

Tercera Edición

Introducción a la

# INGENIERÍA AMBIENTAL

P. AARNE VESILIND

SUSAN M. MORGAN

LAUREN G. HEINE

## Elementos selectos

Elemento			Elemento		
Nombre	Símbolo	Peso atómico (g/gmol)	Nombre	Símbolo	Peso atómico (g/gmol)
Aluminio	Al	26.981	Itrio	Y	88.905
Antimonio	Sb	121.75	Litio	Li	6.939
Argón	Ar	39.948	Magnesio	Mg	24.312
Arsénico	As	74.922	Manganeso	Mn	54.938
Azufre	S	32.064	Mercurio	Hg	200.59
Bario	Ba	137.34	Molibdeno	Mo	95.94
Berilio	Be	9.012	Neón	Ne	20.183
Bismuto	Bi	208.98	Níquel	Ni	58.71
Boro	B	10.811	Niobio	Nb	92.906
Bromo	Br	79.909	Nitrógeno	N	14.007
Cadmio	Cd	112.40	Oro	Au	196.97
Calcio	Ca	40.08	Oxígeno	O	15.999
Carbono	C	12.01115	Paladio	Pd	106.4
Cesio	Cs	132.90	Plata	Ag	107.87
Cinc	Zn	65.37	Platino	Pt	195.09
Circonio	Zr	91.22	Plomo	Pb	207.19
Cloro	Cl	35.453	Potasio	K	39.102
Cobalto	Co	58.9333	Radio	Ra	226
Cobre	Cu	63.54	Radón	Rn	222
Criptón	Kr	83.80	Rodio	Rh	102.91
Cromo	Cr	51.996	Rubidio	Rb	85.47
Escandio	Sc	44.956	Rutenio	Ru	101.07
Estaño	Sn	118.69	Selenio	Se	78.96
Estroncio	Sr	87.62	Silicio	Si	28.086
Flúor	F	18.998	Sodio	Na	22.990
Fósforo	P	30.974	Telurio	Te	127.60
Galio	Ga	69.72	Titanio	Ti	47.90
Germanio	Ge	72.59	Tungsteno	W	183.85
Helio	He	4.003	Uranio	U	238.03
Hidrógeno	H	1.0080	Vanadio	V	50.942
Hierro	Fe	55.847	Xenón	Xe	131.30
Indio	In	114.82	Yodo	I	126.90

# INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA AMBIENTAL

TERCERA EDICIÓN

---

**P. AARNE VESILIND** *Bucknell University*

**SUSAN M. MORGAN** *Southern Illinois University Edwardsville*

**LAUREN G. HEINE** *Clean Production Action*

## Traductores

Jorge Alberto Velázquez Arellano

José Luis Núñez Herrejón

## Revisión técnica

Ing. A. S. Ph.D. Fernando Sánchez Sánchez

Presidente de la Comisión Permanente de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Sociedad Colombiana de Ingenieros

M. en C. José Salvador Pantoja Magaña

Profesor Cátedra del Departamento de Biotecnología e Ingeniería Química

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Estado de México (ITESM-CEM)



**INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA  
AMBIENTAL, TERCERA EDICIÓN**

P. Aarne Vesilind, Susan M. Morgan y  
Lauren G. Heine

**Presidente de Cengage Learning  
Latinoamérica**

Fernando Valenzuela Migoya

**Director editorial, de producción y de  
plataformas digitales para Latinoamérica**

Ricardo H. Rodríguez

**Gerente de procesos para Latinoamérica**

Claudia Islas Licona

**Gerente de manufactura para Latinoamérica**

Raúl D. Zendejas Espejel

**Gerente editorial de contenidos en español**

Pilar Hernández Santamarina

**Gerente de proyectos especiales**

Luciana Rabuffetti

**Coordinador de Manufactura**

Rafael Pérez González

**Editoras**

Ivonne Arciniega Torres

Gloria Luz Olguín Sarmiento

**Diseño de portada**

Andrew Adams

**Imagen de portada**

© Dudarev Mikhail/Shutterstock.com

**Composición tipográfica**

Gerardo Larios García

© D.R. 2013 por Cengage Learning Editores,  
S.A. de C.V., una Compañía de Cengage  
Learning, Inc.

Corporativo Santa Fe

Av. Santa Fe núm. 505, piso 12

Col. Cruz Manca, Santa Fe

C.P. 05349, México, D.F.

Cengage Learning® es una marca registrada  
usada bajo permiso.

DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de  
este trabajo amparado por la Ley Federal del  
Derecho de Autor, podrá ser reproducida,  
transmitida, almacenada o utilizada en  
cualquier forma o por cualquier medio, ya sea  
gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo,  
pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado,  
reproducción, escaneo, digitalización,  
grabación en audio, distribución en Internet,  
distribución en redes de información o  
almacenamiento y recopilación en sistemas  
de información a excepción de lo permitido  
en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal  
del Derecho de Autor, sin el consentimiento  
por escrito de la Editorial.

Traducido del libro *Introduction to Environmental  
Engineering, Third Edition*.

P. Aarne Vesilind, Susan M. Morgan y

Lauren G. Heine

Publicado en inglés por Cengage Learning

© 2010, 2004

ISBN 13: 978-0-495-29583-9

Datos para catalogación bibliográfica:

P. Aarne Vesilind, Susan M. Morgan y

Lauren G. Heine

*INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA AMBIENTAL,  
TERCERA EDICIÓN*

ISBN 13: 9786074819175

Visite nuestro sitio en:

<http://latinoamerica.cengage.com>

# CONTENIDO

<b>PREFACIO</b>	<b>xv</b>
<b>Sobre los autores</b>	<b>xix</b>

## **P R I M E R A P A R T E**

---

INGENIERÍA AMBIENTAL	1
----------------------	---

### **CAPÍTULO 1**

<b>Identificación y resolución de problemas ambientales</b>	<b>3</b>
---	----------

<b>1.1</b>	¿Qué es la ingeniería ambiental?	4
1.1.1	Orígenes de la ingeniería ambiental	4
1.1.2	La ingeniería ambiental en la actualidad	4
1.1.3	La ingeniería ambiental en el horizonte	5
<b>1.2</b>	Estudios de caso	7
1.2.1	El brote de hepatitis en Holy Cross College	7
1.2.2	Eliminación de los sedimentos de aguas residuales	9
1.2.3	El episodio de Donora	12
1.2.4	Cromo en Jersey City	15
1.2.5	El descubrimiento del tratamiento biológico de las aguas residuales	18
1.2.6	La barcaza de la basura	21
<b>1.3</b>	Sostenibilidad y diseño de cuna a cuna	23
1.3.1	Marco para la sostenibilidad	23
1.3.2	Diseño de cuna a cuna	24

## S E G U N D A P A R T E

---

### FUNDAMENTOS

29

### CAPÍTULO 2

#### Decisiones en ingeniería 31

- 2.1 Decisiones basadas en análisis técnicos 32
- 2.2 Decisiones basadas en el análisis de rentabilidad 33
- 2.3 Decisiones basadas en el análisis de costo/beneficio 40
- 2.4 Decisiones basadas en el análisis de riesgo 43
  - 2.4.1 Procedimiento de análisis de riesgo ambiental 46
  - 2.4.2 Gestión del riesgo ambiental 49
- 2.5 Decisiones basadas en la evaluación de opciones 50
- 2.6 Decisiones basadas en el análisis de impacto ambiental 54
  - 2.6.1 Inventario 55
  - 2.6.2 Valoración 55
  - 2.6.3 Evaluación 62
- 2.7 Decisiones basadas en análisis éticos 62
  - 2.7.1 El utilitarismo y las teorías deontológicas 63
  - 2.7.2 Ética ambiental y valor instrumental 65
  - 2.7.3 Ética ambiental y valor intrínseco 66
  - 2.7.4 Ética ambiental y espiritualidad 70
  - 2.7.5 Observaciones finales 71
- 2.8 Continuidad en las decisiones de la ingeniería 71

### CAPÍTULO 3

#### Cálculos en la ingeniería 79

- 3.1 Dimensiones y unidades en la ingeniería 80
  - 3.1.1 Densidad 80
  - 3.1.2 Concentración 81
  - 3.1.3 Tasa de flujo 83
  - 3.1.4 Tiempo de retención 85
- 3.2 Aproximaciones en los cálculos de la ingeniería 86
  - 3.2.1 Procedimiento para los cálculos con aproximaciones 86
  - 3.2.2 Uso de cifras significativas 87
- 3.3 Análisis de la información 89

**CAPÍTULO 4****Balances y separaciones de materia 102**

- 4.1** Balances de materia con un solo material 103
  - 4.1.1 Separación de las corrientes de flujo de un solo material 104
  - 4.1.2 Combinación de corrientes de flujo de un solo material 105
  - 4.1.3 Procesos complejos con un solo material 106
- 4.2** Balances de materia con múltiples materiales 114
  - 4.2.1 Mezclar corrientes de flujo de múltiples materiales 114
  - 4.2.2 Separación de corrientes de flujo de múltiples materiales 120
  - 4.2.3 Procesos complejos con múltiples materiales 127
- 4.3** Balances de materia con reactores 131

**CAPÍTULO 5****Reacciones 143**

- 5.1** Reacciones de orden cero 145
- 5.2** Reacciones de primer orden 147
- 5.3** Reacciones de segundo orden y de orden no entero 150
- 5.4** Vida media y tiempo doble 151
- 5.5** Reacciones consecutivas 152

**CAPÍTULO 6****Reactores 155**

- 6.1** Modelo de mezcla 156
  - 6.1.1 Reactores mixtos por lotes 156
  - 6.1.2 Reactores de flujo estacionario 157
  - 6.1.3 Reactores de flujo completamente mezclado 158
  - 6.1.4 Reactores de flujo completamente mezclado en serie 161
  - 6.1.5 Modelos de mezcla con señales continuas 166
  - 6.1.6 Reactores de flujo arbitrario 166
- 6.2** Modelos de reactores 167
  - 6.2.1 Reactores mixtos por lotes 167
  - 6.2.2 Reactores de flujo estacionario 171
  - 6.2.3 Reactores de flujo completamente mezclado 173
  - 6.2.4 Reactores de flujo completamente mezclado en serie 175
  - 6.2.5 Comparación del desempeño del reactor 176

**CAPÍTULO 7****Flujos y balances de energía 180**

- 7.1** Unidades de medición 181
- 7.2** Balances de energía y conversión 182
- 7.3** Fuentes y disponibilidad de energía 187
  - 7.3.1 Equivalencia de la energía 188
  - 7.3.2 Producción de energía eléctrica 189

**CAPÍTULO 8****Ecosistemas 198**

- 8.1** Flujos de energía y materia en los ecosistemas 199
- 8.2** Influencia humana en los ecosistemas 207
  - 8.2.1 Efecto de los pesticidas en un ecosistema 207
  - 8.2.2 Efecto de los nutrientes en un ecosistema lacustre 208
  - 8.2.3 Efecto de los desechos orgánicos en un ecosistema de corriente 211
  - 8.2.4 Efecto del diseño en un ecosistema 219

**T E R C E R A P A R T E**

## APLICACIONES

225

**CAPÍTULO 9****Calidad del agua 227**

- 9.1** Indicadores de la calidad del agua 228
  - 9.1.1 Oxígeno disuelto 228
  - 9.1.2 Demanda de oxígeno 230
  - 9.1.3 Sólidos 243
  - 9.1.4 Nitrógeno 245
  - 9.1.5 Mediciones bacteriológicas 247
- 9.2** Evaluación de la calidad del agua 253
- 9.3** Normas de calidad del agua 255
  - 9.3.1 Normas de agua potable 255
  - 9.3.2 Normas de aguas residuales 257
  - 9.3.3 Normas de calidad de agua superficial 258

**CAPÍTULO 10****Suministro y tratamiento de agua 264**

- 10.1** El ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua 265
  - 10.1.1 Suministros en mantos freáticos 266
  - 10.1.2 Suministros de agua superficial 273
- 10.2** Tratamiento de agua 276
  - 10.2.1 Ablandamiento 277
  - 10.2.2 Coagulación y floculación 296
  - 10.2.3 Sedimentación 299
  - 10.2.4 Filtración 307
  - 10.2.5 Desinfección 309
  - 10.2.6 Otros procesos de tratamiento 312
- 10.3** Distribución de agua 315

**CAPÍTULO 11****Tratamiento de aguas residuales 322**

- 11.1** Aguas residuales 323
  - 11.1.1 Transportación 323
  - 11.1.2 Componentes 323
- 11.2** Tratamientos preliminar y primario 326
  - 11.2.1 Tratamiento preliminar 326
  - 11.2.2 Tratamiento primario 328
- 11.3** Tratamiento secundario 331
  - 11.3.1 Reactores de lecho fijo 331
  - 11.3.2 Reactores de crecimiento suspendido 331
  - 11.3.3 Diseño de sistemas de lodos activados con base en la dinámica de procesos biológicos 334
  - 11.3.4 Transferencia de gases 346
  - 11.3.5 Separación de sólidos 353
  - 11.3.6 Efluente 354
- 11.4** Tratamiento terciario 356
  - 11.4.1 Eliminación de nutrientes 356
  - 11.4.2 Sólidos adicionales y eliminación orgánica 359
  - 11.4.3 Humedales 360
- 11.5** Tratamiento y eliminación de sedimentos 362
  - 11.5.1 Estabilización del sedimento 365
  - 11.5.2 Deshidratación de sedimento 368
  - 11.5.3 Eliminación final 373
- 11.6** Selección de estrategias de tratamiento 375

**CAPÍTULO 12****Calidad de aire 384**

- 12.1** Meteorología y movimiento del aire 385
- 12.2** Contaminantes principales del aire 390
  - 12.2.1 Particulados 390
  - 12.2.2 Medición de los particulados 392
  - 12.2.3 Contaminantes gaseosos 394
  - 12.2.4 Medición de los gases 394
  - 12.2.5 Medición del humo 396
  - 12.2.6 Visibilidad 397
- 12.3** Fuentes y efectos de la contaminación del aire 398
  - 12.3.1 Óxidos de azufre y de nitrógeno y lluvia ácida 402
  - 12.3.2 Esmog fotoquímico 403
  - 12.3.3 Agotamiento del ozono 404
  - 12.3.4 Calentamiento global (cambio climático) 406
  - 12.3.5 Otras fuentes de contaminantes del aire 410
  - 12.3.6 Aire en interiores 411
- 12.4** Estándares de la calidad del aire 414
  - 12.4.1 Legislación sobre la calidad del aire en Estados Unidos 414
  - 12.4.2 Estándares de emisiones y calidad del aire ambiente 415

**CAPÍTULO 13****Control de la calidad del aire 421**

- 13.1** Tratamiento de emisiones 422
  - 13.1.1 Control de partículas 424
  - 13.1.2 Control de contaminantes gaseosos 427
  - 13.1.3 Control de óxidos de azufre 429
- 13.2** Dispersión de los contaminantes del aire 431
- 13.3** Control de fuentes en movimiento 436

**CAPÍTULO 14****Residuos sólidos 444**

- 14.1** Recolección de basura 445
- 14.2** Generación de residuos 450
- 14.3** Reutilización y reciclaje de los materiales de la basura 453
  - 14.3.1 Procesamiento de los residuos 455
  - 14.3.2 Mercados para los residuos 457

<b>14.4</b>	Combustión de basura	459
<b>14.5</b>	Disposición final de residuos: rellenos sanitarios	464
<b>14.6</b>	Residuos: reducción en la fuente	468
14.6.1	¿Por qué?	468
14.6.2	Análisis del ciclo de vida	469
<b>14.7</b>	Gestión integrada de los residuos sólidos	472

## **CAPÍTULO 15**

### **Manejo de residuos peligrosos 480**

<b>15.1</b>	Definición de residuo peligroso	481
<b>15.2</b>	Manejo de residuos peligrosos	486
15.2.1	Limpieza de sitios abandonados	487
15.2.2	Tratamiento de residuos peligrosos	489
15.2.3	Eliminación de residuos peligrosos	491
<b>15.3</b>	Manejo de residuos radiactivos	492
15.3.1	Radiación ionizante	492
15.3.2	Riesgos asociados con la radiación ionizante	494
15.3.3	Tratamiento y eliminación de residuos radiactivos	496
<b>15.4</b>	Manejo de materiales sostenibles	497
15.4.1	Química ecológica	499
15.4.2	Prevención de la contaminación	502
<b>15.5</b>	El manejo de los residuos peligrosos y las generaciones futuras	505

## **CAPÍTULO 16**

### **Contaminación por ruido 513**

<b>16.1</b>	Sonido	514
<b>16.2</b>	Medición del sonido	519
<b>16.3</b>	Efecto del ruido en la salud humana	522
<b>16.4</b>	Reducción del ruido	523
<b>16.5</b>	Control del ruido	526
16.5.1	Proteger al receptor	526
16.5.2	Reducir el ruido en la fuente	526
16.5.3	Control de la ruta del ruido	527

### **Índice analítico 533**

# INGENIERÍA AMBIENTAL



© Keith y Susan Morgan

*Faro de Cabo de Couedic, Australia*

Los ingenieros ambientales no sólo advierten del peligro sino que también definen las bases para un nivel de vida sostenible que proteja la salud humana y el medio ambiente.

## Identificación y resolución de problemas ambientales



© Wendy Nero/ Shutterstock

*Águila calva*



© Christopher Wood/ Shutterstock

*Osos polares*

Los ingenieros ambientales deben ser conscientes de las lecciones del pasado (cómo sucedieron los problemas y cómo trabajaron en conjunto científicos, ingenieros, organismos normalizadores y otros, para resolverlos). Luego, es necesario aplicar debidamente esas lecciones para solucionar los problemas actuales y evitar que se cometan errores similares en el futuro.

## 1.1 ¿QUÉ ES LA INGENIERÍA AMBIENTAL?

---

La ingeniería del ambiente tiene una larga historia, aunque el término “ingeniería ambiental” es relativamente reciente. Conviene que revisemos de manera breve esa historia y consideremos lo que el futuro nos depara antes de ahondar en ejemplos concretos y en la esencia de los conceptos y los cálculos.

### 1.1.1 Orígenes de la ingeniería ambiental

Los orígenes de la ingeniería ambiental se remontan hasta los albores de la civilización. Proporcionar agua limpia y manejar los desechos fueron acciones que se volvieron vitales siempre que las personas se congregaban en asentamientos organizados. En el caso de las ciudades de la Antigüedad, la disponibilidad de una fuente de agua confiable a menudo significaba la diferencia entre la supervivencia y la destrucción, y el suministro de agua se convirtió en una necesidad defensiva. Los constructores de pozos sanitarios y acueductos eran los mismos individuos a quienes se llamaba para que erigieran los muros y fosos de las ciudades, lo mismo que las catapultas y otros instrumentos bélicos. Estos hombres se convirtieron en los ingenieros de la Antigüedad. No fue sino hasta mediados del siglo XVIII que los ingenieros que construían los servicios para la población civil se distinguieron de los que se dedicaban principalmente a los asuntos de la guerra, y así nació el término “ingeniería civil”. En los años de formación de Estados Unidos, los ingenieros eran en su mayoría autodidactas o se preparaban en la recién formada Academia Militar. En su momento se convocó a los ingenieros civiles (constructores de caminos, puentes y vías férreas) con el objetivo de que diseñaran y construyeran sistemas de suministro de agua para las ciudades y sistemas adecuados para el manejo de los residuos fluviales y el agua de las tormentas.

La llegada de la industrialización trajo consigo problemas de saneamiento básico increíbles en las ciudades debido a la falta de agua y de un manejo apropiado de los residuos. Sin embargo, no hubo protestas públicas sino hasta que se hizo evidente que el agua transmitía enfermedades. A partir de entonces, los ingenieros civiles tenían que proporcionar algo más que un suministro de agua adecuado: debían asegurarse de que el líquido no fuese portador de enfermedades. La salud pública se convirtió en una preocupación integral para los ingenieros civiles responsables de ofrecer suministros de agua a los centros poblacionales, y la eliminación de enfermedades transmitidas a través de ella se convirtió en la meta principal a finales del siglo XIX. Los encargados del drenaje de las ciudades y el suministro de agua limpia se convirtieron en ingenieros de salud pública (en Gran Bretaña) y en ingenieros sanitarios (en Estados Unidos).

### 1.1.2 La ingeniería ambiental en la actualidad

Los ingenieros sanitarios han logrado reducciones notables en la transmisión de enfermedades agudas por aire o agua alterados ambientalmente o contaminados. En Estados Unidos se eliminaron, para efectos prácticos, los efectos agudos de la contaminación. Sin embargo, estas preocupaciones han sido sustituidas por problemas más complejos y crónicos, como el cambio climático; la reducción de los acuíferos; la contaminación del aire interior; el transporte global de sustancias químicas persistentes, bioacumulativas y tóxicas; los impactos sinérgicos de las mezclas de sustancias químicas complejas hechas por el hombre a partir de los productos caseros y farmacéuticos en los afluentes de aguas residuales, los ríos y los arroyos; las sustancias químicas que alteran el sistema endocrino; y una falta de información sobre el efecto que los nuevos materiales que surgen con rapidez (como las nanopartículas) causan en la salud humana y ambiental, así como en la seguridad. Los desafíos para los medios ambientales individuales como el aire y el agua ya no pueden considerarse y manejarse dentro de compartimentos

individuales. Deben tratarse en el nivel del ecosistema para evitar que las preocupaciones por la contaminación pasen de un medio ambiental a otro. Para enfrentar estos problemas crónicos antes de que se vuelvan agudos, los científicos e ingenieros buscan entender el ambiente, las ciudades y la industria como sistemas interactivos (es decir, como ecosistemas interconectados, sistemas sociales e industriales), y pensar en forma proactiva y preventiva para evitar las consecuencias indeseables en lugar de tener que afrontarlas en forma reactiva.

En la mayoría de los países desarrollados de la actualidad la opinión pública ha evolucionado de tal modo que los efectos directos e inmediatos de la contaminación ambiental en la salud ya no son la única preocupación. La limpieza de los arroyos, para beneficio de los arroyos mismos, se ha convertido en una fuerza impulsora, y se han aprobado leyes que abordan nuestro deseo de un ambiente limpio. La protección de los hábitats de la fauna y la flora, la preservación de las especies y la salud de los ecosistemas se han convertido en objetivos válidos para el gasto de recursos. El sentido de misión, que se conoce como *ética ambiental*, es una fuerza impulsora importante detrás de la ingeniería ambiental moderna, y la sociedad lo exige como un valor público. En el siglo xx, la ética ambiental se enfrentó a los deseos de quienes querían explotar los recursos naturales para el beneficio humano. El pensamiento común suponía que algo tenía que sacrificarse: era preciso elegir entre la economía o el ambiente.

### 1.1.3 La ingeniería ambiental en el horizonte

En el siglo xxi es evidente que los ecosistemas y el capital natural de nuestro planeta no son inagotables. La preservación y el mantenimiento del bienestar sanitario, económico y social de las personas depende de que se preserve y mantenga la integridad de los ecosistemas y los servicios para el sistema ecológico que éstos mismos ofrecen. La solución no es un sacrificio, sino el bienestar de la economía y del ambiente. A este respecto, ha surgido un objetivo común en todo el mundo (la meta del desarrollo sostenible), que una comisión de las Naciones Unidas definió en el Informe de Budapest, en 1987, como un “desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”. El desarrollo sostenible (conocido también como “sostenibilidad”) significa cosas distintas para las personas y comunidades diferentes, dependiendo de la índole de sus actividades y los contextos cultural, geográfico, económico y ambiental en que operan.

En el pasado la ingeniería ambiental era una profesión reactiva, es decir, que reaccionaba ante los problemas generados por el crecimiento poblacional del mundo y el aumento en nuestro nivel de vida. Sin embargo, es posible extrapolar las dificultades que enfrentarán los ingenieros ambientales en el futuro. Por ejemplo, sabemos que los problemas de contaminación que apenas hace algunas décadas eran de índole local, ocurren ahora a escala mundial. También sabemos que el uso y la descarga continuos de sustancias químicas nuevas y viejas en el ambiente tendrán efectos impredecibles y a veces sinérgicos, y que el enfoque exclusivo en la eficiencia energética y otras mejoras en la eficiencia no permitirán enfrentar de manera adecuada las limitaciones de recursos que surgen a medida que crecen las poblaciones y mejora la calidad de vida en los países en desarrollo. Los ingenieros ambientales, ahora y en el futuro, desempeñarán una función medular en la consecución del desarrollo sostenible.

Huelga decir que la formación en la ingeniería sanitaria clásica basada en la hidráulica aplicada, la salud pública y los procesos de ingeniería química es inadecuada para enfrentar estos problemas complejos. La nueva generación de ingenieros ambientales responsables de la protección de la salud humana y el ambiente abarcarán las ciencias naturales y abordarán, en un nivel de vanguardia, consideraciones relacionadas con la aplicación de las ciencias biológicas y químicas, como la nanotecnología, biotecnología y tecnología de la información, así como la muerte y toxicidad química y el impacto de todo esto en el ciclo de vida. Los ingenieros ambien-

tales también aprenderán mucho de los procesos industriales, incluido el diseño y desarrollo de productos. Y, por último, dado que estas cuestiones son del dominio público, aprenderán a aplicar las ciencias sociales como la política pública, las comunicaciones y la economía, y a trabajar con diversos grupos de interés para resolver los problemas. Dado que es poco probable que todos estos temas se incluyan por completo en los planes de estudios de la ingeniería civil o ambiental, los estudiantes necesitarán cursar dichas materias en programas académicos relacionados, como administración de empresas, gestión y ciencias ambientales y política pública.

Los ingenieros ambientales utilizarán su formación en diseño para ser proactivos y preventivos en la elaboración de soluciones. A medida que se alejen de un modelo de tratamiento terminal de los problemas e incluso más allá de la prevención de la contaminación por medio de controles de ingeniería, se moverán hacia el uso del diseño para evitarlos desde el principio. Los campos de la ingeniería como la química ecológica, la ingeniería ecológica y el diseño del ambiente, que se estudian en varias secciones de este libro de texto, ayudarán a los ingenieros ambientales y de otras disciplinas a desarrollar productos (y fomentar el manejo de materiales) sostenibles.

A medida que aumenta la complejidad de los problemas que enfrentan los ingenieros ambientales, crece también la necesidad de principios y marcos de referencia que orienten la generación de soluciones. En el año 2003, aproximadamente 65 ingenieros y científicos acordaron en Sandestin, Florida, crear un conjunto de principios para la ingeniería ecológica (también conocida como ingeniería “verde”). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA; U.S. Environmental Protection Agency) define la ingeniería ecológica como “el diseño, la comercialización y el uso de procesos y productos [que] son factibles y económicos y, al mismo tiempo, que reducen al mínimo: 1) la generación de contaminación desde su origen, y 2) el riesgo para la salud humana y el ambiente”. El grupo concibió una serie de principios que, al abordar los aspectos sociales, llegaron más allá de lo que se consideraba el alcance de la ingeniería ecológica. Como tales, se les conoce como los Principios de Sandestin para la Ingeniería Sostenible (o, simplemente, Principios de Sandestin).<sup>1,2</sup> También se han creado otros conjuntos de principios para respaldar el diseño y desarrollo de productos y procesos que tienen beneficios para la salud humana y el ambiente. Entre éstos se encuentran los 12 Principios de Química Ecológica y los 12 Principios de Ingeniería Ecológica.<sup>3</sup> La USEPA ha adoptado los nueve Principios de Sandestin como los Principios de Ingeniería Ecológica. En conjunto, éstos constituyen una guía y un marco de referencia amplio para todos los ingenieros que buscan coadyuvar a resolver los problemas del siglo XXI y caracterizan muy bien la función cada vez más amplia que desempeña el ingeniero ambiental (tabla 1.1).

La ingeniería sostenible transforma las disciplinas y prácticas de la ingeniería existentes en otras que fomentan la sostenibilidad; incorpora el desarrollo y la implementación de productos, procesos y sistemas viables desde los puntos de vista tecnológico y económico que promueven el bienestar humano y, al mismo tiempo, protegen la salud y fomentan la protección de la biosfera como un criterio en las soluciones de ingeniería.

Estos principios sirven como guía para los ingenieros ambientales en todo tipo de empleos (ya sea en el gobierno, los servicios de asesoría, el ámbito académico o el sector privado). El público reconoce y aprecia la labor del ingeniero ambiental y está preparado para utilizar los recursos sociales a fin de lograr la sostenibilidad. La comunidad de ingenieros ambientales profesionales debe prepararse ahora para enfrentar este reto, así como para garantizar que siguen logrando la profundidad de conocimientos y el dominio técnico que cabe esperar de ellos, que se complementen con la capacidad para entender los problemas en el nivel del sistema y colaborar en forma productiva con expertos y legos de otras disciplinas y sectores.

**Tabla 1.1** Principios de Sandestin para la Ingeniería Sostenible

- 
1. Emplear sistemas de análisis y herramientas de evaluación del impacto ambiental en forma integral en la ingeniería de procesos y productos.
  2. Conservar y mejorar los ecosistemas naturales protegiendo al mismo tiempo la salud y el bienestar humanos.
  3. Aplicar un razonamiento que contemple el ciclo de vida en todas las actividades de la ingeniería.
  4. Asegurarse de que todos los insumos y productos materiales y energéticos sean inherentemente seguros y benignos en la medida de lo posible.
  5. Reducir al mínimo el agotamiento de los recursos naturales.
  6. Esforzarse en prevenir la generación de residuos.
  7. Desarrollar y aplicar soluciones por medio de la ingeniería mientras se tiene conciencia de la geografía local, las aspiraciones y las culturas en la que se encuentra el problema.
  8. Crear soluciones por medio de la ingeniería más allá de las tecnologías actuales o predominantes; innovar, mejorar e inventar (tecnologías) para alcanzar la sostenibilidad.
  9. Hacer que las comunidades y los grupos de interés participen de manera activa en el desarrollo de las soluciones que la ingeniería puede ofrecer.
- 

## 1.2 ESTUDIOS DE CASO

---

A continuación aparecen ejemplos de problemas ambientales que se han identificado y resuelto. Se ilustran algunos principios y controversias inherentes al campo de la ingeniería ambiental.

### 1.2.1 El brote de hepatitis en Holy Cross College

Después del juego de Dartmouth en 1969, todos los integrantes del equipo de fútbol americano del Holy Cross College enfermaron.<sup>4</sup> Sufrieron fiebre elevada, náuseas y dolor abdominal, y presentaron ictericia, todas características de la hepatitis. Durante los siguientes días cayeron enfermos más de 87 integrantes del programa de fútbol: jugadores, entrenadores, instructores físicos y otros miembros del personal. La institución universitaria canceló el resto de la temporada y se convirtió en el centro de un misterio epidemiológico. ¿Cómo pudo contraer hepatitis contagiosa todo un equipo de fútbol?

Se piensa que la enfermedad se transmitió en su mayoría de persona a persona. Hay varios tipos de virus de hepatitis, cuyos efectos son muy diversos en los seres humanos. El menos fatal es el de la hepatitis A, que da por resultado varias semanas de incapacidad y pocas veces tiene consecuencias duraderas; sin embargo, las hepatitis B y C pueden ocasionar problemas graves (sobre todo daño al hígado) y duran varios años. En el momento de la epidemia en el Holy Cross College el virus de la hepatitis no se había aislado aún y poco se sabía de su etiología y efectos.

Cuando la universidad cobró conciencia de la gravedad de la epidemia, solicitó y recibió ayuda de organismos estatales y federales, que enviaron epidemiólogos a Worcester. Su primera tarea fue reunir la mayor cantidad de información posible sobre los integrantes del equipo de fútbol: con quién habían estado, a dónde había ido y qué habían comido y bebido. Luego, el

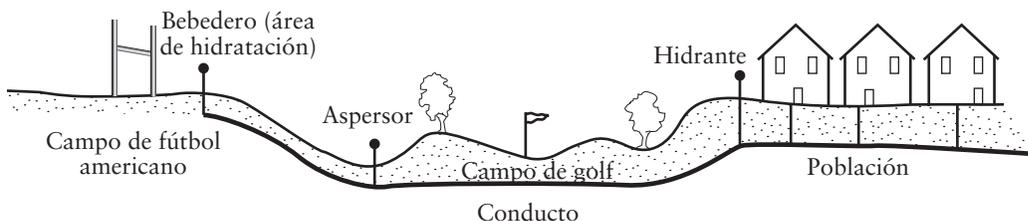
objetivo fue deducir a partir de todas estas pistas cómo se había generado la epidemia. Parte de la información que conocieron y averiguaron fue la siguiente:

- Si bien el periodo de incubación de la hepatitis es de aproximadamente 25 días, la infección tenía que haber ocurrido en algún momento antes del 29 de agosto o alrededor de esa fecha.
- Los jugadores de fútbol americano que abandonaron el equipo antes del 29 de agosto no estaban infectados.
- Los jugadores veteranos que llegaron tarde, después del 29 de agosto, tampoco estaban infectados.
- Los jugadores novatos (de primer año en la universidad) llegaron el 3 de septiembre y ninguno de ellos contrajo la enfermedad.
- Tanto los novatos como los veteranos utilizaron el mismo comedor, y ya que ninguno de los novatos se infectó, era poco probable que el comedor fuera el origen.
- Uno de los entrenadores que contrajo hepatitis no comió en el comedor.
- No había un hilo conductor en el sentido de que los jugadores hayan comido en restaurantes en donde los mariscos contaminados hubieran sido la fuente del virus.
- En la cocina se preparaba una bebida de azúcar, miel, hielo y agua para el equipo (la versión del Gatorade propia de Holy Cross), pero como el personal de la cocina la probaba antes y después de ir al campo de prácticas y ninguno de ellos contrajo la hepatitis, no pudo ser la bebida.

La falta de opciones obligó a los epidemiólogos a concentrarse en el suministro de agua. La universidad recibe el agua de la ciudad de Worcester y una línea subterránea la lleva desde Dutton Street, un callejón, hasta el campo de prácticas de fútbol, en donde se utiliza un bebedero durante el entrenamiento. Las muestras que se tomaron del bebedero confirmaron que no estaba contaminado. Sin embargo, la ausencia de contaminación durante el muestreo no descartaba la posibilidad de una transmisión de la enfermedad a través de esta línea de agua. La línea llegaba hasta el campo de prácticas a través de un conducto que pasaba por una serie de pozos y cajas de aspersión subterráneas que se utilizaban para regar el campo (figura 1.1).

Hubo otros dos datos que resultaron cruciales. Se descubrió que en una de las casas de Dutton Street había niños con hepatitis. Ellos jugaban cerca de las cajas de aspersión en las noches de verano y a menudo las abrían para chapotear en el agua de los pequeños estanques que se formaban en los pozos. Pero si los niños la habían contaminado, ¿cómo entró el agua desde esos estanques hasta la línea si ésta siempre estaba bajo presión positiva?

La pieza final del rompecabezas se colocó cuando los epidemiólogos descubrieron que había ocurrido un gran incendio en Worcester durante la noche del 28 de agosto, que duró hasta las primeras horas del día siguiente. La demanda de líquido para sofocar este incendio fue tan grande que las residencias de Dutton Street se quedaron sin presión de agua. Es decir, las bombas con las que se intentaba extinguir el incendio expulsaban agua en un grado tan alto que la



**Figura 1.1** El conducto que llevaba el agua al campo de prácticas de Holy Cross provenía de Dutton Street y atravesaba varias cajas de aspersión.

presión en el conducto se volvió negativa. Si, además, los niños dejaron abiertas algunas válvulas en las cajas de aspersión y el agua en torno a ellas se contaminó, el virus de la hepatitis debió entrar en la línea de agua potable. A la mañana siguiente, cuando la presión en las líneas de agua se restableció, la que se contaminó fue llevada por efecto de la presión hasta el extremo de la línea (el bebedero en el campo de fútbol) y todos esos jugadores, entrenadores y demás personas que la bebieron contrajeron hepatitis.

Este caso ilustra una *conexión transversal* clásica, o el contacto físico entre agua potable tratada y agua contaminada, y las consecuencias potencialmente graves de esas conexiones. Uno de los objetivos de la ingeniería ambiental consiste en diseñar sistemas que protejan la salud pública. En el caso de las tuberías, los ingenieros necesitan crear sistemas en los que se evite incluso la posibilidad de que haya conexiones transversales, aunque, como muestra el incidente del Holy Cross College, es poco probable que puedan anticipar todas las posibilidades.

### Preguntas para reflexionar

1. La próxima vez que beba agua de un bebedero o la compre en una botella, ¿cuáles serían sus expectativas sobre la calidad de la misma? ¿Quién sería con exactitud el responsable de satisfacer esas expectativas? (Cuidado con esta última pregunta. Recuerde que usted [por fortuna] vive en una democracia.)
2. Dado lo que ahora sabemos sobre la hepatitis, ¿en qué pudo ser diferente la investigación de los epidemiólogos si el incidente hubiera ocurrido el año pasado? Aquí tendrá que hacer una pequeña investigación. La mayoría de las universidades cuenta con excelente información en línea sobre hepatitis y otras enfermedades contagiosas.
3. Suponga que usted es un abogado especializado en lesiones personales y que la familia de uno de los jugadores de fútbol americano lo contrató. ¿Cómo establecería la responsabilidad en este caso? ¿A quién demandaría?

### 1.2.2 Eliminación de los sedimentos de aguas residuales

Los sedimentos se generan en una planta de tratamiento de aguas residuales como desecho de este proceso. Las plantas de tratamiento de aguas residuales desperdician energía porque los seres humanos somos usuarios ineficientes de la energía química que ingerimos. Y, al igual que el metabolismo del cuerpo humano, el sistema de dichas plantas es ineficiente. Si bien producen agua limpia que luego se deposita en el canal más cercano, también generan un subproducto que aún tiene una energía química sustancial. No es posible simplemente deshacerse de este residuo porque saturaría con rapidez un ecosistema acuático, provocaría perjuicios o incluso sería peligroso para la salud humana. El tratamiento y la eliminación del sedimento de las aguas residuales son algunos de los problemas más apremiantes para la ingeniería ambiental. (Para mitigar la opinión pública negativa respecto a la eliminación de sedimentos, una asociación dedicada a vigilar la calidad del agua propuso que se denominara “biosólidos” en lugar de “sedimentos” a los productos que abandonan la planta de tratamiento. Por supuesto, es como llamar a “una rosa con cualquier otro nombre...”.)

Dado que la eliminación de sedimentos resulta tan difícil y si es inapropiada ocasiona problemas para la salud humana, se necesitan regulaciones gubernamentales. Cuando los organismos del gobierno establecen normas ambientales, la salud y el bienestar humanos se ponderan en contraste con las consideraciones de orden económico. Esto es, ¿cuán dispuestos estamos a pagar para tener un ambiente mucho más saludable? La premisa, o al menos la esperanza, es que el organismo regulador cuente con la información esencial para determinar qué efecto tendrán ciertas regulaciones en la salud humana. Por desgracia, esto pocas veces sucede, y estos organismos se ven obligados a tomar decisiones basadas en poca o ninguna información científica. El

regulador debe buscar un equilibrio entre los intereses contrarios y los diversos constituyentes. (Por ejemplo, en Islandia, ¿se ha tomado con gran seriedad la presencia de los elfos y, por tanto, las carreteras se han trazado de modo que no se cause daño a las supuestas moradas de esas personitas!) En una democracia, el regulador representa los intereses del público. Si las regulaciones se juzgan inaceptables, el público puede cambiarlas (¡o cambiar al regulador!).

El ejemplo de una regulación impopular en Estados Unidos fue el límite de velocidad de 55 millas (90 kilómetros) por hora en las carreteras interestatales, que por lo general se ignoraba y al final se revocó. Los reguladores del Departamento de Transporte de Estados Unidos juzgaron de manera errónea la disposición del público para reducir la velocidad en las carreteras. Los dos beneficios (reducir el consumo de gasolina y salvar vidas) eran metas encomiables, pero la regulación se rechazó porque pedía demasiado de las personas. En el caso del límite de velocidad, los ingenieros de transporte lograron establecer sin equivocarse que la reducción en el límite de velocidad de 65 a 55 millas (de 110 a 90 kilómetros) por hora salvaría casi 20,000 vidas cada año, pero este beneficio no influyó en la opinión pública. La gente no estaba dispuesta a pagar el precio de reducir la velocidad en las carreteras.

En forma similar, las regulaciones ambientales persiguen metas admirables y justificables desde el punto de vista moral, por lo común el mejoramiento de la salud pública (o enfrenar lo negativo, la prevención de enfermedades o la muerte prematura); exigen que el regulador pondere sus beneficios acumulados en contraste con sus costos. A menudo se sopesa el valor de la protección de la salud humana y la imposición de acciones normativas que representarían costos económicos y restricciones de la libertad al limitar las conductas contaminantes. Esto es, el regulador, al establecer normas ambientales que mejoran la salud pública, elimina ciertas libertades de quienes liberarían sustancias contaminantes en el ambiente; sopesa el bien de la salud pública y la pérdida de libertad o riqueza (a efecto de reducir la primera e impedir la segunda). El establecimiento de límites estrictos para las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales exige el aumento de los impuestos públicos para pagar el tratamiento adicional. La prohibición de la descarga de los sedimentos industriales cargados de metales pesados requiere que las empresas instalen costosos sistemas de prevención de contaminantes y les impide deshacerse de estos desechos por medios menos onerosos. La fijación de normas relacionadas con el agua potable genera, de igual modo, un mayor gasto de la riqueza disponible para construir mejores plantas de tratamiento. En cada caso, el regulador, al establecer normas ambientales, sopesa el valor moral de la salud pública y de eliminar la riqueza. “No lastimarás” en contraste con “no robarás”. Se trata de un dilema moral, y eso es justo lo que los reguladores enfrentan.

Earle Phelps fue el primero en reconocer que la mayoría de las decisiones en materia de regulación ambiental se toman aplicando lo que él denominó *principio de conveniencia*.<sup>5</sup> Como ingeniero sanitario conocido por su trabajo de saneamiento de arroyos y la creación de la ecuación de Streeter-Phelps para la curva de déficit de oxígeno disuelto (capítulo 8), Phelps describió el concepto de conveniencia como “el intento por reducir el indicador numérico del daño probable, o el indicador lógico del peligro existente, al nivel más bajo que sea posible en términos prácticos y factibles dentro de las limitaciones que imponen los recursos financieros y la capacidad de la ingeniería”. Reconoció que “en la práctica, pocas veces es posible obtener la condición óptima o ideal y que resulta poco económico y, por tanto, inconveniente exigir un método mucho más próximo a eso del que puede obtenerse con facilidad en la práctica actual de la ingeniería y a costos justificables”. Lo que es más importante, Phelps recomendaba, para quienes establecen las normas en la actualidad y que a menudo tienen dificultades para justificar sus decisiones, que “el principio de conveniencia es el fundamento lógico para las normas

administrativas y debe defenderse con franqueza”. Phelps no consideraba que fuera malo el uso de las normas como una especie de límite de velocidad a la contaminación que afecta la salud humana. También entendía las leyes de los dividendos decrecientes y el periodo de demora de la factibilidad técnica. Sin embargo, siempre presionó para que se redujeran los riesgos ambientales a los niveles más bajos que fueran convenientes. (Observe que hay una filosofía contraria en lo que se denomina el “principio precautorio”. Esta filosofía castiga las faltas en lo que respecta a la precaución ante la incertidumbre para evitar los problemas que hemos creado en forma reiterada al suponer que teníamos información adecuada cuando en realidad no era así [por ejemplo, eliminar los desechos peligrosos en lagunas abiertas sin recubrimiento.])

La responsabilidad del regulador es incorporar la mejor ciencia disponible en la toma de decisiones normativas. Pero surgen problemas cuando sólo se dispone de información científica limitada. La complejidad del efecto ambiental del sedimento en la salud humana genera incertidumbre científica y hace que resulte difícil eliminarlo. El problema al crear regulaciones para la eliminación de sedimentos es que los de las aguas residuales tienen propiedades desconocidas y dinámicas y se comportan en forma diferente en distintos medios ambientales. Los reguladores deben determinar cuándo es problemática la presencia de sedimento y qué puede y debe hacerse al respecto.

Ante esta complejidad, a mediados de la década de 1980 la USEPA inició un programa de elaboración de regulaciones para la eliminación de sedimentos basado en el modelo sanitario. El organismo esperó tanto como pudo, aunque la Ley de Agua Limpia de 1972 le demandaba establecer esas regulaciones. La labor fue de enormes proporciones, y se sabía. Las estableció en forma lógica, especificando primero todos los medios por los que los sedimentos perjudicaban a los seres humanos y luego definiendo los peores escenarios. Por ejemplo, en el caso de la incineración, se imaginó a una persona que vive durante 70 años en un lugar a donde, por efecto del viento, le llega de inmediato el humo de un incinerador de sedimentos y respira las emisiones 24 horas al día. La persona nunca se desplaza, el viento nunca cambia de dirección y el incinerador sigue emitiendo los contaminantes durante 70 años. De mayor preocupación serían los metales volátiles, como el mercurio. Con base en evidencias epidemiológicas, como las de la tragedia de Minemata, en Japón, y extrapolando severos órdenes de magnitud, la USEPA estimó las emisiones totales admisibles de mercurio de un incinerador de sedimentos.

Al construir estos escenarios extremos, aunque por completo irreales, la USEPA creó a manera de ensayo una serie de regulaciones para la eliminación de los sedimentos y las publicó para recibir comentarios de las personas. Las respuestas llegaron de inmediato y fueron abrumadoras. Recibió más de 600 respuestas oficiales, casi todas criticando el proceso, las premisas y las conclusiones. Muchos comentarios señalaban que en la actualidad no se cuenta con datos epidemiológicos que demuestren que la eliminación apropiada de sedimentos sea de algún modo perjudicial para el público. Ante la falta de esa información, el establecimiento de normas estrictas parecía injustificado.

Golpeada por tan adversa reacción, la USEPA abandonó el modelo sanitario y adoptó normas de conveniencia como el principio de Phelps que define dos tipos de sedimento: uno (clase B) que se ha tratado por medios como la digestión anaeróbica, y el otro (clase A) que se ha desinfectado. El sedimento de clase A puede desecharse en todas las tierras de labranza, pero el de clase B tiene restricciones, como aguardar 30 días antes de que pueda reintroducirse el ganado en un terreno de pastoreo en el que se ha aplicado el sedimento con atomizador. El sedimento que no se ha tratado (quizá de clase C, aunque no se designó así) no debe desecharse en el ambiente. Esta regulación es conveniente porque todas las plantas de tratamiento de aguas

residuales en Estados Unidos cuentan ahora con algún tipo de estabilización de sedimentos, como la digestión anaeróbica, y una regulación que la mayoría de ellas ya cumple y es popular.

La falta de información epidemiológica útil sobre el efecto de los elementos del sedimento en la salud humana obligó a la USEPA, al crear los escenarios extremos, a equivocarse tanto por el lado conservador que las regulaciones hubieran sido poco realistas y el público no las habría aceptado. La ruina de las regulaciones basadas en el modelo sanitario fue que no cumplían con los criterios propuestos. Sin esa información el público decidió que sencillamente no quería que se le agobiara con regulaciones que se percibían como innecesarias. La USEPA le habría quitado demasiado al público (dinero) y habría devuelto a cambio un beneficio indefinido y en apariencia menor (salud). De modo que la USEPA decidió lo que era conveniente: hacer que las plantas de tratamiento de aguas residuales hicieran lo que podían (como la digestión anaeróbica en algunos casos o la desinfección por calor en otros), a sabiendas de que estas regulaciones serían mejores que nada. Cuando aumente nuestra capacidad para el tratamiento y decidamos gastar más dinero en el tratamiento de aguas residuales, las normas podrían endurecerse porque eso sería entonces lo conveniente desde el punto de vista ético.

La toma de decisiones regulatorias, como la fijación de normas para la eliminación de sedimentos, tiene ramificaciones de orden ético porque implica distribuir los costos y beneficios entre los ciudadanos afectados. El principio de conveniencia es un modelo ético que exige al regulador optimizar los beneficios de la protección de la salud reduciendo al mismo tiempo los costos dentro de los límites de la factibilidad técnica. El principio de conveniencia de Phelps, propuesto hace más de 50 años, sigue siendo una aplicación útil de la ética en la que se recurre al conocimiento científico para establecer regulaciones ambientales dinámicas y, sin embargo, que puedan cumplirse. En el caso de la eliminación de sedimentos, la USEPA tomó una decisión de carácter ético basada en el principio de conveniencia, ponderando el bien moral de la protección a la salud humana en contraste con el daño moral de quitar riqueza al exigir un tratamiento y una eliminación de sedimentos de aguas residuales costosos.

### **Preguntas para reflexionar**

1. Analice sus hábitos de comportamiento desde el punto de vista del principio de conveniencia de Phelps.
2. Un candidato gubernamental en el estado de Nueva Hampshire presentó sus argumentos sobre un solo tema: que se detuviera la descarga de sedimentos de aguas residuales en la tierra en Nueva Hampshire. Imagine que usted tuvo la oportunidad de hacerle tres preguntas durante un debate público. ¿Cuáles serían éstas, y cuáles considera que podrían ser sus respuestas?
3. Se descubrió que las personas que viven en Japón, un país con una sólida mística de la salud y la limpieza públicas, padecen resfriados más graves y frecuentes que quienes viven en otros países. ¿Por qué esto sería cierto?

### **1.2.3 El episodio de Donora**

Era un día común de otoño, nublado y tranquilo, al oeste de Pennsylvania en 1948.<sup>6</sup> Los residentes de Donora, una pequeña población siderúrgica a orillas del río Monongahela, no prestaban mucha atención a lo que parecía ser una atmósfera particularmente llena de humo. Habían visto cosas peores. Algunos incluso recordaban días en que el aire era tan denso que en realidad se veían tiras de carbón suspendidas en el ambiente como negros carámbanos. Así que el desfile de Halloween de los niños se efectuó según lo programado, lo mismo que el juego de fútbol americano de la secundaria el sábado por la tarde, aunque el entrenador del equipo contrario aseguró que protestaría por el juego. Afirmaba que el entrena-

donde de Donora se las había arreglado para tener un paño de esmog sobre el campo, de tal modo que si se lanzara un pase hacia adelante, la pelota desaparecería por completo de la vista y los receptores no sabrían dónde reaparecería.

Pero ese día era distinto de un día usual de esmog. En la noche habían muerto ya 11 personas y 10 más fallecerían en las próximas horas. El esmog era tan denso que los médicos que trataron a los pacientes se perdían cuando iban de una casa a otra. Para el lunes, casi la mitad de la gente en esa pequeña población de 14,000 habitantes estaba en hospitales o enferma en su propio hogar con dolores de cabeza graves, vómito y calambres abdominales. Las mascotas fueron las que más sufrieron, pues todos los canarios y la mayoría de los perros y gatos morían o agonizaban. Ni las plantas caseras fueron inmunes a los efectos del esmog.

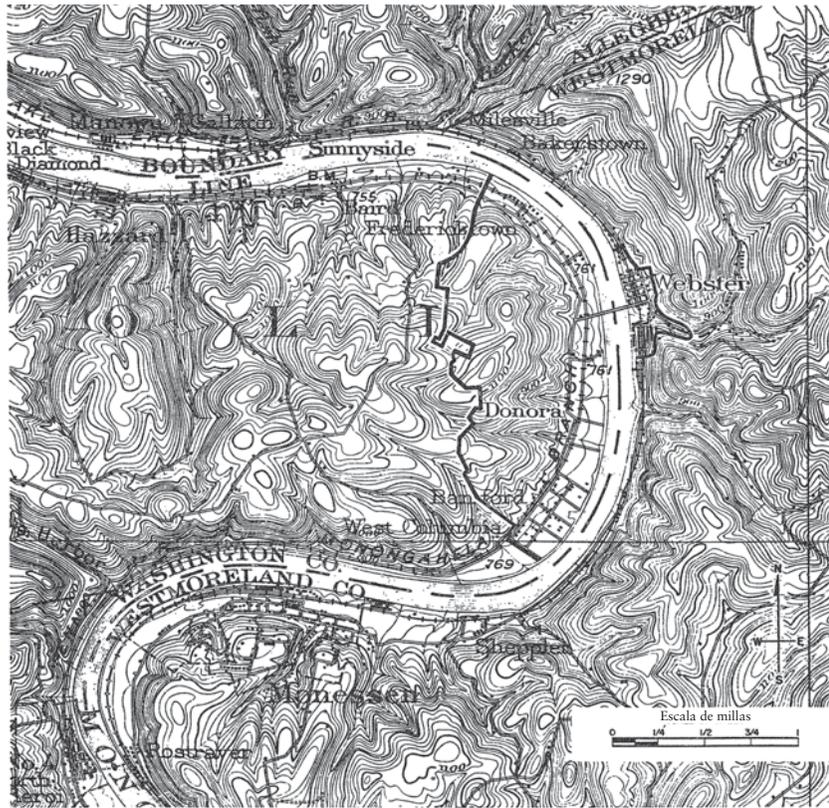
No había vehículos de emergencia u hospitales suficientes para ayudar en una catástrofe de esta magnitud y muchas personas murieron por la falta de una atención inmediata. Se envió a los bomberos con tanques de oxígeno para que hicieran lo que pudieran por auxiliar a los enfermos más graves. No contaban con el oxígeno suficiente para todos, de modo que daban a la gente algunas inhalaciones y procedían a ayudar a otros.

Cuando la atmósfera al final se limpió el 31 de octubre, los seis días de esmog tóxico intenso habían cobrado su factura y el alcance completo del episodio (como se llama a estas catástrofes en la calidad del aire) se hizo evidente. La difusión que hubo en torno a Donora marcó el inicio de una conciencia y un compromiso nuevos por controlar la calidad del aire en nuestras comunidades. Los trabajadores de la salud pensaban que si el esmog hubiera continuado una noche más habrían muerto casi 10,000 personas.

¿Qué es tan especial respecto a Donora que hizo posible este episodio? En primer lugar, era una clásica población dedicada a la elaboración de acero. Tres enormes plantas industriales se encontraban junto al río: una planta de acero, una fábrica de alambres y una planta de zinc para galvanizar el alambre; las tres juntas producían alambre galvanizado. El río Monongahela ofrecía el transporte hacia los mercados mundiales, y la disponibilidad de materias primas y mano de obra confiable (a menudo importada desde Europa del este) la convertía en una empresa muy rentable. Durante el fin de semana, cuando se agudizó la situación de la calidad del aire en la población, las plantas no redujeron su producción. En apariencia, sus gerentes no se consideraron en modo alguno responsables por la condición de los ciudadanos de Donora. No fue sino hasta el lunes por la noche, cuando se conoció la magnitud completa de la tragedia, que apagaron los hornos.

En segundo lugar, Donora se asienta sobre una curva del río Monongahela, con elevados acantilados hacia la parte externa de la curva, lo que crea un espacio o cuenca en el que la población queda en medio (figura 1.2). La noche del 25 de octubre de 1948 se produjo una condición de inversión térmica. Esta condición meteorológica, que nada tiene que ver en sí con la contaminación, sencillamente limitó el movimiento ascendente del aire y creó una especie de tapa sobre el valle. Por tanto, los contaminantes emitidos desde las plantas siderúrgicas no podían escapar y quedaron atrapados bajo esta tapa, con lo que se generó en forma sostenida un nivel cada vez mayor de concentraciones de contaminantes.

Las compañías siderúrgicas insistían en que no eran culpables, y en efecto, nunca se les atribuyó responsabilidad alguna en la investigación especial que se realizó sobre el incidente. Operaban dentro del marco de la ley y no coaccionaron a los trabajadores para que laboraran en sus plantas o a las personas para que vivieran en Donora. En ausencia de una legislación, las compañías no se sentían obligadas a gastar en equipo para controlar la contaminación del aire o modificar los procesos para disminuirla. Consideraban que si se les exigía comprar e instalar dicho equipo quedarían en una desventaja competitiva y al final saldrían del negocio.



A

**Figura 1.2** Donora era una población siderúrgica común a orillas del río Monongahela, al sur de Pittsburgh, con a) acantilados elevados que creaban una cuenca y b) tres plantas siderúrgicas que producían los contaminantes.

La tragedia obligó al estado de Pennsylvania y, finalmente, al gobierno de Estados Unidos a actuar y fue el impulso más grande que se dio para la aprobación de la Ley del Aire Limpio (o Ley del Aire Normal) de 1955, aunque no fue sino hasta 1972 que se aprobó una legislación federal efectiva. Sin embargo, en Donora y en la cercana ciudad de Pittsburgh había una sensación de negación. El esmog y la mala calidad del aire constituían una especie de condición machista que significaba trabajos y prosperidad. La prensa de Pittsburgh dio a las noticias de la tragedia de Donora la misma importancia que a la fuga de los reos de una prisión. Incluso a principios de la década de 1950 se temía que, si la gente protestaba por la contaminación, se cerrarían las plantas y desaparecerían los empleos. Y, en efecto, la planta de zinc (se piensa que fue la principal culpable en la formación del esmog tóxico) cerró en 1957 y las otras dos una década después. Sin embargo, Donora permanece en la memoria como el sitio del episodio más significativo que puso en movimiento nuestro compromiso actual con el aire limpio.

### Preguntas para reflexionar

1. Años después del episodio de Donora, el periódico de la localidad se lamentó publicando: "Lo mejor que podemos esperar es que la gente olvide pronto el episodio de



**Figura 1.2** (Continuación.)

Donora”. ¿Por qué los editores del diario pensaban de esa forma? ¿Por qué no querían que la gente recordara el episodio?

2. Las edades de las personas que murieron iban de los 52 a los 85 años; eran ancianas. La mayoría de ellas ya tenía problemas cardiovasculares graves, con dificultades para respirar. ¿Por qué preocuparse por ellas? En cualquier caso, habrían muerto después de todo.
3. El hecho de que las mascotas sufrieron mucho casi se ha ignorado en los recuentos del episodio de Donora. ¿Por qué? ¿Por qué nos concentramos en las 21 personas que murieron y no en los cientos y cientos de mascotas que perecieron bajo el esmog? ¿No son también importantes? ¿Por qué la gente es más importante para nosotros que las mascotas?

### 1.2.4 Cromo en Jersey City

Jersey City, en el condado de Hudson, Nueva Jersey, fue otrora la capital del procesamiento del cromo en Estados Unidos, y con los años, 20 millones de toneladas de residuos del procesamiento de minerales de cromita se vendieron o se regalaron como relleno.<sup>7</sup> Había muchos sitios contaminados, incluyendo canchas deportivas y sótanos de casas y negocios. Era frecuente que los compuestos de cromo de brillantes colores se cristalizaran en las paredes de los sótanos húmedos y que brotaran en las superficies del suelo en donde se evapora la humedad de la tierra, creando una especie de escarcha anaranjada de cromo hexavalente, Cr(VI). Una tubería de agua

# Balances y separaciones de materia



© Keith y Susan Morgan

*Dog Fence, Australia*



© Keith y Susan Morgan

*Parque de Conservación Red Banks, Australia*

Los ingenieros ambientales necesitan saber qué tan grande deben dibujar la "caja", por ejemplo, dónde trazar la línea y qué incluir y excluir. Si la "caja" es demasiado pequeña, puede haber consecuencias no planeadas; si es demasiado grande, se desperdiciarán tiempo y recursos.

Los alquimistas, quizá los profesionales originales de la ciencia por beneficios, intentaron desarrollar procesos para fabricar oro a partir de metales menos valiosos. Visto desde la posición privilegiada de la química moderna, la razón por la que fracasaron es clara. Excepto por los procesos que implican reacciones nucleares (que no nos interesan en este texto), un kilogramo de cualquier materia, como plomo, al principio de cualquier proceso producirá un kilogramo de esa materia al final, aunque quizá en una forma muy diferente. Este concepto sencillo de la conservación de la masa conduce a una herramienta de ingeniería poderosa, el *balance de materia*. En este capítulo se presenta por primera vez el balance de materia alrededor de una operación unitaria de caja negra. Luego se identifican estas cajas negras como operaciones unitarias reales que llevan a cabo funciones útiles. Inicialmente las cajas negras no tienen nada adentro que afecte el flujo de material; entonces se supone que se producen o consumen cantidades de material dentro de ellas. En todos los casos se asume que el flujo se encuentra en un estado estable, es decir, no cambia con el tiempo. Esta restricción se suprime en los capítulos subsiguientes.

## 4.1 BALANCES DE MATERIA CON UN SOLO MATERIAL

Los flujos de materiales pueden entenderse y analizarse con más facilidad usando el concepto de una caja negra. Estas cajas son representaciones esquemáticas de procesos reales o confluencias de flujos, y no es necesario especificar cuál es este proceso para desarrollar principios generales sobre el análisis de flujos.

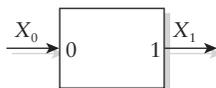
La figura 4.1 muestra una caja negra dentro de la cual fluye algún material. Todos los flujos que entran a la caja se llaman *entradas* (o de entrada) y se representan con la letra  $X$ . Si el flujo se describe como masa por unidad de tiempo,  $X_0$  es una masa por unidad de tiempo del material  $X$  que fluye dentro de la caja. Del mismo modo,  $X_1$  es el flujo de salida, o *efluente*. Si no ocurren procesos dentro de la caja que produzcan más material o destruyan algo de él, y si se supone que el flujo no varía con el tiempo (es decir, se encuentra en un *estado estable*), entonces es posible escribir un balance de materia alrededor de la caja como

$$\begin{bmatrix} \text{Masa por unidad} \\ \text{de tiempo de } X \\ \text{ENTRADA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Masa por unidad} \\ \text{de tiempo de } X \\ \text{SALIDA} \end{bmatrix}$$

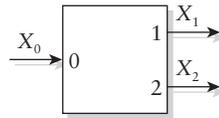
o

$$[X_0] = [X_1]$$

La caja negra puede usarse para establecer un balance de volumen y un balance de masa si la densidad no cambia en el proceso. Debido a que la definición de densidad es masa por unidad de volumen, la conversión de un balance de masa a un balance de volumen se logra dividiendo cada término entre la densidad (una constante). Por lo general es conveniente usar el balance de volumen para los líquidos y el balance de masa para los sólidos.



**Figura 4.1** Caja negra con un flujo de entrada y uno de salida.



**Figura 4.2** Separador con un flujo de entrada y dos de salida.

### 4.1.1 Separación de las corrientes de flujo de un solo material

Una caja negra que se muestra en la figura 4.2 recibe un flujo desde una fuente de alimentación y lo separa en dos o más corrientes. El flujo que entra en la caja se etiqueta como  $X_0$ , y los dos que salen de ella son  $X_1$  y  $X_2$ . Si de nuevo se supone que existen condiciones estables y que no se destruye ni produce material, entonces el balance de es

$$\begin{bmatrix} \text{Masa por unidad} \\ \text{de tiempo de } X \\ \text{ENTRADA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Masa por unidad} \\ \text{de tiempo de } X \\ \text{SALIDA} \end{bmatrix}$$

o

$$[X_0] = [X_1] + [X_2]$$

El material  $X$  puede separarse, por supuesto, en más de dos fracciones, de modo que el balance de materia puede ser

$$[X_0] = \sum_{i=1}^n [X_i]$$

donde hay  $n$  corrientes de salida, o efluentes.

#### EJEMPLO

##### 4.1

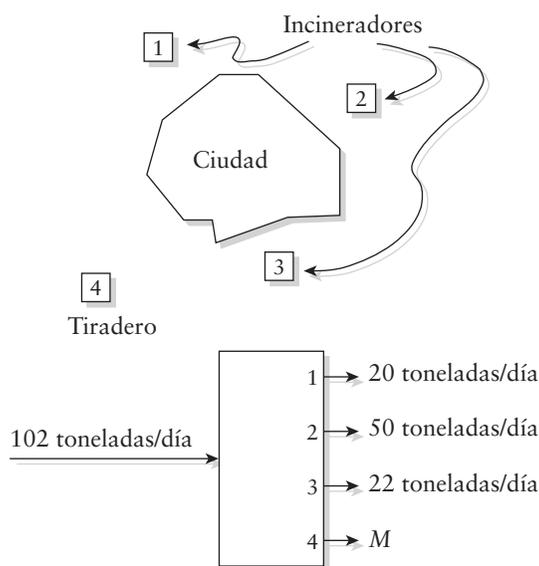
**Problema** Una ciudad genera 102 toneladas/día de desechos que se llevan a una estación de transferencia. En dicha instalación los desechos se dividen en cuatro corrientes de flujo que se dirigen hacia tres incineradores y un tiradero. Si la capacidad de los incineradores es de 20, 50 y 22 toneladas/día, ¿cuánto desecho debe ir al tiradero?

**Solución** Considere la situación en forma esquemática como se muestra en la figura 4.3. Las cuatro corrientes de salida son las capacidades conocidas de los tres incineradores más un tiradero. La corriente de entrada son los residuos sólidos que se entregan a la estación de transferencia. Usando el diagrama, establezca el balance de masa en términos de toneladas por día:

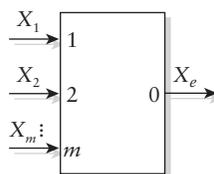
$$[\text{Masa por unidad de desecho ENTRADA}] = [\text{Masa por unidad de desecho SALIDA}]$$

$$102 = 20 + 50 + 22 + M$$

donde  $M$  = masa de desecho al tiradero. Resolviendo la incógnita,  $M = 10$  toneladas/día.



**Figura 4.3** Balance de materia para la eliminación de desechos.



**Figura 4.4** Mezcladora con varios flujos de entrada y uno de salida.

### 4.1.2 Combinación de corrientes de flujo de un solo material

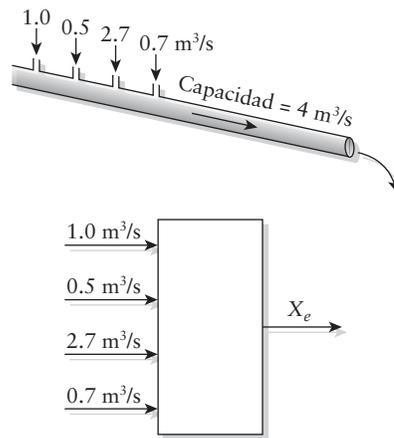
Una caja negra también puede recibir numerosas entradas y descargar una salida, como se muestra en la figura 4.4. Si las entradas se etiquetan  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , el balance de materia produciría

$$\sum_{i=1}^m [X_i] = [X_e]$$

## EJEMPLO

### 4.2

**Problema** Una alcantarilla colectora, que se muestra en la figura 4.5, tiene una capacidad de flujo de  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si el flujo hacia ella se excede no podrá transportar todas las aguas residuales por la tubería y ocurrirán retrocesos. En la actualidad, tres vecindarios descargan su agua residual en la alcantarilla y sus flujos máximos son  $1.0, 0.5$  y  $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Un constructor desea edificar un desarrollo que contribuirá con un flujo máximo de  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  a dicha alcantarilla. ¿Esto causaría que se excediera su capacidad?



**Figura 4.5** Capacidad de una alcantarilla colectora.

**Solución** Establezca el balance de materia en términos de  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Volumen/unidad de tiempo de aguas} \\ \text{residuales ENTRADA} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen/unidad de tiempo de aguas} \\ \text{residuales SALIDA} \end{array} \right]$$

$$[1.0 + 0.5 + 2.7 + 0.7] = X_e$$

donde  $X_e$  es el flujo en la alcantarilla colectora. Resolverlo produce  $X_e = 4.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que es mayor que la capacidad de la alcantarilla colectora, de modo que ésta se sobrecargará si se permite al nuevo desarrollo conectarse a ella. Aun ahora el sistema está sobrecargado (a  $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la única razón por la que no ha ocurrido un desastre es que no todos los vecindarios producen el flujo máximo a la misma hora del día.

### 4.1.3 Procesos complejos con un solo material

Los sencillos ejemplos anteriores ilustran el principio básico de los balances de materia. Las dos suposiciones que se han usado para enfocar el análisis previo se basan en que los flujos se encuentran estables (no cambian con el tiempo) y en que ningún material se destruye (consume) o crea (produce). Si estas posibilidades se incluyen en el balance de materia completo, la ecuación queda

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ACUMULADO} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{SALIDA} \end{array} \right]$$

$$+ \left[ \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{PRODUCIDO} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{CONSUMIDO} \end{array} \right]$$

Si el material en cuestión se etiqueta como  $A$ , la ecuación de equilibrio de masa es

$$\begin{aligned} \left[ \begin{array}{c} \text{Masa de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ACUMULADA} \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{c} \text{Masa de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Masa de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] \\ &+ \left[ \begin{array}{c} \text{Masa de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{PRODUCIDA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Masa de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{CONSUMIDA} \end{array} \right] \end{aligned}$$

o, siempre que la densidad no cambie, en términos de volumen como

$$\begin{aligned} \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ACUMULADO} \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] \\ &+ \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{PRODUCIDO} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Volumen de } A \\ \text{por unidad} \\ \text{de tiempo} \\ \text{CONSUMIDO} \end{array} \right] \end{aligned}$$

La masa o el volumen por unidad de tiempo pueden simplificarse como *gasto*, donde *gasto* simplemente significa el flujo de masa o volumen. Por tanto, la ecuación de balance de materia ya sea para masa o volumen es

$$\begin{aligned} \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{ACUMULADO} \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] \\ &+ \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{PRODUCIDO} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{CONSUMIDO} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Como se observa, muchos sistemas no cambian con el tiempo; los flujos en un momento son exactamente iguales a los flujos posteriores. Esto significa que no es posible acumular nada en la caja negra, ya sea en forma positiva (restos de material) o negativa (material descargado). La ecuación de balance de materia, cuando se cumple la *suposición de estado estable*, es

$$0 = \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{PRODUCIDO} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de } A \\ \text{CONSUMIDO} \end{array} \right]$$

En muchos sistemas simples el material en cuestión no se consume ni se produce. Si esta *suposición de conservación* se aplica a la ecuación de balance de materia, se simplifica a

$$0 = \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{masa o volumen} \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{masa o volumen} \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] + 0 - 0$$

o

$$\begin{bmatrix} \text{Gasto de} \\ \text{masa o volumen} \\ \text{ENTRADA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Gasto de} \\ \text{masa o volumen} \\ \text{SALIDA} \end{bmatrix}$$

la misma ecuación que se usa en los ejemplos anteriores.

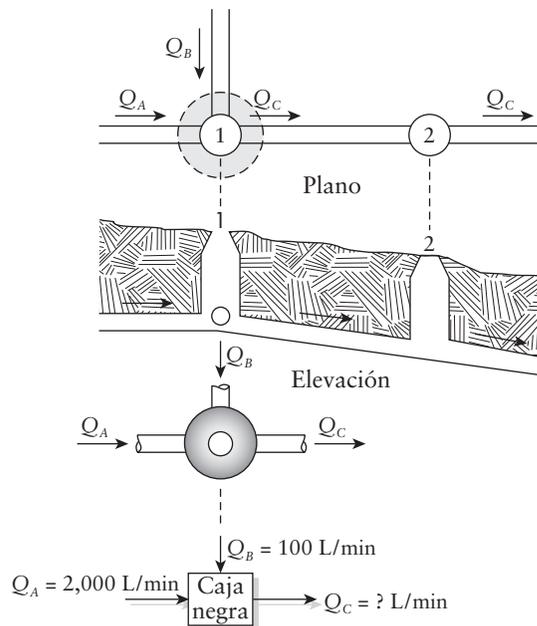
**EJEMPLO**

**4.3**

**Problema** Una alcantarilla que transporta aguas pluviales al Registro 1 (figura 4.6) tiene un flujo constante de 2,000 L/min ( $Q_A$ ). En el Registro 1 recibe un flujo lateral constante de 100 L/min ( $Q_B$ ). ¿Cuál es el flujo hacia el Registro 2 ( $Q_C$ )?

**Solución** Piense en el Registro 1 como una caja negra, como se muestra en la figura 4.6. Escriba la ecuación de balance de materia para el agua (ecuación 4.1):

$$\begin{bmatrix} \text{Gasto de agua} \\ \text{ACUMULADA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Gasto de agua} \\ \text{ENTRADA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Gasto de agua} \\ \text{SALIDA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Gasto de agua} \\ \text{PRODUCIDA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Gasto de agua} \\ \text{CONSUMIDA} \end{bmatrix}$$



**Figura 4.6** Alcantarillado con dos flujos que entran al Registro 1, combinándose y moviéndose hacia el Registro 2.

Debido a que no se acumula agua en la caja negra, se establece que el sistema se encuentra en estado estable. Entonces el primer término de esta ecuación de balance es cero. Del mismo modo, no se produce ni se consume agua, así que los dos últimos términos son cero. Entonces la ecuación queda

$$0 = (Q_A + Q_B) - Q_C + 0 - 0$$

Ahora sustituya los flujos dados en litros por minuto:

$$0 = (2,000 + 100) - Q_C$$

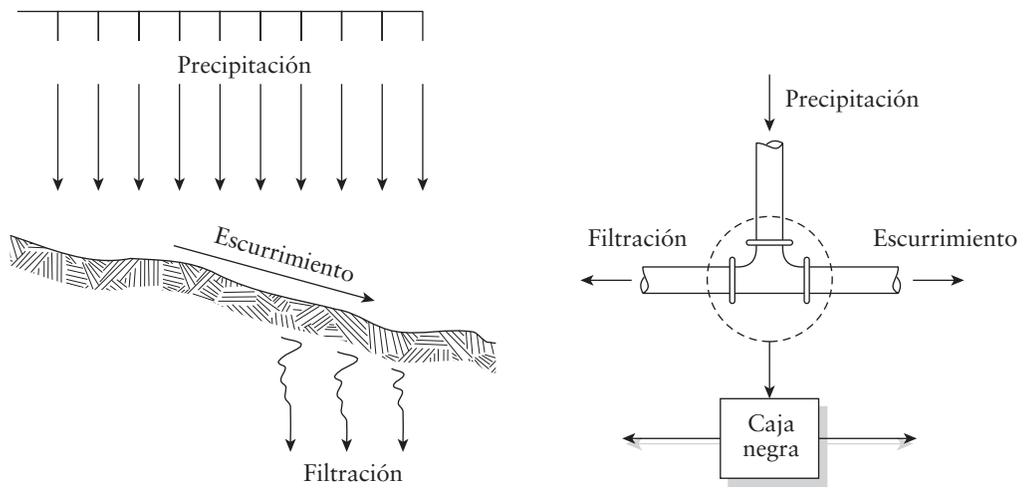
y resuelva:

$$Q_C = 2,100 \text{ L/min}$$

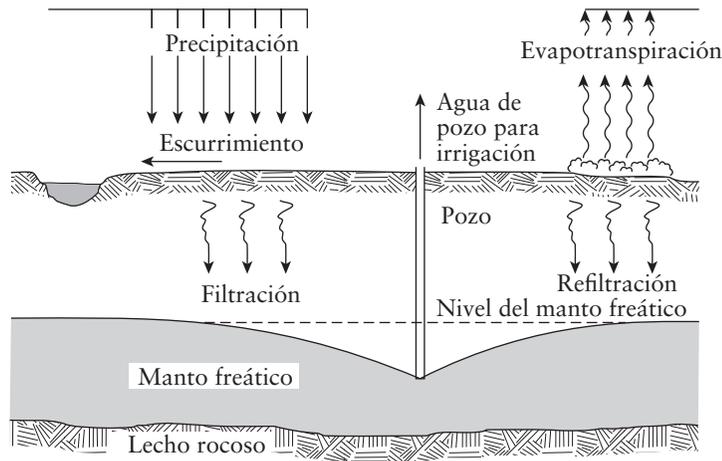
En el lugar en que el flujo se contiene en tuberías o canales es conveniente colocar una caja negra en cualquier empalme con tres o más flujos. Por ejemplo, el registro en el ejemplo 4.3 es un empalme que recibe dos flujos y descarga uno, para un total de tres.

Algunas veces los flujos quizá no estén contenidos en tubos o ríos. En tales casos es útil visualizar primero el sistema como una red de flujo en una tubería. El agua de lluvia que cae a la tierra, por ejemplo, puede filtrarse en el suelo o correr en un curso de agua. Es posible describir este sistema como se muestra en la figura 4.7 y efectuar un balance de materia en la caja negra imaginaria.

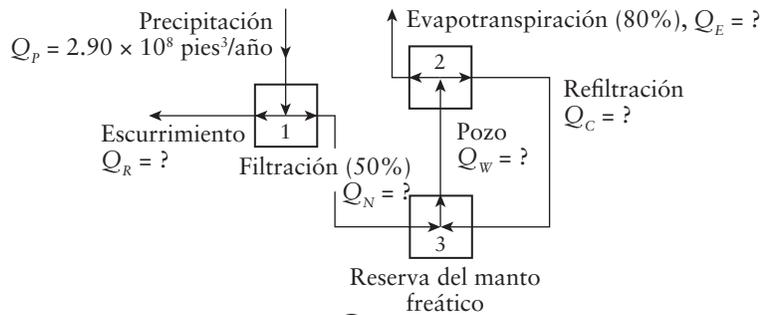
Un sistema puede contener cualquier cantidad de procesos o empalmes de flujos que podrían tratarse como cajas negras. Por ejemplo, la figura 4.8A muestra un esquema del ciclo hidrológico. La precipitación cae a la tierra; algo de agua corre y un poco se filtra en el suelo, donde se une a una reserva de manto freático. Si el agua se usa para irrigación, se extrae de la



**Figura 4.7** La precipitación, el escurrimiento y la filtración pueden visualizarse como una caja negra.



(A)



(B)

Figura 4.8 Ciclo hidrológico simplificado.

reserva del manto freático por medio de pozos. El agua de irrigación se filtra de nuevo en el suelo o se va a la atmósfera gracias a la evaporación o transpiración (agua liberada a la atmósfera por las plantas), por lo común combinada en un proceso: evapotranspiración.

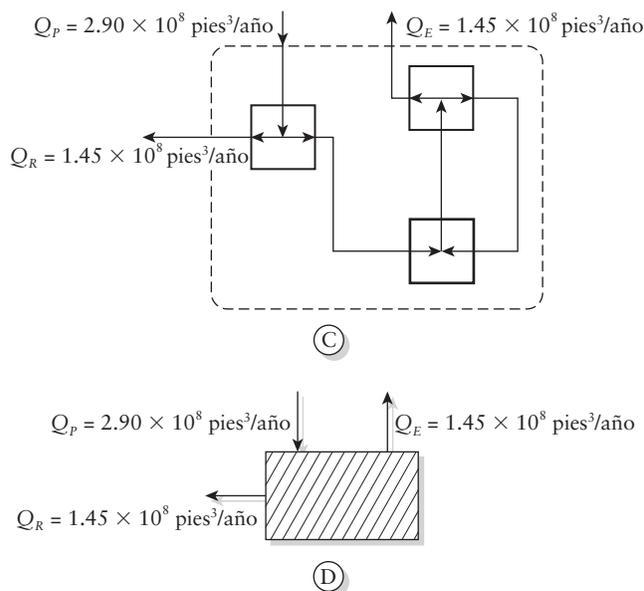
**EJEMPLO**

**4.4**

**Problema** Suponga que la precipitación pluvial es de 40 pulg/año, de las cuales 50% se filtra en el suelo. El campesino irriga los cultivos con agua de pozo. Del agua de pozo extraída, 80% se pierde por evapotranspiración; el resto se filtra de nuevo en el suelo. ¿Cuánta agua subterránea podría extraer el campesino en una granja de 2,000 acres del suelo por año sin agotar el volumen de la reserva del manto freático?

**Solución** Reconociendo este como un problema de balance de materia, primero convierta la precipitación pluvial en un gasto; 40 pulg/año sobre 2,000 acres es

$$40 \frac{\text{pulg}}{\text{año}} \left( \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \right) \times 2,000 \text{ acres} \left( 43,560 \frac{\text{pies}^2}{\text{acre}} \right) = 2.90 \times 10^8 \frac{\text{pies}^3}{\text{año}}$$



**Figura 4.8** (Continuación.)

El sistema en cuestión se traza como la figura 4.8B y la información proporcionada se agrega al bosquejo. Las cantidades desconocidas se representan con variables.

Es conveniente iniciar los cálculos construyendo un balance en la primera caja negra (1), un empalme sencillo con precipitación que entra y escurrimiento y filtración que salen. El balance del gasto de volúmenes es

$$\begin{aligned}
 \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{volumen} \\ \text{de agua} \\ \text{ACUMULADA} \end{array} \right] &= \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{volumen} \\ \text{de agua} \\ \text{ENTRADA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{volumen} \\ \text{de agua} \\ \text{SALIDA} \end{array} \right] \\
 &+ \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{volumen} \\ \text{de agua} \\ \text{PRODUCIDA} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Gasto de} \\ \text{volumen} \\ \text{de agua} \\ \text{CONSUMIDA} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Puesto que se supone que el sistema se encuentra en estado estable, el primer término es cero. Del mismo modo, los últimos dos términos son cero, ya que el agua, de nuevo, no se produce ni se consume (por ejemplo, en reacciones):

$$0 = \left[ 2.90 \times 10^8 \frac{\text{pies}^3}{\text{año}} \right] - [Q_R + Q_N] + 0 - 0$$

Como se planteó en el problema, la mitad del agua se filtra en el suelo; por consiguiente, la otra mitad escurre:

$$Q_R = 0.5 Q_P = Q_N$$

así que sustituir esta información en el balance de material produce

$$0 = 2.90 \times 10^8 - 2Q_R$$

Resolviendo para  $Q_R$  y  $Q_N$ :

$$Q_R = 1.45 \times 10^8 \frac{\text{pies}^3}{\text{año}} = Q_N$$

Un balance en la segunda caja negra (2) produce

$$0 = [Q_W] - [Q_E + Q_C] + 0 - 0$$

Como se estableció en el problema, 80% del agua de irrigación se pierde por evapotranspiración; por consiguiente, 20% se filtra de regreso al suelo:

$$\begin{aligned} 0 &= Q_W - 0.8Q_W - Q_C \\ Q_C &= 0.2(Q_W) \end{aligned}$$

Por último, es posible escribir un balance de materia en la reserva del manto freático (3) si se supone que la cantidad de agua subterránea en la reserva no cambia:

$$0 = [Q_N + Q_C] - [Q_W] + 0 - 0$$

Del primer balance de materia,  $Q_N = 1.45 \times 10^8$  pies<sup>3</sup>/año y del segundo,  $Q_C = 0.2Q_W$ . Sustituya esta información en el tercer balance de materia y resuelva:

$$\begin{aligned} 0 &= 1.45 \times 10^8 + 0.2Q_W - Q_W \\ Q_W &= 1.81 \times 10^8 \text{ pies}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Ésta es la producción máxima segura de agua de pozo para el campesino.

Como comprobación, considere el sistema entero como una caja negra. Esto se ilustra en la figura 4.8C. Sólo hay una forma en que el agua pueda entrar en esta caja (precipitación) y dos formas de salir (escurrimiento y evapotranspiración). Al representar esta caja negra como la figura 4.8D, es posible escribir el balance de materia en pies cúbicos de agua por año:

$$0 = (2.90 \times 10^8) - (1.45 \times 10^8) - (1.45 \times 10^8)$$

El balance del sistema general comprueba los cálculos.

La última comprobación ilustra una herramienta útil y poderosa en los cálculos del balance de materia. Cuando los flujos en un sistema de cajas negras están equilibrados es posible trazar límites (líneas punteadas) alrededor de cualquier caja negra o cualquier combinación de éstas, y esta combinación es en sí una caja negra. Regresando al ejemplo anterior, si se traza una línea punteada alrededor del sistema entero (figura 4.8C) es útil representarla como una sola caja negra (figura 4.8D). Si los cálculos son correctos, los flujos para esta caja deberán balancearse también (y lo hacen).

De manera incidental, ¿qué sucedería si el campesino decidiera tomar más de esa cantidad de agua del suelo? Ocurriría una situación *inestable*, y con el tiempo la reserva del manto freático se secaría. Esto es exactamente lo que ocurre en la actualidad en las Grandes Llanuras. El acuífero Ogallala, una gran reserva que ha proporcionado agua para los campesinos desde 1930, está secándose. **La sobrecarga anual es casi igual al flujo del río Colorado. Un estudio de ingeniería importante advirtió que 5.1 millones de acres de granjas irrigadas lo secarán para el año 2020 si esta tendencia continúa.**

El uso excesivo de fertilizantes representa otro problema ambiental grave. Podemos alimentar a la población del mundo sólo si continuamos extrayendo cantidades enormes de fósforo y otros nutrientes del suelo. Sabemos que al final estas reservas se agotarán y que la producción de nuestras granjas se reducirá en gran medida. Si estos eventos ocurrieran, la hambruna será general en gran parte del mundo. Sin suficiente comida para todos y demasiadas personas desesperadas por ello, ¿cómo se distribuirá? ¿Qué tal si sencillamente ignoramos a quienes mueren de hambre y esperamos que la hambruna reduzca la población global de modo que el alimento que producimos esté en equilibrio con los sobrevivientes? Podríamos argumentar que, de cualquier manera, la cantidad de alimento disponible no alcanzaría para todos y que privarnos de nuestra comida puede causar hambruna aquí también, de modo que al final *todas* las personas morirían de inanición. Es mejor, continúa el argumento, sólo permitir que la naturaleza siga su curso. Cualquier alimento que demos ahora a los países necesitados sólo los alienta a procrear más personas y esto al final conducirá a la tragedia. Este pensamiento se conoce como “ética del bote salvavidas”, nombre que proviene de la idea de que un bote salvavidas sólo puede contener a cierto número de personas; si más de las permitidas por la capacidad tratan de subir, el bote se inundará y *todas* se ahogarán.

Por consiguiente, ¿tenemos la obligación de salvar nuestra propia vida y no preocuparnos por nuestros vecinos? Esto parece algo razonable hasta que consideramos la posibilidad de que quizá *nosotros* seamos quienes no tenemos alimento y nuestros vecinos decidan dejarnos a *nosotros* morir de hambre. ¿Qué deberíamos/podríamos/haríamos, en todo caso?

Esto parece un escenario de ciencia ficción, pero por desgracia puede ser cierto. La privación de recursos es predecible y segura si nuestro sistema global continúa en un estado inestable. Quizá usted es la última generación afortunada. Sus hijos tal vez no lo sean.

Pero volvamos a las cajas negras. Hasta ahora, éstas han tenido que procesar sólo un material; por ejemplo, el agua es el único material balanceado en los dos ejemplos anteriores. Los balances de materia se vuelven bastante más complejos (y útiles) cuando varios materiales fluyen a través del sistema.

Sin embargo, antes de presentar ejemplos de sistemas con múltiples materiales es apropiado establecer algunas reglas generales que son útiles al abordar todos los problemas de balance de materia. Las reglas son:

1. Dibuje el sistema como un diagrama, incluyendo todos los flujos (entradas y salidas) como flechas.
2. Agregue la información disponible, como los gastos de flujo y concentraciones. Asigne símbolos a las variables desconocidas.
3. Trace una línea punteada continua alrededor del componente o componentes que se van a balancear. Esta podría ser una operación unitaria, un empalme, o una combinación de éstos. Todo lo que esté dentro de esta línea punteada se convierte en la caja negra.

4. Decida qué material va a balancearse. Éste podría ser un gasto volumétrico o de flujo de masa.
5. Escriba la ecuación de balance de materia empezando con la ecuación básica:

$$\begin{bmatrix} \text{Gasto} \\ \text{de masa} \\ \text{o volumen} \\ \text{ACUMULADO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Gasto} \\ \text{de masa} \\ \text{o volumen} \\ \text{ENTRADA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Gasto} \\ \text{de masa} \\ \text{o volumen} \\ \text{SALIDA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Gasto} \\ \text{de masa} \\ \text{o volumen} \\ \text{PRODUCIDO} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Gasto} \\ \text{de masa} \\ \text{o volumen} \\ \text{CONSUMIDO} \end{bmatrix}$$

6. Si sólo se desconoce una variable, resuelva esa variable.
7. Si se desconoce más de una variable, repita el procedimiento usando una caja negra diferente o un material distinto para la misma caja negra.

Armados de este modo con un conjunto de lineamientos, ahora pasemos a los problemas en los que se trata con más de un material.

## 4.2 BALANCES DE MATERIA CON MÚLTIPLES MATERIALES

Pueden efectuarse balances de masa y volumen con múltiples materiales que fluyen en un solo sistema. En algunos casos el proceso es una mezcla, donde varias corrientes de entrada se combinan para producir una corriente de salida única, mientras que en otros casos una corriente de entrada individual se divide en varias corrientes de salida de acuerdo con algunas características del material.

### 4.2.1 Mezclar corrientes de flujo de múltiples materiales

Debido a que las ecuaciones de balance de masa y de balance de volumen en realidad son la misma, no es posible desarrollar más que una ecuación de balance de materia para una caja negra, a menos que haya más de un material involucrado en el flujo. Considere el ejemplo 4.5, donde se analiza el flujo de sedimento en ríos (expresado como masa de sólidos por unidad de tiempo).

#### EJEMPLO

#### 4.5

**Problema** Los ríos Allegheny y Monongahela se unen en Pittsburgh para formar el poderoso Ohio. El Allegheny, que fluye al sur a través de bosques y poblados pequeños, corre con un flujo promedio de 340 pies cúbicos por segundo (cfs) y tiene una carga baja de sedimento, 250 mg/L. El Monongahela, por otra parte, va hacia el norte con un flujo de 460 cfs a través de antiguas ciudades acereras y tierras de cultivo pobres, acarreando una carga de sedimento de 1,500 mg/L.

- a) ¿Cuál es el flujo promedio en el río Ohio?
- b) ¿Cuál es la concentración de sedimento en el Ohio?

**Solución** Siga las reglas generales.

Paso 1. Dibuje el sistema. La figura 4.9 muestra la confluencia de los ríos con los flujos identificados.

## Conversiones

<b>Multiplicar</b>	<b>por</b>	<b>para obtener</b>	<b>Multiplicar</b>	<b>por</b>	<b>para obtener</b>
libras de agua	0.01602	pies <sup>3</sup>	newtons/m <sup>2</sup>	$2.94 \times 10^{-4}$	pulgadas de mercurio
libras de agua	27.68	pulg <sup>3</sup>	newtons/m <sup>2</sup>	$1.4 \times 10^{-4}$	lb/pulg <sup>2</sup>
libras de pastel	454	galletas Graham	newtons/m <sup>2</sup>	10	Poise
litros	0.264	gal	pez	$10^{-6}$	microficha
litros	0.0353	pies <sup>3</sup>	pie lb (fuerza)	1.357	J
litros/s	15.8	gal/min	pie lb (fuerza)	1.357	Nm
litros/s	0.0228	millones de gal/día	pies	0.305	m
			pies/min	0.00508	m/s
metros cúbicos	264	gal	pies/s	0.305	m/s
metros cúbicos	35.3	pies <sup>3</sup>	pies/s	720	pulg/min
metros cúbicos	1.31	yd <sup>3</sup>	pies cuadrados	0.0929	m <sup>2</sup>
metros cúbicos/día	264	gal/día	pies cúbicos	1728	pulg <sup>3</sup>
metros cúbicos/h	4.4	gal/min	pies cúbicos	7.48	gal
metros cúbicos/h	0.00638	millón de gal/día	pies cúbicos	0.0283	m <sup>3</sup>
			pies cúbicos	28.3	L
metros cúbicos/s	1	cumec	pies cúbicos/lb	0.0623	m <sup>3</sup> /kg
metros cúbicos/s	35.31	pies <sup>3</sup> /s	pies cúbicos/s	0.646	millón de gal/día
metros cúbicos/s	15,850	gal/min			m <sup>3</sup> /s
metros cúbicos/s	22.8	mil gal/día	pies cúbicos/s	0.0283	gal/min
megáfono	$10^{-12}$	micrófono	pies cúbicos/s	449	gal/min
metros	3.28	pies	pies cúbicos de agua	61.7	lb
metros	1.094	yd	pulgadas	2.54	cm
metros/s	3.28	pies/s	pulgadas/min	0.043	cm/s
metros/s	196.8	pies/s	pulgadas cúbicas de agua	0.0361	lb
metros cuadrados	10.74	pies <sup>2</sup>			
metros cuadrados	1.196	yd <sup>2</sup>	pulgadas de agua	249	N/m <sup>2</sup>
metros cuadrados	$2.471 \times 10^{-4}$	acres	pulgadas de mercurio	0.49	lb/pulg <sup>2</sup>
microscopio	$10^{-6}$	enjuague bucal			
miligramos/L	0.001	kg/m <sup>3</sup>	pulgadas de mercurio	0.00338	N/m <sup>2</sup>
millas	1.61	km			
millas/h	0.447	m/s	ración C	100	raciones
millas/h	88	pies/min			
millas/h	1.609	km/h	toneladas	907	kg
millas cuadradas	2.59	km <sup>2</sup>	toneladas (1,000 kg)	1.10	ton (2,000 lb)
millones de gal	3,785	m <sup>3</sup>	toneladas (2,000 lb)	0.907	toneladas (1,000 kg)
millones de gal/día	43.8	L/s			
millones de gal/día	3785	m <sup>3</sup> /día	toneladas/acre	2.24	toneladas/ha
millones de gal/día	157	m <sup>3</sup> /h	toneladas/ha	0.446	toneladas/acre
millones de gal/día	0.0438	m <sup>3</sup> /s			
millones de gal/día	1.547	pies <sup>3</sup> /s	watts	1	J/s
millones de gal/día	694	gal/min			
			yarda	0.914	m
newton m	1	J	yardas cúbicas	0.765	m <sup>3</sup>
newtons	0.225	60. lb (fuerza)	yardas cúbicas	202	gal



Visite nuestro sitio en <http://latinoamerica.cengage.com>

ISBN-13: 978-607481917-5

ISBN-10: 607481917-3



9 786074 819175