De la tabla 13-8, la emisión de partículas representativa de las máquinas sinterizadoras es de 213 lb por tonelada (EUA) de mineral procesado, de modo que la masa total de las partículas que entran en la planta de ácido es de  $213 \times 100 = 21,300$  lb/día, y la masa de partículas emitidas a la atmósfera es de  $0.001 \times 21,300 = 21.3$  lb/día  $\approx 21$  lb/día.

La combinación de la planta sinterizadora, la planta de ácido sulfúrico y el dispositivo de eliminación de partículas emite a la atmósfera 768 lb/día de SO<sub>2</sub> y 24 lb/día de partículas compuestas de 3 lb de bruma de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 21 lb de sólidos; además, recupera 28,220 lb/día de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y debe deshacerse de 21,280 lb/día de ceniza.

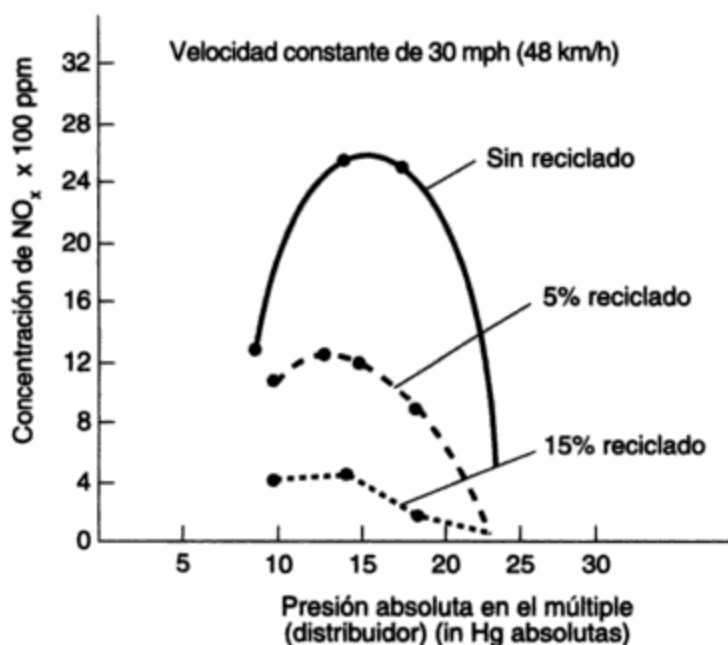
### 13.3.7 Fuentes relacionadas con el transporte

Si se consideran todas las categorías principales de fuentes antropogénicas combinadas, a excepción de la agricultura, el sector del transporte de nuestra economía genera alrededor de un tercio de las emisiones totales de COV, óxidos de nitrógeno y plomo, y más de dos tercios del monóxido de carbono. El CO y los COV (casi todos como hidrocarburos) son productos de una combustión ineficiente, los cuales se eliminarían quemando el combustible hasta CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en el motor del vehículo para producir potencia, si es posible.

La mayor parte de las emisiones de COV proceden del tubo de escape. Éstas se controlan empleando reactores catalíticos e inyectando aire en los puertos de escape del motor para quemar los hidrocarburos que se emiten en esta zona de alta temperatura. Ninguno de estos procesos recupera energía útil, por lo cual los esfuerzos para modificar el diseño de los motores han sido intensivos, en particular desde 1973, cuando los precios del petróleo subieron de manera espectacular. Sin embargo, más del 20% de las emisiones de COV no controladas de los motores de automóvil provienen del respiradero del cárter (escape de gases de los cilindros y aceite lubricante evaporado) y del desfogue del carburador a la atmósfera. Estas emisiones se controlan utilizando un tubo de desfogue del cárter conectado al conducto de toma de aire del motor (que requiere una válvula de control de contaminación) y una unidad de absorción llamada "cánister de carbón" para las pérdidas por evaporación. A partir de 1985 los sistemas de inyección de com-

bustible comenzaron a tomar el lugar de los carburadores; estos sistemas proporcionan una dosificación más precisa de combustible para los cilindros y una reducción significativa en la emisión de contaminantes. En 1989 se legislaron los límites de volatilidad de los combustibles, con lo cual se redujeron más aún las pérdidas por evaporación. En la actualidad se alienta el uso de combustibles oxigenados para reducir las emisiones de COV en el tubo de escape.

Los investigadores han encontrado que es necesario reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno para aminorar las emisiones de precursores de esmog fotoquímico y lluvia ácida (Pitts *et al.*, 1983). La producción de óxidos de nitrógeno aumenta con gran rapidez con la temperatura de combustión, de modo que se cambió el diseño de los motores para bajar la temperatura de los cilindros, principalmente reduciendo la relación de compresión del motor, modificando la sincronización del encendido (chispa), introduciendo la recirculación de gases de escape y utilizando una combustión en dos etapas. La figura 13-5 muestra el efecto de la recirculación de gases de escape en la producción de óxidos de nitrógeno para un motor de encendido por chispa.



**Figura 13-5** Reducción de los óxidos de nitrógeno en los gases de escape de los automóviles como resultado de la recirculación de gases de escape. Fuente: J. D. Benson. "Reductions of Nitrogen Oxides in Automobile Exhaust", S.A.E. International Automobile Engineering Congress, Detroit, Mich., enero 13-17, 1969.

Se generó inquietud por razones de salud en cuanto a que las emisiones de plomo se estaban aproximando a los límites de aceptabilidad en la atmósfera. El uso de gasolina libre de plomo era de hecho obligado, porque el plomo (alrededor de 3g/gal o 0.8 g/L en la gasolina con plomo de alto índice de octano) "envenena" el catalizador de los reactores y reduce en grado significativo su eficacia. La tabla 13-10 muestra que las emisiones de un motor dependen en gran medida de la manera como se hace trabajar al motor, es decir, del modo de conducir.

Un examen sobre los datos de la tabla 13-10 muestra con claridad que el control de la concentración de cada contaminante en el escape del motor del automóvil no nos cuenta la historia completa. Los distintos motores tienen diferentes desplazamientos, y el flujo de gasolina por el motor varía con las rpm (revoluciones por minuto) del motor y la apertura del estrangulador. La consideración de estos factores dio origen a un cambio en el método de regular las emisiones de los automóviles para restringir la masa emitida de contaminantes por vehículo-milla de recorrido a partir de 1970. Más adelante se reconoció que era necesario especificar el

**TABLA 13-10 CONCENTRACIÓN TÍPICA DE CO, NO<sub>x</sub> E HIDROCARBUROS EN EL ESCAPE DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS DE 300 PCD CON ENCENDIDO DE CHISPA Y SIN CONTROLES (EQUIPADO CON CARBURADOR)**

Modo (de operación)	Relación aire/combustible <sup>a</sup>	Emisiones en el escape			
		Flujo de gas (ft <sup>3</sup> /min)	NO <sub>x</sub> (ppm) <sup>b</sup>	HC (ppm) <sup>b</sup>	CO (ppm) <sup>b</sup>
Marcha mínima	12	6.5-7.0	30	350	17,000
Crucero					
Ciudad	13.5-14	40	1,000	200-400	6,000
Carretera	13.5-14	35	1,000		5,000
Aceleración					
Estrangulación parcial	13.3	45	1,700-2,500	350-400	7,000
Máxima	12.7	100-125	700-1,200		
Desaceleración					
Libre	12	6.8	60	1,200	
Con freno	12	6.8	60	1,200	18,000

<sup>a</sup>En términos de masa.

<sup>b</sup>En términos de volumen.

**TABLA 13-11 ESTÁNDARES FEDERALES DE EUA PARA EMISIONES EN EL ESCAPE EN VEHÍCULOS DE SERVICIO LIGERO (AUTOMÓVILES Y CAMIONES LIGEROS<sup>a</sup>) IMPULSADOS POR GASOLINA EN 1991 [g/mi(g/km)]**

NO <sub>x</sub>	HC <sup>b</sup>	CO
1.0 (0.62)	0.41 (0.25)	3.4 (2.1)

<sup>a</sup>Un camión de servicio ligero se define como cualquier vehículo de motor con un peso bruto vehicular de 8,500 lb (3,860 kg) o menos, con un peso vehicular restringido de 6,000 lb (2,720 kg) o menos y un área frontal básica de 45 ft<sup>2</sup> (4 m<sup>2</sup>) o menos. (Existen otras condiciones relativas al uso que no se presentan aquí.)

<sup>b</sup>Los estándares de California son ligeramente distintos a los federales porque el smog fotoquímico está por todas partes en ese estado. Los estándares federales de emisiones de HC se especifican como "sustancias orgánicas no metánicas" y los estándares de California se escriben como "hidrocarburos no metánicos". La diferencia tiene que ver con la composición química de la gasolina que se utiliza durante las pruebas, de certificación de emisiones (los "vehículos de baja emisión" de California se certifican con combustibles oxigenados).

Fuente: U.S. EPA *Compilation of Emission Factors*, JMR-C: DOCS/5-18 STD (revisado el 18/5/93).

ciclo de conducción del vehículo en la legislación para el control de emisiones. En la actualidad, la legislación limita las emisiones con base en los gramos por vehículo-milla en Canadá y en Estados Unidos, empleando un ciclo de conducción específico que incluye cada uno de los modos de conducción en una proporción representativa de un recorrido normal hacia y desde el lugar de trabajo en un entorno urbano (tabla 13-11).

Entre 1970 y 1990 las distancias recorridas en Estados Unidos aumentaron más del 60%. Durante el mismo periodo las emisiones de monóxido de carbono y de COV de fuentes

contaminantes y el tipo y la magnitud relativa de la descarga de contaminantes en cada punto. En la tabla 13-12 se muestran datos comparativos de emisiones para motores *diesel* y gasolina, de servicio pesado y bien afinados.

**TABLA 13-12 EMISIONES COMPARATIVAS<sup>a</sup> DE MOTORES DE SERVICIO PESADO (CAMIONES) g/mi(g/km) CON GASOLINA Y CON DIESEL**

	Impulsados por gasolina	Diesel
CO	97.1 (60.6)	8.8 (5.5)
HC	10.5 (6.5)	3.3 (2.1)
NO <sub>x</sub> <sup>b</sup>	4.8 (3.0)	13.9 (8.6)

<sup>a</sup>Para los modelos del año 1984, suponiendo la operación del vehículo caliente a un promedio de 19.6 mi/h (31.4 km/h) en tráfico urbano y con un motor nuevo.

<sup>b</sup>Como NO<sub>2</sub>.

Fuente: Part B, AP42 U.S. EPA Compilation of Emission vol. 12, 4a. ed., mayo de 1985.

Los motores pequeños de botes y herramientas de jardinería también pueden contribuir de manera sustancial al problema general de la contaminación del aire. La tabla 13-13 muestra los factores de emisión para motores comparables de dos y de cuatro tiempos (por lo general, para los motores de dos tiempos se mezcla aceite con gasolina). El nivel mucho mayor de emisión de hidrocarburos de los motores de dos tiempos en comparación con los de cuatro tiempos es evidente.

**TABLA 13-13 EMISIONES<sup>a</sup> DE MOTORES PEQUEÑOS DE SERVICIO (PODADORA) CON GASOLINA DE DOS Y CUATRO TIEMPOS g/hp-h**

	HC			CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
	Desfogue de escape	Cárter	Evaporación y recarga de combustible			
Ciclo de dos tiempos	437	ND	22.5	1384	0.9	0.5
Ciclo de cuatro tiempos	79.2	12.4	9.8	817	0.8	0.4

<sup>a</sup>Las emisiones de motores nuevos en banco de pruebas se ajustaron para tomar en cuenta factores de uso como desgaste, mantenimiento y condiciones de mal funcionamiento.

Fuente: *Nonroad Engine and Vehicle Emission Study—Report*, U.S. EPA Report 21A-2001, noviembre de 1991.

## 13.4 CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

### 13.4.1 Limpieza natural de la atmósfera

En la sección 6.2 identificamos ciertos tamaños de partícula y mecanismos de eliminación representativos. Las características físicas de las partículas influyen en los mecanismos de elimi-

Por ejemplo, las emisiones de plomo de los automóviles se eliminan quemando combustibles sin plomo, y las emisiones de óxidos de nitrógeno por kilómetro recorrido se han reducido de manera significativa modificando el diseño de los motores. No sabemos cómo eliminar totalmente las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores de combustión interna, pero esto se podría conseguir si cambiamos nuestros medios de transporte. Una posible alternativa es desplazar la ubicación de las emisiones de óxidos de nitrógeno; por ejemplo, del tubo de escape del automóvil a la chimenea de una planta generadora de electricidad, utilizando vehículos impulsados por electricidad o hidrógeno. La legislación sobre la cantidad de cenizas y azufre en los combustibles es un buen medio para reducir las emisiones de estos materiales o de sus productos finales.

Otras soluciones consisten en reducir las emisiones utilizando dispositivos complementarios. En el caso del automóvil, se utiliza un "cánister" (bote) de carbón para adsorber los vapores de hidrocarburos que se emiten desde el carburador y el tanque de gasolina. Los vapores se devuelven después al motor para quemarlos. El uso de un sistema de inyección de combustible es un medio mejor para reducir las emisiones del carburador porque no requiere desfogue a la atmósfera y ofrece el potencial de una eficiencia de combustible ligeramente mejor. En el sistema de escape del automóvil, los convertidores catalíticos y la inyección de aire reducen las emisiones de hidrocarburos por medios químicos. La energía de estos hidrocarburos se pierde. En las aplicaciones industriales se pueden utilizar lavadores (absorbedores) para eliminar contaminantes de corrientes de gases y quizá para inducirlos a reaccionar químicamente para formar sustancias más estables susceptibles de recolección, almacenamiento y nuevo uso.

Se utiliza la dispersión planificada para controlar la calidad del aire cuando las emisiones no son controlables por medio de otras técnicas. Las emisiones desde chimeneas altas tienen más tiempo para dispersarse en la atmósfera antes de alcanzar el suelo, donde afectan a los humanos, los materiales y la vegetación. Por ejemplo, la calefacción eléctrica desplaza las emisiones de las chimeneas cortas de las casas situadas en áreas residenciales a chimeneas altas de localidades remotas.

En la siguiente sección nos ocuparemos de los dispositivos complementarios que se utilizan de forma rutinaria para el control de la contaminación del aire y después, como una alternativa menos deseable, nos encargaremos de los procesos de dispersión atmosférica.

### 13.4.3 Control de la emisión de partículas

Quienes se ocupan del diseño de equipos para controlar la emisión de partículas deben estudiar las partículas que van desde el tamaño inferior a  $1 \mu\text{m}$  hasta las mayores de  $100 \mu\text{m}$  de diámetro. Las partículas más pequeñas son con mucho las más difíciles de recolectar. Los colectores se clasifican en términos amplios de acuerdo con los principios físicos del mecanismo de recolección.

**Cámaras de sedimentación por gravedad.** Las cámaras de sedimentación por gravedad son colectores sencillos y económicos en los cuales las fuerzas gravitatorias dominan el movimiento vertical de las partículas. Estos colectores son en esencia simples expansiones en un conducto, en ellos la velocidad horizontal de las partículas se reduce para dar tiempo a que se sedimenten por gravedad. Las fuerzas que actúan en las partículas se muestran en la figura 13-7, donde  $F_D$  (la fuerza de resistencia al movimiento o viscosidad) =  $F_G$  (la fuerza de la gravedad), y se supone que la partícula cae a  $u_t$ , su velocidad terminal. El componente horizontal de la fuerza de viscosidad es despreciable porque la partícula se mueve a la velocidad de la corriente gaseosa.

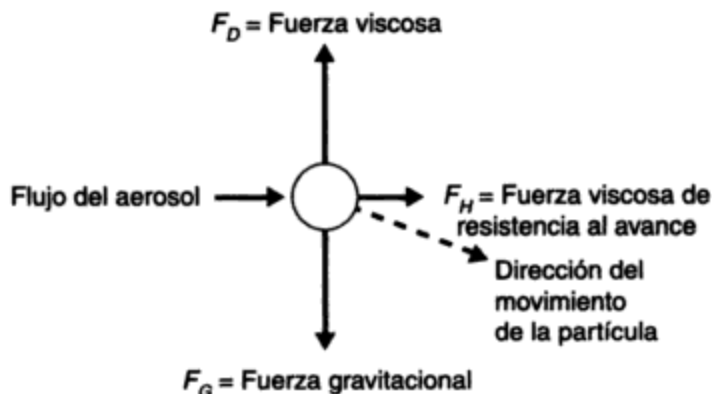


Figura 13-7 Fuerzas que actúan en una partícula cuando se mueve en una corriente de aire.

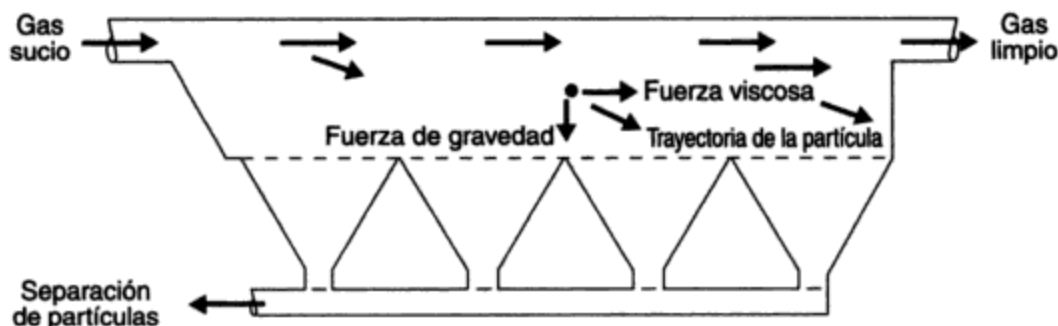


Figura 13-8 Cámara de sedimentación por gravedad.

La figura 13-8 es un bosquejo de una cámara de sedimentación por gravedad muy sencilla. Una expresión teórica de la eficiencia de este colector es

$$\eta_g = 1 - \exp\left\{-\frac{u_t L}{uH}\right\} \quad (13.13)$$

o

$$\eta_g = 1 - \exp\left\{-\frac{g d_p^2 \rho_p L}{18 \mu u H}\right\} \quad (13.14)$$

donde  $\exp(A)$  representa la exponencial  $e^A$  ( $e$  es la base de los logaritmos naturales) y donde

$\eta_g$  = eficiencia de separación, como fracción

$L$  = longitud del colector (m)

$H$  = profundidad del colector (m)

$u$  = velocidad horizontal del gas y las partículas en el colector (m/s)

y los otros símbolos según se definieron anteriormente (véase la sección 6.2.4).

### Ejemplo 13.5

Calcule el diámetro de corte del 50% para partículas de CaO suspendidas en una corriente de aire a 100°C, y que están a una presión atmosférica para una cámara de sedimentación por gravedad de

3 m de largo y 1 m de altura cuando la velocidad del gas en el colector es de 1 m/s. El diámetro de corte del 50% se define como el diámetro de partícula en el cual  $\eta_g = 50\%$  (es decir, se recolecta el 50% de las partículas de este diámetro y el 50% se pierde).

**Solución** Con base en la ecuación (13.14) obtenemos

$$\eta_g = 0.5 = 1 - \exp \left\{ -\frac{g d_p^2 \rho_p L}{18 \mu u H} \right\}$$

$\rho_p$  del CaO = 3310 kg/m<sup>3</sup>, y  $\mu$  del aire =  $2.17 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 2.17 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$  (a 100°C). Por tanto,

$$0.5 = \exp \left\{ -\frac{9.81 \times 3310 \times 3 \times d_p^2}{18 \times 2.17 \times 10^{-5}} \right\}$$

así que

$$\begin{aligned} d_p^2 &= \ln(0.5) \times \left\{ -\frac{18 \times 2.17 \times 10^{-5}}{9.81 \times 3310 \times 3} \right\} \\ &= (-0.693) \times (-40 \times 10^{-10}) = 28 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Por consiguiente, el diámetro de partícula de corte del  $d_p/50 = 5.3 \times 10^{-5} \text{ m} = 53 \text{ } \mu\text{m}$ .

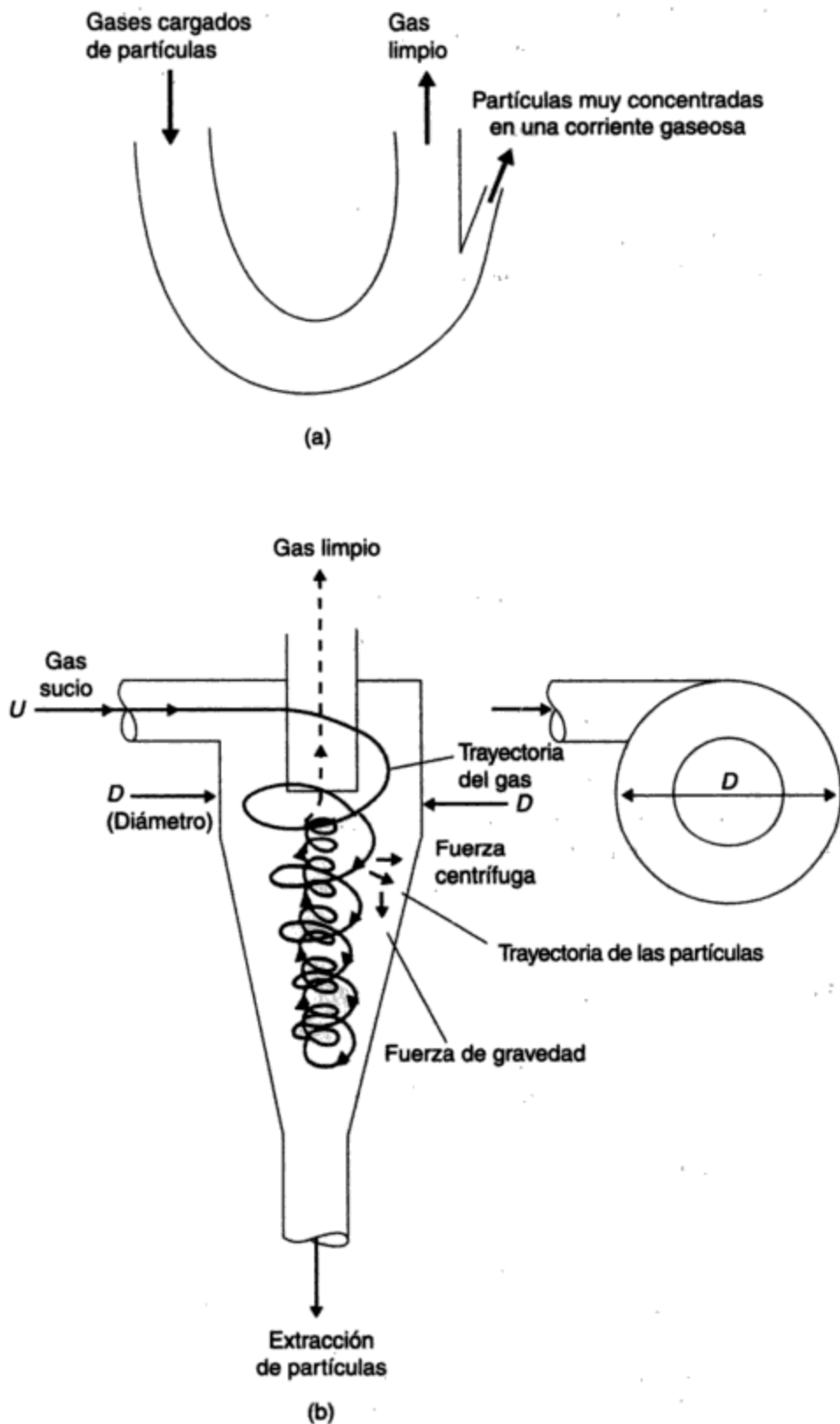
Observe, con base en este ejemplo, que el diámetro de corte no es definido, y en la práctica se recolectan partículas de tamaño menor y mayor que el  $d_p/50$ , pero la distribución de frecuencia de las partículas recolectadas se centra en  $d_p/50$ . Además, podemos encontrar que el rendimiento del colector varía en grado considerable respecto a las predicciones del diseño a causa de turbulencias y variaciones de flujo en el colector. Se hace la compensación de las desviaciones introduciendo coeficientes empíricos que dependen de las características físicas del equipo y de las partículas.

**Colectores inerciales.** En la figura 13-9a se bosqueja un recogedor de partículas muy sencillo, y la figura 13-9b es un dibujo de un separador de partículas común llamado ciclón. Ambos colectores se valen de fuerzas centrífugas para separar las partículas más pesadas de aquellas moléculas de gas que son más ligeras. El recogedor que se muestra en la figura 13-9a aumenta simplemente la concentración de partículas en una corriente gaseosa separada, la cual se podría hacer pasar por un colector gravitatorio (figura 13-8) o posiblemente por un ciclón como el de la figura 13-9b.

Como se muestra en la figura 13-9b, los gases cargados de partículas entran al ciclón en dirección tangencial respecto a la parte superior y, en teoría, descienden en espiral a lo largo de la carcasa en una rotación de cuerpo sólido a la velocidad de entrada  $u$ . Las partículas emigran hacia el exterior de la espiral, donde se deslizan hacia abajo por la carcasa hasta la tolva del fondo. La única salida del ciclón para los gases es en sentido vertical ascendente por el tubo central y, para salir, la espiral debe contraerse hasta un diámetro más pequeño. La reducción del radio de la trayectoria de las partículas da por resultado una fuerza centrífuga mayor conforme las partículas se mueven hacia la espiral interior. En la práctica, se encuentra que la velocidad del gas varía en proporción aproximada con  $r^n$ , donde  $n$  varía entre 0.5 y 0.7.

La magnitud de la fuerza centrífuga  $F_c$  es





**Figura 13-9** Colectores inerciales simples de partículas: (a) sencillo recogedor centrífugo de partículas; (b) colector de ciclón.

$$F_c = m_p \frac{u_T^2}{r} \quad (13.15)$$

o

$$F_c = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{u_T^2}{r} \quad (13.16)$$

donde  $u_T$  es la velocidad tangencial de la partícula y  $r$  es el radio de curvatura de la trayectoria de la partícula.

Un examen de la ecuación (13.16) nos indica que la eficiencia de separación de los colectores centrífugos aumenta:

- Directamente con el cubo del diámetro de la partícula (esto es, con gran rapidez con  $d_p$ )
- Directamente con la densidad de la partícula ( $\rho_p$ )
- Directamente con el cuadrado de la velocidad tangencial  $u_T$  de la partícula en el colector
- Inversamente con el radio  $r$  de la trayectoria de la partícula

Esta dependencia de la eficiencia de recolección del ciclón respecto al radio  $r$  ha dado origen a una terminología arbitraria del ramo, la cual identifica las unidades de diámetro grande como ciclones convencionales y las unidades cuyo diámetro  $D$  es menor de unos 15 cm como ciclones de alta eficiencia. Una eficiencia de recolección típica para un ciclón de 1 m de diámetro podría ser de 50% para partículas de 20- $\mu\text{m}$ ; un ciclón de alta eficiencia podría tener una eficiencia de recolección  $\eta_c = 80\%$  para  $d_p > 10 \mu\text{m}$ . La caída de presión típica a través de un ciclón convencional es de 5 a 15 cm de agua, y dentro de un ciclón de alta eficiencia es de 10 a 30 cm de agua.

Las cámaras de sedimentación por gravedad y los separadores inerciales simples no contienen partes móviles. Estos equipos se pueden fabricar con materiales capaces de soportar temperaturas altas y resistir el ataque corrosivo de las partículas o gases, y su eficacia es la misma para partículas sólidas o líquidas.

**Colectores húmedos.** Los colectores húmedos, o lavadores, tienen por objeto aumentar el tamaño de partícula por medio de agua o de gotitas de suspensión, porque es más fácil recolectar las partículas más grandes. Existen diferentes diseños de lavadores, pero aquí examinaremos sólo dos tipos: los lavadores convencionales y los Venturi.

La figura 13-10 es un bosquejo de un lavador que muestra varios modos de recolección de partículas. En la parte superior de la torre las gotas de agua que caen chocan con las partículas de los gases que fluyen hacia arriba y las recogen. En la sección empacada se agregan formas especiales para aumentar el área de contacto entre el líquido y el aerosol (gas más partículas). No obstante el uso de formas especiales, se tienen todavía problemas de obstrucción en esta sección. Abajo de la sección empacada se encuentra un disco perforado anegado que puede sostener varios centímetros de agua y permite el contacto entre las burbujas que contienen las partículas y el líquido. El líquido drena por las perforaciones para crear en el colector otra sección de gotas que caen.

No todas las colisiones de una gotita de agua y una partícula dan como resultado la recolección de ésta, a causa de la tensión superficial de las gotitas y de las características de

95% cuando  $d_p > 5 \mu\text{m}$ . La caída de presión a través de los lavadores Venturi varía entre 50 y 200 cm de agua aproximadamente. Con altas caídas de presión, los lavadores Venturi son capaces de recolectar partículas muy pequeñas de hasta  $1 \mu\text{m}$  con eficiencias que se acercan al 99%, aunque es muy difícil mantener este rendimiento de manera continua.

Los lavadores recolectan partículas sólidas o líquidas, se pueden proyectar para resistir la corrosión, y son capaces de trabajar a temperaturas relativamente elevadas en tanto el líquido que se utiliza no hierva y sea posible impedir pérdidas excesivas por evaporación. Por estas razones, suelen utilizarse lavadores Venturi para recolectar las partículas pequeñas que se generan en las operaciones de fabricación o fundición de acero. Los costos de operación son relativamente altos para los lavadores de gran pérdida de presión, pero el costo de capital es bajo en comparación con otros colectores de rendimiento equivalente.

**Colectores de tela y de esterilla fibrosa.** Los colectores de tela o de cámara de sacos son similares a una aspiradora en gran escala. Estos equipos se utilizan para extraer partículas secas de corrientes gaseosas secas y a baja temperatura (de 0 a  $275^\circ\text{C}$ ). Se suspenden medias de tela de 15 a 30 cm de diámetro y de hasta 10 m de largo en una cámara, y el aire que se fuerza a pasar por la media se descarga a través de la tela. La tela puede ser tejida o hecha de fieltro, pero la tela tejida es con mucho la más común. La tela se hace de materiales como algodón, fibras sintéticas y fibra de vidrio, cada uno de los cuales se adapta en distinto grado a la temperatura del gas y las partículas, y a sus características físicas y químicas, como se indica en la tabla 13-14. En la figura 13-12 se muestra un esquema de una cámara de sacos de tipo industrial. El uso de celdas múltiples permite dar mantenimiento a la cámara de sacos que están en bloques individuales de celdas, mientras la unidad se encuentra en operación.



Copyrighted image

**Figura 13-12** Típica cámara de sacos (sencilla) con sacudimiento mecánico. (Cortesía de Wheelabrator Canada Inc.)

La tela de la que están hechos los sacos o medias puede tener "agujeros" (observe a través de un trozo de tela hacia una fuente de luz para verlos) de más de 100  $\mu\text{m}$  de ancho; sin embargo, si se maneja correctamente, el colector trabaja con una eficiencia superior al 99% para partículas con  $d_p > 1 \mu\text{m}$ . Las partículas pequeñas se recolectan empleando la torta de filtro de la superficie de la tela como medio filtrante. A medida que el espesor de la torta de filtro aumenta, también lo hacen la pérdida de presión a través de la cámara de sacos y, por consiguiente, los costos de energía. Si la torta de filtro porosa se hace demasiado gruesa, la presión del lado corriente arriba de la torta puede comprimir la misma para formar una masa más compacta, con lo cual aumentará considerablemente la pérdida de presión a través de la torta. Si los poros del filtro se llenan de líquido, sucede algo similar; por esta razón, las cámaras de sacos se limitan a la recolección de partículas secas, y se deben tomar precauciones especiales para impedir una condensación excesiva de la corriente gaseosa.

La torta de filtro se extrae de los colectores pequeños simplemente sacudiendo el saco para desprender la torta. Los colectores industriales grandes se limpian con más cuidado haciendo pasar un chorro anular de aire a lo largo del saco o invirtiendo momentáneamente el flujo a través del mismo. Se produce cierto arrastre de partículas en la corriente gaseosa durante el proceso de limpieza, pero la mayor parte de las partículas arrastradas se recolectan de nuevo y se eliminan en el próximo ciclo de limpieza. Para evitar la necesidad de sacudir con frecuencia los sacos, sin dejar de mantener un espesor de torta de filtro razonable para recolectar las partículas con eficiencia sin una pérdida de presión excesiva, el gasto volumétrico a través de la tela se restringe usualmente entre 0.5 y 2  $\text{m}^3/\text{min}$  por  $\text{m}^2$  de superficie de tela, aunque se utilizan gastos tan altos como 5  $\text{m}^3/\text{min}$  para ciertas telas y ciclos de limpieza. Las típicas caídas de presión a través de una cámara de sacos varían entre 5 y 40 cm (los valores medios para una industrial son de 8 a 15) de agua para periodos de sacudimiento desde cuatro o cinco veces por hora hasta una vez cada cierto número de horas. La durabilidad típica de un saco es de dos a tres años.

Los colectores de esterilla de fibras trabajan con caídas de presión muy pequeñas y suelen ser desechables, aunque muchas se pueden lavar y reutilizar varias veces. Los filtros de esterilla de fibras se emplean extensamente en los sistemas domésticos de acondicionamiento de aire y calefacción con aire caliente, y para filtrar el aire que entra en los motores de combustión interna.

**Precipitadores electrostáticos.** La figura 13-13 muestra un modelo de un precipitador electrostático (PES). La diferencia de voltaje (intensidad de campo) entre el electrodo y las placas colectoras se mantiene a un nivel tan alto como es posible, aunque abajo de la intensidad de campo a la cual se produce el salto de la chispa. Se desprenden electrones en el electrodo en una descarga en corona, los cuales se adhieren a las partículas y las dotan de carga. Las partículas o moléculas con carga (iones) de la misma polaridad que el electrodo emigran hacia las superficies conectadas a tierra en virtud de fuerzas electrostáticas. Se pueden utilizar electrodos con carga positiva o negativa. La corona negativa genera una cantidad un poco mayor de  $\text{O}_2$  y es algo más eficaz para operaciones industriales.

Los iones que migran chocan con las partículas líquidas o sólidas de la corriente gaseosa y les confieren una carga que origina el movimiento de las partículas hacia las placas colectoras. La fuerza que actúa sobre la partícula es

$$F_E = q_p E_c \quad (13.17)$$

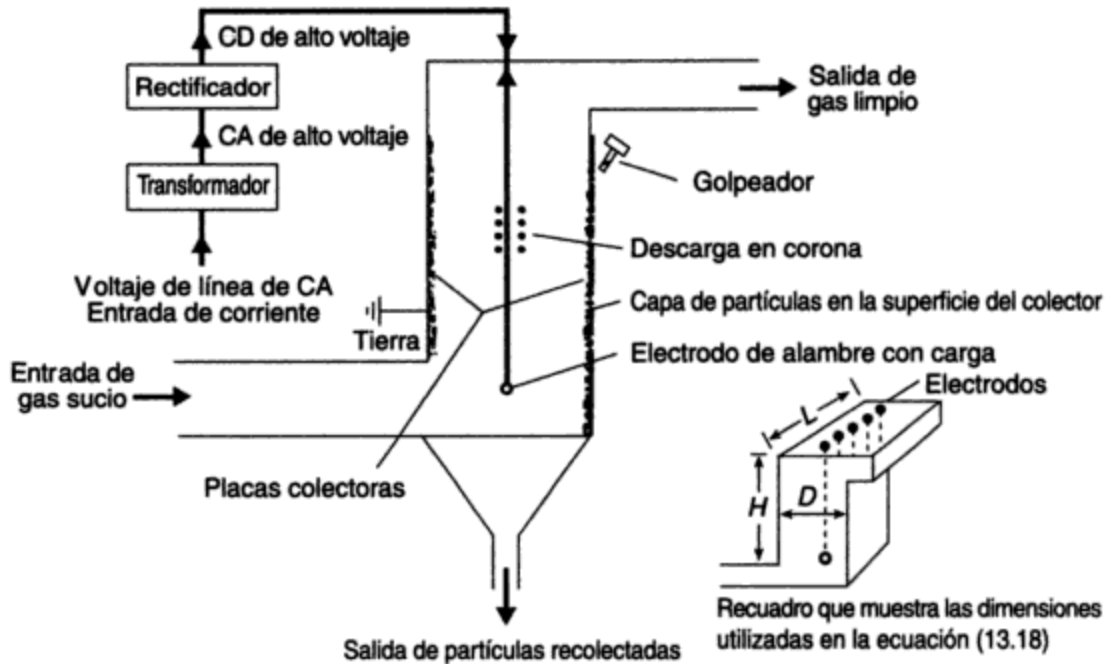


Figura 13-13 Precipitador electrostático elemental.

donde  $F_E$  = fuerza electrostática que actúa sobre la partícula

$q_p$  = carga de la partícula [un valor representativo es  $0.3 \times 10^{-15}$  coulombs (C)]

$E_c$  = intensidad del campo eléctrico (un valor representativo es 10,000 V/cm)

Cuando las partículas tocan las placas se adhieren a ellas. Con el tiempo se acumula una capa de partículas que actúa como un manto aislante, y la magnitud de la carga superficial del manto puede aproximarse en efecto a la del electrodo. Este manto se debe retirar de manera continua golpeando las placas verticales para que la capa de partículas se deslice hacia abajo, enjuagando las placas con un líquido, o, si las partículas recolectadas son líquidas, haciendo que escurran por la superficie de las placas como el agua que se condensa en una ventana. Las partículas que caen de la parte inferior de la placa se recogen en tolvas para eliminarlas. El área de superficie de un colector típico es alrededor de  $250 \text{ m}^2$  por  $\text{m}^3/\text{s}$  de gasto de gas, aunque este valor varía de manera significativa de acuerdo con las características del gas y de las partículas para una eficiencia de rendimiento dada. Unas dimensiones de placa representativas serían de  $13 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ , con una separación entre placas de 30 a 40 cm.

La ecuación de Deutsch para la eficiencia de un precipitador electrostático de placas es

$$\eta_E = 1 - \exp \left\{ - \frac{2u_eHL}{HDu} \right\} \quad (13.18)$$

donde  $u_e$  = velocidad terminal de migración de la partícula, m/s (los valores típicos son de 0.03 a 0.30 m/s)

$H$  = altura de la placa colectoras (m)

(a) La extracción global que consiguen los colectores se muestra en la tabla siguiente:

	Intervalo del tamaño de partícula (μm)				Total
	0-10	10-20	20-44	> 44	
Masa de partículas de la clase (kg/día)	$2 \times 10^3$	$3.5 \times 10^3$	$3 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$	$10 \times 10^3$
Masa de partículas recolectadas (kg/día)					
PES	$1.8 \times 10^3$	$3.4 \times 10^3$	$3 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$	$9.7 \times 10^3$
Ciclón	$1.1 \times 10^3$	$2.7 \times 10^3$	$2.7 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$	$8.0 \times 10^3$

Así pues, la eficiencia global de recolección para el PES es

$$\frac{9.7 \times 10^3}{10 \times 10^3} \times 100 = 97\%$$

y para el ciclón es

$$\frac{8 \times 10^3}{10 \times 10^3} \times 100 = 80\%$$

(b) Sólo las partículas de tamaño inferior a 10 μm son respirables. Por consiguiente, la eficiencia de recolección del PES en cuanto a partículas respirables es del 90% en peso, y la del ciclón es del 55% en peso.

(c) La masa de una partícula con diámetro medio de 5 μm es

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} = 2300 \times \frac{\pi}{6} \times (5 \times 10^{-6})^3 = 1.5 \times 10^{-13} \text{ kg}$$

El número de partículas respirables con diámetro medio de 5 μm que se emiten cada día desde el PES es

$$\frac{(2 - 1.8) \times 10^3}{1.5 \times 10^{-13}} = 13 \times 10^{14}$$

en tanto que el correspondiente al ciclón es

$$\frac{(2 - 1.1) \times 10^3}{1.5 \times 10^{-13}} = 60 \times 10^{14}$$

El número de partículas con diámetro medio de 32 μm que se emiten cada día desde el PES es

$$\frac{(3 - 2.985) \times 10^3}{3.9 \times 10^{-8}} = 1.2 \times 10^9$$

y el correspondiente al ciclón es

$$\frac{(3 - 2.7) \times 10^3}{3.9 \times 10^{-8}} = 7.7 \times 10^9$$

Advierta que cada día se liberan en la atmósfera aproximadamente 100,000 veces más partículas respirables que partículas de 20 a 44  $\mu\text{m}$  de diámetro de cada colector, no obstante el hecho de que la masa de las partículas en este intervalo de tamaño es sólo 1.5 veces mayor.

#### 13.4.4 Control de la emisión de gases

Existen cuatro formas fundamentales de reducir la emisión de gases indeseables.

1. Reducir o eliminar la producción de los gases indeseables.
2. Inducir a los gases a reaccionar después de su producción en procesos químicos para generar emisiones diferentes menos inconvenientes.
3. Extraer de manera selectiva el producto indeseable de una corriente gaseosa por *absorción*, que es la transferencia de moléculas gaseosas a un líquido.
4. Extraer de manera selectiva el gas indeseable por *adsorción*, que es el depósito de moléculas gaseosas en una superficie sólida.

Cuando el gas se recupera del líquido absorbente o del sólido adsorbente, el proceso se describe como *regenerativo*, porque el líquido o sólido se usa repetidamente en el mismo proceso. En estos casos el gas casi siempre se somete a procesos posteriores para hacer de él un producto comercializable del cual se recupera una parte o la totalidad de los costos de recolección.

**Procesos de absorción.** Los absorbedores o torres rociadoras se proyectan para extraer de manera selectiva un gas específico de una mezcla de gases, y son similares a los lavadores de baja presión (figura 13-10). Cuando es necesario reducir las emisiones del gas a concentraciones muy bajas, suelen utilizarse torres empacadas. En la figura 13-14 se muestra una curva típica de un equilibrio de absorción que describe la relación entre la presión parcial de un gas sobre el líquido y la concentración del gas en el líquido. En la figura,  $C^*$  es la concentración en el equilibrio de las moléculas del gas en el líquido absorbente, que corresponde a la presión parcial  $p$  de un gas encima del líquido; y  $p^*$  es la presión parcial en el equilibrio en el gas total que corresponde a una concentración  $C$  de las moléculas gaseosas en el líquido. En los lavadores industriales el líquido conjunto que fluye (como un rocío o en un lecho empacado, por ejemplo) entra en contacto con las mezclas de gases en las cuales la presión parcial del gas por extraer es  $p$ . El gradiente de presión o concentración que impulsa al gas a entrar al líquido es entonces  $p-p^*$  o  $C^*-C$ , respectivamente. Por analogía con la transferencia de calor, una expresión que describe la velocidad de absorción del gas en el líquido es la siguiente:

$$\frac{dN}{dt} = K_G(p - p^*)A = K_L(C^* - C)A \quad (13.19)$$

donde  $K_G$  y  $K_L$  son coeficientes empíricos cuyos valores dependen de la combinación de gases y líquidos, de los patrones de flujo y turbulencia en el lavador, de la temperatura, y también de otros factores;  $N$  es el número de moléculas de gas que se transfieren y  $A$  es el área de contacto entre el líquido y el gas. La ley de Henry es un caso especial de esta ecuación, en el cual la curva de concentración en el equilibrio es lineal.

todavía un proceso empírico, y cada fabricante ha desarrollado coeficientes patentados para una determinada configuración, mezcla de gases y calidad del gas recuperado (o procesado para su eliminación), adsorbente, temperatura de operación, proporciones de volumen de gas a adsorbente, profundidad del lecho y gasto de gas.

La cantidad de adsorbato que el sólido puede incorporar es función de las propiedades químicas y físicas del sólido, en particular del área de superficie de los poros y fisuras de las partículas sólidas, dentro de las cuales se depositan las moléculas de gas. En los procesos industriales suele regenerarse el adsorbente haciendo pasar vapor de agua caliente a través del lecho, con lo cual las moléculas de agua desplazan a las de gas a temperaturas elevadas. El gas concentrado se puede recuperar, secar y reprocesar para obtener un subproducto comercializable, y el adsorbente se recicla.

El carbón y la alúmina activados son adsorbentes excelentes para varios gases. El gel de sílice, como se indicó, es un buen adsorbente de vapor de agua y de algunos otros gases. El área de superficie de los adsorbentes varía desde 500 a 1,500 m<sup>2</sup>/g para el carbón activado hasta 175 m<sup>2</sup>/g para el gel de sílice. La tabla 13-16 muestra la capacidad de adsorción del carbón vegetal activado para tres vapores comunes.

**TABLA 13-16 CAPACIDAD DE ADSORCIÓN Y DE RETENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PARA TRES VAPORES COMUNES**

Sustancia	Capacidad de adsorción (% en peso)	Retención después de la extracción (% en peso)
Tetracloruro de carbono	80-110	27-30 <sup>a</sup>
Gasolina	10-20	2-3 <sup>a</sup>
Metanol	50	1.2 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Se regenera por paso de aire a 25°C a través del lecho durante 6 h.

<sup>b</sup>Se regenera con vapor de agua a 150°C durante 1 h.

Fuente: W. Strauss *Industrial Gas Cleaning* (Londres: Pergamon Press, 1966).

#### 13.4.5 Diagramas de flujo para procesos de recuperación representativos

La importancia del SO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S se reconoció desde los principios de la historia de la contaminación del aire a causa de sus graves efectos en las plantas y en la salud en el caso del SO<sub>2</sub>, y en virtud del desagradable olor del H<sub>2</sub>S a concentraciones muy bajas. Se han llevado a cabo extensos trabajos para reducir el SO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S en las corrientes de gases industriales en una amplia gama de concentraciones, por lo cual consideraremos los procesos de recuperación de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S como ejemplos ilustrativos.

**Extracción selectiva de SO<sub>2</sub> a alta concentración de gases de fundición.** El proceso de dimetilnilina (DMA) (figura 13-15) resulta económico para extraer SO<sub>2</sub> a concentraciones mayores del 3.5% de los gases de escape de la fundición (beneficio) de minerales sulfurados. El SO<sub>2</sub> se recupera en forma líquida y se utiliza en la producción de fer-



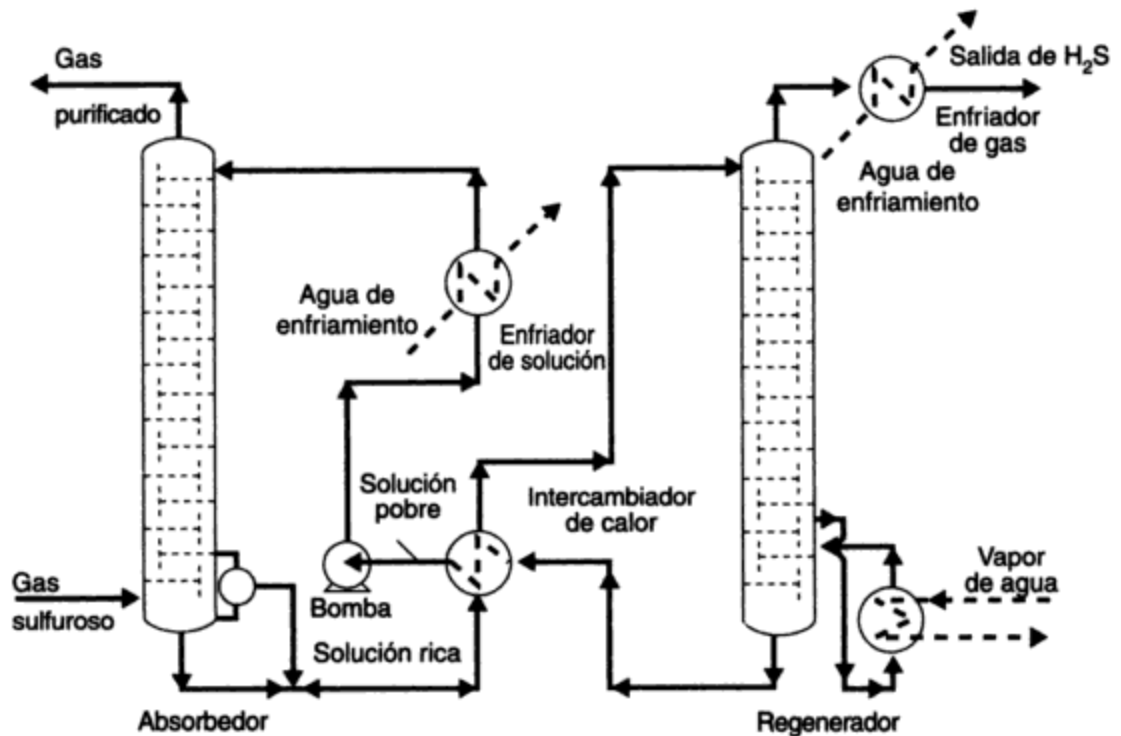
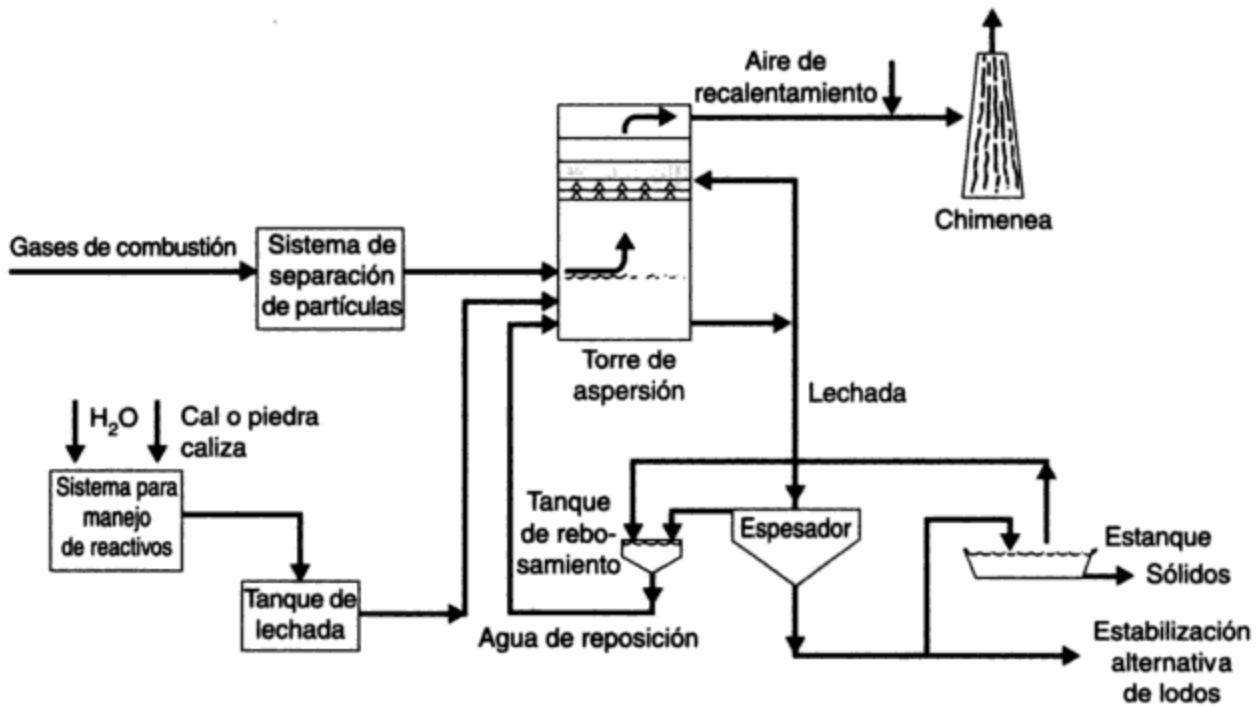


Figura 13-16 Diagrama de flujo del proceso de trietanolamina para la extracción de  $H_2S$  y  $CO_2$  de corrientes de gas sulfuroso. Fuente: W. Strauss. *Industrial Gas Cleaning* (Londres: Pergamon Press, 1966).

de operación de los lavadores y por tanto es necesario lavarla de la corriente de gases de escape en un lavador secundario. En este ejemplo el adsorbente se regenera y el  $H_2S$  se recupera para su conversión ulterior en azufre elemental o  $H_2SO_4$ .

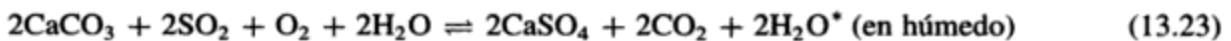
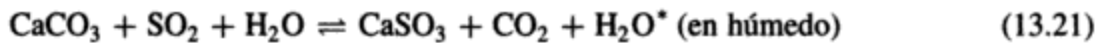
**Extracción selectiva de  $SO_2$  a baja concentración de corrientes gaseosas.** La extracción de  $SO_2$  de corrientes de gases de combustión de hulla o petróleo ha presentado un problema especialmente difícil, porque el  $SO_2$  está presente en concentraciones de menos del 0.5% en una mezcla compleja de otros gases y partículas a temperaturas elevadas. Aunque la concentración de  $SO_2$  es baja, la cantidad de gases que descargan los procesos de combustión es muy grande.

La figura 13-17 es un bosquejo de un lavador típico de cal o piedra caliza y otros componentes complementarios de procesamiento de lodos para extraer  $SO_2$  de los gases de escape de la combustión. En el lavador el  $SO_2$  reacciona con la cal o la piedra caliza y forma sulfitos o sulfatos sólidos que permanecen en solución o en suspensión en la lechada. Los sólidos se separan de la lechada en tanques de sedimentación convencionales, y el líquido, que contiene un poco de sólidos en suspensión, se enriquece adicionando más cal o piedra caliza y después se recircula. El sulfito se guarda en piletas o estanques, o se transforma en sulfato (estabilización de los lodos) por oxidación en tanques de aireación. El sulfito es *tixotrópico* (es decir, se sedimenta como un gel, no como un sólido). El sulfato es un sólido estable (yeso) que se puede utilizar en la industria de la construcción si no está contaminado con otros compuestos o sustancias.



**Figura 13-17** Esquema de un sistema lavador de lechada de cal/piedra caliza para extraer SO<sub>2</sub> de forma selectiva de gases de combustión de combustibles fósiles.

Entre los reactivos comunes de lechada para extraer SO<sub>2</sub> se cuentan la cal (CaO), la cal apagada [Ca(OH)<sub>2</sub> = (CaO + H<sub>2</sub>O)], piedra caliza (CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>; CaCO<sub>3</sub> > 50% de la masa) y dolomita (MgCO<sub>3</sub> + CaCO<sub>3</sub>; MgCO<sub>3</sub> > 50% de la masa). Algunas de las reacciones que se llevan a cabo (en seco a temperaturas altas en el horno, o en húmedo en un lavador y tanque de lodos) son las siguientes:



En tiempos recientes, el concepto de lavado en seco para extraer SO<sub>2</sub> ha ganado aceptación. En los lavadores en seco se rocían gotas de lechada líquida que contiene muy poca agua dentro de una corriente gaseosa caliente. El líquido se evapora mientras se absorbe el SO<sub>2</sub> y se llevan a cabo reacciones químicas similares a las que ocurren en los lavadores húmedos. Las partículas sólidas se recolectan con las cenizas finas en el precipitador o cámara de sacos. Las ventajas de

\*El H<sub>2</sub>O que se incluye en estas ecuaciones representa el líquido o portador del reactivo químico en el lavador.

los lavadores en seco son que se produce un polvo seco, con lo cual se evitan los problemas asociados con la eliminación de una lechada líquida o lodos húmedos, por otra parte se requiere mucha menos agua, se reducen los costos de bombeo de lechadas líquidas y el equipo necesario, y también se eliminan casi por completo la corrosión y la obstrucción de las secciones del lavador donde se está recirculando una lechada.

Es necesario señalar que los absorbedores (lavadores) que hemos descrito para la extracción de  $\text{SO}_2$  de los gases de combustión son "quimiabsorbedores". Esto significa que el  $\text{SO}_2$  se extrae por reacción química con aditivos del líquido del lavador y no por retención como el gas original disuelto en el líquido. Estos procesos no son regenerativos y por tanto descargan material del cual es necesario deshacerse. Parte del  $\text{CaSO}_4$  puede venderse como yeso para construcción y uso agrícola si se genera un producto aceptablemente puro; otros materiales se desechan en estanques de almacenamiento.

### Ejemplo 13.7

Se quema hulla pulverizada que contiene 2.65% de S y 10% de cenizas con un valor calorífico de 12,000 Btu/lb en una planta generadora de 1,000 MW ( $1 \text{ MW} = 3.413 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ ) que opera a un factor de capacidad anual del 60%. La eficiencia térmica de planta es de 33.3%. Se propone la instalación de un lavador de cal en la planta para extraer el 90% del  $\text{SO}_2$  de los gases de combustión. El lavador se ubicaría antes del PES existente, el cual actualmente trabaja con una eficiencia de extracción del 99.5%. Cuando el lavador se instale, la eficiencia del precipitador bajará al 98% como consecuencia de la extracción del  $\text{SO}_2$ , el cual afecta de manera significativa la resistividad de las partículas de ceniza y del gas de combustión. No obstante, el lavador extraerá el 60% de las cenizas finas de los gases de escape además del  $\text{SO}_2$ . Calcule, por hora:

- Las cantidades de hulla que se queman, así como de las cenizas finas y  $\text{SO}_2$  que se descargan en la atmósfera antes de la instalación del lavador.
- La cantidad de piedra caliza que se requiere si se necesita un exceso de 10% (esto es, una cantidad mayor que la estequiométricamente necesaria para extraer el 100% del  $\text{SO}_2$ ) para conseguir la extracción del 90% del  $\text{SO}_2$  en el lavador.
- La masa de lodos secos que se descargarán del lavador y la masa de partículas que extraerá el PES una vez instalado el lavador.
- El volumen de sólidos desecados que se descargarán al área de almacenamiento de ceniza cada año, suponiendo una densidad relativa de 1.83 para los lodos desecados (como  $\text{CaSO}_4$ ) y de 0.8 para la ceniza seca que recolecta el precipitador.
- La masa de  $\text{SO}_2$  y de partículas que se descargarán en la atmósfera después de la instalación del lavador.

Se proporciona un diagrama de flujo del proceso (figura 13-18) y la tabla 13-17, que contiene los factores de emisión, para la resolución del problema (pesos moleculares:  $\text{CaCO}_3 = 100$ ,  $\text{CaSO}_4 = 136$ ,  $\text{CaSO}_3 = 120$ ,  $\text{S} = 32$ ).

### Solución

$$\begin{aligned} \text{(a) Hullas necesarias} &= \frac{1000 \times (3.413 \times 10^6) \times 0.60}{12,000 \times 0.333 \times 2000} = 256 \text{ ton/h en promedio a lo largo del año} \\ &= 232 \text{ toneladas/h} \end{aligned}$$

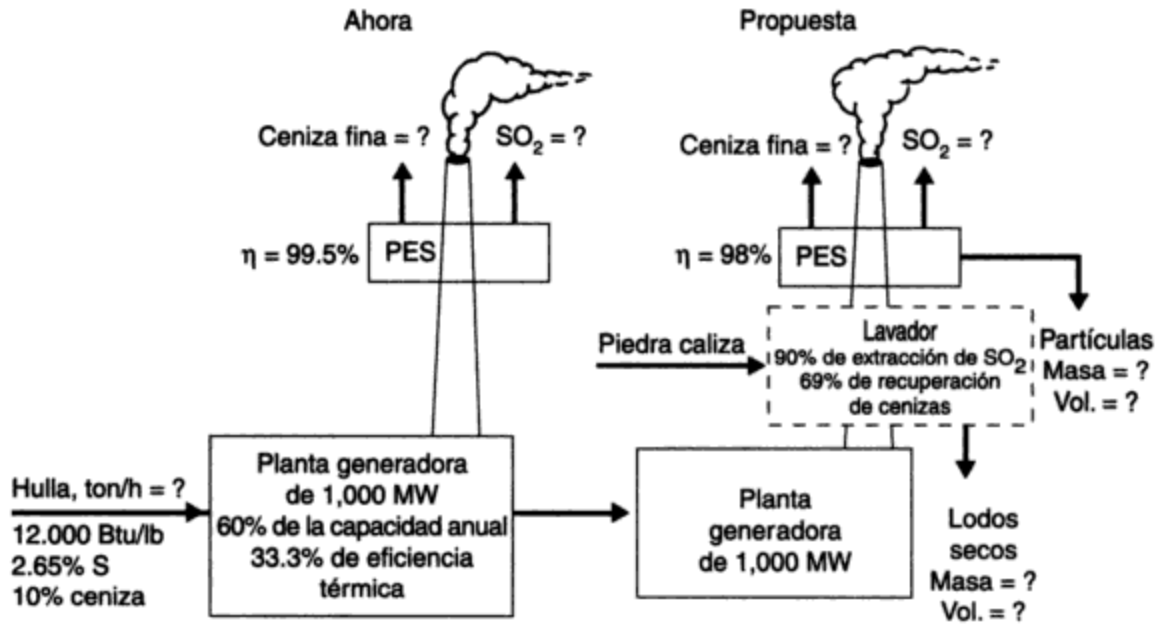


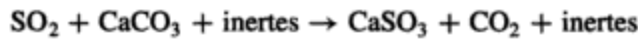
Figura 13-18

$$\text{Cenizas finas producidas por la hulla}^* = 5 \times 10 \times 232 = 11,600 \text{ kg/h} = 11.6 \text{ toneladas métricas/h}$$

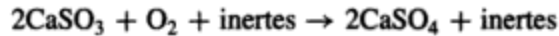
$$\text{Cenizas finas que se emiten desde el PES} = 11,600 \times 0.005 = 58 \text{ kg/h}$$

$$\text{SO}_2 \text{ emitido}^* \text{ (sin lavador)} = 19.5 \times 2.65 \times 232 = 11,988.6 \text{ kg/h} = 11.99 \text{ toneladas métricas/h}$$

(b) La cantidad de piedra caliza que se requiere se obtiene como sigue. Suponga que la piedra caliza es  $\text{CaCO}_3$  y contiene 5% de materiales no reactivos (inertes). Las reacciones químicas son



y



Así pues, 1 mol de  $\text{SO}_2$  reacciona con 1 mol de  $\text{CaCO}_3$  para formar 1 mol de  $\text{CaSO}_4$  (yeso). Por tanto, la cantidad de piedra caliza que se necesita, con base en 5% de inertes y un exceso de 10%, es

$$11988.6 \times \frac{100}{64} \times \frac{1.10}{0.95} \times \frac{1}{1000} = 21.690 \text{ toneladas métricas/h CaCO}_3$$

(c) La masa de lodos secos que se extraerá del lavador se obtiene como sigue:

1. La tasa de extracción de cenizas finas como lodos de lavador es de  $0.60 \times 11,600 = 6960 \text{ kg/h}$ .

\* Véase en la tabla 13-17 el dato para horno alimentado con carbón pulverizado y de fondo seco.

TABLA 13-17 FACTORES DE EMISIÓN PARA COMBUSTIÓN EXTERNA DE CARBÓN BITUMINOSO Y SUBTUMINOSO<sup>a</sup>

Configuración de alimentación	Materia particulada <sup>b</sup>		Óxidos de azufre <sup>c</sup>		Óxidos de nitrógeno <sup>d</sup>		Monóxido de carbono <sup>e</sup>		COV no metánicos <sup>e, f</sup>		Metano <sup>e</sup>	
	kg/tonelada métrica	lb/ton	kg/tonelada métrica	lb/ton	kg/tonelada métrica	lb/ton	kg/tonelada métrica	lb/ton	kg/tonelada métrica	lb/ton	kg/tonelada métrica	lb/ton
• Alimentación con carbón pulverizado												
Fondo seco	5A	10A	19.5S (17.5S)	39S (35S)	10.5(7.5) <sup>g</sup>	21(15) <sup>g</sup>	0.3	0.6	0.04	0.07	0.015	0.03
Fondo húmedo	3.5A <sup>h</sup>	7A <sup>h</sup>	19.5S (17.5S)	39S (35S)	17	34	0.3	0.6	0.04	0.07	0.015	0.03
• Horno de ciclón	1A <sup>h</sup>	2A <sup>h</sup>	19.5S (17.5S)	39S (35S)	18.5	37	0.3	0.6	0.04	0.07	0.015	0.03
• Cargador distribuidor												
Sin controles	30 <sup>i</sup>	60 <sup>i</sup>	19.5S (17.5S)	39S (35S)	7	14	2.5	5	0.04	0.07	0.015	0.03
Después del ciclón múltiple												
—Con reinyección de cenizas finas del ciclón múltiple	8.5	17	19.5S (17.5S)	39S (35S)	7	14	2.5	5	0.04	0.07	0.015	0.03
—Sin reinyección de cenizas finas del ciclón múltiple	6	12	19.5S (17.5S)	39S (35S)	7	14	2.5	5	0.04	0.07	0.015	0.03
• Cargador de alimentación superior <sup>k</sup>												
Sin controles	8 <sup>m</sup>	16 <sup>m</sup>	19.5S (17.5S)	39S (35S)	3.25	7.5	3	6	0.04	0.07	0.015	0.03
Después de ciclón múltiple	4.5 <sup>n</sup>	9 <sup>n</sup>	19.5S (17.5S)	39S (35S)	3.25	7.5	3	6	0.04	0.07	0.015	0.03
• Cargador de alimentación inferior												
Sin controles	7.5 <sup>p</sup>	15 <sup>p</sup>	15.5S	31S	4.75	9.5	5.5	11	0.65	1.3	0.4	0.8
Después del ciclón múltiple	5.5 <sup>n</sup>	11 <sup>n</sup>	15.5S	31S	4.75	9.5	5.5	11	0.65	1.3	0.4	0.8
• Unidades de alimentación manual	7.5	15	15.5S	31S	1.5	3	45	90	5	10	4	8 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Los factores representan emisiones no controladas, a menos que se especifique otra cosa, y se deben aplicar al consumo del carbón tal como se alimenta.

<sup>b</sup>Con base en el Método 5 de la EPA (media captura anterior), como se describe en la referencia 12. Cuando la materia particulada se expresa en términos de contenido de cenizas del carbón, A, el factor se determina multiplicando el % en peso del contenido de cenizas del carbón (tal como se alimenta) por el valor numérico que antecede a la "A". Por ejemplo, si se alimenta carbón con 8% de cenizas en una unidad de fondo seco, el factor de emisión de particulados sería 5 x 8, o 40 kg/Mg (80 lb/ton). La materia "condensable" que se recolecta en la media captura posterior del Método 5 de la EPA en promedio equivale a <5% de la media captura anterior, o "filtrable", para hornos de carbón pulverizado y ciclón, 10% para cargadores que distribuyen, 15% para otros cargadores, y 50% para unidades de alimentación manual (referencias 6, 19, 49).

<sup>c</sup>Expresados como SO<sub>2</sub>; incluyen SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y sulfatos gaseosos. Los factores entre paréntesis se deben utilizar para estimar las emisiones gaseosas de SO<sub>x</sub> de carbón subbituminoso. En todos los casos "S" es el % en peso de contenido de azufre del carbón tal como se alimenta. Vea al pie de la nota b un ejemplo de cálculo. En promedio para el carbón bituminoso, 97% del azufre del combustible se emite como SO<sub>2</sub>, y sólo alrededor del 0.7% del azufre del combustible se emite como SO<sub>3</sub> y sulfatos gaseosos. Un porcentaje igualmente reducido de azufre del combustible se emite como sulfatos particulados (referencias 9, 13). También se retienen pequeñas cantidades de azufre en las cenizas del fondo. Con el carbón subbituminoso se retiene en general un 10% más de azufre del combustible en la ceniza del fondo y en los particulados a causa de la naturaleza más alcalina de las cenizas del carbón. La conversión a sulfatos gaseosos parece ser más o menos igual a la del carbón bituminoso.

<sup>d</sup>Expresado como NO<sub>x</sub>. En general, del 95 al 99% en volumen de los óxidos de nitrógeno presentes en el escape de la combustión están en forma de NO, el resto como NO<sub>2</sub> (referencia 11). Para expresar los factores como NO, multiplíquelos por un factor de 0.66. Todos los factores representan emisiones en operación básica (esto es, 60-110% de carga y ninguna medida de control de NO<sub>x</sub>, como se explica en el texto).

<sup>e</sup>Valores nominales susceptibles de alcanzarse en condiciones normales de operación. Se presentan valores mayores dos o tres órdenes de magnitud cuando la combustión es incompleta.

<sup>f</sup>Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COV) expresados como equivalentes de C<sub>2</sub> a C<sub>6</sub> (referencia 58). A causa de los limitados datos disponibles sobre COVNM para distinguir los efectos de la configuración de alimentación, todos los datos se promediaron de forma colectiva para obtener un promedio único para unidades de carbón pulverizado, ciclones, distribuidores y cargadores de alimentación superior.

<sup>g</sup>El valor entre paréntesis corresponde a calderas con alimentación tangencial.

<sup>h</sup>Emisiones de particulados sin control, cuando no se emplea reinyección de cenizas finas. Cuando se instalan dispositivos de control y la ceniza fina se reinyecta a la caldera, los particulados de la caldera que llegan al equipo de control pueden aumentar hasta por un factor de dos.

<sup>i</sup>Toma en cuenta la ceniza fina que se sedimenta en un economizador, calentador de aire o braguero a contracorriente respecto al dispositivo de control o la chimenea. (Los particulados directamente en la salida de la caldera por lo general tienen el doble de este nivel.) El factor se debe aplicar incluso cuando la ceniza fina se reinyecta de una caldera a otra, al calentador de aire o al economizador de las tolvas de polvo.

<sup>j</sup>Incluye cargadores de parrilla corrediza, parrilla vibratoria o parrilla articulada.

<sup>k</sup>Toma en cuenta la sedimentación de ceniza fina que está en el braguero, en la base del material cargado. La carga de particulados en la salida de la caldera puede ser generalmente 50% mayor.

<sup>l</sup>Vea en el texto el análisis de las eficiencias aparentemente bajas del control con ciclón múltiple, en relación con las emisiones no controladas.

<sup>m</sup>Toma en cuenta la sedimentación de ceniza fina en el braguero, en la dirección de la corriente respecto a la salida de la caldera.

*Fuente:* U.S. EPA, Air Pollution Emission Factors, AP42, 4a. ed., septiembre de 1988.

2. La tasa de extracción de  $\text{CaSO}_4$  como lodos de lavador es

$$0.90 \times 11,988.6 \times \frac{32}{64} \times \frac{136}{32} = 22,928 \text{ toneladas métricas/h}$$

3. La tasa de utilización de piedra caliza sin reaccionar es de 21,690 kg/h, y la rapidez con la que la piedra caliza reacciona para transformarse en  $\text{CaSO}_3$  (PM = 120) es

$$0.90 \times 11,988.6 \times \frac{120}{64} = 20,231 \text{ kg/h}$$

Por tanto, la piedra caliza sin reaccionar, con los inertes, se acumula a una tasa de  $21,690 - 20,231 = 1459 \text{ kg/h}$ , y la rapidez con la que se extrae masa de lodos desecados de lavador es  $6960 + 22,928 + 1459 = 31,347 \text{ kg/h} = 31.3 \text{ toneladas métricas/h}$ .

La tasa de extracción de partículas en el PES que sigue al lavado es  $(1 - 0.60) \times 11,600 \times 0.98 = 4547 \text{ kg/h} = 4.5 \text{ toneladas métricas/h}$ . Por consiguiente, la tasa de extracción de sólidos desecados del lavador y el PES = 35.9 toneladas métricas/h. Esto es comparable con las 11.6 toneladas métricas/h de cenizas finas que se extraen antes de la instalación del lavador.

(d) El volumen de sólidos desecados que se descargan por hora al área de almacenamiento del sistema de lavador y PES es

$$31.3 \text{ toneladas métricas/h} \times \frac{1}{1.83} + 4.5 \times \frac{1}{0.8} = 17.1 + 5.6 = 22.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Esto es comparable con  $11.6 \times 0.995 \times (1/0.8) = 14.4 \text{ m}^3/\text{h}$  antes de la instalación del lavador. Por tanto, es necesario aumentar el área de almacenamiento por un factor de  $22.7/14.4 = 1.58$ .

(e) La masa de  $\text{SO}_2$  que se descargará en la atmósfera después de la instalación del lavador es  $11.99 \times 0.1 = 1.2 \text{ toneladas métricas/h}$ , y la masa de las cenizas finas que se descargará en la atmósfera después de la instalación del lavador es  $11.6 - 6.96 - 4.55 = 0.09 \text{ toneladas métricas/h}$ .

### 13.4.6 Control de la emisión de óxidos de nitrógeno

El control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los procesos de combustión proporciona un buen ejemplo del control para la contaminación del aire a través de una reducción en la cantidad de contaminante que se produce. La cinética química indica que el óxido nítrico se produce con mayor rapidez a medida que la temperatura de la reacción aumenta. La tabla 13-18 presenta los

**TABLA 13-18** TIEMPO PARA LA FORMACIÓN DE NO EN UN GAS QUE CONTIENE 75% DE NITRÓGENO Y 3% DE OXÍGENO

Temperatura °F	Tiempo para 500 ppm de NO segundos	NO en el equilibrio ppm
2400	1370	550
2800	16.2	1380
3200	1.10	2600
3600	0.117	4150

Fuente: U.S. EPA, *Control Techniques for Nitrogen Oxides Emissions from Stationary Sources*, AP 67, 1970.

tiempos de reacción teóricos para la formación de NO a varias temperaturas elevadas en una mezcla de gases que contiene 3% de O<sub>2</sub> y 75% de N<sub>2</sub>, que son las concentraciones aproximadas en los gases de combustión de las calderas. La tabla muestra que, si se puede reducir la temperatura de reacción, se producirá mucho menos NO con el mismo tiempo de residencia.

En los procesos de combustión se pueden alcanzar temperaturas de flama o de cámara de combustión más bajas quemando el combustible lentamente (los quemadores con poco exceso de aire también reducen la disponibilidad de nitrógeno para la reacción) y llevan a cabo la combustión en varias etapas. La recirculación de los gases de escape para diluir la mezcla de combustible y aire en la cámara de combustión de las fuentes de combustión interna o estacionaria tiene un efecto similar (véase la figura 13-5). Las investigaciones indican que son muchos los factores complementarios que afectan la velocidad de reacción del N<sub>2</sub> y del O<sub>2</sub>. La presencia de otras sustancias en formas sólidas, líquidas o gaseosas, el régimen y grado de apagado o enfriamiento de los gases después de la formación del NO, y la concentración de los gases participantes son factores importantes de control. El diseño encaminado a una producción mínima de NO<sub>x</sub> se basa en gran medida en factores empíricos. Una reducción de la generación de NO<sub>x</sub> de 0 a 30% es posible en la actualidad mediante el uso de quemadores de diseño modificado en ciertos hornos. Se llevan a cabo amplios programas de investigación para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> empleando catalizadores, extracción en seco y en húmedo, y control de la temperatura de los hornos.

### 13.4.7 Control de la calidad del aire por dilución ambiental

Para ciertas operaciones, la tecnología encaminada al control de las emisiones todavía está en desarrollo. En estos casos la superposición de un proceso de control de la contaminación en la producción puede dar por resultado un tiempo de paro inaceptable, costos excesivos de mantenimiento y operación, y altos cargos por capital e interés. De acuerdo con nuestra definición original sobre la contaminación del aire, una sustancia no es un contaminante a menos que cause un efecto. En las cercanías de la fuente (el *campo próximo*) suele utilizarse la dilución para alcanzar una calidad aceptable del aire. La dilución por medio de chimeneas altas puede ser un medio más económico que la instalación de sistemas de extracción para alcanzar un estándar de calidad del aire.

Durante las décadas de 1960 y 1970, cuando muchos procesos de control se hallaban en desarrollo, la dilución se empleaba extensamente para el control de la contaminación del aire (calidad del aire). A medida que se generó información adicional, se reconoció que la dilución no es siempre una solución aceptable aunque se eliminen los efectos del campo próximo. Por ejemplo, considere los óxidos de azufre y de nitrógeno y los compuestos de cloro en la atmósfera. En una escala continental o global se reconoce que se puede conseguir una reducción en los efectos de la lluvia ácida sólo si se reducen las emisiones en la fuente o si se imponen medidas mitigadoras como la alcalización de lagos en el campo. Esto ha ocasionado que se reconsidere el valor de la dilución para controlar la calidad del aire y un énfasis renovado y mayor en los procesos de control de emisiones en la fuente.

En tiempos más recientes se ha determinado que la contaminación de cuerpos de agua, como los Grandes Lagos, por contaminantes peligrosos persistentes y por metales pesados se produce principalmente como consecuencia de precipitación desde la atmósfera (International Air Quality Advisory Board, 1993). Hay indicios de que las malformaciones en la vida silvestre tienen relación directa con esta contaminación (Gilbertson y Schneider, 1991). En respuesta a lo anterior, en Estados Unidos se ha alentado el informe voluntario de descargas industriales de 190 sustancias químicas tóxicas para el Inventario de Descargas de Tóxicos, y en Canadá ha



sido obligatorio, desde 1993, informar respecto a la emisión de 176 sustancias químicas tóxicas para el Inventario Nacional de Descargas de Contaminantes. Para varios de estos productos químicos se ha recomendado, como ya hemos señalado, la suspensión inmediata de su producción (sección 13.3.5).

### 13.5 PREDICCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN EL AIRE

El diseño de complejos industriales, la planeación de comunidades, la identificación de fuentes significativas y la predicción de concentraciones de contaminantes en receptores seleccionados, usualmente se hace por medio de modelos matemáticos. Los datos importantes que se alimentan a los modelos de contaminación del aire incluyen el tipo, carácter y distribución de las fuentes, así como los contaminantes emitidos, las variables meteorológicas que determinan el transporte, la dispersión y las reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera. En el campo próximo (a menos de 20 km de la fuente), a excepción de ciertos contaminantes como el flúor, el  $H_2S$  y los oxidantes fotoquímicos, por lo general podemos despreocuparnos de las reacciones químicas y los procesos de eliminación atmosféricos. En el campo lejano (a más de 100 km de la fuente) las reacciones químicas y los procesos de eliminación adquieren cada vez más importancia. Puesto que los modelos son representaciones muy simplificadas de procesos reales, las predicciones de un solo valor se deben considerar dentro de un factor de 2 en el mejor de los casos. Podríamos considerar esta precisión como análoga al factor de seguridad que se emplea en el diseño civil y mecánico de estructuras y componentes de máquinas.

#### 13.5.1 Meteorología de la contaminación del aire

Los factores fundamentales en el transporte de contaminantes del aire (vientos, turbulencia y temperatura de la atmósfera) se analizaron con detalle en el capítulo 7. Los contaminantes se transportan a la velocidad y en la dirección del viento. Al mismo tiempo, los contaminantes que se emiten en forma de columna o penacho desde una fuente continua o como una fumada desde una fuente instantánea se dispersan por la acción de la turbulencia. En la velocidad del viento, su dirección y la turbulencia en la capa de aire desde la superficie terrestre hasta alrededor de 1 km arriba de ella, en donde se emiten la mayor parte de los contaminantes, influye fuertemente la estructura vertical de temperaturas atmosféricas, la cual se describe como la *tasa de decaimiento* de la temperatura.

Si una bolsa que contiene aire se mueve verticalmente en la atmósfera y no se produce arrastre de aire exterior, condensación o evaporación, la temperatura en el interior de la bolsa cambia a la tasa de decaimiento adiabático seco  $\Gamma_D$ , igual a 9.8 K/km de ascensión. Si la temperatura del aire en la atmósfera exterior de la bolsa disminuye en  $\gamma = 5$  K/km de ascensión (véase la sección 7.4), entonces, después de subir 1 km, la temperatura del aire en la bolsa será 4.8 K menor que la del aire circundante. ( $\gamma$  se conoce como la tasa de decaimiento real.) Puesto que la presión, tanto dentro como fuera de la bolsa, es la misma en todos los niveles (las variaciones de presión se transmiten a la velocidad del sonido, pero la transferencia de calor es bastante más lenta), el aire de la bolsa tendrá una densidad mayor que el aire circundante, dada por

$$\rho_p = \frac{P_p}{RT_p} \quad \text{y} \quad \rho_A = \frac{P_A}{RT_A} \quad (13.24)$$

en donde los subíndices  $p$  y  $A$  se refieren a la bolsa y a la atmósfera ambiental, respectivamente, y  $R$  es la constante de los gases para el aire. Advierta que  $P_p = P_A$  y si  $T_p < T_A$ , entonces  $\rho_p > \rho_A$ .

Se concluye que la bolsa con aire que presenta mayor densidad caerá a través del aire circundante hasta alcanzar su posición original, donde las temperaturas dentro y fuera de la bolsa son iguales. Si la bolsa se mueve hacia abajo 1 km respecto a su nivel inicial original ocurre lo contrario, y la bolsa flotante a mayor temperatura se eleva hasta su posición original. Puesto que la bolsa siempre tiene tendencia a regresar a su altitud original en esta atmósfera, decimos que la atmósfera es térmicamente estable. En una atmósfera de este tipo se anula la turbulencia atmosférica vertical horizontal y también la transferencia vertical de cantidad de movimiento.

El efecto de las distribuciones de la temperatura atmosférica ambiental en los movimientos verticales se representa en la figura 13-19. En (a), la curva  $\gamma$  que denota el cambio de temperatura con la altura en el entorno es igual a la tasa de decaimiento adiabático seco, denotado por la curva  $\Gamma_D$ . Una bolsa con aire que se ha movido verticalmente permanecerá donde se encontraba o continuará moviéndose en sentido vertical si las fuerzas externas no detienen su movimiento. Describimos esta atmósfera como térmicamente neutra [véase también la ecuación (7.7) y el comentario que la acompaña].

En la figura 3-19b,  $\gamma > \Gamma_D$ , y una bolsa que se mueve en sentido vertical se acelera a medida que se aleja de su altura original. De este modo los movimientos verticales se intensifican en alto grado, y es cuando decimos que la atmósfera es inestable. La parte (c) de la figura es el caso descrito en detalle para  $\gamma < \Gamma_D$  y se considera como ligeramente estable. La parte (d) muestra una inversión, en donde la temperatura de la atmósfera ambiental aumenta con la altura en vez de disminuir. En una inversión los movimientos verticales y la turbulencia se reprimen intensamente y la atmósfera se clasifica como muy estable.

En este punto uno se podría preguntar cuán representativo es nuestro análisis de la bolsa de aire aplicado a una situación real. Las observaciones indican que el análisis es, de hecho, notablemente acertado para los movimientos verticales y la turbulencia en la atmósfera real.

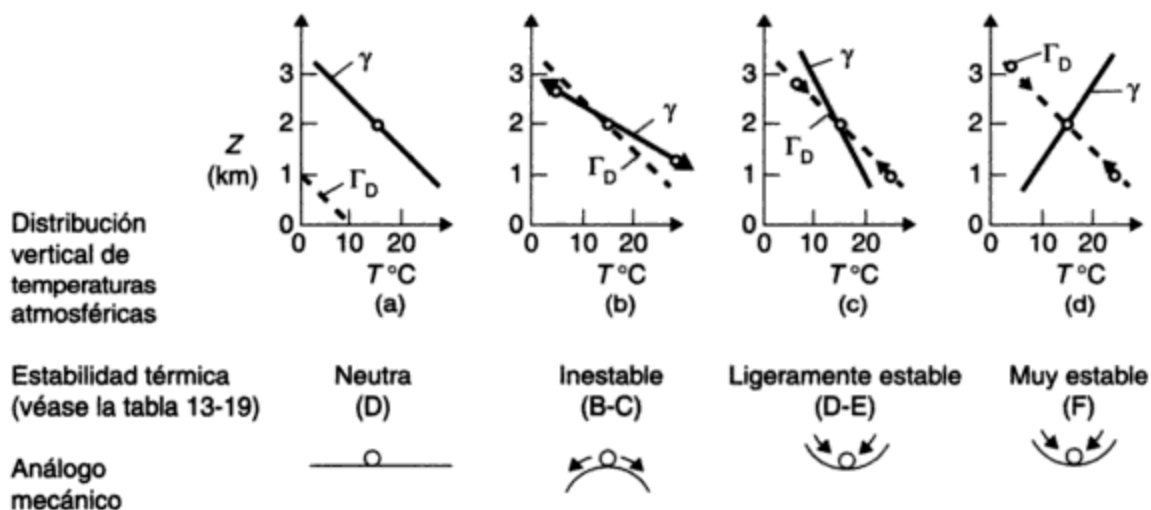


Figura 13-19 Tasas de decaimiento atmosférico y estabilidad.

En la figura 13-20 se muestra un perfil de columna instantáneo y promediado en el tiempo, correspondiente a cada uno de los regímenes de estabilidad de la figura 13-19. Es claro que, cuando los movimientos verticales se intensifican, la sección transversal de la columna promediada en el tiempo es mucho más grande, y decimos que la dispersión es mayor y las concentraciones en la columna son más bajas. En la atmósfera estable representada por una inversión la dispersión es muy lenta y, si la columna se aproxima a la vegetación, a un edificio o a una superficie, éstos pueden quedar expuestos a concentraciones de contaminantes muy altas.

En la figura 13-20e se representa una tasa de decaimiento atmosférico en dos capas con fuerte dispersión cerca del suelo pero con una inversión y difusión vertical limitada en lo alto. Esta configuración de tasa de decaimiento podría desarrollarse en los continentes, cuando sopla

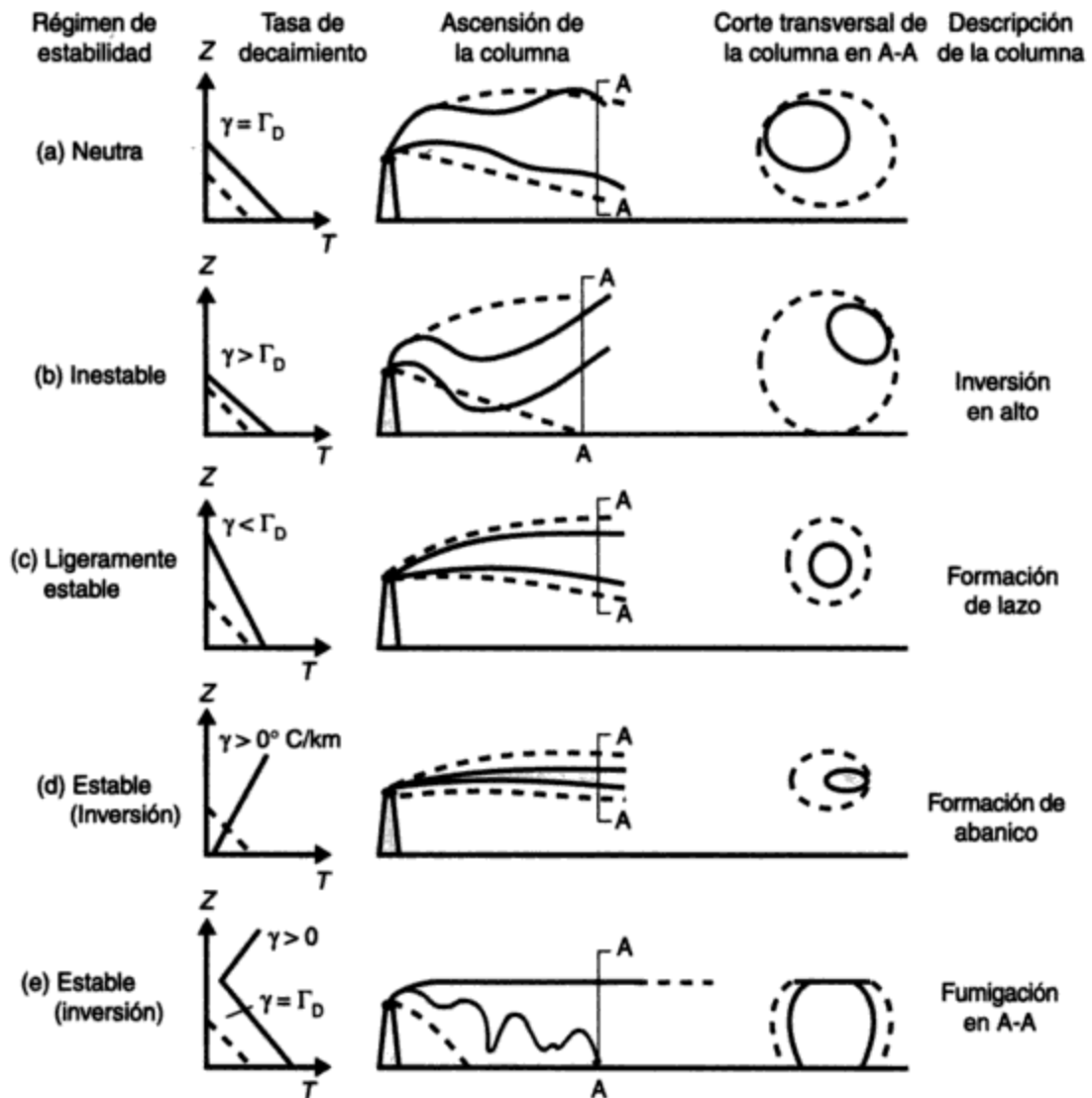


Figura 13-20 Descripciones de columnas para una selección de regímenes de estabilidad atmosférica. Las líneas continuas y punteadas de las columnas representan, respectivamente, los límites de columna instantáneos y promediados en el tiempo (a lo largo de varios minutos u horas).

aire frío desde un lago sobre tierra más cálida (calentada) durante el verano. La inversión actúa casi como una tapa para la difusión vertical, pero la fuerte tasa de decaimiento y la dispersión abajo de la inversión llevan los contaminantes a la superficie en concentraciones altas cerca de la fuente, en una "fumigación".

En una *inversión de superficie* (figura 13-20d) los contaminantes permanecen en una capa poco profunda y los vientos son siempre ligeros, de modo que se observan altas concentraciones de contaminantes cuando éstos se emiten cerca del suelo. Las inversiones de superficie son comunes en noches muy despejadas y sin vientos, cuando la tierra y el aire en contacto con ella se enfrían por irradiación hacia el espacio (llamada **inversión por irradiación**), cuando pasa aire caliente sobre una superficie fría, como un lago o terrenos cubiertos de nieve (llamada **inversión por advección**), y cuando el aire que está en contacto con el suelo a lo largo de los declives de un valle se enfría durante la noche y desciende por los declives hacia el valle para crear un estanque de aire frío cubierto de aire más caliente en lo alto (llamada **inversión por drenaje**). Las inversiones por irradiación típicas se desarrollan hasta profundidades de 200 a 400 m en una noche despejada, y la profundidad usual de las inversiones por advección es de 200 a 500 m, según el alcance sobre la superficie fría.

Se forman inversiones en alto cuando una capa profunda de aire frío pasa sobre una superficie más cálida como tierra calentada o un lago abierto en invierno cuando la tierra está cubierta de nieve. En este caso, el calentamiento en la superficie crea una capa inestable abajo de la inversión, como en la figura 13-20e. Se forman inversiones en alto sobre una ciudad a causa del desprendimiento de calor en la "isla térmica" (figura 7-17). Además, se desarrollan inversiones en alto en gran escala en virtud de complicados procesos dinámicos y termodinámicos en la atmósfera. El persistente esmog de Los Ángeles se forma bajo una inversión en alto en gran escala que restringe la dispersión vertical. Otros factores importantes en el esmog de Los Ángeles son la baja cordillera costera hacia el este, los vientos dominantes del oeste, y las reacciones químicas atmosféricas que son más rápidas cuando se produce una acumulación de contaminantes y la temperatura del aire es más alta.

Las observaciones indican que la velocidad del viento varía con la altura sobre el suelo en función de la estabilidad atmosférica y la aspereza de la superficie. La variación de la velocidad del viento con la altura suele describirse por medio de la ecuación exponencial

$$u_n = u_{10} \left( \frac{Z_n}{10} \right)^p \quad (13.25)$$

donde  $u_n$  = velocidad del viento a la altura  $Z_n$  sobre el suelo, (m/s)

$u_{10}$  = velocidad del viento a 10 m (altura de medición especificada por la Organización Meteorológica Mundial para las estaciones meteorológicas), (m/s)

$p$  = exponente que depende de la estabilidad atmosférica y el carácter de la superficie subyacente (varía desde aproximadamente 0.1 a 0.4 al pasar de una atmósfera inestable a una estable)

Otras variables meteorológicas importantes para el análisis de la contaminación del aire incluyen la precipitación, la cubierta de nubes y la irradiación hacia o desde la superficie terrestre. La precipitación elimina contaminantes de la atmósfera por los procesos físicos de llovido y arrastre y por los procesos químicos de oxidación e hidrólisis. La cubierta de nubes y la irradiación son excelentes indicadores de estabilidad atmosférica cuando se consideran en

conjunto con otras variables (como la velocidad del viento, la hora del día y las características de la superficie subyacente), y la radiación solar de longitud de onda corta domina la fotoquímica atmosférica.

### 13.5.2 Modelos de dispersión de contaminantes

Si se adopta un buen número de supuestos simplificadores es posible desarrollar ecuaciones de difusión gaussianas para describir la dispersión atmosférica de una fumarada en tres dimensiones o una columna en estado estacionario, de una fuente continua, en dos dimensiones (Slade, 1968; Randerson, 1981). Si se considera que el eje  $x$  sigue la línea media de la columna en la dirección del viento medio, con  $y$  (el eje horizontal) y  $z$  (el eje vertical) perpendiculares a la línea media de la columna, entonces, para el modelo más sencillo, podemos suponer que una columna que viaja en sentido horizontal a una velocidad media  $\bar{u}$  se dispersa horizontalmente ( $y$ ) y verticalmente ( $z$ ), de modo que la concentración de un contaminante en un corte transversal cualquiera de la columna sigue la distribución normal (gausiana) de probabilidad. Si además, para cualquier punto  $(x, y, z)$  de la columna la concentración  $C$  de contaminante en ese punto es tal que

$$C_{(x, y, z)} \propto \frac{1}{\bar{u}} \quad (\bar{u} = \text{velocidad media del viento})$$

$$C_{(x, y, z)} \propto Q \quad (Q = \text{intensidad de la fuente})$$

y

$$C_{(x, y, z)} \propto G \quad (G = \text{curva gaussiana normalizada en las direcciones } y \text{ y } z)$$

entonces

$$C_{(x, y, z)} = \frac{Q}{\bar{u}} G_y G_z$$

La expresión para la función gaussiana  $G_y$  normalizada de modo que el área de la curva es la unidad (Perkins, 1974) es

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$

y de forma similar para  $G_z$  de modo que

$$\begin{aligned} C_{(x, y, z)} &= \frac{Q}{\bar{u}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \\ &= \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (13.26)$$

en donde  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son las desviaciones estándar de la dispersión en las direcciones  $y$  y  $z$ , respectivamente,  $x = 0$  en la fuente (origen); en tanto  $y$  y  $z$  son cero en la línea media de la columna.

Para correlacionar esta expresión con el nivel del suelo en vez de la línea media de la columna podemos hacer que la altura de cualquier punto  $P$  de la columna sea una distancia  $Z$  arriba

del suelo. En este caso la altura vertical del punto  $P$  arriba de la línea media de la columna es  $Z - H$  (véase la figura 13-21) y la ecuación se transforma en

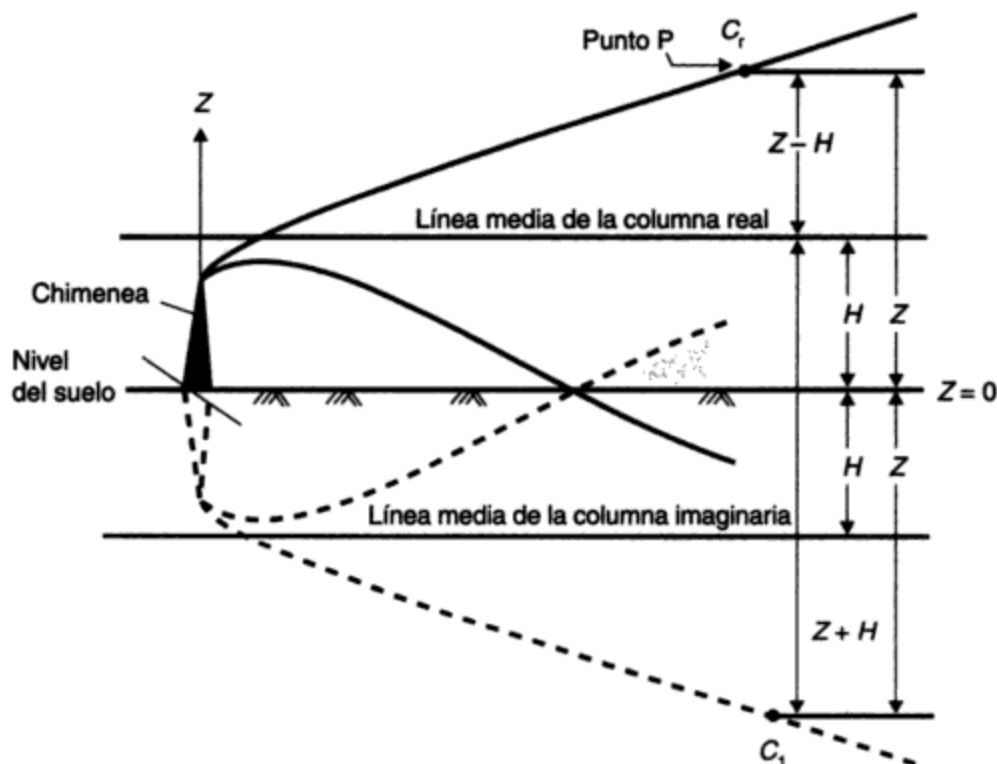
$$C_{(x, y, z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (13.27)$$

Siempre y cuando la columna no choque con el suelo (y que nuestros supuestos previos sean válidos), este modelo debe ser aplicable. Sin embargo, puesto que el suelo tiende a reflejar más que a eliminar contaminantes, se utiliza una técnica que supone un 100% de reflexión de los contaminantes para tomar en cuenta la mayor concentración de contaminantes en el nivel del suelo (véase de nuevo la figura 13-21). Se representa mentalmente una imagen en el espejo de la columna, y la concentración del contaminante en un punto imaginario (en un lugar  $Z + H$ ) se suma a la concentración en la columna real. La ecuación de difusión de columnas, en su forma más común, se transforma entonces en

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (13.28)$$

donde

- $C$  es la concentración del contaminante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en un receptor ubicado en  $(x, y, z)$



**Figura 13-21** Bosquejo de definición que muestra la dispersión de la columna en sentido vertical y la reflexión de los contaminantes en el nivel del suelo.

- $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son coeficientes de difusión en las direcciones  $y$  y  $z$ , respectivamente (m), y son funciones de la distancia  $x$  en la dirección del viento respecto a la fuente y de la estabilidad atmosférica
- $\bar{u}$  es la velocidad media del viento a través de la capa en la cual se produce la dispersión (m/s)
- $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas espaciales del receptor (m) respecto a la fuente (el eje  $x$  está orientado en la dirección del viento medio, y forma un ángulo recto respecto a  $x$  en el plano horizontal,  $z$  está en el plano vertical y  $Z$  es la coordenada vertical respecto al nivel del suelo)
- $H$  es la altura efectiva de emisión del contaminante (m)
- $Q$  es la tasa de emisión en la fuente (kg/s)

Algunos de los supuestos adoptados para desarrollar esta ecuación son los siguientes:

1. Todos los contaminantes se emiten desde una fuente puntual de concentración infinita.
2. El viento es uniforme en toda la capa donde se produce la dispersión, y se puede utilizar un viento promedio o medio en la ecuación. En la práctica, el viento que se utiliza es el que sopla en la parte superior de una chimenea para una fuente elevada, estimado con base en la ecuación (13.25).
3. La distribución de la concentración a lo largo de la anchura y la profundidad de la columna es gaussiana.
4. Los bordes de la columna se definen como la posición donde la concentración de contaminantes ha disminuido a un décimo del valor en la línea media de la columna.
5. El contaminante en cuestión no se pierde por desintegración, reacción química o precipitación (es decir, es conservativo). Se utiliza el método de imágenes para asegurar que los contaminantes no se pierdan en el suelo. (Se supone que todo el contaminante que choca con la superficie terrestre se "refleja" totalmente.)
6. La ecuación se debe utilizar sobre terreno relativamente llano y homogéneo. No se debe emplear de manera rutinaria en áreas costeras o montañosas, en cualquier zona donde los perfiles de los edificios son muy irregulares, o en donde la columna viaja sobre suelo desnudo cálido y después sobre superficies más frías cubiertas de nieve o hielo.
7. La ecuación representa un estado estacionario ( $\delta C/\delta t = 0$ ) en el periodo de cálculo del promedio.
8. Los contaminantes tienen la misma densidad que el aire que los rodea. Este supuesto se aproxima notablemente a la realidad en el caso de gases de chimenea provenientes de procesos en los cuales se queman combustibles fósiles; es satisfactorio para partículas pequeñas pero no para partículas con una velocidad de caída finita y significativa.

Observe que la ecuación se reduce a una forma más sencilla para las concentraciones en lugares específicos al nivel del suelo, como a una distancia  $y$  de la línea media ( $Z = 0$ ) o en la línea media de la columna ( $y = 0, Z = 0$ ).

Los valores de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se han determinado empíricamente y se grafican de manera conveniente como funciones de  $x$  y de la turbulencia atmosférica o de las categorías de estabilidad de la figura 13-22. La tabla 13-19 describe el método para determinar las categorías de estabilidad con base en la velocidad del viento, la hora del día (irradiación) y la cubierta de nubes. La categoría A corresponde a una atmósfera muy inestable, la F a una atmósfera muy estable

y la D a una casi neutra. Las curvas de la figura 13-22 corresponden a las columnas de fuente puntual continua a lo largo de periodos de promedio de 10 min, más o menos, y no se deben utilizar para describir la difusión de una fumarada en tres dimensiones. Con base en los datos de la figura 13-22, la ecuación (13.28) proporciona la concentración promedio de 10 min en una columna de las dimensiones que describen las líneas punteadas de la figura 13-20.

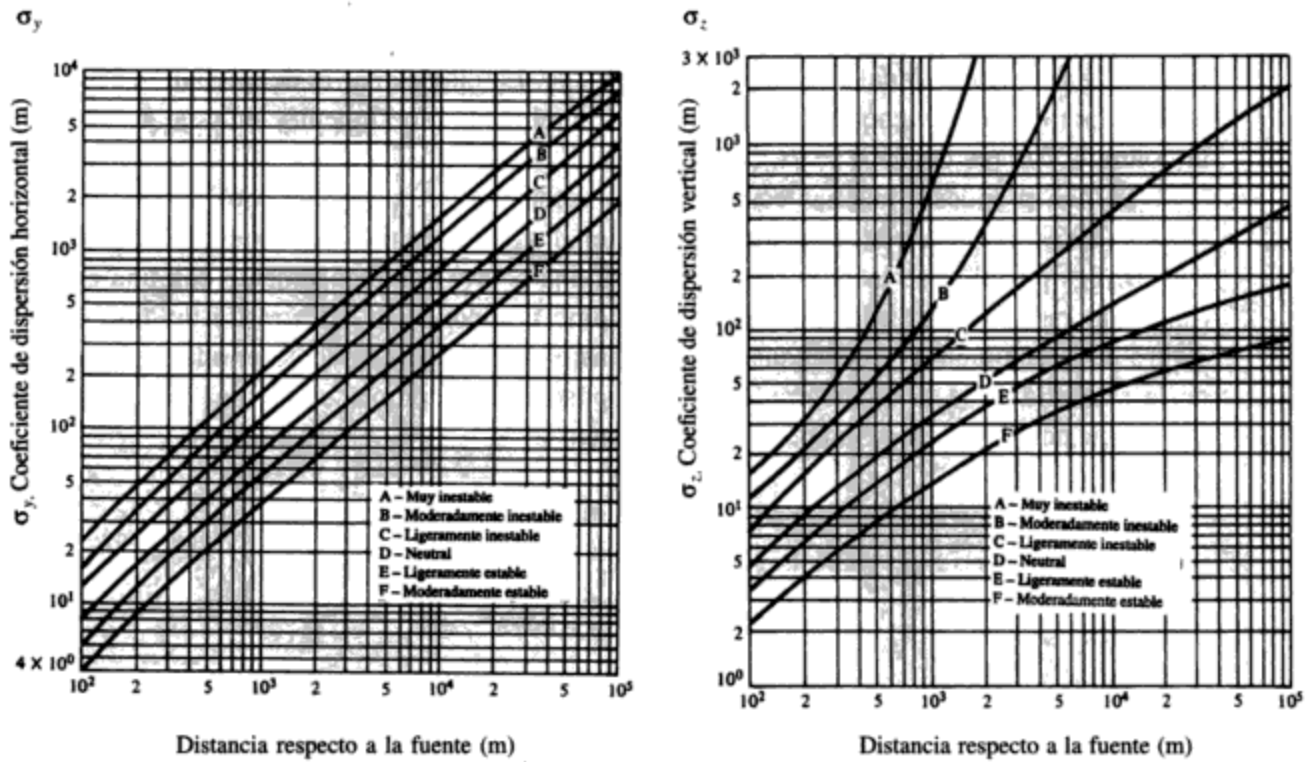


Figura 13-22 Coeficientes de dispersión de columna como función de la distancia en la dirección del viento respecto a la fuente. Fuente: Davis (1973).

TABLA 13-19 INTERPRETACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE ESTABILIDAD

Velocidad del viento en la superficie (a 10 m), (m/s)	De día: radiación solar que llega <sup>a</sup>			De noche: grado de nublados	
	Intensa	Moderada	Leve	$\geq 4/8$ de nubes bajas	$\leq 3/8$ de nubes bajas
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

<sup>a</sup>Las categorías A, B y C varían entre muy inestable y ligeramente inestable. La categoría D es neutra y se debe suponer para condiciones de nublados durante el día o la noche. Las categorías E y F indican condiciones ligeramente estables y moderadamente estables, respectivamente.

Fuente: Adaptado de Turner (1970).



### 13.5.3 Modelos de ascensión de columnas

La variable final que se requiere en la aplicación de la ecuación (13.28) es la altura efectiva  $H$  de la columna. La observación de una columna emitida desde una chimenea a una temperatura  $T_s$ , por encima de la temperatura  $T_A$  del aire ambiental muestra que la columna se eleva por encima de la parte superior de la chimenea debido a su ímpetu de descarga y su empuje ascendente térmico. Para columnas derivadas de la mayor parte de las fuentes de combustión, la ascensión por ímpetu es tan pequeña en relación con la elevación por empuje ascendente (debido a la alta temperatura de la columna) que se puede despreciar. La altura final  $H$  de la columna es la suma de la altura de la chimenea  $H_s$  y la ascensión combinada por ímpetu y empuje ascendente de la columna  $\Delta H$  (es decir,  $H = H_s + \Delta H$ ).

Se han propuesto muchas ecuaciones de ascensión de columnas, pero las que desarrolló Briggs (1969) con base en el análisis dimensional son las de uso más extendido en la actualidad. Briggs postuló que la ascensión de la columna ocurre simultáneamente con una expansión (difusión) relativamente rápida de la misma como consecuencia del arrastre de aire ambiental dentro de la columna. Por consiguiente, la ascensión de la columna debe ser además una función de la estabilidad de la atmósfera. Briggs propuso las ecuaciones siguientes para describir la ascensión por flotación de una columna caliente:

1. Para condiciones estables y próximas a la neutralidad,

$$\Delta H = 2.6 \left( \frac{F}{\bar{u}S} \right)^{1/3} \quad (13.29)$$

donde  $F$  es el flujo ascensional específico inicial de la columna emitida, definido por

$$F = \frac{g(T_s - T_A)W}{T_s} \left( \frac{D}{2} \right)^2 \quad (13.30)$$

donde  $g$  = aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ )

$T_s$  y  $T_A$  = temperaturas del gas emitido y del entorno, respectivamente, en el punto de emisión (K)

$W$  = velocidad de salida de la columna (m/s)

$D$  = diámetro de la chimenea en la parte superior (m)

$\bar{u}$  = velocidad media del viento de la profundidad en la capa atmosférica que suele tomarse como correspondiente a  $u$  a la altura  $H_s$  de la chimenea

$S$  = parámetro de estabilidad ( $1/s^2$ ) definido por

$$S = \frac{g}{T_A} \left[ \frac{\Delta T_A}{\Delta z} + 0.01^\circ C/m \right] \quad (13.31)$$

El coeficiente 2.6 de la ecuación (13.29) se determinó empíricamente, y el valor de  $\Delta T_A/\Delta z$  (la tasa de decaimiento de la temperatura) a través de la capa de ascensión de la columna se debe utilizar para determinar  $S$ .

2. Para atmósferas inestables donde en teoría la columna nunca dejaría de ascender como consecuencia del arrastre de aire ambiental,

$$\Delta H = 1.6 \frac{F^{1/3} x^{2/3}}{\bar{u}} \quad (13.32)$$

Para atmósferas inestables no existe un acuerdo general respecto a dónde se debe dar por terminada la ascensión de la columna, pero es razonable considerar que ha concluido la ascensión cuando la columna ha recorrido más o menos diez alturas de chimenea en la dirección del viento (esto es,  $x = 10H_s$ ).

### Ejemplo 13.8

Se espera que una fábrica procesadora de papel propuesta emita 500 kg de  $H_2S$  al día desde una sola chimenea. El receptor más cercano es una pequeña población situada 1,700 m al noreste del emplazamiento de la fábrica, y se espera que soplen vientos de suroeste durante el 15% del tiempo. La chimenea de la fábrica debe tener la altura suficiente para que la concentración de  $H_2S$  no sea mayor de 0.02 ppm ( $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en términos de masa) al nivel del suelo. Las características físicas de las emisiones y de la atmósfera ambiental son las siguientes:

Velocidad de salida del gas, $W$	20 m/s
Temperatura de salida del gas, $T_s$	122°C
Diámetro de la chimenea, $D$ , en la parte superior	2.5 m
Temperatura del aire ambiental, $T_A$	17°C
Velocidad del viento, $u$ supuesta para análisis conservativo	2 m/s
Tasa de decaimiento de la temperatura, $\gamma$	6°C/km (supuesta)

Calcule la altura necesaria de la chimenea de la fábrica.

**Solución** Con base en la ecuación (13.28), la concentración máxima al nivel del suelo ( $Z = 0$ ) se presenta en la línea media horizontal ( $y = 0$ ). En  $y = 0$ ,

$$\exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] = 1$$

y en  $Z = 0$ ,

$$\left\{ \exp\left[-\frac{(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} = 2 \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Por tanto, la ecuación (13.28) se reduce a la forma simplificada

$$C_{x,0,0} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \left\{ \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

La intensidad de la fuente es

$$Q = \frac{500 \text{ kg/día}}{86,400 \text{ s/día}} = 5.79 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Una tasa de decaimiento de temperatura de 6°C/km representa una atmósfera ligeramente estable; digamos, una categoría de estabilidad E.

En  $x = 1700$  m, para una estabilidad E, de la figura 13-22 tenemos que  $\sigma_y = 80$  m y  $\sigma_z = 30$  m. Despejando  $H$  obtenemos

$$30.3 \times 10^{-9} = \frac{5.79 \times 10^{-3}}{\pi \times 80 \times 30 \times 2} \left\{ \exp \left[ -\frac{H^2}{2 \times (30)^2} \right] \right\}$$

$$\exp \left[ \frac{H^2}{1800} \right] = \frac{30.3 \times 10^{-9} \times 3.14 \times 80 \times 30 \times 2}{5.79 \times 10^{-3}} = 0.079$$

$$e^{H^2/1800} = \frac{1}{0.079}$$

$$\frac{H^2}{1800} = \ln \frac{1}{0.079} = 2.51$$

$$H^2 = 4569$$

$$H = 67.6 \text{ m}$$

Ésta es la altura mínima de la línea media de la columna para la emisión necesaria para que  $C_{1700, 0, 0}$  no sea mayor de 20 ppb, es decir 0.02 ppm.

La ascensión de la columna  $\Delta H$  se estima con base en la ecuación (13.29) para una atmósfera ligeramente estable. Para las condiciones que se especifican,

$$F = \frac{g(T_s - T_A)W}{T_s} \left( \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{9.81 \times (395 - 290) \times 20}{395} \left( \frac{2.5}{2} \right)^2 = 81.4 \text{ m}^3/\text{s}^3$$

y de la ecuación (13.31), para  $\Delta T_A/\Delta z = 0.006^\circ\text{C}/\text{m}$

$$S = \frac{9.81}{290} (-0.006 + 0.01) = 1.35 \times 10^{-4} \text{ por s}^2$$

Por tanto, de la ecuación (13.29),

$$\Delta H = 2.6 \left( \frac{81.4}{2 \times 1.35 \times 10^{-4}} \right)^{1/3} = 174.3 \text{ m}$$

Puesto que la ascensión de la columna es mayor que la altura mínima aceptable de la misma, cualquier altura de chimenea sería suficiente para las condiciones que se especifican. La altura real de la chimenea se escogería después de repetir el cálculo muchas veces para diversas condiciones meteorológicas y de tomar en cuenta otros factores, como el daño a la vegetación a diferentes distancias en la dirección del viento.

#### 13.5.4 Otros modelos de dispersión de contaminantes y exactitud de las predicciones

Los ingenieros especializados en el control de la contaminación del aire emplean muchos otros tipos de modelos para predecir las concentraciones de contaminantes en el aire y para identificar fuentes específicas de contaminantes. Los modelos de transporte de largo alcance, que incluyen reacciones químicas y procesos de precipitación húmeda y seca, han experimentado un desarrollo intenso en la última década para predecir la precipitación ácida y la precipitación de sustancias químicas tóxicas en cuerpos de agua grandes y que son provenientes de fuentes distantes. Se han utilizado modelos elementales para predecir concentraciones de radionúclidos en columnas y fumaradas desde hace muchos años. Estos modelos han servido para cuantificar los términos

de la fuente en casos de emisiones accidentales de radionúclidos por cálculo inverso; es decir, si uno conoce la concentración en la dirección del viento en el punto  $(x, y, z)$  y el tiempo de recorrido, así como las tasas de desintegración y las condiciones meteorológicas, se puede estimar la intensidad de la fuente  $Q$ . En la actualidad se desarrollan intensivamente modelos de receptores con base en emisiones con "huella digital" para identificar fuentes de contaminantes. Por ejemplo, la gasolina contiene una proporción muy específica de bromo a plomo, de modo que estos elementos sirven para identificar la concentración de hidrocarburos que aportan los automóviles en una localidad receptora determinada  $(x, y, z)$ . Se recomienda al lector consultar a Yansky *et al.* (1966), Slade (1968), Turner (1980) y Hanna *et al.* (1982), en donde encontrará análisis excelentes y detallados de algunos de los modelos más comunes, junto con sus aplicaciones y usos. Existe software disponible para casi todos los modelos de uso más común, tanto del dominio público como de proveedores comerciales. Puttre (1994) ha elaborado un buen resumen de los modelos y de las fuentes de software que se utilizan en la actualidad en Estados Unidos.

## 13.6 COSTOS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El costo del equipo para el control de la contaminación del aire es muy variable, y depende de la eficiencia de extracción que se requiere, las características del contaminante y de la corriente gaseosa que lo contiene, incluso de la confiabilidad de rendimiento exigida y de la instrumentación auxiliar que se elija. Los costos de eliminación o los créditos por el material recolectado son importantes, y suele ser conveniente considerar la opción de conversión química o reutilización durante el proceso de recolección o extracción, con los cambios correspondientes en el valor del "residuo". En la siguiente sección se presentan los costos del control de emisiones para una planta generadora que consume combustibles fósiles y para los automóviles impulsados por gasolina.

### 13.6.1 Planta de energía eléctrica alimentada con carbón

Se examina una planta generadora de electricidad de 500 MW alimentada con carbón, con controles de particulados,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ . Los residuos particulados y los recogidos en lavadores se eliminan en una operación de relleno sanitario. Ha sido común la instalación de precipitadores electrostáticos (PES) o cámaras de sacos de flujo gaseoso inverso (CSFGI) para controlar las emisiones de partículas de este tipo de planta. No obstante, en la actualidad se investiga el uso de un filtro de tela de chorro pulsante (FTCHP) como alternativa en la industria generadora de electricidad para extraer particulados, ya que ofrece costos de capital más bajos.\* Se estiman los costos de capital y de operación para los PES, CSFGI y FTCHP en instalaciones nuevas con base en datos de Sloat *et al.* (1993). Se presentan además los costos de instalación y mantenimiento de un sistema lavador de piedra caliza para el control de emisiones de dióxido de azufre, el cual tiene una eficiencia de extracción cercana al 90% y opera a un factor de capacidad del 75% con eliminación de los residuos estabilizados en un relleno sanitario (véase el ejemplo 13.7) próximo a la planta. Los sistemas de control de emisiones de óxidos de nitrógeno todavía

\* Véase en Belba *et al.* (1992), Bustard *et al.* (1992) y Sloat *et al.* (1993) una serie excelente de artículos que describen el desarrollo y uso, así como las características de rendimiento y la economía comparativa del FTCHP.

La temperatura de radiación de cuerpo negro del Sol se calcula en 6,000 K, y la de la Tierra, con su atmósfera, es de 255 K.

- (a) Trace la curva de potencia de radiación en función de la longitud de onda en escala lineal para el Sol, y para la Tierra en hojas aparte.
  - (b) La radiación ultravioleta estimula las reacciones fotoquímicas atmosféricas. ¿Cuál es la fuente dominante de esta radiación de longitud de onda corta?
  - (c) Con base en las curvas trazadas explique el efecto de invernadero del CO<sub>2</sub>.
- 13.2. A la presión atmosférica del aire,  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  a 20°C y  $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ .
- (a) Grafique en papel logarítmico la velocidad de caída, en cm/s, de una gotita de agua en aire a 20°C en función del diámetro de la partícula (en  $10^{-6} \text{ m}$ ).
  - (b) La concentración más alta de polvo de la erupción del volcán El Chichonal del 3 de abril de 1982 se observó a 24 km de altura sobre la superficie terrestre (Robock y Matson, 1983). ¿Cuánto tiempo permanecería suspendida en la atmósfera una partícula de  $10 \mu\text{m}$  con una densidad de  $2100 \text{ kg/m}^3$ ?
  - (c) ¿Qué distancia recorrería la partícula en sentido horizontal durante este periodo si la velocidad media del viento en la capa atmosférica comprendida entre 24 km y la superficie terrestre fuera de 20 km/h?
- 13.3. Determine (a) la tasa de emisión de partículas (kg/s) de óxido de plomo (DR = 8.0) de un proceso y (b) la eficiencia de recolección global de un dispositivo para el control de partículas dadas las estadísticas siguientes:

Diámetro promedio de la clase ( $\mu\text{m}$ )	Número ( $\text{s}^{-1}$ )	Número (%)	Acumulativo (%)	Eficiencia de extracción del precipitador (%)
1.0	$48 \times 10^9$	15	15	40
5.0	$80 \times 10^9$	25	40	40
10.0	$112 \times 10^9$	35	75	80
20.0	$48 \times 10^9$	15	90	90
40.0	$32 \times 10^9$	10	100	99

- 13.4. Calcule las emisiones diarias de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno como NO<sub>2</sub> y materia particulada de una planta generadora de vapor de agua industrial equipada con un sistema de alimentación con carbón pulverizado de fondo seco. La planta quema 500 kg de carbón por hora, y el carbón contiene 12% de cenizas y 2.6% de azufre. La planta está equipada con un precipitador electrostático que alcanza una eficiencia del 95%.
- 13.5. Describa brevemente la diferencia entre un esmog oxidante y un esmog reductor. Utilice ecuaciones químicas si eso le permite *abreviar* su explicación.
- 13.6. Una expresión que describe la atenuación de la luz en la atmósfera debida a dispersión y absorción es

$$I = I_0 e^{-kx}$$

donde  $I$  es la intensidad de la energía electromagnética que recibe un receptor desde una fuente de intensidad  $I_0$  después que la luz ha recorrido una distancia  $x$  en una atmósfera con un coeficiente de extinción de  $k$ .

- (a) Si la extinción del NO<sub>2</sub> es de 1 ppm/m para luz de  $0.4 \mu\text{m}$ , ¿qué fracción de la energía de  $0.4 \mu\text{m}$  resta después de que un haz de luz ha atravesado 5 mi (8 km) de aire que contiene 0.2 ppm de NO<sub>2</sub>?

- (b) La observación indica que la visibilidad, definida como la distancia más grande a la que un objeto negro se puede ver e identificar, se presenta cuando  $I/I_0 = 0.02$  a  $0.05$ . ¿Cuál es la visibilidad en la atmósfera que se describe en la parte (a)?
- 13.7. En un día de verano, cuando la velocidad del viento es de 3 m/s, un camión cisterna cargado con cloro líquido se ve envuelto en un accidente que ocasiona una pequeña rajadura en el tanque y una fuga de 30 kg/min en la parte superior del tanque. (El cloro que escapa está en forma de vapor.) El accidente ocurre en la vía rápida que atraviesa una ciudad, en un lugar donde hay tres edificios de apartamentos muy grandes a unos 300 m en la dirección del viento. El valor límite del umbral para el cloro es de 3 mg/m<sup>3</sup>. (Sugerencia: En la solución, suponga que en una estimación de emergencia, y para todo fin práctico, la densidad de los gases se puede despreciar y la fuga ocurre al nivel del suelo.)
- (a) ¿Daría usted la orden de evacuar los edificios de apartamentos?
- (b) ¿A qué distancia en la dirección del viento establecería barricadas para mantener a las personas alejadas del accidente en el nivel de la calle?
- (c) El departamento de bomberos propone acercarse al camión por el lado contrario al viento y rociarlo abundantemente con agua para evitar una explosión. ¿Ayudará esto a reducir la concentración de cloro en la zona ubicada en la dirección del viento?
- 13.8. Para una cámara de sedimentación por gravedad determine la longitud necesaria para recolectar las partículas de 50 μm de diámetro si el gasto es de 1,000 m<sup>3</sup>/min, el ancho de la cámara es de 5 m, su altura es de 2 m y la densidad relativa de las partículas es de 2.5. Suponga que la temperatura del aire es de 20°C. La buena práctica en el diseño de cámaras de sedimentación demanda una velocidad general de menos de 3 m/s. ¿Satisface ese diseño este requisito?
- 13.9. Compare las fuerzas gravitatorias que actúan sobre una partícula de mercurio que cae en el aire y las fuerzas centrífugas que actúan sobre la misma partícula que se mueve a una velocidad tangencial de 300 m/s con un radio de 1 m.
- (a) Suponga que la partícula mide 100 μm.
- (b) Suponga que la partícula mide 1 μm.
- (c) ¿Sugiere la relación de fuerzas que un ciclón sería relativamente mejor que una cámara de sedimentación para separar las partículas?
- (d) Si su respuesta es afirmativa, ¿por qué se utilizan cámaras de sedimentación?
- (e) ¿Podría el mismo ciclón recolectar gotitas de mercurio y de aceite del mismo tamaño simultáneamente?
- (f) ¿Podría el mismo ciclón recolectar gotitas de mercurio y partículas de uranio simultáneamente?
- (g) Si se necesita una eficiencia del 85%, ¿se podría utilizar un ciclón para recolectar las gotitas de 1 μm?
- 13.10. Se propone una planta termoeléctrica que consume combustibles fósiles, compuesta de cuatro unidades de 500 MW para una capacidad total de 2,000 MW. El factor de carga de diseño es de 60% (esto es, se espera que la planta opere al 60% de la capacidad máxima de diseño en promedio a lo largo de un año). Los combustibles potenciales son hulla y aceites pesados, con contenidos de cenizas de 10 y 0.8%, respectivamente. Las emisiones de dióxido de azufre se van a controlar a un máximo de 1.2 lb de SO<sub>2</sub> por 10<sup>6</sup> Btu de combustible para alimentación con hulla o de 0.8 lb de SO<sub>2</sub> por 10<sup>6</sup> Btu para alimentación con aceite, suponiendo que todo el azufre del combustible se transforma en SO<sub>2</sub> en los gases de escape. Las emisiones de partículas se van a controlar por medio de un dispositivo cuya eficiencia es del 99.5% para alimentación con aceite o con hulla.
- (a) ¿Qué dispositivos o métodos se pueden utilizar para controlar:
- Las emisiones de partículas al nivel requerido?
  - Las emisiones de dióxido de azufre al nivel requerido?
  - Las emisiones de dióxido de nitrógeno?
- (b) ¿Cuáles de los dispositivos o métodos consideraría usted como más aceptables y por qué?

- (c) ¿Por qué controlaría usted las emisiones de cada uno de estos contaminantes?
- (d) Estime la tasa de emisión por hora de cada uno de los contaminantes para cada combustible.
- (e) Los costos anuales de propiedad, operación, mantenimiento y fijos (principalmente intereses) de un lavador de  $\text{SO}_2$  son de alrededor de \$70/kW de capacidad instalada para una planta alimentada con hulla (dólares de 1987) y de alrededor de \$50/kW para una planta alimentada con aceite. Los costos correspondientes de un PES son alrededor de \$24/kW de capacidad instalada para una planta alimentada con hulla y de \$16/kW para una planta alimentada con aceite. Compare los costos combinados del combustible y la contaminación del aire para la planta propuesta tomando en cuenta las restricciones mencionadas. (Advierta que estos costos no incluyen los gastos de manejo y eliminación de cenizas o lodos; para simplificar, no intente incluirlos aquí.)
- 13.11. Se ha dicho que las cargas de partículas atmosféricas han disminuido considerablemente durante los últimos 40 años, pero los efectos de las partículas en la salud no han cambiado de forma significativa a lo largo del mismo periodo y, de hecho, podrían ser mayores. ¿A qué podría deberse esto?
- 13.12. ¿Cuáles son los contaminantes principales que produce el motor de un automóvil? ¿Por qué controlaría usted cada uno de estos contaminantes? ¿Es su efecto significativo en términos locales (digamos, en un radio de 40 km), regionales (en un radio de 800 km), internacionales o mundiales?
- 13.13. Se está considerando una cámara de sacos (filtro de tela) y un lavador Venturi para separar las partículas de los gases de escape de un horno de oxígeno básico en una planta de acero. Analice los méritos relativos de cada tipo de equipo de control, de preferencia en forma tabular, bajo los encabezados siguientes:
- Tamaño de partícula
  - Temperatura
  - Características abrasivas de las partículas
  - Partículas ácidas o alcalinas
  - Eficiencia
  - Condensación (en el gas de escape o en las partículas)
  - Métodos de eliminación de las partículas
  - Costos de operación
  - Costo de capital (inicial)
  - Variación en el gasto de gases de escape
  - Variación en la carga de partículas de los gases de escape
  - Composición química de los gases de escape (ácidos, álcalis, reacción con o en el dispositivo de control)
- 13.14. Una planta generadora de 2,000 MW quema 278 toneladas de combustóleo residual por hora. El combustible contiene 2.6% de S y 1.2% de cenizas. La planta está equipada con sistemas para el control de emisiones de partículas, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. El colector de partículas debe operar a eficiencias superiores al 98% porque la ceniza es valiosa por su contenido de vanadio. El dispositivo de extracción de dióxido de azufre trabaja a una eficiencia nominal del 80%.
- (a) Estime las emisiones de  $\text{SO}_2$  y de partículas por hora de la planta.
- (b) ¿Qué tipo de colector de partículas utilizaría usted en la planta? Indique tres razones por las cuales eligió este tipo de colector.
- (c) ¿Qué tipo de dispositivo de extracción de  $\text{SO}_2$  utilizaría usted antes o después del colector de partículas?
- (d) ¿Cómo controlaría usted las emisiones de óxidos de nitrógeno?
- 13.15. Un horno de sinterización de plomo descarga partículas y  $\text{SO}_2$  por una chimenea de 150 m. Los gases y partículas calientes ascienden 100 m más por encima de la parte superior de la chimenea cuando la velocidad del viento es de 5 m/s y la tasa de decaimiento de la temperatura es de  $6^\circ\text{C}/\text{km}$ .

- ¿Qué distancia en la dirección del viento recorrerá una partícula de  $10\ \mu\text{m}$  antes de caer al suelo? Suponga un terreno llano y velocidad de caída de Stokes para la partícula.
- 13.16. (a) ¿Cuáles son los contaminantes principales que se emiten desde el tubo de escape de un automóvil?  
 (b) ¿Por qué es importante cada contaminante?  
 (c) Mencione un método o dispositivo de control que se utilice en los automóviles actuales para controlar cada contaminante.
- 13.17. En Chicago, los cálculos del inventario de 1990 atribuyeron sólo el 25% de los COV a fuentes móviles, el 33% al uso de disolventes y el resto a áreas, servicios y otras fuentes puntuales. Si esta distribución del inventario de emisiones se utiliza para estimar las emisiones de COV en la atmósfera de Chicago, ¿cuál es el volumen total de COV que se emite cada día? Suponga que había 1,100,000 vehículos que hacían un viaje redondo de 28.5 mi (45.8 km) por día, que la tasa promedio de emisión vehicular de COV es de 1.3 g/VM, y que el peso molecular de las emisiones de COV de fuentes móviles está representado por el del metano (véase el ejemplo 13.1).
- 13.18. El horno que da servicio a un generador de 500 MW descarga alrededor de  $6.1 \times 10^2\ \text{m}^3/\text{s}$  de gases de escape.  
 (a) Con base en las dimensiones típicas de un PES dadas en la sección 13.4.3, estime el tamaño en conjunto del PES para esta unidad. Compare esto con las dimensiones de su casa.  
 (b) La temperatura de los gases de escape de la unidad es de 420 K. ¿Se podría instalar un filtro de tela en lugar del PES?
- 13.19. En el ejemplo 13.7 se estimó que se descargarían 90 kg/h de ceniza fina en la atmósfera después de recolectar las partículas con el lavador y el PES. El porcentaje en peso de las partículas de diversos tamaños es nominalmente

Intervalo de tamaño ( $\mu\text{m}$ )	0-5	5-10	10-20	20-44	>44
En peso emitido %	15	31	29	23	2

- (a) Calcule la masa de las partículas que se descargan de cada intervalo de tamaño.  
 (b) Calcule el número de partículas descargadas de cada intervalo de tamaño. Suponga, para simplificar, que todas las partículas corresponden al punto medio del intervalo de tamaño, que la densidad de la ceniza fina es de  $1,100\ \text{kg}/\text{m}^3$  y que las partículas son esféricas.  
 (c) Si la altura efectiva de la chimenea de la planta es de 250 m y el único mecanismo de separación de las partículas es la precipitación, calcule el tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera.  
 (d) Analice la trascendencia de sus cálculos, con énfasis en la salud.
- 13.20. Una planta sinterizadora de plomo tiene 10 máquinas sinterizadoras en operación, como se describe en el ejemplo 13.4. Se descargan gases de escape a 10 m/s y  $100^\circ\text{C}$  desde una chimenea de 50 m de altura y 0.75 m de diámetro en la parte superior. En un día de primavera la temperatura atmosférica es de  $15^\circ\text{C}$ , la tasa de decaimiento es de  $8^\circ\text{C}/\text{km}$  y la velocidad del viento es de 5 m/s.  
 (a) Estime la concentración máxima de  $\text{SO}_2$  al nivel del suelo a 1,500 m de la chimenea si se instala el sistema de control descrito en el ejemplo 13.4.  
 (b) ¿Satisface este valor el estándar de  $\text{SO}_2$  de Estados Unidos?  
 (c) Si la planta trabaja sin el sistema de control instalado, ¿cuál será la concentración en las mismas condiciones?  
 (d) Grafique la distribución de concentraciones en la dirección del viento desde 200 hasta 2,000 m de distancia respecto a la chimenea en la línea media de la columna, al nivel del suelo y en las condiciones que se especifican.



- (e) Grafique la distribución vertical de concentraciones en la columna en la línea media horizontal de la misma, a 1,500 m en la dirección del viento respecto a la columna en las condiciones que se especifican.
- (f) Grafique la distribución horizontal de concentraciones al nivel del suelo, a 1,500 m en la dirección del viento respecto a la columna en las condiciones que se especifican.

## REFERENCIAS

- BELBA, B. H., GRUBB, W. T. y CHANG, R. L. "The Potential of Pulse-Jet Baghouses for Utility Boilers". Parte 1, "A Worldwide Survey of Users". *Journal of the Air and Waste Management Association*, 42(1992): 209-217.
- BRIGGS, G. A., *Plume Rise*. Washington, D.C.: U.S. Atomic Energy Commission, 1969.
- BUSTARD, C. J., CUSHING, K. M. y CHANG, R. L. "The Potential of Pulse-Jet Baghouses for Utility Boilers". Parte 2, "Performance of Pulse-Jet Fabric Filters Pilot Plants". *Journal of the Air and Waste Management Association*, 42(1992): 1240-1249.
- CADLE, S. H., GORSE, R. A. y LAWSON, D. R. "Real World Vehicle Emissions: A Summary of the Third Annual CRC-APRAC On-Road Vehicle Emissions Workshop". *Journal of the Air and Waste Management Association*, 43(1993): 1084-1090.
- CHILTON, K. y LIS, J. "Do We Need a New Smog Standard?" *Environmental Engineer, Journal of the American Academy of Environmental Engineers* 29 (3), julio (1993).
- DAVIS, M. L. *Air Resources Management Primer*. Nueva York: American Society of Civil Engineers, 1973.
- FINLAYSON-PITTS, B. J. y PITTS, J. N. "Atmospheric Chemistry of Tropospheric Ozone Formation: Scientific and Regulatory Implications". *Journal of the Air and Waste Management Association*, agosto (1993): 1091-1100.
- FRUCHTER, J. S. *et al.* "Mount St. Helens Ash from the May 18, 1980 Eruption: Chemical, Physical, Mineralogical and Biological Properties". *Science*, 5 de septiembre (1980): 1116-1124.
- GILBERTSON, M. y SCHNEIDER, R. S. "IJC Workshop on Cause-Effect Linkages". Número especial, *Toxicology and Environmental Health* 33(4)(1991): 587-640.
- HAAGEN-SMIT, A. J. "Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog". *Industrial Engineering Chemistry*, 44(1952): 1342-1346.
- HALVORSEN, R. y RUBY, M. G. *Benefit-Cost Analysis of Air Pollution Control*, Lexington, Mass.: Lexington Books, 1982.
- HANNA, S. R., BRIGGS, G. A. y HOSKER, R. P. JR. *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1982.
- I J C. "Seventh Biennial Report on Great Lakes Water Quality" y "Supplemental Information to the Seventh Biennial Report". I J C Report ISBN 1-895085-74-8. Windsor: International Joint Commission, 1994.
- INTERNATIONAL AIR QUALITY ADVISORY BOARD. "Progress by the parties in completing an inventory of toxic air emission and in assessing toxic air deposition in the Lake Superior Basin". Informe para la Comisión Conjunta Internacional (Ottawa): International Joint Commission, 1993.
- KOKKINOS, A., CICHANOWICZ, J. E., ESKINAZI, D., STALLINGS, J. y OFFEN, G. "NO<sub>x</sub> Controls for Utility Boilers: Highlights of the EPRI July, 1992 Workshop". *Journal of the Air and Waste Management Association* 42(1993): 1498-1505.

- LAWSON, D. R. "Passing the Test: Human Behaviour and California's Smog Check Program". *Journal of the Air and Waste Management Association*, diciembre (1993): 1567.
- PITTS, J. N. JR., *et al.* "Comment on 'Effect of Nitrogen Oxide Emission Rates on Smog Formation in the California South Coast Air Basin' and 'Effect of Hydrocarbon and NO<sub>x</sub> on Photochemical Smog Formation Under Simulated Transport Conditions'". *Environmental Science and Technology* 17(1983): 54-63.
- PERKINS, H. C. *Air Pollution*. Nueva York: McGraw-Hill, 1974.
- PUTTRE, M. "Environmental Modelling Helps Clean the Air". *Mechanical Engineering*, enero (1994): 44-51.
- RANDERSON, D. (ed.) *Atmospheric Science and Power Production*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1981.
- ROBOCK, A. y MATSON, M. "Circumglobal Transport of the El Chichon Volcanic Dust Cloud". *Science*, julio (1983): 195-197.
- SLADE, D. H. (ed.) *Meteorology and Atomic Energy*. Springfield: VA. U.S. Department of Commerce, 1968.
- SLOAT, D. G., GAIKWAD, R. P. y CHANG, R. L. "The Potential of Pulse-Jet Baghouses for Utility Boilers". Parte 3, "Economics of Pulse-Jet Baghouses, Precipitators and Reverse Gas Baghouses", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 43(1993): 120-128.
- TURNER, D. B. *Workbook of Atmospheric Diffussion Estimates*. Springfield: VA. US Department of Commerce. U.S. PHS *Air Pollution in Donora, Pa*, Bulletin 306, Cincinnati: Public Health Service. 1949.
- WANG, W. *et al.* *Emission Control Hardware Costs in California*. Report 80144. Toronto: Ontario Hydro. 1993.
- YANSKEY, G. R., MARKEA, E. H. y RICHTER, A. P. *Climatology of the National Reactor Testing Station*. Springfield: VA. U.S. Department of Commerce, 1966.

# CAPÍTULO 14

---

## Residuos sólidos

*J. Glynn Henry*

### 14.1 INTRODUCCIÓN

En su sentido más amplio, el término *residuos sólidos* incluye todos los materiales sólidos desechados de actividades municipales, industriales o agrícolas. Sin embargo, para la exposición que sigue, se entenderá por residuos sólidos sólo aquellos que son responsabilidad de un municipio y que usualmente son recolectados por él. Las áreas residenciales y comerciales, junto con ciertas operaciones industriales, son las fuentes de estos residuos municipales “no peligrosos”.

La caracterización de los residuos o desechos sólidos municipales es difícil a causa de la diversidad de sus componentes, muchos de los cuales no se deberían “desperdiciar”. Los objetivos de la administración de los residuos sólidos son controlar, recolectar, procesar, utilizar y eliminar los residuos sólidos de la manera más económica congruente con la protección de la salud pública y los deseos a quienes el sistema da servicio.

Para este fin, en 1989 la Environmental Protection Agency (EPA; Agencia de protección al ambiente) de EUA adoptó una jerarquía de prácticas de administración de residuos, las cuales estaban destinadas a utilizarse como una guía por las comunidades durante la elaboración de planes de administración de residuos (U.S. EPA, 1989). Los cuatro elementos de la jerarquía, en orden de preferencia, son los siguientes:

1. Reducción en la fuente (incluye volver a utilizar los productos y llevar a cabo la formación casera de la conversión en abono [o estercolar la tierra con residuos de traspatio]).

2. Reciclaje de materiales
3. Combustión (de preferencia con recuperación de energía)
4. Rellenos de tierras

El impacto de la jerarquía de administración de residuos de la EPA y de iniciativas similares en los niveles locales se advierte en la reciente tendencia a una mayor recuperación de productos para reciclaje y conversión en abono, y a una reducción en la eliminación de residuos sólidos municipales (RSM) en rellenos de tierras (U.S. EPA, 1992).

En este capítulo se estudian los aspectos operativos de la administración de los RSM, así como los problemas y tendencias administrativas fundamentales. Se presenta además un análisis de la reducción en la fuente, el reciclaje y la recuperación de energía, que son las prioridades principales en la jerarquía de la EPA. La información referente a las cantidades y características de los residuos sólidos ayuda a explicar por qué estos "desechos" constituyen ahora una preocupación importante y por qué la conservación de estos "recursos" es objeto de atención creciente. En las secciones subsecuentes nos ocuparemos de la recolección, separación, procesamiento, transformación y eliminación final de los RSM. Los criterios para los distintos diseños de rellenos y los problemas que presenta su operación, entre ellos el control de lixiviados y de los gases, se tratan en detalle.

## 14.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

### 14.2.1 ¿Qué son los residuos sólidos?

En términos generales, los *residuos sólidos* se definen como aquellos desperdicios que no son transportados por agua y que han sido rechazados porque ya no se van a utilizar. En el caso de los residuos sólidos municipales se aplican términos más específicos a los residuos de alimentos putrescibles (biodegradables), llamados *basura*, y a los residuos sólidos no putrescibles, los cuales se designan simplemente como *desechos*. Los desechos incluyen diversos materiales, que pueden ser combustibles (papel, plástico, textiles, etc.) o no combustibles (vidrio, metal, mampostería, etc.). La mayor parte de estos residuos se desechan con regularidad desde localidades específicas. Existen residuos, en ocasiones llamados *especiales*, como el cascajo de las construcciones, las hojas de los árboles y la basura callejera, los automóviles abandonados y también los aparatos viejos, que se recolectan a intervalos esporádicos en diferentes lugares.

En los componentes de los residuos municipales que hemos descrito no se incluyen muchos otros sólidos que no constituyen normalmente una responsabilidad municipal. Cosas tales como cenizas de plantas generadoras de electricidad alimentadas con carbón, lodos de plantas para el tratamiento de aguas municipales, residuos de predios de crianza de animales, desechos de minas y otros residuos sólidos industriales pertenecen a esta categoría y requieren arreglos por separado para su eliminación. Según Tchobanoglous *et al.* (1977), la porción municipal de los residuos sólidos totales generados representa sólo el 5%, pero es objeto de la máxima atención en virtud del efecto que su eliminación incorrecta puede tener en la salud pública y en el abasto de aguas tanto superficiales como subterráneas.

### 14.2.2 Cambios en los residuos sólidos municipales

Hasta finales de la década de 1940, el grueso de los residuos sólidos municipales consistía en cenizas de hornos quemadores de carbón y residuos de alimentos. Los pocos materiales usados, como metales y trapos, que eran recuperables, se recolectaban de manera informal por los pepenadores. Con el desplazamiento de la floreciente población de los años cincuenta a las ciudades, la densidad de la población urbana aumentó, creció la popularidad de la calefacción con petróleo y gas natural, y la sociedad se hizo cada vez más industrializada. Las dos causas radicales de la creciente urgencia de los problemas que plantean los residuos sólidos son la urbanización y la industrialización. La primera (la afluencia de personas a las áreas metropolitanas) afecta los hábitos de vida y en consecuencia las características de los residuos. Además, en virtud del mayor número de personas, las áreas que requieren recolección de residuos sólidos se han expandido y los predios destinados a la eliminación de los residuos están más lejos. La industrialización, debido a que genera productos de bajo costo y que ahorran trabajo, ha creado una sociedad "desechable". Durante los años sesenta y setenta apareció una profusión de productos nuevos. En el caso de latas, botellas, recipientes de plástico, aparatos, neumáticos y muchos otros artículos se consideraba que era más económico tirarlos que reciclarlos. La recuperación de materiales se ha hecho más difícil en virtud del uso de numerosos materiales sintéticos, plásticos ligados y aleaciones no ferrosas. Los empaques de alimentos de preparación rápida, ferretería, artículos para el hogar y otras mercancías ha creado un enorme conjunto de materiales fáciles de desechar. Los residuos sólidos aumentaron de manera significativa en cuanto a cantidad y complejidad con el advenimiento de la sociedad "desechable" y el crecimiento de la industria de alimentos empaquetados y procesados. La figura 14-1 indica los cambios que han experimentado los residuos sólidos a lo largo de los años. Desde luego, las regiones individuales pueden mostrar tendencias, proporciones y cualidades muy diferentes, y por ello los estudios de los problemas de manejo de residuos sólidos deben tener como base escrutinios específicos de cada localidad.

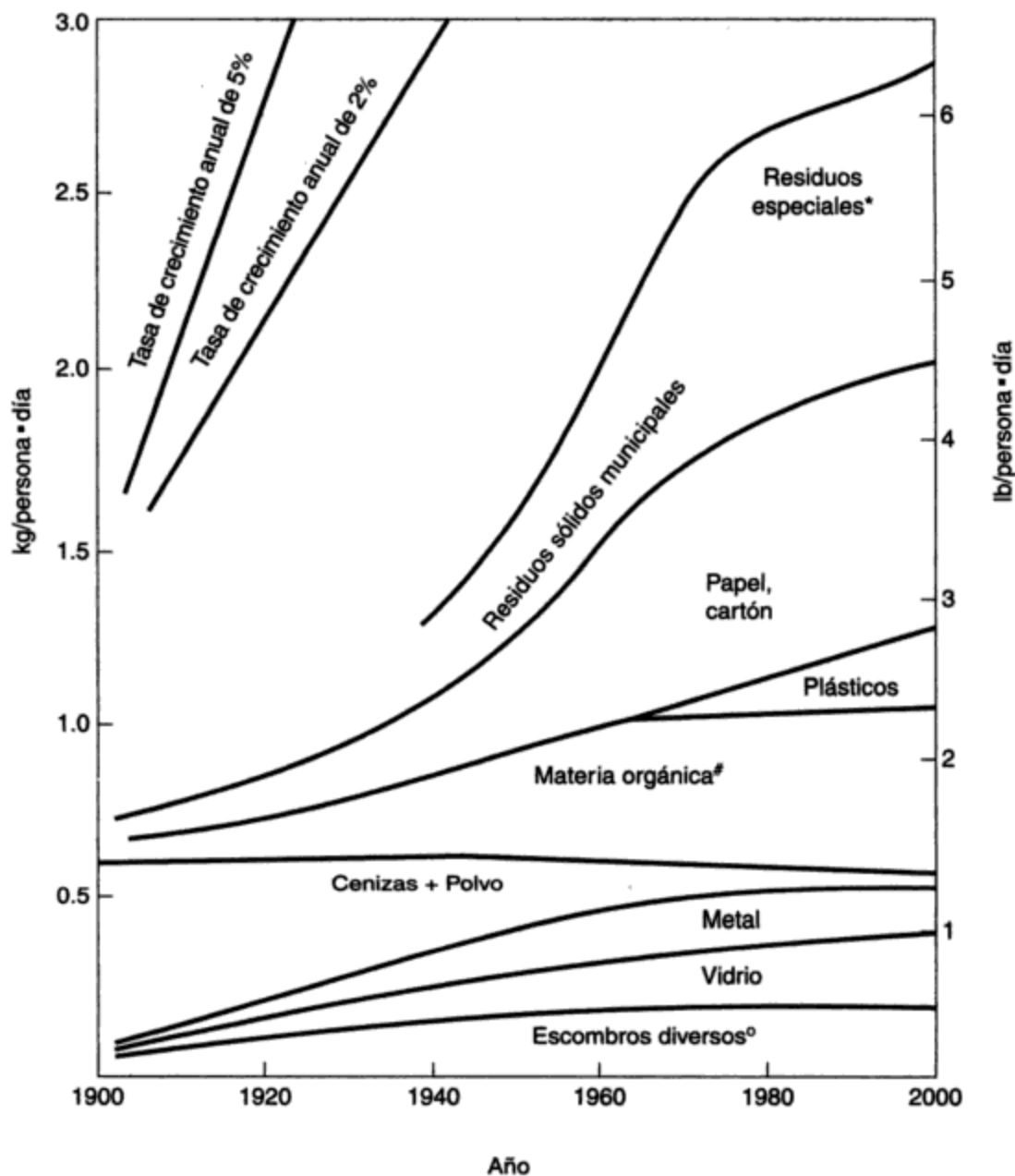
En la actualidad se generan más residuos de alimentos en las plantas procesadoras que en los hogares o granjas. Aunque éstos son un problema a causa de su gran volumen, alta concentración, índole estacional y ubicación rural, el cambio ha hecho posible un mejor control a través de un enfoque de eliminación de desechos que abarca toda la industria y cuyos costos cubren los usuarios de los productos. El crecimiento de la industria procesadora de alimentos no parece haber modificado la cantidad de residuos de alimentos que generan los residentes urbanos, pero el aumento en los empaques asociado con los alimentos de preparación rápida es sin duda una parte de la razón de la creciente producción de residuos per cápita.

#### Ejemplo 14.1

En 1920 se requerían cinco camiones para recolectar 6,400 toneladas (es decir, 5,800 toneladas métricas\*) al año de residuos residenciales y comerciales de un municipio de 20,000 habitantes. Para el 2000, cuando se espera que la población alcance las 100,000 personas:

- (a) ¿Cómo habría cambiado la cantidad anual de desechos recolectada si no se incluyeran los residuos "especiales" en las cantidades anuales?
- (b) Sin tomar en cuenta el tiempo perdido por descompostura y mantenimiento de los vehículos, ¿cuántos camiones de 5 toneladas de capacidad (o sea 4.5 toneladas métricas), trabajando

\*La tonelada americana, también llamada tonelada corta, es igual a 2,000 lb (es decir 907.2 kg), mientras que la tonelada larga es de 2,240 lb (esto es 1,016 kg), y la tonelada métrica (*tonne*, en inglés) equivale a 1,000 kg.



**Figura 14-1** Cambios en la generación de residuos sólidos en Estados Unidos desde 1900. Fuente: D. C. Wilson, Ed., *Handbook of Solid Waste Management* (Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1977); W. R. Niessen, "Estimation of Solid-Waste-Production Rates", pp. 544-574, y D. G. Wilson, "History of Solid Waste Management", pp. 1-9. *Characterization of Municipal Solid Waste in the U.S.*, actualización de 1992, U.S. EPA/530-R-92-109.

Nota: Los estimados para Estados Unidos han sido adaptados de información disponible para Edimburgo (1900), Londres (1925), Nueva York (1940) y Estados Unidos (1960, 1970, 1980, 1990, 2000).

\*Los residuos especiales incluyen cascajo de construcción, limpieza de calles, objetos grandes desechados, etc.

#La materia orgánica incluye residuos de alimentos y de jardín.

°Escombros diversos incluye caucho, cuero, textiles y madera.

5 días por semana, se requerirían para efectuar recolecciones dos veces por semana si los camiones transportaran en promedio 2 cargas/día al 80% de su capacidad?

(c) ¿Cómo cambió la cantidad de papel durante este periodo de 80 años?

**Solución**

(a) Cantidad en 1920 = 6,400 ton/año

$$= \frac{6,400 \times 2,000}{20,000 \times 365} = 1.75 \text{ lb/persona} \cdot \text{día (contra 1.85 de la figura 14-1)}$$

Cantidad en 2,000 = 4.5 lb/persona · día (de la figura 14-1)

$$= \frac{4.5 \times 100,000}{2,000} \times 365 = 82,125 \text{ ton/año (un aumento de alrededor de 13 veces la cantidad de 1920)}$$

(b) Capacidad anual de un camión =  $\frac{5 \text{ ton}}{\text{cargas}} \times \frac{2 \text{ cargas}}{\text{días}} \times \frac{5 \text{ días}}{\text{semanas}} \times \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} \times 80\%$

$$\text{Capacidad} = 2080 \text{ ton/año}$$

$$\text{Camiones necesarios} = \frac{82,125}{2,080} = 39.5 = 40 \text{ (ocho veces el número utilizado previamente)}$$

(c) En 1920, papel = 14% = 0.14 × 6,400 = 896 ton

En 2000, papel = 38% = 0.38 × 82,125 = 31,200 ton (un aumento de 35 veces en cuanto a papel)

**14.2.3 Cantidades**

En la tabla 14-1 se indican las tasas típicas de generación de residuos sólidos municipales e industriales. Las cantidades de residuos residenciales y comerciales que se generan en el Reino Unido y en otros países europeos (Francia, Alemania, Suecia) son alrededor del 40% de las que se producen en Estados Unidos (OCDE, 1991).

**TABLA 14-1 ESTIMADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS POR PERSONA EN ESTADOS UNIDOS, Y EN PARTICULAR EN CALIFORNIA Y FLORIDA PARA 1990**

Fuente de residuos sólidos	Estados Unidos		California		Florida	
	kg/persona · día	lb/persona · día	kg/persona · día	lb/persona · día	kg/persona · día	lb/persona · día
Municipal <sup>a</sup>	2.8	6.1	3.1	6.8	2.7	6.0
Industrial	1.0	2.1	1.2	2.7	0.6	1.4
Agrícola	b	b	3.7	8.2	1.2	2.7
Total	3.1-9.6	6.8-21	8.1	17.8	4.4	9.6

<sup>a</sup>Incluye residencial a 1.1 kg/día, comercial a 0.9 kg/día, y residuos especiales a 0.8 kg/día. Véanse los componentes de los residuos sólidos municipales y los residuos especiales en la figura 14-1.

<sup>b</sup>Estimados por separado para cada lugar.

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (1993).

En las áreas húmedas, a causa de la humedad que absorben los residuos sólidos, la cantidad que se recolecta puede ser mayor que la que se genera, la cual usualmente se informa en base seca. Por otra parte, con el uso de molinos domésticos, almacenamiento local de materiales reciclables y otras medidas de conservación, la cantidad recolectada puede ser inferior a la generada. En este capítulo no se toman en cuenta las diferencias entre las cantidades generadas y las recolectadas porque las variaciones debidas a otros factores son mucho más significativas.

Durante la década de 1960 la cantidad de residuos sólidos generados aumentaba a razón de 3.5% por año, una tasa comparable con el producto nacional bruto (PNB) de la época. En los ochenta, el incremento anual descendió a 2.8% por año, y se espera que disminuya aún más en los noventa hasta alrededor de 1.3% por año (U.S. EPA, 1992). En 1990, la EPA estimaba que la generación de residuos sólidos municipales en Estados Unidos era alrededor de 4.3 lb/persona · día (2 kg/persona · día). Esta estimación se compara favorablemente con la de Tchobanoglous *et al.* (1993), quien informó un valor de 6.1 lb/persona · día (2.8 kg/persona · día) de residuos sólidos, cuando se incluyen cosas como residuos de construcción y demolición y lodos de plantas de tratamiento (estos componentes no se incluyen en los datos de la EPA). En la tabla 14-1 se pueden ver las tasas de generación nacionales y estatales. Debe quedar claro, no obstante, que los valores promedio están sujetos a amplias variaciones de un municipio a otro y de estación a estación, y con respecto a la metodología que se utiliza para estimar las tasas de generación.

#### 14.2.4 Características

**Composición.** Además de las variaciones en cuanto a cantidad, puede haber también grandes diferencias de composición. Los factores que influyen en la composición de los residuos sólidos municipales incluyen algunos como:

- *El clima.* En áreas húmedas como São Paulo, Brasil, el contenido de humedad de los residuos sólidos es comúnmente de 50%.
- *La frecuencia de recolección.* Las recolecciones más frecuentes tienden a aumentar la cantidad anual. Puesto que la cantidad de materiales orgánicos es relativamente constante, quizá con más recolecciones los residentes tienden a desechar más papel y escombros.
- *El uso común de molinos domésticos para basura.* Los molinos reducen, pero no eliminan, los residuos de alimentos.
- *Las costumbres sociales.* Ciertas áreas étnicas consumen pocos alimentos de preparación rápida, por lo cual se producen menos residuos de papel y más de alimentos crudos.
- *El ingreso per cápita.* Las áreas de bajos ingresos producen menos residuos totales, aunque con un contenido alimenticio mayor.
- *La aceptabilidad de alimentos empacados y de preparación rápida.* En Estados Unidos y Canadá el uso generalizado de los empaques ha aumentado el contenido de papel de los residuos sólidos.
- *El grado de urbanización e industrialización del área.* En virtud de la conversión en abono, el reciclaje y la recuperación que son posibles en áreas rurales y en áreas de viviendas unifamiliares, los residuos sólidos de este tipo de fuentes pueden ser inferiores en cuanto a cantidad y tener distintos componentes que los de áreas metropolitanas industrializadas con viviendas multifamiliares.



enterrados. En la tabla 14-4 se indica la densidad no compactada de los diversos componentes (tal como se recolectan).

**TABLA 14-4 DENSIDADES REPRESENTATIVAS SIN COMPACTACIÓN PARA COMPONENTES DE RESIDUOS MUNICIPALES**

Componentes	Densidad <sup>a</sup>	
	kg/m <sup>3</sup>	lb/yd <sup>3</sup>
Papel, cartón, plásticos	80	135
Residuos de alimentos	300	500
Escombros diversos <sup>b</sup>	160	270
Cenizas, polvo, ladrillo, metal ferroso	480	800
Residuos sólidos municipales	150	250
Las categorías amplias antes indicadas incluyen plástico, metales no ferrosos, envases de lata y residuos de jardín. Cuando estos componentes se recolectan por separado, los pesos específicos son los siguientes:		
Plástico	65	110
Aluminio	160	270
Envases de lata	90	150
Residuos de jardín	100	170

<sup>a</sup>La densidad real puede variar hasta en un 50% respecto a los valores representativos que se muestran, de acuerdo con la naturaleza de los componentes y su contenido de humedad.

<sup>b</sup>Los escombros diversos incluyen vidrio, metal no ferroso, madera, caucho, cuero y textiles.

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (1993).

### Ejemplo 14.2

Con base en los valores representativos de los componentes individuales, estime el contenido de humedad y la densidad de los residuos sólidos municipales cuya composición se muestra en la siguiente tabla:

Datos proporcionados para una muestra de 100 kg		Valores estimados					
		Humedad <sup>a</sup>		Sólidos secos		Densidad <sup>b</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen <sup>c</sup> (m <sup>3</sup> )
Componente	kg	%	kg	%	kg		
Papel	45	7	3.2	93	41.8	80	0.56
Residuos de alimentos	20	70	14.0	30	6.0	300	0.07
Metales (Fe)	7	3	0.2	97	6.8	480	0.01
Vidrio	10	2	0.2	98	9.8	160	0.06
Cenizas	3	8	0.2	92	2.8	480	0.01
Escombros	15	20	3.0	80	12.0	160	0.10
<b>Residuos sólidos</b>	<b>100</b>		<b>20.8</b>		<b>79.2</b>		<b>0.81</b>

<sup>a</sup>Porcentaje de humedad de los residuos tal como se recolectan (véase la tabla 14-3).

<sup>b</sup>Densidad del componente en una muestra de 100 kg (véase la tabla 14.4).

<sup>c</sup>Volumen del componente = peso del componente/densidad del componente.

dos y una operación cuidadosa de los rellenos (como se describen en la sección 14.7) para reducir al mínimo el riesgo asociado con el líquido contaminado drenado (llamado *lixiviado*) que proviene de los desechos en descomposición.

### 14.3.2 Reducción de las fuentes

La *reducción de las fuentes*, definida como una reducción en la cantidad o toxicidad de los residuos que entran en la corriente residual, se distingue del reciclaje, la conversión en abono y otras prácticas de recuperación, en que todas ellas se verifican después de la generación de los residuos. La reducción de las fuentes es el componente de mayor categoría en la jerarquía de la administración de los residuos sólidos porque representa el medio más eficaz para reducir los costos económicos y los efectos ambientales asociados con el manejo de los residuos.

Tchobanoglous *et al.* (1993) ha identificado tres requisitos fundamentales para implantar un programa de reducción de las fuentes:

1. Adopción de estándares industriales para la manufactura y empaquetado de los productos con un menor uso de materiales.
2. Aprobación de leyes que reduzcan al mínimo el uso de materiales vírgenes en productos de consumo.
3. Adopción, por parte de las comunidades, de tarifas por servicios de administración de residuos. Dichas tarifas deben sancionar a los generadores por aumentar las cantidades de residuos.

Los ahorros potenciales derivados de la reducción de las fuentes son considerables. En la ciudad de Nueva York se estimó que una reducción del 7% en las fuentes daría lugar a un ahorro de 90 millones de dólares en costos evitados para el año 2000, y costos acumulativos evitados entre 1992 y 2010 de \$700 a \$800 millones (N.Y.C. Dept. of Sanitation, 1992). La disminución en la contaminación del aire y del agua como consecuencia del manejo de menos residuos sólidos sería un beneficio adicional para la sociedad.

### 14.3.3 Reciclaje

Después de la reducción de las fuentes, el reciclaje es la práctica más importante dentro de la jerarquía de la administración de residuos sólidos. No obstante, a lo largo de los últimos 250 años la proporción de residuos domésticos reciclados ha disminuido continuamente, desde más del 90% hasta alrededor del 7% en 1970 (Wilson, 1977; U.S. EPA, 1992). A partir de entonces el interés en el reciclaje ha renacido, y en 1987 el estado de Nueva Jersey aprobó la primera legislación de alcance estatal sobre reciclaje obligatorio. De acuerdo con esta ley, los residentes de las 567 comunidades del estado tenían obligación de reciclar, para 1989, el 25% de los residuos sólidos generados, y todas las poblaciones estaban obligadas a transformar las hojas en abono (Pfeffer, 1992).

La presión de la menguante capacidad de los rellenos de tierras, los efectos ambientales, la mejoría en los mercados, los incentivos económicos y el apoyo político contribuyen a la tendencia hacia el aumento del reciclaje. Para 1990 la recuperación de materiales reciclados en Estados Unidos había ascendido al 17% del total de RSM generados, cifra que incluye alrededor del 2% de residuos que presentan una conversión en abono (U.S. EPA, 1992).

**Mercados para el material reciclado.** Para un programa de reciclaje satisfactorio es necesaria la existencia de un mercado confiable y cercano para los materiales recuperados. Aunque la recuperación de ciertos componentes como latas de aluminio y botellas de plástico grandes puede ser rentable, no sucede lo mismo en la mayor parte de los otros programas de reciclaje, los cuales requieren subsidios o legislación por parte de los gobiernos. El costo neto de la recolección en las aceras y el procesamiento de materiales reciclables (tomando en cuenta los ingresos por materiales vendidos) se ha estimado entre 110 y 176 dólares por tonelada métrica, en comparación con un costo representativo de \$100 por tonelada para la recolección, acarreo y entierro de RSM. Si el costo neto del reciclaje es de \$165 por tonelada y el 25% del flujo de RSM se recicla, la incorporación de un programa de reciclaje aumentaría el costo total del sistema de \$100 por tonelada a cerca de \$120 por tonelada, con base en costos de recolección de \$55 por tonelada y cargos por acarreo y entierro de \$44 por tonelada para residuos no reciclados (Ham, 1992).

El desarrollo de mercados depende de la calidad de los materiales, la capacidad global de la industria y el costo de las materias primas en competencia. La contaminación del material recuperado o los cambios en su composición química debidos a los procesos de recuperación significan que estos productos por lo general son de calidad inferior y por tanto de menor precio que los materiales vírgenes.

Además de mercados confiables, los programas de reciclaje requieren una infraestructura de recolección y procesamiento que permita la disponibilidad de un abasto confiable y consistente de material recuperado para los fabricantes. Los productos que se recuperan de los RSM se pueden reutilizar como "recursos" sólo cuando existe un mercado para ellos. La situación que guarda el reciclaje de algunos de estos materiales recuperados se describe a continuación.

**Reciclaje de aluminio.** Debido al alto costo del mineral de aluminio importado (bauxita) y al desarrollo de una extensa infraestructura de recolección y procesamiento, el aluminio es la materia prima que se recicla con mayor éxito. En 1990, el 64% de todas las latas de aluminio para bebidas producidas en Estados Unidos (o 54,000 millones de recipientes) se reciclaban (Powell, 1991).

**Reciclaje de papel y cartón.** Aunque el papel y el cartón combinados representan la categoría más grande de RSM (por lo común entre el 30 y el 40% del total, en peso), los esfuerzos por reciclar los diversos tipos de papel han tenido sólo un éxito limitado. Esto se ha atribuido a tres factores (Tchobanoglous *et al.*, 1993):

1. La abundancia de fibra virgen de costo relativamente bajo en Estados Unidos y Canadá
2. Las grandes distancias entre muchos centros urbanos y las plantas procesadoras
3. La capacidad limitada de las fábricas para destintar y reutilizar el papel de segunda mano

El establecimiento del reciclaje de periódicos ha sido especialmente difícil: los precios del papel reciclado fluctúan drásticamente desde cero hasta alrededor de 330 dólares por tonelada métrica en un solo año, el material es voluminoso y su manejo costoso, y es necesario destintarlo antes de utilizarlo como materia prima para papel. Sin destintar, la reutilización del papel se limita a fieltro para techos, cartón y productos similares. En 1988, el 33% de los periódicos publicados en Estados Unidos se reciclaban (Powell, 1989). El reciclaje de otros productos de papel para los cuales existe un mercado continuo, como el cartón corrugado, ha tenido más éxito (45% del cartón producido en Estados Unidos en 1988 era reciclado).

**Reciclaje de vidrio.** Puesto que el vidrio triturado reciclado (o vidrio de desecho) funde a una temperatura menor que las materias primas que se utilizan para producirlo, el uso de más vidrio de desecho en la manufactura de vidrio permite ahorros de energía para el fabricante (por cada 10% de aumento en la proporción de vidrio de desecho se consigue una reducción de 2% en el consumo de energía; Warmer, 1993). En consecuencia, los fabricantes de vidrio pueden permitirse pagar un poco más por el vidrio de desecho que por las materias primas (arena, carbonato de sodio y piedra caliza).

En Estados Unidos los recipientes de vidrio nuevos incluyen alrededor del 30% de vidrio de segunda mano, el cual se puede reciclar indefinidamente. La tasa promedio de reciclaje del vidrio en Europa en 1991 era de 46%, la cual deberá aumentar si tienen éxito los esfuerzos encaminados a estandarizar los recipientes de vidrio (para fomentar el uso de botellas retornables) y alentar la producción de más mercancías en vidrio colorido (para aumentar la demanda de vidrio colorido de desecho) (Warmer, 1993).

**Reciclaje de plásticos.** La producción de plástico ha aumentado notablemente en los últimos 20 años, debido sobre todo a su mayor uso en envases y como material para recipientes. No obstante, en Estados Unidos sólo el 2% de la producción virgen se recicla, mucho menos del promedio general de 17% para los residuos sólidos municipales. Las razones de la baja proporción de reciclaje de plásticos son (Tchobanoglous *et al.*, 1993):

- El plástico de desecho tiene poco valor porque el material virgen es relativamente económico.
- No existe una infraestructura de alcance nacional para su recolección y procesamiento.
- La baja densidad del plástico origina altos costos de transporte y manejo.

Una excepción es el fuerte mercado de plásticos de TP (tereftalato de polietileno) reciclados, el cual recuperó en 1990 el 30% de las botellas de 2 L de bebidas gaseosas en Estados Unidos. Aunque los plásticos representan sólo alrededor del 10% en peso de los RSM recolectados, constituyen más o menos el 25% en términos de volumen y se espera que su uso aumente. A medida que se disponga de menos espacio para rellenos y los costos de eliminación aumenten, la presión para mejorar el reciclaje de plásticos se incrementará en el futuro.

**Reciclado de metales ferrosos.** Los envases de lata, que constituyen la categoría principal de metal ferroso reciclado, se deben separar de los materiales no ferrosos, compactar y desestañar antes de reutilizarse. Los altos costos del transporte de las latas a una planta desestañadora, combinados con un mercado inestable de acero de desecho, suelen hacer anti-económico el reciclaje de envases de lata. No obstante, los aparatos, automóviles y otros productos de metales ferrosos que se desechan comúnmente se reciclan después de separar los productos peligrosos y los útiles (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

#### 14.3.4 Recuperación de energía

Las dos formas principales de utilizar la energía que contienen los residuos sólidos municipales son (1) emplear el material como combustible y (2) recuperar el material para reutilizarlo, con lo cual se ahorra la energía necesaria para procesar y transportar el material virgen.

**Combustibles derivados de residuos sólidos.** Los residuos sólidos se pueden quemar directamente en incineradores (un proceso que se conoce como *quema en masa*) o convertirse en *combustible derivado de desechos* (CDD), más eficiente. La quema controlada de

e instituciones. Además de sus ventajas estéticas respecto al uso de botes pequeños, el uso de contenedores y compactadores locales ha reducido la frecuencia de recolección y el volumen de residuos por transportar.

La frecuencia de recolección de residuos sólidos se ha reducido gradualmente a partir de la década de 1950, cuando la práctica más común consistía en recoger la basura dos veces por semana. En la década de 1970, alrededor de la mitad de la población de EUA recibía los servicios de una recolección semanal (Chanlett, 1979) y la tendencia hacia menos rondas de recolección ha continuado hasta los años noventa, aunque en menor proporción. Las razones para recoger los residuos con menos frecuencia son:

- Los residuos se hacen menos desagradables a medida que la proporción de residuos putrescibles disminuye.
- Los camiones empacadores y los camiones para la basura que cuentan con un diseño mejorado mantienen los olores y las moscas bajo control.
- Los costos del servicio aumentan por el alza en los costos de mano de obra y por los acarreos a distancias cada vez más grandes para la eliminación de los residuos.
- Una mejor administración permite trasladar los residuos del punto de recolección a la estación de transferencia y al relleno, que es donde se sepultan en cuestión de horas.

Desde luego, los residuos sólidos se deben recolectar al menos una vez por semana, y quizá con más frecuencia en los distritos de alta densidad y en el caso de residuos con un alto contenido putrescibles, en particular en tiempo de calor.

#### 14.4.2 Equipo de recolección

**Camiones empacadores.** El vehículo usual para áreas residenciales es el camión compactador que se carga manualmente por atrás o por un costado, trabaja con un equipo de dos o tres personas, incluido el conductor (véase la figura 14-3). Cada camión, de 14 a 18 m<sup>3</sup>

Copyrighted image

**Figura 14-3** Camión empacador residencial. Fuente: APWA, American Public Works Association, *APWA Solid Waste Collection Practice* (Chicago: 1975).

de capacidad, puede transportar de 4 a 5 toneladas métricas de residuos a un tiradero o a una estación de transferencia. En la mayor parte de los casos son típicas dos cargas por día y por camión, posiblemente tres. Se dispone también de vehículos compactadores de carga automatizada más grandes que, como su nombre lo indica, cargan y descargan automáticamente cada uno de los apartamentos de los contenedores de almacenamiento. Estos contenedores se recogen en los centros comerciales y lugares similares, luego se devuelven vacíos para su reutilización y así sucesivamente transportan el contenido compactado, junto con el contenido de varios contenedores más, al lugar donde se van a eliminar.

#### Ejemplo 14.4

Un área residencial de unas 40 ha (100 acres) contiene 400 residencias unifamiliares y 8 ha (20 acres) con unidades multifamiliares que alojan a 400 personas. Con dos recolecciones de acera por semana, ¿cuántos viajes diarios tendría que hacer cada camión empacador para dar servicio a esta área? Suponga cuatro residentes por unidad unifamiliar.

#### Solución

*Población atendida:*

Unifamiliar con 4 residentes por unidad	= 1,600 Personas
Multifamiliar con 50 residentes por hectárea	= <u>400 Personas</u>
Total	= 2,000 Personas

*Cantidad de residuos:* Suponga que la generación de residuos residenciales per cápita es de 1.1 kg/día (véase la tabla 14-1). Por tanto, la cantidad diaria para la recolección es

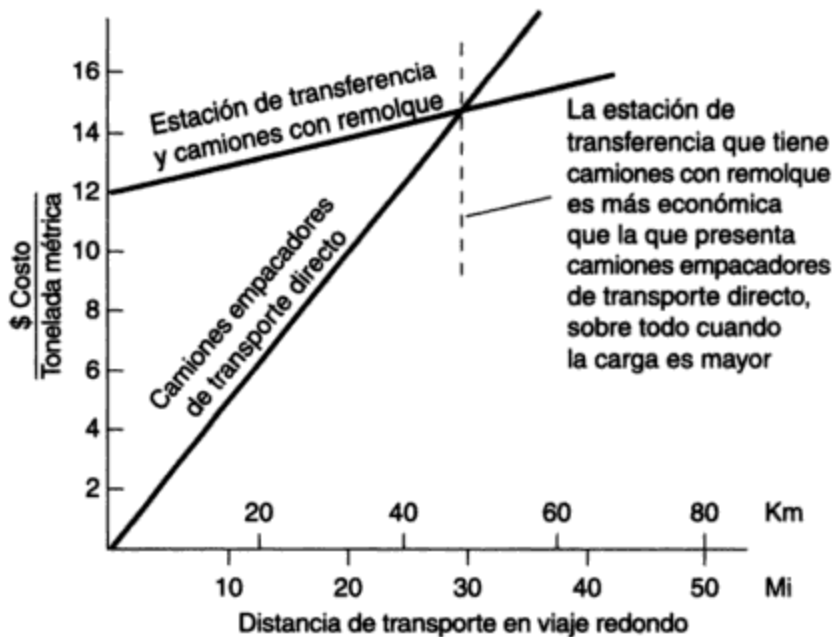
$$2,000 \times 1.1 \times \frac{7}{2} = 7,700 \text{ kg} = 7.7 \text{ toneladas métricas}$$

Así pues, en un día normal de recolección, cuando se ha recogido la mitad de los residuos semanales, un camión empacador de 4 a 5 toneladas métricas de capacidad tendría que hacer dos viajes para dar servicio al área en cuestión.

**Camiones contenedores.** El otro tipo común de vehículo de recolección es el que entrega un contenedor de almacenamiento grande y vacío a una institución o empresa comercial y recoge uno lleno, el cual transporta después para eliminar los residuos. Un conductor puede encargarse de la descarga y carga de contenedores, a menos que los reglamentos exijan que el conductor cuente con un ayudante. Los contenedores pueden ser transportados por un camión grúa que levanta aquellos relativamente pequeños (con escombros sueltos y voluminosos), o por un camión de armazón en forma de báscula capaz de manejar contenedores grandes, llamados cajones descargables, que contienen desechos sueltos o compactados. Con el advenimiento de los camiones empacadores de carga automática y el sistema de contenedores acarreados de estructura en forma de báscula capaz de transportar contenedores mucho más grandes, el camión grúa ha sido reemplazado en casi todas las aplicaciones, a excepción de unas pocas de alcance limitado.

#### 14.4.3 Estaciones de transferencia

A medida que los sitios de rellenos escasean y la distancia de acarreo aumenta, el tiempo que la tripulación del camión empacador emplea en recorridos improductivos se hace excesivo. En esos casos puede ser más económico transferir los residuos de pequeños vehículos de recolección local a unidades capaces de recorrer distancias más largas. La operación se lleva a cabo en



**Figura 14-5** Comparación hipotética de los costos de transporte de desechos al punto de eliminación. La ilustración se basa en un costo de \$0.30 por tonelada métrica · km (\$0.50/ton · mi) para camiones empacadores que transportan 5 toneladas métricas y un costo de \$0.06 por tonelada métrica · km (\$0.10/ton · mi) para camiones de remolque que acarrearán 10 toneladas métricas. Para simplificar se supone que la estación de transferencia tiene un costo fijo anual de \$12 por tonelada métrica por concepto de capital y operación.

### 14.4.5 Selección de rutas

Puede ser difícil determinar la ruta más económica para recolectar residuos sólidos y transportarlos a los puntos de descarga. Variables interrelacionadas como costos de mano de obra, tamaño de la tripulación, restricciones sindicales, frecuencia de recolección, distancia (tiempo de recorrido) al punto de descarga, y el rendimiento y los costos anuales de diversos tipos de equipos para manejo de residuos influyen en la elección. Los dos tipos básicos de recolección local son el de *callejón* y el de *acera*. La recolección de callejón, cuando es posible, tiene ventajas: el propietario no tiene que poner botes, no se requiere un servicio programado, no hay interferencia con el tránsito de las calles, y se puede dar servicio a ambos lados del callejón sin tener que caminar mucho. En algunos municipios se proporciona el servicio de sacar los botes y devolverlos al patio delantero o trasero, pero casi todos los residentes renuncian a estos beneficios a causa del costo adicional. Se puede aplicar el análisis de sistemas a muchos problemas de establecimiento de rutas, pero para la recolección local se emplea comúnmente un método de prueba y error.

Cuando los residuos de diferentes distritos de recolección se pueden enviar a varios puntos posibles, puede ser difícil decidir cuáles deben ir a cada lugar para conseguir la solución más económica. Los problemas de asignación de residuos de este tipo normalmente se resuelven por programación lineal. Cuando no se dispone de un programa o de una computadora, se emplean métodos aproximados para encontrar una solución cercana a la óptima.

## 14.5 SEPARACIÓN Y PROCESAMIENTO DE RSM

### 14.5.1 Separación y procesamiento en la fuente

**Separación de materiales reciclables en la fuente.** Actualmente la reglamentación en muchas áreas demanda que la separación de los materiales reciclables se haga por el residente de una vez en la fuente, en lo que respecta a componentes como papel, aluminio, vidrio y plástico. La separación en la fuente ofrece ventajas porque reduce los costos del procesamiento ulterior para la recuperación de los materiales y produce material de mayor calidad (menos contaminado) que las instalaciones centralizadas para la recuperación de materiales (ICRM). Los materiales que se separan en la fuente pueden recogerse ya sea por recolección en las aceras o por entrega por parte de los propietarios en centros locales de depósito y compra. Los programas de recolección en las aceras en general reciben un mejor apoyo del público (entre 50 y 90% de participación de los residentes) que los programas de depósito o compra.

**Procesamiento en la fuente.** Los residuos sólidos municipales se pueden procesar localmente en los edificios residenciales, comerciales e industriales para reducir el volumen de residuos y recuperar materiales reciclables. Los tipos más comunes de procesamiento local son los siguientes:

1. *Molinos.* Los molinos de basura domésticos que trituran residuos de alimentos para convertirlos en una suspensión, la cual se descarga del fregadero de la cocina a una alcantarilla sanitaria, pueden permitirse cuando la planta de tratamiento de aguas residuales es capaz de manejar las mayores cargas de materiales orgánicos y sólidos que las unidades aportan (alrededor del 30% en cada caso si todas las residencias contaran con molinos). La comodidad para los propietarios, la reducción de la cantidad de residuos sólidos putrescibles que es necesario recolectar y la posibilidad de disminuir la frecuencia de recolección son razones por las cuales ciertos municipios han hecho obligatorias estas unidades de fregadero residenciales.

2. *Compactadores.* Los compactadores domésticos reducen el volumen de los residuos hasta en un 70%, pero sólo manejan ciertos residuos. Su uso no se ha extendido mucho. Por otra parte, las unidades comerciales son comunes en centros comerciales, instituciones y otros lugares donde se practica el embalaje de papel o cartón. La compactación es ventajosa pues reduce los costos de transporte, pero puede causar problemas si se mezclan los RSM con otros. Será necesario abrir las pacas si los residuos se van a incinerar o a enviar a un centro de recuperación de recursos.

3. *Formadores de abono.* Los ambientalistas y diversos gobiernos (estatales, municipales, etc.) fomentan la conversión en abono en el patio trasero de las casas como un medio para reducir la cantidad de residuos que se envían a los rellenos. El proceso implica poner el material orgánico (residuos de cocina y de jardín) en una pila o recipiente, y luego agregar ocasionalmente agua y agitar la mezcla para favorecer la descomposición microbiana (véase la sección 14.6.2). Si los residuos de cocina y de jardín constituyen en conjunto el 25% de los residuos sólidos residenciales, el hecho de no enviarlos a rellenos debe reducir significativamente las necesidades de entierro de residuos.

Los residuos de cocina constituyen alrededor del 7% de los RSM; sin embargo, puesto que las proteínas (carne, pescado), la materia grasa (grasas, manteca) y los productos lácteos no son idóneos para la conversión en abono, la cantidad que se transforma en abono es inferior a esta cantidad, y se reduce aún más porque no todos los residentes están dispuestos a hacerlo o en condi-



Los residuos que se queman sólo para reducir su volumen (es decir, sin recuperación de energía) no necesitan un combustible auxiliar, excepto para el arranque. Por otra parte, cuando el objetivo es la producción de vapor de agua, es necesario incorporar un combustible complementario (casi siempre gas) a los desechos pulverizados en razón del contenido variable de energía de los residuos o en caso de que la cantidad de residuos disponibles sea insuficiente. Los metales ferrosos normalmente se recuperan de la ceniza.

Los mercados para el vapor de agua deben estar cerca de los incineradores de residuos para que estos sistemas de combustión sean competitivos con otras fuentes de calentamiento. La ciudad de Chicago (Planta del Noroeste) y la ciudad de Hamilton, Ontario (Planta SWARU), son dos localidades en donde no había un mercado disponible para el vapor de agua que era producto de la incineración durante los primeros 10 años de operación (APWA, 1979). El incinerador de la ciudad de Montreal, Canadá, no dispuso de un mercado para el vapor de agua de sus incineradores de pantalla de agua para combustión en masa hasta 1983 (alrededor de 15 años después de que se construyó). Ahora se exige a los servicios públicos de EUA que adquieran electricidad generada a partir de la incineración de residuos sólidos. En consecuencia, muchos sistemas de incineración producen ahora electricidad, la cual se transporta con facilidad, por lo cual no es necesario que estos incineradores estén ubicados muy cerca de los mercados de energía. Algunos de los municipios que han conseguido vender su vapor para calefacción o generación de electricidad se muestran en la tabla 14-6 con fines comparativos.

**TABLA 14-6 EJEMPLOS DE INCINERADORES MUNICIPALES PRODUCTORES DE VAPOR DE AGUA EN ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ**

Ubicación y año de inicio	Tamaño de diseño <sup>a</sup> (tons/día)	Costo en el arranque <sup>b</sup> (\$ millones)	Cliente	Recuperación	Costo/1,000 tons/día de capacidad <sup>b</sup> (\$ millones de 1993)
Condado Marion, OR 1986 <sup>c</sup>	550	47.5	Portland General Electrical Co.	—	106
Peekskill, NY 1984 <sup>c</sup>	2,250	239	Consolidated Edison	Fe	134
Detroit, MI 1989 <sup>c</sup>	3,300	650 <sup>d</sup>	Detroit Edison	Fe	197
Chicago, IL 1971	1,600	25.0 <sup>e</sup>	Candy Co. (1981)	Fe	106 <sup>e</sup>
Nashville, TN 1974	720	29.0 <sup>e</sup>	Calefacción del centro de la ciudad	—	144 <sup>e</sup>
Ciudad de Quebec, PQ 1974	1,000	25.0 <sup>e</sup>	Fábrica de pulpa y papel	Fe	106 <sup>e</sup>
Harrisburg, PA 1971	720	8.3 <sup>e</sup>	Pennsylvania Power Co.	Fe	77 <sup>e</sup>
Hamilton, Ont. 1971	500	8.5 <sup>e</sup>	Ontario Hydro (1982)	Fe	110 <sup>e</sup>
Saugus, MA 1976	1,500	50.0 <sup>e</sup>	Planta generadora de la General Electric	Fe	110 <sup>e</sup>

<sup>a</sup>El tamaño de diseño se informa en toneladas cortas (2,000 lb) por día.

<sup>b</sup>Costo promedio en millones (\$) de 1993 por 1,000 tons/día de capacidad = 145 y 107 para instalaciones más nuevas y más antiguas, respectivamente.

<sup>c</sup>Instalación nueva construida con equipo de control para la contaminación del aire.

<sup>d</sup>Incluye el costo de adaptación.

<sup>e</sup>Los costos de capital en \$1,000,000 (EUA) por 1,000 tons (2,000 lb) de capacidad diaria de planta han sido actualizados a un año común (1993) sin los costos adicionales por los controles más estrictos de contaminación del aire que ahora se requieren.

Fuente: Adaptado de APWA (1979), NCRR (1980); Schwegler y Hickman (1981); Brunner (1991).

- La eficacia de un público interesado cuando la contaminación ambiental es motivo de preocupación
- El largo marco temporal que es necesario para los proyectos de gran envergadura que afectan el ambiente; en este caso, 20 años a partir del diseño conceptual en 1976 hasta el inicio de la construcción en 1989, y el término de la adaptación de controles para la contaminación del aire
- Cómo fue que la falta de controles adecuados para la contaminación del aire, en el diseño original, causó demoras e incrementó los costos

En la resolución de los problemas de contaminación del aire del incinerador de Detroit intervinieron todos los gobiernos (federal, estatal o provincial y municipal) tanto de Estados Unidos como de Canadá, para no mencionar el papel que desempeñaron los grupos de asesoría pública, los abogados, los expertos y los tribunales. Es evidente que la construcción de instalaciones municipales requiere una extensa consulta pública y una planeación de largo alcance que tome en cuenta las necesidades futuras para el control de la contaminación.

#### Ejemplo 14.5

Un incinerador de combustión en masa con recuperación de calor trabaja con 400 toneladas métricas/día (450 toneladas/día) de residuos sólidos municipales con gas natural como combustible complementario. Se espera que un plan de separación en fuentes residenciales reduzca en 20% la cantidad de papel y cartón recolectada. Para que el incinerador mantenga la producción de vapor de agua, el valor térmico de los combustibles perdidos se tendría que reemplazar por gas natural a un costo de \$0.20 por  $m^3$  (\$0.56 por 100  $ft^3$ ).

Sin tomar en cuenta los costos de recolección, ¿qué precio por tonelada métrica se tendría que recibir por el papel para que el municipio no gane ni pierda? *Nota:* Se puede despreciar la mayor eficiencia de la incineración de gas natural en comparación con la de los desechos.

**Solución** Nuestros supuestos son los siguientes:

Contenido original de papel de los residuos sólidos (tabla 14-2) = 38%

Contenido energético del papel (tabla 14-5) = 16,300 kJ/kg

Contenido energético del gas natural (tabla 14-5) = 37,300 kJ/ $m^3$

Para la operación original tenemos que

cantidad total de desechos quemados = 400 toneladas métricas/día

cantidad de papel quemado (38%) = 152 toneladas métricas/día

contenido energético del papel quemado = 152 toneladas métricas/día  $\times$  16.3  $\times$  10<sup>6</sup> kJ/tonelada métrica  
= 2.48  $\times$  10<sup>9</sup> kJ/d

Después de la separación obtenemos

contenido energético del papel perdido (20%) = 4.96  $\times$  10<sup>8</sup> kJ/día

volumen adicional de gas necesario:  $\frac{4.96 \times 10^8 \text{ kJ/día}}{37,300 \text{ kJ/m}^3} = 13,300 \text{ m}^3/\text{día}$

costo del gas adicional = 13,300  $\times$  \$0.20  $m^3$  = \$2,660

Por tanto, puesto que la cantidad de papel recuperado es de 30.4 toneladas métricas/día, el municipio tendría que recibir

sarrollados comprometidos con el rescate de tierras, en donde muchas plantas de conversión de residuos sólidos en abono han estado en operación durante muchos años con éxito. Rotterdam, Holanda, en donde se encuentra uno de los incineradores con recuperación de calor más grandes de Europa, tiene una importante planta de conversión en abono para complementar su programa de administración de residuos. El mismo interés por la conversión en abono existe en los países del Tercer Mundo, pero en estas áreas los sistemas de camellones son el método preferido. En Estados Unidos la conversión en abono en gran escala de residuos agrícolas y lodos de aguas residuales es común, y la recolección así como la conversión en abono de residuos de jardín es aún más frecuente; tan sólo Nueva Jersey tenía 180 centros de este tipo en 1988 (Miller, 1991). Al mismo tiempo, sólo había ocho centros de conversión de RSM en abono en Estados Unidos. No obstante, se estaban proyectando unos 75 más para ese año (Miller, 1991) y es probable que la tendencia hacia más conversión de RSM en abono continúe por algún tiempo.

El condado de Sumter, al sur de Florida, es un caso representativo en donde, a causa de la disminución del espacio para rellenos y la prohibición en todo el estado de enterrar residuos de jardín, se construyó una planta de conversión de RSM en abono de 70 toneladas métricas/día (75 ton/día) (Loverude, 1990). Después de retirar los componentes no aceptables y desmenuzar los desechos, los metales ferrosos se separan por medios magnéticos y después se selecciona manualmente el aluminio, el papel y el plástico (el periódico y el vidrio no se separan). Los residuos restantes se muelen o trituran para formar trozos de 2 a 7 cm, se colocan en camellones, se convierten en abono en un término de 3 a 6 semanas y se tamizan para separar los fragmentos pequeños de metales y plásticos. El producto final se vende localmente como acondicionador de suelos (Loverude, 1990).

### 14.6.3 Otros procesos de conversión

Los procesos químicos (como la incineración en lecho fluidizado, la pirólisis y la oxidación húmeda) y los procesos biológicos (como la digestión anaerobia) son otros métodos potenciales para reducir el volumen de los residuos municipales o transformarlos en productos útiles. Se ha proporcionado información sobre muchos de estos procesos en *Integrated Solid Waste Management* (Tchobanoglous *et al.*, 1993) y por parte de otros investigadores (Martin, 1991; Vesilind, 1980; Dasgupta *et al.*, 1991). De todos los procesos de conversión, sólo la incineración con recuperación de calor y la conversión en abono gozan de amplia aceptación.

## 14.7 RELLENOS DE TIERRAS

A excepción de la eliminación de residuos sólidos municipales en el mar, la cual está prohibida por la mayor parte de los países desarrollados, los residuos sólidos, o lo que queda de ellos en alguna forma, deben quedar en tierra. En 1990 el 67% de los RSM que se generaban en Estados Unidos se enterraban, una cantidad apenas inferior a la de 1985 (U.S. EPA, 1992). Desde los primeros tiempos, la eliminación de residuos sólidos en tiraderos al aire libre era la práctica normal para los municipios. El tiradero del pueblo por lo común era un área baja cerca de una corriente de agua. Los resultados visibles eran incendios, contaminación del agua, olores, ratas, moscas y papeles arrastrados por el viento. El entierro de los residuos reducía estos problemas, pero la mejora más importante se consiguió apisonando los residuos en capas y cubriéndolos con tierra al final de las operaciones de cada día. Este método, llamado *relleno sanitario* (po-

demos suponer que para distinguirlo del tiradero no sanitario al aire libre), se usó por primera vez en California en 1934 para rescatar tierras. Apisonar y cubrir todavía hoy son las operaciones básicas. Un mejor apisonamiento, una cubierta más reducida y, más recientemente, la recolección de lixiviados y la vigilancia del predio, aunadas a un mayor cuidado en la selección del lugar, son algunas de las mejoras que se han producido. El área necesaria para enterrar residuos sólidos es alrededor de 1 ha/año por cada 25,000 personas (1 acre/10,000 personas). Esto se ilustra en el ejemplo 14.6.

#### Ejemplo 14.6

Para una población de 25,000, estime las necesidades anuales de área (sin contar la zona de amortiguamiento) para un relleno con apisonamiento normal y una profundidad de desechos de 4 m sin tomar en cuenta el material de la cubierta.

**Solución** Suponiendo que la generación de residuos per cápita es de 2.0 kg/día (figura 14-1) y que la densidad de un relleno de tierras con apisonamiento normal es de 450 kg/m<sup>3</sup> (figura 14.2), el área anual que se requiere es

$$\frac{25,000 \times 2.0 \text{ kg/día} \times 365 \text{ días/año}}{450 \text{ kg/m}^3 \times 4 \text{ m} \times 10,000 \text{ m}^2/\text{ha}} = 1.0 \text{ ha}$$

Las necesidades de área para el entierro de residuos varían de forma considerable con el tipo de residuos y el grado de apisonamiento. Los detalles del diseño y la operación de un relleno sanitario se analizan en la siguiente sección.

#### 14.7.1 Criterios para el diseño de rellenos sanitarios

Los criterios de acceso, distancia de amortiguamiento, cercado, excavación de zanjas, pendientes, manejo de lixiviados, procedimientos de vigilancia y operación, normalmente son establecidos por el organismo responsable de la aprobación del predio. Los requisitos específicos varían en gran medida entre las distintas autoridades, pero Tchobanoglous *et al.* (1993) han sugerido algunas pautas generales. Idealmente, un predio destinado al relleno sanitario debe encontrarse en terrenos de bajo costo dentro de una distancia de transporte económica, contar con acceso todo el año y estar al menos a 1,500 m en la dirección del viento respecto a sus vecinos residenciales y comerciales. El área debe estar razonablemente despejada, nivelada y bien drenada, con capacidad para no menos de unos tres años de uso antes que se haga realidad su futuro papel como espacio "al aire libre". Es deseable un suelo con baja permeabilidad, muy por encima del nivel freático, para protección de las fuentes de aguas subterráneas y como material para la cubierta. La elección final del predio no debe hacerse sin una investigación hidrogeológica detallada. La preparación del terreno implica cercarlo, nivelarlo, apilar material para la cubierta, construir bermas, enjardinar e instalar sistemas de recolección de lixiviados y vigilancia. En muchos casos se proveen también pozos para la recolección de gas.

Los residuos mixtos con diversos grados de compactación se entregan en el predio en camiones empacadores y camiones con remolque. Es necesario hacer una clasificación manual de los residuos que llegan, y puede haber pulverización o compactación a alta presión y embalaje de los mismos para reducir su volumen antes de depositarlos en la tierra. El material suelto se coloca en la parte inferior del foso o zanja preparado y después se distribuye y se apisona por medio de una máquina en capas de alrededor de 0.5 m de espesor. Cuando la profundidad al-

operaciones de apisonamiento. Aplastar tanto desperdicio suelto, aunado al recubrimiento del material con tierra al final de cada día, mitiga estos problemas. La reducción de volumen por pulverización o compactación a alta presión ofrece mayor seguridad además de una operación estéticamente aceptable.

**Pérdida económica.** Las propiedades dedicadas al entierro de residuos ya no están disponibles como tierras agrícolas productivas o como propiedades gravables. Incluso después del cierre del predio, el uso futuro del área se debe restringir a algún tipo de desarrollo al aire libre, como un parque, un área recreativa o una colina para esquiar, y es necesario controlar estrictamente la construcción de edificios.

**Efectos ambientales.** Los efectos potenciales de los residuos sólidos en la salud pública y en el ambiente se señalaron en la sección 14.3. El siguiente comentario se ocupa de los efectos ambientales del lixiviado y del gas de los rellenos sanitarios. Cuando los residuos sólidos municipales se entierran, la materia orgánica presente se descompone en condiciones aeróbicas durante las primeras semanas (en áreas húmedas) o en el primer año (en áreas secas), y después se degrada anaeróbicamente cuando ya no hay oxígeno presente. Mientras los residuos se descomponen, el líquido que sale de ellos, la filtración de aguas subterráneas y el agua de la precipitación pluvial y el desagüe de superficies se cuelean a través de los desechos y producen otro líquido contaminado que se conoce como *lixiviado*. La contaminación de las aguas subterráneas por un lixiviado rico en sustancias orgánicas, sólidos disueltos y otros componentes puede ser un problema grave cuando los pozos cercanos se utilizan como fuente de abastecimiento de agua. El peligro proviene sobre todo de las sales disueltas, puesto que el suelo elimina los materiales orgánicos biodegradables y los organismos patógenos antes de que el lixiviado recorra una distancia muy grande.

Los gases, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que genera la descomposición anaerobia de las sustancias orgánicas del relleno son también motivo de preocupación. De acuerdo con la etapa de descomposición que se alcance, el metano puede constituir hasta el 60% de los componentes gaseosos que genera un relleno sanitario. El metano es un gas inodoro y combustible, más ligero que el aire y explosivo cuando su concentración en aire está entre el 5 y el 15%. Por consiguiente, se trata de un gas peligroso y no se debe descuidar. Los métodos para controlarlo se examinan más adelante. El dióxido de carbono en combinación con el agua crea un ambiente ácido en el cual los minerales como calcio, magnesio, hierro, cadmio, plomo y zinc, presentes en los desechos (o en el suelo), tienden a disolverse y avanzar hacia el nivel freático. El calcio y el magnesio sólo aportan dureza a las aguas subterráneas, pero los metales pesados tóxicos constituyen un problema más serio porque pueden hacer que el agua no sea adecuada para consumo humano.

**Reglamentación inadecuada.** Los reglamentos aplicables a rellenos sanitarios suelen ser arbitrarios o basarse en estudios realizados en otro lugar. Como pionera en el desarrollo de rellenos sanitarios, California ha servido de guía a muchas otras localidades. Por ejemplo, la reglamentación de California exige que los rellenos sanitarios estén ubicados a cierta distancia mínima arriba del nivel freático, en suelos de baja permeabilidad, y a una distancia mínima del punto más próximo de utilización de agua. Esto tiene sentido porque, en California, donde la evaporación es mayor que la precipitación pluvial, el hecho de mantener el relleno sanitario a

una distancia mínima arriba del nivel freático ayuda a proteger las aguas subterráneas contra la intrusión del lixiviado. Sin embargo, en áreas húmedas, alrededor de los Grandes Lagos, por ejemplo, en donde la precipitación supera a la evaporación, un requisito de esta naturaleza no ofrece protección a las aguas subterráneas contra el movimiento descendente del lixiviado. Además, en las áreas donde la profundidad que llega hasta las aguas subterráneas es mayor, se encuentran ordinariamente suelos más permeables. En consecuencia, el lixiviado se filtra rápidamente a través del suelo y esto dificulta la protección de las aguas subterráneas.

Por otra parte, un suelo de baja permeabilidad se considera deseable porque restringe el flujo de lixiviado. Sin embargo, es dudoso si un suelo completamente impermeable es mejor, de acuerdo con la topografía del predio y el clima. En áreas húmedas un suelo totalmente impermeable podría ser problemático al permitir que el lixiviado se acumule en el relleno sanitario y se derrame tarde o temprano, lo cual causaría una molestia local o contaminación de aguas de superficie. La permeabilidad, por tanto, es un factor que debe considerarse en conjunto con otros requisitos.

Por último, la reglamentación por distancia tampoco tiene sentido si no tiene relación con la permeabilidad del suelo. Las pruebas han demostrado que más del 99% de la reducción en el contenido de sólidos disueltos se produce en 17 ft (5 m) de arcilla cenagosa, pero en arena cenagosa tan sólo se necesitan 650 ft (200 m) para una reducción del 90% (Hughes y Cartwright, 1972).

Así pues, las reglas generales que gobiernan los rellenos pueden ser inadecuadas. Los requisitos para un relleno de tierras específico deben tener como base una investigación hidrogeológica extensa del predio mismo. Esto se ha hecho raras veces en el pasado, pero es imprescindible si queremos asegurar la protección adecuada de nuestro abasto de aguas de superficie y subterráneas en el futuro. La fotografía aérea proporciona una base óptima para la elaboración preliminar de mapas. Un levantamiento del predio suministrará entonces detalles adicionales sobre topografía, drenaje, estratigrafía de suelos y características de las aguas subterráneas. Los datos de pozos locales y perforaciones en el predio proporcionan información acerca de la profundidad y el movimiento de las aguas subterráneas.

### 14.7.3 Control y tratamiento de la generación de lixiviados

**Características del lixiviado.** El lixiviado, esto es, el líquido contaminado que drena de un relleno sanitario, varía ampliamente en cuanto a su composición, según la antigüedad del relleno y del tipo de residuos que contiene. En la tabla 14-7 se indican las concentraciones típicas de los componentes y sus límites representativos.

**Cantidad de lixiviado.** Vesilind y Rimer (1981) han descrito una técnica de balance de agua desarrollada por Tenn *et al.* (1975), con base en valores promedio anuales, para estimar la cantidad de lixiviado. De acuerdo con este método, la producción de lixiviado es igual a la precipitación que cae en el relleno menos la cantidad de precipitación que se pierde del mismo. Hasta que el relleno se satura, el agua que entra en él también se reduce en la cantidad de humedad que se retiene en el suelo y los desechos. La base para estimar la proporción de estas fuentes de contribución se indica en la tabla 14-8. La figura 14-9, que muestra el porcentaje de desagüe de suelos cubiertos de grama a diversas pendientes, y la figura 14-10, que correlaciona la capacidad máxima en campo de los suelos con su coeficiente de permeabilidad o diámetro de partícula, complementan la tabla. El ejemplo 14.7 ilustra lo anterior.

en donde  $M_v$  y  $M_p$  son el porcentaje de agua en los desechos apisonados (en volumen) y en los desechos tal como se recolectan (en peso), respectivamente, mientras que  $\rho_c$  y  $\rho_a$  son la densidad de los desechos apisonados y la densidad del agua, respectivamente. Así pues, la capacidad disponible es la siguiente:

Capacidad máxima disponible (supuesto 4) = 30%

Menos el agua presente originalmente en los desechos = 15%

Capacidad disponible de retención de agua de los desechos = 15%

En consecuencia, con una producción de lixiviado de 450 mm/año que se cuela a través de 6 m de desechos, los cuales tienen una capacidad de retención de agua del 15%, transcurrirán

$$\frac{15}{100} \times \frac{6 \text{ m}}{0.450 \text{ m/año}} = 2 \text{ años}$$

antes de que se produzca un flujo desde el relleno.

El ejemplo 14.7 ilustra el uso de un balance de masa sobre el agua para estimar la cantidad y el tiempo de generación del lixiviado. En la práctica, durante el tiempo de operación del relleno, el material no está siempre en su lugar o el desagüe de superficie puede drenar hacia el relleno (en vez de escurrir hacia un sumidero recolector), lo cual crea un problema inmediato de control de lixiviado. El enfoque de balance de agua tiene muchas deficiencias, pero permite hacer una comparación respecto a la gravedad relativa del problema del lixiviado en diferentes condiciones climáticas. El lixiviado puede ser insignificante en climas secos, o incluso superar el 100% de la precipitación en el caso de rellenos de diseño incorrecto en áreas húmedas.

**Control del lixiviado.** La capacidad disponible de retención de líquido en los desechos en ocasiones es la justificación para mezclar residuos líquidos como lodos de aguas negras o efluentes industriales con residuos sólidos. Si los desechos fueran capaces de aceptar el 15% de su volumen de líquido (como en el ejemplo 14.7), se podrían absorber 15 m<sup>3</sup> de líquido por cada 100 m<sup>3</sup> de desechos. Esto equivale a 450 L/tonelada métrica de desechos, para una densidad de 333 kg/m<sup>3</sup> entregados en el relleno; ésta es la proporción que se utilizaba en Reino Unido, donde se practicaba la eliminación conjunta de residuos sólidos municipales y residuos líquidos industriales.

Una vez que se alcanza la capacidad de los desechos para absorber líquido (o incluso antes), el lixiviado emigra a través del suelo subyacente hacia el nivel freático. La máxima rapidez de filtración a través del suelo se produce cuando se alcanza su capacidad de campo (figura 14-10), y en ese punto el suelo ya no absorbe más agua. En estas condiciones, la rapidez de movimiento del líquido a través de un suelo uniforme es proporcional al gradiente hidráulico que causa el flujo. Esta relación, conocida como *ley de Darcy*, se expresa como

$$Q = KSA \quad (14.1)$$

en donde  $Q$  = cantidad de líquido que fluye por el área  $A$  por unidad de tiempo =  $nvA$

$K$  = coeficiente de conductividad hidráulica (depende del tipo de suelo)

$S$  = gradiente hidráulico (esto es, el cambio de elevación de la superficie de agua "libre" entre los dos puntos considerados, dividido entre la distancia que el líquido debe recorrer)

- $A$  = área de sección transversal bruta por la cual pasa el flujo
- $v$  = velocidad a la cual el líquido viaja a través del suelo
- $n$  = porosidad del suelo, es decir, volumen vacío dividido entre el volumen total de la masa de suelo

La tabla 14-9 contiene una lista de valores aproximados de porosidad y conductividad hidráulica. La aplicación de la ley de Darcy se ilustra en el ejemplo 14.8.

**TABLA 14-9 VALORES DE POROSIDAD Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA**

Tipo de suelo	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica	
		Descripción	$K(\text{cm/s})^a$
Grava	25-40	Permeabilidad alta	Más de $1 \times 10^{-1}$
Arena a arena fina	25-50	Permeabilidad media	De $1 \times 10^{-1}$ a $1 \times 10^{-3}$
Arena cenagosa a arena sucia	30-50	Permeabilidad baja	De $1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-5}$
Cieno	35-50	Permeabilidad muy baja	De $1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7}$
Arcilla	40-70	Prácticamente impermeable	Menos de $1 \times 10^{-7}$

<sup>a</sup>En virtud del uso generalizado de los cm/s para sistemas de suelos, estas unidades se han conservado aquí. Los factores de conversión son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{cm/s} \times 1.97 &= \text{ft/min} \\ \text{cm/s} \times 2,880 &= \text{ft/día} \\ \text{cm/s} \times 21,200 &= \text{gpd/ft}^2 \end{aligned}$$

Fuente: Para valores de porosidad, R. A. Freeze y J. A. Cherry, *Groundwater* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1979), pp. 36-37. Para valores de conductividad hidráulica, P. Theil, "Subsurface Disposal of Storm Water", en *Modern Sewer Design*, edición canadiense, ed. Committee of Sheet Steel Producers (Washington, D.C.: American Iron and Steel Institute, 1980), pp. 175-193.

**Ejemplo 14.8**

Si el relleno sanitario que se describe en el ejemplo 14.7 se estableciera en arcilla con un 50% de porosidad, y si  $K = 1 \times 10^{-7}$  cm/s:

- (a) ¿Cuánto tiempo tomaría para que el lixiviado se filtrara desde el fondo del relleno, a través del suelo subyacente, hasta el nivel freático 1.5 m más abajo? (Suponiendo que no se permite que el lixiviado se acumule en el relleno y que el suelo subyacente está saturado.)
- (b) ¿Cuánto tiempo tomaría si el suelo tuviera una conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s?
- (c) Si el relleno sanitario se llenara hasta rebosar, ¿qué efecto tendría esto en el tiempo de recorrido del líquido determinado en las partes (a) y (b)?

**Solución** (a) De la ecuación (14.1) y mediante la relación  $v = Q/nA$ , obtenemos lo siguiente

$$v = \frac{KSA}{nA} = \frac{KS}{n}$$

Por tanto,

$$K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s} \times 86,400 \times 365 \text{ s/año} = 3.15 \text{ cm/año}$$



combinación de procesos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos. En la literatura (Forgie, 1988; U.S. EPA, 1955) se puede encontrar información más detallada acerca de la selección del método más adecuado de tratamiento de lixiviados.

#### 14.7.4 Producción de gas

El gas que se produce en los rellenos sanitarios por la digestión anaeróbica de desechos orgánicos se desahoga a la atmósfera a través de hendeduras o pozos empacados con grava y no causa problemas. En ciertos rellenos sanitarios se instalan quemadores de gas en la parte superior de los respiraderos para quemar el gas que escapa. Si no se proporciona una ventilación adecuada, puede haber un movimiento lateral del gas bajo la cubierta del relleno, en particular cuando la superficie del suelo está congelada. Esto puede ser peligroso si el gas emigra a los edificios cercanos.

El aumento en el precio de los combustibles en la década de 1970 hizo despertar el interés en la posibilidad de recuperar el gas de los rellenos sanitarios. En Estados Unidos en 1983 había más de 20 proyectos en proceso de realización, casi todos en California, para recuperar y purificar el gas de rellenos sanitarios para uso interno en la generación de calor y energía, o para uso externo como combustible (Weddle *et al.*, 1983). El metano ( $\text{CH}_4$ ), que constituye del 40 al 60% del gas de rellenos sanitarios, tiene un contenido calorífico alrededor de  $37,000 \text{ kJ/m}^3$  ( $991 \text{ Btu/ft}^3$ ), o  $20,000 \text{ kJ/m}^3$  para el gas de relleno que contiene 55% de metano. A causa de la dilución del gas con aire durante su recuperación,  $16,800 \text{ kJ/m}^3$  ( $450 \text{ Btu/ft}^3$ ) es quizá un valor más realista (Emcon Associates, 1980). En teoría, la cantidad de gas que se produce es de 200 a 270 L de  $\text{CH}_4$  por kilogramo de desechos, de acuerdo con las características de los residuos sólidos y la base de la determinación (Vesilind, 1980). De la cantidad que se genera, se estima que se puede recuperar del 15 al 35%.

La estabilización de los rellenos y por ende la generación de gas toman un tiempo muy largo. Treinta años es un periodo que se menciona, pero esto se podría acortar en condiciones de humedad continua o prolongarse si los residuos permanecen secos. Para un periodo de estabilización de 25 a 30 años, de un tercio a dos tercios del gas se podría generar dentro de los primeros cinco años (Tchobanoglous *et al.*, 1977). Emcon Associates (1980) ha informado de tasas de producción de metano de 2.5 a 3.7 L por kilogramo de desechos por año, para desechos que han estado enterrados algunos años.

#### Ejemplo 14.9

A lo largo de un periodo de tres años, los residuos de una población de 100,000 habitantes han sido colocados en un relleno sanitario con un sistema de recuperación de gas. Esta práctica continuará en el futuro previsible, de modo que se espera un suministro constante de gas con 55% de metano ( $\text{CH}_4$ ). Una base del ejército cercana tiene 50 casas solas con calefacción de petróleo para el personal casado. Las viviendas consumen un promedio de  $100 \times 10^6 \text{ kJ}$  de energía calorífica durante el año y tienen una demanda máxima durante el mes más frío de  $2\frac{1}{2}$  veces el promedio. ¿Habrá suficiente gas de relleno sanitario disponible para calentar estas casas?

**Solución** Los supuestos para el problema son los siguientes:

1. Cantidad de residuos sólidos municipales entregados en el predio = 1 tonelada métrica/persona por año.
2. Producción total de gas = 200 L de  $\text{CH}_4$  por kilogramo de desechos a lo largo de 30 años.

3. La recuperación de gas será de al menos el 15% del que se genera (esto es, 30 L de CH<sub>4</sub> por kg de desechos).
4. Al menos un tercio de este gas se generará dentro de los primeros 5 años.
5. La eficiencia de conversión de los hornos de gas es de 75%.
6. El primer año en el que las casas estén conectadas será el más crítico, porque el gas disponible dependerá de la provisión de tres años de residuos que ya están enterrados. Por tanto, esta cantidad de residuos se usará como base para los cálculos.

La cantidad anual de residuos sólidos producidos es de 100,000 toneladas métricas/año, así que la cantidad total en tres años es de 300,000 toneladas métricas. La cantidad total de CH<sub>4</sub> que se produce en 30 años a partir de la provisión original de tres años de residuos es

$$\frac{200 \text{ L} \times 1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times 300,000 \text{ toneladas métricas} \times \frac{1000 \text{ kg}}{\text{tonelada métrica}} = 6 \times 10^7 \text{ m}^3$$

La recuperación de CH<sub>4</sub> es el 15% =  $9 \times 10^6 \text{ m}^3$ , de modo que la tasa de recuperación durante los primeros cinco años es

$$\frac{1}{3} \times \frac{9 \times 10^6 \text{ m}^3}{5 \text{ años}} = 600,000 \text{ m}^3/\text{yr}$$

(Advierta que  $600,000 \text{ m}^3/\text{año} = 2 \text{ L}$  de CH<sub>4</sub> por kilogramo de desechos, un valor muy conservador en comparación con los 2.5 a 3.7 L/kg informados [Emcon Associates, 1980].)

La energía disponible para calefacción a un 75% de eficiencia =  $450,000 \text{ m}^3/\text{año}$ , de modo que el contenido de energía del combustible (55% de CH<sub>4</sub>) es

$$\frac{450,000 \text{ m}^3/\text{año}}{0.55} \times 16,800 \text{ kJ/m}^3 = 13.8 \times 10^9 \text{ kJ/año}$$

Puesto que las necesidades térmicas por vivienda durante el periodo de máxima demanda es de  $250 \times 10^6 \text{ kJ/año}$ , el número de casas a las que se puede dar servicio es

$$\frac{13.8 \times 10^9 \text{ kJ/año}}{250 \times 10^6 \text{ kJ/año}} = 55 \text{ casas}$$

En consecuencia, habrá suficiente gas de relleno sanitario para calentar las casas, y con 100,000 toneladas métricas de desechos adicionales que se depositan cada año, la cantidad de gas recuperable irá en aumento durante muchos años. Advierta que no se ha respondido la pregunta respecto a si sería económico recuperar, limpiar y almacenar el gas, y después operar las instalaciones para 50 viviendas. ¿Cuál es su opinión?

## 14.8 OPORTUNIDADES FUTURAS

En todo Estados Unidos, Canadá y Europa hay una creciente tendencia hacia el reciclaje, la conversión en abono y, en menor medida, a la reducción de las fuentes. En la mayor parte de los casos la fuerza impulsora de estas tendencias es la falta de espacio para rellenos y la consecuente legislación sobre desviación de residuos. Un estudio de las prácticas de administración de residuos sólidos en 15 estados de EUA puso de manifiesto que cada uno de ellos había aprobado reglamentos de reciclaje, y la mayoría fomentaban la conversión en abono y la reducción de las fuentes (Ham, 1992). Además de estos nuevos enfoques hacia la administración de residuos, surgirán oportunidades para mejorar las prácticas más antiguas, de los sistemas de recolección a la incineración y a la eliminación final. La administración de residuos, para que sea eficaz, debe integrar todos estos

aspectos de un sistema de residuos sólidos para el máximo beneficio de aquéllos a quienes el sistema sirve. Todos los componentes están interrelacionados y un cambio en uno puede afectar a todos los demás. En consecuencia, ninguna actividad se puede examinar en forma aislada.

### 14.8.1 Legislación

El control de los residuos sólidos debe comenzar desde la manufactura y la mercadotecnia, mucho antes de que los productos lleguen al consumidor. Esto requiere una legislación eficaz y la cooperación de la industria. El diseño del producto, su empaque y los hábitos de consumo del consumidor son áreas donde son posibles mejoras significativas en la reducción de los residuos si se cuenta con la voluntad política y corporativa para apoyar estas medidas. La estandarización de las botellas de cerveza y de vino, y la prohibición de recipientes de bebidas desechables son ejemplos del tipo de legislación que se puede aplicar para conservar los recursos y liberar al municipio de la carga que significa ocuparse de estos artículos desechados.

### 14.8.2 Recolección

Para la mayor parte de los municipios es probable que continúen las prácticas actuales de recolección con camiones empacadores y equipos de dos o tres personas. No obstante, en circunstancias especiales son posibles enfoques más novedosos e innovadores. Algunos de ellos son los siguientes:

- Los vehículos de recolección de una sola persona que automáticamente recogen, descargan y devuelven recipientes son eficientes en condiciones ideales. Sin embargo, los autos estacionados, los árboles bajos y los recipientes de tamaño no uniforme crean problemas (Stone, 1977).
- Los sistemas neumáticos de recolección de residuos sólidos con tubos de 450 mm de diámetro mínimo son comunes para el transporte a distancias cortas desde hospitales, grandes complejos de apartamentos y fuentes similares (Stone, 1977). Estos sistemas se utilizan de manera ocasional para distancias más largas, hasta unos 3 km. Esta clase de sistemas han funcionado con éxito en Suecia y Japón, y también en Disney World en Florida desde finales de la década de 1960, y podrían tener aplicaciones de tipo municipal en Estados Unidos y Canadá (Zandi, 1977).
- Las tuberías para suspensiones líquidas tienen potencial para el transporte de residuos sólidos a distancias más grandes que los sistemas neumáticos. Los tubos podrían conectarse directamente a los edificios o complementar un sistema neumático (Zandi, 1977). En uno u otro caso, los residuos se deben moler y mezclar con agua antes de descargarse a la tubería. Los altos costos iniciales del sistema y de la molienda de los sólidos han desalentado su uso. Sin embargo, el surgimiento de bombas de molino de bajo costo para sistemas de recolección de aguas residuales puede alentar el uso de sistemas más sencillos para los residuos sólidos. Parece ser que un sistema común para el manejo tanto de residuos sólidos como de aguas residuales también tiene potencial.

### 14.8.3 Incineración

Las perspectivas futuras de la incineración como componente de un plan integral de administración de residuos sólidos dependerá en gran medida de las actitudes del público y de las ac-

ciones de los encargados de elaborar las políticas nacionales. En países europeos como Suiza y Dinamarca, las políticas nacionales que promueven la incineración (para residuos que no se convierten en abono ni se reciclan) han dado como resultado que la combustión sea la forma predominante de manejo de los residuos. En Estados Unidos la legislación sobre desviación de residuos aprobada en muchos estados ha enfocado los esfuerzos en el reciclado y la conversión en abono. La disminución del relleno sanitario (o entierro de residuos) en efecto ha reducido la presión para construir incineradores. Otros factores, identificados por Ham (1992), que han limitado el crecimiento de la incineración en la administración de residuos sólidos son:

- Los costos y los problemas técnicos asociados con la satisfacción de los estrictos estándares para emisiones de contaminantes del aire en continuo cambio
- El manejo y eliminación de los residuos de la combustión, los cuales se consideran como peligrosos en algunos estados
- La preocupación pública respecto a la contaminación del aire
- El temor de invertir en unidades de largo plazo y que demandan mucho capital a causa de las fluctuantes prioridades en la administración de los residuos sólidos

Existe una creciente tendencia para producir material más limpio para la incineración o la conversión en abono, y por tanto ceniza o abono residuales más limpios. A medida que los controles para la contaminación del aire para los incineradores y los reglamentos que gobiernan el uso de abono se hagan más estrictos, se harán esfuerzos aún mayores para mejorar la materia prima.

#### 14.8.4 Los rellenos de tierras

El relleno de tierras es el elemento común de todos los métodos de eliminación, pues se aplica a los residuos sólidos tal como se recolectan o a lo que queda de ellos después del procesamiento. Para las regiones donde el costo es el factor determinante para la eliminación de residuos sólidos, el entierro de residuos no procesados continuará como método predominante. Incluso en países muy desarrollados en donde la incineración es común y los terrenos escasean, existen predios potenciales para relleno sanitario. En el Reino Unido, por ejemplo, el 25% del espacio que dejan las operaciones mineras de superficie en un año podría dar cabida a todos los residuos residenciales y comerciales, con el 75% restante disponible para residuos industriales inertes y cascajo de la industria para la construcción (Holmes, 1981).

Aunque es mucho lo que hemos aprendido acerca de los rellenos de tierras desde los tiempos del tiradero al aire libre, quedan todavía muchas preguntas sin responder; por ejemplo:

- ¿En qué condiciones se debe proyectar un relleno sanitario para mantenerse seco, y cuándo sería provechosa la adición (o recirculación) de líquido?
- ¿Cuáles son las consecuencias de la eliminación conjunta de residuos sólidos municipales y lodos de aguas negras o residuos industriales?
- ¿Cuándo se deben proyectar los rellenos con una contención completa, y cuándo considerar la atenuación por suelos y la migración de lixiviados?
- ¿Qué circunstancias deben existir para que sea práctica la recuperación de gas de los rellenos? (En Italia, la recuperación de gas que proviene de los rellenos sanitarios es obligatoria por ley.)

Es necesario dar respuesta a éstas y a muchas otras preguntas para que el diseño de los futuros rellenos tenga una base racional. Las soluciones estarán influidas por las características del predio y el clima, desde luego, pero también por los tipos de procesamiento, recolección y control de las fuentes que anteceden al entierro de residuos y por el tamaño del área a la cual se da servicio. El control de estos últimos factores dependientes de los sistemas (entre otros) es la función de la administración de residuos. Las pautas para ésta se establecen en un plan administrativo de residuos elaborado en armonía con los objetivos de la autoridad local, regional o nacional involucrada. Estos objetivos, y su orden de prioridad, varían de una localidad a otra. En una región, la protección del abasto de aguas subterráneas podría ser el requisito principal, mientras que en otra predominará el uso mínimo de rellenos o la recuperación máxima de energía. Si los objetivos se establecen con claridad por medio de un plan integral, es más probable que las decisiones de tipo político y las que tomen los administradores estén en armonía y sean por tanto más aceptables para el público.

## PROBLEMAS

- 14.1. Un incinerador de combustión en masa quema 800 toneladas métricas/día (880 toneladas/día) de residuos sólidos municipales, 7 días a la semana.
- ¿Qué área de almacenamiento se necesita para guardar los residuos de 3 días si la profundidad promedio de los desechos debe limitarse a 1.5 m (5 ft)? Los residuos se trasladan en camiones compactadores.
  - ¿Cuántos camiones compactadores llegan al incinerador en un día promedio si las recolecciones se llevan a cabo a lo largo de 5 días?
  - Si una huelga de periódicos reduce la cantidad de papel recolectado en un 50%, ¿cuál es la reducción porcentual del peso de los desechos que se entregan cada día?
- 14.2. Una vez por semana se van a recolectar los residuos sólidos de un campamento de verano con 100 niños y un personal de 25 adultos. Si se separan las botellas y latas (que representan el 20% del peso), los residuos de papel (40%) se queman en el incinerador del campamento, y sólo se recolectan los residuos de la cocina (30%) y diversos residuos de las cabañas (10%), ¿qué volumen se recogerá?
- 14.3. La composición de los residuos sólidos de una comunidad residencial es la siguiente:

Componente	Porcentaje en peso
<b>Combustibles</b>	
Papel y cartón	35
Residuos de alimentos	15
Recortes de jardín	10
Otros (textiles, caucho, madera, plástico)	10
<b>No combustibles</b>	
Metal	10
Vidrio	10
Ceniza	10

Estime (a) el contenido de humedad, (b) la densidad y (c) el contenido de energía de estos residuos con base en los valores representativos de los componentes (tablas 14-3, 14-4 y 14-5).

- 14.4. Las proporciones de residuos sólidos que se muestran en la tabla 14-2 y las tasas de generación per cápita que se indican en la figura 14-1 son promedios correspondientes a Estados Unidos. Sin tomar en cuenta los residuos "especiales", indique de forma cuantitativa cómo se compararían las proporciones y las tasas de generación per cápita (kg/día) con el promedio nacional en cada uno de los siguientes casos:
- (a) La primera recolección en un área residencial después de la Nochebuena si los árboles de Navidad se recogen por separado.
  - (b) La recolección, en el mismo vecindario de la parte (a), durante la temporada de vacaciones de verano que abarca dos meses.
  - (c) La recolección en una comunidad residencial suburbana en donde también se ubican muchas oficinas centrales, organismos gubernamentales e industrias de alta tecnología.
  - (d) La recolección en una población de 20,000 habitantes ubicada en una región agrícola. Se encuentra en operación un plan privado y dinámico de separación de papel, botellas y latas en la fuente.
- 14.5. Complete los valores de contenido de humedad que faltan en la siguiente tabla:

Residuos sólidos municipales	Contenido de humedad	
	% en volumen	% en peso
Tal como se entregan a un relleno sanitario (300 kg/m <sup>3</sup> )		25
En un relleno sanitario bien apisonado (600 kg/m <sup>3</sup> )		

- 14.6. Con base en un costo neto de reciclado de \$165 por tonelada (véase la sección 14.3.3) muestre cómo un programa de reciclaje que desvía el 25% de los RSM del relleno sanitario (con un ahorro de \$44 por tonelada) aumenta el costo total del sistema de \$100 por tonelada sin reciclaje a alrededor de \$132 por tonelada con reciclaje.
- 14.7. Señale la fuente de lo indicado en cada uno de los siguientes incisos y exponga una razón que explique por qué, desde un punto de vista ambiental o de salud pública, todos ellos son motivo de preocupación en los rellenos.
- (a) Dióxido de carbono
  - (b) Metano
  - (c) Disolventes
  - (d) Nitrógeno orgánico
  - (e) Roedores
- 14.8. Con base en los siguientes costos hipotéticos determine la distancia promedio de transporte hasta un relleno sanitario que se necesitaría para que el uso de una estación de transferencia y camiones con remolque de una sola persona (con capacidad para 20 toneladas métricas) fuese más económico que el transporte directo hecho por camiones empacadores con equipos de tres personas (con capacidad para 4 toneladas métricas).

Costos de mano de obra (promedio)	\$12.00/h
Costos de capital y de operación	
Estación de transferencia	\$14.00/tonelada métrica (\$12.75/ton)
Camiones empacadores	\$0.62/km (\$1.00/mi)
Unidades de trailer	\$1.25/km (\$2.00/mi)

Suponga que la velocidad promedio durante el transporte es de 30 km/h (20 mph) tomando en cuenta las demoras en el relleno sanitario.

- 14.9. El Municipio Regional de Villaurbana tiene un núcleo urbano industrializado, A, y dos ciudades centralizadas, B y C (figura 14-11). En la actualidad se están transportando directamente dos mil toneladas diarias de residuos sólidos municipales de toda el área a un relleno sanitario permanente apropiado D.



Figura 14-11

Se está considerando la posibilidad de (1) proveer estaciones de transferencia en A, B y C, con descarga final en D, o (2) de incorporar procesamiento central para recuperación de recursos en A, con estaciones de transferencia en B y C y descarga final de los residuos en D.

- (a) Describa brevemente o ilustre con un diagrama otros dos sistemas que sería conveniente evaluar.  
 (b) ¿Cuál es la utilidad de las técnicas matemáticas de programación en la evaluación de otros sistemas?  
 (c) ¿Es razonable evaluar estas opciones con base sólo en los costos? ¿Qué otros factores podrían ser importantes? Sea específico.
- 14.10. Determine el tiempo de equilibrio (sin pérdida ni ganancia) del viaje redondo para camiones empacadores conducidos del punto A a un centro de eliminación en comparación con el uso de unidades de tractor y de *trailer* para transportar los residuos de una estación de transferencia en el punto A hasta el centro de eliminación. Los siguientes datos son aplicables.

	Camiones empacadores	Camiones de remolque
Volumen	20 m <sup>3</sup>	90 m <sup>3</sup>
Densidad de los residuos	275 kg/m <sup>3</sup>	400 kg/m <sup>3</sup>
Costo de operación	\$50/h	\$70/h

El costo de operación y amortización de la estación de transferencia es de \$15 por tonelada métrica, y el costo del tiempo adicional para descargar las unidades de *trailer* en comparación con los camiones empacadores es de \$2 por tonelada métrica.

- 14.11. Como parte de un programa para reducir la frecuencia de recolección de dos veces por semana a una sola, un municipio estadounidense de 300,000 habitantes está promoviendo la instalación de unidades de eliminación de fregadero en los hogares y poniendo en práctica un plan para recoger el papel periódico por separado. Un incinerador de pantalla de agua y de combustión en masa, alimentado con petróleo, toma los residuos municipales, cuya composición es similar a la que se muestra en la tabla 14-2 y en la figura 14-1 para 1991, y vende vapor de agua a una planta generadora de energía eléctrica adyacente. Si se utilizan unidades de fregadero capaces de reducir los residuos de alimentos recolectables en un 50% en el 20% de las viviendas, y suponiendo que el contenido de papel de los residuos sólidos municipales será el 85% de la cantidad que se recolectaba antes:
- (a) ¿En qué porcentaje se reducirá la producción de vapor para la planta generadora si no se aporta combustible complementario y el contenido de alimentos y papel representa todo el material

- Waste Matters*. The Municipality of Metropolitan Toronto, vol. 3, número 1, 1993.
- WEDDLE, C. L., McDONALD, H. S. y HOWARD, W. R. "Landfill Gas Utilization at a Wastewater Treatment Plant". *Journal of the Water Pollution Control Federation* 55 (1983): 1325-1330.
- WILSON, D. G. "Resource and Energy Recovery". *Handbook of Solid Waste Management*, D. G. Wilson (ed.). Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1977, pp. 275-431.
- WOLF, K. W. y SOSNOVSKY, C. H. "High Pressure Compaction and Baling of Solid Waste". *Handbook of Solid Waste Management*, D. G. Wilson (ed.). Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1977, pp. 136-149.
- WOODS, R. "Waste-to-Energy and Recycling: Under One Roof". *Waste Age*, noviembre (1992): 60-64.
- ZANDI, I. "Pipeline Transportation of Solid Wastes". *Handbook of Solid Waste Management*, D. G. Wilson (ed.). Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1977, pp. 115-125.



# CAPÍTULO 15

---

## Residuos peligrosos

*J. Glynn Henry y O. J. C. Runnalls*

### 15.1 INTRODUCCIÓN

Los peligros en el ambiente pueden tener su origen en sucesos naturales como crecidas y huracanes (capítulo 4), en perturbaciones ambientales causadas por el hombre como la acumulación de CO<sub>2</sub> y la lluvia ácida (capítulo 5) y en el tratamiento y eliminación incorrectos de residuos tóxicos y peligrosos (como los disolventes orgánicos y los residuos metálicos) que genera una sociedad industrializada. El control de estos residuos industriales o “especiales” se estudia en este capítulo.

Los **residuos peligrosos** son aquellos que podrían ser dañinos para la salud de los humanos o de otros organismos, o para el ambiente. Diversas autoridades emplean definiciones más precisas, ninguna de las cuales ha sido acogida con amplia aceptación. La Regulación 824/76 de Ontario, elaborada bajo la Waste Management Act (Ley para la administración de residuos) y más tarde puesta en práctica por la Environmental Protection Act (Ley para la protección ambiental) de 1975, proporciona una definición de los residuos peligrosos que es representativa de aquellas que utilizan muchos países:

“Residuos peligrosos son los desechos que requieren precauciones especiales para su almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento o eliminación para evitar daños a personas o propiedades, e incluye residuos explosivos, inflamables, volátiles, radiactivos, tóxicos y patológicos.”

Una definición abreviada de los residuos peligrosos, elaborada por la Environmental Protection Agency de EUA (U.S. EPA), dice lo siguiente:

“El término *residuos peligrosos* significa: un desecho sólido o combinación de ellos que, a causa de la cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas puede

- causar o contribuir de manera significativa a un aumento en la mortalidad o un incremento en una enfermedad grave irreversible o reversible que produzca incapacidad; o
- plantear un peligro presente o potencial considerable para la salud humana o el ambiente cuando se trata, almacena, transporta, elimina o maneja de alguna otra manera incorrectamente”.

Para los fines de la definición anterior, los residuos sólidos comprenden un espectro de materiales muy amplio, entre ellos algunos líquidos y gases.

El tratado completo de la EPA sobre residuos peligrosos está disponible en el número del 19 de mayo de 1980 del *Federal Register*, vol. 45, núm. 98 (Libro 2 de 3), páginas de la 33119 a la 33137. Las listas de residuos peligrosos incluidas en ese documento son muy extensas e incluyen los siguientes:

- Disolventes halogenados que se han utilizado para desengrasar, como tricloroetileno, cloruro de metileno y otros
- Disolventes no halogenados usados como xileno, acetona, etilbenceno, éter etílico y otros
- Lodos de tratamiento de aguas residuales de operaciones de galvanoplastia
- Lodos desecados de lavadores para control de la contaminación del aire de hornos de coque y altos hornos
- Lodos generados durante la producción de diversos compuestos de cromo
- Lodos de separadores API de refinerías de petróleo

Algunos ejemplos de residuos excluidos de la lista de peligrosos son las aguas negras domésticas, los flujos de retorno de la irrigación, desechos de minas, estiércol, sobrecapas de excavaciones mineras, cenizas finas y cenizas residuales, fluidos de perforación y, residuos de explotación de petróleo crudo, gas natural o energía geotérmica. Asimismo se excluyen de estas listas los residuos nucleares y radiactivos, los cuales, en virtud de sus necesidades específicas, se controlan por separado de acuerdo con la Atomic Energy Act (Ley para la energía atómica) de 1954 y las enmiendas a la misma.

El problema con todas las definiciones es la falta de clasificación del grado de riesgo en cada caso. Es obvio que ciertos residuos son más peligrosos que otros; por ejemplo, los plaguicidas deben recibir mayor atención que los residuos aceitosos. No obstante, las definiciones no asignan prioridades a los riesgos, una deficiencia que es necesario remediar en el futuro.

En este capítulo examinaremos el manejo, desde su fuente hasta su eliminación final, de tres tipos de residuos peligrosos: (1) los materiales radiactivos, que son principalmente responsabilidad de las autoridades federales, (2) los residuos médicos, y (3) los residuos industriales líquidos no radiactivos, la mayoría de los cuales están sujetos a jurisdicción estatal o provincial.

La energía nuclear es la causa fundamental de los problemas que plantean los residuos radiactivos, inicialmente en la explotación minera y el procesamiento del combustible de uranio y los desechos de minas resultantes, y en último término en el combustible agotado de los reactores de energía nuclear. Los problemas que presenta el manejo seguro y la eliminación de éstos, así como el retiro de servicio de reactores nucleares se examinan en la sección 15.2. Los residuos

médicos de hospitales y centros de investigación y los químicos de la industria son los otros residuos peligrosos que se analizan. En términos de complejidad y magnitud, los residuos industriales plantean el desafío más grande, y el resto del capítulo se ocupa principalmente de su manejo y eliminación. Se comparan los enfoques de la administración de residuos peligrosos en diferentes países, y se explican en detalle las opciones disponibles para el tratamiento y eliminación de residuos industriales peligrosos.

## 15.2 RESIDUOS NUCLEARES

Todos los reactores nucleares dependen del uranio como combustible. El uranio se extrae de las menas (minerales metálicos) y se refina por medio de procesos químicos. Aquel que contiene la composición isotópica presente en la naturaleza, de 0.72% de uranio 235 y 99.2% de uranio 238 se utiliza en los reactores de agua pesada. Sin embargo, para uso en reactores de agua ligera y reactores avanzados con enfriamiento por gas, es necesario aumentar el contenido de uranio 235, de cuatro a cinco veces, en una planta de enriquecimiento isotópico. El uranio se transforma en varillas de combustible que se insertan en el reactor nuclear, donde permanecen hasta por dos años. Durante este periodo las varillas se tornan intensamente radiactivas debido a la generación de productos de fisión y a la formación de elementos transuránicos como plutonio, americio y curio (los elementos 94, 95 y 96). Una vez que las varillas de combustible se extraen del reactor, es necesario enfriarlas para extraer el calor que libera la desintegración radiactiva. La manera más fácil de conseguir esto, al menos durante el primer año o dos, es en un estanque lleno de agua que se describe por lo común como un *estanque de almacenamiento de combustible agotado*. El ciclo del combustible se completa con la separación del valioso plutonio residual del uranio y de los productos de fisión en una planta de reproceso químico, o por eliminación del combustible en un depósito subterráneo. Si se elige la primera ruta, es preciso inmovilizar los productos de fisión incorporándolos en una matriz de vidrio o cerámica antes de eliminarlos en un depósito similar. En la figura 15-1 se muestra un diagrama de flujo del ciclo del combustible de un reactor de agua pesada CANDU con sobrepresión y alimentado con uranio natural. El ciclo del combustible para los reactores de agua ligera es más complicado porque se requiere combustible enriquecido, como se ilustra en la figura 15-2.

### 15.2.1 Efectos en la salud y el ambiente

Los efectos de la operación del ciclo del combustible nuclear en la salud y en el ambiente se pueden separar en dos categorías que corresponden a la producción de residuos de bajo y alto nivel. La mayoría de los residuos de bajo nivel se generan en las operaciones de extracción y refinación de uranio, las cuales liberan en el ambiente pequeñas cantidades de torón 230, radio 226, radón 222 y plomo 210, así como especies iónicas no radiactivas. El daño que causan estos residuos tanto a las personas como a su medio, se produce normalmente a lo largo de un periodo prolongado. Por ejemplo, el radio 226 puede sufrir una elución lenta hacia arroyos, ríos y lagos, y puede alcanzar niveles con los cuales la ingestión de agua durante varias décadas podría dar origen a enfermedades de la sangre y los huesos. De forma similar, en el pasado algunos trabajadores de minas de uranio padecían cáncer pulmonar por exposición al radón 222 después de trabajar bajo tierra por muchos años (Ham, 1976). Esta experiencia llevó a las autoridades encargadas de la regulación, a principios de la década de 1970, a reducir a un tercio los límites de

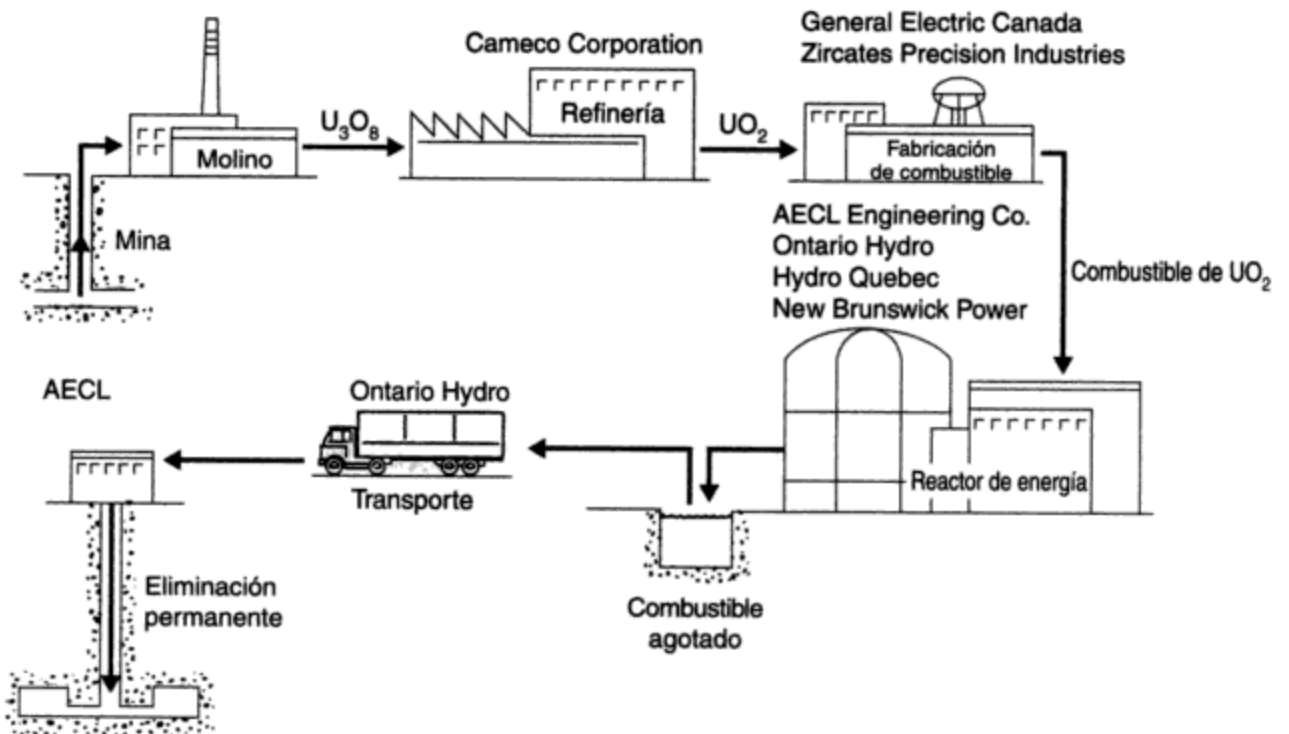
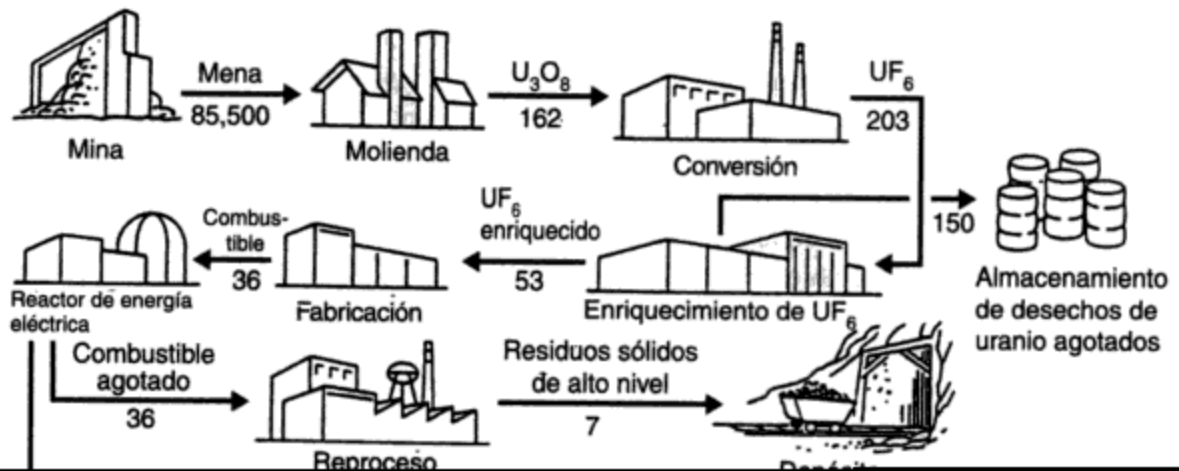


Figura 15-1 Ciclo completo del combustible de uranio natural en Canadá.



exposición a radón 222 (el nivel actual), con los cuales los mineros pueden trabajar bajo tierra durante 30 años sin un riesgo excesivo de padecer cáncer pulmonar por exposición al radón. El problema de los residuos de bajo nivel se caracteriza, en consecuencia, por grandes volúmenes de material y largos periodos de exposición previos al surgimiento de peligros serios para la salud y el ambiente.

El problema de los residuos de alto nivel es todo lo contrario. Los residuos se producen en un volumen relativamente pequeño, que es el núcleo de combustible del reactor, donde en poco tiempo el combustible nuevo se torna muy radiactivo. De llegar a interrumpirse el enfriamiento del combustible en el reactor, como sucedió en el de Three Mile Island (TMI) de Harrisburg, Pensilvania, en marzo de 1979, se puede destruir la integridad del revestimiento metálico del combustible y liberarse cantidades letales dentro de la estructura de contención del edificio del reactor. Cinco años después del accidente de TMI, los niveles de radiación dentro del edificio todavía eran tan altos que al personal que se ocupó de las operaciones de inspección y limpieza se le permitía sólo unos pocos minutos de tiempo de trabajo al mes para no exceder los límites de exposición a la radiación. No obstante, la cantidad de productos radiactivos de fisión que escaparon del edificio de TMI hacia el área circundante en el momento del accidente fue pequeña. Se ha estimado que la radiación recibida de estos productos de fisión puede dar origen a menos de un caso de cáncer mortal entre los 2 millones de personas que habitaban en un radio de 80 km del lugar del accidente (Fabrikant, 1981). Puesto que se espera que en esta población se presente un total de 541,000 casos de cáncer por otras causas, será imposible detectar cualquier incremento debido al accidente de Three Mile Island.

Un accidente propiciado por el uso de un reactor y que fue más grave todavía ocurrió el 26 de abril de 1986, cuando los operadores perdieron el control de un reactor moderado con grafito y enfriado por agua durante un ensayo de baja potencia en Chernobyl, en la Unión Soviética. El núcleo del reactor eléctrico de 1,000 MW se destruyó, el moderador de 2,500 toneladas métricas de grafito se incendió, y la parte superior del edificio ligero de tipo industrial que alojaba la unidad salió volando en pedazos. Entre el 4 y el 5% del inventario radiactivo escapó fuera del edificio. Una gran parte del material se sedimentó en el suelo cercano, pero una fracción se dispersó en la atmósfera superior y se extendió en una franja amplia alrededor del hemisferio norte. Se iniciaron muchos incendios a causa del combustible y del grafito encendido expulsados sobre el techo del edificio de turbinas, pero fueron extinguidos en pocas horas por bomberos que trabajaron en campos de alta radiación.

En total, el número de operadores del reactor y bomberos que murieron a causa del accidente fue de 31 (IAEA, 1986). Un total de 200 personas más que estaban presentes en la escena del accidente sufrieron lesiones por exposición a la radiación y fue necesario hospitalizarlas. Toda esta gente ya se ha recuperado. Las estimaciones de los expertos rusos sugieren que la radiactividad liberada podría producir hasta 2,000 casos adicionales de cáncer durante los próximos 50 años entre los 75 millones de personas que viven en la parte europea de la CEI (IAEA, 1986). Sin embargo, en virtud de que la incidencia normal de cáncer será alrededor de 10 millones de casos entre esta población, es probable que los casos adicionales que son consecuencia del accidente de Chernobyl sean tan pocos que será imposible detectarlos.

Aunque el mundo tal vez experimentó el peor accidente concebible en un reactor nuclear, las consecuencias en términos de decesos y lesiones debilitantes fueron mucho menores que lo predicho por los expertos mundiales en seguridad de reactores (U.S. AEC, 1974). La experiencia de Chernobyl sugiere que los accidentes en los reactores no tienen efectos más devastadores que los accidentes convencionales asociados con la producción de energía en gran escala.

Copyrighted image

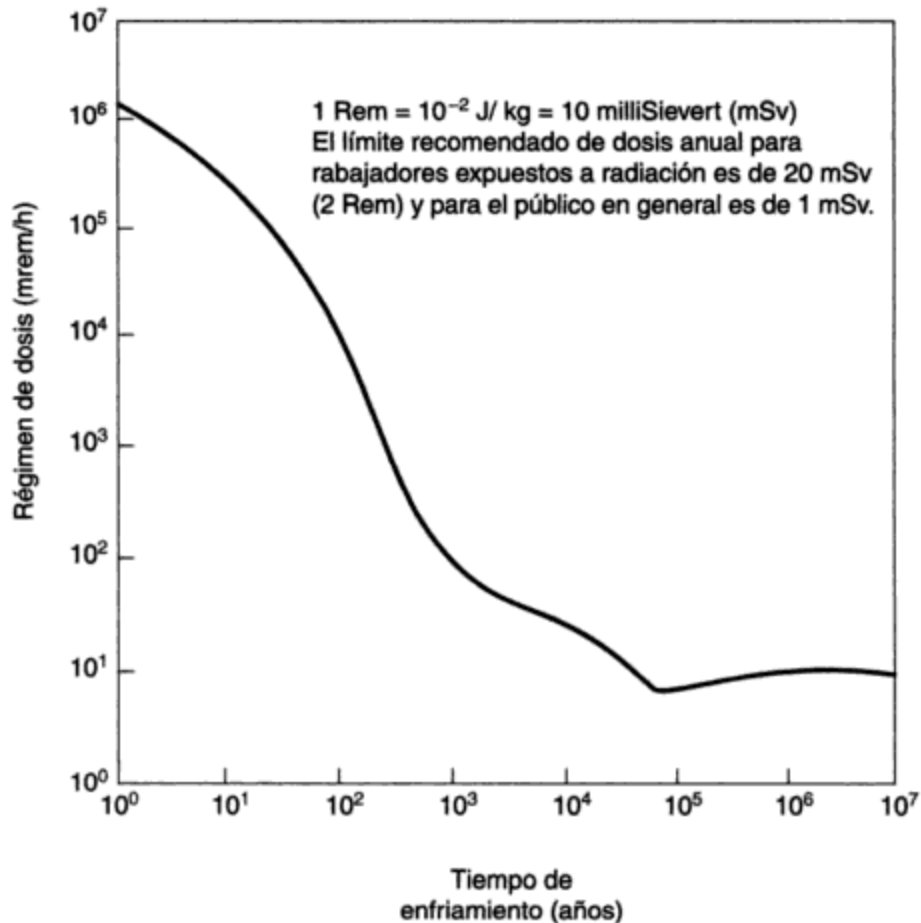
**Figura 15-4** Estanque de combustible auxiliar de la planta generadora nuclear de Pickering, donde las varillas de combustible usadas y luego almacenadas bajo agua son visibles aunque no dañinas para los trabajadores que se encuentran en el puente y no están protegidos.  
*Fuente:* Ontario Hydro.

permite separar la solución de los sólidos; a esta solución se aplica entonces un tratamiento químico adicional para recuperar el uranio. Posteriormente la gran masa de sólidos residuales se envía por tubería en forma de suspensión hasta el estanque de desechos para eliminarla. Por ejemplo, en el área de extracción de uranio del lago Elliot de Canadá en 1986, se generaron 6 millones de toneladas métricas de roca residual finamente dividida, o desechos, a fin de recuperar 5,000 toneladas métricas de uranio.

Los desechos plantean varios problemas porque contienen contaminantes minerales, químicos y radiactivos. Se podría pensar que bastaría con devolverlos a la mina de la cual se extrajo el mineral. Por desgracia, esto interferiría con la extracción de más mineral, y en cualquier caso el volumen de desechos es por lo general de 30 a 40% mayor que el de la roca original a causa del proceso de pulverización. En consecuencia, casi todas las compañías que se dedican a la extracción de uranio se deshacen de sus desechos en instalaciones superficiales cuidadosamente proyectadas.

Los contaminantes minerales varían de acuerdo con la naturaleza de la mena original. En el conglomerado del lago Elliot, por ejemplo, del 5 al 8% es pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Una vez que la mena se ha triturado y molido, la pirita queda más expuesta al ataque del oxígeno, el agua y las bacterias que en su estado original bajo tierra. Un producto de este tipo de ataque es el ácido sulfúrico, el cual poco a poco puede filtrarse hacia los ríos y lagos cercanos, en perjuicio de los mismos.

Los desechos contienen contaminantes metálicos tóxicos como arsénico, cadmio, mercurio, molibdeno, vanadio y zinc junto con el hierro. Otros contaminantes inorgánicos, entre ellos iones amonio, cloruro y sulfato, pueden estar presentes en concentraciones tales que representan una amenaza para el entorno próximo.



**Figura 15-5** Régimen de dosis de radiación gama externa de un haz de combustible irradiado de referencia de Pickering a una distancia de 30 cm (consumo de salida promedio de  $7,500 \text{ MW} \cdot \text{día/tonelada métrica de U}$ ). Fuente: Aikin *et al.* (1977), reproducido con autorización del Ministerio de Abastecimiento y Servicios de Canadá.

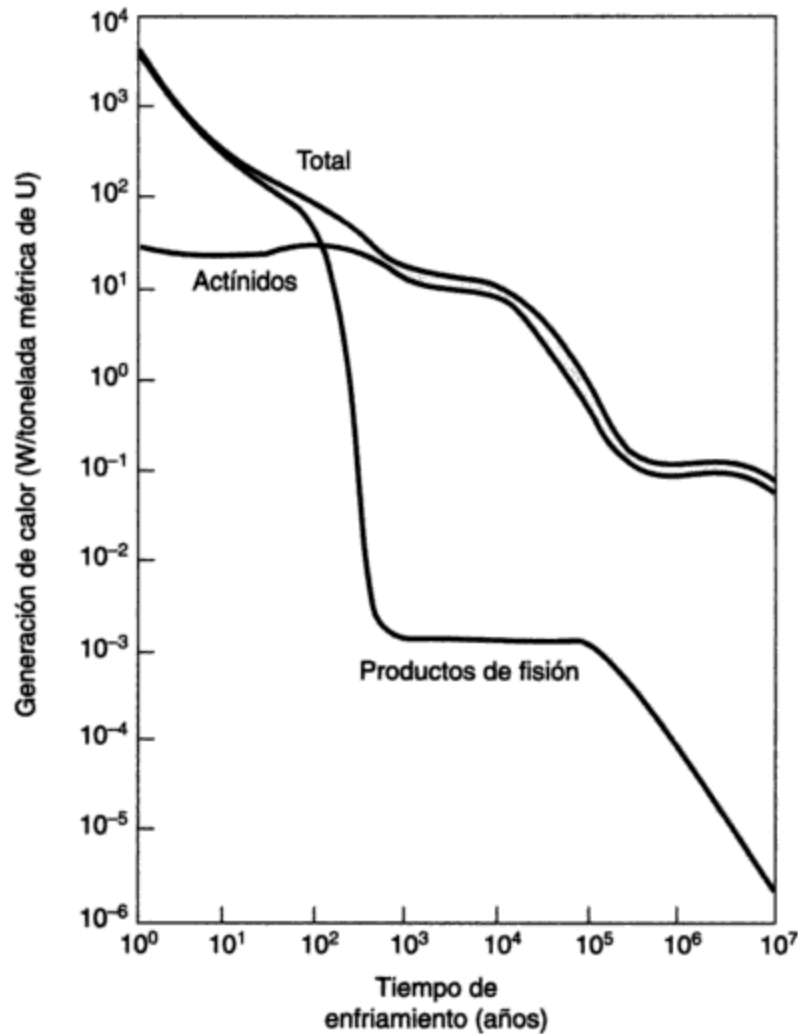
Tiempo de residencia a una distancia de 30 cm después de

- (a) 10 años = 2 s
- (b) 100 años = 36 s
- (c) 1000 años = 1 h

### Ejemplo 15.2

¿Cuál es la producción de calor de un haz de combustible agotado de Pickering después de un tiempo de enfriamiento de (a) 1 año; (b) 1,000 años?

**Solución** De la figura 15-6, la producción de calor del combustible irradiado de Pickering después de 1 año es de 4 kW/tonelada métrica de uranio, y después de 1,000 años es de 20 W/tonelada métrica de uranio. Puesto que un haz contiene 20 kg de U, su producción de calor es de 80 W después de 1 año y de 0.4 W después de 1,000 años.



**Figura 15-6** Generación de calor por desintegración: combustible irradiado de referencia de Pickering (consumo de salida promedio de 7,500 MW · día/tonelada métrica de U). Fuente: Aikin *et al.* (1977), reproducido con autorización del Ministerio de Abastecimiento y Servicios de Canadá.

#### 15.2.4 Manejo de residuos nucleares

**Desechos de minas y molinos.** El almacenamiento y la eliminación de desechos son problemas específicos para cada lugar. Las soluciones dependen en gran medida del clima, la topografía y la geología locales y de la naturaleza de la operación de explotación minera (si es subterránea o a cielo abierto). La proximidad de áreas habitadas también afecta el diseño de ingeniería.

En las regiones áridas del suroeste de Estados Unidos se pone énfasis en la eliminación de los desechos en una depresión abajo del nivel del suelo, para después cubrir el depósito con un espesor protector de suelo, arena, grava o roca triturada. La capa de recubrimiento puede tener de 1 a 3 metros de espesor. El requisito exacto no se conocerá hasta que los diversos organismos reguladores hayan acordado una reglamentación específica en relación con la contención del radón.



El manejo de los desechos en las áreas donde la precipitación es mayor, como en el lago Elliot, en Canadá, se enfoca a diseños que reducen al mínimo la disolución del radio 226, los iones de metales tóxicos y otros contaminantes, como sulfatos y cloruros.

La mayor parte de la tecnología para el diseño y la construcción de instalaciones seguras para la eliminación de desechos de minas y molinos de uranio está disponible. Esta clase de áreas requieren pocos controles institucionales y deben proporcionar un almacenamiento seguro para el ambiente a largo plazo. En los países productores de uranio todavía se realizan intensos esfuerzos de investigación y desarrollo para proveer los datos restantes necesarios para asegurar que los desechos de las minas y molinos de uranio no constituyan un peligro para los humanos o para el ambiente.

**Residuos de refinerías y de la fabricación de combustible.** Se generan pequeñas cantidades de residuos que contienen uranio en las refinerías donde se purifican los concentrados de uranio de las minas. El uranio es tan valioso, que normalmente los residuos se aceptan de regreso en el circuito de molienda en los molinos de minas sin cargo, puesto que el material, aunque sea en pequeña cantidad, es equivalente al mineral de alta calidad de muchas minas. Otro producto de la operación de las refinerías es nitrato de amonio. Su contenido de uranio se reduce durante los procesos químicos que se llevan a cabo hasta una concentración inferior a la que se encuentra normalmente en los fertilizantes comerciales, de modo que se puede comercializar como un producto agrícola aceptable.

En las operaciones de fabricación de combustible se produce una pequeña cantidad de óxido de uranio residual como resultado de las operaciones de compresión, sinterización y molienda. Una vez más, por el alto valor del uranio se recicla al proceso de fabricación por disolución en ácido nítrico, precipitación como diuranato de amonio y conversión en dióxido de uranio en polvo. En efecto, el circuito es cerrado y no escapan cantidades significativas de residuos de uranio al ambiente.

**Combustible agotado.** El tiempo durante el cual el combustible agotado se debe almacenar bajo el agua está todavía en duda. Desde luego, el primer año o dos después de descargarse del reactor, el flujo térmico de los productos de fisión que se desintegran es suficiente para hacer que el almacenamiento bajo agua sea la opción más deseable. Sin embargo, a medida que el tiempo transcurre, surge otra posibilidad, la del almacenamiento provisional en seco en botellas de concreto. La ruta específica para tal almacenamiento está determinada por los aspectos económicos y la eliminación final que se propone para el combustible agotado. Un método económico propuesto sería guardar el combustible bajo el agua durante quizá los primeros 50 años. La gran resistencia a la corrosión del material de revestimiento metálico de aleación de circonio permite confiar en que debe ser posible llegar al fin de ese periodo sin daños significativos debidos a la corrosión. Algunos haces de combustible agotado del reactor NPD canadiense, por ejemplo, han sido almacenados de esa manera desde 1962.

Otras personas son de la opinión de que el almacenamiento en seco en recipientes de concreto puede ofrecer una opción más económica para tiempos de almacenamiento aún mayores. Ambos caminos ofrecen la ventaja de que los haces de combustible se conservan en una forma fácilmente recuperable para el futuro, en el caso de que el reproceso del combustible para separar y reciclar el plutonio fisionable fuera deseable.

Cuando el combustible agotado se descarga de los reactores de agua ligera, consiste en una mezcla de uranio enriquecido, plutonio y productos de fisión. El componente de uranio enri-

## 15.3 RESIDUOS MÉDICOS

### 15.3.1 Tipos de residuos

La Medical Waste Tracking Act (MWTa; ley para el rastreo de residuos médicos) de EUA, promulgada por el Congreso en respuesta a la preocupación pública que se despertó después de que el mar depositó en la playa de la costa este de EUA jeringas, agujas y otros residuos, define los “residuos médicos reglamentados” como (U.S. EPA, 1989b):

- Cultivos y cepas de agentes infecciosos
- Residuos patológicos humanos
- Sangre humana y productos de sangre
- Instrumentos cortantes: usados y sin usar
- Residuos de animales contaminados
- Residuos procedentes de pacientes aislados con enfermedades muy contagiosas

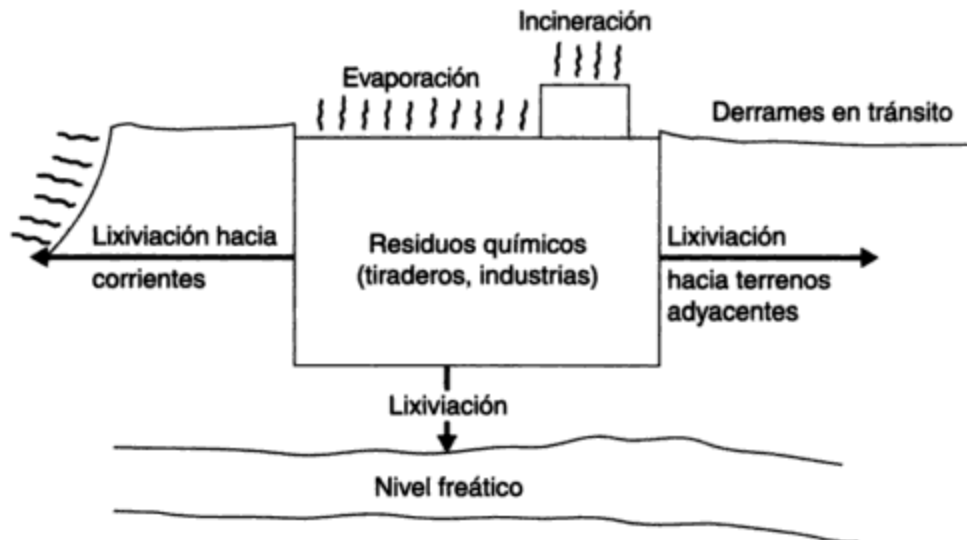
Entre los generadores de residuos médicos están los hospitales y, en menor medida, las clínicas, los laboratorios de investigación y las compañías farmacéuticas. La generación de residuos sólidos en hospitales se estima entre 4.5 y 9.1 kg/día por cama, de los cuales se considera que alrededor del 10% está infectado o puede causar enfermedades. Además de los residuos infecciosos y no infecciosos, casi todos los hospitales también generan residuos químicos y quimioterapéuticos, orgánicos (disolventes) y radiactivos que pueden estar reglamentados bajo la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA; Ley para la conservación y recuperación de recursos) (excepto los residuos radiactivos sujetos a la Ley para la energía atómica, como ya hemos señalado). En un estudio se estimó que la generación de residuos peligrosos tipo RCRA es de 21 mL/cama por día; lo cual, para un hospital de 200 camas, se traduce en 152 kg al mes. Esta proporción es significativa porque califica a un hospital como “generador de cantidades pequeñas” bajo la RCRA y lo obliga a enviar esos residuos a un centro autorizado externo (Cross *et al.*, 1985).

### 15.3.2 Control de los residuos médicos

El control de los residuos médicos se basa en guías como la *Guide for Infectious Waste Management* de 1986 de la EPA de EUA y *Guidelines for the Handling and Disposal of Biomedical Wastes* de 1986 del Ministerio del Ambiente de Ontario. La promulgación y puesta en vigor de reglamentos que gobiernan la recolección, procesamiento, transporte y eliminación de residuos médicos son por lo general responsabilidad de la comunidad donde se ubican las instalaciones. Los arreglos para el manejo interno de los residuos y su eliminación externa se dejan en manos de los generadores de los mismos.

Para los hospitales la práctica normal es la incineración local de los sólidos combustibles en un incinerador de alta temperatura de diseño específico, con quemadores para calentar los gases posteriormente, con lo cual se alcanza en la cámara de combustión primaria una temperatura recomendada entre 980° y 1,200°C para conseguir la combustión completa. Las cenizas se depositan en un relleno sanitario. Los residuos de los hospitales que carecen de equipos para incineración o esterilización se apartan y se empaquetan en recipientes con códigos de color y rótulos especiales para su transporte y tratamiento externo previo a su disposición final.

Probablemente el riesgo más frecuente asociado con el manejo de residuos peligrosos es el potencial de contaminación de aguas subterráneas. Cuando se descargan en tierra en instalaciones no proyectadas para una contención total (embalses de superficie, pilas de desperdicios, sistemas de inyección en pozos profundos o rellenos de tierras) los residuos peligrosos pueden filtrarse hasta los acuíferos adyacentes y por tanto afectar las fuentes de agua potable. Es más fácil detectar los efectos de los residuos peligrosos mal manejados en la flora y la fauna locales que en las aguas subterráneas. De hecho, el análisis de insectos, peces y vida silvestre expuestos con respecto a la estructura de las comunidades y poblaciones, a características individuales o a concentraciones de contaminantes en los tejidos (bioanálisis) ahora es común en las evaluaciones de efectos ambientales. Ciertas prácticas de eliminación que ya no son aceptables, como los embalses de superficie (como fosos, estanques y lagunas) han tenido (y continúan teniendo) graves efectos en el ecosistema. Un ejemplo escandaloso de consecuencias en el ecosistema por una eliminación incorrecta de residuos industriales fue la descarga de 4,000 toneladas métricas de residuos de la manufactura de DDT en un pantano de Alabama próximo a la Olin Chemical Corporation (Corporación química Olin). Además de contaminar un arroyo cercano y los peces del mismo, se encontró que los patos silvestres contenían 480 ppm de DDT (contra niveles de fondo promedio de 1 a 10 ppm) y se destruyeron poblaciones enteras de aves acuáticas (Blackman, 1993). En la figura 15-9 se muestran las rutas de entrada de las sustancias químicas peligrosas en el ambiente. En la sección 8.5 se presenta un análisis más detallado de los efectos ambientales de las sustancias tóxicas, entre ellas los metales pesados y las sustancias químicas orgánicas.



**Figura 15-9** Rutas de entrada de sustancias químicas y residuos peligrosos en el ambiente. Fuente: S. Safe, "Hazardous Organic Compounds", *Proceedings, Symposium on the Treatment and Disposal of Hazardous Wastes*, University of Toronto, mayo de 1981.

**Sustancias químicas orgánicas.** Las sustancias químicas orgánicas que son motivo de preocupación son las que persisten en el ambiente (se degradan con lentitud) y son solubles en grasas porque se acumulan en la cadena alimenticia. Los bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés) y ciertos plaguicidas son ejemplos de sustancias orgánicas que se comportan de esta manera y causan problemas que van desde toxicidad inmediata hasta efectos a largo

plazo (carcinogenicidad, mutagenicidad, etc.). Muchos de estos contaminantes persistentes se forman por la degradación de sustancias primarias o en la combustión de sustancias que contienen alguna forma de cloro. Los combustibles fósiles, los materiales orgánicos y los residuos sólidos municipales son fuentes comunes que desprenden sustancias orgánicas cloradas tóxicas cuando se incineran. La adsorción de estos compuestos en el polvo y la ceniza fina hace posible una amplia distribución atmosférica de estos contaminantes.

**Contaminantes inorgánicos.** Muchos elementos inorgánicos, como el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el arsénico (As), son venenos biológicos a concentraciones del orden de milésimas de partes por millón (ppm). Éstos y otros elementos tóxicos se acumulan en la materia orgánica del suelo y los elementos, y se incorporan a las plantas en crecimiento. Además, puesto que los humanos los excretan de manera deficiente, pueden acumularse en órganos y tejidos hasta alcanzar niveles tóxicos en el organismo. Los metales tóxicos pasan a la atmósfera (por la quema de carbón y la combustión de residuos sólidos y peligrosos), alcanzan las aguas receptoras (por precipitación atmosférica y filtración de minas y rellenos) y contaminan las tierras (como consecuencia de la aplicación de lodos de aguas negras). El pH bajo causado por la lluvia ácida o la generación de CO<sub>2</sub> aumenta la capacidad de transportación y por tanto la disponibilidad de los metales al hacerlos más solubles.

Las rutas que siguen los contaminantes tóxicos de las fuentes industriales al ambiente y a través de él a las personas son numerosas y complejas. No obstante, es fundamental entender estas rutas para controlar los efectos ambientales de los residuos químicos.

## 15.5 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

### 15.5.1 Métodos

Como se mencionó en la sección 15.1, la definición de un residuo peligroso es escurridiza. Es difícil saber cuándo un material se debe clasificar como peligroso. Si se vierte café en una pecera, los peces mueren. ¿Significa esto que el café se debe considerar como una sustancia peligrosa? El enfoque más sencillo para identificar los residuos peligrosos consiste en considerarlos bajo categorías generales, como radiactivos, inflamables o tóxicos. El uso de un sistema de clasificación de este tipo permite a los departamentos de bomberos manejar con facilidad los problemas urgentes que plantean los residuos peligrosos durante incendios, derrames y accidentes.

Muchos países, entre ellos Estados Unidos, el Reino Unido, Francia, Alemania y los Países Bajos, complementan un sistema de clasificación general con listas detalladas de sustancias, procesos, industrias y residuos considerados como peligrosos. Otros países amplían las clasificaciones generales fijando concentraciones máximas de contaminantes específicos. En Japón, por ejemplo, cuatro tipos de residuos se consideran tóxicos (lodos, escorias, residuos ácidos y residuos alcalinos), así como aquellos que contienen cualquiera de los nueve materiales tóxicos [As, PCB, CN, Cd, Cr<sup>6</sup>, Pb, Hg y fosfatos orgánicos (totales y alquilfosfatos)] en cantidades superiores a los límites permisibles (Urata, 1980).

Es posible utilizar algoritmos que toman en cuenta cualidades como reactividad, toxicidad y persistencia para hacer un tamizado previo a fin de identificar los residuos peligrosos. El problema es que, como todos los sistemas de clasificación, estos modelos tienen deficiencias:

**TABLA 15-1 CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE CONTAMINANTES PARA EL PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACIÓN PARA CARACTERÍSTICAS DE TOXICIDAD<sup>a</sup>**

Contaminante	Nivel reglamentario (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Benceno	0.5
Cadmio	1.0
Tetracloruro de carbono	0.5
Clordano	0.03
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
Cromo	5.0
Cresol ( <i>o</i> -, <i>m</i> -, <i>p</i> - o cresol total)	200.0
2,4-D	10.0
1,4-Diclorobenceno	7.5
1,5-Dicloroetano	0.5
2,4-Dinitrotolueno (límite de cuantificación)	0.13
Endrín	0.02
Heptaclor (y su epóxido)	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclorobutadieno	0.05
Hexacloroetano	3.0
Plomo	5.0
Lindano	0.4
Mercurio	0.2
Metoxiclor	10.0
Metil étil cetona	200.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
Piridina (límite de cuantificación)	5.0
Selenio	1.0
Plata	5.0
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
Tricloroetileno	0.5
2,4,5-Triclorofenol	400.0
2,5,6-Triclorofenol	2.0
2,4,5-TP (Silvex)	1.0
Cloruro de vinilo	0.2

<sup>a</sup>A partir del 1 de septiembre de 1990. (Los residuos para los cuales los extractos lixiviados que contienen cualquiera de estos contaminantes en concentraciones superiores a los límites señalados se clasifican como residuos peligrosos.)

Fuente: *United States Code of Federal Regulations*, título 40, parte 261.24. Para obtener información adicional sobre algunos de estos contaminantes véase la sección 8.5.

Con base en estos listados la EPA ha elaborado una lista de 126 (originalmente 129) *contaminantes prioritarios*. En la tabla 15-2 se muestran ejemplos de estas sustancias químicas tóxicas y sus destinos probables en el ambiente.

**TABLA 15-2 EJEMPLOS DE SUSTANCIAS QUÍMICAS TÓXICAS PRESENTES EN RESIDUOS INDUSTRIALES**

Tipo (número total)	Ejemplo	Uso o fuente industrial	Destino probable
Metales y sustancias inorgánicas (15)	Cianuros	Baños de galvanoplastia	Agua
Plaguicidas (20)	Clordano	Manufactura de plaguicidas	Sedimentos, biota
Bifenilos policlorados (7)	Arocloros PCB	Líquido de enfriamiento para transformadores	Sedimentos, biota
Compuestos alifáticos halogenados (24)	Diclorometano (cloruro de metileno)	Disolvente	Agua
	Tetraclorometano (tetracloruro de carbono)	Disolvente y desengrasante	Agua
	Cloroeteno (cloruro de vinilo)	Manufactura de plásticos	Agua
Éteres	2-Cloroetil (vinil éter)	Residuos farmacéuticos	Agua, sedimentos
Compuestos aromáticos monocíclicos (12)	Etilbenceno	Disolvente	Sedimentos
	Tolueno	Disolvente	Sedimentos
Fenoles y cresoles (11)	Fenol	Residuos de refinería	Agua
	Pentaclorofenol	Conservación de maderas	Sedimentos, biota
Ésteres ftálicos (6)	Ftalato de dimetilo	Manufactura de acetato de celulosa	Sedimentos, biota
Compuestos aromáticos policíclicos (18)	Naftaleno	Manufactura de colorantes y materiales sintéticos	Sedimentos, biota
	Fenantreno	En el alquitrán de hulla	Sedimentos, biota
Nitrosaminas y otros (7)	Acrilonitrilo	Manufactura de plásticos	Agua, sedimentos
Total	126		

*Fuente:* Adaptado de la lista de la EPA de EUA de 126 contaminantes prioritarios (nov. de 1980), según la describen M. Chapman, G. P. Romberg y G. A. Vigers en "Design of Monitoring Studies for Priority Pollutants", *Journal of the Water Pollution Control Federation* 54 (1982): 292-297.

Quienes critican este proceso de identificación de residuos peligrosos señalan que el proceso de listado es demasiado costoso y consume mucho tiempo, con la consecuencia de que ciertos residuos de alta peligrosidad escapan al control de la RCRA porque aún no han sido incluidos en las listas. Además, se ha criticado el proceso por el cual se permite que los residuos peligrosos tratados "salgan" del programa de residuos peligrosos de la RCRA. Los residuos característicos tratados ya no se consideran peligrosos cuando dejan de mostrar características de riesgo. Para que los residuos salgan es necesario eliminar sus características de peligrosidad, esto para que después quien genera los residuos solicite a la EPA el retiro de la lista, lo cual puede ser prolongado y costoso. En consecuencia, muchos residuos de baja peligrosidad y que

1. Reducción de la cantidad de residuos
2. Separación y concentración de los residuos
3. Intercambio de residuos
4. Recuperación de energía/materiales
5. Incineración/tratamiento
6. Eliminación en tierra segura

La eliminación o reducción de los residuos peligrosos por medio de cambios en el proceso de producción es el primer objetivo de un plan de manejo. Después de esto, es indispensable que se lleve la cuenta de los residuos peligrosos restantes desde su origen hasta su disposición final. Este concepto "de la cuna a la tumba" depende de una documentación amplia por medio de un sistema de "manifiesto" o "guía de embarque" para registrar los movimientos de los residuos.

Los reglamentos federales amparados por la RCRA en Estados Unidos reconocen que los estados individuales son responsables de elaborar un plan de residuos peligrosos con ciertos requisitos, entre los cuales están:

- El registro de todos los "generadores de cantidades pequeñas" peligrosas que producen más de 100 kg de residuos al mes
- La recolección y transporte de residuos peligrosos sólo por compañías con licencia que operen bajo un sistema de manifiestos
- La eliminación final en instalaciones aprobadas para el tratamiento o eliminación de residuos peligrosos

En Canadá la práctica es similar, al menos en teoría, pero el principal control federal del movimiento de residuos peligrosos se realiza a través de la Transportation of Dangerous Goods Act (Ley para el transporte de mercancías peligrosas). Al igual que otros problemas de eliminación de residuos en Canadá, los residuos peligrosos fundamentalmente son un problema provincial.

### **15.6.1 Cantidades de residuos peligrosos generados**

Las cantidades de residuos peligrosos que produce la industria pueden variar desde una cantidad insignificante en países de economía agraria hasta más de 200 kg/persona · año, en las sociedades muy industrializadas. La tabla 15-3 contiene estimaciones aproximadas de las cantidades de residuos peligrosos que se producen en algunas áreas desarrolladas.

En los 19 países representados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la cantidad promedio de residuos peligrosos generados es de 55 kg/persona · año, la mayoría de ellos (del 60 al 90%) se traslada a un Centro de Tratamiento y Eliminación de Residuos Peligrosos (CTERP) externo. En las regiones muy industrializadas de Estados Unidos y Canadá (por ejemplo, California o la provincia de Ontario) la cantidad de residuos peligrosos que requieren tratamiento en un CTERP es mucho mayor, alrededor de 300 kg/persona · año, de los cuales quizá del 20 al 30% reciben tratamiento en un centro externo. El menor énfasis en el reciclaje y reutilización de residuos en Estados Unidos y Canadá podría explicar esta tasa más alta de generación.

**TABLA 15-3 CANTIDADES DE RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE GENERAN EN LAS REGIONES INDUSTRIALIZADAS**

Localidad	Residuos peligrosos (10 <sup>6</sup> toneladas métricas/año)	Población total (millones)	kg/persona · año (en base húmeda)
Estados Unidos	275 <sup>a</sup>	250	1,100
	45 <sup>b</sup>	250	180
California	4.6	22	210
Canadá	3.3	26	130
Ontario	1.6	9	180
Europa (19 países de la OCDE) <sup>c</sup>	24	440	55
Francia	3	55	54
Países Bajos	1.5	15	100
Dinamarca	0.11	5	22
Japón	0.67	120	5.5

<sup>a</sup>Residuos peligrosos según los define la EPA de EUA (representan cerca del 70% de todos los residuos industriales que se generan); incluyen grandes cantidades de aguas residuales diluidas y otros residuos que no requieren tratamiento en un CTERP.

<sup>b</sup>Residuos peligrosos según los definen la mayoría de los países (típicamente del 10 al 20% de los residuos industriales totales generados); se excluyen normalmente los residuos que no requieren tratamiento en un CTERP [esto es, aguas residuales diluidas (cubiertas por los reglamentos de protección de aguas) y residuos de establecimientos comerciales, industrias de servicios, instituciones, etc.]

<sup>c</sup>La Europa de la OCDE incluye a Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Islandia, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza y Turquía.

Fuente: Adaptado de Yakowitz (1993); Henry y Heinke (1989), OWMC (1986); Skinner (1987).

La tasa extremadamente alta de generación en EUA de 1,100 kg/persona · año que se muestra en la figura 15-3 incluye todos los residuos definidos como peligrosos por la EPA de EUA, ya sea que los mismos requieran tratamiento en un CTERP o no. En otros países los residuos peligrosos normalmente son los industriales que requieren tratamiento local o externo en un CTERP, y el inventario de residuos peligrosos puede excluir:

- Las aguas residuales que se tratan localmente y se descargan en alcantarillas o aguas de superficie
- Los residuos que se eliminan por inyección en pozo profundo
- Los residuos de operaciones comerciales como gasolineras, talleres de reparación, lavanderías e institutos de investigación
- Los residuos de derrames y de rehabilitación de predios

Un inventario de los residuos industriales peligrosos generados en la provincia de Ontario, Canadá, en 1981, mostró la distribución que se presenta en la tabla 15-4. Todos estos residuos, equivalentes a unos 180 kg/persona · año, se pueden considerar como peligrosos, pero existe una amplia variación en el grado de peligro que implican, por ejemplo, los residuos aceitosos y los lodos de cianuro.



peligrosos. La proporción correspondiente que se maneja externamente en la antigua Alemania Occidental, Dinamarca y los Países Bajos se acerca más al 80% (Environment Canada, 1980).

Cuando los residuos no son idóneos para eliminarse directamente, es preciso elegir un método o, con más frecuencia, una combinación de ellos, para aplicar a los residuos un tratamiento previo que permita eliminarlos sin peligro. Los procesos de tratamiento físico y químico (TFQ) siguientes, y que son de utilidad para las industrias, también podrían ser componentes de un centro regional de TFQ que da servicio a todas esas industrias.

**Procesos físicos.** Se dispone de diversos procesos físicos para la separación de sólidos y líquidos, entre ellos centrifugación, flotación, sedimentación y filtración. El carbón activado es eficaz para la extracción de sustancias orgánicas tóxicas. Para la separación de componentes específicos se puede emplear uno de los procesos de membrana semipermeable (ósmosis inversa, diálisis o electrodiálisis). La rectificación y la destilación son otros procesos físicos útiles para separar compuestos específicos.

**Procesos químicos.** El tratamiento químico es un componente indispensable de la mayor parte de las operaciones de tratamiento de residuos peligrosos. Freeman (1989) describe estos procesos junto con algunos ejemplos comunes de su aplicación. Entre ellos se cuentan los siguientes:

- Oxidación (de cianuro a cianatos, por cloración alcalina)
- Reducción (de  $\text{Cr}^6$  a  $\text{Cr}^3$ , con  $\text{SO}_2$ )
- Precipitación (de Cd, Hg, etc., con sulfuros)
- Ajuste de pH (de lechada de cal, con el licor agotado de baños limpiadores de metales)
- Intercambio iónico (extrae las sustancias inorgánicas metálicas y no metálicas)
- Estabilización/solidificación (de lodos inorgánicos, y de suelos contaminados con agentes que se unen)

En la estabilización/solidificación se utilizan agentes a base de cemento o cal para solidificar o estabilizar los residuos inorgánicos peligrosos en forma de silicatos o hidróxidos inertes. Chemfix, Liqua-Con y Stablex son tres ejemplos de procesos satisfactorios de solidificación a base de silicatos. La tecnología para solidificar residuos orgánicos está menos adelantada. Se han ideado varias pruebas para determinar el potencial de lixiviación, la integridad física y el comportamiento de largo plazo de los residuos estabilizados. Aunque es posible emplear pruebas de lixiviación para comparar la eficacia de diferentes procesos de estabilización, aún no se ha probado que las mismas pronostiquen la capacidad de lixiviación a largo plazo de los residuos, y tampoco simulan las condiciones reales en el campo de un confinamiento controlado. Para los fines que persiguen los reglamentos de eliminación en tierra de la RCRA, la EPA emplea el "Procedimiento de lixiviación para características de toxicidad", ya mencionado, para evaluar la capacidad de lixiviación.

**Procesos biológicos.** Siempre y cuando la concentración de sustancias tóxicas no sea excesiva y sea posible aclimatar el proceso biológico, ciertos materiales orgánicos tóxicos (fenoles, aceites y otros residuos de refinera, por ejemplo) se pueden tratar de manera satisfactoria, y se consigue una eliminación de más del 60% de muchos metales pesados (Cd, Pb,  $\text{Cr}^6$ , etc.) Estos resultados se alcanzan con más frecuencia en plantas de tratamiento de aguas resi-

**Confinamientos controlados.** Cuando un confinamiento controlado es la única opción disponible, éste deberá aceptar y retener residuos orgánicos e inorgánicos en una forma tan concentrada como sea posible y por un periodo indefinido, quizá a perpetuidad. En caso necesario, el lixiviado se extrae para tratarlo y eliminarlo.

**Eliminación conjunta.** En la eliminación conjunta de residuos peligrosos con desperdicios municipales, el propósito es que cantidades grandes de desperdicios absorban cantidades relativamente pequeñas de residuos inorgánicos líquidos peligrosos (y algunos orgánicos) para que se produzca la atenuación de los contaminantes por los desperdicios y el suelo circundante.

**Centro de tratamiento de residuos peligrosos.** Aquí los residuos orgánicos se incineran o se tratan (física o biológicamente) para producir un efluente líquido aceptable y lodos concentrados destinados a enterrarse. A los residuos inorgánicos se les elimina su toxicidad, se neutralizan y se concentran para producir residuos líquidos y lodos aceptables que es necesario concentrar aún más y quizá solidificar para eliminarlos en un confinamiento controlado. Ninguna tecnología individual es capaz de resolver todos los problemas del manejo de residuos peligrosos; el tratamiento o eliminación de subproductos residuales industriales requiere una combinación de varios procesos. La experiencia en las sociedades industrializadas ha mostrado una tendencia hacia el uso de los siguientes medios:

- Incineración a altas temperaturas (1,200°C o más) para deshacerse de residuos orgánicos como lodos aceitosos, PCB y plaguicidas prohibidos.
- Diversos procesos de tratamiento físico-químico (TFQ) para tratar residuos inorgánicos (y ciertas mezclas de aceites y agua). La estabilización/solidificación de los residuos inorgánicos especialmente peligrosos también puede ser deseable como alternativa o complemento de los procesos de tratamiento físico-químico más convencionales.
- Un confinamiento controlado para recibir los residuos generados por los métodos de tratamiento anteriores y un volumen limitado de residuos para los cuales no existen procesos de tratamiento satisfactorios (por ejemplo, los residuos que contienen materiales tóxicos como mercurio, arsénico y cadmio). A menos que se disponga de otros depósitos, como minas de sal, un confinamiento controlado es un componente indispensable de cualquier plan de manejo de residuos peligrosos.

La figura 15-10 muestra una disposición esquemática de los componentes principales que se podrían incluir en un centro de tratamiento de residuos peligrosos.

### 15.7.3 Cantidades de residuos por confinar

Es muy difícil estimar el volumen de residuos peligrosos por confinar porque la densidad y el volumen varía ampliamente con las características de los residuos y los procesos de tratamiento que se utilizan. La tabla 15-6 proporciona una guía aproximada para estimar volúmenes de lodos y residuos precedentes de diversos procesos de concentración (véase el ejemplo 15.5). La densidad de los residuos peligrosos puede variar desde 1 tonelada métrica/m<sup>3</sup> para líquidos y lodos fluidos hasta quizá 1½ toneladas métricas/m<sup>3</sup> para sólidos inorgánicos secos o desecados. Los valores que se indican en la tabla están sujetos a amplias fluctuaciones y se deben emplear con discreción. Un buen diseño de instalaciones para el tratamiento de residuos peligrosos debe

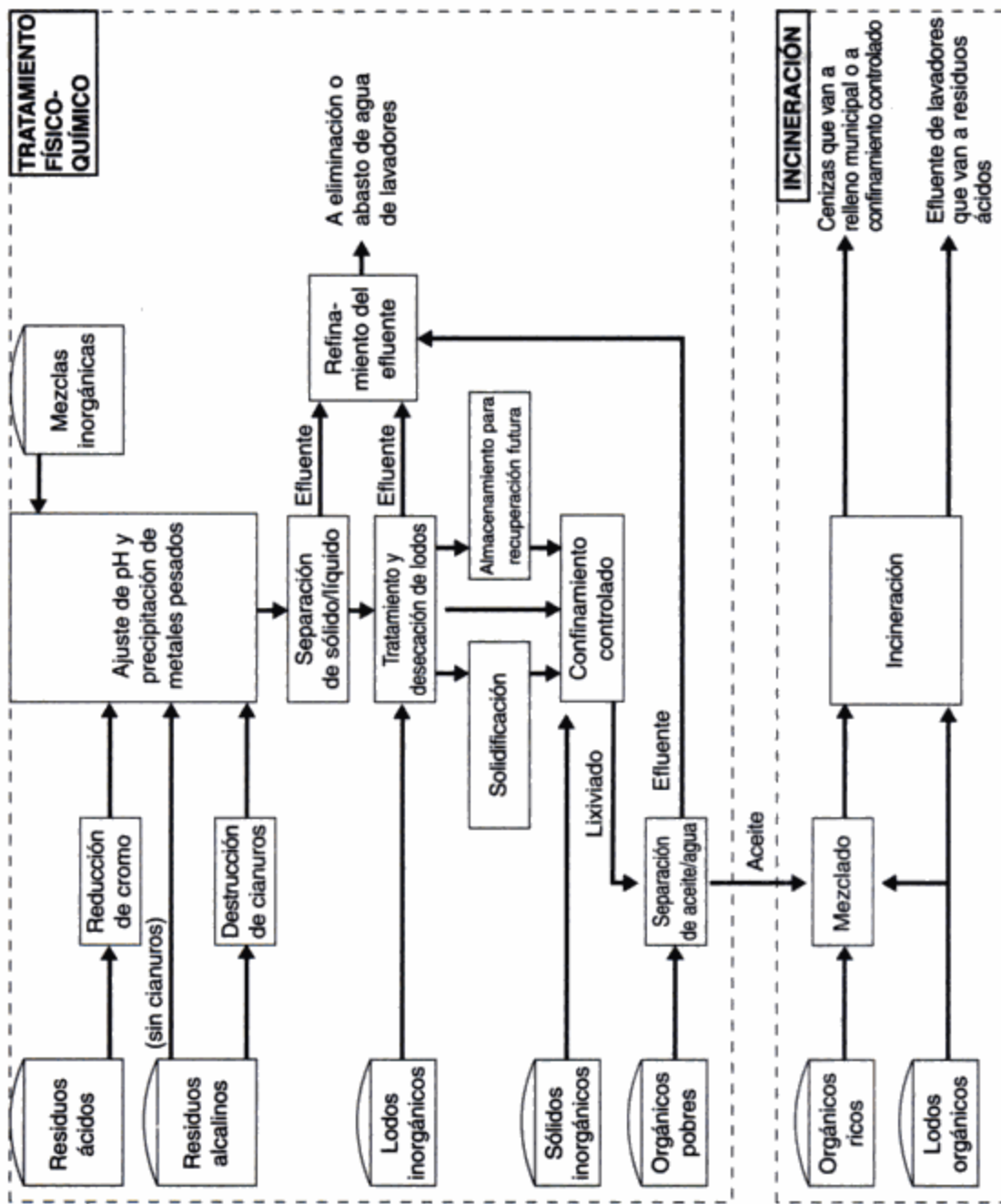


Figura 15-10 Componentes representativos de un centro de tratamiento de residuos peligrosos. Fuente: Henry y Martini (1982).

**Tratamiento físico-químico (TFQ).** La sección de TFQ recibe 30,000 toneladas métricas/año de mezclas de aceite/agua (para su separación), soluciones inorgánicas (ácidos y álcalis), efluente de lavadores de incinerador y lixiviado del confinamiento para residuos peligrosos. El tratamiento químico de estos residuos consiste en (1) oxidación del cianuro a cianato, (2) reducción del cromo hexavalente, (3) precipitación de metales pesados. Los procesos de tratamiento físico que se emplean son (1) separación de sólidos y líquidos por medio de clarificadores por gravedad y separadores Lamella, (2) separación de aceites y agua por medio de separadores de tipo API seguidos de centrífugas y filtros de vacío para concentrar los lodos y (3) desecación de hidróxidos metálicos con filtros prensa.

La forma de eliminación de los residuos del TFQ varía de acuerdo con sus características. Los lodos inorgánicos desecados se transportan a un confinamiento seguro externo, los lodos orgánicos y los residuos aceitosos se incineran, y el efluente tratado se descarga después de su almacenamiento a una corriente o a una alcantarilla sanitaria, según la calidad del mismo.

Vale la pena destacar dos características del centro GSB. Primero, no se llevan al relleno de tierras residuos almacenados en tambores excepto cuando contienen sustancias inorgánicas muy tóxicas como arsénico o mercurio. En estos casos los tambores se encapsulan en concreto. El segundo aspecto importante es que no se envían residuos líquidos ni orgánicos al relleno de tierras.

**Confinamientos controlados.** El confinamiento controlado al cual se transportan los residuos de la GSB está ubicado en un predio de 15 ha en un área agrícola de Gallenbach, a 55 km de Ebenhausen. Se espera que las cuatro celdas con un área total de 9.5 ha y una capacidad de 1.4 millones de metros cúbicos sirvan durante unos 20 años al ritmo actual de utilización. La figura 15-11b muestra una de las celdas. Los residuos no orgánicos ni líquidos procedentes de Ebenhausen se depositan junto con cantidades pequeñas de residuos industriales similares de Bavaria y otras partes de Alemania. No se aceptan residuos municipales ni residuos líquidos, aunque se permiten ciertos residuos en tambores.

Entre los factores que contribuyen a la seguridad del confinamiento contra la migración de lixiviados están los siguientes:

- Baja permeabilidad del suelo arcilloso circundante ( $K = 1 \times 10^{-7}$  cm/s)
- La existencia de una capa de arcilla y un revestimiento de polietileno de alta densidad en el fondo del relleno, entre cada ascenso de 6 m y encima de la celda llena
- Un complicado sistema de recolección y eliminación de lixiviado que transfiere el mismo a un estanque de retención para su posterior tratamiento en Ebenhausen
- Desviación del desagüe de superficie a estanques de retención de tamaño apropiado para dar cabida a una tormenta cada 100 años
- Vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas en el sentido de la corriente respecto al relleno de tierras

El volumen de lixiviado que se devuelve a Ebenhausen para su tratamiento equivale a alrededor del 60% de la precipitación anual que reciben las celdas (700 mm/año).

### Ejemplo 15.5

Los residuos inorgánicos que se reciben anualmente en el centro de tratamiento y eliminación de residuos peligrosos GSB se componen de sólidos para entierro directo (90,000 toneladas métricas), lodos por desecar (10,000 toneladas métricas) y líquidos para ajuste de pH (10,000 toneladas

**Duración esperada del relleno de tierras**

$$= \frac{\text{capacidad}}{\text{volumen/año}} = \frac{1,400,000 \text{ m}^3}{65,680 \text{ m}^3/\text{año}} = 21.3 \text{ años}$$

Observe que el volumen de residuos del tratamiento físico-químico y de la incineración de la materia orgánica es insignificante, y que la duración del relleno de tierras depende casi en su totalidad de la cantidad de sólidos inorgánicos y lodos desecados que se entierran de forma directa, es decir sin tratamiento.

En otros países del Mercado Común Europeo son comunes la incineración y el TFQ, seguidos de estabilización de los residuos inorgánicos en unos pocos casos. En Francia es común la recuperación de aceites, y se permite cierta eliminación conjunta. Sin embargo, la diferencia en Europa Continental parece ser si la responsabilidad del manejo de los residuos peligrosos se delega a la industria, como en Francia y los Países Bajos, si principalmente está a cargo del gobierno, como en Dinamarca, o si se comparte, como en Alemania.

**Reino Unido.** En Inglaterra existe una mezcla de propiedad privada y pública de las instalaciones. Se practica un poco la incineración, el TFQ y la solidificación, pero el método principal es la eliminación conjunta con desperdicios municipales. En el relleno de tierras para eliminación conjunta de Pitsea, Inglaterra, a 70 km al este de Londres, se transportan por camión 43 millones de galones (163,000 m<sup>3</sup>) de residuos industriales líquidos al predio cada año y se mezclan con 400,000 toneladas de desperdicios, las cuales se transportan en barcasas por el Támesis desde Londres. El predio de 1,300 acres, en operación desde 1900, es un lugar de Inglaterra donde la evaporación excede la precipitación pluvial. Se piensa que la proporción relativamente pequeña de residuos industriales a municipales (450 L/tonelada métrica) se puede enterrar sin peligro en virtud de la atenuación de los contaminantes por procesos naturales y también por la dilución natural. Feates y Parker (1980, pág. 56) mencionan que “el cuerpo tiene una capacidad natural para resistir los materiales indeseables y peligrosos si la concentración de los mismos es suficientemente baja y por tanto se pueden considerar como seguros”. Estos autores sugieren que, en tanto podamos asegurar que los residuos se dispersan a una concentración inferior al nivel peligroso, esto debe ser seguro y aceptable. Los mismos autores indican que el entierro de residuos se ha practicado con pocos problemas en Gran Bretaña desde la Revolución Industrial, hace más de 200 años, y recomiendan que continúe, siempre y cuando la calidad (esto es, la seguridad) del predio destinado para el relleno de tierras concuerde con el grado de peligrosidad de los residuos, y se utilice la “fijación” de contaminantes en tales rellenos por precipitación química y absorción.

Otros estudios del destino de los residuos peligrosos en los rellenos de tierras han indicado además que éstos tienen una capacidad de asimilación significativa para contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. Se ha observado que los metales pesados se inmovilizan parcialmente (y por tanto se retienen) en rellenos simulados a escala de laboratorio debido a la precipitación por sulfuro del Cd, Zn, Pb y Ni, y a la reducción, en el caso del mercurio, a Hg elemental (Gould *et al.*, 1990). Se encontró que las sustancias halogenadas tóxicas (como el tricloroetileno y los clorofenoles), que son hidrofóbicas, se incorporan a los constituyentes orgánicos de los RSM como grasas, aceites y ceras, por lo cual su concentración en la fase acuosa (lixiviado) es baja (Reinhart *et al.*, 1990). Los autores advierten que a medida que el relleno se estabiliza y la fracción orgánica se reduce, también disminuye la afinidad de los compuestos orgánicos por los desperdicios.

La política gubernamental en el Reino Unido favorece la eliminación conjunta de residuos peligrosos con RSM porque los confinamientos controlados, que proporcionan únicamente una contención total de los residuos peligrosos, se ven como una forma de almacenamiento a largo plazo y no como una eliminación definitiva, puesto que los constituyentes peligrosos no se degradan en absoluto. Quienes proponen la eliminación conjunta destacan el hecho de que han sido muy pocos los casos en los cuales los predios destinados a la eliminación conjunta han causado contaminación de aguas subterráneas y de superficie. Sin embargo, a pesar de los bajos costos y los efectos ambientales relativamente benignos de la eliminación conjunta, la creciente inquietud acerca de la calidad del agua ha dado origen a controles reguladores de la eliminación de residuos peligrosos más estrictos, como los que dicta la Water Act (Ley de aguas) de 1989. Se considera que la implantación de esta legislación limitará severamente los tipos de residuos aceptables en predios "dispersos y atenuados" (de eliminación conjunta), lo cual, a su vez, causará un aumento en el grado de tratamiento de los residuos peligrosos previo a su entierro (quizá por estabilización/solidificación). En segundo lugar, se espera que la autorización de rellenos de tierras para "residuos potencialmente contaminantes" se restrinja a los que pueden proporcionar contención. De hecho, ciertos predios se proyectan ahora para contención plena del lixiviado por medio de elementos como revestimientos del fondo (de arcilla o sintéticos), remates de baja permeabilidad, recolección de lixiviados y control del drenaje de superficie (Mills, 1990).

### 15.7.5 Prácticas en Estados Unidos y Canadá

**Estados Unidos.** En contraste con la situación europea, en Estados Unidos predomina el tratamiento y eliminación local de residuos peligrosos. En 1987, un estudio de las emisiones de sustancias químicas tóxicas por los fabricantes puso de manifiesto que sólo el 24% de la cantidad total de sustancias químicas se transfería al exterior del local generador (U.S. EPA, 1989a). La mayor parte de los residuos que se transfieren al exterior son manejados por 146 centros especializados privados que son propiedad de unas 100 empresas dedicadas al manejo de residuos, las cuales proporcionan tratamiento físico-químico, incineración o entierro, aunque rara vez una combinación de estos procedimientos. De los 146 CTERP que operaban en Estados Unidos en 1993, se proporcionaba tratamiento químico en 93 de ellos (64%) e incineración en 52 (36%). La tabla 15-7 es un resumen de los tipos de procesos unitarios que se utilizan en estos centros.

Una vez más, la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA; Ley para la conservación y recuperación de recursos) de 1976, con sus enmiendas posteriores, cubre el control de los residuos peligrosos. Como se mencionó en la sección 15.5.2, los residuos desechados que no están excluidos de manera específica por los reglamentos se clasifican como peligrosos si tienen ciertas características o se incluyen en las listas de materiales peligrosos. La preocupación principal con los materiales tóxicos es su efecto en las aguas subterráneas y superficiales, las cuales, respectivamente, abastecen alrededor de una cuarta parte y tres cuartas partes de las necesidades de agua de EUA.

Como ya hemos señalado, el objetivo de la EPA de EUA en cuanto al manejo de residuos peligrosos es alcanzar la máxima reducción en la fuente, reutilización y reciclaje de los residuos antes de su completa destrucción o la eliminación de su toxicidad, y la contención plena de los residuos. Esta última implica que los residuos se retendrán de manera indefinida, posiblemente a perpetuidad. No se toma en cuenta la asimilación o dispersión natural, ni la degradación en el ambiente hasta un nivel aceptable, como los estándares de agua potable "segura". La lógica de este enfoque, descrita por Dietrich (1980), es que:

**TABLA 15-7 PROCESOS UNITARIOS EN LOS 146 CENTROS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS COMERCIALES EN ESTADOS UNIDOS, 1993<sup>a</sup>**

Procesos utilizados en los 146 CTERP de Estados Unidos	Número de centros que utilizan el proceso	Porcentaje de centros que utilizan el proceso
<b>Tratamiento químico</b>	93	64
Neutralización	73	50
Precipitación	55	38
Oxidación/reducción	48	33
Estabilización/solidificación	66	45
Oxidación húmeda	10	7
Intercambio iónico	2	2
<b>Tratamiento físico</b>	39	27
Lagunas de evaporación	9	6
Separación de sólido/líquido	9	6
Desecación	7	5
Rectificación, destilación	19	13
Adsorción en carbón	6	4
<b>Incineración</b>	52	36
Horno rotatorio	18	12
Horno de cemento	32	22
Otros tratamientos térmicos	12	8
<b>Tratamiento biológico</b>	10	7
<b>Eliminación</b>	33	22
Entierro	24	16
Inyección en pozos profundos	9	6

<sup>a</sup>La mayoría de los 146 centros aplican varios procesos, de modo que el número (o el porcentaje) total de procesos utilizados es mayor de 146 (100%).

Fuente: Adaptado de McCoy and Associates (1993).

- No se dispone de modelos de atenuación ni herramientas de pronóstico.
- La tecnología para rectificar el daño ambiental no ha avanzado lo suficiente.
- No se conoce el nivel de los contaminantes en el agua potable que no ofrecen peligro.
- Es poco probable que el público acepte una contención parcial.

La introducción de la RCRA constituyó un paso significativo en la reglamentación de los residuos peligrosos, pero se dejó sin resolver el obstáculo principal para la implantación del programa. Lo que hace falta es un mecanismo para aprobar los predios considerados como idóneos para tratamiento o eliminación y para ocuparse de las objeciones inevitables y legítimas que surgen ante la elección de cualquier localidad. La clasificación única de los residuos peligrosos y de los requisitos para los predios es otra deficiencia de la RCRA. El manejo económico de los residuos peligrosos exige diferenciar entre distintos grados de peligrosidad. Una de las primeras omisiones de la RCRA (la corrección de los problemas ambientales creados por predios de residuos peligrosos abandonados) ha sido subsanada en la legislación del Superfund, aprobada en diciembre de 1980 (42 USC 9601) (el programa Superfund se analiza en la sección 15.10).

Hasta 1976 los métodos para el control de residuos peligrosos variaban considerablemente de un estado a otro. Illinois permitía la eliminación conjunta de residuos industriales si su contenido de metales pesados era inferior a los valores especificados y no se agregaban más de 10 gal de residuos a cada yarda cúbica de desperdicios sin compactar ( $\approx$  450 L/tonelada

TABLA 15-8 RESIDUOS INCOMPATIBLES

Grupo A	Grupo B	Riesgo
1. Líquidos y lodos alcalinos	Residuos ácidos	Generación de calor, reacción violenta
2. Metales, hidruros metálicos	1A, 1B	Generación de H <sub>2</sub> gaseoso, incendio, explosión
3. Alcoholes, agua	1A, 1B, 3A, residuos que reaccionan con agua	Incendio, explosión, generación de calor y gases inflamables o tóxicos
4. Alcoholes, otros hidrocarburos	1A, 1B, 2A	Incendio, explosión, reacción violenta
5. Soluciones de cianuros o sulfuros	1B	Generación de HCN o H <sub>2</sub> S gaseosos tóxicos
6. Agentes oxidantes	2A, 4A, ácidos minerales, ácidos orgánicos, residuos inflamables	Incendio, explosión, reacción violenta

Fuente: 40 CFR 264, Apéndice V: "Ejemplos de residuos incompatibles potenciales".

municipal bien proyectado. De igual manera los productos comerciales que contienen un poco de asbesto en una matriz de cemento o de algún material similar, como los productos de asbesto-cemento rotos, se pueden enviar a un relleno de tierras municipal. Entre los factores importantes para la creación de un confinamiento controlado socialmente aceptable y que no represente un peligro para el ambiente están los criterios de selección de terrenos, los detalles de diseño y construcción y la recolección y tratamiento de lixiviados.

### 15.8.3 Selección y aprobación de terrenos

Idealmente, el terreno sobre el cual se va a localizar un confinamiento controlado debe tener poco potencial agrícola y estar ubicado en un área rural, al menos a 8 km de los centros de población y a 750 m del vecino más próximo (MacLaren, 1980). El terreno debe tener una pendiente superficial de 1 a 5% sobre arcilla impermeable profunda ( $K = 1 \times 10^{-7}$  cm/s) y el nivel freático máximo debe estar al menos 1.5 m abajo del fondo del relleno.\* El acceso de vehículos, el drenaje de superficie, el potencial de inundación, la vida silvestre y la relación con los recursos acuíferos principales y las fuentes de suministro de agua a las comunidades se cuentan entre los muchos factores que pueden llegar a ser razones para el rechazo del predio. Entre las dificultades técnicas de poca importancia relativa y los problemas grandes originados por la oposición del público, no es difícil que se requieran hasta 10 años, y a veces más, para encontrar y obtener la aprobación para un predio idóneo.

Por ejemplo, en la provincia de Ontario, Canadá, a la Ontario Waste Management Corporation (Corporación Ontario para la administración de residuos), una compañía de la Corona formada en 1981, le llevó tres años seleccionar el terreno adecuado para un centro de tratamiento y eliminación de residuos industriales. Se emplearon tres años más para redactar y revisar el documento de evaluación ambiental de 7,000 páginas el cual, de acuerdo con la ley de Ontario, debe incluir una justificación de la necesidad del proyecto, un examen de todas las alternativas posibles y la lógica empleada para seleccionar la alternativa "preferida", y también una descripción de la operación de la planta, una evaluación de los impactos y, por último, una estrategia para mitigar todos los impactos negativos. Cuatro años de audiencias públicas crearon 54,000 páginas de transcripciones, las cuales se redujeron a un informe de 800 páginas. Finalmente, en

\*Para una explicación de la permeabilidad y del flujo a través de un suelo uniforme, de acuerdo con la ley de Darcy, véase la sección 14.7.3.



para cada residuo por la EPA. En relación con los requisitos posteriores al cierre, la vigilancia de las aguas subterráneas, la inspección (del revestimiento del fondo) para detección de fugas y la supervisión del predio deben continuar durante 30 años o más después del cierre.

## 15.9 TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE LIXIVIADOS

Las características del lixiviado son específicas de los residuos y el lugar; varían ampliamente de acuerdo con (1) el tipo de residuos y el tratamiento que recibieron antes de ser depositados en el relleno de tierras, (2) la tasa de evaporación y la precipitación neta retenida en el relleno, y (3) la cantidad de lixiviado que emigra al suelo circundante.

### 15.9.1 Tratamiento combinado

El tratamiento del lixiviado se puede llevar a cabo (1) combinándolo con aguas residuales municipales cuando se dispone de una alcantarilla y el lixiviado satisface los requisitos de los reglamentos para uso de alcantarillas, y además la planta municipal está en condiciones de manejarlo; o (2) combinándolo con residuos industriales peligrosos cuando se dispone de un centro de tratamiento y eliminación de residuos peligrosos (CTERP). El tratamiento con residuos municipales rara vez es posible, de modo que la segunda opción es la solución más probable. El tratamiento del lixiviado no constituye un problema difícil cuando ya se dispone de instalaciones para procesar los residuos industriales que se entregan en el centro. La naturaleza de estas instalaciones (es decir, si incluyen incineración, TFQ, solidificación, etc.) determina el tipo de material que se envía al confinamiento controlado y por tanto las características del lixiviado que se produce.

### 15.9.2 Tratamiento por separado

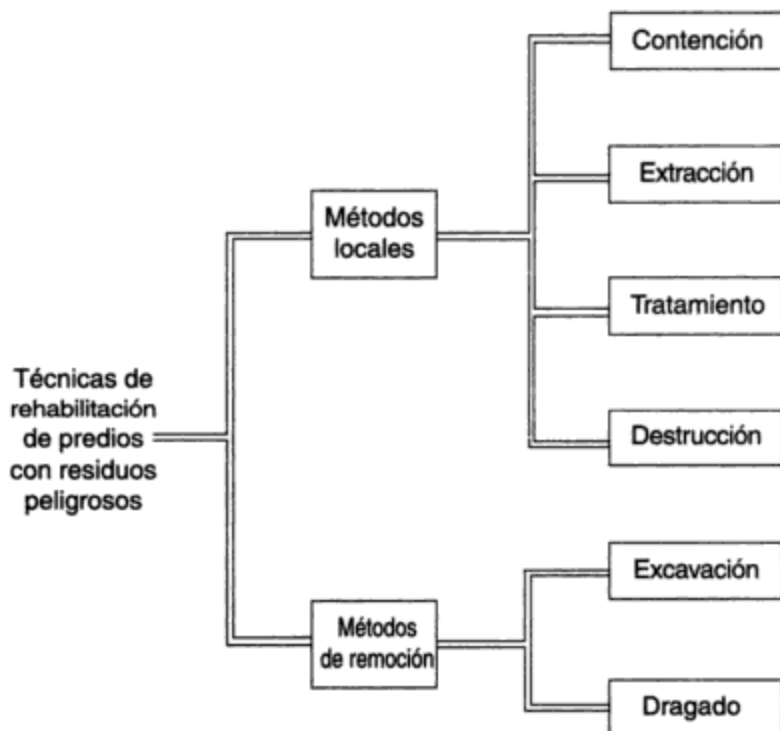
Cuando un confinamiento controlado ha sido depositario de residuos peligrosos que han recibido poco o ningún tratamiento previo, el tratamiento del lixiviado por separado puede ser difícil. En virtud de que la RCRA restringe ahora la eliminación en forma líquida de residuos peligrosos, este tipo de situación ya no debe presentarse en el futuro en los confinamientos nuevos. Por desgracia, es necesario el tratamiento del lixiviado de rellenos de tierras para residuos peligrosos más antiguos y abandonados. En esta área se tiene poca experiencia previa. Lo poco que se conoce ha sido resumido por Shuckrow *et al.* (U.S. EPA, 1982) y McArdle *et al.* (1988).

Cuando se dispone del lixiviado, los procesos de tratamiento potenciales se pueden evaluar por medio de estudios sobre cómo tratarlo. Ésta fue la situación en el canal Love de Niagara Falls, Nueva York. Los estudios que se llevaron a cabo indicaron que el tratamiento biológico del lixiviado era posible sólo con una dilución de 1:5 de lixiviado a aguas residuales municipales si se agregaban nutrientes y se controlaba el pH. Los estudios piloto también mostraron que el carbono activado granulado (CAG) era el medio más adecuado para extraer los contaminantes prioritarios (sustancias orgánicas tóxicas). Con base en estos estudios se construyó en el área del canal Love una planta permanente para tratar alrededor de 27 m<sup>3</sup> (7,000 gal) de lixiviado por día (Haycock, 1981). Los procesos que se utilizaron fueron los de igualación, neutralización, sedimentación, filtración y adsorción con CAG. Se exigió una limitación de 300 mg/L de COT (un parámetro fácil de vigilar, aunque no especialmente significativo), como condición previa a la descarga del efluente en una alcantarilla urbana para su tratamiento posterior en la planta de tratamiento de aguas residuales por TFQ de Niagara Falls. En 1985 se incorporó un reactor discontinuo secuencial a fin de re-

Una consideración crucial en todos los proyectos de limpieza es el grado de rehabilitación por conseguir. La cuestión de “qué tan limpio es limpio” es objeto de mucho debate, porque influye en alto grado en los costos de limpieza y también en los riesgos para la salud pública asociados a un predio específico. Los estándares de limpieza del Superfund demandan que las aguas afectadas alcancen un grado de limpieza equivalente a los Niveles Máximos de Contaminantes de la Safe Drinking Water Act (Ley para el agua potable segura) (véase la tabla 11-5) y los criterios de calidad del agua de la Clean Water Act (Ley para el agua limpia). Además, suelen requerirse evaluaciones de riesgos con base en datos específicos del predio para estimar el peligro carcinogénico por exposiciones atribuibles a un predio del Superfund [el criterio más común es no más de un cáncer en exceso en una población de 1 millón de habitantes (es decir, 10-6)]. Ciertos estados simplemente han establecido como regla que todos los proyectos de rehabilitación alcancen los niveles de fondo de contaminación, lo cual equivale a restaurar el predio a su estado original. Sin duda, los requisitos de limpieza se relajarán en el futuro. En la mayor parte de los casos la necesidad de tratar el agua para alcanzar estándares de agua potable o de restaurar el predio a niveles de fondo de contaminación no es justificable desde un punto de vista económico ni para la protección de la salud pública.

**15.10.1 Técnicas de rehabilitación**

La exposición que sigue se basa en gran medida en las técnicas de rehabilitación presentadas por Freeman (1989) y Blackman (1933). La figura 15-13 muestra las operaciones fundamentales para la rehabilitación de predios. Aunque algunas se utilizan de forma individual, casi todas se aplican en combinación, como por ejemplo en los sistemas de bombeo y tratamiento. En general, la EPA prefiere las técnicas de rehabilitación que reducen en grado significativo el volumen, la toxicidad o la movilidad de los residuos peligrosos. El transporte y la eliminación fuera del predio es la opción menos favorable.



**Figura 15-13** Categorías de acciones para rehabilitación de predios con residuos peligrosos. Fuente: Blackman (1993).

gases tóxicos, inflamables o malolientes en el suelo. El calentamiento del aire afluyente aumenta la desorción\* (de materia orgánica) de las partículas de suelo y mejora la eficiencia de la extracción. Los gases se recogen en pozos o zanjas con tubos perforados de PVC de 4 a 6 in (10 a 15 cm) y se transportan a la superficie hacia unidades de tratamiento o combustión.

El **tratamiento** de los residuos se puede llevar a cabo bajo tierra (*in situ*) o en la superficie (después de la extracción o excavación). El tratamiento *no biológico in situ* comprende la introducción de un fluido a través de pozos de inyección en la zona contaminada para inmovilizar o eliminar la toxicidad de los contaminantes. Se han empleado procesos de oxidación, reducción, hidrólisis, precipitación, quelatación y estabilización/solidificación para el tratamiento *in situ*. Sin embargo, es necesario tomar precauciones para asegurar que los agentes de tratamiento que se inyectan queden confinados a la zona de tratamiento y ellos mismos no causen contaminación. La *biorrehabilitación* se basa en la modificación de las condiciones del predio para favorecer la degradación bacteriana de los compuestos orgánicos por microorganismos naturales; también es posible bombear hacia las aguas subterráneas y aplicar al terreno microbios cultivados en el laboratorio o modificados genéticamente y que han sido adaptados para degradar compuestos específicos. Los programas de biodegradación (tanto aerobia como anaerobia) han probado ser capaces de degradar diversos hidrocarburos, entre ellos gasolina, fenoles y ciertos alcanos y alquenos clorados simples (como los PCB de bajo nivel de cloración).

La **destrucción** de residuos orgánicos peligrosos por incineración a alta temperatura en la superficie es la técnica de rehabilitación de predios más popular en virtud de su gran eficiencia y versatilidad. Puesto que los metales pesados y otras sustancias inorgánicas no se destruyen, es necesario recoger los restos y eliminarlos en un relleno seguro.

La **vitrificación *in situ*** (VIS) o destrucción térmica, otra opción, es una técnica en proceso de surgimiento en la cual los residuos enterrados se calientan hasta temperaturas de fusión (por aplicación de corriente eléctrica al suelo) para producir un bloque de vidrio estable y químicamente inerte. Los elementos no volátiles quedan inmovilizados en la masa vitrificada, mientras que los componentes orgánicos se pirolizan; los gases que desprende la combustión se recogen y se tratan. Se ha demostrado en pruebas piloto que la VIS trata de manera eficaz suelos, lodos y pilas de desechos con residuos radiactivos, así como suelos contaminados con metales pesados y PCB.

### **Métodos de remoción que se emplean en la rehabilitación de terrenos.**

La **excavación**, seguida de tratamiento y reposición o transporte fuera del predio, puede ser necesaria en el caso de residuos peligrosos sólidos y semisólidos que no se avienen al tratamiento *in situ*. Los suelos contaminados que no es posible solidificar *in situ* se pueden extraer, mezclarse con un agente aglutinante (como polvo de hornos de cemento) en una amasadera y devolverse al predio.

El **dragado** normalmente se emplea para extraer sedimentos contaminados de corrientes, estuarios o embalses de superficie. Para los sedimentos bien consolidados en aguas poco profundas se utilizan cucharones de quijadas, cables de arrastre o retroexcavadoras. Si los sedimentos contienen mucho líquido o se encuentran en aguas más profundas, se extraen por dragado hidráulico. El material extraído se bombea o se transporta en barcazas hasta instalaciones costeras para su tratamiento.

\*La *desorción* es el proceso de eliminación de una sustancia sorbida mediante el procedimiento inverso de la adsorción o la absorción.

lo cual estimula la biodegradación aerobia e inhibe la producción de más cloruro de vinilo (puesto que el mismo se forma en condiciones anaeróbicas) (Miller y Valkenburg, 1992).

## 15.11 DESAFÍOS FUTUROS

La filosofía de eliminación de residuos peligrosos que considera que lo que no se ve no existe, y que prevaleció durante muchas décadas, ya no es aceptable en las sociedades industrializadas. Las traicioneras consecuencias ambientales de una eliminación incorrecta se han hecho demasiado evidentes. Si pretendemos que la producción industrial y el mejoramiento correspondiente de la calidad de vida continúen, debemos aceptar los residuos industriales como un producto secundario de este progreso. El fuego, el agua y la electricidad tienen efectos potencialmente dañinos que aceptamos en virtud de los beneficios que los compensan. La industrialización no es diferente: para disfrutar sus beneficios, debemos aceptar la necesidad de eliminar de forma segura los residuos peligrosos resultantes.

A la actividad legislativa de la década de 1970 le siguieron esfuerzos encaminados a corregir las prácticas de eliminación incorrectas del pasado y a desarrollar nuevos métodos que no degraden nuestros recursos hidráulicos ni amenacen la salud humana. Los métodos para manejar los residuos peligrosos están en etapa de desarrollo. Los procedimientos pioneros ideados para el movimiento de residuos radiactivos podrían servir de guía para el transporte de residuos industriales líquidos peligrosos. El enfoque aplicado por la industria nuclear a la eliminación de residuos, que es el aislamiento completo en localidades geológicas idóneas, también es apropiado para los residuos industriales peligrosos. Las investigaciones realizadas por científicos nucleares indican que técnicamente es factible inmovilizar los residuos nucleares de manera satisfactoria en una forma cuya integridad se puede asegurar durante al menos varios miles de años. No se puede proporcionar la misma seguridad para los residuos industriales en el momento actual porque las investigaciones son insuficientes.

Los papeles que deben desempeñar la incineración, la solidificación, la eliminación conjunta y el entierro en rellenos seguros no están bien definidos. Por ejemplo, en Europa es común la incineración de todos los residuos orgánicos, pero en California, en virtud de la preocupación por la contaminación del aire, la incineración no ha tenido un uso extenso. Durante la década de 1970 California enterraba casi todos sus materiales orgánicos tóxicos, pero la presión que ejerce la creciente preocupación por el entorno ha modificado esta práctica, y el entierro de sustancias orgánicas tóxicas se considera ahora sólo como un último recurso. La solidificación está bien establecida en el Reino Unido, Francia y Japón, pero no en otras partes de Europa y sólo en una medida limitada en Norteamérica. Esto significa que en Norteamérica los residuos con concentraciones altas de metales tóxicos (Hg, Pb, Cd) están expuestos a lixiviación en los rellenos de tierras, una situación indeseable que la solidificación podría mitigar.

En el caso de los compuestos orgánicos peligrosos, parecería que lo más conveniente es destruir todos esos residuos, incluso los PCB y los remanentes de operaciones de recuperación de disolventes, por incineración a temperaturas mayores de 1,200°C. La destrucción en un horno de cemento es una solución alternativa ideal para los PCB y varios compuestos orgánicos halogenados más. Estos materiales sirven como combustible complementario para el horno y suministran los cloruros necesarios para la fabricación de cemento. En 1991, sólo de 25 a 30 de los 105 hornos de cemento de Estados Unidos estaban quemando residuos peligrosos, lo cual sugiere que esta opción se podría explotar mejor (Mantus, 1992). Australia ha aceptado el uso de hornos de cemento para la destrucción de residuos peligrosos.

Un área promisoriosa que está siendo objeto de estudios intensivos en el tratamiento de residuos orgánicos peligrosos es la adaptación de microorganismos capaces de eliminar la toxicidad o destruir sustancias orgánicas antropogénicas (sintéticas) tóxicas. Ya se han desarrollado microbios que degradan petróleo, el plaguicida paratión, 2,4-D, DDT y PCB (Sullivan, 1981). Un científico pronostica que pronto será posible "diseñar en el laboratorio" un organismo que se alimente de cualquier sustancia química o compuesto tóxico. Con 111 compuestos orgánicos designados ahora por la EPA de EUA como contaminantes prioritarios, la aplicación de este nuevo concepto de eliminación microbiana a sistemas en gran escala constituirá un interesante desafío para los científicos e ingenieros durante muchos años por venir.

Se dispone de opciones más convencionales para manejar los residuos inorgánicos peligrosos. Las grandes industrias están quizá en condiciones de tratar sus residuos localmente. Estas empresas podrían emplear, en primer término, procesos físicos y químicos para neutralizar y concentrar los residuos, con lo cual en muchos casos el efluente líquido se podría descargar en el sistema de alcantarillado municipal y los lodos húmedos separados se podrían enviar a granel o en tambores a un centro de tratamiento de residuos peligrosos. Las industrias más pequeñas podrían enviar sus ácidos y bases no tratados, envasados en tambores, a un centro de tratamiento aprobado o, si el mismo está demasiado lejos, a una planta regional donde los residuos se neutralizarían y concentrarían. Aunque son comunes en Europa, hay pocos centros de procesamiento y tratamiento de residuos peligrosos en Estados Unidos y Canadá. Esta capacidad limitada hará necesario clasificar los residuos (para evaluar el grado de peligrosidad de los diferentes tipos de residuos). Esto permitirá más flexibilidad en el tratamiento y la eliminación al hacer posible la utilización, para residuos menos peligrosos como las mezclas de aceite y agua, de predios que no serían idóneos para materiales más tóxicos. Este enfoque exigiría la clasificación de los predios para relleno de tierras en tres o cuatro categorías, con base en su idoneidad para el almacenamiento de residuos a largo plazo.

Un confinamiento controlado será un componente indispensable de cualquier plan de manejo de residuos peligrosos. Sin embargo, el relleno de tierras deberá fungir, no como el receptáculo primario de residuos peligrosos sin tratamiento, sino sólo como lugar de descanso final para los remanentes peligrosos no reciclables, ya sin toxicidad o solidificados. Aún así, se forma un lixiviado, el cual es necesario recolectar y tratar para satisfacer los requisitos especificados como condiciones para su eliminación. Los residuos peligrosos son tan variables como los procesos que los generan. En consecuencia, el lixiviado procedente del entierro de sus restos es igualmente variable. Es esta diversidad en la composición del lixiviado, junto con las diferencias en cuanto a características y clima del predio, lo que dificulta aplicar un enfoque estandarizado al tratamiento de lixiviados. Lo que ha sido apropiado en un caso o región puede ser inadecuado para otro. El tratamiento de lixiviados se encuentra en una etapa de desarrollo temprana, y continuamente se evalúan nuevas técnicas.

Sin embargo, los problemas técnicos no serán el obstáculo principal para la implantación de planes de manejo de residuos peligrosos. Las cuestiones de jurisdicción, de motivación suficiente, los arreglos financieros, los mecanismos de aprobación de predios, las provisiones para el cuidado a perpetuidad, la aceptación del público y otras consideraciones de naturaleza no técnica serán mucho más decisivas y, por consiguiente, merecedoras de alta prioridad. De estos problemas no técnicos quizá los dos más difíciles son la ubicación de nuevos centros de tratamiento y eliminación de residuos peligrosos y el impacto ambiental de los predios contaminados antiguos. En el primer caso probablemente habría necesidad de crear un consejo imparcial de ubicación, u otro organismo similar, que se ocupe de las fuertes objeciones que surgen de manera inevitable

Pollution Probe (una organización para la defensa del público) no está convencida de ello. “No somos partidarios de la tecnología de confinamientos”, dijo la señorita Wordsworth. “La arcilla sólo retarda el flujo del lixiviado, no lo detiene. En realidad se trata de una tecnología de los tiempos de los dinosaurios”.

- (a) Comente acerca de los puntos de vista de los partidarios y los opositores de los confinamientos. ¿Está usted de acuerdo o en desacuerdo con unos u otros, o con ninguno, y qué efecto tendrían estos puntos de vista en la elección de métodos para la eliminación de residuos industriales peligrosos? Explique.
  - (b) Mencione varias alternativas básicas para el manejo de residuos (excepto la inyección en pozos profundos y el almacenamiento en cavernas de sal) que la industria puede utilizar para reducir la cantidad de remanentes de residuos industriales que se depositan en un confinamiento. Señale una ventaja y una desventaja de cada alternativa.
- 15.11.** Una región industrializada de Norteamérica, con una población residente de 5 millones de habitantes, está elaborando un plan para la eliminación de sus residuos peligrosos.
- (a) Estime las cantidades aproximadas de residuos orgánicos e inorgánicos que requerirían tratamiento y eliminación externos.
  - (b) Elabore un diagrama de flujo que muestre los componentes de un centro de tratamiento y eliminación de residuos peligrosos (CTERP) para precisamente manejar estos residuos; suponga que no se incluyen unidades de incineración y que se dispone de una alcantarilla sanitaria municipal.
  - (c) Estime el volumen que deberá tener el relleno seguro para dar servicio a este CTERP durante 20 años.
- 15.12.** Suponga que los residuos peligrosos del área industrial del problema 15.11 que se eliminan externamente se tratan en un centro de tratamiento de residuos peligrosos (CTERP) que proporciona tratamiento físico y químico (TFQ) con desecado de lodos, incineración de toda la materia orgánica y entierro de los restos concentrados.
- (a) Elabore un diagrama de flujo que muestre los componentes de un CTERP idóneo para los residuos que llegan a él, e indique las proporciones aproximadas en las cuales se podrían subdividir adicionalmente las fracciones inorgánica y orgánica para su ulterior tratamiento y eliminación.
  - (b) Estime el volumen del relleno seguro que se necesita para dar servicio a este CTERP durante 20 años.
- 15.13.** Con la tabla 15-4 y el esquema de un centro de tratamiento de residuos peligrosos de la figura 15-9 como guías, determine los volúmenes anuales de residuos por enterrar si se entregan 100,000 toneladas métricas/año de residuos peligrosos a este CTERP para su tratamiento y eliminación. Utilice los volúmenes residuales máximos que se muestran en la tabla 15-6.
- 15.14.** Una antigua gasolinera fue abandonada en 1950 porque los tanques subterráneos de almacenamiento de gasolina y aceite se rompieron y partes del predio quedaron saturados de productos de petróleo a concentraciones de hasta 450 mg/kg de suelo. Para 1995 la concentración se había reducido hasta un máximo de 5 ppm debido, se supone, a una descomposición biológica. Puesto que la concentración de petróleo disminuyó a un promedio alrededor de 10 ppm por año, el inspector de construcciones concluyó que el petróleo habría desaparecido en un año más y aprobó un permiso de construcción residencial para el predio. Como ingeniero ambiental de la ciudad, usted sabe que esto es un error e informa de ello a su supervisora. Ella le pide que le explique por qué el inspector estaba equivocado y le solicita determinar cuándo se alcanzará la concentración permisible de 1 ppm, aceptable para terrenos residenciales. Elabore un memorándum para su supervisora donde explique cuáles son sus supuestos y por qué el inspector sanitario estaba en un error. Muestre todos sus cálculos. (*Sugerencia:* Para reacciones de orden cero,  $A_0 - A = kt$ ; para reacciones de primer orden,  $\ln A/A_0 = -kt$ .)

## REFERENCIAS

- AIKIN, A. M., HARRISON, J. M. y HARE, F. K. *The Management of Canada's Nuclear Wastes*. Energy, Mines and Resources Report, EP77-6. Ottawa: Energy, Mines and Resources, Canadá, 31 de agosto de 1977.
- BEECHER, N. y RAPPAPORT, A. "Hazardous Waste Management Policies Overseas". *Chemical Engineering Progress*, Mayo (1990): 30-39.
- BEHMANESH, N., ALLEN, P. T. y WARREN, J. L. "Flow Rates and Composition of Incinerated Wastes Streams in the U.S." *Journal of the Air and Waste Management Association* 42 (1992): 437-442.
- BLACKMAN, JR. W. L. *Basic Hazardous Waste Management*. Boca Raton, Fl.: Lewis Publishers, 1993.
- BROWN, P. A. y MCEWEN, J. "Plutons as Hosts". *GEOS* 11 (4) (1982): 12-15. *Chemical Engineering News*; 25 de febrero de 1991, p. 12 (de "Leading Edge Reports" en Cleveland, Ohio).
- COHEN, B. L. "Health Effects of Radon from Insulation of Buildings". *Health Physics* 39 (1980): 937-941.
- CROSS, TESSITORE and ASSOCIATES. "Centralized Incinerator Study for the South Florida Hospital Association". Orlando, Fl. 1985.
- DALLAIRE, G. "Hazardous Waste Management in California: Lessons for the U.S." *Civil Engineering* 51, Marzo (1981): 53-56.
- DIETRICH, G. M. "Ultimate Disposal of Hazardous Wastes". En *Toxic and Hazardous Waste Disposal*, vol. 3, R. B. Pojasek (ed.). Ann Arbor, Mich: Ann Arbor Science, 1980. pp. 1-11.
- DIXON, R. S. y ROSINGER, E. L. *Third Annual Report to the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program*. Report AECL-6821. Pinawa, Manitoba: Atomic Energy of Canada Limited, diciembre de 1981.
- ENVIRONMENT CANADA. *Canadian Fact Finding Mission on Hazardous Waste Management in Europe*, G. Rivoche (ed.). Toronto: Waste Management Branch, Environment Canada, 1980.
- FABRIKANT, J. L. "Health Effects of the Nuclear Accident at Three Mile Island". *Health Physics* 40 (1981): 151-161.
- FEATES, F. S. y PARKER, A. "Codes to Practice and Research Relating to Landfill Disposal of Hazardous Wastes in the United Kingdom". En *Toxic and Hazardous Waste Disposal*, vol. 2, R. B. Pojasek (ed.). Ann Arbor, Mich: Ann Arbor Science, 1980, pp. 51-66.
- FREEMAN, H. M. (ed.). *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. Nueva York: McGraw-Hill, 1989, pp. 7.1-7.85.
- GLENN, W. M., ORCHARD, D. y STERLING, T. M. *Hazardous Waste Management Handbook*. Don Mills, Ontario: Corpus Information Services, 1988.
- GOULD, J. P., CROSS, W. H. y POHLAND, F. G. "Factors Influencing Mobility of Toxic Metals in Landfills Operated with Leachate Recycle". En *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management*, D. W. Tedder y F. G. Pohland (ed.). Washington, D.C: American Chemical Society, 1990.
- GRASSO, D. *Hazardous Waste Site Remediation, Source Control*. Boca Ratón, Fla: CRC Press, 1993.
- HAM, J. M. *Report of the Royal Commission on the Health and Safety of Workers in Mines*. Toronto: Ministry of the Attorney General, Government of Ontario, 1976.

- HAYCOCK, D. "Corrective Measures at the Love Canal". Trabajo presentado en un seminario sobre residuos peligrosos, Environment Canada, Wastewater Technology Centre, Burlington, Ontario, 18-20 de marzo de 1981.
- HENRY, J. G. Visita personal al centro G.S.B. de Ebenhausen y al predio de relleno de tierras seguro de Gallenbach, junio de 1986.
- HENRY, J. G. y HEINKE, G. W. *Environmental Science and Engineering*, Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall Inc., 1989.
- HENRY, J. G. y MARTINI, O. *Hazardous Waste Treatment and Disposal*. Solid and Hazardous Waste Management Publication WM 82-01. Toronto: University of Toronto, 1982.
- HIGGINS, T. *Hazardous Waste Minimization Handbook*. Chelsea, Mich. Lewis Publishers, 1989.
- IAEA. Experts' Meeting, "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences". International Atomic Energy Agency. Viena, 25-29 de agosto de 1986.
- MACLAREN *Annex (II) Site Selection*. MacLaren Engineers, Planners, Scientists, Inc. Technical Report to the Ministry of the Environment. Toronto: 1980.
- MANTUS, E. K. (ed.). *All Fired Up: Burning Hazardous Waste in Cement Kilns*. Seattle, Wash.: Environmental Toxicology International, 1992.
- MCARDLE, J. L., AROZARENA, M. M. y GALLAGHER, W. E. *Treatment of Hazardous Waste Leachate*, Park Ridge, N.J.: Noyes Data Corporation, 1988.
- MCCOY and ASSOCIATES INC. "Directory of Commercial Hazardous Waste Management Facilities". *Hazardous Waste Consultant*, marzo-abril (1993).
- MILLER, D. W. y VALKENBURG, N. "Seymour: A Superfund Success Story". *Hazardous Materials Control*, enero-febrero (1992).
- MILLS, D. A. "Environmental Protection in Relation to Direct Landfill of Wastes". En *Proceedings of a Symposium on Technology Advances in Treating Difficult and Toxic Wastes*, N. J. P., Graham y C. J., Murphy, (ed.). Londres: Imperial College, 20 de febrero de 1990.
- Nuclear Fuel*. "EPA Relaxes Standards". Nueva York: McGraw-Hill, 20 de diciembre de 1982.
- OWMC. *Environmental Assessment Summary (Plan Stage)*. Toronto, (Ontario Waste Management Corporation) 1986.
- PUGLIONESI, P. S. "Redefining Hazardous Waste". *Environmental Engineer* 24 (1993): 13-21.
- REINHART, D. R., GOULD, J. P., CROSS, W. H. y POHLAND, F. G. "Sorptive Behaviour of Selected Organic Pollutants Codisposed in a Municipal Landfill". In *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management*, D. W., Tedder y F. G., Pohland (ed.). Washington, D.C.: American Chemical Society, 1990.
- RUMMERY, T. E. y ROSINGER, E. L. J. *The Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program*. Report AECL-8374. Pinawa, Manitoba: Atomic Energy of Canada Limited, diciembre de 1984.
- RUSSELL, M., COLGLAZIER, E. W. y TONN, B. E. "The U.S. Hazardous Waste Legacy". *Environment* 34(6) (1992):12.
- SETH, R., PRASAD, D. y HENRY, J. G. "Sulphur Minimization in Bacterial Leaching", *Proceedings 50th Purdue Industrial Waste Conference*, Purdue University, West Lafayette, Indiana 1995.



- SKINNER, P. N. "Performance Difficulties of 'Secure' Landfills for Chemical Waste and Available Mitigation Systems". En *The Hazardous Waste Dilemma: Issues and Solutions*, J.P. Collins y W. P. Saukin (eds.). Nueva York: American Society of Civil Engineers, 1981, pp. 32-55.
- SKINNER, J. H. "An Overview of International Perspectives in Hazardous Waste Management". En *International Perspective on Hazardous Waste Management*. Londres: Academic Press, 1987.
- SULLIVAN, N. "Poison Eater". *OMNI* 3, junio (1981): 18, 143.
- URATA, J. "Treatment of Toxic Wastes in Japan". En *Toxic and Hazardous Waste Disposal*, vol. 3, R. B. Pojasek (ed.), pp. 55-66. Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science, 1980.
- U.S. AEC. *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*. WASH-1400, Germantown, Md. U.S. Atomic Energy Commission. Agosto de 1974.
- U.S. EPA. *The Report to Congress: Waste Disposal Practices and their Effects on Groundwater*. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.: Office of Water Supply and Office of Solid Waste Management Programs, 1977.
- U.S. EPA. *Management of Hazardous Waste Leachate*. Informe por A. J., Shuckrow, A. P., Pajak, y C. J. Touhill. U.S. EPA SW 871, Contract 68-03 2766. Cincinnati; Ohio: U.S. Environmental Protection Agency. Septiembre de 1982.
- U.S. EPA. *The Toxics-Release Inventory: A National Perspective*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticides and Toxic Substances. EPA 5604-89-005, 1989.
- U.S. EPA. "Managing and Tracking Medical Wastes: A Guide to the Federal Program for Generators". *Solid Wastes and Emergency Response*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/530-SW-89-021, Washington, D.C., 1989.
- U.S. EPA. *How to Meet Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure*. Park Ridge, N.J.: Noyes Data Corporation, 1990.
- YAKOWITZ, H. "Waste Management: What Now? What Next? An Overview of Policies and Practices in the OCDE Area." *Resources, Conservation and Recycling* 8 (1993) 131-178.

# CAPÍTULO 16

---

## Administración del ambiente

*R. Ted Munn  
Gary W. Heinke  
J. Glynn Henry*

### 16.1 INTRODUCCIÓN

La administración sensata y equitativa del ambiente exige equilibrar diversos intereses en conflicto. Una industria que descarga residuos no tratados en la atmósfera o en cuerpos de agua puede argumentar que está empleando el método de eliminación más económico, el cual da por resultado un costo de producción menor que le permite vender su producto a bajo precio. Esto genera beneficios no sólo para la industria sino también para el público, en forma de productos baratos y más empleos. Sin embargo, el mismo público está pagando costos indirectos asociados con la contaminación industrial. Ahora el público debe pagar por tratar su agua potable en mayor medida de la que sería necesaria en ausencia de contaminación industrial, y quizá pague con más enfermedades y menor calidad de su medio.

Si se considera una región y una población suficientemente grandes, no es difícil ver que todos nosotros somos contaminadores, directos o indirectos, y que compartimos las desventajas y los costos de limpieza de las actividades que generan contaminación, aunque en muchos casos no de manera equitativa. No sólo se trata de un caso de la industria contaminante contra el público. Las causas subyacentes de la fatiga ambiental se presentaron en la primera parte de este libro. Con base en la lectura de esos capítulos debe quedar claro que la culpa del cambio en la calidad del ambiente a lo largo de los años no se puede adscribir a una industria o grupo de ellas. Los residuos que proceden de fuentes residenciales y comerciales también han contribuido a la problemática ambiental.

En este capítulo se examinan cuatro consideraciones importantes en la implantación de una política ambiental, las cuales se ilustran por medio de estudios de caso. Los ejemplos aclaran el procedimiento de identificación y predicción de impactos ambientales, explican las estrategias que los gobiernos aplican para controlar la contaminación y destacan la importancia de la ética en la administración ambiental.

## 16.2 DESARROLLO SOSTENIDO

En 1987 la World Commission of Environment and Development (WCED; Comisión mundial para el ambiente y el desarrollo) publicó su informe *Nuestro futuro común*, en el cual dio considerable relieve a la frase: *desarrollo sostenido*, esto es, "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las del futuro". Esta idea de desarrollo sostenido (introducida y definida en la sección 1.6.1 del informe) aporta una nueva dimensión a la formulación de políticas económicas y ecológicas, pero la definición de la WCED no opera en sentido alguno.

La necesidad de adoptar una perspectiva a largo plazo se ilustra por medio de dos ejemplos. A muchos bosques les toma 100 años madurar, y en el caso de las *secoyas* de California, 400 años. De manera similar, muchas obras de ingeniería se proyectan para durar décadas, y hasta siglos (grandes sistemas de control de crecidas; fundiciones). Por consiguiente, se debe poner mayor énfasis en las tendencias a largo plazo, aunque el "problema del día" pueda parecer de importancia capital. Un gran sistema de irrigación, por ejemplo, ¿sería capaz de soportar las consecuencias de un clima más caluroso y seco en el próximo siglo? Con el surgimiento reciente de problemas globales interrelacionados, como el calentamiento del planeta y el agotamiento del ozono en la estratosfera, existe una preocupación creciente respecto a que el cambio global en el siglo XXI no tendrá precedentes. Vea, por ejemplo, la colección de ensayos en Clark y Munn (1986).

Aun si se acepta que el *desarrollo sostenido* es un concepto importante, de cualquier manera existe confusión respecto a cómo avanzar hacia ese estado deseable. Muchos autores han señalado que, si *desarrollo* significa *crecimiento*, no se puede sostener a largo plazo. Así pues, la idea de *crecimiento industrial sostenido* no es defendible. En consecuencia, está surgiendo el punto de vista de que el *desarrollo* se debe interpretar en el sentido industrial como *reestructuración*, y en el sentido ambiental como *evolución* [vea por ejemplo, Munn (1992)]. El ambiente, incluso el económico, se encuentra en proceso de cambio continuo. Para ser sostenido, una industria o un ecosistema se debe adaptar a los cambiantes factores externos para sobrevivir. Las propiedades de un sistema que le permitan evolucionar se conocen como su *integridad* (Kay, 1991). Un sistema que intenta sobrevivir conservando el *statu quo* en vez de adaptarse a un mundo cambiante se verá sometido a esfuerzos cada vez mayores, y en ciertos casos tal vez se derrumbará a final de cuentas.

Hasta cierto punto, una industria individual o una región pequeña puede conseguir su propia capacidad sustentable (por ejemplo, exportando sus residuos). No obstante, el desarrollo sostenido debe abarcar, en última instancia, a todos los sectores de la economía y a todos los pueblos de la Tierra. Por ejemplo, la industria agrícola es sostenida por medio de subsidios energéticos masivos (para el funcionamiento de la maquinaria, para fabricar fertilizantes, plaguicidas y herbicidas, etc.) y de subsidios económicos (por ejemplo, el de la política agrícola común en Europa). Sin embargo, a largo plazo entran en juego fuerzas ambientales en gran escala y

perspectiva general integral. Estos análisis fueron revisados por los organismos reguladores apropiados, aunque no por el público. En el caso de la industria de la energía nuclear, se exigieron investigaciones detalladas en campo como requisito para la autorización de permisos de operación.

El movimiento ambiental de la década de los años sesenta y principios de los años setenta dio por resultado que los grupos ambientales se tornaran políticamente activos en muchos países. Como respuesta parcial a estos grupos de presión, los gobiernos aceptaron el principio de que las organizaciones de ciudadanos deberían tener la oportunidad de participar en el proceso de toma de decisiones de los grandes desarrollos que podrían tener impactos ambientales significativos.

La primera legislación ambiental integral de Estados Unidos, la National Environmental Policy Act (NEPA; Ley de política ambiental nacional), entró en vigor el 1 de enero de 1970. Esta ley contiene tres secciones principales:

1. Una declaración de la política nacional y, con ella, una prescripción de metas ambientales que el gobierno federal estaba obligado a perseguir.
2. Una especificación de que los organismos federales deberían elaborar un MIA respecto a las acciones federales que afectasen de manera significativa la calidad del ambiente humano.
3. La institucionalización del proceso de EIA en la Oficina Ejecutiva del Presidente por medio del establecimiento del Consejo para la Calidad Ambiental.

En Canadá, el gobierno federal estableció un Proceso de Evaluación y Revisión Ambiental en 1973 para asegurar que:

1. Los efectos ambientales se tomen en cuenta en una etapa temprana de la planeación de nuevos proyectos, programas y actividades federales.
2. Se lleve a cabo una evaluación ambiental antes de que se hagan compromisos o se tomen decisiones irrevocables para todos los proyectos que pudieran tener un efecto adverso en el ambiente (los proyectos con efectos ambientales potencialmente significativos se presentarían ante el Environment Canada para su revisión).
3. Los resultados de las evaluaciones sean utilizados para la planeación, la toma de decisiones y la puesta en práctica.

La necesidad de llevar a cabo una evaluación del impacto ambiental ha sido aceptada por muchas otras jurisdicciones, entre ellas casi todos los estados de EUA, las provincias canadienses, Japón, Australia y la mayor parte de los países europeos. El proceso de EIA ha estado en evolución desde principios de la década de 1970. En esa época se ponía énfasis en los factores físicos medibles, en particular aquéllos para los cuales existían estándares y códigos (por ejemplo, calidad del aire, calidad del agua, eliminación de residuos sólidos). Después de algunos años, la EIA comenzó a incluir factores biológicos y ecológicos, no obstante que eran difíciles de cuantificar. En tiempos más recientes, la EIA se amplió aún más para incluir factores socioeconómicos (oportunidades de empleo, impactos culturales, factores recreativos, etc.), con lo cual fue posible evaluar balances entre factores socioeconómicos y ambientales. En ciertas jurisdicciones el proceso de EIA también se está empleando para evaluar demandas colectivas (por ejemplo, para prohibir un plaguicida o para regular el contenido de plomo en la gasolina.)

El sistema de EIA ha sido recibido con beneplácito por muchos científicos, ingenieros, grupos cívicos y otras personas. No obstante, en la práctica el proceso ha dejado mucho que desear. Por ejemplo, los MIA suelen ser demasiado largos y excesivamente técnicos (para los grupos cívicos), y no se ocupan del ambiente de una manera holística. Sin embargo, se está dando un proceso de aprendizaje, el cual mejora la utilidad de las EIA. En ciertos casos se proporciona apoyo financiero a grupos cívicos mediadores para ayudar a elaborar presentaciones para las audiencias públicas.

### **16.3.2 Elementos del proceso de evaluación del impacto ambiental**

El primer paso en el proceso de EIA consiste en determinar si un proyecto pertenece al ámbito de la ley o reglamento pertinente, y si es probable que el desarrollo cree un trastorno ambiental significativo. De ser así, se emprende una evaluación que conduce a la elaboración de un MIA. En la mayor parte de las jurisdicciones el MIA está abierto al escrutinio público y puede ser revisado en audiencias públicas. Finalmente, se toma una decisión de tipo político en cuanto a (1) aceptar el proyecto, (2) aceptar una forma corregida del proyecto propuesto, (3) aceptar una propuesta alternativa, o (4) rechazar el proyecto.

**Contenido.** El MIA debe:

1. Describir una acción propuesta, así como las alternativas (incluso la de no actuar).
2. Estimar la naturaleza y magnitud de los efectos ambientales probables de todas las alternativas.
3. Identificar los problemas humanos pertinentes.
4. Definir los criterios que se deberán emplear para medir la trascendencia de los cambios ambientales, incluso el peso relativo que se debe asignar para comparar los diferentes tipos de cambios.
5. Estimar la trascendencia de los cambios ambientales pronosticados (es decir, estimar los efectos de la acción propuesta).
6. Hacer recomendaciones para la vigilancia de los procedimientos que se deberán seguir durante y después de la puesta en práctica de la acción.

Suele ser necesario elaborar un informe de punto de partida para presentarlo antes o al mismo tiempo que el MIA. El informe de punto de partida contiene un inventario ambiental, esto es, un recuento de los hechos en relación con las condiciones ambientales de la región en el momento del informe, junto con las tendencias que se hayan presentado de manera reciente. Si existen deficiencias en los datos, es posible que se solicite al encargado del MIA llevar a cabo un programa de campo.

Una consideración importante es la selección de alternativas para la acción propuesta. Las opciones deben incluir diferentes formas para construir y operar el proyecto. El MIA puede describir el proyecto en un lugar específico. No obstante, es más fácil comparar los efectos en diversos lugares que determinar el valor absoluto de cualquier efecto en un lugar determinado. Si no se consideran localidades alternativas, se tendrán dificultades muy reales, en particular en las audiencias públicas, con los problemas de "no en el patio de mi casa", en los cuales nadie

está en desacuerdo con el proyecto en tanto éste se ubique en algún otro lugar. Las líneas de transmisión de electricidad, las carreteras y los predios destinados a la eliminación de residuos son ejemplos representativos de este tipo de problemas.

La naturaleza y magnitud de los cambios ambientales probables que se deben estimar e incluir en el MIA pertenecen a tres clases principales:

1. *Físicos*: por ejemplo, probabilidades de terremotos; calidad del agua en las aguas subterráneas, ríos y lagos; calidad del suelo y del aire
2. *Biológicos*: por ejemplo, vegetación, vida silvestre; especies de peces deportivas y comerciales; especies en peligro de extinción
3. *Socioeconómicos*: por ejemplo, demográficos; económicos; valores y actitudes sociales

Cuando los efectos socioeconómicos no se incluyen en un MIA, por lo general están presentes en una "agenda oculta" de los participantes en las audiencias públicas y en los aspectos políticos.

Es relativamente fácil pronosticar los efectos físicos con base en una buena práctica científica; en capítulos anteriores se han descrito varios métodos para ello. Las predicciones de los efectos biológicos y ecológicos son mucho más inciertas. Esto se debe a que los organismos vivos y las comunidades de los mismos están sujetos a muchas tensiones naturales: sequías, inundaciones, pastoreo excesivo, así como tensiones creadas por la sociedad. Además, los organismos vivos son adaptables y poseen una gran variabilidad genética, de modo que sus reacciones a las múltiples tensiones ambientales no son siempre predecibles. Los primeros MIA incluían censos de flora y fauna en el área afectada, en particular con respecto a las especies en peligro de extinción. No obstante, la tendencia actual es un cambio hacia estudios de ciclos vitales, hábitats y cadenas alimenticias de especies representativas, con particular énfasis en los procesos de quienes se piensa gobiernan el comportamiento de los componentes ambientales (Beanlands y Duinker, 1983).

Las predicciones de los impactos socioeconómicos son muy inciertas, incluso en un sentido cualitativo. No obstante, estos efectos son de importancia fundamental para la persona afectada y pueden causar cambios biológicos o ecológicos adicionales a los que ocasiona el proyecto mismo. Observe que los efectos socioeconómicos pueden variar dentro de una misma comunidad: ciertas personas apoyarán la propuesta para una carretera porque reducirá su tiempo de traslado a su trabajo; otras se opondrán a causa del ruido, la contaminación del aire o la pérdida de un paisaje pintoresco.

Por último, los efectos acumulativos pueden ser importantes en ciertos casos, en los cuales muchos efectos pequeños dan lugar a una crisis de gran magnitud muchos años después (Munn, 1994).

La determinación de cuáles son los efectos ambientales pertinentes es fundamental para dar validez y credibilidad al proceso de evaluación de impactos. Para asegurar que el MIA sea un documento útil, es necesario establecer desde un principio los límites de la evaluación en cuanto a tiempo, espacio y número de factores por considerar.

**Marcos temporales.** En la mayor parte de los casos el EIA abarca los siguientes marcos temporales:

1. El presente (informe de punto de partida o inventario ambiental)

En el otro extremo están quienes afirman que un MIA debe incluir todo. Esto suele dar por resultado un documento de cientos de páginas que, en el mejor de los casos, muy pocas personas leen. Schindler (1976, p. 509) hace referencia al gran “despilfarro” en los MIA que origina la creación de una “literatura gris de tan difusa, voluminosa y de distribución tan limitada, que sus conclusiones y recomendaciones nunca son objeto de escrutinio por la comunidad científica en general”.

Así pues, es indispensable incluir factores adicionales a los que cubren en ese momento las leyes y reglamentos, pero también es importante limitar el alcance de las evaluaciones en cuanto a tiempo, espacio y número de factores para que el MIA constituya un documento útil. La posición idónea, intermedia entre los dos extremos, depende de la naturaleza de cada proyecto y del buen juicio de los participantes en el MIA.

**Factores de ponderación.** Una vez seleccionados los factores que se incluirán en un MIA, es necesario pronosticar su magnitud futura, aunque sólo sea en una escala cualitativa. Entonces, se puede idear un sistema de ponderación para facilitar la comparación entre diferentes clases de efectos. Los montos se pueden estimar por el método de Delphi, en el cual a cada miembro de un grupo de personas se le pide ordenar la importancia de los diversos factores o efectos. Después se informa a cada uno de las respuestas de los otros miembros y se le invita a revisar y corregir sus propias respuestas; este proceso en muchos casos permite alcanzar un consenso de grupo.

Uno de los enfoques más sencillos para obtener una evaluación visual es la matriz de Leopold (Leopold *et al.*, 1971) que se presentó en el capítulo 2. El método es más bien cualitativo y se debe emplear con precaución. La matriz (figura 16-1) provee espacio para la magnitud y para la importancia de cada efecto. Siempre y cuando la matriz no sea mucho mayor de  $10 \times 10$ , esta forma de visualización puede ser de utilidad. En relación con esto se puede utilizar un proceso de señalamiento con banderines si ciertos efectos (con respecto a un sitio histórico o una reserva de vida silvestre, por ejemplo) son tan importantes que generan una situación que no permite continuar.

### 16.3.3 Diseño de una evaluación del impacto ambiental

Se dispone de diversos enfoques para la EIA, y las personas interesadas deben consultar al menos una de las siguientes referencias: Canter (1977), Holling (1978), Munn (1979), PADC (1983) y Westman (1985). También es conveniente examinar los MIA elaborados para proyectos de tipo similar. La siguiente lista es una práctica de preguntas que es recomendable tomar en cuenta en el diseño de una EIA.

#### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

- ¿Qué tipo de proyecto se está considerando?
- ¿Cuáles son las dimensiones físicas del área sujeta a consideración?
- ¿Cuánto tiempo se necesitará para poner en práctica el proyecto?
- ¿Se comprometen terrenos de forma irrecuperable?
- ¿Es el proyecto una fase crítica de un desarrollo mayor?
- ¿Cuáles son los planes a largo plazo de quien propone?
- ¿El proyecto aprovecha en forma óptima a los trabajadores locales, los recursos renovables y otros beneficios?

**Instrucciones**

1. Identifique todas las acciones (ubicadas a lo ancho de la parte superior de la matriz) que son parte del proyecto propuesto. Haga una lista de las características o condiciones ambientales pertinentes en la columna lateral de la matriz.
2. Bajo cada acción propuesta trace una diagonal en la intersección con cada inciso del costado de la matriz en caso de que sea posible un impacto.
3. Una vez completada la matriz, en la esquina superior izquierda de cada cuadro con diagonal ponga un número del 1 al 10 que indique la *magnitud* del posible impacto. El número 10 representa la dimensión más grande del impacto y el 1 la menor (no se usan ceros). Antes de cada número anote un signo + si el efecto sería benéfico. En la esquina inferior derecha de cada cuadro ponga un número del 1 al 10 para indicar la *importancia* del posible impacto (por ejemplo, regional contra local); una vez más, el 10 representa la máxima importancia y el 1 la mínima.
4. El texto que acompaña a la matriz debe ser un análisis de los impactos significativos de las columnas y las filas con gran número de cuadros marcados, y de los cuadros individuales que tienen números más grandes.

	a	b	c	d	e
m		2 1			8 5
n		7 2	8 8	3 1	9 7

Figura 16-1 Instrucciones para el uso de la matriz de Leopold. Fuente: Leopold et al. (1971).

- ¿Habrá trastornos ambientales de consideración durante la construcción?

**OPERACIONES DEL PROYECTO**

- ¿Cómo se manejarán los residuos peligrosos y los productos de desecho?
- ¿Qué se ha previsto respecto a la capacitación de los empleados en el campo de la protección ambiental?
- ¿Qué planes de contingencia se han elaborado para hacer frente a los accidentes?
- ¿Qué planes se han hecho para la vigilancia ambiental?
- ¿Se revisará con regularidad el equipo de seguridad?

**CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR**

- ¿Es complejo el terreno y crea dificultades para pronosticar cosas como la calidad de las aguas subterráneas, las características del suelo y el transporte de la contaminación del aire?
- ¿Es probable que el lugar sea particularmente susceptible a desastres naturales (por ejemplo, inundaciones o terremotos)?
- ¿Obligará el proyecto a muchas personas a mudarse a otro lugar?



### DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS

- ¿Hay expertos locales capaces de proporcionar asesoría respecto a efectos específicos?
- ¿Existe la posibilidad de buscar la asesoría externa de un especialista?
- ¿Existen publicaciones (memorandos técnicos, guías, etc.) que podrían ayudar a identificar los efectos posibles del tipo de proyecto específico?

Una vez que se ha determinado la magnitud y la trascendencia de los efectos, la EIA está prácticamente concluida. La etapa final para hacer recomendaciones respecto a si el proyecto se debe aceptar, rechazar o autorizar con algunas modificaciones, normalmente está a cargo del consejo establecido para llevar a cabo las audiencias públicas.

#### 16.3.4 EIA internacionales

Ciertas acciones pueden causar efectos ambientales en más de una jurisdicción o país, o en aguas internacionales. Son ejemplos de esto la descarga de residuos industriales y municipales en ríos que sirven de frontera a varios países o los atraviesan, el problema de largo alcance de la lluvia ácida, el manejo integrado de plagas, la importación y exportación de alimentos, el calentamiento global debido al CO<sub>2</sub>, la cacería internacional de ballenas, la desertificación, la administración ambiental de la Antártida y el problema del ozono de la estratosfera.

Muchos EIA internacionales son tratados interesantes pero han tenido poco efecto en la gente encargada de tomar las decisiones, esto a causa de una falta de comprensión de las formas para alcanzar un consenso internacional. En particular rara vez se identifica a las partes afectadas, y en pocas ocasiones se comparan los beneficios y desventajas. Un problema especial es que con frecuencia no hay sólo un encargado de tomar las decisiones. Además, suele ocurrir que los beneficios correspondan a un país y las desventajas a otro. Por último, puede suceder que los estándares ambientales no sean uniformes en las diversas jurisdicciones que intervienen.

Los problemas científicos son igualmente inextricables, en particular en escala mundial. Las cuestiones de riesgos deben examinarse de forma especial en un contexto internacional. Algunas de las consecuencias (por ejemplo, el calentamiento del clima inducido por el CO<sub>2</sub> y el agotamiento del ozono de la estratosfera) son muy inciertas. Sin embargo, si no se hace algo al respecto dentro de un periodo específico, puede ser demasiado tarde para impedir una tendencia irreversible. Esta idea se encierra en el llamado *principio precautorio*. Para complicar aún más la evaluación, la tendencia puede ser dañina para ciertos países o sectores económicos pero benéfica para otros. Así pues, se necesitan marcos intergubernamentales para las EIA que incluyan la creación de pautas para las prioridades de investigación.

#### 16.3.5 Conclusiones

El objetivo principal de una EIA es conciliar las consideraciones ambientales y socioeconómicas con respecto a los proyectos y otras acciones propuestas. En consecuencia, el sistema de EIA es un componente potencialmente útil de una buena administración ambiental; sin embargo, de la manera como se practica en la actualidad, dista mucho de ser perfecto. Algunas de las críticas que se le han hecho y (entre paréntesis) los argumentos en sentido contrario son los siguientes:

**Fase V: Análisis de otros efectos atmosféricos.** Es probable que la **precipitación ácida** sea un problema, aunque una sola planta de energía aporta una fracción muy pequeña (1% o menos) de la precipitación ácida húmeda que cae en el campo circundante. La razón de esto es que la precipitación ácida húmeda procede de muchas fuentes que se encuentran a lo largo de cientos de kilómetros. No obstante, se deben hacer estimaciones de precipitación ácida húmeda y seca, empleando la fórmulas apropiadas, con base en una serie temporal histórica razonable de observaciones hechas cada hora de viento y precipitación. Por lo general un periodo de 5 a 10 años de registros es adecuado.

No es probable que los **efectos en el clima** sean significativos en el caso de plantas de energía alimentadas con carbón, excepto tal vez si se propone una torre de enfriamiento, en cuyo caso una carretera adyacente podría verse afectada. (La niebla puede reducir la visibilidad, y la humedad o hielo en las superficies puede causar condiciones resbalosas.)

El **ruido** sólo es problema durante la construcción.

Las **consideraciones de seguridad** por lo general se manejan en la sección de ingeniería para el diseño de un EIA. Sin embargo, la sección atmosférica deberá contener las estadísticas climatológicas básicas en cuanto a extremos de temperatura, viento y precipitación.

El **cambio climático a largo plazo** es una cuestión de importancia creciente, en particular en las audiencias públicas. Las emisiones esperadas de CO<sub>2</sub> se deben incluir en la EIA, no obstante que este "gas de invernadero" no es un contaminante del aire en el sentido tradicional. Además, la posible elevación del nivel del mar y una mayor frecuencia de oleajes de tormenta a lo largo de los próximos 100 años pueden ser causa de preocupación pública en lugares costeros abiertos y en donde existe el gran flujo o corriente de la marea.

**Aplicación de estas ideas a la planta generadora de electricidad propuesta.** Sin la pretensión de llevar a cabo cálculos de dispersión en detalle, puede ser de utilidad la identificación de las situaciones de contaminación del aire que tienen mayor interés en cada uno de los lugares propuestos:

#### **LOCALIDAD 1 (TERRENO COSTERO ABIERTO)**

- Fumigaciones diurnas de brisa marina en primavera y verano
- Formación de rizos convectivos diurnos con vientos ligeros
- Vientos fuertes y constantes

#### **LOCALIDAD 2 (EN UN VALLE)**

- Mezcla limitada del aire en el piso del valle
- Fumigación matutina
- Arrastre descendente de vientos fuertes a lo ancho del valle

#### **LOCALIDAD 3 (CERCA DE UN FLUJO DE MAREA DENTRO DE UN ÁREA CON CONSTRUCCIONES)**

- Fumigaciones diurnas de brisa marina en primavera y verano
- Arrastre descendente aerodinámico de los vientos en torno a los edificios de apartamentos altos
- Vientos fuertes y constantes

El otro componente del costo externo son los gastos de reparación o reducción del daño causado por la contaminación. El costo de construir y operar una planta municipal de tratamiento de agua es un ejemplo: el agua que ha sido "dañada" por la contaminación debe ser restaurada para hacerla potable.

Puesto que los derechos a los bienes públicos no son propiedad de persona alguna, no se pueden comprar ni vender, por lo cual no existe un mercado en el cual se les pueda asignar un valor. En ocasiones se puede determinar una compensación por estos costos externos con relativa facilidad. Por ejemplo, suponga que el operador de un pabellón de pesca ha cultivado los peces de cierto estanque. Si el efluente de una fábrica de pulpa de madera que está corriente arriba mata los peces, el operador del pabellón no recibiría ganancias en el negocio de la pesca debido a la acción contaminante de la fábrica de pulpa, y entonces el operador entablaría una demanda judicial. Para evitar este alto costo, la fábrica de pulpa, aplicando los principios normales de administración de empresas, tendría que determinar cuánto necesita gastar en el abatimiento de la contaminación para evitar la muerte de los peces y el pago de los daños consiguientes. En este sencillo ejemplo los costos externos de la contaminación se transferirían al contaminador. Desde luego, a la larga estos costos se trasladarían a los consumidores de pulpa y papel y, por consiguiente, a la sociedad en conjunto.

Es mucho más difícil asignar un valor a la pérdida del disfrute de los placeres recreativos y estéticos de un río o lago para un grupo de habitantes de casas de campo cuando el río o lago ha sido contaminado por la misma fábrica de pulpa. Para estas personas, como individuos o como grupo, también es más difícil entablar un proceso judicial que quizá sea costoso contra la fábrica de pulpa. En consecuencia, acudimos a nuestros representantes electos ante el gobierno, en el nivel local, estatal o nacional, para proteger nuestros recursos públicos, esto es, para tener aire y agua limpios. Es más probable que un gobierno responda si percibe que una causa determinada es muy importante para el electorado. Muchos grupos cívicos preocupados por la protección ambiental se han dedicado a emplear todos los medios disponibles para presionar a los gobiernos a fin de que promulguen leyes e introduzcan incentivos que consigan que el contaminador ponga en práctica medidas para el control de la contaminación. De una forma u otra, estos métodos "internalizan" los costos externos de la contaminación en la medida de lo posible. Cuando no es factible conseguir esto, los costos externos tendrán que ser cubiertos por la sociedad en conjunto, como un costo social de la contaminación, del mismo modo que compartimos otros costos sociales como los que crean las necesidades de empleo, seguridad social y salud ocupacional.

### 16.4.2 Estándares ambientales y de efluentes

La meta de las estrategias de administración ambiental consiste en mantener o mejorar la calidad del ambiente (circundante). Los **estándares ambientales** se determinan para diversas características o contaminantes diferentes dentro de un medio como el aire o el agua. Estos estándares tienen como propósito reducir al mínimo los riesgos para la salud de humanos, animales o el entorno en general. Los componentes para los cuales se fijan estos estándares deben ser cuantificables y mensurables por medios científicos. En agua y en aire, se fijan criterios de concentraciones permisibles de diversos contaminantes. Además, los contaminantes para los cuales se fijan estándares ambientales se deben correlacionar con sus fuentes. Un organismo regulador puede fijar estándares ambientales y vigilar las condiciones del entorno, pero no puede controlar ni manejar las condiciones si no es controlando las fuentes de los contaminantes que afectan las condiciones ambientales. Por ejemplo, es deseable mantener la concentración de particula-

tos, la aplicación de toques de queda para las operaciones en los mismos y la construcción de chimeneas altas o desembocaduras marinas largas de aguas negras.

La zonificación da por resultado una calidad ambiental variable. El gobierno podría dividir el país, desde luego, en regiones con diferentes estándares ambientales esperados y por tanto con distintos estándares de efluentes permisibles. De esta manera, los contaminadores podrían determinar por sí mismos el balance entre los costos de abatimiento y los costos de ubicación o reubicación. Las personas también podrían elegir el nivel de calidad ambiental en el cual desean vivir. Sin embargo, este plan presenta muchas desventajas. Por ejemplo, las industrias podrían verse obligadas a ubicarse lejos de sus mercados, lo que aumentaría el precio de las mercancías. Además, durante la implantación de un plan de esta naturaleza, habría muchos alegatos del tipo de "no en mi patio trasero". Por otra parte, las industrias de los recursos naturales, como la silvicultura y la minería, no se pueden llevar lejos de sus fuentes de suministro. Otra desventaja sería que los trabajadores industriales y los de servicio que fueran afines estarían prácticamente condenados a vivir en lugares de mala calidad. De hecho, la industria, la densidad de la población y la contaminación siempre han ido de la mano, y se requeriría algo más que simples leyes para separarlas.

**Prohibición, o descarga cero.** Otra forma de regulación directa de la contaminación es la prohibición, también conocida como *descarga cero*. Las ventajas de este concepto son obvias. En primer lugar, no habría cambios en la calidad ambiental. Más aún, todos los recursos se tendrían que transformar totalmente en materiales útiles o almacenarse de manera indefinida. Además, la legislación parecería ser equitativa, puesto que las mismas reglas se aplicarían a todos. Un concepto de esta naturaleza, sin embargo, es normalmente imposible de llevar a la práctica. Un sencillo balance de materia muestra que cualquier recurso que se tome del entorno, incluso la energía, se debe devolver en alguna forma. Aun si fuera concebible reciclar todos los residuos a productos nuevos, de todos modos se necesitaría una gran cantidad de energía para conseguirlo. Para casi todas las actividades, alcanzar la descarga cero sería costoso, si no es que imposible. De momento, los productores de residuos muy peligrosos, para los cuales no se dispone un tratamiento, son los únicos sujetos a requisitos de descarga cero, y están obligados a almacenar sus residuos hasta que se encuentre un medio seguro para eliminarlos.

**Estándares de efluentes.** Los estándares de descarga de efluentes son la forma más común y más útil de regulación directa. Éstos pueden adoptar la forma de estándares de aplicación general que exigen que los efluentes de todos los contaminadores satisfagan los mismos criterios, o pueden elaborarse de manera individual para cada contaminador. Las ventajas de un enfoque de aplicación general son que es fácil de administrar, parece justo para todos los contaminadores y proporciona el control más rígido sobre la calidad ambiental. Las desventajas son que puede ser poco económico, y por tanto poco práctico, e insistir en que todos los contaminadores satisfagan los mismos estándares de efluentes. Algunos contaminadores pueden satisfacer con facilidad estándares que otros en absoluto son incapaces de hacerlo, o sólo a un costo muy alto. Las diferentes capacidades de asimilación del entorno en distintos lugares se pueden tomar en cuenta sólo si se considera caso por caso. Por ejemplo, un río grande y de flujo rápido acepta una cantidad mucho mayor de contaminación orgánica que un arroyo pequeño, por lo cual las concentraciones de contaminantes procedentes de descargas de fuente puntual podrían ser mucho más altas antes de afectar seriamente la calidad del río. No obstante, casi todas

**Ejemplo 16.1**

Una industria produce 800 m<sup>3</sup>/día de residuos orgánicos con una DBO<sub>5</sub> de 635 mg/L. Si los residuos con DBO<sub>5</sub> menor de 300 mg/L quedan cubiertos por los cargos básicos por alcantarillado, por impuestos o como parte de la cuenta del agua, ¿qué recargo anual pagaría esta industria si el costo de operación por la eliminación de la DBO<sub>5</sub> es de \$0.25 por kg de DBO<sub>5</sub> eliminada?

**Solución**

Gasto diario	800,000L/día
DBO <sub>5</sub> diaria	$\frac{800,000 \times 635}{10^6} = 508 \text{ kg}$
DBO <sub>5</sub> /año	$508 \times 365 = 185,420 \text{ kg}$
DBO <sub>5</sub> permitida	300 mg/L
DBO <sub>5</sub> permitida/año	$\frac{800,000 \times 300}{10^6} = 240 = 87,600 \text{ kg}$

Así pues, la DBO<sub>5</sub> en exceso por año es de 97,820 kg, y el recargo anual es de  $97,820 \times \$0.25 = \$24,455$  por año.

**Fórmula de evaluación/recargo.** Otra forma de cobrar por el servicio de alcantarillado es permitir a todos los usuarios la misma cantidad de tratamiento por unidad monetaria evaluada, a partir de la cual se aplica un recargo. En ocasiones, los municipios permiten hasta el doble de tratamiento por unidad monetaria evaluada sin recargos; esto es, se aceptan residuos hasta dos veces más concentrados de lo normal sin costo adicional. A partir de esto, se agrega un recargo con base en el costo real de la eliminación de la DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión.

**Ejemplo 16.2**

Si la evaluación residencial promedio es de \$5,000 por casa, determine el recargo que se aplicaría a la industria del ejemplo 16.1 si la industria tuviera una tasa de \$4 millones. Suponga que los usuarios tienen derecho a la misma cantidad de tratamiento por unidad monetaria evaluada.

**Solución** Para la residencia privada promedio cuya tasa es \$5,000 y que aloja un promedio de 3.5 personas, la contribución de DBO<sub>5</sub> por vivienda, suponiendo 76 g/persona · día con base en la tabla 12-3, sería de

$$\begin{aligned} \text{DBO}_5 &= 3.5 \times 76 = 266 \text{ g/día} \\ &= 0.266 \times 365 = 97 \text{ kg/año} \end{aligned}$$

El factor normal de evaluación  $F$  es por tanto

$$F = \frac{\text{lb DBO}_5/\text{año}}{\text{evaluación}} \times \frac{97}{5,000} = 0.02$$

Observe que  $F$  también se podría encontrar a partir de

$$\frac{\text{DBO}_5 \text{ total a la planta de tratamiento de aguas residuales}}{\text{evaluación municipal total}}$$

Para  $F = 0.02$ , a los usuarios se les permiten 0.02 kg de DBO<sub>5</sub> por año por unidad monetaria evaluada sin aplicación de recargos. Si se aplica esto a la industria del ejemplo 16.1, el recargo se calcula como sigue:

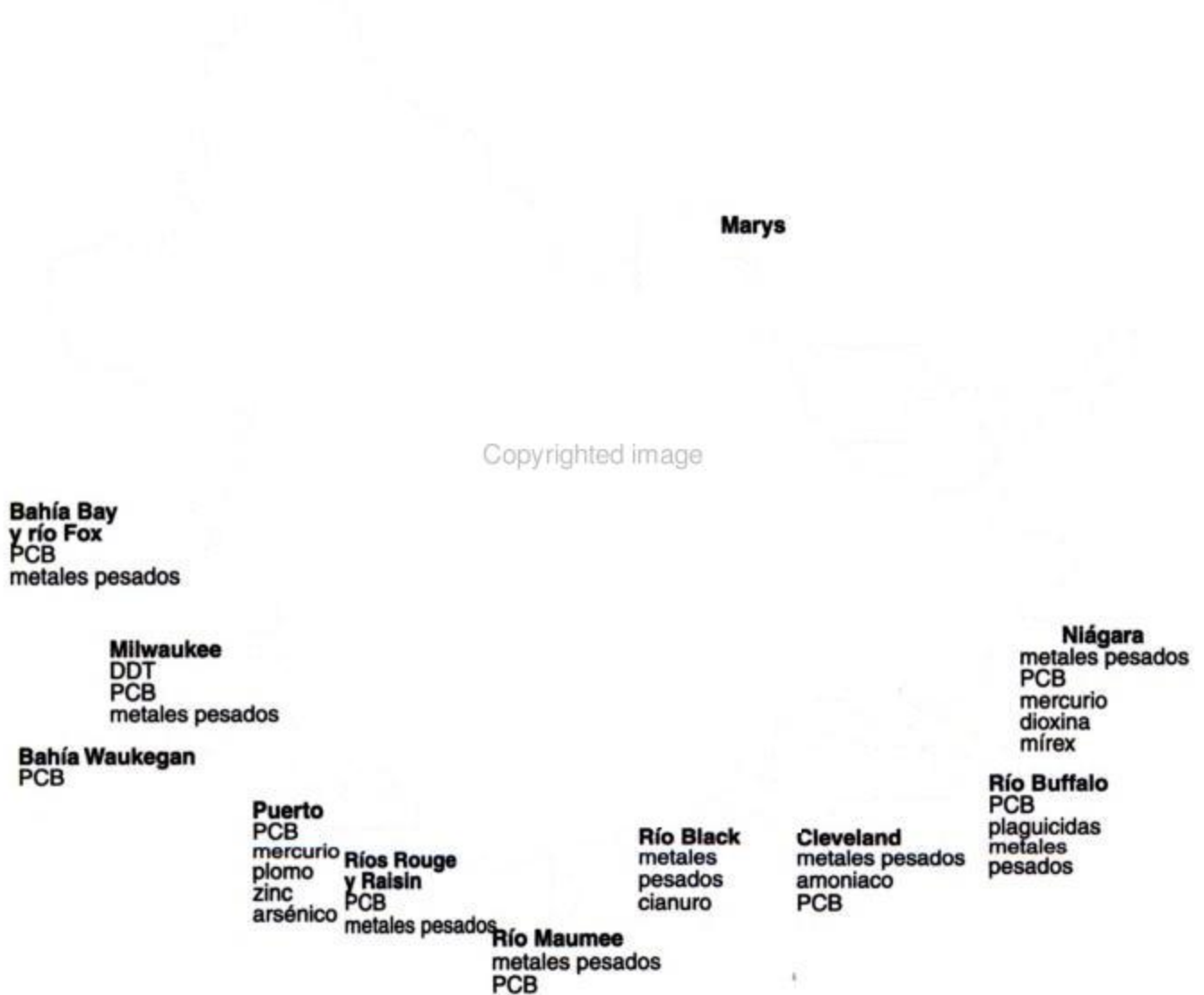
DBO <sub>5</sub> /año	185,420 kg
Evaluación	\$4,000,000
Factor de evaluación	0.02
DBO <sub>5</sub> permitida	$4,000,000 \times 0.02 = 80,000$ kg
DBO <sub>5</sub> en exceso/año	105,420 kg
Costo del tratamiento	\$0.25/kg de DBO <sub>5</sub> eliminada
Recargo	$105,420 \text{ kg} \times \$0.25 = \$26,355.00/\text{año}$

*Comentario:* La fórmula de evaluación/recargo evita el problema de un recargo sólo con base en la calidad, con lo cual el recargo se podría evitar por simple dilución de los residuos a una concentración inferior a la permitida en el estatuto para residuos industriales.

Otro método para determinar los cargos al contaminador ha sido sugerido por Dales (1968); el gobierno vendería "derechos" a cualquier parte interesada en contaminar el aire o agua durante un periodo de uno o más años. El gobierno podría entonces limitar la cantidad total de contaminantes descargados restringiendo el número de derechos o autorizaciones de descarga a la venta con base en la capacidad asimilativa del cuerpo receptor. Estas autorizaciones se comprarían y venderían en un mercado abierto, donde sus precios se determinarían con base en la dinámica normal del mercado. Las ventajas de un sistema de este tipo son: que es equitativo (en un sentido económico), que el gobierno puede controlar las cargas de contaminación totales (la calidad ambiental) sin preocuparse por permisos de descarga punto por punto, que los costos se internalizan para los contaminadores de una manera que ellos pueden controlar, y que el gobierno recibe ingresos. Cada contaminador tiene entonces la opción de determinar cuánto pagará en cargos al contaminador y cuánto por el abatimiento de la contaminación. En estas circunstancias, los costos reales de la contaminación se harían evidentes para los contaminadores y para la comunidad en conjunto, puesto que los precios de las autorizaciones de descarga no estarían fijados de manera arbitraria por el gobierno, sino que serían determinados por los mismos contaminadores. Las autorizaciones de descarga podrían ser adquiridas y también retenidas por grupos interesados en el ambiente, a fin de impedir el uso de estos derechos por parte de los contaminadores.

Este concepto se ha puesto en práctica en Estados Unidos, en donde el primer mercado de créditos por emisiones de SO<sub>2</sub> se abrió en el Chicago Board of Trade (Junta de comercio de Chicago) en 1993. Después de acordar el nivel general de emisiones de SO<sub>2</sub> para una región dada, los reguladores gubernamentales emitieron adjudicaciones a empresas individuales, las cuales pueden comerciar libremente con ellas en el mercado abierto. El plan consiste en reducir las adjudicaciones totales con el tiempo para de esta manera mejorar la calidad del aire ambiental. El atractivo de este sistema es su eficiencia económica. Los contaminadores con altos costos de abatimiento preferirán comprar permisos en vez de invertir en costosa tecnología para el control de la contaminación. Los contaminadores con costos de abatimiento bajos venderán permisos y se verán alentados a reducir aún más su contaminación a fin de vender una mayor proporción de sus créditos. Quienes critican el sistema se oponen a la idea de que los gobiernos vendan derechos de privilegio para contaminar el aire, lo cual es en realidad una forma de privatizar recursos que son de propiedad pública. Otros han expuesto inquietudes respecto a la complejidad de los esquemas de comercio y a que los gobiernos estén dispuestos a forzar a las industrias a renunciar a una parte de sus créditos cuando se reduzcan las adjudicaciones totales (Estrin y Swaigen, 1993).

Históricamente, los métodos más comúnmente utilizados por el gobierno para el control de la contaminación han sido la regulación directa (zonificación y estándares de efluentes) y los

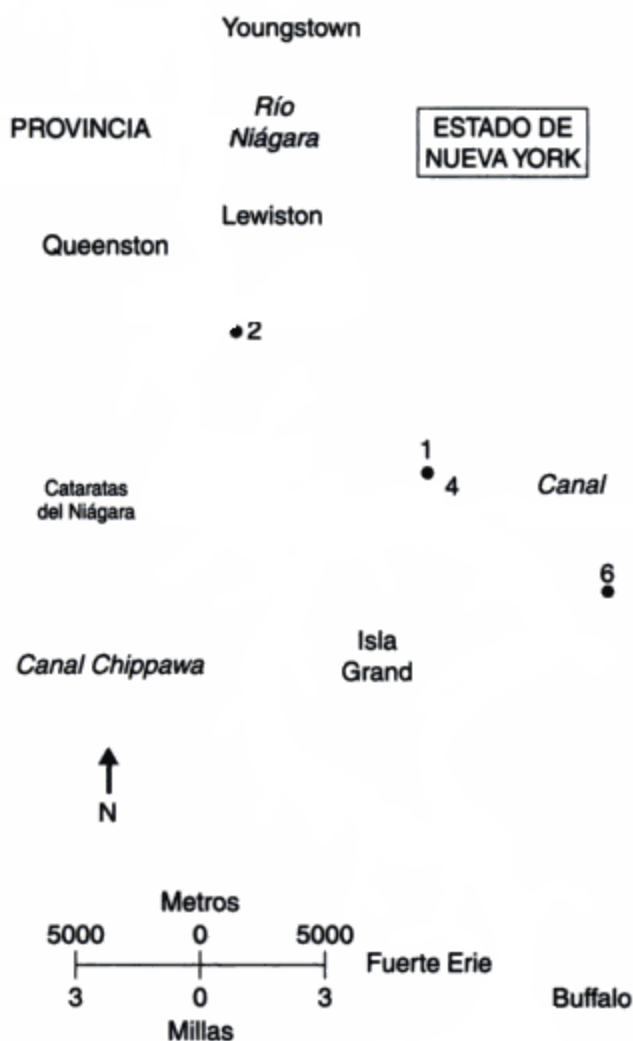


**Figura 16-2** Sustancias tóxicas en los Grandes Lagos. *Fuente:* Environment Canada, *Sweetwater Seas: The Legacy of the Great Lakes*. (Ontario: Ministry of the Environment).

es prácticamente imposible saber qué cantidad de determinada sustancia química es excesiva. Algunas sustancias son tan dañinas que una cantidad mínima podría causar graves enfermedades o incluso la muerte de humanos. El problema se complica por el hecho de que muchos compuestos químicos se acumulan en el cuerpo de los organismos que consumen sustancias que han sido contaminadas. Cuanto más arriba está una especie en la cadena alimenticia, más se amplifica el efecto. Puesto que los humanos ocupan el lugar más alto en la cadena, la condición que guarda el río Niágara es motivo de gran preocupación para los 5 millones de residentes del estado de Nueva York y de Ontario, quienes dependen del río o del lago Ontario como fuente de agua potable.

El río Niágara aporta de manera continua numerosos metales traza y compuestos orgánicos al lago Ontario a causa de la acumulación de estos contaminantes en los sedimentos del

lago Erie y del río Niágara, y por las descargas que se hacen en el río desde fuentes municipales e industriales, aunadas a los escapes de los terrenos destinados a la eliminación de residuos químicos. La figura 16-3 muestra la ubicación de las fuentes de residuos más importantes a lo largo del río. La zona del canal Love alcanzó notoriedad internacional durante la década de 1970, pero de algún modo es la única fuente de contaminantes. En total existen más de 300 predios para la eliminación de residuos peligrosos y que son fuentes potenciales de contaminantes para el río Niágara (sólo 5 de ellos están en Ontario), así como más de 100 descargas municipales e industriales de fuente puntual (23 en el lado de Ontario). Como ejemplos de las cantidades en juego, se estima que la carga diaria de contaminantes orgánicos prioritarios es alrededor de 400 kg de Nueva York y 10 kg de Ontario. Los fenoles totales que llegan de Nueva York y Ontario son alrededor de 350 y 12 kg, respectivamente, y los metales pesados suman 575 y 70 kg, respectivamente.



**Figura 16-3** Ubicación de los principales predios para la eliminación de residuos en el río Niágara. Fuente: Crabtree (1982).

- (1) Canal Love
- (2) Parque Hyde
- (3) Área S
- (4) Calle 102
- (5) Predios Alphabet
- (6) Propiedad Durez



tinados a residuos peligrosos y de sedimentos contaminados. En abril de 1993, 20 de los 24 predios más importantes estaban en proceso de limpieza, y se preveía que las cargas tóxicas procedentes de estos terrenos disminuirían de 315 kg/día en 1989 a 4 kg/día para 1996.

Como ya hemos mencionado, los esfuerzos de vigilancia continúan en ambos países. Es difícil cuantificar y controlar las cargas de fuentes no puntuales, por lo cual se necesitan programas rigurosos de vigilancia para evaluar, por ejemplo, la eficacia de la limpieza de predios con residuos peligrosos. Los Remedial Action Plans (RAP; Planes de acción rehabilitadora) para el río Niágara (uno estadounidense y otro canadiense) se encuentran en la etapa de establecimiento de opciones de rehabilitación y programas de limpieza. La coordinación de los múltiples organismos que intervienen en el NRTMP y en los RAP es tarea de enormes proporciones, pero en esta etapa es muy importante impedir una duplicación de los esfuerzos y asegurar la solución más rápida posible. Para esto, existen buenos argumentos a favor de que se amalgamen todas las iniciativas relacionadas con la rehabilitación del río Niágara en un solo programa amplio y más fácil de coordinar.

**Factores que influyen en las decisiones ambientales.** Las decisiones relacionadas con la protección o la limpieza del ambiente no se toman sólo con base en factores ambientales. Esto es válido en particular para el río Niágara. La naturaleza internacional de las situaciones agrega otro elemento a las diversas influencias que están presentes normalmente.

**Factores económicos.** La protección del río respecto a los productos de desecho actuales de la sociedad es en sí misma costosa; la corrección de errores pasados y prácticas perjudiciales incrementa en grado considerable ese costo. Al encarar esta realidad encontramos dos puntos de vista extremos. Por una parte, está el argumento de que, puesto que existen lagunas en nuestro conocimiento de los efectos de muchas sustancias químicas en la salud, su presencia en el ambiente se debe reducir a cero a cualquier costo. Por otro lado, se tiene el punto de vista de que, en virtud de que existe mucho desempleo, se debe dar prioridad a los empleos y a la inversión en industrias; cualquier gasto adicional destinado al ambiente deberá esperar hasta que la economía mejore.

Ninguno de los extremos es aceptable. Los riesgos ambientales son demasiado grandes para esperar un tiempo indefinido hasta que las condiciones económicas mejoren. Se han dado los pasos iniciales (como resultado de la preocupación por parte del público), pero, en virtud del tiempo de gestación que se requiere para establecer medidas de control y rehabilitación, se necesitan compromisos inmediatos con programas específicos. Por supuesto, las consideraciones prácticas (como costos y beneficios) son criterios importantes en el desarrollo de estos programas, ya sea que tengan como propósito vigilar (se debe examinar el número, la frecuencia, la ubicación y también los requisitos analíticos de las muestras) o poner en práctica medidas correctivas (se debe investigar una gama de opciones).

Los movimientos de la población tienen un impacto significativo en la fortaleza económica de una región. Durante la década de 1970 el estado de Nueva York experimentó una reducción del 3.8% en su población, como reflejo de una tendencia general de las personas en Estados Unidos a mudarse al sur, hacia un clima más cálido. La población de Buffalo decayó en un drástico 22.7% durante este periodo. Varias industrias del área cerraron, con pocas posibilidades de abrir de nuevo sus puertas en el futuro. De manera inevitable, esta situación afecta los programas ambientales y amplifica la necesidad de un enfoque firme, aunque equilibrado, hacia la limpieza del río.

**Factores sociales.** La marejada de información sobre cuestiones ambientales, proveniente de organismos gubernamentales, instituciones académicas y grupos de intereses espe-

ciales ha aumentado el grado de conciencia y el conocimiento del público en general acerca de las prácticas insatisfactorias para la eliminación de residuos. En consecuencia, se ejerce una presión continua en los gobiernos e industrias para que corrijan estos problemas. Esta presión, que en gran medida se aplica a través de los medios de comunicación sin recurrir a la ley y a sus reglamentos, ha sido muy eficaz porque ni las autoridades ni las industrias contaminantes desean ser objeto de la publicidad adversa.

Al mismo tiempo, existe una conciencia social creciente entre las industrias del área del Niágara, como en otras partes, la cual se manifiesta en el deseo de ser percibidas como si fueran ciudadanos corporativos responsables. Cuando se señalan infracciones a las limitaciones de las descargas, muchas compañías ponen remedio a la situación de manera voluntaria, sin necesidad de coerción por parte de las autoridades.

**Factores políticos.** Datos publicados en Estados Unidos y en Canadá indican que los contaminantes peligrosos están entrando al río Niágara desde el lado estadounidense y también desde el canadiense (en proporción de 90 y 10%, respectivamente). Por consiguiente, es necesario que exista no sólo voluntad política en ambos lados de la frontera, sino además un contacto estrecho entre los gobiernos y organismos correspondientes para que la limpieza del río sea eficaz.

Para Ontario, la ruta política ofrece dos alternativas. Una es el contacto directo entre el Ministro del Ambiente de Ontario y el Comisionado del Departamento de Conservación Ambiental del estado de Nueva York. Esta ruta ha sido utilizada (y se seguirá utilizando) para resolver problemas que están dentro de la jurisdicción del estado de Nueva York y de la provincia de Ontario (por ejemplo, permisos de descarga u órdenes de control, y la mayoría de los predios destinados a la eliminación de desechos).

La otra alternativa consiste en utilizar los canales diplomáticos establecidos por intermedio del Departamento Canadiense de Asuntos Externos y el Environment Canada con el Departamento de Estado y la EPA (Oficina de protección ambiental) de EUA. Ésta es la opción para cuestiones que pertenecen a la jurisdicción de la EPA, como los litigios federales de EUA respecto a ciertos predios para la eliminación de residuos, asignaciones del Superfund y la Clean Water Act (Ley para el agua limpia). Si es apropiado, el contacto directo entre el Ministro del Ambiente de Canadá y el administrador de la EPA de EUA puede ser parte del proceso.

Los canales diplomáticos también se han utilizado para tratar de establecer arreglos de acceso a la información técnica sobre predios de eliminación de residuos sujetos a litigio, y para que cada país tenga un impacto en las decisiones que conciernen a medidas de limpieza. A la luz de la confidencialidad que por necesidad envuelve a una causa judicial, de tener éxito estos medios diplomáticos se habrá alcanzado un cambio importante en los procedimientos.

**Factores jurídicos.** En Estados Unidos existe una mayor tendencia que en Canadá a recurrir a los tribunales para resolver problemas ambientales. El enfoque de confrontación de EUA suele dar por resultado demoras de años. El punto de vista en Canadá es que, en virtud de que el río Niágara es una vía fluvial sujeta a un tratado internacional, se deben aplicar medidas especiales; no se debe permitir que los procedimientos legislativos internos normales de uno u otro país se interpongan en el camino de los medios más rápidos posibles para eliminar las fuentes de contaminación.

Cualquiera que sea el enfoque que se adopte, Canadá y Estados Unidos tendrán que estar familiarizados con los procesos jurídicos de cada uno, en relación con las cuestiones ambientales, para que se produzca una interacción de mutuos beneficios.

## 16.5 ÉTICA AMBIENTAL

### 16.5.1 La ética en la sociedad

¿Qué tan generalizada está la corrupción, la codicia y la deshonestidad en el mundo “civilizado” de nuestros días? Unos cuantos ejemplos en diferentes segmentos de la sociedad ponen de manifiesto el lado poco ético de la naturaleza humana.

**Político.** El programa de la cadena televisiva CBS “60 Minutes” informó (2 de mayo de 1994) que los últimos cinco alcaldes de Chelsea, Massachusetts, una ciudad de 28,000 habitantes, habían sido acusados por corrupción y que tres de ellos cumplían condenas en prisión. En un comentario sobre el comportamiento político, Chuck Shepherd señaló que el alcalde Spencer Schlosnagle de Friendsville, Maryland, había recuperado su cargo en 1994 a pesar de que había sido encontrado culpable del delito de exhibicionismo una semana antes y tenía cuatro cargos similares pendientes. En la misma columna también se mencionó que George Hohman, un ex senador del estado, quien aún debía \$9,000 de la multa de \$20,000 que le fue impuesta cuando fue convicto por cohecho en 1991, estaba conteniendo de nuevo para el senado de Alaska porque, como él mismo dijo, “era la única forma que conocía de conseguir el dinero suficiente para terminar de pagar la multa” (Shepherd, 1994).

**Jurídico.** En una columna del *Orlando Sentinel*, Mike Royko (1994) describía a Chicago como “una ciudad donde la corrupción judicial se considera un deporte local. Los jueces aceptan dinero por arreglar juicios de homicidio, muertes por conducir en estado de ebriedad y prácticamente cualquier cosa que amerite el precio de un crucero de lujo”. Tampoco los abogados están por encima de las prácticas no éticas. En Raleigh, Carolina del Norte, el abogado especializado en bancarrotas Mark Kirby fue enjuiciado por el delito de fraude federal (Shepherd, 1994). De acuerdo con un fiscal, cuando Kirby trabajaba para el despacho de abogados Brown, Kirby & Bunch en 1990 y 1991, cobraba a sus clientes un promedio de 1,200 horas al mes (un mes de 31 días de 24 horas cada uno tiene sólo 744 horas).

**Negocios.** En Gran Bretaña, como en muchos otros países, la idea de que los negocios deben ser éticos no goza de amplia aceptación. Una encuesta aplicada por la Universidad de Westminster a 645 gentes de negocios del Reino Unido mostró que, si bien casi todos los que respondieron estaban conscientes de la ética en los negocios, muchos dijeron que antepondrían las utilidades a la ética. La filósofa Jennifer Jackson, directora del Centro de Ética Profesional y de Negocios de la Universidad de Leeds, dice que “la ética en los negocios sigue siendo una broma para muchas personas que suponen que los negocios no pueden ser éticos” (*Globe and Mail* de Toronto, 1993).

**Ingeniería.** Para conseguir obras de carreteras, Allan Kammerer, un directivo de una empresa de ingeniería que luchaba por sobrevivir, pagó \$100,000 en sobornos al ingeniero del condado. Como consecuencia de una investigación del Departamento de Obras Públicas del condado por el Procurador General, al ingeniero se le impuso una multa y una sentencia de cinco años de prisión por fraude. La American Society of Civil Engineers (ASCE; Sociedad americana de ingenieros civiles) prohibió al consultor el ejercicio de su profesión durante un año, hecho que arruinó su vida personal y el número de sus empleados se vio reducido de 30 a solamente 4 (Andrews y Kemper 1992).

- En ciertas aldeas agrícolas del Cáucaso, donde se cultivaba arroz con un uso intensivo de plaguicidas, el cáncer es la única causa de muerte.
- En 1991, el 52% de los reclutas potenciales para el ejército Soviético carecían de aptitud física, mental o de otro tipo para el servicio.
- En Magnitogorsk, donde el complejo acerero más grande del mundo emite 870,000 toneladas de contaminantes al aire cada año, el 34% de los adultos y el 67% de los niños de 14 años o menos padecen enfermedades respiratorias.

Ningún país ha escapado a los desastres ambientales causados por humanos. Unos cuantos ejemplos de diferentes países ilustran este punto. Si lo desea, el lector puede agregar sus propias historias de horror a esta breve lista.

Estados Unidos	El derrame acuático de petróleo más grande del mundo: 240,000 barriles (Exxon Valdes, 1989)
Rusia	El derrame terrestre de petróleo más grande del mundo: más de un millón de barriles (Komi: tubería, 1994)
Canadá	Pérdida de la pesca de bacalao en la costa oriental (prohibición federal, 1992)
Ucrania	El peor desastre nuclear del mundo (Chernobyl, 1988)
Rusia	Devastación del mar de Aral de agua dulce por prácticas de irrigación ineptas; se extinguieron 24 especies endémicas de peces
Europa	Contaminación industrial irrestricta de la Europa central y la oriental durante 50 años
La India	El peor accidente industrial del mundo (Bhopal, 1988)
México	La peor contaminación atmosférica del mundo (Ciudad de México, 1994)

### 16.5.3 Responsabilidad por la degradación ambiental

¿Por qué ha tolerado e incluso alentado la sociedad una industrialización y desarrollo sin trabas que ha traído consigo el calentamiento global, la lluvia ácida (véase el capítulo 5) y otros tipos de degradación ambiental? La culpa, por lo común, recae en la religión, el gobierno y la tecnología. Los argumentos son más o menos los siguientes:

- *Religión.* Las religiones judeocristianas han enseñado que Dios dio a los humanos el dominio sobre toda la Tierra, y la doma de la naturaleza y la explotación de los recursos han sido consideradas como actividades éticas por la mayor parte de la sociedad.
- *Gobierno.* En un sistema capitalista, el interés por uno mismo (e incluso la codicia) se consideran como virtudes que alientan la competencia, la cual reduce el costo de los bienes y servicios y crea más producción, la que a su vez trae consigo más empleos, los cuales significan más poder adquisitivo; de esta manera, la rueda que se ha echado a andar gana ímpetu y fuerza. La economía prospera pero el ambiente sufre las consecuencias.
- *Tecnología.* Los avances de la ciencia han hecho posible nuestro elevado nivel de desarrollo. (No obstante, han creado residuos que el entorno no puede asimilar.)

¿En realidad podemos culpar a las instituciones así como a la religión y al gobierno, u ocultarnos detrás de palabras como *la tecnología*? Casi todas las religiones implican el concepto de reverencia a la naturaleza. Estos importantes principios, bien entendidos y practicados,

3. *Ética "con base en deberes"* (Immanuel Kant, 1724-1804). Toda persona tiene el deber de actuar de un modo tal que sea universalmente aceptable para todos, sin excepción. (De esta manera todos seríamos honestos, bondadosos, generosos y pacíficos.)

*Problema:* La aplicación universal de una regla puede ser perjudicial.

4. *Ética "utilitaria"* (John Stuart Mill, 1806-1873). La mejor opción es la que produce el beneficio máximo para el mayor número de personas (lo cual pondría en peligro los derechos de las minorías).

*Problema:* La cuantificación de los beneficios puede ser difícil.

Ninguna de las cuatro teorías es aplicable a todas las situaciones, pero cada una puede contribuir de alguna forma a la resolución de los problemas éticos. Una solución propuesta es probablemente razonable si está de acuerdo con tres de las cuatro teorías. En los casos donde este enfoque no es útil, se debe hacer un juicio de valor respecto a cuál de las teorías es la más apropiada. La elección debe ser tal que evite cualquier conflicto de interés y no atribuya beneficios a quien toma la decisión.

**Códigos de ética.** Casi todos los organismos profesionales han elaborado *códigos de ética* para sus miembros como una guía de comportamiento moral. En el caso de los ingenieros, todos los códigos de ética incluyen principios generales y además instrucciones de conducta específica en relación con los deberes del ingeniero hacia la sociedad, patrones, clientes, colegas, subordinados, la profesión y hacia ellos mismos. De lo que no se ocupan es del ambiente. Rara vez, si acaso se menciona, y aún así sólo de manera informal.

En las *ASCE Guidelines to Practice Under the Fundamental Canons of Ethics* (ASCE, 1994) hay una sola referencia [Item (f) Canon 1] respecto a que "los ingenieros *deberían* estar comprometidos con el mejoramiento del ambiente para intensificar la calidad de la vida". El uso de la palabra "deberían" en vez del obligatorio "deben" debilita una afirmación ya de por sí endeble. Los códigos de ética para la profesión de ingeniería en la mayoría de los estados y provincias no incluye siquiera la palabra *ambiente*. Es evidente que es necesario complementar o actualizar estos códigos para exigir, como mínimo, que la protección ambiental y el desarrollo sustentable se tomen en consideración en todos los proyectos, desde alcantarillas hasta vehículos espaciales.

### 16.5.5 Resolución de problemas éticos

Los problemas éticos pueden incluir desde dilemas morales que amenazan la vida hasta decisiones éticas sencillas. Con frecuencia los líderes en tiempo de guerra han encarado dilemas morales; por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial, en virtud de que Gran Bretaña había conseguido descifrar en secreto el código que los alemanes empleaban para enviar sus mensajes, Winston Churchill, el Primer Ministro británico, supo del plan alemán para destruir la ciudad inglesa de Coventry por medio de un ataque aéreo masivo. Alertar a la ciudad o tomar medidas de protección habría revelado a los alemanes que su código había sido interpretado. Al guardar silencio Churchill sacrificó muchas vidas inglesas, pero más tarde pudo utilizar el código para engañar a los alemanes respecto a dónde se estaba llevando a cabo la invasión aliada de Europa, con lo cual se aseguró el éxito de la invasión al mismo tiempo que se redujo al mínimo el número de bajas.

Las decisiones éticas en los problemas ambientales también pueden presentar dilemas morales. El uso del cloro es un buen ejemplo de una decisión que afecta la vida de las perso-

- Ponerse en práctica en forma rápida e inequívoca
- Apegarse a las leyes, los códigos de ética y una o más de las teorías éticas apropiadas
- Ser vista como moralmente correcta y no crear un conflicto de intereses
- Ser seguida y modificada según lo requieran las circunstancias desde su inicio hasta su conclusión

**Aplicación de la técnica.** Es preciso admitir que el procedimiento que hemos descrito para tratar con los problemas éticos es muy superficial. Se trata simplemente de un intento por elaborar un sistema lógico y evolutivo para sintetizar información y llegar a una conclusión razonable. Examinemos la prohibición del cloro para la desinfección de abastos de agua como una situación donde se podría aplicar la técnica.

Los ambientalistas afirman que la desinfección del agua con cloro produce compuestos carcinógenos que ponen en peligro la salud pública. La industria del agua sostiene que el cloro es un desinfectante económico seguro y que es superior a cualquier otra alternativa. Quizá la técnica de tres etapas pueda aclarar un poco la situación.

1. *Defina el problema.* La pregunta “¿se debería prohibir el cloro y reemplazarlo por otros métodos de desinfección?” es clara, y su objetivo es proteger más la salud pública. Para determinar cuál es el mejor camino a seguir se necesita información acerca de cada método:
  - Eficacia y grado de uso para sistemas de abastecimiento y distribución de agua
  - Problemas en la manufactura, transporte y aplicación
  - Formación de subproductos, prevención o eliminación de los mismos
  - Costo
2. *Considere las opciones.* Se deben examinar todas las alternativas posibles de la cloración, como derivados del cloro, otros halógenos, diversos agentes oxidantes ( $O_3$ ,  $H_2O_2$ , etc.), así como la luz ultravioleta (UV) y los filtros de membrana. Una comparación del rendimiento y el historial pondría de manifiesto, por ejemplo, que:
  - Ninguna alternativa (excepto el cloro y sus derivados) puede proporcionar un remanente para el sistema de distribución
  - El cloro es un gas tóxico, cuyo transporte a granel es peligroso, lo mismo que su uso
  - Los efectos de los subproductos de algunos desinfectantes alternativos en la salud no se conocen
  - El cloro no forma compuestos carcinógenos cuando el agua no contiene precursores orgánicos
  - Los costos de los otros desinfectantes son de un 50 a 250% mayores que los del cloro. Con base en la información es evidente que el cloro no es el mejor desinfectante si el agua contiene precursores orgánicos o incluso si la seguridad es un problema
3. *Tome una decisión.* Ni el uso irrestricto del cloro ni una prohibición total proporcionan una solución satisfactoria. Una matriz de toma de decisiones (tabla 16-1), aunque no es necesaria en este caso, demuestra que un compromiso que proporciona la máxima protección de la salud pública es la mejor solución. Una prohibición parcial satisface al menos tres de las cuatro teorías éticas, lo cual sugiere que la solución es razonable. No obstante,

puede haber circunstancias atenuantes no consideradas en este ejemplo tan simplificado que modifiquen el objetivo de la solución. La falta de fondos es una restricción obvia. Aunque no siempre existe una solución plenamente satisfactoria a un problema ético, una decisión tomada con una base racional se puede defender al menos con la conciencia tranquila.

**TABLA 16-1** CONSECUENCIAS DE LA PROHIBICIÓN DEL CLORO COMO DESINFECTANTE

Tipo de prohibición	Prohibición total	Sin prohibición	Prohibición parcial
Desinfectante	Alternativa del cloro	Cloro	Cloro o alternativa
Ventajas	Riesgo de fugas o derrames de cloro, se eliminan los compuestos orgánicos clorados	Desinfectante económico y eficaz ampliamente utilizado durante 70 años Proporciona desinfectante residual en el sistema de distribución	La alternativa reduce los riesgos cuando: El agua contiene sustancias orgánicas El transporte o uso seguro del cloro es motivo de preocupación
Desventajas	Ausencia de desinfectante residual en la cañería del acueducto Se desconocen los efectos en la salud de ciertos subproductos Mayor costo	Potencial de fugas y derrames Riesgo de formación de carcinógenos cuando el cloro se combina con ciertas sustancias orgánicas	La alternativa: No deja remanente Tiene efectos desconocidos en la salud Tiene un costo más alto

Las características particulares de los diversos desinfectantes no se toman en cuenta en la tabla 16-1. En la práctica, se haría una comparación entre dos desinfectantes con respecto a microorganismos específicos (bacterias, virus, protozoarios) con base en la calidad del agua que se requiere (para uso doméstico, hospitales, industria de bebidas, etc.). Por ejemplo, el cloro no es eficaz contra *Cryptosporidium*, las cloraminas dañan las máquinas de diálisis, y la luz UV es ineficaz cuando el agua es turbia.

### 16.5.6 Actitudes cambiantes

La actitud del público hacia el planeta Tierra parece estar cambiando en tres etapas que se superponen: de una etapa de *dominación* se ha ido a una *gerencial* o de *administración* (*mayordomía*) y, por último, hacia un mayor respeto o *reverencia* por el ambiente natural. La preocupación pública ha obligado a los políticos y legisladores a reconocer esta tendencia y también ha impulsado a ciertas asociaciones de científicos e ingenieros a adoptar pautas para la protección ambiental y el desarrollo sostenido.

**Dominación.** Durante la mayor parte del siglo XX, la sociedad consideró el ambiente como algo por conquistar. Este punto de vista estaba apoyado por la creencia islámica, judaica y cristiana de que los humanos, creados a imagen de Dios, están destinados a tener dominio sobre todas las demás criaturas y sobre el aire, el agua y la tierra que los rodea. Esta actitud fomentó la explotación y contribuyó así de manera indirecta a muchos de nuestros problemas ambientales.

**Gerencial.** Estas mismas religiones también encarnaban el concepto gerencial o de mayordomía, el cual demandaba a sus seguidores la administración y protección de la Tierra para beneficio de todos. Sin embargo, no fue sino hasta que las consecuencias de las perturbaciones ambientales y los recursos menguantes se hicieron evidentes que la sociedad comenzó a considerar con seriedad la mayordomía y la necesidad de conservar los recursos. El cambio de énfasis, aunque importante, conservaba todavía a los humanos en un papel de dominación, aunque estableció las raíces del desarrollo sostenido.

**Reverencia.** Más que “mayordomos” o “administradores”, los taoístas se consideran “amigos” del ambiente, al cual tratan con reverencia. Sus enseñanzas destacan la necesidad de vivir en equilibrio con el mundo natural. Otras religiones van aún más lejos. Los budistas y los hindúes, por ejemplo, piensan que los humanos son simplemente una parte de un sistema natural y que todos los componentes de nuestro mundo, vivos o inanimados, son interdependientes.

**Presión del público.** Es indudable que una población en crecimiento permanente no puede continuar explotando los recursos del planeta como ha ocurrido a lo largo de la historia. Ya no podemos seguir viendo los bosques vírgenes como cultivos comerciales para suministrar madera, ni los peces como una provisión ilimitada de alimento que se puede cosechar libremente, ni el suelo como un medio que se puede fertilizar en exceso para producir más cultivos. Hay signos alentadores de que las protestas vociferantes del público y de los grupos defensores han forzado a los políticos y a los gobiernos a tomar medidas positivas para proteger y sustentar el entorno y para defender a los ciudadanos que informan de comportamientos ambientales poco éticos.

En el verano de 1994 el presidente Carlos Roberto Reina de Honduras ordenó una prohibición temporal de toda la explotación maderera porque los muchos años en los que se derribó sin medida la selva tropical húmeda habían comenzado a modificar el clima del país (Newman, 1994). En Leichhardt, un municipio del núcleo interno de la ciudad de Sidney, Australia, los residentes eligieron en 1994 un alcalde que propugnaba una plataforma “verde”. El consejo ha aprobado leyes que hacen obligatoria la calefacción solar en todos los edificios nuevos y se propone prohibir todo uso de maderas de selva tropical húmeda (Suzuki, 1994). Desde 1981, cuando Michigan se convirtió en la primera jurisdicción de Estados Unidos y Canadá en promulgar una “Whistleblowers Protection Act” (Ley de protección a los denunciantes), otros gobiernos han introducido leyes similares. Los denunciantes son empleados que informan respecto a las conductas ilegales, peligrosas o poco éticas en una organización, por lo general después de un intento fallido por conseguir que la situación se corrija internamente. La ley protege a estos empleados contra el despido o discriminación por parte de la compañía.

**Respuesta de los profesionistas.** Prácticamente todo lo que se construye, desarrolla o manufactura afecta al ambiente en algún grado; sin embargo, y a excepción de la legislación destinada a proteger el bienestar público, a los profesionistas que participan en estas actividades no se les ha exigido considerar las cuestiones ambientales.

En los primeros años de la década de 1990 la Institution of Engineers de Australia se convirtió en una de las primeras asociaciones en corregir esta deficiencia. Para hacer a los ingenieros más conscientes de sus responsabilidades ambientales, la institución complementó su Código de Conducta y su Código de Ética con “Principios ambientales”. Los ingenieros de Alberta y Ontario siguieron su ejemplo, y otras instituciones han implementado medidas simi-



alidad se desarrolla en una etapa temprana de la vida. Esto significa que los primeros años de la niñez, cuando la familia es todavía la influencia principal, son determinantes para establecer normas morales apropiadas. Tenemos la obligación de enseñar a los jóvenes, con el ejemplo si es posible, acerca de los problemas éticos que habrán de encontrar en la vida y las responsabilidades que deberán aceptar por sus acciones. Ellos no necesitan ser individuos implacables, agresivos, competitivos y motivados por las ganancias para triunfar. De hecho, el matemático Anatol Rapoport, director del Instituto de Estudios Avanzados de Viena y ex profesor de la University of Michigan, sostiene que cooperar, compartir y seguir la regla de oro son actitudes que permiten alcanzar el éxito en la vida. La noción de que la vida es un juego en el que la suma es igual a cero (por cada ganador debe haber un perdedor) es falsa, afirma Rapoport. La vida es un juego de motivos mixtos en el cual existen coincidencias y diferencias parciales entre los intereses de las personas. Su concepto se ilustra por medio de un juego sencillo llamado "El dilema del prisionero", en el cual los jugadores, para obtener lo que desean, deben cooperar. Los jugadores deben confiar siempre unos en otros y estar dispuestos a compartir las recompensas. El principio demuestra una lección moral importante que es aplicable a la vida en muchas áreas, desde la capacitación que proporcionan los padres hasta el libre comercio y la protección ambiental.

En su histórico discurso ante una sesión conjunta del Congreso de EUA del 21 de febrero de 1990, Vaclav Havel (presidente de Checoslovaquia en esa época) afirmó lo siguiente: "Todavía no sabemos cómo poner la moralidad por delante de la política, la ciencia y la economía. Continuamos destruyendo el planeta y el ambiente que nos han sido confiados. Cerramos todavía los ojos a los crecientes conflictos sociales, étnicos y culturales del mundo". Havel hizo un llamado a una revolución en la forma de pensar y actuar de las personas para evitar la catástrofe ecológica, social o demográfica hacia la cual se dirige el mundo, y propuso la creación de lo que el presidente Lincoln llamó *La familia del hombre*, para después afirmar lo siguiente (*Life*, 1991, vol. 14, núm. 1):

"La salvación de este mundo humano no está sino en el corazón humano, en el poder humano para reflexionar, en la mansedumbre humana y en la responsabilidad humana."

El desafío de Havel va más allá del de la mayordomía; es afín al concepto espiritual común a los rituales y a las religiones de los hindúes, los budistas y muchos pueblos primitivos y aborígenes, entre ellos los indios estadounidenses. La idea de que los humanos somos sólo una parte de un mundo natural integrado fue descrita de manera sucinta en 1854 por el jefe Seattle de la tribu Squamish cuando escribió al presidente Franklin Pierce para abogar por un mejor trato para los pueblos indios y el ambiente:

"Enseña a tus hijos lo que hemos enseñado a los nuestros: que la tierra es su madre. Todo lo que le sucede a la tierra le sucede a los hijos de la tierra. Si ellos escupen en el suelo escupen en sí mismos. Las personas no tejieron la red de la vida, son sólo hilos de ella. Todo lo que hagan a la red lo hacen a sí mismos." (Ponting, 1993.)

Los valores centrados en la creación de los pueblos nativos del jefe Seattle contrastan notoriamente con las prácticas del mundo moderno, en el cual hemos sojuzgado a la naturaleza talando selvas tropicales húmedas, cultivando en exceso la tierra y eliminando con descuido los residuos. Es indudable que los científicos del ambiente y los ingenieros pueden hacer una contribución valiosa para prevenir y corregir estos errores.

munidad para aportar un liderazgo constructivo a las organizaciones locales y grupos de interés público en la búsqueda de una comprensión de las necesidades, las alternativas de acción disponibles y las respuestas finales. Lamentablemente, muchas de estas personas bien preparadas se muestran renuentes a manifestar en público sus puntos de vista y a ofrecer su ayuda. Como suele ocurrir, el liderazgo público proviene de abogados y otros profesionistas. Ciertos científicos e ingenieros han expresado su preocupación acerca de un posible conflicto de interés con sus empleos, los cuales pueden tener relación con los residuos, el manejo de ellos o una compañía que está contribuyendo de forma directa o indirecta al problema. ¿Tienen los científicos e ingenieros la obligación ética de "intervenir"? ¿Cómo sugiere usted que manejen esta situación quienes puedan tener un aparente conflicto de intereses (PEO, 1992)?

## REFERENCIAS

- ANDREWS, G. C. y KEMPER, J. D. *Canadian Professional Engineering Practice and Ethics*. Toronto: Holt, Rinehart and Winston, 1992.
- ASCE. *Guidelines to Practice Under the Fundamental Canons of Ethics*. Nueva York: American Society of Civil Engineers, 1994.
- BEANLANDS, G. E. y DUINKER, P. N. *An Ecological Framework for Environmental Impact Assessment in Canada*. Halifax, Nueva Escocia: Dalhousie University, Institute for Resource and Environmental Studies, 1983.
- CANTER, L. W. *Environmental Impact Assessment*. Nueva York: McGraw-Hill, 1977.
- CLARK, W. C. y MUNN, R. E. *Sustainable Development of the Biosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- CONWAY, G. R. y O'CONNELL, P. E. *The Analysis of the Environmental Component of Water Resource Management Projects*. Londres: University of London, Imperial College Centre for Environmental Technology, 1978.
- CRABTREE, P. "Niagara River—An International Challenge". Trabajo presentado en el Seminario del Ministerio del Ambiente de Ontario, Toronto, 3 de noviembre de 1982.
- DALES, J. H. *Pollution, Property and Prices*, Toronto: University of Toronto Press, 1968.
- ENVIRONMENT CANADA y ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. *Sweetwater Seas, The Legacy of the Great Lakes*. Ottawa: Environment Canada, Ministry of the Environment.
- ESTRIN, D. y SWAIGEN, J. *Environment on Trial: A Guide to Ontario Environmental Policy*. Toronto: Emond Montgomery Publications, 1993.
- FESHBACH, M. y FRIENDLY, A., Jr. *Ecocide in the USSR*. Nueva York: Basic Books, 1992.
- GABOV, T. *Everybody Does It*. Toronto, University of Toronto Press, 1994.
- The Globe and Mail, Toronto*, 15 de marzo de 1993.
- GRIMA, A. P., TIMMERMAN, P., FOWLE, C. D. y BYER, P. *Risk Management and EIA: Research Needs and Opportunities*. Ottawa: Environment Canada, CEARC/FEARO, 1986.
- HOLLING, C. S. (ed.). *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Toronto: Wiley, 1978.
- KAY, J. J. "A Nonequilibrium Thermodynamic Framework for Discussing Ecosystem Integrity". *Environmental Management*. 15 (1991): 483-495.
- LEOPOLD, L. B., CLARKE, F. E., HANSHAW, B. B. y BALSEY, J. R. "A Procedure for Evaluating Environmental Impact. *U.S. Geological Survey Circular 645*. Washington, D.C.: Government Printing Office, 1971.

# APÉNDICE A

---

## Símbolos, dimensiones y unidades

Un **símbolo** es una designación específica, como una letra o una abreviatura, elegida para representar cierto objeto o concepto. Por ejemplo, la letra **d** puede servir para designar el **diámetro**, **A** para el **área** y **V** para el **volumen**.

**Dimensión** es un término que se aplica a las tres unidades básicas, masa [M], longitud [L] y tiempo [t] en las cuales se pueden expresar todas las unidades físicas. En ciertos casos la temperatura [T] y la cantidad de sustancia [mol] también se incluyen como dimensiones básicas. Por ejemplo, la magnitud de los conceptos mencionados en el primer párrafo son:  $d$  (diámetro) = [L],  $A$  (área) = [L<sup>2</sup>] y  $V$  (volumen) = [L<sup>3</sup>]. El símbolo = [·] significa "tiene dimensiones de". No importa cuál sea el sistema de unidades que se utilice (el SI, el de ingeniería estadounidense, el británico o el métrico), las dimensiones de cada lado de una ecuación completa deben ser las mismas. Por consiguiente, es muy útil indicar las dimensiones de cada término en los problemas de ingeniería para asegurar que cada concepto tenga las dimensiones correctas.

Las **unidades** son estándares o patrones específicos de medición dentro de un sistema determinado, como el *Système International d'Unités (SI)* o el *American Engineering System (AES)*. Por ejemplo, los conceptos antes mencionados podrían tener las unidades siguientes:

Concepto	Unidades SI	Unidades AES
Diámetro, $d$	Metro (m)	Pies (ft)
Área, $A$	Metro cuadrado (m <sup>2</sup> )	Pies cuadrados (ft <sup>2</sup> )
Volumen, $V$	Metro cúbico (m <sup>3</sup> )	Pies cúbicos (ft <sup>3</sup> )

Es muy importante ser congruente en el uso de símbolos y unidades. Incluso dentro de una misma disciplina pueden ocurrir grandes incongruencias que causan malentendidos y con-

TABLA A-1.1 UNIDADES SI BASE Y COMPLEMENTARIAS CON UNIDADES EQUIVALENTES EN EL AES

Cantidad	Símbolo de la cantidad	SI		AES	
		Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad	Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad
Unidades básicas					
Longitud	L	metro	m	pie	ft
Masa	M	kilogramo	kg	libra masa <sup>a</sup>	lb <sub>m</sub>
Tiempo	t	segundo	s	segundo	s
Corriente eléctrica	I	ampere	A	ampere	A
Temperatura					
termodinámica	T	kelvin	K	Rankin (Fahrenheit)	°R (°F)
Cantidad de sustancia	ℳ	mol	mol	mol	mol
Intensidad luminosa		candela	cad	pie-candelas	ft-candelas
Unidades complementarias					
Ángulo plano		radián	rad	grados	°
Ángulo sólido		esterradián	sr	grados	°

<sup>a</sup>Distinta de la libra fuerza (lb<sub>f</sub>) como unidad de fuerza.

Una característica adicional que tipifica el enfoque de bloques de construcción del sistema SI es que se ha adoptado un conjunto de 16 prefijos para formar múltiplos y submúltiplos de cualquier unidad base o derivada. De esta manera, las unidades se pueden cambiar de medidas muy pequeñas a muy grandes por medio de los prefijos. Los prefijos SI, junto con sus símbolos, aparecen en la tabla A-1.3. Los siguientes son algunos ejemplos comunes:

Un centésimo de metro ( $10^{-2}$  m) = 1 centímetro (cm)

Mil metros ( $10^3$  m) = 1 kilómetro (km)

Un milésimo de gramo ( $10^{-3}$  g) = 1 miligramo (mg)

Un millonésimo de gramo ( $10^{-6}$  g) = 1 microgramo (μg)

Un millonésimo de metro ( $10^{-6}$  m) = 1 micrómetro (μm) [antes 1 micra (μ)]

Existe cierto número de unidades que no son parte del sistema SI, pero a causa de su uso generalizado, sería poco práctico desecharlas. Varias de ellas se muestran en la tabla A-1.4. Algunos comentarios adicionales sobre las unidades en esta tabla pueden ser de utilidad.

**Peso contra masa.** En el sistema SI el término *masa* se emplea para especificar la cantidad de materia que un objeto *contiene*, en tanto que el término *peso* denota la fuerza gravitatoria que actúa *en* un objeto material. Por consiguiente, la masa de un objeto es independiente de su ubicación; por el contrario, el peso (o fuerza) puede cambiar con la ubicación.

La unidad de masa es el kilogramo (kg), y la unidad en la cual se mide el peso o la fuerza es el newton (N). Un N es igual a  $1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$  y, cuantitativamente, el peso o fuerza de un objeto

TABLA A-1.2 SELECCIÓN DE UNIDADES SI DERIVADAS

Cantidad				Unidades SI		
Nombre	Símbolo	Dimensión	Nombre de la unidad	Símbolo	Expresión en términos de otras unidades SI (en su caso)	
Área	$A$	$L^2$	Metro cuadrado	$m^2$		
Volumen	$V$	$L^3$	Metro cúbico	$m^3$		
Velocidad	$u$	$L/t$	Metro por segundo	$m/s$		
Aceleración	$a$	$L/t^2$	Metro por segundo al cuadrado	$m/s^2$		
Fuerza	$F$	$M/t^2$	Newton	$N$	$kg \cdot m/s^2$	
Presión	$P$	$M/Lt^2$	Pascal	$Pa$	$N/m^2 = kg/m \cdot s^2$	
Trabajo, energía, calor	—	$M L^2/t^2$	Joule	$J$	$N \cdot m = kg \cdot m^2/s^2$	
Potencia	$P$	$M L^2/t^3$	Watt (joule por segundo)	$W$	$J/s = kg \cdot m^2/s^3$	
Densidad	$\rho$	$M/L^3$	Kilogramo por metro cúbico	$kg/m^3$		
Volumen específico	$1/\rho$	$L^3/M$	Metro cúbico por kilogramo	$m^3/kg$		
Concentración (de cantidad de sustancia)	$C$	$mol/L^3$	Mol por metro cúbico	$mol/m^3$		
Gasto	$Q$	$L^3/t$	Metro cúbico por segundo	$m^3/s$		
Viscosidad dinámica (absoluta)	$\mu$	$M/Lt$	Pascal segundo	$Pa \cdot s$	$kg/m \cdot s$	
Viscosidad cinemática	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	$L^2/t$	Metro al cuadrado por segundo	$m^2/s$		
Tensión superficial	—	$M/t^2$	Newton por metro	$N/m$	$kg/s^2$	
Capacidad calorífica	—	$M L^2/t^2 T$	Joule por kelvin	$J/K$	$kg \cdot m^3/s^2 \cdot K$	
Capacidad calorífica específica	—	$L^2/t^2 T$	Joule por kilogramo kelvin	$J/(kg \cdot K)$	$m^2/s^2 \cdot K$	
Energía específica (entalpía)	—	$L^2/t^2$	Joule por kilogramo	$J/kg$	$m^2/s^2 \cdot kg$	
Conductividad térmica	—	$ML^3 T$	Watt por metro kelvin	$W/m \cdot K$	$m/s^3 \cdot K$	
Energía molar	—	$ML^2/t^2 mol$	Joule por mol	$J/mol$	$kg \cdot m^2/s^2 \cdot mol$	
Capacidad calorífica molar	—	$ML^2/t^2 mol T$	Joule por mol kelvin	$J/mol \cdot K$	$kg \cdot m^2/s^2 \cdot mol \cdot K$	

3. La presión en una cañería de acueducto es de 50 lb/in<sup>2</sup> (psi). ¿Cuál es la presión en N/m<sup>2</sup> y en kPa?
4. Una atmósfera equivale a \_\_\_\_\_ lb/in<sup>2</sup> y a \_\_\_\_\_ kPa.
5. Un comprador de una granja de 100 acres en Kansas paga 1,500 dólares por acre, y desea saber cuánto es esto en \$/ha.
6. Un buque cisterna petrolero tuvo una fuga de 50,000 barriles de petróleo cerca de una playa. Si el espesor de la mancha de petróleo es de 2 cm y su anchura es alrededor de 400 m, ¿cuál es la longitud de playa afectada?
7. La temperatura en un incinerador que quema residuos sólidos y lodos es alrededor de 1,400°F. ¿Cuánto es esto en °C y K?
8. Las necesidades de agua para irrigación se citan como 620 acre · ft/día. Expresé esto en una unidad SI apropiada.
9. Los lodos de aguas negras digeridos son un combustible de baja calidad con un contenido de energía (valor calórico) de 9,100 kJ/kg de sólidos secos. ¿Cuál es el valor calórico en Btu/lb?
10. El gasto de agua para combate de incendios en una población se especifica como 500 L/s con una duración mínima de 8 h. Calcule el gasto que se requiere en gpm y el tamaño del depósito de almacenamiento para protección contra incendios tanto en m<sup>3</sup> como en millones de galones.
11. La densidad y la viscosidad de un aceite a 100°F son de 55 lb/ft<sup>3</sup> y  $1.4 \times 10^{-3}$  lb<sub>r</sub> · s/ft<sup>2</sup>, respectivamente. Calcule los valores SI equivalentes.
12. La ecuación 6.6 proporciona la velocidad de sedimentación terminal de una partícula esférica que se sedimenta en un líquido como

$$u_t = \left[ \frac{4}{3} \frac{g(\rho_p - \rho)}{C_D \rho} d_p \right]^{1/2}$$

¿Cuáles son las dimensiones de  $C_D$ , que es el coeficiente de resistencia al avance?

13. Los trabajos científicos que se envían a casi todas las revistas estadounidenses se deben dar en unidades tanto SI como AES, con las segundas entre paréntesis. Complete la información que falta en el siguiente texto, tomado de un artículo enviado recientemente a una revista.

La planta de tratamiento de aguas residuales de Sarnia tiene cuatro tanques de sedimentación rectangulares de flujo horizontal de 41.1 m de largo ( ), 9.2 m de ancho ( ) y una profundidad promedio de 2.7 m ( ). El gasto promedio es de 35,000 m<sup>3</sup>/día ( ). Las mediciones de la velocidad del flujo a través del tanque dieron un valor promedio de 14 mm/s ( ) a una tasa de rebosamiento de 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · día ( ) a 30 mm/s ( ) a una tasa de rebosamiento de 115 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · día ( ).

14. La ecuación de Darcy-Weisbach se utiliza para calcular la pérdida por fricción para el flujo por tubos circulares a partir de

$$h_L = f \frac{Lu^2}{2gd}$$

donde  $h_L$  = pérdida de altura hidráulica por fricción

$f$  = factor de fricción

$L$  = longitud del tubo

$d$  = diámetro del tubo

$u$  = velocidad promedio del flujo en el tubo

$g$  = aceleración debida a la gravedad

Si la pérdida de carga tiene dimensiones de longitud, ¿cuáles deben ser las dimensiones de  $f$  para que la ecuación sea dimensionalmente correcta?

**REFERENCIAS**

Para obtener información relacionada con el Sistema Internacional de Unidades y su aplicación, póngase en contacto, en Estados Unidos, con

Office of Technical Publications  
National Bureau of Standards  
U.S. Department of Commerce  
Washington, DC 20234

y en Canadá, con

Metric Commission  
235 Queen Street  
Ottawa, Ontario  
K1A 0H5

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION COMMITTEE. "Final Report on Metric Units and Sizes". *Journal of the American Water Works Association* 74 (1982):27.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. *Metric Practice Guide*. CSA Standard Z234.1-76. Rexdale, Ontario: Canadian Standards Association; 1976.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. *SI Units and Recommendations for Use of Their Multiples and of Certain Other Units, ISO 1000*. Ginebra: International Standards Organization Central Secretariate, 1973.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. *The Metric System of Measurement (SI)*. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, Fed. Reg., 10 de diciembre de 1976.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. *Units of Expression for Wastewater Treatment (with Emphasis on Metrication)*. WPCF Manual of Practice núm. 6. Alexandria, Va.: WPCF, octubre de 1976.

**APÉNDICE A.3: FACTORES DE CONVERSIÓN DE USO FRECUENTE**

En las tablas siguientes, la conversión de un conjunto inicial o determinado de unidades a las unidades deseadas se hace multiplicando las originales por el factor que se indica. Las conversiones están en orden alfabético en cada categoría. Aunque casi todas las conversiones de SI a AES son iguales a las correspondientes entre unidades SI y británicas, las excepciones se señalan cuando corresponde.

**LONGITUD**

centímetro	× 0.3937	= in
	× 0.0328	= ft
pie	× 30.48	= cm
	× 0.3048	= m
pulgada	× 2.540	= cm
	× 0.0254	= m
kilómetro	× 3281	= ft
	× 0.6214	= milla (terrestre)
metro	× 3.281	= ft

milímetro de agua	$\times 9.80638$	= Pa
pulgada de mercurio (32°F)	$\times 3386.38$	= Pa
(60°F)	$\times 3376.85$	= Pa

**ENERGÍA**

Btu	$\times 252$	= cal
	$\times 1.055$	= kJ
	$\times 0.2930$	= Wh
Btu por segundo	$\times 1.414$	= caballo de fuerza (hp)
	$\times 1.055$	= kW
caballo de fuerza	$\times 42.42$	= Btu/min
	$\times 550$	= ft lb <sub>f</sub> /s
	$\times 746$	= W
	$\times 746$	= J/s
caloría	$\times 4.1855$	= J
	$\times 4.1855$	= Ws
kilojoule	$\times 0.9478$	= Btu
	$\times 238.8$	= cal
	$\times 1$	= kW <sub>s</sub>
megawatt-hora	$\times 3.6$	= GJ
pie libra fuerza por segundo	$\times 1.356$	= W = J/s
watt	$\times 3.412$	= Btu/h
	$\times 1$	= J/s

**TEMPERATURA**

°C	$^{\circ}\text{C} + 273.15$	= K
	$^{\circ}\text{C} \times (1.8) + 32$	= °F
	$^{\circ}\text{C} \times (1.8) + 491.58$	= °R
°F	$^{\circ}\text{F} + 459.48$	= °R
	$(^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9$	= °C
	$(^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9 + 273.15$	= K
K	$\text{K} - 273.15$	= °C
	$(\text{K} - 273.15) \times 1.8 + 32$	= °F
°R	$^{\circ}\text{R} - 459.48$	= °F
	$^{\circ}\text{R} - 491.58 \times 5/9$	= °C
	$(^{\circ}\text{R} - 491.58) \times 5/9 + 273.15$	= K

**VISCOSIDAD DINÁMICA (20°C)**

centipoise	$\times 0.001$	= N · s/m <sup>2</sup> = Pa · s
libra fuerza-segundo por pie cuadrado	$\times 47,880$	= centipoise
newton-segundo por metro cuadrado	$\times 1,000$	= centipoise
poise	$\times 10$	= poise
	$\times 0.1$	= N · s/m <sup>2</sup> = Pa · s

**VISCOSIDAD CINEMÁTICA (20°C)**

centistoke	$\times 1$	= mm <sup>2</sup> /s
	$\times 0.038750$	= ft <sup>2</sup> /h
pie cuadrado por hora	$\times 25.807$	= centistoke
	$\times 0.09290$	= m <sup>2</sup> /h
metro cuadrado por hora	$\times 10.764$	= ft <sup>2</sup> /h



### APÉNDICE A.4: SÍMBOLOS Y UNIDADES DE USO FRECUENTE EN LA INGENIERÍA AMBIENTAL

Parámetro	SI		AES/británico	
	Unidad	Símbolo	Unidad	Símbolo
<b>UNIDADES BÁSICAS</b>				
Masa	gramo	g	onza	oz
	kilogramo	kg	libra-masa	lb <sub>m</sub>
	tonelada métrica	t	tonelada	ton
Longitud	milímetro	mm	pulgada	in
	metro	m	pie	ft
	kilómetro	km	milla	mi
Fuerza	newton	N	libra-fuerza	lb <sub>f</sub>
Potencia	watt	W	unidad térmica británica	Btu
Presión	pascal	Pa	libra por pulgada cuadrada	psi (lb/in <sup>2</sup> )
	kilopascal	kPa	libra por pie cuadrado	psf (lb/ft <sup>2</sup> )
	megapascal	MPa		
<b>RECURSOS HIDRÁULICOS</b>				
Espesor de acuíferos	metro	m	pie	ft
Área de captación	metro cuadrado	m <sup>2</sup>	pie cuadrado	ft <sup>2</sup>
	hectárea	ha	acre	acre
	kilómetro cuadrado	km <sup>2</sup>	milla cuadrada	mi <sup>2</sup>
Profundidad de la toma	metro	m	pie	ft
Diámetro	milímetro	mm	pulgada	in
Velocidad	metro/segundo	m/s	pie por segundo	fps
Volumen del pozo	metro cúbico	m <sup>3</sup>	pie cúbico	ft <sup>3</sup>
Precipitación				
Lluvia	milímetro	mm	pulgada	in
Nieve	centímetro	cm	pulgada	in
Régimen	milímetro por día	mm/d	pulgada por día	in/día
Flujo de ríos, velocidad	metro por segundo	m/s	pie por segundo	ft/s (fps)
	metro cúbico por segundo	m <sup>3</sup> /s	pie cúbico por segundo	ft <sup>3</sup> /s (cfs)
Altura del agua	metro	m	pie	ft
Descenso del nivel de pozos	metro	m	pie	ft
	Nivel	metro	pie	ft
Radio	milímetro	mm	pulgada	in
<b>TRATAMIENTO DE AGUA</b>				
Capacidad de planta	metro cúbico por día	m <sup>3</sup> /d	galón por día	gpd
	megalitro por día	ML/d	millón de galones por día	mgd
Flujo de aguas sin tratar	metro cúbico por segundo	m <sup>3</sup> /s	galón/minuto	gpm
	litro por segundo	L/s	pie cúbico/minuto	ft <sup>3</sup> /min
Temperatura de aguas sin tratar	grados Celsius	°C	grado Fahrenheit	°F
Turbidez de las aguas sin tratar	unidades de turbidez	TU	unidad de turbidez	TU
Dosificación química	miligramo por litro	mg/L	parte por millón	ppm

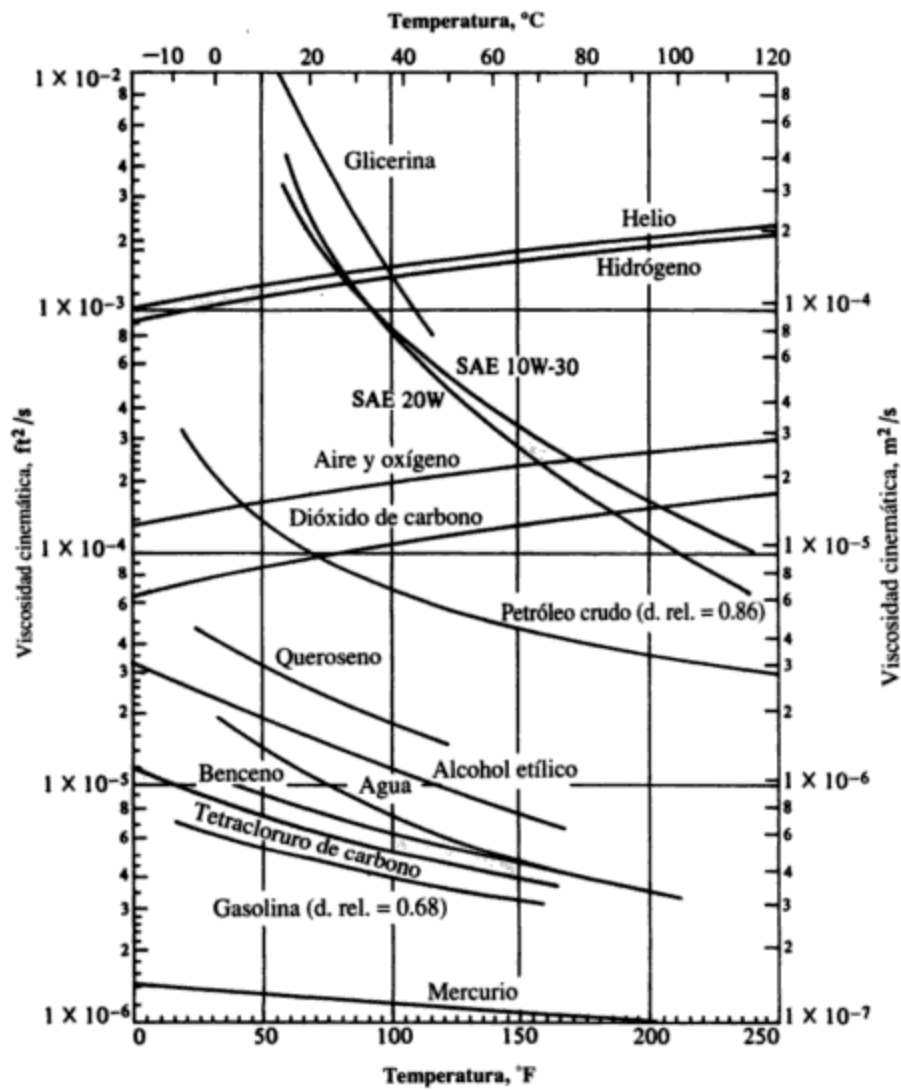
Parámetro	SI		AES/británico	
	Unidad	Símbolo	Unidad	Símbolo
Producción de gas de digestor (a partir de sólidos volátiles)	metro cúbico por kilogramo	m <sup>3</sup> /kg	pie cúbico por libra	ft <sup>3</sup> /lb
Rendimiento de filtro (sólidos secos)	kilogramo por metro cuadrado por hora	kg/m <sup>2</sup> · h	libra por pie cuadrado por hora	lb/ft <sup>2</sup> · h
Carga hidráulica	metro cúbico por metro cuadrado por hora	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · h	galón por minuto por pie cuadrado	gpm/ft <sup>2</sup>
Espesado de lodos (carga de sólidos)	kilogramo por metro cuadrado por día	kg/m <sup>2</sup> · día	libra por pie cuadrado por día	lb/ft <sup>2</sup> · día
<b>CONTAMINACIÓN DEL AIRE</b>				
Precipitación de polvo	gramo por metro cuadrado	g/m <sup>2</sup>	gramo por pie cuadrado	g/ft <sup>2</sup>
	kilogramo por kilómetro cuadrado	kg/km <sup>2</sup>	libra por acre	lb/acre
Materia particulada transportada por el aire	gramo por metro cúbico (diversos submúltiplos de gramo permisibles)	g/m <sup>3</sup>	libra por 1,000 pies cúbicos	lb por 1,000 ft <sup>3</sup>
Gases atmosféricos	microgramo por metro cúbico	μg/m <sup>3</sup>	parte por millón en volumen a 20°C	ppm en volumen
			parte por millón en peso	ppm en peso
Recuento de partículas	número por centímetro cúbico	n/cm <sup>3</sup>	número por pie cúbico	n/ft <sup>3</sup>
Presión atmosférica	milibar	mbar	atmósfera	atm
	milímetro de mercurio	mmHg	pulgada de mercurio	in Hg

### APÉNDICE B.2: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA ESTÁNDAR

Temperatura °C	Densidad, $\rho$	Peso específico, $\gamma$	Viscosidad dinámica, $\mu$	Viscosidad cinemática, $\nu$
	kg/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>	N · s/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /s
-20°C	1.40	13.7	$1.60 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-5}$
-10°C	1.34	13.2	$1.67 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-5}$
0°C	1.29	12.7	$1.72 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-5}$
10°C	1.25	12.2	$1.76 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-5}$
20°C	1.20	11.8	$1.81 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-5}$
30°C	1.17	11.4	$1.86 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-5}$
40°C	1.13	11.1	$1.91 \times 10^{-5}$	$1.69 \times 10^{-5}$
50°C	1.09	10.7	$1.95 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-5}$
60°C	1.06	10.4	$2.00 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$
70°C	1.03	10.1	$2.04 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-5}$
80°C	1.00	9.81	$2.09 \times 10^{-5}$	$2.09 \times 10^{-5}$
90°C	0.97	9.54	$2.13 \times 10^{-5}$	$2.19 \times 10^{-5}$
100°C	0.95	9.28	$2.17 \times 10^{-5}$	$2.29 \times 10^{-5}$
120°C	0.90	8.82	$2.26 \times 10^{-5}$	$2.51 \times 10^{-5}$
140°C	0.85	8.38	$2.34 \times 10^{-5}$	$2.74 \times 10^{-5}$
160°C	0.81	7.99	$2.42 \times 10^{-5}$	$2.97 \times 10^{-5}$
180°C	0.78	7.65	$2.50 \times 10^{-5}$	$3.20 \times 10^{-5}$
200°C	0.75	7.32	$2.57 \times 10^{-5}$	$3.44 \times 10^{-5}$
(°F)	lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup>	lb <sub>f</sub> /ft <sup>3</sup>	lb <sub>f</sub> · s/ft <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup> /s
0°F	0.00269	0.0866	$3.39 \times 10^{-7}$	$1.26 \times 10^{-4}$
20°F	0.00257	0.0828	$3.51 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-4}$
40°F	0.00247	0.0794	$3.63 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-4}$
60°F	0.00237	0.0764	$3.74 \times 10^{-7}$	$1.58 \times 10^{-4}$
80°F	0.00228	0.0735	$3.85 \times 10^{-7}$	$1.69 \times 10^{-4}$
100°F	0.00220	0.0709	$3.96 \times 10^{-7}$	$1.80 \times 10^{-4}$
120°F	0.00213	0.0685	$2.47 \times 10^{-7}$	$1.16 \times 10^{-4}$
150°F	0.00202	0.0651	$4.23 \times 10^{-7}$	$2.09 \times 10^{-4}$
200°F	0.00187	0.0601	$4.48 \times 10^{-7}$	$2.40 \times 10^{-4}$
300°F	0.00162	0.0522	$4.96 \times 10^{-7}$	$3.05 \times 10^{-4}$
400°F	0.00143	0.0462	$5.40 \times 10^{-7}$	$3.77 \times 10^{-4}$

Fuente: J. A., Roberson y C. T., Crowe, *Engineering Fluid Mechanics*, 2a. ed. (Boston: Houghton Mifflin, 1980). Datos de R. E., Boltz y G. L., Tuve, *Handbook of Tables for Applied Engineering Science* (Cleveland: CRC Press, 1973).

### APÉNDICE B.4: VISCOSIDADES CINEMÁTICAS DE DIVERSOS FLUIDOS



Fuente: J. A., Roberson y C. T., Crowe, *Engineering Fluid Mechanics*, 2a. ed. (Boston: Houghton Mifflin, 1980). Adaptado de V. L. Streeter, *Fluid Mechanics*, 5a. ed. (Nueva York: McGraw-Hill, 1971).

**UNIDADES AES/BRITÁNICAS***Forma de energía**Valor calorífico (millones de Btu)*

## Petróleo

(por barril)	
Petróleo crudo	5.8030
Gases licuados de petróleo	4.0950
Gasolina para motores	5.2220
Gasolina para aviación	5.0505
Combustible turbo para aviación	5.4145
Queroseno	5.6770
<i>Diesel</i> y combustóleo ligero	5.8275
Combustóleo ligero y gas de destiladora	6.2874
Coque de petróleo	6.3852
Gas natural (por mil pies cúbicos)	1.0000
Carbón (por tonelada corta)	
Antracita	25.4000
Bituminoso importado	25.8000
Bituminoso canadiense	25.2000
Subbituminoso	17.0000
Lignit	13.2000
Coque (por tonelada corta)	24.8000
Gas de horno de coque (por mil pies cúbicos)	0.5000
Electricidad (por megawatt hora)	3.4120 (uso) 10.000 (producción)

**CONVERSIÓN**

Forma de energía	SI a AES/británicas	AES/británicas a SI
Petróleo crudo	1 metro cúbico (a 15°C) = 6.293 barriles (a 60°F) 1 barril = 35 galones imperiales o 42 galones de EUA 1 galón imperial = 4.546 litros 1 tonelada métrica de petróleo crudo = 7.428 barriles (crudo canadiense promedio)	1 barril (a 60°F) = 0.15891 metros cúbicos (a 15°C)
Gas natural	1 metro cúbico (a 101.325 kPa Y 15°C) = 35.301 pies cúbicos (a 14.73 psia y 60°F)	1 millar de pies cúbicos (a 14.73 lb/in <sup>2</sup> abs y 60°F) = 28.32784 metros cúbicos (a 101.325 kPa y 15°C)
Carbón	1 tonelada métrica (t) = 1.102 toneladas cortas	1 tonelada corta = 0.907185 toneladas métricas
Petróleo, gas, carbón	1 joule (J) = 0.000948 Btu	1 Btu = 1.054615 kilojoules

# APÉNDICE C

---

## Abreviaturas y símbolos

### ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS EN ESPAÑOL

A	área; coeficiente de van't Hoff-Arrhenius
<i>a</i>	aceleración
DBO	demanda bioquímica de oxígeno
Btu	Unidad térmica británica
$\epsilon$	fracción de trazador presente (entrada de trazador)
C	concentración; coeficiente para flujo contra incendios
$C_D$	coeficiente de resistencia al avance
DQO	demanda química de oxígeno
CFC	clorofluorocarbonos
RTCA	reactor de tanque completamente agitado
<i>d</i>	distancia; diámetro
<i>D</i>	profundidad; distancia; diámetro
OD	oxígeno disuelto
FTS	flujo en tiempo seco
$E_a$	energía de activación de Arrhenius
$E_c$	intensidad de campo eléctrico
EIA	evaluación del impacto ambiental
MIA	manifiesto del impacto ambiental
PES	precipitador electrostático
<i>F</i>	fracción de trazador presente (entrada continua)
<i>F</i>	fuerza; flujo contra incendios; factor de gravamen o contribución; factor de empuje ascendente de columna
A/M	relación alimento/microorganismos
<i>g</i>	aceleración debida a la gravedad
gpcd	galones per cápita por día
G	tiempo de generación; curva gaussiana normalizada
PNB	producto nacional bruto

# APÉNDICE D

---

## Problemas ambientales especiales

Los problemas que se incluyen al final de cada uno de los 16 capítulos de este libro se idearon como un repaso de cada capítulo y prácticamente el estudiante no tiene que recurrir a otros materiales para su resolución. Por otra parte, el propósito de los siguientes “Problemas ambientales especiales” es presentar a los estudiantes cuestiones de alcance más amplio que implican varias disciplinas, diferentes segmentos de la sociedad, diversos métodos de control de la contaminación y algunos de conservación.

En ciertos casos puede haber muchas respuestas “correctas”, por lo cual es necesario que las opiniones se basen en datos de apoyo con ejemplos, y que se señalen todos los supuestos.

1. El gobierno federal ha donado 30 millones de dólares para la construcción de un nuevo edificio de Ciencia e Ingeniería Ambiental en una de las universidades multidisciplinarias más grandes del país. El objetivo es desarrollar la enseñanza e investigación interdisciplinarias sobre cuestiones ambientales en los niveles de licenciatura y posgrado. El edificio deberá ser amigable para el ambiente, eficiente en su consumo de energía y ser un modelo para otras escuelas.
  - (a) ¿Qué disciplinas/departamentos deben incorporarse al nuevo edificio?
  - (b) ¿Qué proporción del edificio se debe dedicar a usos como salones de clases, salones para seminarios, laboratorios (de investigación, de enseñanza), instalaciones de cómputo y áreas comunes (auditorio, cafetería, sanitarios)?
  - (c) ¿Qué proyectos de investigación en campo se podrían llevar a cabo en el último piso del edificio en vez de hacerlo en un laboratorio tradicional?
  - (d) ¿Qué aspectos ambientales se deben tomar en cuenta para el diseño de instalaciones para calefacción, ventilación, abasto de agua y eliminación de residuos?

*Nota:* Utilice una universidad conocida como punto de partida.

2. Para mejorar el clima en los negocios, el Congreso de EUA en 1995 tomó medidas para aligerar los requisitos ambientales por medio de acciones como:

- demorar la autorización de la Clean Water Act (Ley para el aire limpio) e imponer una moratoria de un año a la reglamentación gubernamental
- demandar que el gobierno reembolse a las compañías si la reglamentación gubernamental reduce sus utilidades o su valor de mercado
- ordenar que las nuevas reglas del gobierno produzcan beneficios que compensen sobradamente los costos

Comente acerca de los posibles efectos que los incisos anteriores podrían tener en (a) la actividad empresarial, (b) el ambiente y (c) si, desde su punto de vista, el efecto global sería benéfico o perjudicial a corto y a largo plazo.

3. Imagine que usted es una gota de agua que se descarga desde la chimenea de una planta generadora de electricidad. Con el tiempo usted cae, en forma de lluvia ácida, en un lago que es la fuente de agua potable para una ciudad grande. Describa su recorrido y los sucesos en los cuales participó desde el momento en que dejó la chimenea y disfrutó de varios recorridos secundarios hasta su retorno, como agua residual tratada, al mismo lago. No olvide incluir los detalles de sus encuentros con otros compuestos, sustancias químicas y microorganismos, así como el abuso físico al cual se vio sometido durante su recorrido.
4. Una parcela de tierra de 100 acres en el estado de Nueva York, propiedad del gobierno federal, se va a transformar en una comunidad experimental para 1,000 habitantes, planeada desde el punto de vista ambiental y tan autosuficiente y ahorradora de energía como sea posible. Como Jefe de Planeación del gobierno, describa sus recomendaciones en cuanto a viviendas (número, tipo(s), materiales, etc.), servicios para la localidad (como caminos, agua, alcantarillado, y residuos sólidos, etc.), enjardinado (parques, estanques, follaje, etc.); localmente los únicos servicios disponibles son los del teléfono y la energía eléctrica.
5. El área de Fort Lauderdale, en Florida, ha sido llamada "la Venecia de las Américas" a causa de la existencia de canales similares en estas dos ciudades. Sin embargo, muchos de los problemas que son evidentes en los canales venecianos no están presentes en las vías de agua de Fort Lauderdale.
  - (a) ¿Cuáles son los problemas de Venecia y cómo ha controlado Fort Lauderdale estos problemas?
  - (b) ¿Qué opciones tiene Venecia para corregir y controlar los problemas de sus canales?
6. Las naciones en vías de desarrollo resienten que se les diga que deben implantar medidas modernas de protección ambiental como las de los países desarrollados.
  - (a) ¿Por qué deben esas naciones incurrir en estos gastos cuando su prioridad principal es el desarrollo industrial para una población cada vez más urbanizada?
  - (b) ¿Qué puede hacer Estados Unidos y otras naciones industrializadas para fomentar el uso de estándares ambientales idóneos en estos países?
7. La Canadian International Development Agency (CIDA; Oficina canadiense para el desarrollo internacional) proporciona fondos y asesoría para proyectos en regiones que carecen de medios para satisfacer necesidades humanas. Algunos de estos medios son las instalaciones educativas, los servicios médicos y cierta infraestructura. Se están examinando solicitudes de apoyo para un sistema de abastecimiento de agua para:
  - (a) un área de *permafrost* en el norte de Siberia
  - (b) una región desértica en el norte de Sudán
  - (c) un pequeño país tropical en Centroamérica



En virtud de que los fondos son limitados y sólo se puede emprender un proyecto, imagine que su director le ha solicitado exponer en detalle el tipo de sistema de abastecimiento que usted considere como el más idóneo en cada caso y cuáles serían los costos y beneficios relativos del mismo.

Su estudio debe tomar en cuenta la estructura administrativa, las etapas del proyecto desde su planeación, financiamiento y puesta en práctica hasta el mantenimiento posterior del sistema completo.

8. Ciertos activistas ambientales (algunos los llamarían extremistas) afirman que "cero tolerancia" es la única respuesta que se debe dar a determinadas actividades que afectan el ambiente. Por ejemplo, ellos prohibirían de inmediato actividades como:

- la incineración de residuos sólidos municipales
- el desmonte de bosques
- el uso de plaguicidas y herbicidas
- la destrucción de residuos tóxicos y peligrosos en hornos de cemento
- la generación de energía nuclear

Seleccione una de las actividades anteriores, u otra de su elección (a la que estos ambientalistas se opondrían con el mismo vigor), y describa una situación en la cual la actividad elegida por usted sería la mejor desde el punto de vista tanto económico como ambiental. Recuerde que, como científico o ingeniero ambiental, está obligado a cuantificar sus argumentos.

9. Para una ciudad de 200,000 habitantes, compare el costo total de la recolección y eliminación de residuos sólidos con y sin reciclaje.

Suponga que el reciclaje incluye periódicos, casi todos los plásticos, botellas y latas, pero no la conversión en abono, excepto para las hojas de plantas que recolecta el municipio.

Utilice precios de mercado para los materiales reciclados y costos de recolección y eliminación de residuos reales, si dispone de ellos. En caso contrario, emplee costos representativos de otras fuentes.

10. El 25 aniversario del Día de la Tierra se celebró el 22 de abril de 1995. Desde el evento original, inaugurado en 1970 por el senador Gaylord Nelson de Wisconsin, se han producido cambios ambientales significativos<sup>\*†</sup>. Cuantifique los avances ambientales que se hayan alcanzado en su estado o provincia en ese periodo de 25 años. Tome en cuenta factores como:

- el crecimiento de la población
- la cantidad, perdida o ganada, de tierras agrícolas, suelo vegetal superior, energía, recursos naturales, pantanos, etcétera
- el número de ciudades y pueblos con programas de reciclaje
- los lugares donde ya no se prohíbe la natación
- los grados ambientales conferidos
- los cambios en la lista de especies en peligro de extinción
- las contribuciones a la contaminación por parte de industrias, automóviles, embarcaciones para el esparcimiento, incineradores, etcétera
- los cambios en la calidad del aire de las grandes ciudades.

\* Los logros de 7 activistas ambientales se describen en National Geographic (187): 4 de abril de 1995, Washington, D.C., pp. 123-138.

† Los logros ambientales han sido documentados también por Gregg Easterbrook en "A Moment on the Earth: The Coming of Environmental Optimism", Viking, 1995.

# Índice

- Abasto público del agua**, [38](#)  
**Abiótico**, definición, [303](#)  
**Ablandamiento del agua**, [408](#)  
**Abono**, formación de, [272](#), [595-96](#)  
de biosólidos, [481](#)  
por propietarios de vivienda, [586-87](#)  
**Abono**, sanitarios de, [482](#), [484](#)  
**Abreviaturas**, [755-57](#)  
**Absorción**, procesos de, para el control de la emisión de gases, [536-37](#)  
**Acción reparadora**, para los efectos de la lluvia ácida, [135-37](#)  
regulación por el gobierno para la, [137](#)  
*Véase también* Control; Administración ambiental  
**Acero**, producción de, [33-34](#)  
emisión de partículas de la, [514](#)  
**Ácida**, lluvia. *Véase* Lluvia ácida  
**Acidez**, [166-69](#)  
**Acidificación** por uso del carbón, [74-75](#).  
*Véase también* Lluvia ácida  
**Ácido-base**, reacciones, [158-69](#)  
**Ácido conjugado**, [158](#), [160](#)  
**Ácido(s)**  
conjugados, [158](#), [160](#)  
definición, [158](#)  
fuertes, ejemplos de, [159](#)  
**Acontecimientos geofísicos extremos**, [90](#)  
cambio ambiental y, [92-93](#)  
**Acuicultura**, [453](#)  
**Acueductos**, [409-10](#)  
**Acuffers**, [342](#), [392](#)  
**Acumulación**, mezclado con, [186-89](#)  
**Adaptaciones a los peligros ambientales naturales**, [98-104](#)  
clasificación de las, [103-4](#)  
enfoque industrial, [98-101](#)  
enfoque postindustrial, [101-3](#)  
enfoque preindustrial, [98](#)  
**Administración ambiental**, [685-729](#)  
desarrollo sostenido, [686-87](#)  
estrategias para el control de la contaminación, [700-714](#)  
aspectos económicos de, [703-701](#)  
estudio de caso del problema del río Niágara, [709-14](#)  
reglamentación, [702-9](#)  
**ética ambiental** y, [715-25](#)  
actitudes cambiantes del público y, [722-24](#)  
ética en la sociedad y, [715-716](#)  
las personas como problema, [718](#)  
perspectiva histórica de, [716-17](#)  
resolución de problemas éticos, [719-22](#)  
evaluación del impacto ambiental, [687-99](#)  
componente atmosférico de la EIA para una planta generadora alimentada con carbón, [696-99](#)  
críticas a, [695-96](#)  
definición, [687](#)  
diseño de, [692-95](#)  
internacional, [695](#)  
perspectiva histórica de la, [687-89](#)  
proceso de, elementos del, [689-92](#)  
**ADN** (ácido desoxirribonucleico), [259-60](#)  
**Adsorción**, [146](#)  
procesos de, para el control de emisiones de gases, [537-38](#)  
**Aedes aegypti**, [291](#)  
**Aerobias**, bacterias, [261](#)  
**Aerobios/anóxicos**, procesos para el tratamiento de aguas residuales, [446-47](#)  
**Aerobios**, hongos, [266](#)  
**Aerobios**, procesos para tratamiento de lixiviado, [607](#)  
**Aeronomía**, [217](#)  
**Aerosol**, [219](#)  
**Agente Naranja**, [297](#)  
**Agnes** (tormenta tropical, 1972), [94-95](#)  
**Agricultura**  
efecto ambiental de la, [43](#)  
efectos indirectos en el agua, [339](#)  
uso de agua por la, [372](#), [374](#), [375](#)  
consuntivo, [347-48](#)  
**Agroempresa**, [367-68](#), [372](#), [374](#)  
**Agua**  
absorción y emisión de radiación, [224](#)  
acidez y alcalinidad del, [152](#), [157](#), [166-69](#)  
cantidad y calidad en los ríos y lagos, [321](#)  
capacidad amortiguadora del agua natural, [163-65](#)  
como ácido o base, [159](#)  
dureza del, [152](#), [157](#), [392](#), [408](#)  
en la atmósfera, [219](#), [235-42](#)  
ciclo hidrológico, [179](#), [180](#), [238-42](#), [342](#), [343](#), [346-47](#), [348](#), [368](#)  
humedad y precipitación, [235-38](#), [239](#)  
en suelos, [271](#)  
expresión de la concentración de partículas en, [146-47](#)  
ionización del, [159-61](#)  
microbiología del, [273-75](#)  
propiedades físicas del, a presión atmosférica, [749](#)  
recuentos típicos de bacterias en, [274](#)  
**Agua**, abasto de, [383-420](#)  
almacenamiento de, [411-15](#)  
distribución del, [410-11](#)  
símbolos y unidades para la, [745](#)  
fuentes de, [392-95](#)  
agua de mar, [395](#)  
aguas de superficie, [392](#), [393](#), [394](#)  
aguas residuales recuperadas, [395](#), [416](#)  
aguas subterráneas, [392-94](#)  
necesidades de cantidad, [384-89](#)  
demanda de agua, [384-89](#)  
fluctuaciones del uso, [386-89](#)  
necesidades y desarrollo futuro del, [415-16](#)  
procesos de tratamiento de, [395-408](#)  
cloración, ética de la, [719-22](#)  
desinfección, [394](#), [405-7](#)  
eliminación de materia particulada, [397-405](#)  
eliminación de sustancias disueltas, [407-8](#)  
planta de tratamiento, [395-97](#)  
símbolos y unidades para, [744-45](#)  
requisitos de calidad, [389-92](#)  
características físicas, [390](#)  
características químicas, [392](#)  
estándares, [389-90](#), [391](#)  
transmisión del, [409-10](#), [416](#)  
usos del, [383-84](#)  
**Agua-aire-tierra**, interacción, [3](#)  
**Agua**, calidad del, [287-88](#)  
**Agua**, contaminación del, [36](#), [394](#), [421-91](#)  
aguas residuales, [422-31](#)  
aguas pluviales, [41](#), [428-31](#), [438-39](#)  
componentes de, [422-25](#)  
concentración de nitrógeno en términos de un componente común, [155-57](#)  
expresión de la concentración de partículas en, [146-47](#)  
industriales, [428](#)  
medición de DBO en, [425-26](#)  
microbiología de, [273-75](#)  
municipales, [427-28](#)  
recuperadas, [376](#), [395](#), [416](#), [486-87](#)  
sedimentación de sólidos en suspensión de, [181-82](#)  
valores representativos de contaminantes en, [429](#), [430](#)  
de aguas receptoras, [431-36](#)  
efectos de los contaminantes, [431-33](#)  
necesidad del control de la contaminación en, [435-36](#)  
requisitos de calidad, [433-35](#)  
fuentes puntuales contra no puntuales de, [422](#)  
métodos de tratamiento de aguas residuales con base en terrenos, [451-56](#)  
aplicación en terrenos, [451-52](#), [455](#), [479-80](#)  
eliminación de remanentes, [479-81](#)  
estanques de oxidación, [453-56](#)  
lagunas, [453-56](#)  
sistema carbónico abierto sin sólidos, [164](#)  
papel del gobierno/público en el control de la, [484-85](#)  
plantas de tratamiento de aguas residuales, [456-81](#)  
instalaciones locales, [481-84](#)  
problemas de olor, [481](#)  
procesamiento de lodos, [474-79](#)  
procesos de película fija, [470-74](#)  
sistemas de crecimiento en suspensión, [457-70](#)  
subsídios para, [704-5](#), [708-9](#)  
recolección de aguas residuales, [436-40](#)  
contaminación por derrames de alcantarillas combinadas, [38-40](#)

- primeros sistemas de, [436](#)  
sistemas actuales de, [436-38](#)  
tendencias en el control de, [486-87](#)  
tratamiento de aguas residuales  
principios de, [440-51](#)  
procesos de, [440-50](#)  
requisitos de efluentes, [433-34](#), [440](#)  
selección de, [450-51](#)  
símbolos y unidades para el, [746](#)
- Agua de mar, [395](#)
- Agua dulce disponible, [346](#)
- Agua, enfermedades de transmisión por, [4](#),  
[274-75](#), [278-79](#), [283-88](#), [395-96](#)
- Agua, esquemas de control del  
industriales, [98-100](#)  
preindustriales, [98](#)
- Agua, plantas de recuperación de, [350](#)
- Agua potable, calidad del, efecto de la  
lluvia ácida sobre las aguas  
subterráneas y la, [133-34](#). Véase  
también Agua, abasto de
- Agua, uso industrial de, [386](#)
- Aguas de superficie, [392](#), [393](#), [394](#)
- Aguas internacionales, [362](#)
- Aguas negras, [422](#), [427-28](#)  
aplicación en terrenos, [451-52](#)  
estudios con trazadores para evaluar el  
rendimiento de los tanques de  
sedimentación en, [202-3](#)  
plantas de tratamiento de  
eutroficación del embalse de Occoquan  
y, [376](#), [378](#)  
Véase también Residuos sólidos; Agua,  
contaminación del
- Aguas negras domésticas, [427](#)
- Aguas negras sanitarias, [427](#)
- Aguas pluviales, [41](#), [428-31](#)  
retención durante periodos de desagüe  
máximo, [438](#)
- Aguas pluviales, administración de,  
[378](#), [379](#)
- Aguas pluviales, depósito para retención de,  
[439](#)
- Aguas receptoras, contaminación de, [431-36](#)
- Aguas residuales. Véase Agua,  
contaminación del
- Aguas residuales, componentes inorgánicos  
de las, [423-24](#)
- Aguas residuales industriales, [428](#)
- Aguas residuales municipales, [422](#), [427-28](#)  
Véase también Agua, contaminación del
- Aguas residuales recuperadas, [376](#), [395](#), [416](#),  
[486-87](#)
- Aguas subterráneas, [346](#), [351](#), [392-94](#)  
contaminación por residuos sólidos  
control de lixiviados y, [606](#)  
de rellenos de tierras, [599](#)  
definición, [392](#)  
efecto de la lluvia ácida en las, [133-34](#)
- Aire  
expresión de concentraciones de partículas  
en, [146](#)  
propiedades mecánicas del, a la presión  
atmosférica estándar, [750](#)
- Aire ambiental, control de la calidad del, por  
dilución, [547-48](#)
- Aire ambiental, estándares de la calidad del,  
[503-6](#)
- Aire, contaminación del, [35](#), [92](#), [112](#), [492-566](#)  
contaminantes del aire, [492](#), [497-98](#)  
control de la, [521-48](#)  
control de la calidad del aire, [522-23](#)  
control de la calidad del aire ambiental  
por dilución, [547-48](#)  
control de las emisiones de óxidos de  
nitrógeno, [546-47](#)  
control de las emisiones de partículas,  
[523-36](#)  
control de las emisiones gaseosas, [536-38](#)  
diagramas de flujo para procesos de  
recuperación representativos, [538-46](#)  
limpieza natural de la atmósfera, [521-22](#)  
efectos de la, [498-506](#)  
en la salud, [498-502](#)  
en materiales y servicios, [503](#)  
en plantas y animales, [502-3](#)  
estándares de la calidad del aire  
ambiental, [503-6](#)  
en Londres, [292-93](#), [493](#), [494](#)  
en perspectiva, [492-98](#)  
contaminantes globales y regionales, [497](#)  
el smog de Los Ángeles, [495-96](#), [551](#)  
episodios registrados a lo largo de la  
historia, [493-95](#)  
fuentes de, [506-21](#)  
agrícolas, [512-13](#)  
comerciales, [511](#)  
contaminantes atmosféricos principales,  
[497-98](#)  
domésticas, [510-11](#)  
identificación de, [506-7](#)  
industriales, [513-17](#)  
naturales, [508-10](#)  
relacionadas con el transporte, [496](#),  
[517-21](#)  
manejo de residuos sólidos y, [577](#)  
por incineración, [593-94](#)  
predicción de concentraciones de  
contaminantes, [548-59](#)  
exactitud de la, [558-59](#)  
meteorología de la contaminación del  
aire, [548-52](#)  
modelos de ascensión de columnas,  
[556-58](#)  
modelos de dispersión de la  
contaminación, [552-55](#), [558-59](#)  
símbolos y unidades de uso frecuente para  
la, [747](#)  
Véase también Lluvia ácida
- Aire de interiores, microbiología del, [276-77](#)
- Aire seco, [217-18](#)
- Aireación, [408](#)  
en el proceso de estabilización por  
contacto, [459-60](#)  
en lodos activados convencionales, [457](#)  
en un sistema de crecimiento en suspensión  
en RSD, [460-61](#)  
proceso de aireación prolongada, [457-59](#),  
[467](#)
- Aireación prolongada, proceso de, [457-59](#), [467](#)
- Albedo, [225-27](#)
- Alcalinidad, [152](#), [166-69](#)  
del agua, expresión de la, [152](#), [157](#)  
total, [166](#)
- Alcalinidad de carbonato, [166](#), [167](#), [168](#)
- Alcance, factores determinantes del, por  
incluir en el MIA, [691-92](#)
- Alcantarillas  
contaminación por derrames de  
alcantarillas combinadas, [438-40](#)  
de los tiempos antiguos, [4](#)  
primeros sistemas, [436](#)  
sistemas actuales, [436-38](#)
- Alcantarillas combinadas, [436](#), [438](#)  
contaminación por derrames de, [438-40](#)
- Alcantarillas sanitarias, [436-37](#)
- Alemania, decadencia de los bosques por la  
lluvia ácida en, [130](#)
- Algas, [256](#), [257](#), [266](#), [267](#)  
clasificación de las, [266](#), [268](#)  
definición, [256](#)  
en suelos, [272](#)
- Alimento/microorganismos (A/M), relación,  
[467](#)
- Alimentos/bebidas, industria de, impacto  
ambiental de la, [43](#)
- Alimentos, residuos de, cambios en los, [569](#)
- Alivio, cauce de, [91](#)
- Almacenamiento de provisión de agua,  
[411-15](#)
- Altoestrato, [237](#), [239](#)
- Almínea activada, [538](#)
- Aluminio  
concentraciones en aguas acidificantes,  
[127-28](#)  
toxicidad en bosques, lluvia ácida y, [130](#),  
[132](#)
- Aluminio, reciclaje de, [579](#)
- Aluminio, sulfato de, como coagulante, [399](#)
- Ambientalistas, proyectos de desarrollo  
hidráulico y conflictos con los, [365](#)
- Ambiente, administración del. Véase  
Administración ambiental
- Ambiente, definición, [2](#)
- American Chemical Exchange, [651](#)
- American Engineering System (AES),  
[730](#), [731](#)  
conversión de SI a, [739-43](#)  
unidades del, [11](#)  
valor calorífico de combustibles en el,  
[753-54](#)
- American Lung Association, [502n](#)
- Ames, Iowa, planta de recuperación de  
recursos de, [588](#)
- Amibas, [269](#), [270](#)
- Amibiasis (disentería amibiana), [281](#), [285](#)
- Amonificación, [316](#)
- Amortiguador (*buffer*), definición, [163](#)
- Anfibios, efecto de la lluvia ácida en los, [129](#)
- Animales, efectos de la contaminación del  
aire en, [502-3](#)
- Aniones, [151-52](#)
- Anopheles*, mosquito, [271](#), [286](#), [290](#)
- Anquilostomas, enfermedades por, [281](#)
- Anticiclón, [232](#)
- Ántrax, [281](#)
- APN, hidrocarburos aromáticos  
polinucleados, [74](#)
- Arabia Saudita, políticas petroleras de, [56](#)
- Área  
factores de conversión para, [740](#)  
unidad SI de, [735](#)
- Área de captación, [321](#)
- Área nuclear, [259-60](#)
- Arena, filtros de, [401-3](#)
- Arena, partículas de, [509-10](#)

- Arenque estadounidense en los Grandes Lagos, [332](#)
- Aristóteles, [718](#)
- ARN (ácido ribonucleico), [259](#)
- Arsénico, envenenamiento por, [293-94](#), [296](#)
- Arrastre, [522](#)
- Arrhenius, ecuación de dependencia respecto a la temperatura, [193-94](#)
- Asbesto, [294](#), [296](#)
- Ascariasis, [281](#)
- ASCE Guidelines to Practice under the Fundamental Canons of Ethics, [719](#)
- Aspergillus, [272](#)
- Asuán, presa de, [353](#)
- Atmósfera
- agua en la, [217](#), [235-42](#)
  - efecto de la urbanización en la, [40](#), [41](#)
  - estándar de EUA, [751](#)
  - industrialización, impacto en la, [42](#), [43](#)
  - limpieza natural de la, [521-22](#)
  - microbiología de la, [275-76](#)
  - modelos de circulación general de la, [117](#)
  - propiedades fundamentales de la, [217-21](#)
  - composición y estado físico, [217-19](#)
  - estado térmico y eléctrico, [219-21](#)
  - uso y producción de energía, impacto del, [69-78](#)
- Véase también Contaminación del aire
- Atmósfera baja, movimiento de la, [229-32](#)
- Atmósfera, ciencias de la, [217](#). Véase también Clima; Meteorología
- Atmósfera estándar de Estados Unidos, [751](#)
- Atomic Energy Act, de 1954, [621](#)
- Auditoría posterior a la construcción, [687](#)
- Automóviles, emisiones de los
- como fuente de contaminación del aire, [496](#), [517-21](#)
  - control de calidad de, [523](#)
  - costos del control de, [560](#)
  - regulación de, [518-19](#)
- Autótrofo, definición, [305](#)
- Azufre, dióxido de
- como contaminante atmosférico principal, [497](#), [498](#)
  - efectos en la salud, [295](#), [296](#), [500](#), [502-3](#)
  - eliminación selectiva de, [538-46](#)
  - de corrientes gaseosas, [540-46](#)
  - en gases de fundición, [538-39](#)
  - estándares de calidad del aire ambiental para, [504](#)
  - factores de conversión para, [505](#)
  - lluvia ácida y, [122](#), [123](#), [124-25](#)
  - mercado de créditos de emisiones en el Chicago Board of Trade, [708](#)
- Azufre, óxidos de
- fuentes industriales de, [513](#)
  - reducción de emisiones de, [135-37](#)
- Bacilos**, [256](#), [260](#)
- Bacterias, [255-65](#)
- coliformes, [274-75](#), [287-88](#)
  - conversión en abono y, [272](#), [595](#)
  - crecimiento y muerte de, [260-65](#)
  - de importancia en el ambiente, [259](#)
  - desnitrificantes y nitrificantes, [316](#)
  - diagrama esquemático de una célula representativa, [260](#)
  - en el agua, [273-74](#)
  - en el aire de interiores, [277](#)
  - en la atmósfera, [275](#), [276](#)
  - en suelos, [271-72](#)
  - enfermedades de transmisión por agua causadas por, [284-85](#)
  - fijación de nitrógeno por, [315](#)
  - heterótrofas y autótrofas, [261](#), [446](#)
  - tratamiento biológico de residuos con, [445-47](#)
- Bacterias anaerobias, [261](#)
- Bacterias autótrofas, [261](#)
- procesos aerobios con, [446](#)
- Bacterias desnitrificantes, [316](#)
- Bacterias facultativas, [261](#)
- Bacterias heterótrofas, [261](#)
- procesos aerobios con, [446](#)
- Bacterias microaerófilas, [261](#)
- Bacterias nitrificantes, [316](#)
- Bacterias patógenas, eliminación de, en el tratamiento del agua, [396](#)
- Bacterias termófilas, [595](#)
- Balace de agua, ecuación de, [242](#)
- Balances de materia. Véase Materia, balances de
- Banca de agua, programas de, [375](#)
- Banco Mundial, [45](#), [385](#)
- Base
- conjugada, [158](#), [160](#)
  - definición, [158](#)
- Basidios, [267](#)
- Basura, [568](#). Véase también Residuos sólidos
- Basura, molinos de, domésticos, [581](#), [586](#)
- Bebés azules, enfermedad de los, [35](#), [296](#)
- Bergeron-Findeisen, proceso, [236](#), [237](#)
- Bicarbonato, alcalinidad de, [166](#), [168](#)
- Bienes privados, [700](#)
- Bienes públicos, [700-701](#)
- Bifenilos policlorados (PCB), [296](#), [298](#), [299](#)
- Bilharzia (esquistosomiasis), [280](#), [281](#), [286-87](#)
- Biorrehabilitación, [675](#)
- Biosólidos. Véase Lodos
- Biosorción, [459](#)
- Biota
- definición, [304](#)
  - efecto de la lluvia ácida en la, [129](#)
- Biótico, definición, [303](#)
- Bolsa de residuos, papel de la, [651](#)
- Bomberos, departamentos de, flujo de agua que necesitan los, [387-88](#)
- Bosque(s)
- administración, para evitar el efecto invernadero, [121](#)
  - desmonte de selvas tropicales húmedas, [138-39](#)
  - efectos de la lluvia ácida en los, [129-32](#)
  - emisiones de compuestos orgánicos volátiles de, [510](#)
  - perturbaciones ambientales de origen humano en, [112](#)
- Botulismo, [281](#)
- Bowen, relación de, [229](#)
- Boyle, ley de, [169-70](#), [171](#)
- Brisbane, Australia, composición de los residuos sólidos municipales de, [573](#)
- British North American Act (BNA), [362](#)
- Brookhaven National Laboratory, [133](#)
- Brucelosis, [281](#)
- Buffalo, río, [331](#)
- Cadena alimenticia**, [310](#)
- acumulación de contaminantes de diversos tipos, [312](#)
  - definición, [306](#)
  - lluvia ácida y, [129](#)
  - niveles tróficos y, [311-13](#)
- Cadmio, acumulación de, en la cadena alimenticia, [312](#)
- Cadmio, envenenamiento por, [294](#), [296](#)
- Cal-carbonato de sodio, ablandamiento con, [408](#)
- Cal/piedra caliza, sistema lavador de lechada de, para eliminar dióxido de azufre, [540-41](#)
- costos de, [559](#), [560](#)
- Calcio, carbonato de, [314](#)
- Calcio, fosfato de, [318](#)
- Calentamiento global, [92](#). Véase también Efecto invernadero
- Calidad del aire, estándares de, [492-93](#)
- ambiental, [503-6](#)
- California
- esmog de Los Ángeles, [495-96](#), [551](#)
  - proyectos hidráulicos estatales y federales en, [373](#)
  - reglamentos sobre rellenos de tierras, [599](#)
  - residuos sólidos generados per cápita en (1990), [571](#)
- California Waste Exchange, [651](#)
- Calor residual de una planta generadora que utiliza carbón, [75](#)
- Cámaras de sacos de flujo gaseoso inverso (CSFGI), costos de capital y de operación de, [559](#), [560](#)
- Cambios ambientales, estimación de, [690](#)
- Cambios biológicos, inclusión en el MIA, [690](#)
- Cambios físicos que se incluyen en el MIA, [690](#)
- Camellones, [272](#)
- Camellones, formación de abono en, [595](#)
- Camerún, erupciones volcánicas en, [92](#)
- Camiones compactadores, [582-83](#)
- Camiones contenedores, [583](#)
- Camiones empacadores, [582-83](#)
- Camiones, para basura
- contenedores, [583](#)
  - empacadores y de compactación, [582-83](#)
- Campo de concentración de contaminación al nivel del suelo
- condiciones meteorológicas que causan un alto, [697-98](#)
  - estimación de, [699](#)
- Canadá
- control legislativo de recursos hidráulicos en, [362](#), [363](#)
  - costo promedio de las importaciones de petróleo crudo en, [59](#)
  - emisiones nacionales de contaminantes primarios en, [507](#)
  - estadísticas de población, [15-16](#)
  - estándares de agua potable en, [391](#)
  - estándares de la calidad del aire ambiental en, [503](#), [504](#)
  - Inventario Nacional de Emisión de Contaminantes, [548](#)
  - Niágara, río, contaminación del, [709-14](#)
  - observaciones representativas de la calidad del aire ambiental en, [505](#)

- Ontario Waste Management Corporation, [666](#)
- precipitación anual en, [342-43](#), [344](#), [345](#)
- Proceso de Evaluación y Revisión Ambiental (1973), [688](#)
- situación energética de, [78-82](#)
- eliminación de combustible nuclear agotado, [632-35](#)
- operaciones de explotación de minas de uranio, [626](#), 627-28
- tratamiento y eliminación de residuos químicos en, 664-65
- Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), [484-85](#)
- Canada-U.S. Great Lakes Water Quality Agreement (1973), [364](#), 709
- Canada Water Act (1970), [362](#)
- Canadian Inland Waters Directorate, [361](#)
- Canal Periférico, [338](#), [365](#), [371-76](#)
- Canales abiertos, 409-10
- Canales diplomáticos para decisiones ambientales en el río Niágara, [714](#)
- Canalones, 409
- Candida*, [267](#)
- CANDU, reactor de agua pesada con sobrepresión, [622](#), 629
- combustible agotado del, 633-34
- Cantidad-calidad, fórmula de, para cargos por servicios, 706
- Cantidad, fórmula de, para cargos por servicios, 706
- Capa límite planetaria, [220](#)
- Capa límite superficial, [220](#)
- Capacidad amortiguadora de las aguas naturales, [163-65](#)
- Cápside, [265](#)
- Capsómeros, [265](#)
- Cápsula (material bacteriano), [257](#), [282](#)
- Carbón
- bituminoso, factores de emisión para la combustión de, [544-45](#)
  - impacto ambiental del, [64](#), [73-75](#)
  - proporción recursos/demanda del, [63-64](#)
  - Véase también* Energía
- Carbón activado, [408](#)
- Carbón activado, capacidad de adsorción y retención del, [538](#)
- Carbón bituminoso, combustión de, factores de emisión para, [544-45](#)
- Carbón, gasificación de, [74](#)
- Carbón, lavado de, [136](#)
- Carbón, planta generadora de electricidad alimentada con
- componente atmosférico de la EIA para, 696-99
  - costos para el control de la contaminación del aire para, [559-60](#)
- Carbónico, ácido, [314](#)
- curvas de titulación de, [165](#)
- Carbonífero, periodo, [314](#)
- Carbono
- activado, [408](#)
  - fijación del, [313](#)
- Carbono, ciclo del, [313-14](#), [315](#)
- principales depósitos de almacenamiento y procesos de transferencia en el, [113-15](#), [116](#)
- Carbono, dióxido de
- absorción y emisión de radiación por, [224](#)
  - acumulación de, [71](#), [113-19](#)
  - conclusiones acerca del, [121-22](#)
  - efectos de la, [115-19](#)
  - especulaciones sobre la futura, [117](#), [118](#)
  - medidas de control de, [120-22](#)
  - situación actual, [113-15](#)
  - en el aire seco, [217](#), [218](#)
  - generado por rellenos de tierras, [599](#)
- Carbono, monóxido de
- como contaminante atmosférico principal, 497-98
  - efectos en la salud del, [501](#)
  - estándares de la calidad del aire para, [504](#)
  - factores de conversión para, 505
  - fuentes de, relacionadas con el transporte, [517-21](#)
  - fuentes industriales de, [513](#)
- Carbono orgánico total (COT) en aguas residuales, [424](#)
- Carcinógenos, [448](#)
- Carga de superficie, régimen de, 442-43
- Carga eléctrica, [146](#)
- Carga hidráulica, régimen de, factores de conversión para, 742
- Carga orgánica, régimen de, [467](#)
- Cartón, reciclaje de, [579](#)
- Catastrofistas, [92](#)
- Cationes, [151](#), [152](#)
- CBR, contactor biológico rotatorio, [472-73](#)
- CDD, combustible derivado de desechos, [580-81](#), [588](#), [593](#)
- CECOS International, Inc., 669
- Cedar Bog, lago (Minnesota), [307-8](#), [310-11](#)
- Célula vegetativa, [260](#)
- Central Valley Project de California, [365-66](#), [372](#), [373](#)
- Centrifugación, [444](#)
- Centros de recuperación de materiales (CRM), [586](#), 588-90
- Cero, crecimiento de población, [22](#), [25](#)
- Cero, descarga, [703](#)
- CFC, [115](#), [120](#), [497](#)
- Cianobacterias, [255](#)
- Cianofitos, [268](#)
- Ciclo hidrológico, [92](#), [179](#), [180](#), [238-42](#), [342](#), [343](#), [346-47](#), [348](#), [368](#)
- Ciclón (separador de partículas), [525-27](#)
- Ciclones, [232](#)
- en Bangladesh (1970), [94](#)
  - medición de, [88](#)
- Ciclos elementales, [313](#)
- Cigarrillos, partículas del humo de, 499
- Ciliados (cilióforos), [269](#), [270](#)
- Cinética de reacción, [189-208](#)
- constante de velocidad de reacción, efecto de la temperatura en, [193-94](#)
  - definición, [189](#)
  - diseño de reactores, principios de, [205-8](#)
  - en un sistema de crecimiento en suspensión, [461-70](#)
  - orden de reacción, [190-91](#), [204-5](#)
  - reactores, tipos de, [195-203](#), [461](#)
  - estudios típicos con trazadores de, [202-3](#)
  - flujo no ideal y estudios con trazadores de, [198-203](#)
  - tiempo de retención y, [196-98](#)
  - tipos de, [191-93](#)
  - velocidades de reacción, determinación de, [203-5](#)
- Circulación general, modelos de, de la atmósfera, [117](#)
- Cirrocúmulos, [237](#)
- Cirrostratos, [237](#)
- Cirros, [237](#)
- Citoplasma, [258-59](#), [260](#)
- Citrobacter freundii*, [275](#)
- Ciudades. *Véase* Urbanización
- Ciudades antiguas, tecnología municipal de las, [4](#)
- Civilización minoica, desagües de alcantarillas de la, [436](#)
- Cladophora*, [332](#)
- Clarificación, régimen de, 442-43
- Clarificadores, [444](#)
- secundarios, [457](#)
- Clean Air Act (1991), 593
- Clean Water Act (1977), [334](#), 433, 480, [673](#)
- Clima, [242](#)
- definición, [216](#)
  - distribución mundial del, [242-45](#)
  - mesoclima, 697-98
  - modificación por erupciones volcánicas, [92](#)
  - urbano, [247-50](#)
  - variabilidad del, [245-46](#)
- Clima, efectos en el, [699](#)
- Climas urbanos, [247-50](#)
- Climatología, [217](#), *Véase también* Clima
- Cloaca Máxima, [4](#)
- Cloración, [279](#), [397](#), [405-7](#)
- de aguas residuales, [447-48](#)
  - resolución de problemas éticos relacionados con la, [719-22](#)
- Cloración hasta el punto de cambio, [405](#)
- Cloraminación, 406
- Cloro, demanda de, [405](#)
- Cloro, dióxido de, [120](#)
- Cloro libre disponible, [405](#)
- Clorofitos, [268](#)
- Clorofluorocarbonos (CFC), [120](#), [497](#)
- efecto invernadero y, [115](#)
- Cloroformo, [298](#), [299](#)
- Cloroplastos, [266](#)
- Closing Circle, The (Commoner)*, [7](#), [35](#)
- Clostridium*, [260](#)
- perfringens*, [274](#), [275](#)
  - tetani*, [284](#)
- Coagulación, [398-401](#)
- Coagulación/floculación, [396](#), [398-401](#), [407](#)
- Cocos, [256](#)
- Códigos de ética, [719](#)
- Colectores de aguas pluviales, [437](#)
- Colectores de tela y de estera fibrosa, [530-32](#)
- Colectores húmedos, [527-30](#)
- Colectores inerciales de partículas, [525-27](#)
- Cólera, [278](#), [281](#), [284-85](#), [421](#)
- Coliformes, grupo de bacterias, [274-75](#), [287-88](#)
- Coloides, [143](#), [396](#)
- Color en aguas receptoras, 432
- Colorado, río, desviación del, [351](#)
- Columna, ecuación de difusión de, [553-55](#)
- Columna, modelos de ascensión de, [556-58](#)
- Columnas reguladoras, [412](#)

- Combustible  
 derivado de desperdicios, [580-81](#), 588, 593  
 nuclear agotado, [632-36](#)  
 recuperación de gas de rellenos sanitarios, [608-9](#)  
 valor calorífico (contenido de energía) en unidades SI y AES/británicas, 753-54  
*Véase también* Energía
- Combustible agotado, estanque de almacenamiento de, [622](#)
- Combustible, cambio de, [136](#)
- Combustible derivado de desperdicios (CDD), [580-81](#), 588, 593
- Combustible nuclear agotado, [632-36](#)
- Combustible nuclear, residuos de fabricación de, [632](#)
- Combustibles fósiles. *Véase* Carbón; Energía; Petróleo
- Combustibles, mezclado de, [136](#)
- Combustibles sintéticos, fabricación a partir del carbón, exposición a los productos de la, [74](#)
- Combustibles, volúmenes de, [66-67](#)
- Comercio de productos energéticos de Canadá, [80-82](#)
- Compactación de residuos sólidos, 573-74, 575, 598, [599](#)
- Compactadores domésticos, 581, [586](#)
- 3M, compañía, programa "La prevención de la contaminación vale la pena", [11](#)
- Compensación, punto de, [324](#)
- Compensación, reserva de, [414](#)
- Componente común, método del, para expresar concentraciones de soluciones, [155-57](#)
- Componentes, método de, de proyección de poblaciones, [26-29](#)
- Comportamiento político poco ético, 716
- Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liabilities Act (CERCLA) de 1980, 672
- Compuestos orgánicos sintéticos, producción de, [35](#)
- Compuestos orgánicos volátiles (COV), [496](#), [498](#), [510](#), [513](#)  
 fuentes relacionadas con el transporte, [517-21](#)  
*Véase también* Hidrocarburos
- Comunidades bióticas, [321-22](#)
- Concentración, factores de conversión para, [742](#)
- Concepts of Ecology* (Kormondy), [304](#)
- Conciencia pública, [7-9](#)  
 de la contaminación del agua, 485
- Conciencia pública y acción, [7-9](#), 485
- Conciencia social, [714](#). *Véase también* Ética
- Condensación, núcleos de, [235](#)
- Condiciones anaeróbicas, olores derivados de, [481](#)
- Conductividad hidráulica, control de lixiviados y, [605](#)
- Conferencia general de pesos y medidas (1960), 731
- Conferencia sobre el entorno humano (1972), [7](#)
- Confinamientos controlados, [654](#), [659-61](#), 665-70, [678](#)  
 diseño y construcción de, 667-68  
 factores que contribuyen a la seguridad, [659](#)  
 función de los, 665
- problemas de los, 668-70  
 residuos aceptables para, 665-66  
 selección y aprobación de terrenos para, [666-67](#)
- Congelación, desalinización por, [395](#)
- Conservación, [11](#)  
 del agua, [352](#), [368-69](#)
- Conservación de la materia, ley de, [179](#)
- Consideraciones estéticas en el entierro de residuos, 598-99
- Constante solar, [221](#), [304](#)
- Consumo de energía, [45](#), [50](#)  
 actual, [52-59](#), [115](#)  
 acumulación de dióxido de carbono y, [115](#)  
 crecimiento de la población y, [60](#)  
 en una selección de ciudades, [250](#)  
 energía primaria, [50](#), [511](#)  
 futuro, [60-64](#)
- Contacto, proceso de estabilización por, 459-60, [467](#)
- Contactor biológico rotatorio (CBR), [472-73](#)
- Contaminación  
 conciencia y acción públicas respecto a la, [7-8](#)  
 definición, [2](#)  
*Véase también* Aire, contaminación del; Residuos peligrosos; Perturbaciones ambientales humanas; Peligros ambientales naturales; Agua, contaminación del
- Contaminación, aspectos económicos del control de la, 700-701
- Contaminación del aire, fuentes agrícolas de la, 512-13
- Contaminación, estrategias para el control de la, [10](#), 700-714  
 aspectos económicos de, 700-701  
 estudio de caso del problema del río Niágara, 709-14  
 reglamentación, 486-87, 702-9  
*Véase también* Control
- Contaminación fecal, [274](#), [275](#), [287-88](#)
- Contaminación, modelos de dispersión de la, [552-55](#), [558-59](#)
- Contaminación térmica, [75](#)
- Contaminantes atmosféricos principales, 497-98
- Contaminantes inorgánicos, [293-96](#)
- Contaminantes orgánicos, [296](#), [299](#)
- Contaminantes primarios, [495](#)
- Contaminantes prioritarios, [644](#)
- Contaminantes secundarios, [495](#)
- Contención, método de, para rehabilitación de terrenos, 674
- Control  
 de fuentes de residuos sólidos, [610](#)  
 de la contaminación del agua  
 necesidad de, [435-36](#)  
 papel del gobierno/público en, [484-85](#)  
 tendencias en el, 486-87  
 de la eutroficación, [328-29](#)  
 de lixiviados, [604-7](#)  
 de recursos hidráulicos  
 legislativo, [361-64](#), [370](#)  
 necesidad de, [339-40](#)  
 de residuos biomédicos, [637](#)  
 del efecto invernadero, medidas para, [120-22](#)
- lluvia ácida, medidas para el control de la, [135-38](#)  
 para la contaminación del aire, [521-48](#)  
 control de emisiones de gases, [536-38](#)  
 control de emisiones de óxidos de nitrógeno, [546-47](#)  
 control de emisiones de partículas, [523-36](#)  
 control para la calidad del aire, 522-23  
 control para la calidad del aire por dilución, [547-48](#)  
 costos del, [559-60](#)  
 diagramas de flujo representativos para el proceso de recuperación, [538-46](#)  
 limpieza natural de la atmósfera, [521-22](#)  
 sistemas tecnológicos de, [98-101](#)  
*Véase también* Contaminación, estrategias para el control
- Control jurisdiccional de la contaminación del aire, 503. *Véase también* Legislación
- Convenio para el cambio del clima, [120-22](#)
- Conversión, factores de, [739-43](#)
- Conversión, problemas de, 735-37
- Coriolis, fuerza de, [229](#), [231](#), [232](#)
- Corrosión de tuberías de agua, lluvia ácida y, [134-35](#)
- Corrupción judicial, [715](#)
- Cosecha, operaciones típicas de, tasas y factores de emisión de partículas para, [512](#)
- Costo  
 de la contaminación, 700-701  
 del abatimiento de la contaminación, subsidio del, 704-5
- Costo-beneficio, análisis de, [358-61](#), [370](#)
- Crecida(s), [90](#)  
 control de, [99](#), [100](#)  
 del huracán Hazel, [95](#), [103](#)  
 del Hwang Ho (río Amarillo) en China (agosto de 1931), [94](#)  
 medición de, [88](#)  
 Mississippi, gran crecida del río (1993), [95](#)  
 modelos de, enfoques de, [104-5](#)  
 pérdidas en Estados Unidos, [97](#)  
 seguros contra, [106](#)
- Crecida, borde de, [91](#)
- Crecida, lecho de, [90](#), [91](#)
- Crecimiento económico, medidas de, [31-34](#).  
*Véase también* Industrialización; Urbanización
- Crecimiento en suspensión, sistemas de tratamiento de aguas residuales de, [457](#), 459  
 cinética de reacción de, [461-70](#)  
 en plantas de proceso dual, 473-74  
 para tratar lixiviados, 607
- Crecimiento exponencial de la población, [15](#)
- Crecimiento exponencial, fase de, de las bacterias, [263](#)
- Crecimiento logarítmico, fase de, de las bacterias, [263](#)
- Crecimiento, tasa específica de, [463-66](#)
- Creencias éticas judeocristianas, [717](#)
- Criptosporidiosis, [281](#), [286](#)
- Crisofitos, [268](#)
- Cromatóforos, [266](#)
- Crustáceos, [258](#)  
 definición, [256](#)  
 efecto de la lluvia ácida en los, [129](#)

- Cuantificación de los problemas ambientales, [11](#)
- Cuenca colectora, [321](#)
- Cultivos, efecto de la lluvia ácida en los, [132-33](#)
- Cumplimiento forzoso  
de estatutos de residuos industriales, [706](#)  
de la regulación directa, [704](#)
- Cumulonimbos, [233](#), [237](#), [239](#)
- Cúmulos, [233](#), [237](#), [238](#)
- Cuyahoga, río, [331](#)
- CWM Chemical Services, [668](#)
- Cylops, [258](#)
- Charles** (o Gay-Lussac), ley de, [170-71](#)
- Chernobyl, accidente nuclear de, [76](#), [624](#)
- Chesapeake, bahía de, [334](#)
- Chicago Board of Trade, mercado de créditos para la emisión de dióxido de azufre en el, [708](#)
- Churchill, Winston, [719](#)
- Dalton**, ley de, de las presiones parciales, [173-75](#)
- Daphnia*, [258](#)
- Darcy, ley de, [604-5](#)
- DBO carbonosa, [425-26](#)
- DBO (demanda bioquímica de oxígeno)  
carga de, [474](#), [475](#)  
de aguas residuales, [425-26](#)  
eliminación de, [450](#)  
en aguas receptoras, [432](#)
- DDT (diclorodifeniltricloroetano), [35](#), [296](#), [297](#), [299](#), [311-13](#), [639](#)
- Década Internacional del Abasto y Saneamiento del Agua, [347](#)
- Década Internacional del Abasto y Saneamiento del Agua Potable, [415](#)
- Decaimiento, tasa de, [219](#)  
ambiental, [233](#), [234](#)  
atmosférica, [548-51](#)
- Delphi, método de, [692](#)
- Demanda bioquímica de oxígeno. Véase DBO (demanda bioquímica de oxígeno)
- Demanda de agua, [384-89](#)
- Demanda media diaria de agua, [384](#)
- Demanda química de oxígeno (DQO) de aguas residuales, [424-25](#)
- Demographic Techniques* (Pellard, Yosuf y Pollard), [27](#)
- Densidad  
de residuos sólidos, [573-75](#)  
factores de conversión para, [742](#)  
unidad SI de, [734](#)
- Densidad de población global, [39-40](#)
- Denuncia, legislación sobre la, [723](#)
- Depósitos de superficie, [411-12](#)
- Depósitos flotantes, [412](#)
- Depresión primaveral del pH, [123](#), [126](#)
- Derechos de agua, [433](#)
- "Derechos" para contaminar, venta de, [708](#)
- Derechos ribereños, [339](#)
- Derrame, régimen de, [202](#), [442-43](#)
- Derrames de petróleo, [70-71](#), [111](#)
- Desalinización, [351](#), [369](#), [376](#), [392](#), [395](#)
- Desarrollo sostenido, [9](#), [113](#), [686-87](#)
- Desastres, [45](#). Véase también Peligros ambientales naturales
- Descargas térmicas en aguas receptoras, [432-33](#)
- Desecación de lodos, [477-79](#)
- Desechos de minas y molinos, [626-29](#), [631-32](#). Véase también Energía nuclear; Residuos nucleares
- Desinfección, [264](#)  
agentes, [265](#)  
de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, [447-48](#)  
tendencias en la, [486](#)  
tratamiento de agua por, [397](#), [405-7](#)
- Deslave de componentes del follaje solubles en ácido debido a la lluvia ácida, [132](#)
- Desnitrificación, [316](#)
- Desoxirribonucleico, ácido, [259-60](#)
- Desperdicios. Véase Residuos sólidos
- Después de los hechos, control de la contaminación, [10](#)
- Destilación, desalinización por, [395](#)
- Destrucción de residuos orgánicos peligrosos, [675](#)
- Destrucción térmica, [675](#)
- Desulfuración de petróleo, [136](#)
- Desulfurización de petróleo, [136](#)
- Detroit, Michigan, problemas de los incineradores en, [593-94](#)
- Diclorodifeniltricloroetano (DDT), [35](#), [296](#), [297](#), [299](#), [311-13](#), [639](#)
- Dietanolamina, proceso de, eliminación de sulfuro de hidrógeno con el, [539-40](#)
- Difusión, ecuaciones gaussianas de, para dispersión de contaminación, [552-55](#)
- Digestión anaerobia de lodos, [475-77](#)
- Digestión convencional de lodos, [475](#)
- Digestión de lodos en una etapa, [475-76](#)
- Dilución  
balances de materia en la, [182-83](#)  
control para la calidad del aire ambiental por, [547-48](#)
- Dimensión, definición, [730](#)
- Dimetilnilina (DMA), proceso de, [538-39](#)
- Dina, [87n](#)
- Dioxina, [296-98](#), [299](#)
- Disentería bacilar, [281](#), [284](#)
- Disociación de ácido, constantes de, [159](#), [160](#)
- Disolvente, [150](#), [151](#)
- Dispersiones coloidales, [145-46](#)
- Distribución del suministro de agua, [410-11](#)
- Distritos de aguas, [372](#)
- DMA, proceso de, [538-39](#)
- Dominación del entorno, actitud de, [722](#)
- Domos subterráneos de sal, [633](#)
- Donora, EUA, episodio de contaminación del aire en, [494](#)
- Down to Earth* (Eckholm), [7](#)
- DQO (demanda química de oxígeno) de aguas residuales, [424-25](#)
- Dragado, método de, para rehabilitación de terrenos, [675](#)
- Dual, proceso de tratamiento de aguas residuales, [473-74](#)
- Duplicación, tiempo de, [15](#), [21](#)
- Dureza de carbonatos, [392](#)
- Dureza del agua, [152](#), [157](#), [392](#), [408](#)
- Dureza no carbónica, [392](#)
- Ecología**, [303-36](#)  
cadena alimenticia y niveles tróficos, [311-13](#)  
ciclo del carbono, [313-14](#), [315](#)  
ciclo del fósforo, [316-20](#)  
ciclo del nitrógeno, [314-16](#), [317](#)  
ciclos de nutrientes, [313-20](#)  
conceptos introductorios de, [303-4](#)  
definición, [303](#), [304](#)  
eutroficación, [318](#), [326-34](#)  
cambios fisicoquímicos y biológicos, [327-28](#)  
control de la, [328-29](#)  
de estuarios costeros, [333-34](#)  
definición, [326](#)  
estudio de caso de los Grandes Lagos, [329-33](#)  
problema de, [326-27](#)  
flujo de energía en los ecosistemas, [304-11](#)  
comparación de productividad primaria en diferentes ecosistemas del mundo, [308-10](#)  
estimaciones de producción primaria, [306-8](#)  
más allá de los productores primarios, [310-11](#)  
limnología, elementos de, [320-26](#)  
cantidad y calidad del agua, [321](#)  
comunidades bióticas, [321-22](#)  
luz en los lagos, [322-24](#)  
temperatura y estratificación vertical de los lagos, [324-26](#)
- Ecosistemas, [303-11](#)  
definición, [246](#), [304](#)  
flujo de energía en los, [304-11](#)
- Ecosistemas terrestres, flujo de energía en los, [306-7](#)
- Ecuación hidrostática, [230](#)
- Edad de los lodos, [466](#)
- Edad Media, epidemias en la, [278](#)
- Edades, estructura de, [22-23](#)
- Eficiencia hidráulica de un tanque de sedimentación, [202-3](#)
- Efluentes, estándares de, [702](#), [703-4](#)
- Efluentes, requisitos de los, para el tratamiento de aguas residuales, [433-34](#), [440](#)
- Efluentes, reutilización de, tendencias en la, [486-87](#)
- Egipto, composición de los residuos sólidos municipales en, [573](#)
- EIA. Véase Evaluación del impacto ambiental (EIA)
- EIA, componente atmosférico de la, para una planta de energía alimentada con carbón, [696-99](#)
- EIA internacional, [695](#)
- "El contaminador paga", principio de, [657](#)
- Electrodialisis, [395](#)
- Eliminación conjunta de residuos peligrosos, [654](#), [661-62](#), [664](#)
- Eliminación de residuos sólidos. Véase Residuos sólidos
- Elliot, lago, área de explotación de minas de uranio, [626](#), [627-28](#), [632](#)
- Embalse, sistemas de, para tratamiento de aguas residuales, [452-56](#)
- Embalses, [351](#), [353](#), [411-13](#)  
para retención de aguas pluviales, [439](#)
- Emergencia, medidas de, para enfrentar peligros naturales, [103](#)

- Emergencias, reserva de agua para, [414](#), [415](#)  
 Emisiones gaseosas, control de, [536-38](#)  
 Empaques, [36](#), [569](#), [572](#)  
*End of Affluence, The* (Ehrlich & Ehrlich), [7](#)  
 Endémico, definición, [254-55](#)  
 Endotoxinas, [282](#)  
 Energía, [49-84](#)  
   consumo de, [45](#), [50](#)  
     actual, [52-59](#), [115](#)  
     acumulación de dióxido de carbono y, [115](#)  
     crecimiento de la población y, [60](#)  
     en una selección de ciudades, [250](#)  
     energía primaria, [50](#), [51](#)  
     futuro, [60-64](#)  
   contenido de los combustibles en unidades AES/británicas, [753-54](#)  
   contenido de los residuos sólidos municipales, [576-77](#)  
     recuperación de, [580-81](#)  
   densidades de una selección de combustibles, [67](#)  
   factores de conversión para, [743](#)  
   flujo en los ecosistemas, [304-11](#)  
   flujo y utilización en la cadena alimenticia, [311](#)  
   fuente necesaria para la evaporación, [241](#)  
   fuentes de energía primaria, [50-52](#)  
     disponibilidad futura de, [60-64](#)  
   impactos ambientales de la, [64-78](#)  
     de la energía nuclear, [64](#), [76-78](#)  
     de las sustancias tóxicas, [68](#)  
     del carbón, [64](#), [73-75](#)  
     del desarrollo, [64-68](#)  
     del desarrollo hidroeléctrico, [75](#)  
     del gas natural, [72-73](#)  
     del petróleo, [69](#), [70-72](#)  
     disponibilidad, [67-68](#)  
     fondo de radiación solar y energía alimenticia, [65-66](#)  
     matrices de, [69-78](#)  
     volúmenes de combustibles, [66-67](#)  
   producción de gas en los rellenos de tierras, [608-9](#)  
   producción y factores de conversión, [54](#)  
   recuperación en la incineración, [589-92](#)  
   salidas y entradas en la atmósfera, [221-29](#)  
     balance de radiación en la superficie, [224-28](#)  
     radiación solar, [221-23](#)  
     radiación terrestre, [222](#), [223-24](#)  
     uso de energía en la superficie, [228-29](#)  
     Véase también tipos específicos de energía  
 Energía alimenticia, [65-66](#)  
 Energía, capital de, [50](#)  
 Energía generada internamente, [52](#)  
 Energía hidroeléctrica, [75](#), [354](#)  
 Energía, ingreso de, [50](#)  
 Energía nuclear, [36](#)  
   impacto ambiental de la, [64](#), [76-78](#)  
   reactores de, [629-31](#), [636](#)  
     accidentes en, [76](#), [624](#)  
   uso más económico y eficiente de la, [63](#)  
 Energía solar, [341-42](#)  
   ciclo hidrológico y, [342](#)  
 Energía suministrada comercialmente, consumo de, [53](#), [54](#)  
 Energía, transferencias verticales de, [225](#)  
 Enfermedad endémica, [280](#)  
 Enfermedades, [283-99](#)  
   de las minas de carbón, [73](#)  
   de transmisión por agua, calidad del agua y, [4](#), [274-75](#), [283-88](#), [395-96](#), [422](#)  
   de transmisión por aire, [288-90](#)  
   de transmisión por insectos y roedores, [290-92](#)  
   no infecciosas, [292-99](#)  
   por contaminantes inorgánicos, [293-96](#)  
   por contaminantes orgánicos, [296-98](#), [299](#)  
   residuos sólidos y, [577-78](#)  
   teoría del miasma de las, [278](#)  
   transmisión de, [283](#)  
 Enfermedades no infecciosas, causas de los contaminantes inorgánicos, [293-96](#)  
 contaminantes orgánicos, [296-98](#), [299](#)  
 Enfermedades, teoría de los gérmenes de las, [278-79](#)  
 Enfoque industrial de los peligros naturales, [98-101](#)  
 Enfoque preindustrial ante los peligros naturales, [98](#)  
 Enfriamiento adiabático en seco, tasa de, [233](#), [234](#)  
*Entamoeba histolytica*, [270](#), [285](#)  
*Enterobacter aerogenes*, [275](#)  
 Entorno jurídico, comportamiento poco ético en el, [715](#)  
 EPA, [7](#), [130-32](#), [390](#), [391](#), [493](#), [502n](#), [504](#), [567](#), [572](#), [620-21](#), [628-29](#), [637](#), [641](#), [642](#), [644](#), [645](#), [650](#), [662](#), [664](#)  
 Epidemias, [254](#), [255](#), [278-82](#), [291](#)  
 Epidemiología, [278-99](#)  
   definición, [254](#), [255](#)  
   enfermedades, [283-99](#)  
     de las minas de carbón, [73](#)  
     de transmisión por agua, calidad del agua y, [4](#), [274-75](#), [278-79](#), [283-88](#), [395-96](#), [422](#)  
     de transmisión por aire, [288-90](#)  
     de transmisión por insectos y roedores, [290-92](#)  
     no infecciosas, [292-99](#)  
     por contaminantes inorgánicos, [293-96](#)  
     por contaminantes orgánicos, [296](#), [299](#)  
     residuos sólidos y, [577-78](#)  
     teoría de los gérmenes de las, [278-79](#)  
     teoría del miasma de las, [278](#)  
     transmisión de, [283](#)  
   patógenos, [279-83](#), [288](#), [422-23](#), [432](#), [577-78](#)  
   saneamiento y salud y, [278-79](#)  
 Epilimnio, [320](#), [325-26](#)  
 Equilibrio, transferencia gas-líquido en el, [176-78](#)  
 Equivalente de población, [428](#)  
 Eras glaciales, [242-45](#), [247](#)  
 Erg, [87](#)  
 Erie, lago, [326](#), [328](#), [329](#), [331](#), [332](#), [333](#), [709-10](#)  
 Erupciones volcánicas, [92](#), [103](#), [508-9](#)  
*Erythrosporidium*, [407](#)  
 Escarchado, [237](#)  
 Escombros, [568](#). Véase también Residuos sólidos  
 Escurrimiento, razón de, [242](#)  
*Escherichia coli*, [261](#), [262](#), [275](#)  
 Esfericidad, [149-50](#)  
 Esmog, [494](#), [506](#)  
   en Los Ángeles, [495-96](#), [551](#)  
   Véase también Aire, contaminación del  
 Espirilos, [256](#)  
 Esporangióforo, [268](#)  
 Esporas, [260](#)  
 Esporozoarios, [269](#), [271](#)  
 Espuma en aguas receptoras, [432](#)  
 Esquistosomiasis, [280](#), [281](#), [286-87](#)  
 Estabilidad atmosférica, [233](#), [549-52](#), [556-58](#)  
 Estabilización, estanque de, [453-56](#)  
 Estado estacionario, [180](#)  
 Estado no estacionario, [181](#)  
 Estados Unidos  
   combustible nuclear agotado en, eliminación del, [633](#)  
   consumo y reservas de petróleo en, [53-55](#)  
   contaminación del río Niágara, [709-14](#)  
   conversión en abono en, [595](#), [596](#)  
   datos de peligros naturales de, [96-97](#)  
   emisiones nacionales de contaminantes primarios del aire en, [507](#)  
   estándares de calidad del aire ambiental en, [503](#), [504](#)  
   estándares para el agua potable en, [390](#), [391](#)  
   informe de emisiones industriales de sustancias químicas tóxicas en, [547-48](#)  
   National Environmental Policy Act (NEPA), [688](#)  
   operaciones de extracción de uranio en, [628](#)  
   pirámide de población de, [22-23](#)  
   precipitación anual en, [342-43](#), [344](#), [345](#)  
   recursos hidráulicos de, control legislativo de, [362-64](#)  
   residuos peligrosos en  
     fuentes de, [648](#)  
     identificación de, [640-45](#)  
   residuos sólidos en  
     cambios en los, [569-71](#)  
     cantidades generadas en, [569](#), [571-72](#)  
     composición de los, [573](#)  
     reciclaje de, [578-80](#)  
   tratamiento y eliminación de residuos químicos en, [662-64](#)  
   uso de agua en, [348](#)  
   total, por fuente, [393](#), [394](#)  
 Estallidos durante la exploración en busca de petróleo, [70](#)  
 Estándares  
   ambientales, [701-2](#)  
   de calidad del agua, [389-90](#), [391](#), [433-35](#)  
   ambiental, [503-6](#)  
   de calidad del aire, [492-93](#)  
   de efluentes, [702](#), [703-4](#)  
   de ozono, [502n](#)  
   morales, [724-25](#)  
   para emisión de radón de pilas de desechos de minas, [628-29](#)  
 Estándares ambientales y de efluentes, [701-2](#)  
 Estanques de oxidación facultativos, [453](#)  
 Estatutos  
   sobre la contaminación del agua, [485](#)  
   sobre residuos industriales, [706](#)  
 Estatutos municipales sobre la contaminación del agua, [485](#)  
 Estera fibrosa, colectores de, [530-32](#)  
 Esterilización, [264-65](#)  
 Estratificación térmica de los lagos, [324-26](#)



- Estratopausa, [219](#)  
 Estratos, [237](#), [239](#)  
 Estratosfera, [219-20](#). Véase también Ozono  
 Estuarios costeros, eutroficación de, [333-34](#)  
 Ética  
 ambiental, [715-25](#)  
 actitudes cambiantes del público y, [722-24](#)  
 ética en la sociedad y, [715-16](#)  
 las personas como problema, [718](#)  
 perspectiva histórica de, [716-17](#)  
 resolución de problemas éticos, [719-22](#)  
 códigos de, [719](#)  
 definición, [718](#)  
 teorías de, [718-19](#)  
 Ética "basada en los deberes", [718-19](#)  
 Ética "basada en los derechos", [718](#)  
 Ética "utilitaria", [719](#)  
 Eucariotas, [255](#), [266](#)  
 Euglena, [269-70](#)  
 Euglenofitos, [268](#)  
 Europa occidental, tratamiento y eliminación de residuos químicos en, [657-61](#)  
 Eutroficación, [35](#), [318](#), [326-34](#)  
 cambios físicoquímicos y biológicos, [327-28](#)  
 control de la, [328-29](#)  
 de estuarios costeros, [333-34](#)  
 definición, [326](#)  
 en el embalse de Occoquan, [376](#)  
 estudio de caso de los Grandes Lagos, [329-33](#)  
 problema de, [326-27](#)  
 Eutroficación cultural, [326](#), [328](#)  
 Eutroficación natural, [326](#)  
 Evaluación del impacto ambiental (EIA), [687-99](#)  
 componente atmosférico de la, para planta generadora alimentada con carbón, [696-99](#)  
 críticas a la, [695-96](#)  
 de la contaminación del río Niágara, [709-14](#)  
 definición, [687](#)  
 diseño de, [692-95](#)  
 internacional, [695](#)  
 perspectiva histórica de la, [687-89](#)  
 proceso de, elementos del, [689-92](#)  
 proyectos que pueden requerir una, [687](#)  
 Evaluación/recargo, fórmula de, para cargos por servicios, [707-9](#)  
 Evaporación, [341-42](#)  
 ciclo hidrológico y, [240](#), [241-42](#)  
 requisitos para la, [241](#)  
 Evapotranspiración, [241-42](#)  
*Everybody Does It* (Gabov), [716](#)  
 Excavación, método de, para rehabilitación de terrenos, [675](#)  
 Excusados incineradores, [482](#), [484](#)  
 Excusados químicos, [482](#), [484](#)  
 Excusados sin agua, [482](#), [484](#)  
 Exotoxinas, [282](#)  
 Extracción, método de, para rehabilitación de terrenos, [674-75](#)  
**Factor limitante**, [316](#)  
 Factores económicos con influencia en las decisiones acerca de la contaminación en el río Niágara, [713](#)  
 Factores políticos  
 decisiones acerca de la contaminación del río Niágara y, [714](#)  
 influencias en los recursos hidráulicos, [364-68](#)  
 grupos de presión, [364-65](#)  
 políticas de administración, [365-68](#)  
 Fase estacionaria del crecimiento bacteriano, [264](#)  
*Federal Register*, [621](#), [641](#)  
 Fenitrotión, [296](#), [298](#), [299](#)  
 Fertilidad, [22](#), [23](#)  
 de reposición, nivel mundial de, [29](#)  
 tasa de fertilidad total, [22](#), [23](#), [24](#)  
 Fertilizantes sintéticos, [35](#)  
 Ferrocarril, transporte de residuos sólidos por, [584-85](#)  
 Fiebre amarilla, [281](#), [291](#)  
 Fiebre ondulante, [281](#)  
 Fijadores de nitrógeno simbióticos, [315-16](#)  
 Fijar, diluir y dispersar, filosofía de, [661-62](#)  
 Filtración directa, [396](#)  
 Filtración en medios granulares, [444](#)  
 Filtración, tratamiento de agua por, [396-97](#), [400-405](#)  
 Filtro de tela de chorro pulsante (FTCHP), costos de capital y de operación de, [559](#), [560](#)  
 Filtros  
 de bandas, [477](#)  
 de placas y marcos, [477](#)  
 lixiviadores, [470-72](#), [473](#)  
 Filtros de arena lentos, [401](#)  
 Filtros de arena rápidos, [401-3](#)  
 Filtros de bandas, [477](#)  
 Filtros lixiviadores, [470-72](#), [473](#)  
 Final de la tubería, control de la contaminación al, [10](#)  
 Física y química, [142-215](#)  
 de cinéticas de reacción, [189-208](#)  
 constante de velocidad de reacción, efecto de la temperatura en la, [193-94](#)  
 definición, [189](#)  
 diseño de reactores, principios de, [205-8](#), [461-70](#)  
 reactores, tipos de, [193-203](#), [461](#)  
 tipos de, [191-93](#)  
 velocidades de reacción, determinación de, [203-5](#)  
 de los balances de materia, [179-89](#), [205](#)  
 concepto de, [179-83](#)  
 ejemplos de, [184-89](#)  
 pautas para hacer, [183](#)  
 de los gases, [169-79](#)  
 ley de Boyle, [169-70](#), [171](#)  
 ley de Charles (o Gay-Lussac), [170-71](#)  
 ley de Dalton de las presiones parciales, [173-75](#)  
 ley de los gases ideales, [172](#)  
 transferencia gas-líquido, [175-79](#)  
 de soluciones, [150-69](#)  
 acidez y alcalinidad, [157](#), [166-69](#)  
 capacidad amortiguadora de las aguas naturales, [163-65](#)  
 composición de, métodos para expresar, [152-57](#)  
 concentración en términos de un componente común, [155-57](#)  
 escala de pH, [161-62](#)  
 reacciones ácido-base, [158-69](#)  
 sistema carbónico, [162-63](#)  
 solubilidad y, [150-52](#)  
 dispersión de partículas, [142-50](#)  
 coloidales, [145-46](#)  
 concentraciones de partículas, métodos para expresar, [146-47](#)  
 sedimentación de partículas en un fluido, [147-50](#)  
 tamaño, forma y distribución de partículas, [143-45](#)  
 Fisión binaria de células bacterianas, [262](#)  
 Fitoplancton, [320](#), [321](#), [323](#), [325](#)  
 Flagelados (*Mastigophora*), [269](#)  
 Flagelos, [257-58](#)  
 Floculación, [398-99](#), [400](#)  
 Flood Control Act, de 1936, [97](#)  
 Floraciones algáceas, [266](#), [321](#), [327](#), [328](#), [333](#)  
 Florida, cayos de, [334](#)  
 Florida Power and Light Corporation, [78](#)  
 Florida, residuos sólidos estimados generados per cápita en (1990), [571](#)  
 Flotación, [444](#)  
 Fluido, sedimentación de una partícula en un, [147-50](#)  
 Flujo completo, tiempo de, [196-98](#)  
 Flujo continuo, reactor de, [205-8](#)  
 Flujo por tierra de aguas residuales, [452](#), [455](#)  
 Flujo, reactor de, [195-96](#), [197](#)  
 Flujo solar específico, [304](#)  
 Flúor  
 efectos en la salud y fitotóxicos del, [501](#), [502](#)  
 efectos en los materiales, [503](#)  
 estándares de calidad de aire ambiental para, [503](#)  
 Fluorosis, [502](#)  
 Fluoruro, [397](#)  
 estándares de calidad de aire ambiental para, [504](#)  
 Fondo de radiación solar, [65-66](#)  
 Fosfatos, [318](#)  
 Fósforo, ciclo del, [316-20](#)  
 Fósforo inorgánico, [318](#), [319](#)  
 Fósforo orgánico particulado, [318](#)  
 Fósforo, proceso de eutroficación y, [327](#), [376](#), [378](#)  
 Fosos absorbentes, [483](#)  
 Fotoautótrofos, [261](#)  
 Fotosíntesis, [304](#), [305](#), [310](#), [313](#)  
 Fracción molar, [153](#)  
 Francia  
 composición de residuos sólidos municipales en, [573](#)  
 control del agua en, [364](#)  
 Fricción, [229](#)  
 Front, presa, [372](#)  
 Fuegos domésticos, [510](#)  
 Fuente, programas de separación en la, para residuos sólidos, [586-87](#)  
 Fuente, reducción en la, [578](#)  
 Fuentes comerciales de la contaminación del aire, [511](#)  
 Fuentes domésticas de contaminación del aire, [510-11](#)  
 Fuentes industriales de contaminación del aire, [513-17](#)

- Fuentes naturales de contaminación del aire, 508-10
- Fuerza deflectora de la rotación de la Tierra, 229
- Gas natural**  
 abasto en Canadá, 80, 81  
 impacto ambiental del, 72-73  
 sulfuroso, eliminación selectiva de sulfuro de hidrógeno del, 539-40  
*Véase también* Energía; Metano
- Gas natural licuado (GNL), 73
- Gases, 169-79  
 en aire seco en atmósferas bajas, 217-18  
 en suelos, 271  
 generados por rellenos de tierras, 599  
 rellenos sanitarios, 608-9  
 lavado natural de, de la atmósfera, 522  
 leyes de los gases, 169-75  
 ideales, 172  
 ley de Boyle, 169-70, 171  
 ley de Charles (o de Gay-Lussac), 170-71  
 ley de Dalton de las presiones parciales, 173-75  
 participantes en el crecimiento bacteriano, 261  
 solubilidad en líquidos, 151  
 transferencia gas-líquido, 175-79  
 ley de Henry, 175-79  
 ley de Raoult, y presión de vapor, 175
- Gases de combustión, desulfurización de, 136
- Gases ideales, ley de los, 172
- Gasto, factores de conversión para, 741-42
- Gay-Lussac, ley de, 170-71
- General Accounting Office, informe sobre la lluvia ácida de la, 137
- Gérmenes, teoría de los, de las enfermedades, 278-79
- Giardia*, 269  
*lamblia*, 286
- Giardiasis, 281, 286
- Gigantismo urbano, tendencia hacia el, 38-39
- Glaciares, clima y, 247
- Global 2000 Report to the President of the United States* (Barney), 44
- Global 2000 Revised*, 44-45
- Gobierno  
 control de la contaminación del agua por el, 484-85  
 influencia en la ética, 717-18  
 prevención de peligros naturales y, 104  
 regulación, 102, 137, 480-81, 485, 486-87, 518-19, 599-600, 702-9  
 respuesta a los desastres naturales, 96, 102  
*Véase también* Legislación
- Gran Bretaña. *Véase* Reino Unido
- Grandes empresas, proyectos de desarrollo hidráulico y conflictos con las, 365.  
*Véase también* Industria
- Grandes Lagos, los, 313, 328, 329-33, 364  
 cambios en las características químicas de las aguas en, 331-32  
 datos morfométricos de, 329  
 eutroficación, estudio de caso de, 329-33  
 sustancias químicas tóxicas en, 709-11
- Gravimétrico, procedimiento, 146-47
- Gravitación, 229
- Greater Detroit Resource Recovery Authority (GDRRA), 593
- GSB (*Gesellschaft zur Beseitigung von Sondermüll*), centro, 657, 658
- Guide for Infectious Waste Management* (U.S. EPA), 637
- Guidelines for the Handling and Disposal of Biomedical Wastes* (Ontario Ministry of the Environment), 637
- Harmon**, fórmula de, 436-37
- Hartz, montañas, bosques de las, 130
- Havel, Vaclav, 725
- Hazardous and Solid Waste Amendments, de 1984, 664
- Helsinki, Finlandia, composición de residuos sólidos municipales en, 573
- Henry, ley de, 175-79, 536
- Hepatitis infecciosa, 281, 285
- Heterótrofo, definición, 306
- Heterótrofos exigentes, 261
- Hexaclorofene, 297
- Hidrocarburos, 71, 72, 111, 495-96  
 como contaminante atmosférico principal, 497, 498  
 fuentes comerciales de, 511  
 fuentes de, relacionadas con el transporte, 517-21
- Hidrocarburos aromáticos polinucleares (APN), 74
- Hidrógeno, sulfuro de, 72-73  
 eliminación selectiva del gas natural sulfuroso, 539-40  
 fuentes industriales de, 513  
 lavado natural del, de la atmósfera, 522
- Hidrología, 242
- Hidrosfera, impactos ambientales en la de la industrialización, 42, 43  
 de la urbanización, 41  
 del uso y desarrollo de fuentes de energía, 69-78  
*Véase también* Agua, contaminación del; Recursos hidráulicos; Agua, abasto de
- Hidroxiapatita, 318
- Hidróxido, alcalinidad de, 166, 167
- Hierro, producción de, emisiones de partículas de la, 514
- Hifas, 266, 268
- Hipolimnia, 320, 325, 326
- "Hondonada polvorienta", condiciones de, 508
- Hongos, 256, 257, 265, 266-69  
 clasificación de, de suelos y acuáticos, 269  
 conversión en abono y, 272, 595  
 definición, 256  
 en la atmósfera, 275, 276  
 en suelos, 271-72
- Hongos saprófitos, 266
- Hospitales, residuos de, 637
- Hoya tributaria, 321
- Hoyas tributarias, protección de, estudio de caso de, 338, 376-79
- Humedad, 235-38, 239
- Humedad absoluta, 235
- Humedad, contenido de, de residuos municipales sólidos, 571, 573, 574
- Humedad, deficiencia de, medidas de la, 89
- Humedad específica, 235
- Humedad, razón de la mezcla de  $x$ , 235
- Humedad relativa, 235, 236
- Humus*, 271
- Huracán Hazel (1954), 95, 103
- Hurón, lago, 329, 332
- Hwang Ho (Río Amarillo), crecidas del, en China (agosto de 1931), 94
- Iceberg**, 351
- Impactos humanos  
 de la industrialización, 42, 43  
 de la urbanización, 42  
 del uso y desarrollo de fuentes de energía, 69-78
- Impactos socioeconómicos, predicción de, 690
- Imperio romano, 4
- Ímpetu del crecimiento de la población mundial, 29-30
- Incendios, domésticos y forestales, 510
- Incendios forestales, 510
- Incendios, reserva para combate de, 414, 415
- Incineración, 589-95  
 de lodos desecados, 477-79  
 de residuos biomédicos, 637  
 de residuos peligrosos, 677  
 de residuos químicos, 653, 654, 657  
 problemas asociados con la, 593-94  
 prospectos futuros de la, 610-11  
 recuperación de energía en la, 589-92  
 reducción de volumen por, 591-92  
 regulación de la, 480-81  
 salud pública y residuos de la, 577-78  
 tipos de incineradores, 589-91, 592
- Incineradores de alimentación intermitente, 589
- Indicadores, organismos, 274-75, 287
- Industria, 383  
 crecimiento anual de la, 33-34
- Industrial Toxics Project, 650
- Industrialización, 4, 14, 30-36  
 dilema de la, 44-45  
 efecto multiplicador o de onda expansiva, 33  
 impacto ambiental de la, 42-43  
 medidas de crecimiento económico y, 31-34  
 residuos sólidos y  
 cambios en los, 569  
 composición de los, 572  
 tecnología de producción y, 35-36
- Industrias agrícolas, 35
- Inestabilidad, 233
- Infección, definición, 280
- Infiltración lenta, sistemas de, 452
- Infiltración rápida, sistemas de, 452
- Infrarroja, radiación, 221
- Ingeniería, profesión de, ética y, 715, 719, 723-24
- Insecticidas agrícolas, 512-13
- Insectos, enfermedades de transmisión por, 290-91, 292
- Instalaciones externas, eliminación de residuos peligrosos en, 653-54
- Instalaciones médicas, residuos de, 637
- Institution of Engineers, de Australia, 723
- Insurance Advisory Organization, 414
- Integración, método de, para determinar el orden de reacción para un RTFT, 204-5
- Integrated Solid Waste Management* (Tchobanoglous *et al.*), 596
- Integridad, desarrollo sostenido e, 686
- Interacción de sistemas, 2-3

- Intercambio iónico, [408](#)
- Intereses especiales, grupos de, desarrollo de recursos hidráulicos y, [364-65](#)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), [117](#)
- International Joint Commission (IJC) para Canadá y Estados Unidos, [512-13](#)
- Inventario ambiental, [687](#)
- Inventario de Descargas de Tóxicos (EUA), [548](#)
- Invernadero, efecto, [71](#), [112](#), [113-19](#), [224](#)  
conclusiones acerca del, [121-22](#)  
efectos del, [115-19](#)  
medidas de control para el, [120-22](#)  
situación actual, [113-15](#)
- Inversión por advección, [551](#)
- Inversión por drenaje, [551](#)
- Inversiones, [234](#), [550-51](#)
- Inversiones de superficie, [551](#)
- Inyección de piedra caliza en quemadores de etapas múltiples (ICQM), [136](#)
- Iones, [151](#)
- Ionización del agua, [159-61](#)
- Irrigación, [383](#)  
métodos de, [369](#)  
por aspersión, [452](#)
- Irrigación por aspersión e infiltración, [452](#), [455](#)
- Irrigación por goteo, [369](#)
- Isla térmica urbana, [249-50](#)
- Islas térmicas urbanas, [249-50](#)
- Isopletas, [342](#)
- Kant**, Immanuel, [718-19](#)
- Kawartha, sistema de lagos, [329](#)
- Kilowatt-hora, [221n](#)
- Labrado de madera**, operaciones de, emisiones de partículas de las, [515](#)
- Lactobacilos, [261](#)
- Lagos  
eutrofización de, [35](#), [318](#), [326-34](#)  
luz en, [322-24](#)  
sistema carbónico cerrado con sólidos en, [164](#)  
temperatura y estratificación vertical de, [324-26](#)  
*Véase también* Limnología, elementos de; lagos específicos
- Lagos mesotróficos, [326](#)
- Lagos oligotróficos, [326](#), [327](#)
- Laguna anaeróbica, [453](#), [455](#)
- Lagunas aireadas, [453](#), [454](#), [455](#)
- Lampreas en los Grandes Lagos, [331](#), [332](#), [333](#)
- Latencia, fase de, en el crecimiento bacteriano, [263](#)
- Lavado a contracorriente, [402-3](#)
- Lavado en seco, [541-42](#)
- Lavado en seco, intervalo de emisiones del, [511](#)
- Lavadores, [527-30](#), [536-37](#), [539-46](#)  
para lavado seco, [541-42](#)  
sistema de lechada de cal/piedra caliza, [540-41](#), [559](#), [560](#)  
Venturi, [529-30](#)
- LDR. *Véase* Regiones menos desarrolladas (R-D)
- Lecho fluidizado, combustión en, [136](#)
- Legionarios, enfermedad de los, [290](#)
- Legislación, [495](#), [620](#), [688](#)  
contaminación del río Niágara y, [714](#)  
controles para recursos hidráulicos, [361-64](#), [370](#)  
denuncia, [723](#)  
para controlar la contaminación, [702-9](#)  
para el control de residuos sólidos, [61](#)  
Superfund, [663](#), [672](#)  
*Véase también* Control; Regulación gubernamental
- Leopold, matriz de, [692](#), [693](#)
- Levaduras, [266](#), [267](#), [269](#)
- Límite, capa, [220](#)  
sobre una ciudad, [248-49](#)
- Limits to Growth, The (Meadows)*, [7](#)
- Limnología, elementos de, [320-26](#)  
cantidad y calidad del agua, [321](#)  
comunidades bióticas, [321-22](#)  
luz en los lagos, [322-24](#)  
temperatura y estratificación vertical de los lagos, [324-26](#)
- Limpieza natural de la atmósfera, [521-22](#)
- Limpieza química del carbón, [136](#)
- Líquidos, ley de Henry de los gases disueltos en líquidos, [175-79](#)
- Lisímetro, [241](#)
- Litosfera, impactos ambientales en la de la industrialización, [42](#), [43](#)  
de la urbanización, [41-42](#)  
del uso y desarrollo de fuentes de energía, [69-78](#)
- Lixiviado, [578](#), [599](#), [600-608](#)  
cantidad de, [600-604](#)  
características del, [600](#), [601](#)  
control del, [604-607](#)  
en un confinamiento controlado, [659](#)  
tratamiento de, [607-8](#)  
tratamiento combinado, [670](#)  
tratamiento por separado, [670-71](#)  
y eliminación de residuos peligrosos, [670-71](#), [678](#)
- Locke, John, [718](#)
- Lodos  
activados con oxígeno, [460](#), [467](#)  
activados convencionales, [457](#), [459](#), [467](#)  
crudos, [441](#)  
deseccación de, [184-85](#)  
manejo de, tendencias en el, [487](#)  
procesamiento de, [474-79](#)  
símbolos y unidades de uso frecuente para, [746-47](#)  
secado de, [185-86](#)
- Lodos activados convencionales, proceso de, [457](#), [459](#), [467](#)
- Lodos activados residuales, [457](#)
- Lodos crudos, [441](#)
- Lombrices intestinales, [281](#)
- Londres, Inglaterra, contaminación del aire en, [292-93](#), [493](#), [494](#)
- Longitud, factores de conversión para la, [739-40](#)
- Los Ángeles  
esmog en, [495-96](#), [551](#)  
terremoto en (1994), [95](#)
- Lossing Ground (Eckholm)*, [7](#)
- Love, canal, [638](#), [670-71](#), [711](#)
- Lowry-Bronsted, definición de ácido-base de, [158-59](#)
- Luz en los lagos, [322-24](#)
- Luz visible, banda de ondas de, [221](#)
- Llovido, [522](#)
- Lluvia ácida, [2-3](#), [36](#), [112](#), [122-37](#), [295](#), [497](#), [511](#)  
áreas afectadas por la, [128-29](#)  
efectos de la, [123-35](#)  
en aguas subterráneas, materiales y construcciones, [133-35](#)  
en ecosistemas terrestres, [129-33](#)  
en sistemas acuáticos, [123-29](#)  
fuentes y distribución de, [122-23](#)  
medidas de reparación y control, [135-38](#)  
naturaleza del problema, [122](#)
- Macrofitos**, [322](#)
- Malaria, [281](#), [290](#)
- Manifiesto del impacto ambiental (MIA), [687](#), [690](#), [691](#), [696](#)
- Máquinas, energía de, crecimiento de la, [50](#), [51](#)
- Mar, nivel del, cambio climático y, [247](#)
- Marco espacial de la EIA, [691](#)
- Marcos temporales de las EIA, [690-91](#)
- Marine Fisheries Service, [374-75](#)
- Masa contra peso, [732-35](#)
- Masa, balances de. *Véase* Materia, balances de Masa, factores de conversión para la, [741](#)
- Masa/masa (masa de soluto por masa de solución), [152-53](#)
- Masa/volumen (masa de soluto por volumen de solución), [152](#), [154](#)
- Mastigóforos, [269](#), [270](#)
- Materia, balances de, [179-89](#), [205](#)  
concepto de, [179-83](#)  
ejemplos de, [184-89](#)  
pautas para hacer, [183](#)
- Materia orgánica  
en aguas receptoras, [432](#)  
en aguas residuales, [424-25](#)  
*Véase también* DBO (demanda bioquímica de oxígeno)
- Materia particulada  
efectos en la salud, [295-96](#), [498-99](#), [500](#)  
eliminación de, en el tratamiento del agua, [396](#), [397-405](#)  
estándares de calidad del aire ambiental para, [504](#)  
fuentes de, [510](#)
- Materiales, efectos de la contaminación del aire en los, [503](#)
- Materiales para la construcción, efectos de la lluvia ácida en los, [135](#)
- Matrices del impacto ambiental para la energía, [69-78](#)  
carbón, [64](#), [73-75](#)  
desarrollo hidroeléctrico, [75](#)  
energía nuclear, [64](#), [76-78](#)  
gas natural, [72-73](#)  
petróleo, [69](#), [70-72](#)  
para urbanización e industrialización, [40-43](#)
- Mauna Loa Observatory, [113-114](#)
- Mayordomía, concepto de, [723](#)
- "Media de oro", ética de la, [718](#)
- Medical Waste Tracking Act (MWTA), [636-37](#)
- Medición de peligros naturales, [87-89](#)
- Medidas técnicas de control para perturbaciones ambientales de origen humano, [138](#)

- Medio Oriente  
recursos petrolíferos, 55-57  
urbanización temprana en el, 36
- Mejoramiento ambiental bruto (MAB), 31, 32
- Membrana citoplásmica, 258
- Membranas en rellenos seguros, 667
- Mendota, lago (Wisconsin), 307, 308
- Mercalli, escala de, modificada, 87, 88, 89
- Mercurio, envenenamiento por, 292, 295, 296
- Mesoclima, definición de, 697-98
- Mesófilos, 261
- Mesopausa, 220
- Mesosfera, 220
- Metahemoglobinemia, 35, 295
- Metales ferrosos, reciclado de, 580
- Metales, industria de los, impacto ambiental de la, 43
- Metalimnio, 320, 325
- Metano  
efecto invernadero y, 115  
generado por rellenos de tierras, 599, 608  
*Véase también* Gas natural
- Meteorología, 217-42  
agua en la atmósfera, 235-42  
ciclo hidrológico, 179, 180, 238-42, 342, 343, 346-47, 348, 368  
humedad y precipitación, 235-38, 239  
de la contaminación del aire, 548-52  
definición, 217  
definición del mesoclima, 697-98  
propiedades atmosféricas fundamentales, 217-21  
composición y estado físico, 217-19  
estado térmico y eléctrico, 219-21  
salidas y entradas de energía, 221-29  
balance de radiación superficial, 224-28  
radiación solar, 65-66, 221-23, 304-5  
radiación terrestre, 222, 223-24  
uso de energía en la superficie, 228-29  
turbulencia y estabilidad, 232-34, 549-52, 556-58  
*Véase también* Tiempo meteorológico
- Meteorología: viento, 229-32
- México, pirámide de la población en, 22, 23
- Mezclado con acumulación, 186-89
- Miasma, 278
- Micelio, 257, 266, 267, 268
- Micosis pulmonar, 290
- Microbiología, 255-77  
aplicada, 271-77  
de suelos y residuos sólidos, 271-72  
del agua, de aguas residuales y de organismos indicadores, 273-75  
del aire atmosférico y de interiores, 275-77  
definición, 254, 255  
fundamentos de, 255-71  
*Véase también* Algas; Bacterias; Hongos; Protozoarios; Virus
- Microbiología aplicada, 271-77  
de la atmósfera y del aire de interiores, 275-77  
de suelos y residuos sólidos, 271-72  
del agua, aguas residuales y organismos indicadores, 273-75
- Microbios, nomenclatura de, 256
- Microorganismos  
clasificación de, 255-56  
conversión en abono y, 595  
en aguas residuales, 422-23  
tratamiento de residuos orgánicos peligrosos con, 677-78
- Michigan, lago, 329, 331, 332
- Migración neta, 15, 16
- Milibar, 219
- Mill, John Stuart, 719
- Minas, seguridad en las, 73
- Minería a cielo abierto, 73
- Minería, impacto ambiental de la, 42, 43  
de carbón, 73-75  
de materiales radiactivos, 76  
desechos nucleares; 628-29  
uranio, 625-28
- Minimata (Japón); bahía de, envenenamiento por mercurio en la, 292
- Mírex, 296, 298, 299
- Miscibilidad de soluciones, 151
- Mississauga, Ontario, descarrilamiento de tren y evacuación en (1979), 95
- Mississippi, río, gran crecida del (1993), 95
- Modelos de computadora para las estructuras del control de aguas, 353-54
- Mohos, 266, 269
- Mol, definición dentro de la ingeniería de, 153n
- Molalidad, 153
- Molaridad de una solución, 154
- Molinos de alimentos, granos y cereales, emisiones de partículas de, 514-15
- Moral  
definición, 718  
desarrollo de la, 724-25  
*Véase también* Ética
- Moralidad. *Véase* Ética
- Mortalidad. *Véase* Muerte(s) y tasas de mortalidad
- Mosa, valle del (Bélgica), esmog en el, 494
- Motilidad, bacterias con, 257-58
- Movimiento de la atmósfera baja, 229-32
- Mucor, 272
- Muerte o menguante, fase de, de las bacterias, 264
- Muerte(s) y tasas de mortalidad  
de las áreas y regiones principales del mundo (1965-1970), 279  
distribución porcentual por causa de, 292, 293  
en desastres naturales de gran magnitud, 94-95, 96-97  
en las R+D, 18, 19, 20  
en las R-D, 18-20
- Multas, 704
- Mycobacterium tuberculosis*, 289
- Nacimiento, tasas de, en las regiones más y menos desarrolladas, 18, 19  
*Véase también* Población, crecimiento de la
- Naciones Unidas, 7-8, 347, 415  
estudio de las tendencias mundiales de mortalidad, 292, 293
- Nadador, comezón del, 287-88
- National Energy Board (Canadá), 79
- National Environmental Policy Act (NEPA, 1970), 688
- National Fire Protection Association (NFPA), 414
- National Pollutants Release Inventory (Canadá), 548
- National Reclamation Act, de 1902, 367
- Negocios, comportamiento no ético en los, 715
- New York Times Index*, 97
- Newton, segunda ley de, 229
- Niágara, cataratas del, 297
- Niágara, río, contaminación del, 709-14  
abatimiento, iniciativas para el, 712-13  
decisiones ambientales, factores que influyen en las, 713-14  
naturaleza del problema, 709-11  
vigilancia de, 712
- Niágara, río, Remedial Action Plans (RAP), 713
- Niagara River Toxics Committee (NRTC), 712
- Niagara River Toxics Management Plan* (NRTMP), 712
- Nimboestratos, 237
- Nitratos y nitritos, 35, 295, 296, 316
- Nitrificación, 316
- Nitrobacter*, 316
- Nitrosomonas*, 316  
*europae*, 262
- Nivel de vida, 45  
mejoras al, 3-4
- Nivel freático, 342
- Niveles tróficos, 306, 311  
cadena alimenticia y, 311-13
- "No en el patio de mi casa", síndrome de, 678, 689-90, 703
- Normalidad de una solución, 154-55
- Norte, el. *Véase* Regiones más desarrolladas (R+D)
- Norte, mar del, reservas de petróleo en el, 62
- Norteamérica. *Véase* Canadá; Estados Unidos
- NPA, nitrato de peroxiacetilo, 496, 497, 498
- NTU, 146
- Nube(s)  
capa de, 237  
cúmulos y cumulonimbos, 233, 237, 238  
precipitación desde las, 237
- Nubes, cubierta de, como indicador de estabilidad atmosférica, 551-52
- Nuclear Regulatory Commission (NRC), 628
- Nueva Jersey, ley de reciclaje de (1987), 528

- propiedades mecánicas del aire a presión atmosférica estándar, [750](#)  
 valor calorífico (contenido de energía) de combustibles en unidades SI y AES/británicas, [753-54](#)  
 viscosidades cinemáticas de diversos fluidos, [752](#)
- Protistas, [255](#)  
 Protoplasma, [258-60](#)  
 Protozoarios, [256](#), [258](#), [265](#), [269-71](#)  
 comunes, esquema de clasificación para, [269](#)  
 definición, [256](#)  
 en la atmósfera, [275](#)  
 en suelos, [269](#), [272](#)  
 Protozoarios parásitos (suctorios), [269](#), [271](#)  
 Proyecciones de población, [25-29](#)  
 Pseudópodo, [269-70](#)  
 Pseudópodos (Sarcodina), [269](#)  
 Psicrófilos, [261](#)  
 Psicrótrofos, [261](#)  
 Public Law 92-500 (1972), [421](#)  
 Público, el  
 actitudes hacia el ambiente, [722-24](#)  
 comportamiento poco ético del público en general, [716](#)  
 oposición a los incineradores, [593](#)  
 Pulpa y papel, industria de, impacto ambiental de la, [43](#)
- Quema en masa de residuos sólidos**, [580](#), [581](#)  
 "Quimiabsorbedores", [542](#)  
 Química. Véase Física y química  
 Quimioautótrofos, [261](#)  
 Quimiótrofo, definición de, [306](#)
- R+D**. Véase Regiones más desarrolladas (R+D)  
 Radiación  
 como indicador de estabilidad atmosférica, [551-52](#)  
 terrestre, [222](#), [223-24](#)  
 ultravioleta, [221](#), [448](#)  
 Véase también Radiación solar  
 Radiación, balance de, [224-28](#)  
 Radiación, inversión por, [551](#)  
 Radiación neta, [224-28](#)  
 Radiación solar, [221-23](#), [304-5](#)  
 absorbida, [225](#)  
 fondo de, [65-66](#)  
 problema de agotamiento del ozono y, [119-20](#)  
 Radiación solar absorbida, [225](#)  
 Radiación terrestre, [222](#), [223-24](#)  
 Radiactividad  
 de la energía nuclear, [76-77](#)  
 natural de fondo, [509](#)  
 por explotación minera de materiales radiactivos, [76](#), [625-29](#)  
 Véase también Energía nuclear; Residuos nucleares  
 Radio-226, [622](#), [627](#)  
 Radón, [217](#), [218](#), [509](#), [628-29](#)  
 Radón-222, [622-24](#), [627-28](#)  
 Raoult, ley de, [176](#)  
 presión de vapor y, [175](#)  
 Rapoport, Anatol, [725](#)  
 Rayo, [221](#)  
 RCRA, Resource Conservation and Recovery Act, [641](#), [646](#), [650](#), [662-64](#), [665](#), [672](#)  
 Reacción elemental, múltiple, e irreversible, [192](#)  
 Reacción intermitente, [195](#)  
 Reacciones cinéticas, [189](#). Véase también Cinética de reacción  
 Reacciones elementales, [191-93](#)  
 Reacciones heterogéneas, [189](#), [190](#)  
 Reacciones homogéneas, [189](#), [190](#)  
 Reactor de tanque completamente mezclado (RTCM), [195-96](#), [197](#), [461](#)  
 diseño de, [205-8](#)  
 estudios con trazadores del flujo en un, [198-201](#)  
 Reactor semintermitente, [196](#)  
 Reactor tubular de flujo de tapón (RTFT), [195-98](#), [461](#)  
 determinación del orden de reacción por el método de integración para, [204](#)  
 diseño de, [207](#), [208](#)  
 estudios con trazadores del flujo en, [200](#), [201](#)  
 Reactores intermitentes, [195-96](#), [197](#)  
 determinación de la velocidad de reacción en, [203-5](#)  
 Reactores nucleares  
 accidentes en, [76](#), [624](#)  
 residuos de, [629-31](#), [636](#)  
 retiro de servicio de, [636](#)  
 Reactores secuenciales discontinuos (RSD), [460-61](#)  
 Reciclaje, [578-80](#), [646](#)  
 mercado para material reciclado, [579-80](#)  
 plantas de recuperación de recursos y, [588](#), [590](#)  
 separación de materiales reciclables en la fuente, [586](#)  
 Reclamation Act (1902), [372](#)  
 Recogedor de partículas, [525-27](#)  
 Recolección de residuos sólidos, sistemas neumáticos de, [610](#)  
 Recreación, aguas destinadas a, [384](#)  
 Recursos acuíferos, [337-82](#)  
 administración de, [337](#), [338-41](#)  
 desafíos futuros en la, [368-71](#)  
 importancia del agua y, [338](#)  
 necesidad de control, [339-40](#)  
 objetivos en la, [340-41](#)  
 aguas subterráneas, efecto de la lluvia ácida en las, [133-34](#)  
 cargos equitativos por, [370](#)  
 conservación de, [352](#), [368-69](#)  
 consideraciones tecnológicas, [341-54](#)  
 cantidad de agua disponible, [343-47](#)  
 cuantificación de los efectos ecológicos y sociales, [352-54](#)  
 opciones para satisfacer las demandas, [349-52](#)  
 periodos de escasez, [347](#)  
 precipitación anual, [342-43](#), [344](#), [345](#)  
 propiedades del agua, [341-42](#)  
 uso del agua, [347-49](#)  
 controles legislativos de, [361-64](#), [370](#)  
 desafíos futuros en relación con, [368-71](#)  
 estudios de caso sobre, [371-79](#)  
 Canal Periférico, [338](#), [365](#), [371-76](#)  
 hoya tributaria de Occoquan en Virginia, [338](#), [371](#), [376-79](#)  
 influencias políticas en los, [364-68](#)  
 grupos de presión, [364-65](#)  
 políticas de administración de, [365-68](#)  
 planeación de, [354-61](#), [369-70](#)  
 adopción de un plan, [361](#)  
 bosquejo del proceso, [356](#)  
 etapas del proceso de, [355](#)  
 evaluación de alternativas y sus efectos, [357-61](#), [369-70](#)  
 para rellenos sanitarios, [599-600](#)  
 Regulación directa, [485](#), [702-4](#), [708-9](#)  
 Rehabilitación de terrenos con residuos peligrosos, [671-76](#), [678-79](#)  
 Rehabilitación de terrenos, métodos locales de, [674-75](#)  
 Reina, Carlos Roberto, [723](#)  
 Reino Unido  
 control del agua en el, [364](#)  
 tratamiento y eliminación de residuos químicos en el, [661-62](#)  
 Religión, ética y, [717](#), [718](#), [723](#)  
 Relleno(s) de tierras, [272](#), [480](#)  
 confinamientos controlados, [654](#), [659-61](#), [665-70](#), [678](#)  
 de residuos sólidos, salud pública y, [577-78](#)  
 sanitario, diseño y operación, [272](#), [596-609](#)  
 criterios para, [597-98](#)  
 generación y control de lixiviado, [600-608](#)  
 oportunidades futuras, [611-12](#)  
 problemas con, [598-600](#)  
 producción de gas y, [608-9](#)  
 viejos y abandonados, [678](#)  
 volumen de residuos peligrosos para, [654-56](#)

- Rellenos sanitarios, diseño y operación de, [272](#), [596-609](#)  
 criterios para, [597-98](#)  
 generación y control de lixiviados, [600-608](#)  
 oportunidades futuras, [611-12](#)  
 problemas con, [598-600](#)  
 producción de gas y, [608-9](#)
- Remanentes, eliminación de, [479-81](#)
- Remoción, métodos de, utilizados en la rehabilitación de terrenos, [675](#)
- Reposición, crecimiento de, [22](#), [23-25](#)
- Reposición, fertilidad de, nivel mundial de, [29](#)
- Residuos aceptables para confinamientos controlados, [665-66](#)
- Residuos biomédicos, [621](#), [622](#), 636-37
- Residuos, ciclo de los  
 en la sociedad agraria, [5](#)  
 en la sociedad industrializada, [4](#), [6](#)  
 "Residuos especiales", [568](#)
- Residuos incompatibles, [666](#)
- Residuos industriales, [621](#), [622](#), 638-40  
 ejemplos de sustancias químicas tóxicas presentes en, [644](#)  
 eliminación conjunta de, [654](#), [661-62](#), 664  
 estatutos para, 706  
 generados en Ontario, Canadá, [647-48](#)  
 tratamiento y eliminación de residuos químicos, 651-53  
*Véase también* Residuos peligrosos
- Residuos nucleares, [621-36](#)  
 de la extracción y el procesamiento de uranio, 628-29  
 de reactores generadores de energía, 629-31  
 retiro de servicio de, 636  
 del retiro de servicio de reactores, 636  
 efectos en la salud y en el ambiente debido a los, [622-28](#)  
 manejo de, [631-36](#)
- Residuos orgánicos en suelos, [271](#)
- Residuos peligrosos, [620-84](#)  
 confinamiento controlado, [654](#), [659-61](#), 665-70, [678](#)  
 diseño y construcción de, 667-68  
 función del, 665  
 problemas con el, 668-70  
 residuos aceptables para, 665-66  
 selección y aprobación de terrenos, [666-67](#)  
 definición, [620-21](#)  
 desafíos futuros en relación con, [677-79](#)  
 identificación de, [640-45](#)  
 concentraciones de contaminantes para, [643](#)  
 métodos de, [640-41](#)  
 práctica en Estados Unidos, 641-45  
 listas de, [621](#)  
 lixiviados de, tratamiento y eliminación de, [670-71](#)  
 tratamiento combinado de, [670](#)  
 tratamiento por separado de, [670-71](#)  
 manejo de, 645-51  
 cantidades generadas y, [646-49](#)  
 componentes de un plan para, 649-50  
 minimización de los residuos, 650  
 papel de la bolsa de residuos, [651](#)  
 rehabilitación de terrenos, 671-76, [678-79](#)
- en el predio del Superfund de Seymour, Indiana, 676  
 técnicas de, [673-75](#)
- Residuos biomédicos, [621](#), [622](#), 636-37
- Residuos nucleares, [621-36](#)  
 de la extracción y procesamiento de uranio, 628-29  
 de reactores generadores de energía, 629-31, 636  
 efectos en la salud y el ambiente, [622-28](#)  
 manejo de, [631-36](#)
- Residuos químicos, 638-40  
 efectos ambientales de los, 638-39  
 necesidad de control, 638
- Residuos químicos, tratamiento y eliminación de, 651-65  
 cantidades por enterrar, [654-56](#)  
 eliminación conjunta, [654](#), [661-62](#), 664  
 en Estados Unidos y Canadá, [662-65](#)  
 en Europa Occidental y el Reino Unido, 656-62  
 en instalaciones externas, 653-54  
 por la industria, 651-53
- Residuos peligrosos, centro de tratamiento de, [654](#), [655](#), [657](#)
- Residuos químicos, 638-40  
 efectos ambientales de los, 638-39  
 inorgánicos, [640](#)  
 necesidad del control de, 638  
 orgánicos, [639-40](#)  
 tratamiento y eliminación de, [651-65](#)  
 cantidades por enterrar, [654-56](#)  
 en Estados Unidos y Canadá, [662-65](#)  
 en Europa occidental y el Reino Unido, 656-62  
 externos, 653-54  
 por la industria, [651-53](#)
- Residuos químicos inorgánicos, [640](#)
- Residuos químicos orgánicos, [640](#)
- Residuos sólidos, [35](#), [567-619](#)  
 características de los, [568-77](#)  
 cambios en los, [569-71](#)  
 cantidades de, [569](#), [571-72](#)  
 composición de, [572-73](#)  
 contenido de energía de, 576-77  
 densidad de, 573-75  
 consideraciones de manejo, 577-81  
 protección de la salud pública, 577-78  
 reciclaje, [578-80](#)  
 recuperación de energía de, [580-81](#)  
 reducción en la fuente, [578](#)  
 conversión de, 590-96  
 conversión en abono, 595-96  
 incineración, 590-95, [610-11](#)  
 otros procesos de conversión, [596](#)  
 de peligrosidad aguda, 642  
 definición de, [567](#), [568](#)  
 definición de la RCRA, 641-42  
 diseño y operación de rellenos sanitarios, [596-609](#), [611-12](#)  
 criterios para el, [597-98](#)  
 generación y control de lixiviados, [600-608](#)  
 problemas con, 598-600  
 producción de gas y, [608-9](#)  
 eliminación de  
 contaminación del aire por, [510-11](#)  
 por entierro, [272](#)
- microbiología de, [271-72](#)  
 oportunidades futuras en relación con los, [609-12](#)  
 separación y procesamiento de, [586-89](#)  
 centralizados, 587-89  
 separación y procesamiento en la fuente, [586-87](#)  
 sistemas de recolección de, 581-85, [610](#)  
 equipo, [582-83](#)  
 estaciones de transferencia, [583-84](#)  
 facilidad y frecuencia de recolección, 581-82  
 selección de rutas, [585](#)  
 transporte por ferrocarril, 584-85  
*Véase también* Residuos peligrosos
- Residuos sólidos municipales. *Véase* Residuos sólidos
- Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) de 1976, [641](#), [646](#), 650, [662-64](#), 665, 672
- Resourceful Earth, The* (Simon & Kahn), [45](#)
- Retención, tiempo de, [196-98](#)
- Retiro de servicio de reactores de energía nuclear, 636
- Reubicación  
 para evitar peligros naturales, [103](#)  
 suministro de agua y, [351](#)
- Reutilización de materiales, 581. *Véase también* Reciclaje
- Reutilización, tipo de, enfoque para satisfacer demandas de agua, [350](#), [352](#)
- Reverencia hacia el ambiente, actitud de, [723](#)
- Revestimientos de confinamientos controlados, 667-68
- Revolución agrícola, [36](#)
- Revolución Industrial, [30-31](#)
- Reye, síndrome de, [298](#)
- Rhizobium*, [315](#)
- Rhizopus*, [272](#)
- Ribonucleico, ácido, [259](#)
- Rickettsia*, [281](#), [291-92](#)  
*proWazekii*, [291](#)  
*typhi*, [291](#)
- Richter, escala de, [87-88](#)
- Ríos, [321](#), [322](#). *Véase también* Limnología, elementos de
- Ríos, proyectos que alteran los patrones de flujo de, [352-53](#)
- Rocío, punto de, [235](#)
- Rodofitos, [268](#)
- Roedores, enfermedades de transmisión por, [291-92](#)
- Rotífero, [256](#), [258](#)
- RSD (reactores secuenciales discontinuos), [460-61](#)
- RTCM, [195-201](#), [461](#)
- RTFT. *Véase* Reactor tubular de flujo de tapón (RTFT)
- Ruido, [699](#)
- Rutas, selección de, para recolectar residuos sólidos, [585](#)
- Sacos, colectores de cámara de, [530-32](#)
- Safe Drinking Water Act  
 enmiendas de 1986 a la, [390](#)  
 niveles máximos de contaminantes de la, [673](#)

- uso de agua en las ciudades  
estadounidenses y canadienses,  
384, 385
- Uso consuntivo del agua, 347-48
- Uso no consuntivo del agua, 347, 348
- Vapor**, 235
- Vapor de agua, 217, 219
- Vapor de agua de incineradores, mercados  
para el, 592
- Vapor, densidad de, 235
- Vapores del suelo, extracción de, 674-75
- Vapores, sistema de extracción de (SEV),  
676
- Vectores, 283
- Velocidad de reacción, 189-90, 192
- Velocidad de sedimentación terminal,  
147
- Ventiscas, medición de, 88-89
- Venturi, lavadores, 529-30
- Vibrio cholerae*, 284-85
- Vida, expectativas de (1965-1970), 279
- Vida libre, fijadores de nitrógeno de, 315
- Vidrio, reciclaje de, 580
- Viento, 229-32
  - turbulencia, 232-34
  - velocidad del, variación con la altitud,  
551
- Viento geostrofico, 231, 232
- Vigilancia de la contaminación del río  
Niágara, 712
- Virión, 265
- Virulencia, 280
- Virus, 257, 265-66
  - definición, 256
  - eliminación en el tratamiento del agua,  
396
  - enfermedades de transmisión por agua por,  
285
- Viscosidad, dinámica y cinemática  
de diversos fluidos, 752
  - factores de conversión para, 743
- Vitrificación *in situ* (VIS), 675
- Volumen
  - factores de conversión para, 730-41
  - unidad SI de, 735
- Volvox, 269
- Vorticella, 258, 269
- Waquoil**, bahía de, 334
- Washington, lago, 328
- Waste Management Act (Canadá), 620
- Water Quality Agreement (1987), 485
- Water Resources Act (Canadá, 1970), 421
- Watt, definición, 221n
- Welland, canal de, 331, 439
- Westchester County Materials Recovery  
Facility, del estado de Nueva York,  
588-90
- Whiteshell Nuclear Research Establishment  
of Atomic Energy of Canada Limited,  
634
- Wilson, James, 724
- World Commission of Environment and  
Development (WCED), 9, 686
- World Environment, The* (Holdgate *et al.*), 7
- Worldwatch Institute, 45
- Zona eufótica**, 320, 324
- Zonificación, regulación por, 702-3
- Zooplankton, 320, 321, 322