

Carabias 🌿 Meave 🌿 Valverde 🌿 Cano-Santana

Ecología

y medio ambiente en el siglo XXI



Ecología y medio ambiente en el siglo XXI

Ecología y medio ambiente en el siglo XXI

Julia Carabias

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Jorge A. Meave

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Teresa Valverde

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Zenón Cano-Santana

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Revisión técnica:

Biól. Laura Beatriz García Barajas

Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco

Jefa de la Materia de Biología

Colegio de Bachilleres, Plantel 2



México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

**CARABIAS, JULIA; MEAVE, JORGE A;
VALVERDE, TERESA; CANO-SANTANA,
ZENÓN.**

Ecología y medio ambiente en el siglo XXI

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2009

ISBN: 978-607-442-005-0

Área: Biología

Formato: 20 × 25.5 cm

Páginas: 264

Editor: Enrique Quintanar Duarte

e-mail: enrique.quintanar@pearsoned.com

Editor de desarrollo: Felipe Hernández Carrasco

Supervisor de producción: Gustavo Rivas Romero

Fotografías de portada: Javier de la Maza

Carmen Valdés

PRIMERA EDICIÓN, 2009

D.R. © 2009 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Atacomulco 500-5° Piso

Industrial Atoto

53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Reg. Núm. 1031

Prentice-Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN: 978-607-442-005-0

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 12 11 10 09



Contenido

UNIDAD I

Bases biológicas de la ecología	1
---------------------------------------	---

CAPÍTULO 1

Qué es la ecología y cómo afecta el ambiente a los organismos	1
---	---

1.1 Para la imaginación	1
1.2 Definición de ecología	2
1.3 Historia de la ecología	2
1.3.1 El inicio de la civilización	2
1.3.2 La época clásica	3
1.3.3 Los naturalistas	3
1.3.4 El pensamiento evolucionista	4
1.3.5 La ecología moderna	6
1.4 Divisiones de la ecología	7
1.4.1 Relación de la ecología con otras disciplinas	8
1.5 El método científico en la ecología	9
1.6 Factores bióticos y abióticos	9
1.6.1 Factores abióticos	10
1.6.2 Factores bióticos	17
1.7 Ecofisiología: Nociones y aplicaciones	17
 Para reflexionar.....	19
 Actividades complementarias	20

CAPÍTULO 2

Ecología de poblaciones	21
-------------------------------	----

2.1 Para la imaginación	21
2.2 ¿Qué es una población?	22
2.2.1 Propiedades emergentes de las poblaciones	22
2.2.2 Nociones de demografía	24
2.3 El crecimiento de las poblaciones	28
2.3.1 Crecimiento exponencial	28
2.3.2 Crecimiento logístico	29
2.4 Factores que regulan el crecimiento de las poblaciones	30
2.4.1 Los factores abióticos como reguladores de las poblaciones	30
2.4.2 Los factores bióticos: Las interacciones ecológicas	31
 Para reflexionar.....	39
 Actividades complementarias	40

CAPÍTULO 3

Ecología de comunidades.....41

3.1	Para la imaginación	41
3.2	Definición de comunidad ecológica	42
3.3	Propiedades emergentes de las comunidades	43
3.4	La coexistencia de especies en una comunidad.....	46
3.5	Medición de la diversidad de las comunidades	46
3.6	Patrones globales y regionales de la diversidad biológica	49
3.7	Clasificación de las comunidades: El concepto de bioma.....	51
3.8	Dinámica estacional de las comunidades: Fenología	55
3.9	Dinámica sucesional de las comunidades	57
3.9.1	Disturbio y perturbación	57
3.9.2	Sucesión primaria y sucesiónsecundaria.....	58
3.9.3	Polémicas en torno a la teoría de la sucesión.....	59
3.9.4	Aplicación de la teoría sucesional a la restauración ecológica	61
	Para reflexionar.....	62
	Actividades complementarias	63

CAPÍTULO 4

Los ecosistemas y la biosfera.....65

4.1	Para la imaginación	65
4.2	Definición y propiedades emergentes de los ecosistemas.....	66
4.3	El flujo de energía	68
4.3.1	Fotosíntesis	69
4.3.2	Respiración	70
4.3.3	Producción y productividad	70
4.3.4	Estructura trófica.....	74
4.3.5	Eficiencias ecológicas.....	77
4.3.6	Los saprófagos	78
4.4	El movimiento de la materia	79
4.4.1	Ciclos sedimentarios.....	81
4.4.2	Ciclos atmosféricos.....	82
4.5	La biosfera y sus procesos	84
	Para reflexionar.....	85
	Actividades complementarias	86

CAPÍTULO 5

Biodiversidad.....87

5.1	Para la imaginación	87
5.2	¿Qué es la biodiversidad?	88
5.3	¿Cuántas especies diferentes existen y cuándo surgieron?	90
5.4	¿Dónde se distribuye la biodiversidad?.....	95
5.5	Los países megadiversos	99
	Para reflexionar.....	102
	Actividades complementarias	103

UNIDAD II

Recursos naturales y deterioro ambiental	103
--	-----

CAPÍTULO 6

Recursos naturales y servicios ambientales	105
--	-----

6.1 Para la imaginación	105
6.2 Servicios ambientales	106
6.3 Recursos naturales	108
6.3.1 El agua como recurso	109
6.3.2 El suelo como recurso	112
6.3.3 Recursos forestales	119
6.3.4 Recursos pesqueros	122
6.3.5 Los recursos minerales	123
6.3.6 Petróleo	124
 Para reflexionar...	126
 Actividades complementarias	126

CAPÍTULO 7

Deterioro ambiental	127
---------------------------	-----

7.1 Para la imaginación	127
7.2 ¿En qué consiste el deterioro del ambiente?	128
7.3 Factores del deterioro	129
7.3.1 Población humana	130
7.3.2 Patrones de consumo	134
7.3.3 Tecnologías	142
7.3.4 Gobernabilidad	145
 Para reflexionar...	145
 Actividades complementarias	146

CAPÍTULO 8

Cómo se manifiesta el deterioro ambiental	147
---	-----

8.1 Para la imaginación	147
8.2 Las escalas del deterioro	148
8.3 Deterioro a nivel global	149
8.3.1 Cambio climático	149
8.3.2 Adelgazamiento de la capa de ozono	154
8.3.3 Desertificación	155
8.3.4 Pérdida de la biodiversidad	157
8.4 Deterioro a nivel local	162
8.4.1 Deforestación	162
8.4.2 Pérdida y degradación del suelo	164
8.4.3 Problemas por el uso del agua	168
8.5 Contaminación	169
8.5.1 Clasificación de los contaminantes	170
8.5.2 Generación de residuos: Fuentes de la contaminación	172
8.5.3 Consecuencias de la contaminación	177

 Para reflexionar.....	181
 Actividades complementarias	182

UNIDAD III

Ecología y sociedad.....	183
--------------------------	-----

CAPÍTULO 9

Desarrollo sostenible.....	183
----------------------------	-----

9.1 Para la imaginación	183
9.2 Desarrollo sostenible: Definiciones e historia del concepto	184
9.3 Alternativas sostenibles de conservación y uso de los recursos naturales	185
9.3.1 Áreas naturales protegidas	186
9.3.2 Uso de los ecosistemas naturales sin transformarlos	189
9.3.3 Uso de tecnologías amigables.....	194
9.3.4 Restauración ecológica.....	199
9.3.5 Reducción y supresión de contaminantes.....	199
 Para reflexionar.....	201
 Actividades complementarias	202

CAPÍTULO 10

Respuestas y soluciones institucionales al problema del deterioro ambiental.....	203
--	-----

10.1 Para la imaginación	203
10.2 El contexto mundial.....	204
10.2.1 Conferencia de Estocolmo	204
10.2.2 Protocolo de Montreal.....	206
10.2.3 Conferencia de Río	207
10.2.4 Cumbre de Johannesburgo	211
10.2.5 Otros esfuerzos internacionales	213
10.3 Gobernabilidad ambiental	214
10.4 Instrumentos ambientales.....	214
10.4.1 Instrumentos jurídicos o regulatorios	215
10.4.2 Instrumentos de planeación.....	218
10.4.3 Instrumentos económicos	223
10.5 Instituciones relacionadas con el ambiente en México	224
10.6 Procesos adicionales de gobernabilidad ambiental	226
10.6.1 Descentralización	226
10.6.2 Impulso de la participación social	227
10.6.3 Flujo de información.....	228
10.6.4 Financiamiento	229
10.7 ¿Adónde vamos?	230
 Para reflexionar.....	230
 Actividades complementarias	231

Glosario.....	233
---------------	-----

Semblanza de los autores

Julia Carabias

Bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); realizó estudios de maestría en la misma institución. Ocupa una plaza de profesor asociado “C” de tiempo completo en el Departamento de Ecología y Recursos Naturales de esa facultad.

Su trabajo de investigación se centra en temas ambientales, incluyendo la regeneración de las selvas tropicales, la restauración ambiental, el manejo de los recursos, ecología y sistemas productivos, la pobreza y el medio ambiente, así como la política ambiental. Ha publicado un gran número de libros sobre estos temas.

En 1994 asumió la presidencia del Instituto Nacional de Ecología. Posteriormente fue la titular de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (1994 a 2000). Desde su reincorporación a la UNAM coordina la maestría en restauración ecológica e imparte cursos de licenciatura y posgrado. Su destacada trayectoria en el área de la gestión ambiental ha merecido un amplio reconocimiento nacional e internacional.

En 2001 recibió el Premio Getty otorgado por el World Wildlife Fund. En octubre de 2004 recibió el Premio Internacional Cosmos 2004 y la Universidad de Ochanomizu (Japón) le otorgó el doctorado *Honoris Causa*. En 2005, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) le otorgó el Premio “Campeones de la Tierra”.

Jorge A. Meave

Egresado de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde estudió la licenciatura en biología y la maestría en ciencias. Obtuvo el grado de doctor en la York University, de Toronto, Canadá.

Es profesor titular “B” de tiempo completo en el Departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias, UNAM, donde imparte clases de ecología, ecología vegetal, bioestadística y biogeografía en la licenciatura y en el posgrado en ciencias biológicas. Coordina el Grupo de Investigación Ecología y Diversidad Vegetal. Su experiencia docente abarca un periodo de más de un cuarto de siglo.

Ha sido director de numerosas de tesis de licenciatura, maestría y doctorado, sobre todo en el área de ecología vegetal, y ha impartido cursos de diversos temas en el extranjero. Es autor de libros, numerosos artículos de investigación y de difusión, así como coautor de libros especializados. Fue editor del *Boletín de la Sociedad Botánica de México* y actualmente forma parte del comité editorial de *Tropical Ecology*.

Teresa Valverde

Realizó estudios de licenciatura de biología y maestría en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Llevó a cabo estudios de doctorado en la Open University, de Gran Bretaña.

Actualmente es profesora titular “B” de tiempo completo en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y coordina el Grupo de Ecología de Poblaciones.

Realiza investigación en el área de ecología de poblaciones y conservación de especies vegetales, e imparte clases en la licenciatura de biología y en el posgrado en ciencias biológicas.

Es autora de libros y numerosos artículos de investigación, y ha dirigido un gran número de tesis de licenciatura y posgrado.

Zenón Cano-Santana

Llevó a cabo estudios de biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Estudió el doctorado en el Centro (hoy Instituto) de Ecología de la UNAM. Es profesor titular “A” de tiempo completo en la Facultad de Ciencias, UNAM, donde coordina el Grupo de Ecología de Artrópodos Terrestres.

Fue responsable académico de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria. También fue coordinador del Departamento de Ecología y Recursos Naturales y coordinador de la licenciatura en biología, en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Realiza investigación en el área de ecología de artrópodos, interacciones ecológicas, restauración ecológica y ecosistemas, e imparte clases en los niveles de licenciatura y posgrado. Es autor de libros y de varios artículos de divulgación e investigación; además ha dirigido un gran número de tesis de licenciatura y posgrado. Actualmente es editor asociado de la revista *Folia Entomológica Mexicana* y miembro de la mesa directiva de la Sociedad Científica Mexicana de Ecología.

Prólogo

Los conceptos centrales sobre el funcionamiento de la naturaleza y los efectos que en ella provoca la intervención humana no forman parte aún del conocimiento básico de nuestras sociedades. Por esa razón, ha sido muy difícil en el último medio siglo —cuando los problemas ambientales comenzaron a agudizarse de manera vertiginosa— encontrar soluciones y aplicarlas para revertir las tendencias de deterioro que destruyen la naturaleza. Para nosotros resulta cierto el dicho de que “no se cuida lo que no se conoce”. Por ello, con este libro pretendemos que el estudiante conozca las reglas de la naturaleza que rigen la compleja relación entre los organismos y el medio que los rodea.

El medio ambiente del planeta se está alterando severamente, a ritmos e intensidades sin precedentes. La extinción de especies, la pérdida de servicios ambientales, el calentamiento global, la escasez de agua y la pérdida de su calidad son, entre otros, algunos de los efectos más severos que reflejan las modificaciones en el funcionamiento de la naturaleza, en la evolución de la vida y en el desarrollo mismo de las sociedades humanas.

Resulta urgente e indispensable tomar medidas drásticas para corregir el rumbo y orientar el desarrollo actual, de tal manera que no se limite el derecho que tienen las futuras generaciones de elegir sus propias formas de desarrollo. En otras palabras, es necesario encontrar el camino hacia el desarrollo sostenible.

Una de las condiciones más importantes para lograr lo anterior es la toma de conciencia sobre los efectos que los humanos provocamos en la naturaleza cuando la utilizamos, ya sea de manera directa o indirecta. Es decir, debemos comprender las repercusiones de nuestras acciones sobre el suelo, el agua, la flora, la fauna y la atmósfera, elementos de los cuales los humanos tomamos satisfactores para hacer posible el desarrollo de nuestras sociedades. Asimismo, es importante reconocer plenamente los riesgos de la tecnología que aplicamos, así como las consecuencias del incremento en la demanda productos y materias primas ante el aumento de la población y las inadecuadas costumbres

consumistas. También es importante conocer las reglas colectivas adecuadas que debemos adoptar para que exista una convivencia armónica entre la sociedad y la naturaleza.

La conciencia social e individual se adquiere mediante la educación. Por ello, resulta muy loable que se haya incorporado en el programa de estudios a nivel bachillerato la asignatura de Ecología y Medio Ambiente. De esta forma, al cabo de algunos años, cuando los actuales estudiantes de esta asignatura tengan la edad de tomar decisiones al momento de ejercer su profesión y asumir su papel en la sociedad —esto es, cuando sean investigadores, legisladores, jueces, líderes políticos, miembros de organizaciones sociales, madres y padres—, tendrán la información y los elementos necesarios para tomar una decisión adecuada y respetuosa hacia el medio ambiente en cualquiera de sus actos en la vida. Eso hará posible un cambio trascendente en las presentes generaciones.

Los autores hemos escrito esta obra con la esperanza de contribuir a la formación de los jóvenes del siglo XXI en los temas del medio ambiente, complementando el conocimiento que adquieren con sus profesores, actores importantes en la búsqueda de soluciones a la problemática ambiental.

En la presente obra, los autores hicimos un esfuerzo por incluir los temas centrales de la ecología como disciplina biológica, de tal forma que el lector sea capaz de comprender el contenido real del cuerpo de conocimientos científicos en los que ésta descansa. Al mismo tiempo, incorporamos los aspectos ambientales de la disciplina, es decir, aquellos que constituyen la aplicación inmediata de la ecología a nuestra vida cotidiana.

Es importante comentar, en este contexto, que la presente obra tiene un antecedente: el libro titulado *Ecología y Medio Ambiente*, publicado en 2005 por esta misma editorial (autores: Valverde, Cano-Santana, Meave y Carabias). Este nuevo texto, titulado *Ecología y Medio Ambiente en el siglo XXI* (por Carabias, Meave, Valverde y Cano-Santana), responde a la necesidad de reformular el contenido del libro anterior con el objeto de actualizarlo y adecuarlo al nuevo programa de la asignatura (Ecología y Medio Ambiente) aprobado por la Secretaría de Educación Pública en 2006. Existen, por lo tanto, similitudes y diferencias entre ambos textos: aunque los temas tratados son esencialmente los mismos en ambos, en el presente texto se ofrecen los temas correspondiente a la ecología estrictamente biológica de una forma relativamente más concisa, mientras que los que tienen que ver con el manejo de los recursos naturales, y con la relación entre la ecología y la sociedad, se presentan de una manera más amplia y exhaustiva.

Así, el presente texto está integrado por tres unidades. La primera de ellas consta de cinco capítulos que exponen el estudio científico de la ecología como disciplina biológica. En ellos se analiza la finalidad de la ecología como ciencia y sus objetos de estudio: los individuos, las poblaciones, las comunidades y los ecosistemas. Asimismo, nos ocupamos del complejo tema de la biodiversidad, el cual constituye la base para comprender de dónde provienen los recursos naturales que usamos en nuestra vida cotidiana, así como los servicios ambientales de los cuales disfrutamos. En la segunda unidad, que consta de tres capítulos, se revisan los recursos naturales, los servicios ambientales, así como las causas y consecuencias del deterioro ambiental. Por último, en la tercera unidad, integrada por dos capítulos, se expone el abanico de soluciones que permiten revertir el deterioro ambiental. En particular, se analizan las alternativas sostenibles para el uso de los recursos naturales y las soluciones institucionales, en los ámbitos nacional e internacional, propuestas y ejecutadas a la fecha.

Cada capítulo inicia con una sección titulada “Para la imaginación” en la cual se hace una narración relacionada con el contenido del capítulo. Estos relatos ilustran situaciones que invitan al lector a reflexionar sobre la relación entre la naturaleza y nuestro comportamiento. Después de esta sección,

se desarrolla en extenso el capítulo correspondiente a los temas señalados anteriormente. En ellos se resaltan en negritas algunas palabras clave que pueden consultarse, para una mayor comprensión, en el glosario que aparece al final del libro.

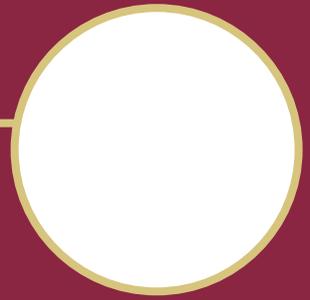
Al final de cada capítulo se incluye una sección titulada “Para reflexionar”, cuya función es estimular la reflexión entre los estudiantes y profesores en torno a los temas expuestos en el libro. Las preguntas planteadas en esta sección no necesariamente tienen una respuesta puntual: más bien se trata de ejercicios analíticos que requieren que el estudiante utilice los conocimientos recién adquiridos para llegar a alguna conclusión razonable sobre una pregunta ecológica en particular. Finalmente, cada capítulo cierra con una lista propuesta de actividades complementarias que el profesor puede solicitar a sus alumnos, las cuales pueden utilizarse como una herramienta de refuerzo y evaluación.

El libro está ilustrado con numerosas fotografías, gráficas, cuadros y figuras que hacen la lectura y la comprensión más ágiles y didácticas. Además, incluimos una serie de recuadros donde se presenta información especializada adicional que puede servir de guía para los profesores y como un camino de profundización para los estudiantes. Con esta estructura pretendemos que la obra resulte amena a los lectores, y esperamos que se convierta en una herramienta de interacción entre los estudiantes y los profesores.

Los autores albergamos la esperanza de que nuestros jóvenes lectores perciban el entusiasmo con que escribimos este libro, de tal manera que puedan disfrutarlo al máximo.

UNIDAD I

Bases biológicas de la ecología



CAPÍTULO 1

Qué es la ecología y cómo afecta el ambiente a los organismos

1.1 Para la imaginación

Una fresca mañana, hace unos 7,500 años, Tsenka salió de su cueva y se dispuso a iniciar sus labores del día junto con las demás mujeres de la tribu. Los hombres habían salido a cazar desde hacía un par de días. Tiempo atrás se habían establecido en una cueva hermosa cuya entrada daba hacia el oriente y cerca de la cual pasaba un río caudaloso. Cuando Tsenka era niña, su tribu iba de un lado a otro según la temporada del año, huyendo del frío y buscando qué comer. Tiempo después encontraron esa cueva que ya estaba habitada por otro grupo de personas. De ellas aprendieron el arte de sembrar semillas y producir sus alimentos en las tierras que colindaban con el río. Quisieron quedarse en ese lugar: las mujeres ayudaban en la siembra y los hombres salían a cazar en grandes grupos.

Con el tiempo, Tsenka aprendió que el maíz se siembra a finales de la época de calor, antes de que empiecen las lluvias; que los **quelites** y el **amaranto** crecen rápido y se pueden sembrar en cualquier temporada, siempre y cuando se les riegue un poco cada día; que las calabazas se pudren fácilmente si no se les cosecha cuando están maduras. Este tipo de conocimientos sobre la naturaleza, adquiridos a partir de la experiencia personal de tantos seres humanos, fueron fundamentales para que prosperaran tribus como la de Tsenka (figura 1.1). Tales conocimientos también constituyeron la semilla a partir de la cual se desarrollarían posteriormente las ciencias naturales, entre ellas, la ecología.



Figura 1.1

Desde tiempos muy remotos, el ser humano aprendió a obtener de la naturaleza los recursos que requiere para su subsistencia. La invención de la agricultura partió de un conocimiento empírico de ciertos procesos ecológicos y representó un paso fundamental que determinó el surgimiento de culturas sedentarias. En la imagen se observan pinturas rupestres que representan el uso del arado primitivo en los albores de la agricultura.

1.2 Definición de ecología

La palabra “ecología” proviene de los vocablos griegos *oikos* (οἶκος, “casa”) y *logos* (λογος, “estudio, tratado”), y constituye el estudio científico de la relación de los organismos vivos con “su casa”, es decir, con el medio ambiente en el que habitan. El medio ambiente de cualquier ser vivo es increíblemente complejo, pues hay numerosos factores que lo caracterizan, como la temperatura, la humedad, la cantidad de luz, la presencia de depredadores y competidores, y la disponibilidad de agua y alimento, entre muchos otros. En síntesis, la ecología intenta comprender las interacciones (es decir, las acciones recíprocas) de los organismos con su entorno y la forma en que éstas se reflejan en las adaptaciones morfológicas y fisiológicas, así como en la abundancia, la distribución y la diversidad de los organismos en la naturaleza.

1.3 Historia de la ecología

1.3.1 El inicio de la civilización

Desde los albores de la humanidad, los seres humanos han acumulado conocimientos **empíricos** sobre los ambientes donde viven y las relaciones que establecen con los organismos con los que conviven. Para los primeros humanos era fundamental saber en qué sitios y en qué épocas podían encontrar alimento (hojas, frutos, semillas, hongos, peces, insectos, animales de caza, entre otros).

Seguramente a un integrante de alguna tribu sedentaria del pasado, como la protagonista de la historia al inicio de este capítulo, no le sorprendía el cambio de las estaciones, como tampoco estos sucesos sorprenden hoy a cualquier campesino del mundo moderno.

A partir de la invención de la agricultura (figura 1.1), el ser humano profundizó su conocimiento acerca del ambiente, en especial el referente a las propiedades del suelo, la temporalidad de la temperatura y de la lluvia, al igual que el conocimiento de algunos fenómenos biológicos como la llegada de aves migratorias, la aparición de ciertos insectos y la fructificación de algunas plantas.

1.3.2 La época clásica

Quizá el primer tratado con un alto contenido ecológico es la *Historia de los animales*, de Aristóteles (384-322 antes de nuestra era, a.n.e.) en la Grecia Clásica. Aristóteles escribió sobre la distribución de los organismos en el mundo conocido hasta entonces por los griegos, y en su obra ofreció interesantes explicaciones sobre el surgimiento de las plagas de langostas y de ratones en campos agrícolas. Sin embargo, ya Heródoto (484-425 a.n.e.) y Platón (429-347 a.n.e.) habían escrito sobre los cambios repentinos en los tamaños poblacionales de algunos animales silvestres y, de esta forma, sentaron las bases de lo que ahora conocemos como la ecología de poblaciones. En el área de la botánica, Teofrasto (372-287 a.n.e.) analizó cuidadosamente la distribución y abundancia de varias especies de plantas y su relación con factores climáticos y **edáficos** (referentes al suelo). Teofrasto merece el reconocimiento de haber escrito los primeros textos de ecología utilizando un enfoque experimental.

En la Roma Antigua, Plinio el Viejo (23-79, de nuestra era, d.n.e.) también hizo una contribución importante a la nascente ecología, al escribir su *Historia natural*, obra en 37 volúmenes que se considera como la primera enciclopedia de ciencias naturales.

1.3.3 Los naturalistas

El pensamiento ecológico no avanzó mucho durante los más de 10 siglos que duró la Edad Media, ni tampoco durante el Renacimiento. Sin embargo, desde el siglo XVIII surgió en Europa un grupo de personas interesadas en el estudio de la naturaleza, conocidas por esta razón como “naturalistas”. En general, ellos contaban con estudios universitarios en diversas disciplinas (geología, geografía, paleontología, botánica y zoología) y tenían en común una fascinación por los fenómenos naturales. Además, como muchos gozaban de una posición social acomodada, lo que les permitía viajar a diferentes partes del mundo, tuvieron la oportunidad de hacer observaciones directas sobre los seres vivos en regiones que presentaban condiciones naturales muy diferentes a las que prevalecían en sus países.

Entre los naturalistas que más contribuyeron a establecer los cimientos de la ecología moderna podemos mencionar a Buffon, Malthus y Humboldt. Georges Buffon (1707-1788) tocó el tema de las plagas y quizá fue el primero en ocuparse de la cuestión de la regulación poblacional en su *Historia natural* (1756). Casi medio siglo más tarde, en 1798, Thomas R. Malthus (1766-1834) publicó el *Ensayo sobre la población*, donde predijo que la población humana sufriría grandes hambrunas, pues crecería a un ritmo más rápido que la producción de alimentos. Otro destacado naturalista fue Alexander von Humboldt (1769-1859) (figura 1.2), geólogo de formación y con vastos conocimientos de botánica,



Figura 1.2

Alexander von Humboldt (1769-1859), naturalista alemán que recorrió amplias regiones del continente americano. Su obra es una importante contribución a la botánica.

matemáticas y química. En compañía de Amado Bonpland, Humboldt realizó un largo viaje por Cuba, México y el norte de Sudamérica, que lo inspiró a escribir su *Viaje a las regiones equinocciales*. En esta obra monumental describe detalladamente la distribución de la **vegetación** y de las plantas a través de **gradientes ambientales**, que había caracterizado a partir de mediciones realizadas con los mejores instrumentos de su época. Quizá el mayor legado de Humboldt fue su efecto inspirador en el pensamiento de Charles Darwin, otro gran naturalista del siglo XIX de quien hablaremos en la siguiente sección.

1.3.4

El pensamiento evolucionista

Durante siglos prevaleció la creencia en un origen divino del mundo y de sus criaturas tal y como las conocemos actualmente. Sin embargo, cada vez se acumulaba más evidencia científica que apuntaba en otra dirección. En primer lugar, los abundantes **fósiles** de especies extintas hallados por los naturalistas los llevaban a preguntarse sobre el origen de esas misteriosas rocas y su relación con los seres vivos actuales. Por otro lado, los viajes de los europeos a regiones remotas del planeta les revelaron un nuevo mundo de plantas y animales. ¿De dónde había surgido tanta variedad de formas de vida? ¿Por qué unas formas se parecían más entre sí que otras? ¿Aquellas que se parecían tuvieron un origen común? Al intentar responder a estas preguntas, los naturalistas llegaron a la conclusión de que los seres vivos no siempre habían tenido la apariencia actual, sino que cambiaron con el tiempo, dando lugar a especies diferentes.

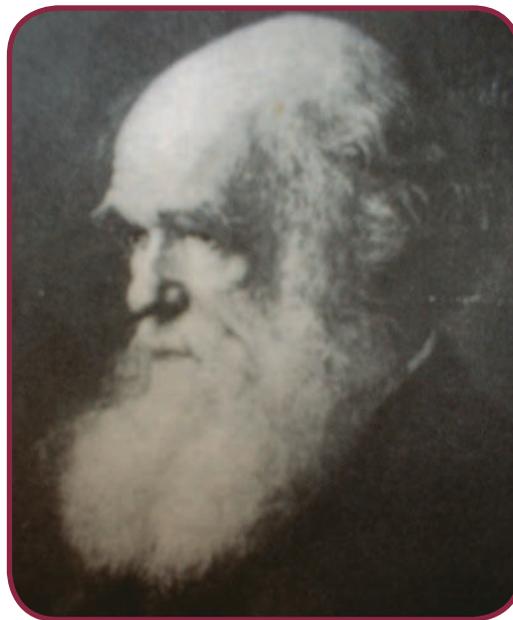


Figura 1.3

Charles Darwin (1809-1882), naturalista británico que publicó *El origen de las especies*, obra en la que postula la evolución de las especies por selección natural.

Estas reflexiones culminaron en una de las obras más geniales del pensamiento humano: *El origen de las especies*, publicada en 1859 por Charles Darwin (1809-1882) (figura 1.3). En ella, Darwin planteó una teoría centrada en la idea de que los seres vivos se encuentran en constante **evolución** como resultado de la acción de la **selección natural**. Como su nombre lo dice, la selección natural consiste en que los organismos más exitosos de cada especie (los más “aptos”, en palabras de Darwin) son seleccionados por la naturaleza, es decir, sobreviven más fácilmente y se reproducen con mayor éxito, lo que permite que sus características pasen a las siguientes generaciones (véase el recuadro 1.1, “La selección natural”).

Recuadro 1.1

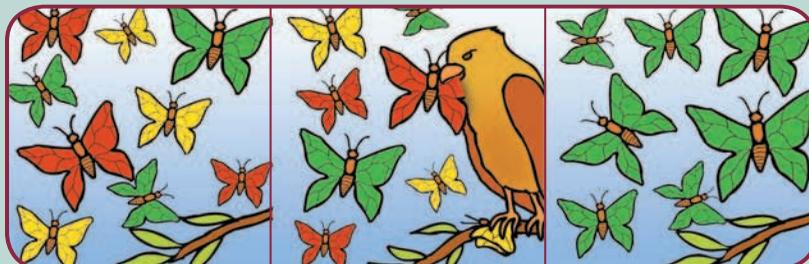
La selección natural

Para que la selección natural actúe, se deben presentar las siguientes condiciones:

1. Los organismos de una misma población deben presentar ciertas diferencias entre sí (por ejemplo, unos son más grandes que otros, o unos corren más rápidamente que los demás).
2. Las características que presenta un organismo (si es más grande o más chico que los otros miembros de la población o si corre más deprisa) se heredan, es decir, se transmiten a la descendencia.
3. No todos los organismos tienen el mismo éxito: a algunos les va mejor que a otros (por ejemplo, los más veloces escapan más fácilmente de sus depredadores).
4. Los organismos que tienen mayor éxito tendrán más descendencia, a la cual heredarán sus características (por ejemplo, los más rápidos y que escapan más fácilmente de los depredadores tendrán más hijos; así, los depredadores cazarán a los lentos, que no sobrevivirán para reproducirse).
5. Con el paso del tiempo, la población estará formada por organismos que tengan las características de los que fueron más exitosos (por ejemplo, correrán más rápidamente que los de generaciones anteriores, puesto que de toda la variedad inicial que había, sólo algunos, los más exitosos, dejaron descendencia). En este punto decimos que se ha dado un proceso de *evolución*.

Un ejemplo

Supón que en un grupo de mariposas de cierta especie algunas son verdes, otras amarillas y otras rojas. Las amarillas y las rojas tienen la desventaja de que llaman mucho la atención de las aves, quienes se las comen en cuanto las detectan. Sin embargo, los pájaros casi no comen mariposas verdes, pues como son del mismo color que las plantas sobre las que se posan, no las ven tan fácilmente. Así, las mariposas verdes sobreviven más y pueden tener más hijos que las amarillas y las rojas. A la larga, este grupo de mariposas será predominantemente de color verde. Ha ocurrido un proceso de evolución por selección natural, pues la naturaleza “seleccionó” a aquellos organismos que son capaces de enfrentar mejor las condiciones en las que viven.



Darwin pensaba que la selección natural, a través de su acción constante y paulatina, era la responsable de producir grandes cambios en la forma y el funcionamiento de los organismos. Las especies actuales que habitan el mundo surgieron de ancestros comunes que fueron sometidos a diferentes **presiones de selección**, de forma que evolucionaron en distintas direcciones, dando lugar a especies diferentes.

Las ideas de Darwin revolucionaron por completo la concepción de la naturaleza que se tenía hasta entonces. Por primera vez se pensó en la naturaleza como una entidad cambiante, lo cual fue fundamental para el surgimiento de la ecología hacia finales del siglo XIX y principios del XX. En esencia, la ecología tiene que ver con este cambio constante, pues sus objetos de estudio (es decir, las interacciones entre los organismos y el medio ambiente) son precisamente las presiones de selección natural que conducen, con el tiempo, a la evolución de los seres vivos.



1.3.5

La ecología moderna

Después de la publicación de *El origen de las especies*, las ideas evolucionistas se incorporaron gradualmente al pensamiento de los biólogos de la época. Así surgió el interés por estudiar a los organismos en su propio medio ambiente y analizar sus relaciones recíprocas. Fue entonces cuando apareció propiamente la disciplina de la ecología, definida por primera vez por el fisiólogo alemán Ernst Haeckel (1834-1919) en 1866.

La ecología, como la conocemos actualmente, es producto de un proceso de maduración y conformación que inició en la segunda mitad del siglo XIX. Durante las primeras décadas después de que Haeckel definió a la ecología, ésta pasó por una etapa de conformación en la que su objeto de estudio quedó establecido. Más adelante, durante la primera mitad del siglo XX se propusieron nuevos conceptos y se sustentaron con formulaciones matemáticas y teorías científicas, lo cual llevó a un proceso de consolidación de la ecología. Algunos de estos nuevos conceptos fueron los de **ecosistema**, **nicho ecológico** y **sucesión ecológica**, que analizaremos más adelante. Por último, desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad, la ecología cambió su rumbo al iniciar una etapa de aplicación, en la que ha dejado de limitarse al ámbito estrictamente científico para introducirse en las esferas política, económica y social.

La presencia actual de la ecología en estos ámbitos se ha acentuado a raíz de que los seres humanos empezamos a tomar conciencia de que estamos provocando daños irreparables a los ecosistemas naturales, al utilizarlos para producir los bienes necesarios para nuestra subsistencia. La preocupación por el futuro mismo de la humanidad ha comenzado a difundirse tanto entre los biólogos y otros científicos, como entre los políticos, los empresarios y el público en general. Una de las disciplinas que puede ofrecer algunas respuestas a la crisis ambiental es precisamente la ecología, ya que estudia el equilibrio de los ecosistemas y el importante papel de cada especie en el funcionamiento de la naturaleza.

La ecología encuentra su mayor campo de aplicación en su intento por enfrentar la actual crisis ambiental, en particular a través de la búsqueda de las mejores estrategias para la conservación y el manejo racional y **sostenible** (o **sustentable**) de los recursos naturales. Asimismo, al estudiar los ecosistemas naturales y los manejados por el ser humano, la ecología se propone comprender su funcionamiento y prevenir su deterioro.

La crisis ambiental tiene muchos aspectos, no todos relacionados con la ecología. Por ejemplo, para tratar el problema de la contaminación ambiental concurren ciencias como la química o la meteorología; la física y la ingeniería ofrecen alternativas a las fuentes de energía cada vez más escasas; para

entender el fenómeno del cambio climático mundial debemos apoyarnos en la geografía y la termodinámica. Así, la preocupación por la crisis ambiental, que trataremos en las siguientes unidades, no es exclusiva de la ecología. Es un problema que debe ser abordado por diversas ciencias y concierne a toda la humanidad.

1.4 Divisiones de la ecología

La vida se encuentra organizada en diferentes niveles de complejidad, desde las moléculas orgánicas que constituyen a los seres vivos (como los lípidos y las proteínas), hasta la biosfera en su conjunto. La ecología es una ciencia biológica que estudia los niveles de mayor complejidad de la vida: los **individuos**, las **poblaciones**, las **comunidades**, los **ecosistemas** y la **biosfera**. Éstos son los **niveles de organización** de la materia viva que estudia la ecología (figura 1.4), los cuales definen las subdisciplinas más generales que constituyen esta ciencia. De hecho, son el objeto de estudio de los siguientes tres capítulos. El cuadro 1.1 presenta esta división de forma sintética.

Cuadro 1.1 Subdisciplinas en las que se divide la ecología en relación con los niveles de organización que estudia.

Nivel de organización	Rama de la ecología	¿Qué estudia?
INDIVIDUO	1. AUTOECOLOGÍA (Ecología de los individuos)	Las interacciones de los individuos con el ambiente, las cuales determinan las adaptaciones morfológicas, fisiológicas y conductuales de las diferentes especies.
	1a. Ecofisiología	El funcionamiento de los individuos en relación con su medio ambiente abiótico.
	1b. Etología (Ecología de la conducta)	El comportamiento de los animales en su ambiente natural.
POBLACIÓN	2. ECOLOGÍA DE POBLACIONES	La interacción entre el ambiente y las poblaciones que determinan su distribución y abundancia.
	2a. Demografía	Los cambios numéricos de las poblaciones a través del análisis de las tasas de natalidad, mortalidad y migración.
COMUNIDAD	3. SINECOLOGÍA (Ecología de las comunidades)	La estructura, la composición y el funcionamiento de las comunidades ecológicas en relación con su medio ambiente.
ECOSISTEMA Y BIOSFERA	4. ECOLOGÍA DE ECOSISTEMAS	Los flujos de materia y energía que se dan entre los organismos y los componentes abióticos en los diferentes ambientes, así como su regulación.

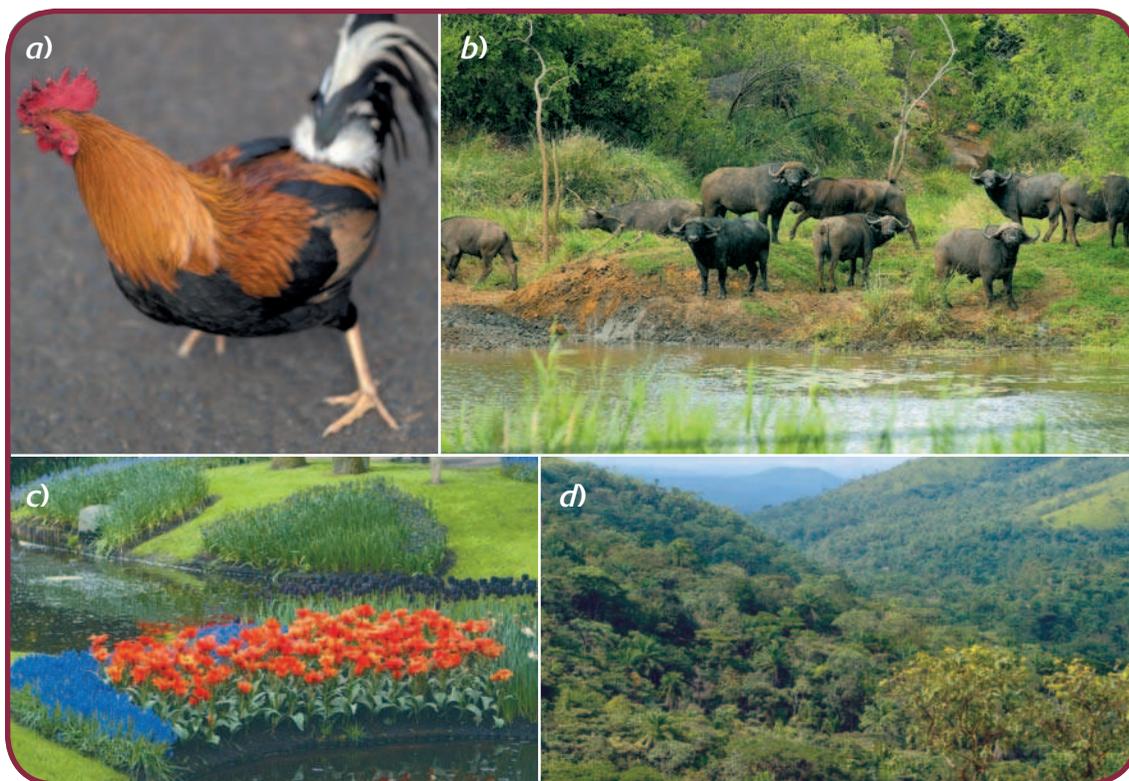


Figura 1.4 Niveles de organización de la materia viva que constituyen el objeto de estudio de la ecología. *a)* Individuo: cada ser vivo aislado. *b)* Población: conjunto de individuos de la misma especie que se pueden reproducir entre ellos. *c)* Comunidad: conjunto de poblaciones de diferentes especies entre las cuales se dan interacciones ecológicas. *d)* Ecosistema: conjunto total de comunidades vivas en el contexto de su entorno abiótico, con el que mantienen intercambio de materia y energía.

Hay otras formas de clasificar las ramas de la ecología: según el tipo de ambiente que estudia (ecología terrestre, ecología acuática, ecología marina, ecología de montañas, ecología de desiertos, etcétera), el grupo biológico en el que se concentra (ecología de parásitos, ecología vegetal, ecología de insectos, ecología de hongos, ecología de algas, etcétera) o el enfoque teórico que emplea (ecología evolutiva, ecología teórica, ecología matemática, ecología aplicada, ecología cuantitativa, ecología funcional, ecología humana, entre otras).

1.4.1 Relación de la ecología con otras disciplinas

La ecología se encuentra íntimamente vinculada con otras disciplinas biológicas. En particular, tiene una estrecha relación con la fisiología, que estudia el funcionamiento de los órganos y sistemas de los seres vivos; la ecología, por su parte, trata de entender el efecto de las condiciones ambientales en las que viven los organismos sobre este funcionamiento. También se relaciona con la biología evolutiva, ya que las interacciones ecológicas constituyen, en sí mismas, las presiones de selección

natural que impulsan la evolución de las especies. Otra ciencia relacionada es la genética, la cual es fundamental para comprender cómo se heredan las características que determinan el éxito ecológico de los organismos.

Por otro lado, existe un conjunto de disciplinas no biológicas que apoyan a la ecología. Entre ellas podemos mencionar a las encargadas de estudiar el componente **abiótico** de la naturaleza, como la geografía, la geología y la **meteorología**. Asimismo, la química y la física ayudan a entender procesos ecológicos importantes, como los ciclos de los nutrientes y los intercambios de materia y energía entre los organismos y su medio ambiente. Por esta razón se dice que la ecología es una ciencia *interdisciplinaria*, pues recurre a varias disciplinas de las ciencias naturales en la búsqueda de respuestas a sus preguntas fundamentales.

Finalmente, la ecología está ligada a disciplinas ajenas a las ciencias naturales, como la sociología y la economía, pues al ofrecer criterios y métodos de uso y conservación de los recursos biológicos, ayuda a administrar la base de recursos naturales en la que se encuentra sustentada toda sociedad. Así, se dice que la ecología es también una ciencia *transdisciplinaria*, pues funciona como un puente entre las disciplinas científicas y las sociales.

1.5 El método científico en la ecología

Los ecólogos construyen su disciplina a través de la formulación de preguntas que pueden responderse de diversas formas. Un componente esencial de la tarea de la ecología es la aplicación del método científico, que podemos resumir en los siguientes pasos: 1) observar y medir fenómenos naturales; 2) plantear hipótesis, esto es, explicaciones anticipadas sobre los fenómenos observados, y 3) someter a prueba las hipótesis o explicaciones mediante experimentos u observaciones sistemáticas, para describir un patrón general. Estos tres pasos resumen el método científico *inductivo*. Ahora bien, hay muchos sistemas y procesos ecológicos con los que es prácticamente imposible experimentar, como sucede al estudiar un ecosistema marino o la sucesión ecológica en una isla recién emergida. En tales casos, el conocimiento se genera mediante la formulación de patrones generales y su comprobación a través de observaciones repetidas, un procedimiento conocido en el contexto del método científico como *deducción*.

1.6 Factores bióticos y abióticos

En la naturaleza los organismos no se encuentran aislados, sino que están en contacto unos con otros; además, están inmersos en un espacio que presenta condiciones físicas y químicas particulares. Todo ello constituye el **medio ambiente**. Las características del medio ambiente son un tema de interés en ecología porque afectan el **desempeño** de los organismos y determinan sus probabilidades de sobrevivir y reproducirse. Como parte del medio ambiente distinguimos dos conjuntos de factores: los **abióticos** y los **bióticos**. Los factores abióticos se refieren a las condiciones físicas y químicas del ambiente, como la humedad, la radiación solar, la temperatura o la salinidad, mientras que los factores bióticos son aquellos que tienen que ver con la presencia de otros organismos.

 1.6.1

Factores abióticos

Los factores abióticos determinan que ciertos organismos se encuentren o no en un ecosistema. Las condiciones abióticas que permiten la vida de los organismos de las diferentes especies tienen que ver con su fisiología, es decir, su funcionamiento interno. A la vez, su fisiología determina su grado de tolerancia y sus requerimientos ante condiciones abióticas particulares.

La fisiología de cada organismo está determinada por un conjunto de reacciones orgánicas muy complejas que las fuerzas evolutivas han “modelado” a lo largo de miles de años. Como resultado, se dice que los organismos están **adaptados** a su ambiente. Por ejemplo, muchos **crustáceos** (grupo al que pertenecen los camarones, los cangrejos y los acociles) están adaptados para vivir en las condiciones de salinidad variable de los estuarios o desembocaduras de ríos. Estos animales han evolucionado en tales ambientes durante millones de años, y su fisiología ha adquirido los rasgos que les permiten enfrentar las condiciones abióticas que prevalecen en esos ecosistemas.

Los factores que constituyen el medio ambiente abiótico pueden ser **recursos** o **condiciones**. Los recursos son elementos del ambiente que los organismos *usan* o *consumen*, y al hacerlo, disminuyen la disponibilidad de los mismos. Por ejemplo, para una planta, el agua es un recurso; al absorberla a través de sus raíces, disminuye la cantidad disponible para otras plantas. En contraste, las condiciones son factores del medio que los organismos *perciben* o *experimentan*, y que no implican el consumo. Un ejemplo claro es la temperatura, condición ambiental que afecta el funcionamiento de los organismos por su efecto directo sobre los procesos fisiológicos.

A continuación revisaremos los principales factores abióticos.

Temperatura

La temperatura y la humedad son los factores más importantes que determinan la distribución de las especies de organismos en nuestro planeta. Estos dos factores determinan el **clima** de una región.

La temperatura varía en función de muchos factores. En principio, la temperatura depende de la manera en que inciden los rayos solares sobre la superficie terrestre. Como es evidente, esta condición cambia no sólo durante el día, sino también a lo largo del año y entre sitios ubicados a distinta **latitud**. Las regiones más cercanas a los polos son más frías que las regiones próximas al ecuador, donde los rayos solares inciden de manera casi perpendicular durante todo el año (figura 1.5). La temperatura también varía con la **altitud**; las cumbres de las montañas son más frías que las zonas que se encuentran a nivel del mar. Finalmente, la temperatura depende de la cercanía a cuerpos de agua: las zonas que se encuentran muy alejadas del mar o de grandes lagos tienen una temperatura más extrema que las regiones cercanas a esos cuerpos de agua.

Según la forma en la que los organismos se ven afectados por la temperatura exterior, distinguimos a los **endotermos**, que son capaces de regular su propia temperatura a través de un metabolismo muy activo que genera calor, y los **ectotermos**, cuya temperatura depende de las condiciones térmicas del medio ambiente. Los mamíferos y las aves, por ser organismos endotermos, pueden vivir en condiciones de temperatura muy variada y **aclimatarse** con relativa facilidad a cambios térmicos. Entre los animales ectotermos encontramos a los reptiles, los anfibios, los peces y todos los invertebrados (moluscos, artrópodos, anélidos, celenterados, etcétera). Además, todas las plantas, los hongos y los microorganismos son ectotermos. Puesto que la temperatura interna de estos organismos casi siempre es la misma que la del medio, sus posibilidades de vivir en regiones con temperaturas demasiado frías y demasiado calientes son limitadas.

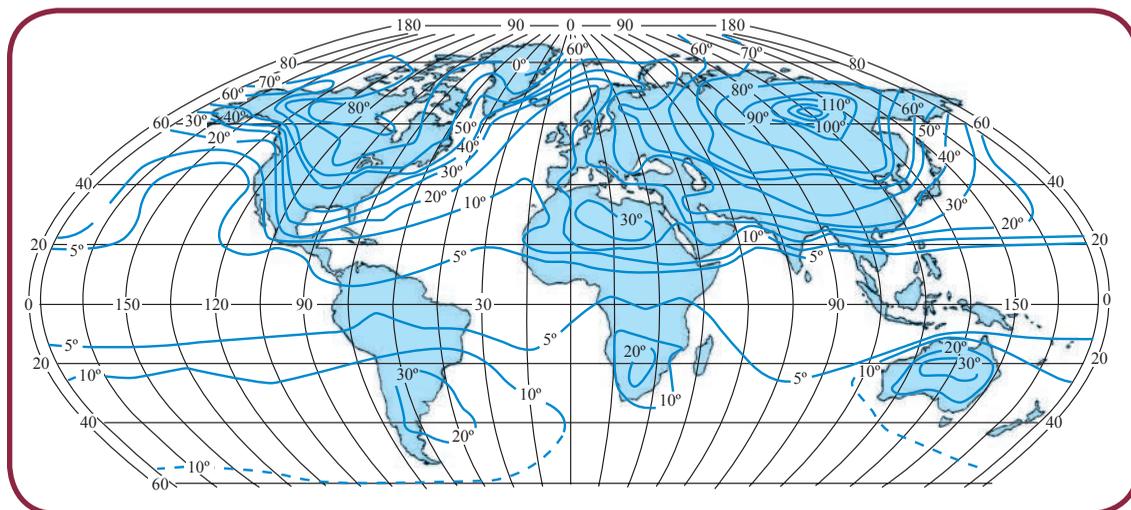


Figura 1.5 Mapamundi en el que se señalan las regiones térmicas del planeta. Las líneas señalan zonas en las cuales las variaciones anuales de temperatura son similares. La variación anual de temperatura se define aquí como la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido menos la temperatura media del mes más frío (tomado de Krebs, 1996).

Humedad

En los ambientes terrestres, el agua se puede encontrar en la atmósfera o en el suelo. La humedad atmosférica es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, mientras que la humedad edáfica se refiere a la cantidad de agua contenida en el suelo. La cantidad de agua que hay en el suelo y en la atmósfera depende de los patrones de lluvia. Al igual que la temperatura, la precipitación también es un determinante importante del clima. La humedad y la temperatura se afectan mutuamente: cuando la temperatura es muy elevada, el agua se evapora y pasa a formar parte de la atmósfera; al bajar la temperatura, el agua que se encuentra en la atmósfera se condensa en forma de lluvia o rocío, y se hace accesible para los seres vivos.

A nivel mundial, la cantidad y la temporalidad de la precipitación están determinadas por la circulación de los vientos. Por ejemplo, el movimiento de los vientos alisios hace que las lluvias sean abundantes en las regiones cercanas a los trópicos durante el verano; a la vez, el descenso de viento seco alrededor de los paralelos correspondientes a los 30° al norte y al sur del ecuador genera grandes desiertos en esas latitudes (figura 1.6). Por otro lado, a una escala más pequeña, los patrones de precipitación dependen de la cercanía de mares o lagos, así como de la presencia de montañas. Algunas cadenas montañosas corren más o menos paralelas a las costas; en esas zonas, el aire húmedo y cálido que circula del mar hacia el continente choca contra las montañas, se eleva y se enfría, descargando toda su humedad en forma de lluvia. El aire que pasa al otro lado de la montaña está seco. Así, en el lado de la montaña que da al mar el clima es húmedo y en el otro lado es seco. A este fenómeno se le conoce como **sombra orográfica** o simplemente **sombra orográfica** (figura 1.7).

El agua constituye a la vez un recurso y una condición. Para los organismos acuáticos, como los peces, los corales y las algas, el agua es una condición sin la cual sencillamente no existirían. Para muchos animales y plantas terrestres, la humedad atmosférica es una condición que determina en gran

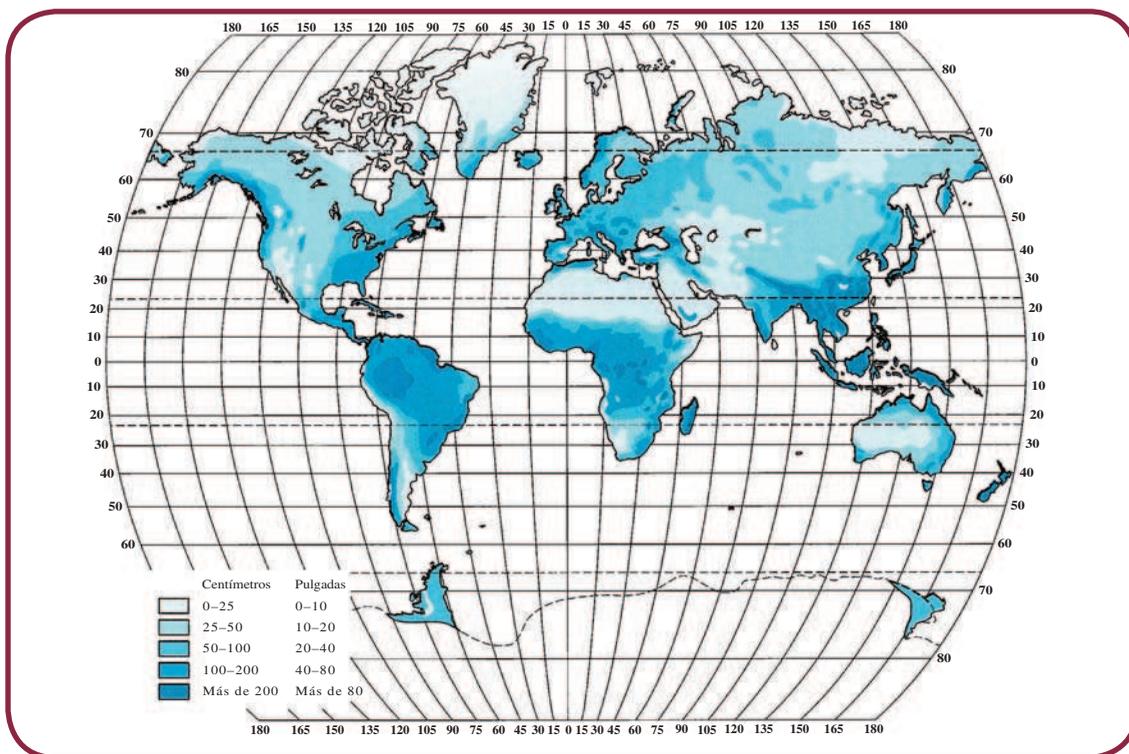


Figura 1.6 Mapamundi en el que se indica la precipitación anual que reciben las diferentes regiones del mundo (tomado de Krebs, 1996).

medida su tasa de pérdida de agua (por **transpiración** a través de los **estomas** en el caso de las plantas, o a través de la piel en forma de sudor en el caso de muchos animales).

El agua también es un recurso que consumen los seres vivos. Las plantas terrestres absorben agua y la utilizan para llevar a cabo la **fotosíntesis**. A la vez, al ser ingerida por los animales, el agua pasa a formar parte de sus tejidos, donde se utiliza para su metabolismo.

Muchas plantas tienen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten reducir su pérdida de agua. Las adaptaciones son cambios en la estructura anatómica o en los procesos fisiológicos de un organismo que evolucionan con el tiempo y le permiten desenvolverse con mayor éxito en el medio. Entre las adaptaciones morfológicas están la presencia de pelos, cutículas cerosas o tejidos

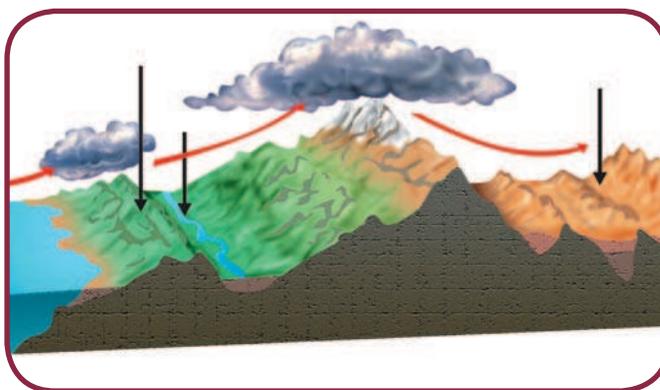


Figura 1.7 El efecto de sombra orográfica consiste en la intercepción de los vientos húmedos por las cadenas montañosas.

suculentos capaces de almacenar agua (figura 1.8). Entre las adaptaciones fisiológicas podemos mencionar la existencia de metabolismos fotosintéticos que tienen una alta eficiencia de uso del agua (C₄ y CAM; véase el recuadro 1.2, “La fotosíntesis y los distintos metabolismos fotosintéticos”).

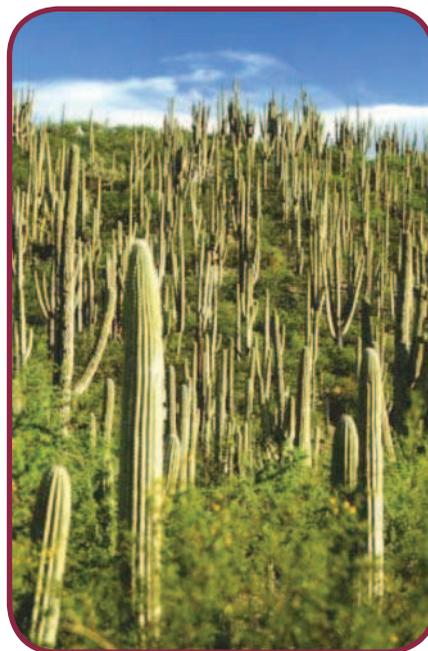


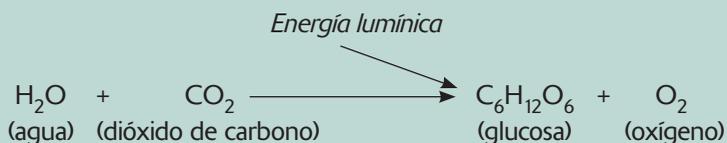
Figura 1.8

Los cactus son el mejor ejemplo de plantas con tejidos suculentos, gracias a los cuales son capaces de almacenar grandes cantidades de agua en sus tallos. En la imagen se ilustra una población del cactus columnar *Neobuxbaumia mescalaensis*, en la región semiárida de Tehuacán, Puebla (México).

Recuadro 1.2

La fotosíntesis y los distintos metabolismos fotosintéticos

Las plantas, las algas y algunos microorganismos crecen gracias al proceso de fotosíntesis, que consiste en la transformación de la energía lumínica en energía química (es decir, en la energía que se almacena en los enlaces químicos que se forman entre átomos) por medio de la captura del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para *sintetizar* carbohidratos. En general, la reacción química más común que ocurre durante la fotosíntesis se resume de la siguiente forma:



La incorporación del CO₂ para formar glucosa se da gracias a la enzima ribulosa 1,5-bifosfato (también llamada *rubisco*). En la mayoría de las plantas esta carboxilación inicial da lugar a la formación de dos moléculas de tres carbonos (por eso este metabolismo fotosintético se conoce como C₃) a partir de las cuales se forma la glucosa, que tiene seis carbonos. La rubisco tiene una característica importante: su sitio activo puede ser ocupado tanto por CO₂ como por O₂. Cuando es ocupado por O₂, no habrá incorporación neta de carbono.

(continúa...)

Cuando las temperaturas son altas o la atmósfera está muy seca, las plantas cierran sus estomas, lo cual reduce la pérdida de agua por transpiración, pero también reduce la entrada de CO_2 a las hojas. Esto disminuye la tasa fotosintética de las plantas C_3 . Sin embargo, hay plantas que tienen la capacidad de captar CO_2 eficientemente aun en estas condiciones porque poseen una anatomía foliar diferente de la de las plantas C_3 . Estas plantas, cuyo metabolismo fotosintético se conoce como C_4 , presentan células especializadas alrededor de los estomas en donde se da la fijación inicial del CO_2 en una molécula de cuatro carbonos (por eso se llaman C_4), gracias a la enzima fosfoenol-piruvato carboxilasa. El CO_2 fijado inicialmente de esta forma es transportado hacia las células más internas de la hoja, en donde se libera para ser incorporado, a través de la enzima rubisco, a otras moléculas orgánicas. Este mecanismo constituye una especie de "bomba" que transporta el CO_2 desde los estomas hasta las células en las que la rubisco lleva a cabo la carboxilación final. Este transporte da lugar a una alta concentración de CO_2 cerca de los sitios activos de la rubisco, lo cual impide que esta enzima se oxigene y permite que se fije el CO_2 aun cuando haya temperaturas altas y baja humedad atmosférica.

Hay un tercer tipo de metabolismo fotosintético, llamado CAM, por las siglas de *crassulacean acid metabolism*, metabolismo ácido de las crasuláceas, pues fue en las plantas de esta familia (a la que pertenece la siempreviva, *Sedum* sp, y la oreja de burro, *Echeveria* sp) en las que se detectó por primera vez. Este metabolismo es similar al C_4 , pues el CO_2 se fija inicialmente en moléculas de cuatro carbonos. Sin embargo, en las plantas CAM este proceso ocurre durante la noche, que es cuando los estomas se abren. Durante el día los estomas se cierran y el CO_2 fijado durante la noche se libera dentro de las células, de tal forma que la rubisco se carboxila y se da la fijación final del CO_2 a través de la formación de glucosa. La apertura de los estomas durante la noche disminuye marcadamente la pérdida de agua por transpiración, pues a esta hora la temperatura es más baja y la humedad atmosférica más alta.

La mayoría de las plantas presentan un metabolismo fotosintético de tipo C_3 , que es eficiente a temperaturas moderadas (entre 25 y 35°C) y sin limitaciones de agua. Las plantas con metabolismos fotosintéticos tipo C_4 y CAM son más eficientes en cuanto al uso del agua, lo cual les permite ocupar ambientes más áridos y calurosos. Las plantas C_4 tienen una alta capacidad de captar CO_2 por cada molécula de agua que pierden y, por lo tanto, son comunes en ecosistemas salinos y en pastizales tropicales o sabanas. Las plantas CAM colonizan zonas desérticas y también son comunes entre las epífitas, las cuales tienen un acceso limitado al agua.

Luz

La iluminación natural en nuestro planeta depende de la radiación solar. La luz está muy relacionada con la temperatura, ya que a una radiación solar más intensa corresponden temperaturas más elevadas. La cantidad de radiación lumínica que recibe un punto sobre la superficie terrestre varía a lo largo del día y del año. Al número de horas de luz y oscuridad a lo largo de un periodo de 24 horas se le conoce como **fotoperiodo**. En las zonas cercanas al ecuador el fotoperiodo casi no cambia durante el año. Por el contrario, hacia latitudes más altas el fotoperiodo es más variable a lo largo del año. El fotoperiodo funciona como una señal que dispara muchos procesos biológicos, tales como el inicio de la temporada de reproducción de muchas plantas y animales.

La luz constituye un recurso indispensable para las plantas. La radiación lumínica proporciona la energía que requieren las plantas para llevar a cabo la **fotosíntesis**. Durante este proceso, la energía

lumínica se transforma en energía química (es decir, aquella que se almacena en los enlaces químicos entre átomos), la cual se utiliza posteriormente para fijar el CO_2 atmosférico en la forma de moléculas orgánicas, como los **azúcares** y la **celulosa**.

En los ecosistemas acuáticos la luz es un factor que limita de manera drástica la distribución y la abundancia de los organismos. En los mares o lagos, el agua superficial absorbe gran parte de la luz, impidiendo que penetre a grandes profundidades. Más de la mitad de la luz se absorbe en el primer metro de agua, e incluso en aguas claras, a una profundidad de 20 m sólo llega entre el 5 y 10% de la luz que incide sobre la superficie. Esto determina que el **fitoplancton** se concentre en las capas superficiales del agua (figura 1.9).

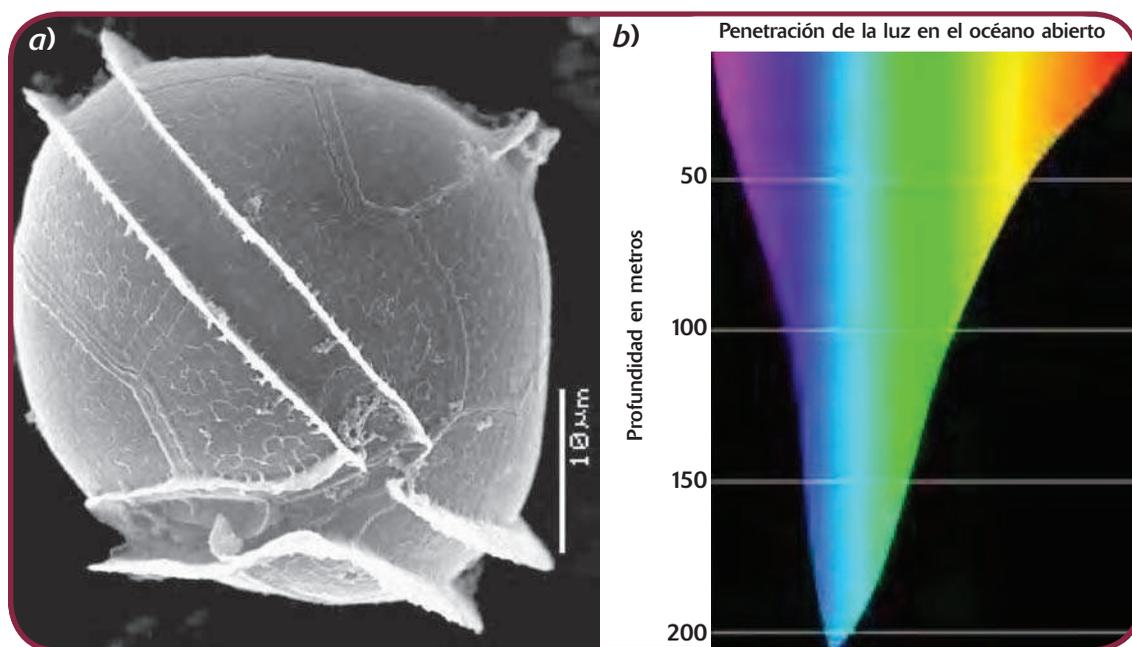


Figura 1.9 El fitoplancton se encuentra en las capas superficiales del agua, pues es ahí donde se recibe la mayor cantidad de radiación fotosintéticamente activa. En la imagen se observa *a)* un dinoflagelado (organismo unicelular que forma parte del fitoplancton) y *b)* diagrama que muestra la profundidad a la que penetran las diferentes longitudes de onda de la luz visible.

Suelo

Las características del suelo, tales como su fertilidad, textura y capacidad de retener agua, entre otras, son de gran importancia, especialmente para las plantas, las cuales obtienen de él muchos de sus elementos nutritivos. Las partículas que forman el suelo provienen de la descomposición de la materia orgánica, principalmente vegetal, y del **intemperismo** de la **roca madre** subyacente (es decir, la desintegración de rocas masivas en pequeños fragmentos). La interacción entre el suelo y la vegetación es muy compleja. Por ejemplo, la composición química del suelo determina qué nutrientes estarán disponibles para las plantas, y esos nutrientes, a la vez, determinan la fertilidad del suelo y el tipo de vegetación que se puede establecer en él. Las zonas con suelos infértiles, por ejemplo, suelen presentar una cobertura vegetal escasa. Los nutrientes que más limitan el crecimiento de las plantas son el potasio (K), el fósforo (P) y el nitrógeno (N), y en menor medida, el calcio (Ca) y el sodio (Na).

La textura del suelo se refiere al tamaño de las partículas inorgánicas que lo constituyen. Los suelos que contienen partículas finas (como el limo o las arcillas) forman superficies compactas que dificultan la infiltración del agua. Por el contrario, los suelos formados por partículas gruesas (como la arena) son muy permeables al agua, la cual arrastra consigo muchos nutrientes y sales minerales. Por ello, los suelos arenosos, como los de las dunas costeras (figura 1.10), son infértiles y retienen poca humedad en sus capas superficiales.



Figura 1.10

Las dunas costeras se encuentran en muchas partes del mundo. Se caracterizan por sus suelos arenosos e infértiles, pues el agua se filtra rápidamente a través de las partículas de arena, arrastrando consigo los nutrientes.



Figura 1.11

a) En los estuarios (ambientes que se forman en las desembocaduras de los ríos) y b) en los manglares, la salinidad del agua es altamente variable. Los organismos que se distribuyen en este tipo de ecosistemas se aclimatan a tales cambios a través de ajustes osmóticos.

Salinidad

La salinidad es la concentración de sales en el agua o en el suelo. La variación de la salinidad del agua afecta fuertemente a los organismos acuáticos. La concentración salina del agua de los océanos es constante (aproximadamente de 3.5%), y los organismos que viven en esos ecosistemas están adaptados a la alta salinidad del medio gracias a un balance osmótico interno. En el otro extremo están los sistemas de agua dulce (con menos de 1% de sales), como los ríos y los lagos, donde viven organismos intolerantes a la salinidad. Una situación intermedia se presenta en los estuarios, las lagunas costeras y los manglares (figura 1.11), pues en ellos la salinidad varía notablemente a través del tiempo, dependiendo de los aportes relativos de agua dulce y agua salada. Los organismos que viven en esos ambientes, como muchos crustáceos, moluscos, peces y plantas, poseen mecanismos de compensación muy complejos que les permiten ajustar la presión osmótica de sus células en relación con la salinidad del medio.

pH

El potencial de hidrógeno (pH) del agua en los sistemas acuáticos, o del suelo en los ecosistemas terrestres, se refiere a qué tan ácido o qué tan alcalino es el medio. Los suelos con un pH ácido (por debajo de 6) tienden a presentar comunidades vegetales poco **diversas** en comparación con los suelos con pH neutro (7-8), pues pocas especies de plantas pueden vivir en condiciones de acidez. En el caso de algunos cultivos agrícolas, el pH es un factor muy importante, ya que en suelos muy ácidos se presenta una alta concentración de iones de aluminio Al^{3+} , el cual es muy tóxico para las plantas. Por otro lado, en suelos muy alcalinos se reduce la disponibilidad de hierro, manganeso y fósforo, pues en esas condiciones tales elementos forman compuestos insolubles.



1.6.2 Factores bióticos

Además de los factores abióticos, la presencia de otros organismos también afecta el desempeño, la abundancia, la distribución y la **diversidad** de los seres vivos. Los factores bióticos están representados por las interacciones que mantienen los seres vivos unos con otros (por ejemplo, **competencia**, **depredación** y **mutualismo**); esas relaciones forman parte de su ambiente. Estudiaremos las interacciones bióticas en el capítulo 2.

1.7

Ecofisiología: Nociones y aplicaciones

Las condiciones particulares que requieren los organismos de cada especie para sobrevivir, crecer y reproducirse están relacionadas con su fisiología. La **ecofisiología** es la ciencia que estudia las características fisiológicas de los organismos que les permiten vivir en un ambiente físico particular.

Un concepto ecofisiológico muy importante es el de las **curvas de tolerancia** (también conocido como la **ley de la tolerancia de Shelford**). Esta idea plantea que el **desempeño** de los organismos de una especie es mejor en un intervalo particular de condiciones ambientales; por lo mismo, estas condiciones se conocen como *óptimas*. Cuando los valores de ese factor son demasiado elevados o demasiado bajos, entonces el desempeño de los organismos es deficiente (figura 1.12a). Por arriba de un valor máximo y por debajo de un valor mínimo, los organismos de la especie no pueden sobrevivir. Por ejemplo, los organismos de una especie de camarón se desarrollan más rápido y con mayor éxito cuando el agua se mantiene alrededor de 23°C; a temperaturas excesivamente cálidas o frías esos animales mueren (figura 1.13).

El desempeño de un organismo está relacionado con su vigor y es una medida de “qué tan bien funciona” en las condiciones en las que se encuentra. En condiciones óptimas el organismo puede sobrevivir, crecer y reproducirse; mientras que en condiciones subóptimas quizá pueda crecer y sobrevivir, pero no reproducirse. Si las condiciones se alejan aún más del nivel óptimo, apenas podrá sobrevivir en el mejor de los casos (figura 1.12a). El conjunto de los valores de un factor físico particular comprendidos entre el nivel mínimo y el máximo que permiten la supervivencia de un organismo definen el intervalo de tolerancia de este último ante tal factor.

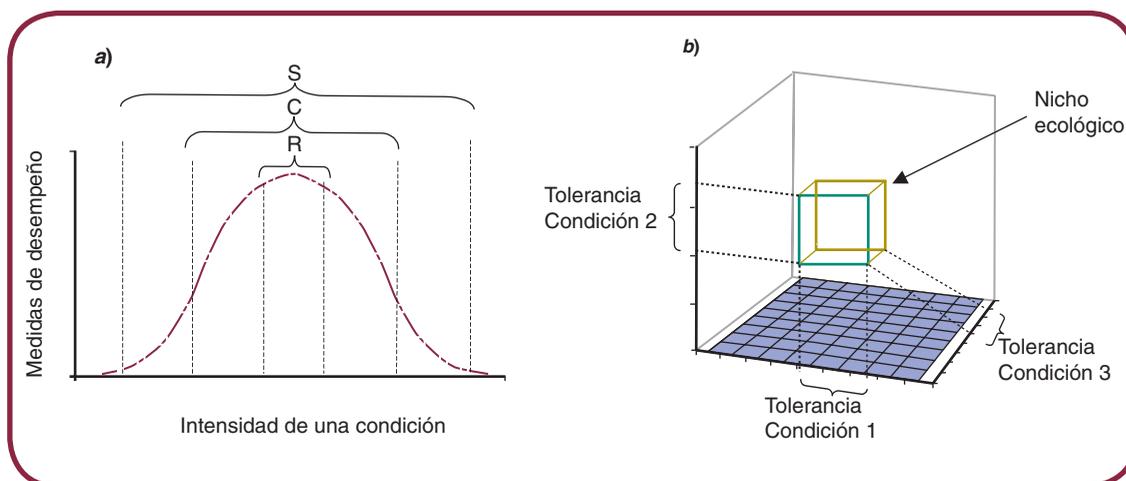


Figura 1.12 a) Curva de tolerancia de Shelford. Las condiciones óptimas permiten la reproducción (R), el crecimiento (C) y la supervivencia (S); las condiciones que no son óptimas permiten sólo el crecimiento y la supervivencia, y cerca de los límites de tolerancia sólo es posible la supervivencia. b) El nicho ecológico está dado por múltiples dimensiones que representan los márgenes de tolerancia de un organismo a la serie de condiciones que imperan en su ambiente.

Es evidente que los seres vivos requieren de una gama de factores ambientales para vivir: una temperatura óptima, cierta cantidad de alimento, oxígeno y un medio con una salinidad particular, entre muchos otros. Imaginemos que para cada uno de estos factores, podemos trazar una curva de tolerancia como la de la figura 1.12a, con un valor máximo, un mínimo y uno óptimo en los cuales los organismos de una especie pueden vivir. El resultado sería algo parecido a lo que se ilustra en la figura 1.12b. Ese “espacio” o “volumen” formado por la conjunción de todas las condiciones y recursos que requieren los organismos de una especie para subsistir es su **nicho ecológico**. Por supuesto, el nicho ecológico de un organismo no sólo está formado por tres dimensiones, como en el caso de la figura 1.12b, sino por una infinidad de dimensiones, cada una de las cuales representa un factor abiótico o biótico particular.



Figura 1.13 Un ejemplar de *Allanaspides hickmani*, el camarón pigmeo de Tasmania. Su área de distribución es muy restringida y se encuentra en peligro de extinción por su alta sensibilidad a las inundaciones por aguas contaminadas.

Otro concepto ecofisiológico importante es el de **factor limitante**. La definición de factor limitante proviene de la llamada **ley del mínimo** de Liebig, la cual plantea que la eficiencia con la que ocurre cualquier proceso (por ejemplo, la fotosíntesis, el crecimiento de un organismo o su movilidad) está determinada por el recurso que se encuentre en menor cantidad o por la condición que alcance valores más extremos. Esta variable ambiental es la que se considera el factor limitante. Por ejemplo, en los

ambientes áridos el factor limitante es el agua, pues su escasez es lo que restringe en mayor medida el crecimiento de las plantas.

Nuestro conocimiento de los intervalos de tolerancia de algunas especies ante factores abióticos particulares resulta muy útil para evaluar las características del medio ambiente sin necesidad de utilizar aparatos complejos. Por ejemplo, cierta especie de caracol marino vive sólo en aguas con un alto contenido de plomo. De esta forma, si el análisis de la fauna litoral de una región revela una gran abundancia de este caracol, podemos sospechar que esta región presenta **contaminación** por plomo. En tal caso, este caracol se considera una **especie indicadora** de la presencia de plomo en el agua. Existen especies de pastos que son indicadores de contaminación por cobre en el suelo. También hay especies de **líquenes** que crecen sobre la corteza de los árboles, cuya presencia o ausencia se asocia con altos niveles de contaminación atmosférica. La existencia de especies indicadoras nos permite evaluar la calidad del ambiente.

Otra aplicación importante de la ecofisiología es la posibilidad de predecir el área completa de distribución geográfica de una especie a partir del conocimiento de las condiciones ambientales en los pocos sitios donde se le ha encontrado. Esta información resulta fundamental para proteger a especies en peligro de extinción, gracias a que permite identificar posibles áreas de protección. Además, dado que las condiciones ambientales se están modificando como producto del cambio climático (véase el capítulo 8), este procedimiento permite predecir cómo cambiarían las áreas de distribución de las especies.



Para reflexionar...

1. ¿Qué conocimientos del ambiente necesitaría una tribu como la de Tsenka para poder pasar de la etapa nómada a la sedentaria?
2. ¿En qué se parece la selección natural a la selección que hacen los criadores de perros cuando eligen rasgos particulares de los animales que crían (por ejemplo, el tamaño, el color del pelaje y la agresividad)?
3. En la actualidad se escucha frecuentemente la frase "cuidemos la ecología". ¿Qué sentido crees que tenga esta frase? Por analogía, comenta el significado de frases como "cuidemos la química" o "cuidemos las matemáticas".
4. Tres problemas que enfrentan los ecólogos del siglo XXI son la pérdida de especies, la contaminación del aire y agua, y la producción de alimentos. ¿Con qué profesionistas de otras disciplinas crees que tengan que interactuar en la búsqueda de soluciones?
5. ¿Cómo varía el fotoperiodo y la lluvia a lo largo del año en la región en la que vives? ¿Cuáles flores o animales sólo están presentes en determinadas épocas del año? ¿Con qué factor crees que esté relacionada su presencia?
6. ¿Cuál crees que sea el factor limitante para el crecimiento de las plantas en los siguientes ambientes: *a)* un desierto; *b)* el piso de una selva; *c)* una cueva; *d)* unas dunas costeras; *e)* la cima de una montaña muy alta; *f)* un manglar?



Actividades complementarias

1. Pregunta a cinco familiares qué entienden por ecología. Compara sus respuestas con lo que aprendiste en este capítulo.
2. Escribe una historia de cómo las ballenas, siendo mamíferos descendientes de animales terrestres, se adaptaron a la vida marina mediante un proceso evolutivo.
3. Cuenta cuántas especies de árboles hay en el parque más cercano a tu escuela o a tu casa. ¿Qué nivel de organización estás analizando al hacer este estudio?
4. Pon a reposar 2 litros de agua de la llave durante tres días. Llena tres recipientes con medio litro de esta agua y coloca la misma cantidad de pulgas de agua en cada uno de ellos. A un recipiente agrega 100 ml del agua que dejaste reposar, previamente enfriada con hielos, al segundo recipiente agrega 100ml de la misma agua, previamente calentada hasta que esté tibia; al tercero agrega 100 ml de agua que esté a temperatura ambiente. Mide la temperatura del agua en los tres recipientes con un termómetro. Observa qué pasa con la movilidad de las pulgas de agua y discute las posibles causas de lo que observaste.
5. En un jardín busca áreas donde el pasto esté creciendo a pleno sol y áreas donde esté más bien sombreado. Fíjate bien que se trate de la misma especie de pasto. Corta 10 hojas maduras en cada una de las dos condiciones. Compara su textura al tacto y mide su grosor con ayuda de un vernier o calibrador. Si cuentas con un microscopio, compara las características de su superficie. ¿Qué diferencias aprecias entre las hojas de pasto que crecen a pleno sol y las que crecen a la sombra? ¿A qué las atribuyes?

CAPÍTULO 2

Ecología de poblaciones

2.1 Para la imaginación

Soy macho, tengo tres años de edad y soy parte de una tropa de monos aulladores (figura 2.1). Vivimos en la Selva Lacandona, en el noroeste de Chiapas, en una región exuberante, verde, cubierta de árboles gigantescos. Mi tropa tiene ahora 18 monos, la mayoría de ellos son hembras (una de ellas es mi mamá) y sólo hay unos cuantos machos. Durante el día, pasamos la mayor parte del tiempo cerca de la copa de los árboles, buscando hojas y frutos para comer y descansando. Al caer la noche nos vamos aquietando y luego nos dormimos, todos juntos. A veces nos encontramos con otras tropas de monos y convivimos un poco con ellos. Hasta el año pasado yo era de los más jóvenes de mi tropa, pero este año nacieron tres monitos, pues estos tiempos han sido de abundancia y las hembras han podido criar con éxito. Gracias a esta abundancia, cuando nos encontramos con otras tropas, tenemos una interacción amistosa, pues hay suficiente alimento para todos. Pero el año en que yo nací, fue muy diferente: hubo muchos incendios en la selva porque llovió poco, y muchos de los monitos recién nacidos murieron. Recuerdo que ese año, cuando nos encontrábamos con monos de otras tropas, los machos se peleaban por los frutos disponibles. A mí me asustaban un poco esas peleas, pues se armaban unas griterías..., ¡que alborotaban a toda la selva!

2.2 ¿Qué es una población?

Una población es un conjunto de organismos de la misma especie que viven en un mismo lugar, es decir, comparten un mismo espacio y, por lo tanto, pueden interactuar entre ellos (por ejemplo, se aparean para reproducirse o compiten por los mismos recursos alimenticios). Así, el conjunto de tropas de monos aulladores (figura 2.1) de la región selvática descrita en la sección anterior conforma una población. Los organismos de todas las **especies** que habitan en nuestro planeta nunca viven aislados, sino que forman **poblaciones**. Cada especie comprende un gran número de poblaciones a lo largo y ancho de su área de distribución geográfica.

Los seres humanos también formamos poblaciones: por ejemplo, podemos hablar de la población de Nepal; de la población de la ciudad de Buenos Aires; o de la población del barrio de Santa Mónica, en Cali (Colombia). En todos los casos nos referimos a un grupo de personas que viven en un mismo lugar. Este lugar puede ser tan grande como un país o tan pequeño como unas cuantas manzanas de una ciudad, dependiendo del fenómeno que vayamos a estudiar. A las poblaciones humanas las estudian los geógrafos, los actuarios o los demógrafos, quienes obtienen de ellas información muy diversa. Los ecólogos, por su parte, estudian poblaciones de organismos diferentes de los seres humanos, con la finalidad de comprender qué factores afectan sus variaciones numéricas a través del tiempo. La posibilidad de comprender este tipo de fenómenos poblacionales tiene una gran importancia práctica, pues los recursos biológicos que utiliza el ser humano para satisfacer sus necesidades se encuentran en la naturaleza en forma de poblaciones. Estas poblaciones pueden ser naturales, como los cardúmenes de atún de los que se produce el atún enlatado, o manejadas, como el ganado o los cultivos agrícolas.



Figura 2.1

Conjunto de monos aulladores descansando sobre las ramas de un árbol de la selva tropical perennifolia.

2.2.1 Propiedades emergentes de las poblaciones

Las poblaciones tienen propiedades que no presentan los individuos que las conforman, pues *emergen* del hecho de que las poblaciones son, en sí mismas, grupos de individuos. Por eso se conocen como **propiedades emergentes**. Estas características de las poblaciones son las que estudian los ecólogos con la finalidad de describirlas y distinguirlas unas de otras. Las principales propiedades emergentes de las poblaciones son las siguientes:

- **Tamaño.** Es el número de organismos que componen una población.

- *Densidad*. Es el número de organismos por unidad de área o volumen. Brinda información de qué tan cerca, es decir, qué tan apiñados se encuentran los organismos, lo cual constituye una medida de la intensidad de la **competencia** por recursos entre individuos.
- *Patrón de distribución*. Se refiere al arreglo espacial de los organismos en una población, el cual puede ser agregado, aleatorio o uniforme (figura 2.2).
- *Parámetros demográficos*. Son los procesos que dan lugar a cambios numéricos en las poblaciones. Hay cuatro parámetros demográficos básicos: la **tasa de natalidad**, la **tasa de mortalidad**, la **tasa de emigración** y la **tasa de inmigración**. La tasa de natalidad indica cuántos individuos nacen por unidad de tiempo y es una consecuencia de la reproducción. La tasa de mortalidad es el número de individuos que mueren por unidad de tiempo. El movimiento de individuos entre poblaciones se mide a través de las tasas de inmigración (los individuos que entran a la población) y de emigración (los que salen). La combinación de estos cuatro procesos origina cambios numéricos en las poblaciones a través del tiempo.

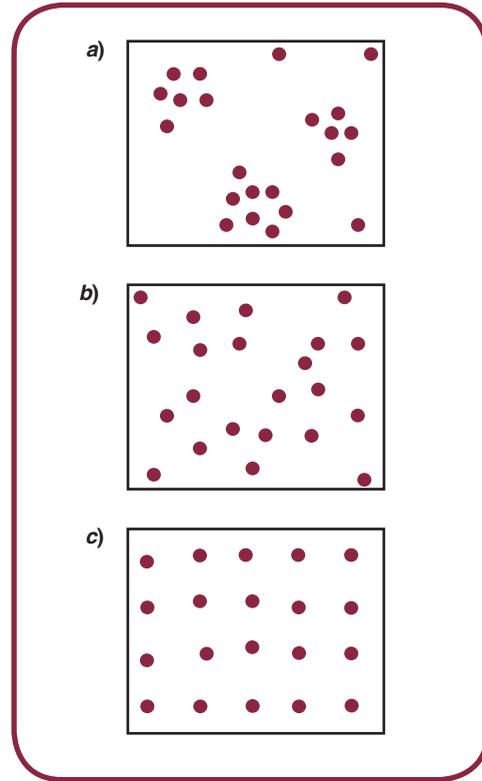


Figura 2.2 Patrones de distribución: a) agregado, b) aleatorio, y c) uniforme o regular.

- *Tasa de crecimiento poblacional*. Como resultado de los nacimientos, las muertes, las emigraciones y las inmigraciones, el tamaño de la población cambia con el tiempo. Esta tasa de cambio se conoce como *tasa de crecimiento poblacional* y es uno de los parámetros más importantes que los ecólogos intentan conocer. Una manera de cuantificar la tasa de crecimiento poblacional es en términos porcentuales: si la población de tarántulas de la selva de Los Tuxtlas, en Veracruz, crece a una tasa de 2% anual, esto significa que si hoy hay 100 tarántulas en esa localidad, dentro de un año habrá 102. Otra forma de describir el crecimiento de una población es a través de la variable λ (la letra griega “lambda”), también conocida como la *tasa finita* de crecimiento poblacional. Para una tasa de crecimiento de 2% anual, como la de la población de tarántulas referida anteriormente, $\lambda = 1.02$. De esta forma, si conocemos el tamaño poblacional en este momento (por ejemplo, $N_{\text{hoy}} = 100$) y conocemos el valor de λ (en este caso $\lambda = 1.02$), podemos calcular de qué tamaño será la población al cabo de un año:

$$N_{\text{en un año}} = N_{\text{hoy}} \times \lambda = 100 \times 1.02 = 102$$

También podemos medir la tasa de crecimiento de una población de manera *relativa*. La variable que describe el crecimiento poblacional de esta forma se llama *tasa intrínseca de crecimiento*, representada por la letra r , y cuantifica el cambio poblacional per cápita, es decir, por cada individuo de la población. Si la población de una especie de nopal en el desierto de Mapimí, Durango, crece con una $r = 0.40$, esto quiere decir que por cada nopal de la población actual, tendremos 0.40 nopales más en el futuro. Como es de esperarse, existe una relación entre r y λ :

$$r = \ln \lambda$$

Así, la tasa de crecimiento de esta población de nopales ($r = 0.40$) correspondería a una λ de 1.5 (el logaritmo natural de 1.5 es igual a 0.40). Por lo tanto, si hoy tenemos 100 nopales en una porción del desierto de Mapimí, dentro de un año tendremos 150.

- **Estructura poblacional.** Esta propiedad indica cómo está configurada la población. Puesto que las poblaciones están formadas por individuos de diferentes tipos (por ejemplo, de diferentes edades, tamaños o sexos), la estructura poblacional describe cuántos individuos hay de cada tipo. De esta descripción podemos obtener información importante. Por ejemplo, en muchos organismos las probabilidades de morir, de reproducirse o de migrar dependen de su edad. De esta forma, la estructura de edades de la población da una idea de lo que podría pasar con ella en el futuro. En la figura 2.3 se presenta la estructura de edades observada en 1974, en dos poblaciones humanas: en ese año la población de México estaba formada por una alta proporción de niños menores de cinco años, mientras que la población de Estados Unidos tenía una mayor proporción de jóvenes entre las edades de 10 y 20 años. Estas diferencias reflejan una tasa de crecimiento poblacional mucho más acelerada en México que en Estados Unidos, lo que produce estructuras poblacionales muy contrastantes.

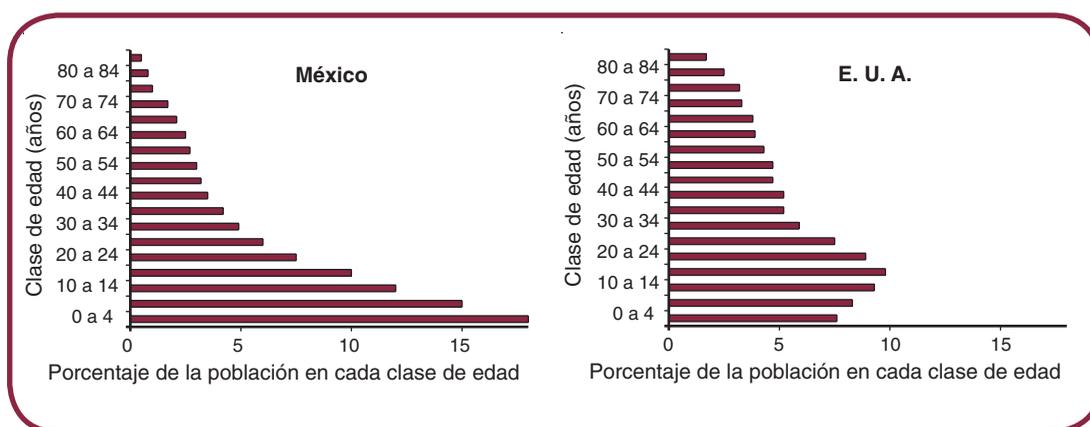


Figura 2.3 Estructura de edades de la población de México y de la de Estados Unidos en 1974 (modificación de Krebs, 1985).

2.2.2 Nociones de demografía

La demografía es el estudio de cómo están estructuradas las poblaciones y de cómo cambian con el tiempo. El término *demografía* proviene de dos vocablos griegos: *demos* (δῆμος, que significa grupo o pueblo) y *graphein* (γράφειν, escribir, registrar). En la antigüedad este término se limitaba al estudio de poblaciones humanas. Sin embargo, desde principios del siglo xx, con el surgimiento y desarrollo de la ecología, los ecólogos también comenzaron a utilizar técnicas demográficas para estudiar poblaciones de animales, plantas, hongos, protistas y bacterias. El ecólogo de poblaciones estudia cómo cambia el tamaño de las poblaciones (N) como resultado de los cuatro parámetros demográficos básicos que definimos en la sección anterior: los nacimientos (b), las muertes (m), las

emigraciones (e) y las inmigraciones (i). De esta forma, el tamaño de una población en el futuro se puede conocer mediante la fórmula:

$$N_{\text{futuro}} = N_{\text{ahora}} + b - m + i - e$$

Una de las herramientas demográficas más utilizadas en ecología es la **tabla de vida**, un formato en el que se registran los principales parámetros demográficos de una población, particularmente la supervivencia y la reproducción. Para elaborar una tabla de vida, primero es necesario dividir a la población en categorías de edad (si esto no fuera posible, se pueden utilizar categorías de tamaño o estadios de desarrollo). En cada categoría de edad se registran las probabilidades de supervivencia de los individuos, así como su **fecundidad**, lo cual permite calcular la tasa de crecimiento de la población (por ejemplo, r , según se definió en la sección anterior).

Existen dos tipos generales de tablas de vida:

- a) *De cohorte* (también llamadas *dinámicas* u *horizontales*), las cuales se basan en el seguimiento de una **cohorte**, desde el nacimiento de los individuos hasta la muerte del último de sus miembros. Una cohorte es un grupo de organismos que nacieron más o menos al mismo tiempo. Conforme transcurre el tiempo, se registra cuántos organismos de la cohorte original alcanzan las diferentes categorías de edad y cuántos mueren en cada una de ellas. También se registra cuántos descendientes dejan los organismos de las diferentes categorías de edad (véase el recuadro 2.1, “Las columnas de la tabla de vida” y el cuadro 2.1).
- b) *Estáticas* (también llamadas *verticales*), las cuales se basan en la estructura de las edades que tiene una población en un momento dado. Es decir, se parte del número de organismos que hay en cada categoría de edad y se hace la suposición de que esta estructura de edades refleja el comportamiento de una cohorte a través del tiempo. Por ejemplo, si tenemos 125 organismos de tres años de edad y 193 de dos años, es razonable suponer que, al pasar de los dos a los tres años de edad, muere aproximadamente 46% de los organismos (es decir, que los 125 son los sobrevivientes de los 193 que hubo el año anterior). La misma suposición debe hacerse para las demás categorías de edad.

Cuadro 2.1 Tabla de vida de cohorte para una población hipotética de una especie de mariposa.

Edad (meses) x	N_x	l_x	d_x	q_x	m_x	$l_x m_x$
0	1,243	1.000	0.583	0.583	0	0
1	518	0.417	0.138	0.330	0	0
2	347	0.279	0.100	0.357	0	0
3	223	0.179	0.107	0.601	0	0
4	89	0.072	0.062	0.865	78	5.616
5	12	0.010	0.010	1	23	0.230
						$R_0 = 5.846$

Nota: N_x = número de organismos que sobrevivieron para ingresar a cada una de las categorías de edad; l_x = proporción de sobrevivientes con respecto al número inicial de individuos (en este caso, 1,243); d_x = proporción de organismos que murieron durante el intervalo que duró la categoría, con respecto al número inicial; q_x = proporción de organismos que murieron durante el intervalo que duró la categoría, con respecto al número que ingresó a la categoría; m_x = fecundidad de los organismos de cada categoría de edad, medida en este caso en términos del número promedio de huevos que pone cada hembra; y R_0 = tasa reproductiva neta (véase el texto).

Recuadro 2.1

Las columnas de la tabla de vida

Una tabla de vida tiene varias columnas que describen características demográficas de la población en estudio. A continuación se presentan las principales columnas de la tabla de vida, así como la forma en la que se calcula cada una.

Parámetro	Qué representa	Cómo se calcula
l_x	Proporción de organismos que sobrevivieron para entrar en la clase x , con respecto al número inicial de organismos.	$\frac{n_x}{n_0}$
d_x	Proporción de organismos que murieron en el intervalo de x a $x + 1$, con respecto al número inicial de organismos. Cuando se calcula a partir de n_x , representa el número de organismos muertos entre x y $x + 1$.	$l_x - l_{x+1}$ o bien, $n_x - n_{x+1}$
q_x	Tasa de mortalidad. Representa la proporción de organismos que murieron durante el intervalo que duró la clase (entre x y $x + 1$), con respecto al número que ingresó a la clase.	$\frac{d_x}{l_x}$
k_x	Poder de muerte o intensidad de la mortalidad. Evaluación de la mortalidad (estandarizada por el uso de logaritmos).	$\log n_x - \log n_{x+1}$
p_x	Proporción de organismos que sobreviven con respecto al total que ingresó a la clase.	$1 - q_x$
F_x	Número total de descendientes provenientes de la clase x .	Debe obtenerse de observaciones de campo.
m_x	Fecundidad. Número promedio de descendientes por individuo (por hembra).	$\frac{F_x}{n_x}$
e_x	Esperanza de vida. Tiempo que se espera que viva, en promedio, un individuo de la clase x .	$\frac{T_x}{n_x}$ A la vez, $T_x = \sum L_x$ $L_x = (n_x + n_{x+1})/2$
R_0	Tasa reproductiva neta. Tasa a la que se multiplica la población cada generación.	$\sum l_x m_x$
T_G	Tiempo generacional. Tiempo promedio que transcurre entre el nacimiento de un individuo y el nacimiento de su descendencia.	$\frac{\sum l_x m_x}{R_0}$

La diferencia principal entre una tabla de vida de cohorte y una estática radica en los datos de los que parte cada una: en el caso de las tablas de vida de cohorte, se sigue a un grupo de organismos a través del tiempo, mientras que en el caso de las tablas de vida estáticas se utiliza la estructura

poblacional, que es como una “fotografía” del estado actual de la población, y se trabaja bajo la hipótesis de que ésta refleja su comportamiento en el pasado (figura 2.4).

Por otro lado, al dar seguimiento a una cohorte, es factible cuantificar el número de descendientes que produce cada individuo al llegar a la edad reproductiva, a partir de lo cual se puede calcular la fecundidad (m_x) para integrarla a la tabla de vida (cuadro 2.1). Sin embargo, al elaborar una tabla de vida estática, que parte de la estructura de edades o de tamaños, no siempre tenemos acceso a datos sobre la reproducción de los individuos.

A partir de la tabla de vida es posible obtener una **curva de supervivencia**, que indica cómo es el patrón de supervivencia de los organismos de una población a través del

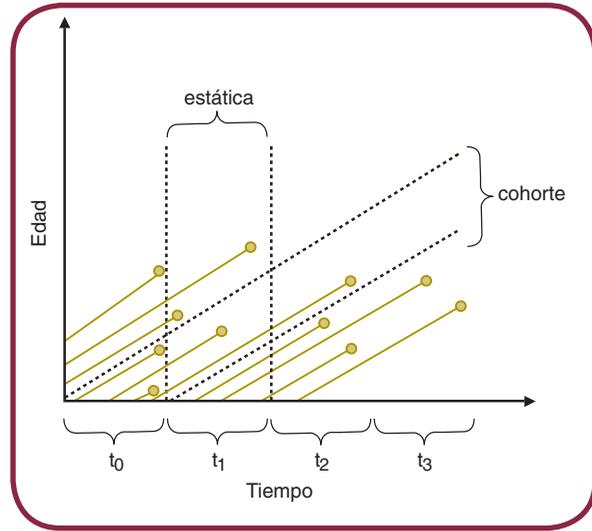


Figura 2.4

Esta gráfica representa una población. Cada línea refleja la trayectoria de vida de un individuo, y el punto al final de cada línea representa el momento de la muerte. Las formas de obtener los datos para elaborar una tabla de vida (de cohorte y estática) se señalan con las líneas punteadas (tomado de Begon et al., 1996).

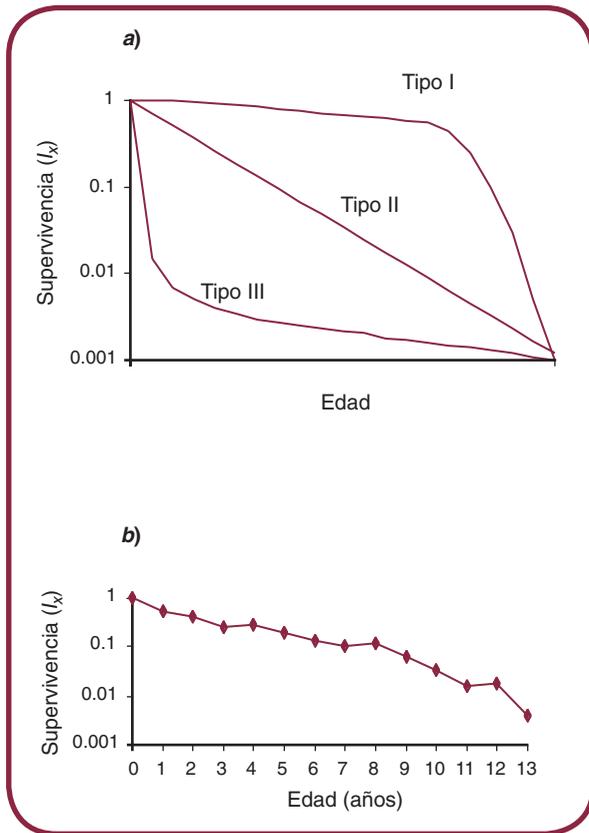


Figura 2.5

a) Curvas de supervivencia del tipo I, II y III. b) Curva de supervivencia para una población hipotética de una palma que vive 13 años.

tiempo. Para esto se utiliza la columna de l_x de la tabla de vida y se grafica en el eje de las ordenadas (y), en escala logarítmica, con la edad en el eje de las abscisas (x).

Se han descrito tres tipos básicos de curvas de supervivencia de acuerdo con la etapa de la vida en la que se concentra una mayor mortalidad (figura 2.5a). Una curva de supervivencia del *tipo I* representa una población en que la mayoría de los organismos mueren en las categorías de edad más avanzada (por ejemplo, el ser humano y muchos otros mamíferos en los que se presenta **cuidado parental**). La curva del *tipo II* representa una población en la que la tasa de mortalidad es casi constante. Por último, una curva de supervivencia del *tipo III* implica que la mayoría de los individuos mueren durante las primeras etapas del ciclo de vida, de manera que muy pocos alcanzan las categorías de

edad intermedias y tardías (por ejemplo, muchos insectos, peces y anfibios, así como la mayoría de las plantas).

Las principales columnas de la tabla de vida son l_x (la supervivencia) y m_x (la fecundidad), pues a partir de la combinación de las dos se obtiene una medida de la tasa de crecimiento poblacional, con una variable llamada R_0 , la **tasa reproductiva neta** que indica cuántos descendientes se espera que tenga una hembra durante toda su vida y que también representa la tasa a la que se multiplica la población de una **generación** a otra, es decir, es una medida generacional. El **tiempo generacional** (T_G) es el tiempo promedio que transcurre entre el nacimiento de un individuo y el nacimiento de su descendencia. Por ejemplo, en el caso de las poblaciones humanas, el tiempo generacional es de poco menos de 30 años. Para la mariposa del cuadro 2.1, el tiempo generacional es de 4.04 meses, pues la mayoría de los individuos ponen huevecillos cuando se encuentran en la categoría de cuatro meses, y algunos lo hacen en la categoría de cinco meses.

Para calcular r (la tasa de crecimiento poblacional per cápita definida en la sección anterior) a partir de la tabla de vida, se utiliza la siguiente aproximación (véase el recuadro 2.1, “Las columnas de la tabla de vida”):

$$r \approx (\ln R_0)/T_G$$

Las tablas de vida son de gran utilidad para conocer en detalle el comportamiento de una población y para saber si la población crece, se reduce o se mantiene constante. También permiten identificar los estadios, edades o categorías de tamaño en los que se da la mayor mortalidad y en los que, por consiguiente, los individuos de una población son más vulnerables. En el caso de las especies en peligro de extinción, estos aspectos de la tabla de vida sirven para identificar las categorías en las que se deben concentrar los mayores esfuerzos de conservación.

2.3 El crecimiento de las poblaciones

En las secciones anteriores nos referimos a la tasa de crecimiento poblacional, una propiedad emergente de las poblaciones que se deriva de los parámetros demográficos básicos (nacimientos, muertes, inmigraciones y emigraciones). También mencionamos algunas de las variables con las que se cuantifica la tasa de crecimiento poblacional (por ejemplo, λ , r y R_0). Estas variables se han utilizado para construir modelos matemáticos que describen el crecimiento de las poblaciones. Con ellos se puede entender el comportamiento numérico de las poblaciones y pronosticar el tamaño de una población al cabo de un lapso determinado. Existen dos modelos básicos de crecimiento poblacional: el exponencial y el logístico.

2.3.1 Crecimiento exponencial

El modelo de crecimiento exponencial, postulado por Thomas R. Malthus en 1798, supone que las poblaciones crecen a una tasa constante. Según el modelo de crecimiento exponencial, si $\lambda = 1.05$ (lo que implica un crecimiento del 5% anual), este valor se mantendrá constante independientemente del tamaño de la población y de las condiciones en las que se encuentre. Al proyectar el

tamaño de la población de acuerdo con esto, obtenemos una curva exponencial (figura 2.6). La ecuación que define esta curva es:

$$N_t = N_0 \lambda^t$$

es decir, el tamaño de la población en el tiempo t (N_t) está dado por el tamaño de la población al inicio (N_0) multiplicado por el valor de la tasa de crecimiento poblacional (λ) elevada a la potencia t (o de manera equivalente, $N_t = N_0 e^{rt}$, si se expresa la ecuación en términos de r).

Si una población de tucanes ahora cuenta con 470 individuos y tiene una tasa de crecimiento poblacional de $\lambda = 1.03$, su tamaño dentro de cinco años será de:

$$N_{(5)} = (470) \times (1.03)^5 = 545 \text{ individuos}$$

Como ya mencionamos, el modelo de crecimiento exponencial supone que la tasa de crecimiento poblacional se mantiene constante. Sin embargo, en la naturaleza esto sucede sólo por periodos reducidos, por ejemplo, cuando los recursos son muy abundantes o cuando una población apenas está colonizando un hábitat en el que no encuentra mucha **competencia**. A pesar de esto, el modelo exponencial es de gran utilidad, pues da una idea del potencial de crecimiento de una población, dada su tasa de crecimiento actual.

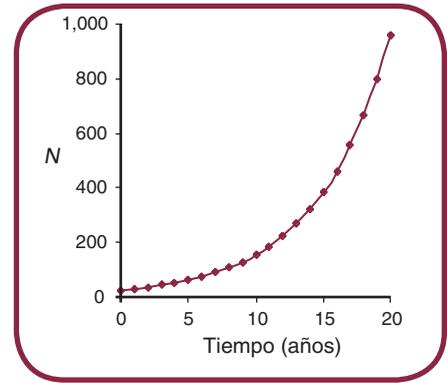


Figura 2.6 Crecimiento poblacional de tipo exponencial.

2.3.2 Crecimiento logístico

Como dijimos, una población crece sólo hasta cierto límite, lo que significa que su tasa de crecimiento poblacional no es constante. La densidad poblacional tiene un efecto sobre la tasa de crecimiento de la población, pues afecta la disponibilidad de recursos. Cuanto mayor sea la densidad, más intensa será la competencia por los recursos, lo que reduce la tasa de crecimiento poblacional. En 1838, Pierre François Verhulst propuso un modelo matemático que supone que la población alcanza un tamaño máximo, por encima del cual ya no puede crecer. A este modelo se le conoce como logístico y se caracteriza por que la tasa de crecimiento disminuye conforme aumenta el tamaño de la población (N). Al describir gráficamente cómo cambia N a través del tiempo, obtenemos una curva sigmoide (pues tiene forma de S), que se conoce como la *curva logística* (figura 2.7). La ecuación que define esta curva (en su forma integrada, que es la más común) es la siguiente:

$$dN/dt = Nr [1 - (N/K)]$$

Esta ecuación establece que el *cambio* en el tamaño de la población con el paso del tiempo, que se denota como dN/dt , es proporcional al tamaño de la población (N) multiplicado por la tasa de crecimiento poblacional (r) y por el factor $[1 - (N/K)]$. Este último término puede adoptar valores entre 0 y 1, afectando la tasa de crecimiento (r) según el tamaño de la población (N). El valor de este término nos indica qué tan lejos está el tamaño poblacional actual (N) del tamaño máximo que puede alcanzar (K).

Una variable novedosa que incorpora la ecuación logística es precisamente K , conocida como la **capacidad de carga**: el número máximo de individuos que un ambiente puede mantener, de acuerdo con sus condiciones y con la cantidad de recursos que ofrece. Desde el punto

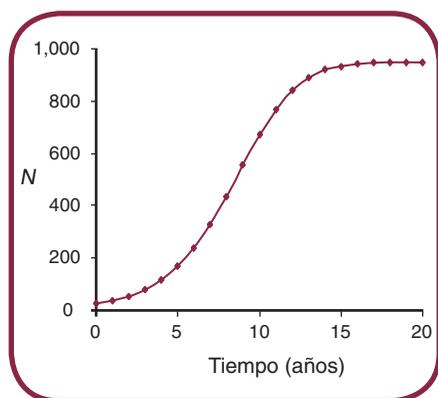


Figura 2.7 Crecimiento poblacional de tipo logístico.

de vista matemático, K es la densidad poblacional a la cual el tamaño de la población no cambia con el tiempo ($dN/dt = 0$).

La ecuación logística predice un crecimiento poblacional que, a bajas densidades poblacionales, se parece al exponencial; sin embargo, conforme la población aumenta, su crecimiento se hace cada vez más lento y se acerca poco a poco a la capacidad de carga (figura 2.7). Por esta razón se dice que, en el modelo logístico, el crecimiento poblacional es **densodependiente**, pues la velocidad a la que crece la población depende de su densidad.

2.4

Factores que regulan el crecimiento de las poblaciones

Como ya vimos, las poblaciones no crecen al infinito, sino que sus densidades se mantienen relativamente constantes. Los factores que impiden que las poblaciones crezcan de forma ilimitada, es decir, aquellos que *regulan* su tamaño, se dividen en dos grandes grupos: los abióticos y los bióticos.

2.4.1

Los factores abióticos como reguladores de las poblaciones

Cuando los factores abióticos (véase el capítulo 1) son desfavorables, los organismos pueden disminuir su capacidad reproductiva o incluso morir. En este sentido, los factores abióticos limitan el tamaño poblacional, es decir, impiden que las poblaciones crezcan demasiado al provocar la muerte de algunos de sus individuos.

Por lo general, las condiciones abióticas de cada hábitat varían de forma moderada, lo que permite que las poblaciones de muchas especies logren vivir en ese lugar. Pero de vez en cuando algunos factores abióticos varían a tal grado que llegan a causar la muerte de muchos organismos. Por ejemplo, la falta de humedad en un año excepcionalmente seco o la presencia de una helada muy intensa son eventos que pueden limitar el crecimiento de las poblaciones de muchas especies. Estas variaciones en las condiciones abióticas, cuando son demasiado intensas, se consideran **catástrofes** naturales, pues llegan a tener un efecto drástico sobre las poblaciones. Las catástrofes son poco frecuentes, pero muy intensas. Entre ellas se cuentan incendios, huracanes, temblores, heladas, inundaciones y derrumbes.

El nivel de mortalidad en las catástrofes naturales depende de la intensidad del factor abiótico en cuestión, independientemente del tamaño de las poblaciones. Por esta razón, los factores abióticos dan lugar a una mortalidad **densoindependiente** (es decir, que no está relacionada con la densidad poblacional).



2.4.2

Los factores bióticos: Las interacciones ecológicas

A diferencia de los factores abióticos que actúan de forma densoindependiente, los factores bióticos, es decir, las interacciones ecológicas, actúan de forma **densodependiente**, pues dependen de la densidad poblacional: se hacen más intensas a medida que aumenta el tamaño de la población. Los factores densodependientes **regulan** el tamaño de las poblaciones: permiten el crecimiento poblacional cuando la densidad es baja, pero lo limitan a densidades elevadas.

Las interacciones ecológicas se clasifican en cinco tipos, dependiendo de si el efecto que provocan sobre los organismos es positivo, negativo o neutro (cuadro 2.2). La **competencia** provoca efectos negativos en las dos poblaciones que interactúan. La **depredación** tiene efectos positivos para los depredadores, pero afecta negativamente a las presas. El **mutualismo** es una interacción en la que ambos participantes se benefician. Por último, en el **amensalismo** y el **comensalismo** una de las partes que interactúan no resulta afectada, en tanto que la otra se ve afectada negativamente (en el caso del amensalismo) o positivamente (en el caso del comensalismo). A continuación analizaremos en detalle cada una de estas interacciones ecológicas.

Cuadro 2.2 Clasificación de las interacciones ecológicas, según el efecto que provocan sobre las poblaciones implicadas.

		Población 1		
EFECTO		<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>	<i>Neutro</i>
Población 2	<i>Positivo</i>	Mutualismo		
	<i>Negativo</i>	Depredación	Competencia	
	<i>Neutro</i>	Comensalismo	Amensalismo	Sin interacción

Competencia

La competencia se da entre organismos que requieren los mismos recursos, los cuales se encuentran disponibles en cantidades limitadas. El resultado de la competencia es que afecta negativamente el **desempeño** de los organismos, es decir, sus probabilidades de *sobrevivir*, su capacidad para *crecer* o su éxito *reproductivo*. Por lo tanto, es una interacción de tipo $(-, -)$.

La competencia no implica necesariamente que los organismos tengan que enfrentarse unos a otros y pelearse por el alimento. En algunos casos sí hay enfrentamiento (**competencia por interfe-rencia**), pero la mayoría de las veces los organismos simplemente disminuyen la cantidad de recursos al consumirlos, por lo que tales recursos estarán menos disponibles para otros (**competencia por explotación**), quienes se irán debilitando lentamente hasta morir. Así, la competencia puede causar la muerte de los organismos, sin que éstos hayan luchado “cuerpo a cuerpo” para obtener sus recursos.

Hay dos tipos de competencia, dependiendo de la identidad de las especies implicadas:

1. **Competencia intraespecífica.** Es la que ocurre entre organismos de la misma **especie**, por lo cual puede llegar a ser muy intensa, pues los organismos que compiten tienen prácticamente los mismos requerimientos de recursos.

En una población de plantas, éstas compiten por recursos como la luz, los nutrientes minerales y el agua. Supongamos que las semillas de una especie germinan y producen una **cohorte de plántulas**. Inicialmente éstas serán muy numerosas, aunque algunas lograrán crecer más rápido, por lo que producirán sombra sobre las más pequeñas y no las dejarán crecer. Esta competencia por la luz podría ir acompañada, además, de una competencia por el espacio y por los recursos del suelo (agua y nutrientes minerales). A medida que crecen las plantas de esta cohorte, algunas mueren, de forma que cada vez quedarán menos, un fenómeno que se conoce como **autoaclareo**.

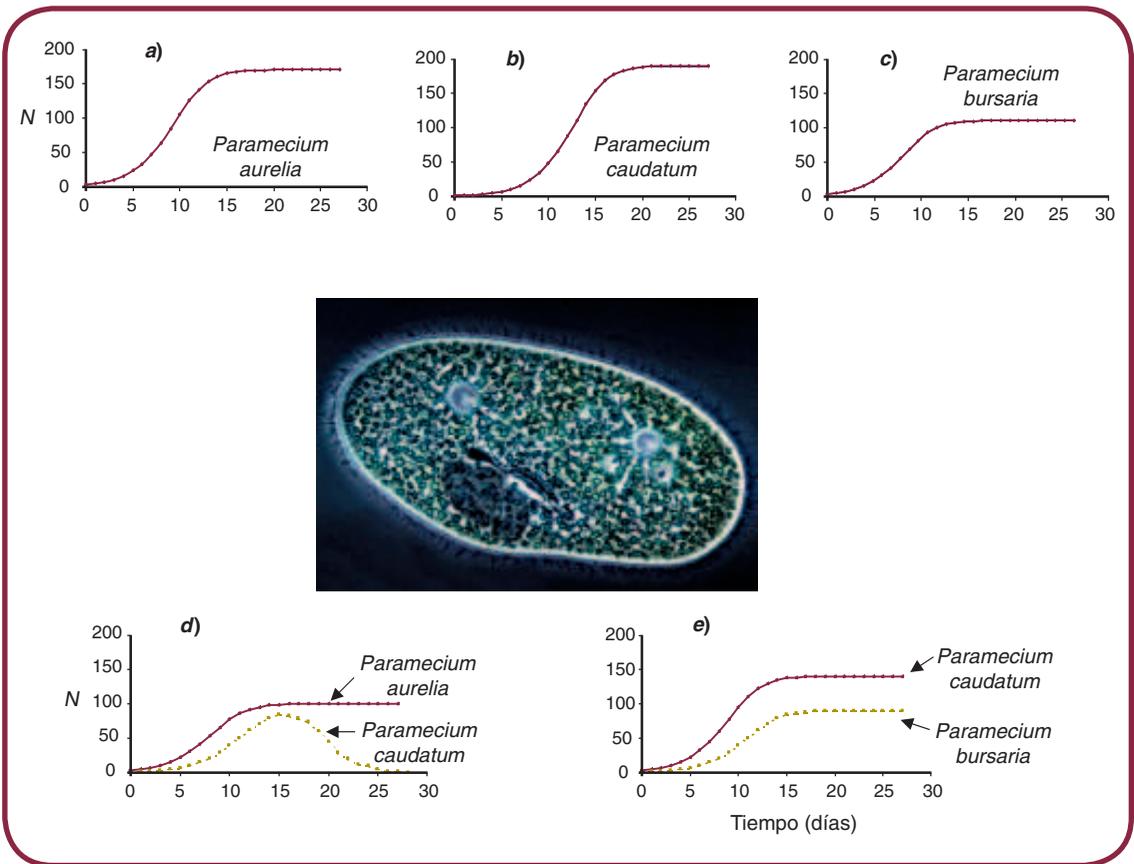
El autoaclareo ocurre también en plantas cultivadas cuando éstas se siembran en densidades muy altas, por lo que es conveniente conocer cuál es la densidad óptima de siembra (según la especie de que se trate, el clima del lugar y el tipo de suelo, entre otros factores) para maximizar la producción con la mínima inversión posible, como aconsejan los ingenieros agrónomos.

2. **Competencia interespecífica.** Tiene lugar entre organismos de diferentes especies que utilizan los mismos recursos para subsistir. En algunas ocasiones las especies competidoras son relativamente similares, por ejemplo, las diferentes especies de pinos que coexisten en un bosque templado. No obstante, también es posible la competencia entre especies muy diferentes. Por ejemplo, muchas hormigas se alimentan de semillas, las cuales son a la vez el recurso alimenticio de los ratones de campo y de ciertos pájaros. Así, dos, tres o más especies totalmente diferentes pueden aprovechar el mismo recurso y, al utilizarlo, disminuyen su disponibilidad, lo que tiene un efecto importante sobre los organismos de las otras especies.

Como resultado de la competencia interespecífica puede darse una **exclusión competitiva**, es decir, el desplazamiento de una de las dos especies hasta su desaparición total de la localidad. Fue el ecólogo ruso G. F. Gause quien propuso este concepto en 1934. Gause trabajó con tres especies de paramecios, **protozoarios** que se desarrollan en aguas con altos contenidos de bacterias. Gause cultivó cada especie en un recipiente por separado y observó que alcanzaban una densidad poblacional máxima (capacidad de carga; véase la sección 2.3.2). A continuación, Gause colocó en el mismo recipiente ejemplares de dos especies de paramecio: *Paramecium caudatum* y *Paramecium aurelia*, y observó que la primera especie se mantenía (aunque a una densidad menor que cuando estaba sola), mientras que la segunda desaparecía al cabo de 26 días (figura 2.8). En este experimento una especie excluyó a la otra como producto de la interacción competitiva.

Sin embargo, cuando Gause colocó en el mismo recipiente ejemplares del *Paramecium caudatum* y del *P. bursaria*, el resultado fue distinto: ambas especies permanecieron en el cultivo, aunque en menores densidades de las que alcanzaron cuando se cultivaron solas (figura 2.8e). Cuando Gause examinó con detalle el recipiente en el que mantenía este cultivo, observó que los individuos de *P. caudatum* se alimentaban de las bacterias que estaban suspendidas en el agua, mientras que los *P. bursaria* se alimentaban de levaduras depositadas en el fondo. En otras palabras, cada especie de paramecio se especializaba en el consumo de un recurso diferente, lo que en los hechos significaba que no competían muy intensamente. Así, Gause postuló el **principio de exclusión competitiva**, que después se llamaría **principio de Gause**: dos especies pueden coexistir sólo si sus **nichos ecológicos** son suficientemente diferentes. Si no hay diferenciación de nichos, una especie será excluida como producto de la competencia (exclusión competitiva).

Analicemos más a fondo la relación entre el concepto de **nicho ecológico** y la teoría de la competencia. En la sección 1.7 (capítulo 1) definimos nicho ecológico como el conjunto de condiciones y recursos que requieren los organismos de una especie para subsistir (véase la figura 1.12b). Una dimensión muy importante del nicho ecológico es la que tiene que ver con sus recursos alimenticios. En el ejemplo de los paramecios de Gause, la coexistencia entre el *P. caudatum* y el *P. bursaria* es


Figura 2.8

Resultados del experimento que realizó Gause con diferentes especies de paramecios. En los incisos a), b) y c) se muestra la curva de crecimiento poblacional de las tres especies cuando se cultivaron por separado. En los incisos d) y e) se observa el resultado de cultivar dos especies a la vez en el mismo recipiente.

posible sólo gracias a que sus nichos ecológicos son diferentes en lo que se refiere a su alimento. De ahí que el principio de Gause plantee que la base de la coexistencia entre especies es la diferenciación de sus nichos ecológicos.

A partir de estas ideas, se postuló que cada especie tiene un **nicho fundamental** y un **nicho realizado**. El nicho fundamental es el que cada especie puede ocupar *potencialmente*, según sus requerimientos y tolerancias fisiológicas. Por su parte, el nicho realizado es el que ocupa en la realidad y puede ser más restringido que el nicho fundamental, como producto de la competencia, o más amplio, en el caso de que alguna interacción mutualista lo permita. Por ejemplo, pensemos en dos especies de lagartijas, una que vive en regiones muy elevadas y otra que vive a menores altitudes, aunque sus áreas de distribución se superponen en algunos puntos. En las montañas en las que sólo hay una especie, ésta ocupará todo el gradiente de altitudes al que se encuentra adaptada (nicho fundamental); sin embargo, en sitios en los que estén presentes ambas especies, cada una restringirá su distribución, ocupando sólo ciertas porciones del gradiente altitudinal (nicho realizado) como producto de la competencia en las regiones en las que coexisten (figura 2.9).

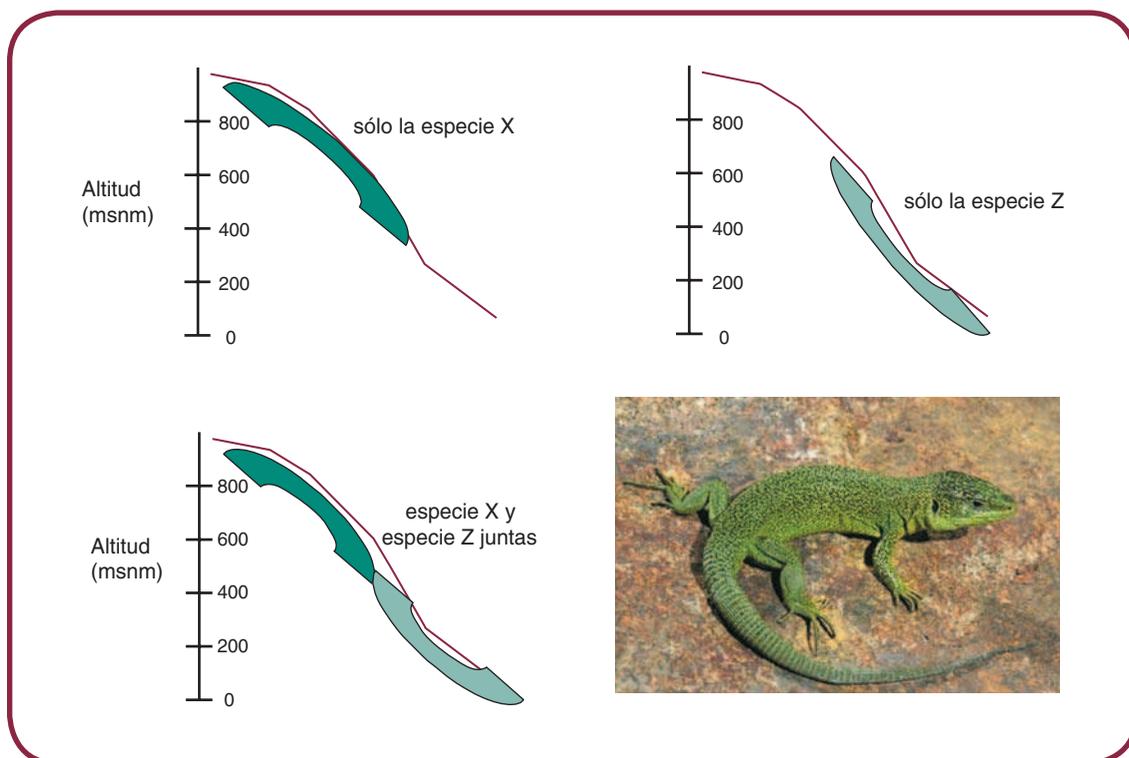


Figura 2.9

Cuando dos especies de lagartijas coexisten en la misma ladera, cada una restringe el intervalo de altitudes que abarca su distribución, de tal manera que sus nichos realizados prácticamente no se traslapan.

Depredación

La *depredación* consiste en que un organismo se alimenta de otro. En general, esta interacción produce beneficios a una de las especies (el **depredador**) y perjuicios a la otra especie (la **presa**), por lo cual se considera como una interacción de tipo (+, -) (cuadro 2.2).

Se reconocen cuatro tipos fundamentales de depredadores: los depredadores verdaderos, los herbívoros, los parásitos y los parasitoides. Esta clasificación se basa en la cantidad de presas que consumen los depredadores a lo largo de su vida y en el hecho de si la interacción implica o no la muerte de la presa.

1. Depredadores verdaderos. Los depredadores verdaderos consumen muchas presas a lo largo de su vida y estas últimas mueren al ser consumidas. En esta categoría podemos considerar a los grandes carnívoros, como los leones, los jaguares, los lobos o los coyotes, que consumen otros animales, como cebras, tlacuaches, ratones, ardillas, lagartijas y demás. También incluimos a las ballenas —las cuales consumen en cada bocanada millones de crustáceos y otros invertebrados que forman parte del **zooplancton**—, a los tiburones y a otras especies de peces que consumen a otros peces. Además, existen miles de invertebrados que entran en esta categoría, como las langostas marinas, las arañas y muchas especies de hormigas.

Los depredadores provocan la muerte de las presas y reducen el tamaño de sus poblaciones. Las presas, a la vez, afectan a las poblaciones del depredador, pues cuando hay pocas presas, los depredadores no tienen qué comer y su abundancia disminuye. Este *control mutuo* entre las poblaciones de presas y depredadores hace que el tamaño de ambas poblaciones fluctúe de forma alternada. Un ejemplo de este tipo de *fluctuaciones numéricas acopladas* se presenta en las dos poblaciones de

la figura 2.10: el lince canadiense (*Lynx canadensis*) y su presa principal, la liebre americana (*Lepus americanus*).

2. Herbívoros. La herbivoría consiste en el consumo de una planta por parte de un animal. Pocos herbívoros consumen una planta entera; por lo general se comen sólo algunas de sus partes, de tal manera que la planta no muere necesariamente. Diferentes herbívoros se especializan en el consumo de distintas partes de las plantas. Hay algunos que consumen sólo las hojas, otros se comen las flores o los frutos, otros atacan a las raíces o a los **meristemos** foliares, y otros más se especializan en consumir la **savia**, como los insectos chupadores que perforan el tallo y extraen el líquido rico en nutrientes que circula por el tejido vascular de las plantas.

El daño que causan los herbívoros depende de varios factores, como la cantidad de tejido que remueven, la temporada del año en la que atacan a la planta, el tipo de tejido removido y la edad o el tamaño de la planta. Muchas plantas **compensan** el efecto de la herbivoría de tal manera que las consecuencias del daño provocado por el herbívoro se amortiguan. Por ejemplo, si el herbívoro consume hojas viejas o que se encuentran bajo la sombra (y por lo tanto, su tasa fotosintética es baja), la planta casi no sufre perjuicios, ya que sólo pierde tejido que le resulta difícil mantener, pues son hojas que utilizan carbohidratos en su respiración.

Los herbívoros consumen sólo entre 1 y 20% de la materia vegetal que producen los ecosistemas terrestres. Al parecer, este tipo de depredadores cuenta con abundante alimento, pues la mayor parte de la biomasa de un ecosistema es materia vegetal. Sin embargo, las plantas son un alimento muy pobre. La mayor parte del tejido vegetal está formado por fibra (como celulosa o lignina) que los animales no pueden digerir. Además, su contenido de proteínas es sumamente bajo. Por último, muchas plantas presentan características morfológicas (espinas, aguijones o pelos urticantes) o contienen sustancias químicas (como alcaloides, flavonoides y diversos compuestos nitrogenados) que son tóxicas para muchos herbívoros. Estas características, que muy probablemente han evolucionado en diversos grupos de plantas en respuesta a las presiones de los herbívoros, tienen el efecto de reducir la incidencia de la herbivoría.

3. Parásitos. Los parásitos son organismos que viven a expensas de otros y que se alimentan de *una sola presa* (o en ocasiones de unas cuantas), con la que establecen una relación muy íntima. Generalmente la presa, que en este caso se conoce como **hospedero**, no muere como resultado del ataque del parásito, sino que sólo se debilita y pierde vigor.

El parasitismo es una interacción de gran importancia en la naturaleza. Todas las especies de plantas y animales tienen parásitos que se alimentan de ellas. Así, podemos darnos una idea del gran número de especies que son parasitarias. Además, los parásitos tienen una gran importancia a nivel socioeconómico, pues son la fuente de las enfermedades del ser humano, así como de los padecimientos de nuestros recursos alimenticios (como el ganado, los pescados y mariscos, los cultivos, etcétera). Por esta razón, el parasitismo se ha estudiado a mayor profundidad en el contexto de la medicina y sólo recientemente se han empezado a analizar sus implicaciones ecológicas.

Los parásitos se clasifican en *microparásitos* y *macroparásitos*. Los **microparásitos** son de tamaño pequeño (como virus, bacterias y protozoarios), tienen tiempos de vida cortos y generalmente

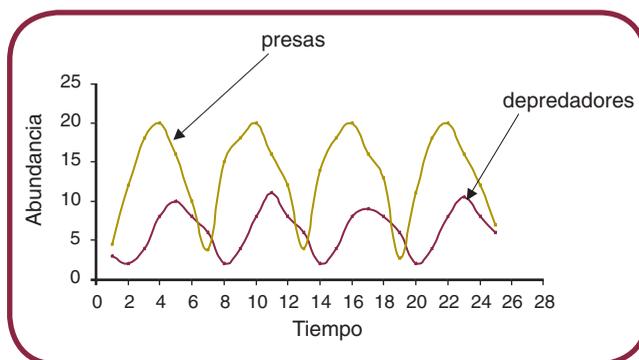


Figura 2.10

Ejemplo de las fluctuaciones numéricas acopladas que presentan una población de presas y la de sus depredadores.

se transmiten por contagio directo; la infección que provocan sólo es transitoria y con frecuencia los hospederos desarrollan alguna **respuesta inmune** que puede ser de larga duración. Por su parte, los **macroparásitos**, entre los que se incluyen los helmintos (como la tenia y otras lombrices intestinales) y los insectos (como las pulgas y los piojos), son de mayor tamaño, tienen tiempos generacionales más largos y a menudo se transmiten a través de vectores específicos; pueden producir infecciones persistentes o crónicas, y su efecto depende de la cantidad de parásitos que aloje el hospedero. Además, aun en el caso de que el hospedero sea capaz de generar una respuesta inmune, ésta es de corta duración y depende de la abundancia del parásito.

Algunas características generales de los organismos parásitos son las siguientes: 1) su ciclo de vida incluye alguna fase de dispersión o de búsqueda de nuevos hospederos; este proceso a veces se ve facilitado por un hospedero intermediario (vector); 2) la fase de dispersión comprende estructuras muy resistentes (como esporas o quistes), y 3) producen una gran cantidad de descendientes, lo que facilita el proceso de infección de nuevos hospederos.

Entre las plantas también existen especies parásitas que obtienen sus recursos de otras plantas, como es el caso del muérdago (figura 2.11), que germina sobre la rama de algún árbol y proyecta

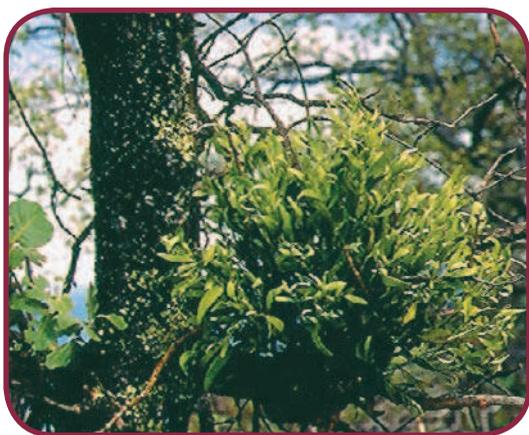


Figura 2.11

El muérdago es una planta hemiparásita que se establece sobre otras plantas, proyectando sus raíces hacia el interior del tejido vascular de su hospedero.

sus raíces hacia el interior para extraer agua y nutrientes de los tejidos del hospedero. Las plantas **hemiparásitas** poseen su propio tejido fotosintético y dependen de su hospedero principalmente como una fuente de agua. En cambio, las plantas **holoparásitas** ni siquiera tienen hojas, por lo que deben obtener tanto agua como fotosintatos a partir de su hospedero; en ocasiones, las holoparásitas se reconocen sólo por sus flores y frutos, que aparecen en la temporada reproductiva.

4. Parasitoides. Los organismos que pertenecen al grupo de los parasitoides son de vida libre durante su fase adulta. Sin embargo, durante el estado larvario viven a expensas de otro organismo que muere como resultado de la infección. Todos los organismos parasitoides son insectos de los órdenes de los himenópteros (avispas) y de los dípteros (moscas) que atacan a otros **artrópodos**. Por esta razón, los parasitoides se utilizan con éxito en programas de **control biológico** de plagas, ya que

atacan de manera específica a ciertas especies de insectos. Además, su mecanismo de transmisión es muy eficiente, pues los adultos, al ser de vida libre, buscan activamente al futuro hospedero de sus crías para **ovipositar** en él.

Mutualismo

El mutualismo tiene lugar entre organismos de diferentes especies, los cuales se benefician mutuamente al interactuar. Por esta razón se trata de una interacción de tipo (+, +). Muchos mutualismos son **facultativos**, es decir, los organismos participantes pueden vivir en ausencia uno del otro. Sin embargo, otros mutualismos son **obligados**, lo que significa que los dos organismos necesitan por fuerza de la presencia del otro para subsistir. Tal es el caso de los **protozoarios** (del género *Trichomonas*) que viven en el aparato digestivo de las termitas y se encargan de descomponer la madera que éstas consumen. Las termitas (insectos coloniales del orden de los isópteros) no pueden vivir sin estos pro-

tozoarios, pues son incapaces de digerir las fibras complejas que componen la madera. Por su parte, los protozoarios tampoco pueden vivir sin las termitas, pues éstas constituyen su hábitat, además de que se encargan de proveerlos constantemente de alimento.

En la mayoría de las relaciones mutualistas uno de los miembros brinda alimento al otro, mientras que el segundo ofrece al primero protección, limpieza, dispersión, polinización o sencillamente un sitio para vivir.

Hay muchos ejemplos de interacciones mutualistas muy interesantes. Uno de ellos es el del arbusto tropical *Acacia cornigera*, que frecuentemente se encuentra habitado por hormigas del género *Pseudomyrmex*. Las hormigas se alimentan del líquido rico en azúcares —que la planta produce en nectarios especiales—, así como de las proteínas contenidas en las puntas de los **foliolos**. Las hormigas viven en el interior de las espinas de la planta, que son abultadas y huecas (figura 2.12). De esta forma, las hormigas obtienen de la planta tanto su alimento como un lugar seguro para vivir. La planta, a la vez, obtiene protección de parte de las hormigas, pues cuando algún herbívoro se acerca para intentar alimentarse de ella, las hormigas lo atacan ferozmente y lo hacen huir.

La relación que se da entre las plantas con flores y sus organismos polinizadores también es un ejemplo de mutualismo. La planta ofrece néctar y polen al polinizador, quien los colecta y consume como alimento. El polinizador transporta el polen de la planta a otras flores, gracias a lo cual éstas producen semillas. Una gran variedad de especies animales



Figura 2.12

Las hormigas del género *Pseudomyrmex* viven en las espinas huecas de las acacias y se alimentan del néctar que éstas producen en nectarios extraflorales; las hormigas protegen a la acacia de la acción de los herbívoros, por lo que se considera un ejemplo de mutualismo.



Figura 2.13

Las flores de muchas especies de cactus son polinizadas por murciélagos que, en la búsqueda de néctar, transportan el polen de una planta a otra.

fungen como polinizadores. Entre los más numerosos están los abejorros, las abejas y las avispas (insectos del orden de los himenópteros), las mariposas y palomillas (lepidópteros), las moscas (dípteros), así como los colibríes y algunos murciélagos (figura 2.13).

Otra interacción mutualista entre plantas y animales es la dispersión de frutos y semillas por parte de diversas especies de animales (como aves, monos, murciélagos, roedores e incluso hormigas). Éstos consumen los frutos y, en el proceso, transportan las semillas lejos de la planta madre, muchas veces llevándolas a sitios adecuados para su germinación. Por ejemplo, los murciélagos consumen los frutos de muchos cactus. El animal toma un pedazo del fruto y vuela hacia algún arbusto, donde mastica

la pulpa y escupe las semillas al suelo, o bien, las traga y posteriormente las defeca. El resultado es que el murciélago obtiene alimento de la planta, mientras que ésta gana la posibilidad de que sus semillas lleguen a sitios propicios para su germinación, en este caso bajo los arbustos, que son ambientes sombreados y protegidos de la intensa radiación solar que caracteriza a los desiertos.

Comensalismo y amensalismo

En el comensalismo y el amensalismo uno de los dos participantes no se ve perjudicado ni beneficiado por la interacción. En el amensalismo el otro miembro se ve afectado negativamente, lo que la hace una interacción de tipo $(0, -)$, en tanto que en el comensalismo resulta beneficiado en alguna medida, lo que da lugar a una interacción de tipo $(0, +)$.



Figura 2.14

Muchas orquídeas presentan un hábito epífita, pues se establecen en las ramas de árboles y arbustos, lo que constituye un ejemplo de comensalismo.

Un ejemplo de comensalismo es la relación entre las plantas **epífitas** y sus hospederos. Las epífitas son plantas que viven sobre otras plantas, como muchas orquídeas (figura 2.14), helechos, bromelias (como el heno) e incluso algunos cactus; las plantas hospederas generalmente no se ven afectadas por las epífitas, mientras que estas últimas se ven beneficiadas al obtener un sustrato dónde establecerse.

Como ejemplo de amensalismo podemos citar al fenómeno de **alelopatía**, que consiste en la producción de sustancias repelentes que impiden el establecimiento de plántulas bajo la sombra de algunas especies de plantas. Ciertos eucaliptos, por ejemplo, tienen un efecto alelopático, pues se ha visto que muy pocas semillas son capaces de germinar en los lugares donde sus hojas caen y se descomponen.



Para reflexionar...

1. Los ecólogos han estudiado mucho más tiempo las poblaciones de especies animales que las de especies de plantas. ¿A qué crees que se deba esto?
2. La **longevidad** de los organismos vivos varía desde unas cuantas horas en el caso de algunas bacterias, hasta varios miles de años en el caso de algunos árboles. ¿Crees que la longevidad del organismo de estudio sea un factor importante a tomar en cuenta para decidir qué tipo de tabla de vida es más adecuado para analizar su demografía? ¿Por qué?
3. La ecuación logística plantea que las poblaciones alcanzan una densidad máxima denominada capacidad de carga. ¿En qué medida crees que este concepto refleja una realidad sobre el comportamiento numérico de las poblaciones en la naturaleza? ¿Cómo crees que se aplica a la población humana?
4. En el ejemplo de la tropa de monos aulladores que se describió en la sección inicial del capítulo, ¿qué factores bióticos y abióticos crees que regulen el tamaño de sus poblaciones?
5. De las interacciones bióticas que se explicaron en este capítulo, ¿cuáles has observado en los sistemas naturales que conoces? Menciona ejemplos específicos de cada una.
6. Las interacciones presa/depredador comúnmente producen fluctuaciones numéricas acopladas en ambas poblaciones. ¿Crees que éste sea el caso de las poblaciones humanas en relación con los recursos de los que se alimentan? ¿Qué similitudes y diferencias encuentras?
7. ¿Crees que las interacciones mutualistas pueden considerarse altruistas? Es decir, ¿cada especie actúa en beneficio de la otra?



Actividades complementarias

1. Investiga el significado del término simbiosis en por lo menos tres fuentes bibliográficas y analízalo en el salón de clases con tus compañeros. ¿A qué conclusión llegan?
2. Si la población de carpas de un estanque tiene 890 individuos, calcula cuántos individuos habrá al cabo de cinco, 10 y 15 años si su tasa de crecimiento poblacional (λ) tiene los siguientes valores: *a*) 1.02, *b*) 0.98 y *c*) 1.73.
3. Haz una lista completa de todas las personas que componen tu familia extendida (abuelos, tíos, primos, sobrinos, padres y hermanos). Anota la edad de cada uno. Junta esta información con la que obtengan todos los compañeros de tu salón y construye una gráfica de la estructura de edades de esta "población" utilizando categorías de edad de cinco años (0-4, 5-9, 10-14 y así sucesivamente). ¿A qué conclusiones llegan a partir de esta gráfica?
4. Haz germinar frijoles y lentejas en macetas con 10 semillas cada una, con el siguiente diseño: *a*) una maceta con 10 semillas de frijol, *b*) otra con 10 semillas de lenteja y *c*) una más con cinco semillas de frijol y cinco de lenteja. Al cabo de un mes cosecha las plantas con todo y raíz, sécalas en un horno (80°C durante dos días) y péscalas (si no dispones de un horno adecuado, sécalas al Sol). ¿En qué combinación fue mayor la biomasa promedio por planta de frijol y en cuál fue mayor la de lenteja? ¿Cuál crees que haya sido el efecto de la competencia entre ambas?

● CAPÍTULO 3 ●

Ecología de comunidades

3.1 Para la imaginación

Había pasado un año desde que aquel pavoroso estruendo despertó a todos los habitantes del pueblo poco antes de la media noche. Javier y sus hermanas despertaron aterrados, sin saber cuál había sido la causa de tan tremendo escándalo aquella noche lluviosa. Al día siguiente, los tres pequeños se dirigieron junto con sus padres y otros vecinos al lugar del desastre. Al llegar, descubrieron con gran sorpresa que una parte del gran cerro ubicado al norte del poblado se había venido abajo. “Seguramente tanta lluvia aflojó la tierra”, dijo don Alberto. La casa abandonada donde Fermín y su esposa vivían antes de marcharse a la capital del estado en busca de trabajo quedó destruida.

Comenzaba la época de lluvias del año siguiente cuando Javier y su padre regresaban de la milpa. En el camino pasaron por el lugar donde aún estaba acumulado el enorme montón de tierra, debajo de la ladera rocosa que había quedado desnuda, desprovista de su cubierta de suelo y árboles. “Mira papá, —comentó Javier—, sobre toda esta tierra están naciendo varios tipos de plantas, como las que brotan en la milpa y que nosotros siempre quitamos para que no le estorben al maíz; ¡y también hay muchos arbustos ya grandes!”. Pero al levantar la vista para ver si pasaba lo mismo en la parte de arriba del deslave, sobre las rocas desnudas, se sorprendió al notar que ahí no había plantas de ese tipo, sino una gran diversidad de helechos, musgos y líquenes de varios colores. Su padre le explicó que lo mismo había pasado en el deslave que había ocurrido hacía doce años (figura 3.1), cerca del lugar donde se juntan los dos arroyos, donde ahora ya había, además de helechos y musgos, pastos y algunos arbustos pequeños.

“¡Qué raro! —pensó Javier—. ¿A qué se deberá esto? ¿Por qué no nacen helechos y musgos sobre el montón de tierra, pero sí sobre la ladera rocosa? ¿Por qué casi no hay malas hierbas y arbustos en la parte de arriba?” Años después, cuando estudiaba la preparatoria, Javier aprendió que el conjunto de plantas que se van estableciendo en un sitio perturbado depende de si hay o no suelo. Como todo en la vida, las condiciones iniciales afectan profundamente los eventos posteriores, así como el resultado final.



Figura 3.1

Los deslaves de tierra son comunes en zonas montañosas que tienen climas lluviosos. El suelo, al humedecerse, puede deslizarse hacia las zonas bajas, generando perturbaciones de gran intensidad (tomada de: <https://cepoweronline.sslpowered.com/pacific-geotech.com/Images/Landslide.jpg>).

3.2

Definición de comunidad ecológica

En la naturaleza ningún organismo vive aislado de otros, y ninguna población, por pequeña o grande que sea, crece en ausencia de poblaciones de otras especies. Esta realidad llevó al reconocimiento de un nivel de organización de mayor complejidad que el poblacional y que corresponde al de las **comunidades ecológicas** (o **comunidades bióticas**). Una comunidad ecológica es un conjunto de poblaciones de diferentes especies que conviven en un sitio donde pueden interactuar, al menos potencialmente, de diversas formas.

Casi en cualquier sitio del planeta coexisten individuos de muchísimas especies y de numerosos grupos biológicos. De acuerdo con la definición de comunidad biótica expresada antes, ésta debería incluir a todos los organismos de todos esos grupos biológicos presentes en un sitio, es decir, la totalidad de bacterias, protistas, hongos, plantas y animales que allí viven. Sin embargo, ningún biólogo ha logrado elaborar una lista de la totalidad de especies de alguna comunidad, y lo más probable es que esto nunca suceda, ya que el número de especies que existen en nuestro planeta es formidable, como resultado de millones de años de evolución orgánica en la Tierra. Algunos cálculos señalan que en todo el mundo podría haber entre 30 y 50 millones de especies, cifra que resulta abrumadora, sobre todo si se le compara con los aproximadamente dos millones de especies descritas por los biólogos hasta ahora.

Además, y debido precisamente a esta gran diversidad de especies, ningún biólogo puede especializarse en todos los grupos biológicos conocidos, lo cual dificulta aún más el estudio de las comunidades ecológicas. Esta circunstancia obliga a los ecólogos a subdividir las comunidades ecológicas en comunidades parciales, o **subcomunidades**, para su estudio. Entre los criterios utilizados para definir una subcomunidad están el grupo taxonómico (por ejemplo, una comunidad de aves), el hábitat

(como una comunidad de manglar), el tipo de alimento que consume un grupo de organismos (por ejemplo, una comunidad de carnívoros), o una combinación de los criterios anteriores (por ejemplo, la comunidad de peces carnívoros de un arrecife coralino; figura 3.2).



Figura 3.2

Los ecólogos dividen a las comunidades en subcomunidades. Aquí vemos a los peces carnívoros de un arrecife coralino (tomada de: http://travelpod.com/users/mclubbe/mikeski_rtw_2.1067119200.fish_moso_2.jpg).

3.3

Propiedades emergentes de las comunidades

Las características exclusivas de las comunidades constituyen sus **propiedades emergentes**. Entre ellas se distinguen dos grupos: 1) las estáticas, es decir, las propiedades que pueden ser analizadas en un momento particular en el tiempo, y 2) las dinámicas, es decir, las relacionadas con las modificaciones que sufren las comunidades con el paso del tiempo, cuyo análisis requiere necesariamente de observaciones repetidas en diferentes momentos. Las propiedades emergentes más importantes de las comunidades ecológicas son las siguientes:

Riqueza de especies

La riqueza de especies (**riqueza específica** o simplemente **riqueza**) es el número de especies que conforman una comunidad. Aunque —como ya dijimos antes— es prácticamente imposible conocer la riqueza real de las comunidades ecológicas, esta labor no es tan difícil para las subcomunidades que las conforman.

Composición

La composición de una comunidad es el conjunto de especies que la conforman, es decir, indica *cuáles* especies están presentes. A veces es muy difícil conocer la identidad específica de las especies de una comunidad bajo estudio; en tales casos, el análisis se puede basar en categorías taxonómicas de mayor jerarquía (géneros, familias o inclusive órdenes).

La información sobre la composición de una comunidad es muy importante. Por ejemplo, si sabemos que una especie rara o amenazada está en la lista de especies de una comunidad, como por ejemplo, el águila arpía (figura 3.3), podemos concluir que vale la pena hacer esfuerzos para la conservación de esa comunidad. Asimismo, la identidad de las especies de una comunidad nos da indicios sobre las condiciones climáticas del lugar, aun sin contar con información meteorológica.

Estructura

La *estructura* es la manera en la que está organizada una comunidad. El componente más estudiado de la estructura de las comunidades es la **estructura cuantitativa**, término que se refiere al número de individuos o la **biomasa** de cada especie en la comunidad. Los ecólogos saben que no todas las especies son igualmente abundantes en una comunidad; por el contrario, siempre hay una especie o algunas que tienen una contribución importante a la estructura de la comunidad, por lo que se les conoce como **especies dominantes**, mientras que otras más bien son raras.

En ciertas comunidades se distingue también un componente estructural conocido como **estructura vertical**. Ésta se define como la distribución diferencial de los organismos de una comunidad a lo largo de un eje vertical, ya sea sobre el suelo en comunidades terrestres o a distintas profundidades bajo la superficie del agua en las comunidades acuáticas. Por ejemplo, en muchos bosques se reconocen varios estratos: uno conformado por plantas pequeñas, casi todas herbáceas; otro ubicado por encima de éste donde predominan especies arbustivas, y uno más alto formado por los árboles del **dosel** del bosque.

Los ecólogos también se interesan por conocer la distribución de los organismos de una comunidad sobre la superficie del terreno; a esta distribución se le conoce como **estructura horizontal**. El término **estructura espacial** engloba tanto a la estructura vertical como a la horizontal de una comunidad.

Fisonomía

La fisonomía es el aspecto visual de las comunidades. En las comunidades conformadas por organismos **sésiles** (que viven sujetos a un sustrato), el aspecto no cambia en lapsos cortos, y por ello el estudio de este atributo se limita a comunidades vegetales y de arrecifes coralinos. La fisonomía de una comunidad depende básicamente de la morfología de las especies que la conforman; sin embargo, otros atributos, como la densidad de los individuos, influyen sobre ella. Por ejemplo, la impresión visual que nos causa una comunidad cerrada de pastizales, donde la mayoría de las plantas son pequeñas **gramíneas**, difiere mucho de la que recibimos al observar una comunidad donde abundan grandes cactus columnares con aspecto de candelabro (figura 3.4).

Diversidad

La diversidad es la variedad de organismos que constituyen una comunidad. Para los ecólogos este concepto es más complejo que el de riqueza, ya que tiene dos componentes: la riqueza de especies y sus abundancias relativas. Imaginemos, por ejemplo, dos sencillas comunidades de árboles, cada una compuesta por dos especies, una de pino y otra de encino. En ambos casos la riqueza es idéntica: dos especies. No obstante, ¿qué pasaría si la primera comunidad estuviera formada por 99 pinos y un encino, y la otra por 50 pinos y 50 encinos? ¿Cuál de las dos sería más diversa? A todas luces la segunda, pues en este caso la contribución de ambas especies es equitativa. En contraste, en el primer caso, los pinos acaparan el terreno, por así decirlo (figura 3.5). Aunque con frecuencia el término *diversidad* se usa como sinónimo de riqueza, sobre todo cuando nos referimos a grandes



Figura 3.3

El águila arpía forma parte de la comunidad de aves rapaces de algunas regiones tropicales de México.

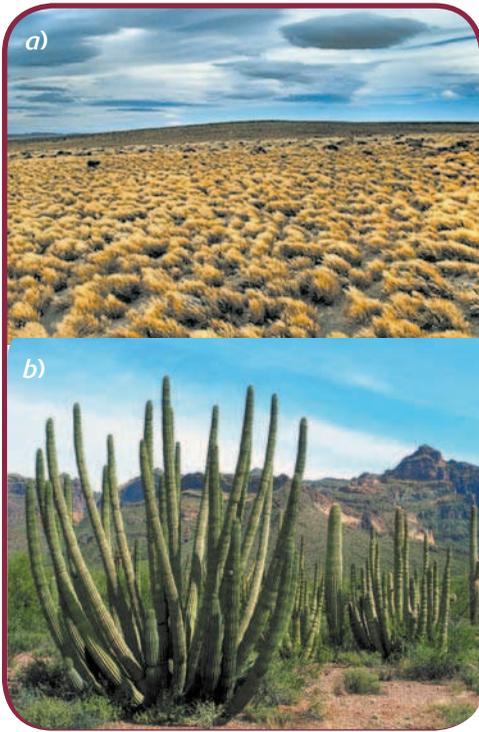


Figura 3.4

a) Fisonomía de un pastizal en Patagonia, Argentina.
 b) Fisonomía de un matorral de cactus columnares en Acatepec, Puebla.

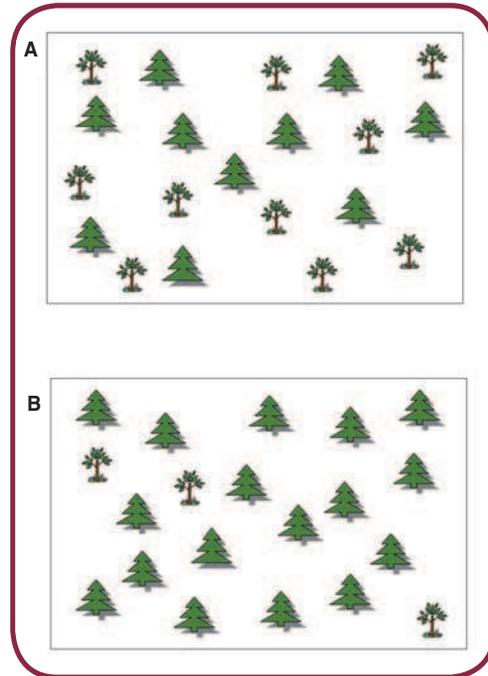


Figura 3.5

Dos comunidades de pino y encino con el mismo número de individuos pero distinta diversidad. La comunidad A está integrada por 10 pinos y 10 encinos; la comunidad B está integrada por 17 pinos y 3 encinos. Se aprecia que la comunidad A es más diversa que la comunidad B.

extensiones de tierra, vale la pena distinguirlos, pues cada uno se refiere a características distintas de la comunidad.

Fenología

La fenología es un atributo dinámico de las comunidades que se refiere a su comportamiento estacional. Este último depende de la expresión de las diferentes etapas del ciclo de vida de las especies que componen la comunidad y de su acoplamiento con los cambios del estado del tiempo a través de las estaciones del año. Como ejemplos de eventos que estudia la fenología podemos citar el brote y la caída de las hojas de los árboles, los momentos de máxima producción de frutos de las plantas y la temporada de vuelo de los adultos de las mariposas.

Estado sucesional

El estado sucesional es otra característica dinámica de la comunidad e indica su grado de desarrollo a lo largo del proceso de recuperación que ocurre después de un evento destructivo o **disturbio**. Los procesos sucesionales generalmente duran muchos años y en estos largos periodos se pueden distinguir etapas diferentes, por ejemplo, una fase de colonización inicial, una fase de desarrollo y una fase de madurez, como veremos más adelante.

3.4

La coexistencia de especies en una comunidad

Durante más de un siglo los ecólogos de comunidades han debatido sobre diferentes ideas acerca de la naturaleza y el funcionamiento de las comunidades ecológicas. El análisis de esta polémica se puede consultar en libros más especializados. Sin embargo, vale la pena revisar aquí una de las ideas centrales de tal discusión, que es la que se refiere a que las especies pueden coexistir en una comunidad gracias a la diferenciación de sus **nichos ecológicos**.

El nicho ecológico, como vimos en el capítulo 1, se define como el conjunto de características ambientales que una especie tolera o requiere para subsistir. Si dos especies comparten nichos idénticos, el principio de exclusión competitiva (véase el capítulo 2) predice que necesariamente una excluirá a la otra. Por eso, la coexistencia de muchas especies debe estar basada en una diferenciación, aunque sea mínima, de sus nichos. Esto permite que muchas especies se “acomoden” en un ambiente, ya que cada una puede explotar distintos “compartimientos” del mismo, como pudo adivinar Javier, nuestro amigo de la historia inicial de este capítulo.

La idea de que la coexistencia de especies en las comunidades ecológicas se da gracias a la diferenciación de nichos no ha convencido a todos los ecólogos. Muchos investigadores piensan que el azar desempeña un papel importante en la coexistencia de las especies, es decir, que las comunidades tienen una naturaleza fundamentalmente **aleatoria**. Por ejemplo, en una comunidad afectada de forma periódica por **disturbios**, la riqueza, la composición y la estructura cambiarían constantemente, dependiendo de qué organismos lleguen en un momento dado a colonizar los sitios abiertos por los disturbios.

3.5

Medición de la diversidad de las comunidades

Como ya dijimos, la diversidad está asociada con la variedad de organismos que componen una comunidad. Al intentar cuantificarla, los ecólogos enfrentan varios problemas. En primer lugar, es necesario decidir a qué escala espacial se quiere medir. Si la escala es pequeña, podemos conocer la riqueza, aunque también sería posible contar cuántos individuos tiene cada una de las especies presentes (es decir, sus abundancias relativas). A una escala mayor, como la correspondiente a la cuenca del Río Balsas en el sur de México, es imposible conocer las abundancias relativas de las especies; en este caso, una idea aproximada del número de especies es la mejor medida de su diversidad.

A principios de la década de 1970 el ecólogo estadounidense Robert Whittaker dividió el concepto de diversidad en tres categorías, dependiendo de la escala a la que hacen referencia: *a*) la **diversidad alfa** es la que existe en una localidad particular; *b*) la **diversidad beta** es una medida de qué tanta variación en la composición de especies hay entre varias localidades, y *c*) la **diversidad gamma** es una medida que se refiere a la variedad de organismos en una área muy amplia, por ejemplo, una región o un país. Existe una relación estrecha entre estas tres medidas de diversidad, pues el total de especies en el área más grande (diversidad gamma) depende de la riqueza de cada una de las localidades que engloba (diversidad alfa) y de qué tan diferente es la composición de cada una de éstas (diversidad beta).

La diversidad alfa puede medirse en términos de la riqueza específica, aunque con frecuencia se toma en cuenta la abundancia relativa de cada especie (figura 3.5). Esto se refleja en los diferentes **índices de diversidad** que utilizan los ecólogos, algunos de los cuales se presentan en el recuadro 3.1, “Índices de diversidad y dominancia”.

Recuadro 3.1

Índices de diversidad y dominancia

Si bien podemos medir la diversidad de una comunidad solamente con la riqueza de especies, muchos ecólogos consideran que es necesario reconocer que no todas las especies presentes son igualmente abundantes. A partir de esta idea se han desarrollado índices de dominancia que consideran ambas variables, es decir, el número de especies y sus abundancias relativas.

Para el cálculo de estos índices muchas veces es necesario convertir algunos números a logaritmos. Algunos textos recomiendan usar logaritmos de base 2, pero también resultan convenientes los de base 10 o el logaritmo natural (base e). Es esencial indicar claramente cuál logaritmo se usó, porque sólo así es posible hacer comparaciones de la diversidad de diferentes comunidades.

1. Índice de Shannon (H'), también conocido como índice de Shannon-Wiener. Se define como la sumatoria de los productos de la abundancia de cada especie por el logaritmo de dicha abundancia. Cuanto más grande es su valor, mayor es la diversidad de una comunidad; a la vez, ésta depende de qué tan homogéneas son las abundancias relativas que conforman la comunidad. Este índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H' = \sum p_i \log p_i$$

donde p_i es la proporción (expresada como fracción) de individuos que corresponden a cada especie (denotada por i) y $\log p_i$ es el logaritmo de esa fracción.

Asociada al índice de Shannon suele calcularse una medida conocida como equitabilidad o equidad (E), la cual nos dice qué tan cercano está nuestro valor del máximo que podríamos haber obtenido si las abundancias de todas las especies fueran iguales. Se calcula de la siguiente manera:

$$E = \frac{H'}{H'_{\text{máx}}}$$

y

$$H'_{\text{máx}} = \log S$$

donde S es el número total de especies en la comunidad y \log es cualquier logaritmo.

2. Índice de Simpson (D). Se define como la suma de los cuadrados de las fracciones correspondientes a cada especie en una comunidad:

$$D = \sum p_i^2$$

Calculado de esta manera, este índice es en realidad una medida del grado de dominancia que hay en la comunidad. Es decir, cuanto más alto es su valor, más dominante es una especie (o unas cuantas especies). Por ello, para usarlo como un índice de diversidad es necesario calcular su inverso (D'):

$$D' = \frac{1}{D}$$

3. Índice de Berger-Parker (d). Es un sencillo índice que se calcula como el cociente resultante de dividir el número de individuos de la especie más abundante entre el número total de individuos:

$$d = \frac{N_{\text{máx}}}{N} = p_{i \text{ máx}}$$

(continúa...)

De nuevo, este índice refleja el grado de dominancia en la comunidad y no su diversidad. Por ello, para este último fin también podemos calcular su recíproco:

$$d' = \frac{1}{p_i \text{ máx}}$$

A continuación vemos la aplicación de estos índices para tres comunidades hipotéticas. Las comunidades A y B tienen cuatro especies cada una, mientras que la comunidad C tiene siete especies. Observa cómo a pesar de que varían las abundancias de estas especies en sus comunidades, todas ellas tienen en total 20 individuos.

Cálculo del índice de Shannon:

Especie	Comunidad I				Comunidad II				Comunidad III			
	<i>N</i>	<i>p_i</i>	log <i>p_i</i>	<i>p_i</i> × log <i>p_i</i>	<i>N</i>	<i>p_i</i>	log <i>p_i</i>	<i>p_i</i> × log <i>p_i</i>	<i>N</i>	<i>p_i</i>	log <i>p_i</i>	<i>p_i</i> × log <i>p_i</i>
A	14	0.70	-0.16	-0.108	5	0.25	-0.60	-0.151	7	0.35	-0.456	-0.160
B	4	0.20	-0.70	-0.140	5	0.25	-0.60	-0.151	4	0.20	-0.699	-1.140
C	1	0.05	-1.30	-0.065	5	0.25	-0.60	-0.151	3	0.15	-0.824	-0.124
D	1	0.05	-1.30	-0.065	5	0.25	-0.60	-0.151	2	0.10	-1.000	-0.100
E									2	0.10	-1.000	-0.100
F									1	0.05	-1.301	-0.065
G									1	0.05	-1.301	-0.065
TOTAL	20	1.00		-0.378	20	1.00		-0.604	20	1.00		-0.754

Ahora sólo basta multiplicar por -1 los números marcados en negritas para eliminar los signos negativos y así obtener los tres valores respectivos del índice de Shannon: 0.378, 0.604 y 0.754.

Cálculo del índice de Simpson:

Especie	Comunidad I			Comunidad II			Comunidad III		
	<i>N</i>	<i>p_i</i>	<i>p_i</i> ²	<i>N</i>	<i>p_i</i>	<i>p_i</i> ²	<i>N</i>	<i>p_i</i>	<i>p_i</i> ²
A	14	0.70	0.490	5	0.25	0.063	7	0.35	0.123
B	4	0.20	0.040	5	0.25	0.063	4	0.20	0.040
C	1	0.05	0.003	5	0.25	0.063	3	0.15	0.023
D	1	0.05	0.003	5	0.25	0.063	2	0.10	0.010
E							2	0.10	0.010
F							1	0.05	0.003
G							1	0.05	0.003
TOTAL	20		0.536	20		0.252	20		0.212

(continúa...)

En este punto tenemos que calcular el inverso de los números marcados en negritas para obtener los tres valores correspondientes del índice de diversidad de Simpson: 1.866, 3.968 y 4.717.

Ahora podemos calcular el índice de Berger-Parker para nuestras tres comunidades. En este caso no es necesario hacer una tabla tan complicada, ya que basta con observar con cuidado la anterior para encontrar la fracción (p) correspondiente a la especie más abundante. Estos valores son 0.70, 0.25 y 0.35, respectivamente. Con ellos obtenemos el índice de diversidad, para lo cual volvemos a calcular los valores inversos: 1.429, 4.000 y 2.857.

Reunamos ahora todos estos datos en un cuadro para ver cómo se comportaron nuestros índices y qué tan diferentes son las tres comunidades.

Comunidad	Número de especies	Número de individuos	Índice de Shannon	Índice de Simpson	Índice de Berger-Parker
I	4	20	0.378	1.866	1.429
II	4	20	0.604	3.968	4.000
III	7	20	0.754	4.717	2.857

Con estos datos podemos ver que los diferentes índices nos dan diferente información sobre las comunidades en cuestión. Por ejemplo, es claro que de acuerdo con el índice de Shannon, la comunidad III es la más diversa, pero el índice de Berger-Parker señala que la comunidad II es la que destaca por su diversidad. A pesar de que los valores absolutos de los índices de Simpson y de Berger-Parker de la comunidad II son similares, esto no significa nada. Las comparaciones sólo se pueden hacer entre el mismo índice.

3.6

Patrones globales y regionales de la diversidad biológica

Las diferentes especies no se distribuyen de forma homogénea en la superficie del planeta. Este hecho fue reconocido por varios naturalistas europeos (como Humboldt, Darwin y Wallace, entre otros), quienes exploraron regiones alejadas de sus tierras de origen. Sus escritos hacen patente el asombro que les produjo el descubrimiento de un gran número de plantas y animales, antes desconocidos por los europeos, en las tierras que exploraron.

El patrón mundial más notable de riqueza biológica es su reducción paulatina desde el ecuador hacia los polos. Por ejemplo, el número de especies de aves conocidas en Costa Rica, un país de pequeñas dimensiones, excede a la riqueza de aves registrada en países con territorios tan enormes como Estados Unidos y Canadá (figura 3.6). Asimismo, aunque el territorio de México es de apenas la quinta parte del de Estados Unidos, la riqueza de especies vegetales de nuestro país es de alrededor de 28,000 especies, superando por mucho el número conocido en Estados Unidos (unas 18,000). Sin embargo, este patrón no es universal para todos los organismos; por ejemplo, los anátidos (la familia de aves que incluye a los patos y los gansos) tienen más especies en las regiones templadas que en las cercanas al ecuador.

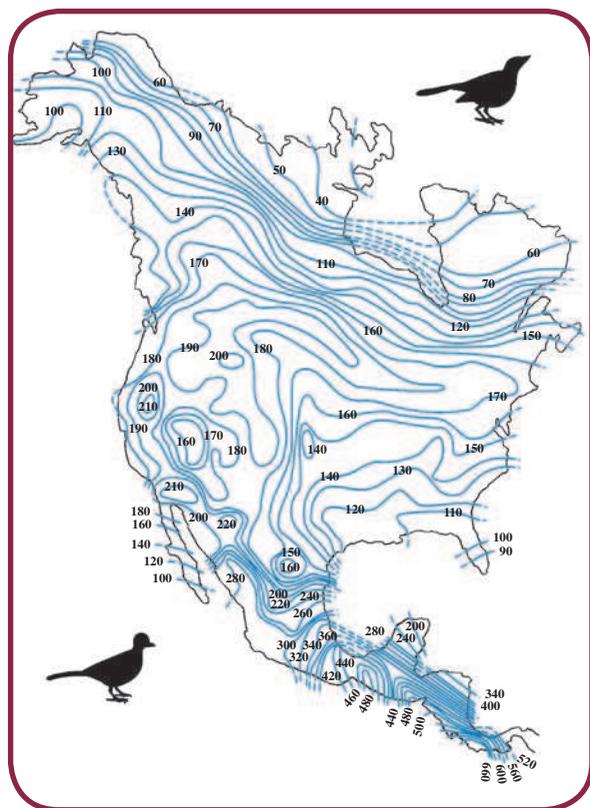


Figura 3.6 Número de especies de aves que se presentan en regiones de América Central y América del Norte (tomada de: Krebs, 2001).

La riqueza y la diversidad de las comunidades también tienden a modificarse con la altitud. En general, en las tierras bajas existe un mayor número de especies que en los sitios localizados a mayores altitudes. De nuevo, este patrón tiene excepciones, ya que varios grupos biológicos son más diversos a altitudes intermedias que en cualquiera de los dos extremos (figura 3.7). En los océanos sucede algo similar con respecto a la profundidad: tanto para las comunidades pelágicas como para las bentónicas, la mayor diversidad se encuentra a profundidades intermedias, entre 2,000 y 3,000 m (figura 3.8).

El hecho de que conozcamos los patrones geográficos de diversidad con cierta precisión no quiere decir que comprendamos bien cuáles son las causas que los determinan. Los ecólogos sospechan que uno de los factores responsables es la radiación solar limitada que reciben las regiones de latitudes altas, lo que determina su baja **productividad**. Otra explicación es que hay una mayor diversidad de hábitat en las tierras de latitudes bajas. Otra más propone una supuesta estabilidad climática a través del tiempo geológico en

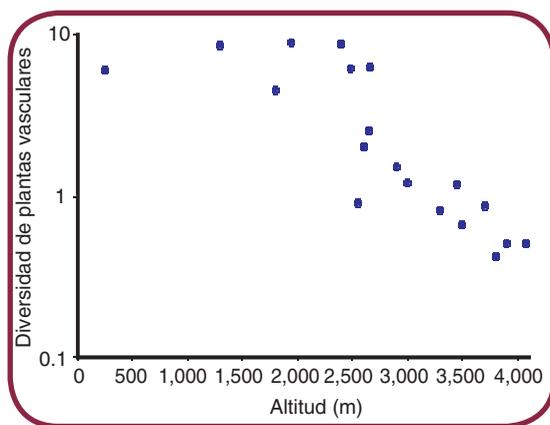


Figura 3.7 Diversidad de plantas vasculares a diferentes altitudes en los Himalayas de Nepal. Como se observa, conforme se asciende una montaña disminuye la diversidad de plantas (tomada de: Begon et al., 1996).

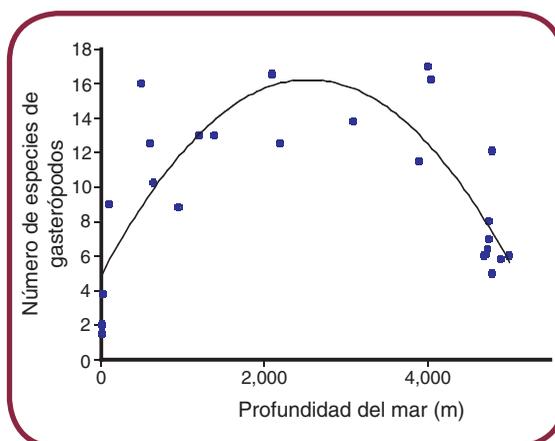


Figura 3.8 Relación entre la profundidad de las aguas marinas y la riqueza de especies de gasterópodos. La riqueza máxima se alcanza a profundidades intermedias (tomada de: Begon et al., 1996).

las regiones cercanas al ecuador, lo que ha permitido que en ellas se reduzcan las tasas de extinción de especies.

3.7

Clasificación de las comunidades: El concepto de bioma

Uno de los objetivos centrales de la ecología de comunidades es estudiar las relaciones entre éstas y su ambiente abiótico. Para alcanzar este objetivo, se ha optado por clasificar de alguna forma a las comunidades ecológicas. Como el componente vegetal de las comunidades es un elemento relativamente permanente del paisaje, suele usarse como referencia para hacer estas clasificaciones. Ejemplos de comunidades terrestres son la **selva tropical húmeda**, el **matorral xerófilo** o el **bosque mesófilo de montaña**. En contraste, para clasificar a las comunidades de organismos acuáticos es más común usar criterios basados en el tipo de hábitat que ocupan: a la comunidad flotante que habita cerca de la superficie del agua se le conoce como **plancton**, mientras que la comunidad **bentónica** está conformada por organismos que viven en el fondo.

Una unidad muy grande de clasificación de las comunidades ecológicas en relación con su ambiente es el **bioma**. Un bioma es un tipo general de comunidad característico de una región climática del planeta. Por lo general, la región de referencia está definida a una escala geográfica muy amplia (continental o mundial). La correspondencia estrecha entre la comunidad biótica y el ambiente abiótico hace posible la caracterización de los biomas, tanto por el tipo de animales y plantas que los componen, como por las condiciones climáticas del lugar.

Los biomas terrestres más conocidos son: la selva tropical húmeda y la sabana (en climas cálidos húmedos, conocidos como de tipo A); el desierto (en climas secos, o de tipo B); el bosque templado (en climas templados, llamados C); el bosque boreal o taiga (en climas fríos, o de tipo D); y la tundra (en climas polares, o de tipo E) (figura 3.9). Los biomas acuáticos comprenden dos tipos claramente distinguibles: los de aguas continentales y los marinos. Entre los biomas terrestres y acuáticos, existen biomas de transición o de interfase, que suelen ser muy diversos a causa de las complejas interacciones que se dan entre los componentes de estos dos tipos de ambientes. Algunos ejemplos de biomas de transición son las playas arenosas y rocosas, los manglares y las marismas.

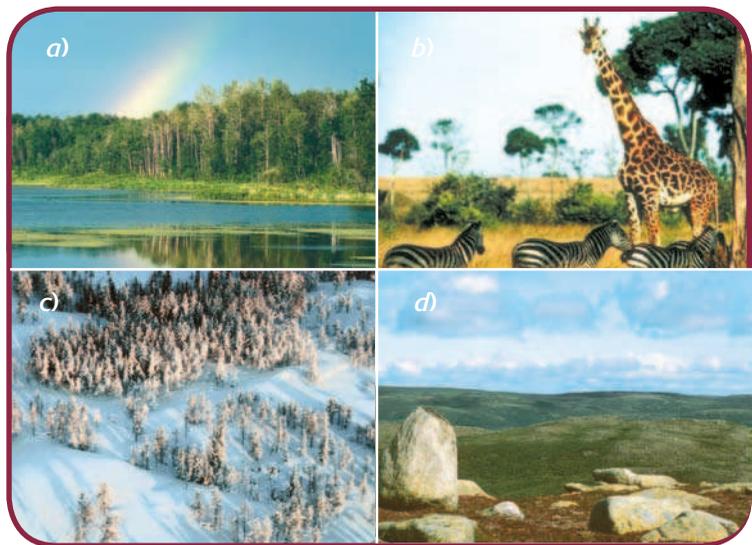


Figura 3.9

Ejemplos de diferentes biomas terrestres: a) la selva tropical, b) la sabana, c) el bosque boreal o taiga, y d) la tundra.

En general, cada tipo de bioma terrestre se caracteriza por que los organismos dominantes o más notorios tienen una morfología particular, lo cual le confiere una fisonomía característica, generando un tipo de paisaje específico (véase cuadro 3.1). Por ejemplo, el bosque boreal se distingue por la presencia de **coníferas** cuyas copas tienen formas cónicas; además, en este bioma viven muchos animales, entre los que destacan mamíferos grandes, como los osos negros y los grises. Por otra parte, en los desiertos predominan plantas como los cactus y los magueyes, los cuales tienen adaptaciones morfológicas que les permiten resistir la sequía (ausencia de hojas, espinas, tallos fotosintéticos y tejidos que acumulan agua); en estos biomas, los animales suelen ser de tamaño pequeño y presentan hábitos nocturnos, lo cual les permite ahorrar agua.

Cuadro 3.1 Los biomas y sus principales características

Bioma	Tipo de clima y características	Distribución en el planeta	Vegetación dominante	Fauna característica
Tundra	Polar. Inviernos largos, muy fríos, y veranos cortos; baja precipitación, principalmente en forma de nieve, por lo tanto, poca agua líquida. Subsuelo congelado de forma permanente (permafrost).	Extremo norte de los continentes americano y eurasiático. En México hay sitios equivalentes en las montañas más altas, arriba del límite altitudinal del crecimiento de los árboles.	Matorrales enanos con forma de almohadilla, líquenes, musgos y hierbas de porte bajo.	Numerosos animales migratorios o hibernantes: gansos, bueyes almidleros, caribúes, zorras del Ártico, renos y osos polares, entre otros.
Bosque boreal o taiga	Frío y estacional, más húmedo que los climas polares. Verano suficientemente cálido para que se descongele el subsuelo.	Canadá, oeste de Estados Unidos, casi toda Siberia, Escandinavia y sur de los Andes. Partes altas de las montañas en otras regiones del mundo, incluyendo México.	Bosques de coníferas (árboles con copas en forma de cono), muchas veces dominados por una sola especie o pocas especies.	Animales grandes y medianos de comportamiento estacional: osos café y grises, patos, alces, lince y castores, entre otros.
Bosque templado decíduo o caducifolio	Templado con veranos cálidos y a veces secos, e inviernos fríos.	Este de Estados Unidos y Canadá, Europa central y este de Asia. El equivalente en México son los bosques templados húmedos de las laderas de las grandes sierras.	Bosques conformados por varios tipos de árboles que pierden las hojas al inicio del invierno: encinos, hayas, maples, liquidámbar, tilos, álamos, alerces, entre otros.	Venados cola blanca, conejos y liebres, zorros rojos, numerosas aves como codornices, águilas calvas, águilas reales y búhos.

(continúa...)

<p>Estepa o pastizal</p>	<p>Intermedio entre los climas templados de los bosques y los secos de los desiertos. Pueden ser extremos pero tendiendo a fríos. A veces los veranos son cálidos y húmedos.</p>	<p>Centro de Estados Unidos y Canadá, pampas sudamericanas, sur de Australia y Asia Central. En México son comunes entre la Sierra Madre Occidental y la Altiplanicie Mexicana, en Chihuahua y Zacatecas.</p>	<p>Dominadas por pastos, con ausencia casi total de árboles y arbustos. En algunas regiones se les conoce como praderas.</p>	<p>Bisontes americanos, dromedarios, venados bura, saltamontes, roedores, liebres y perritos de las praderas.</p>
<p>Desierto y semidesierto</p>	<p>Seco, con precipitación muy escasa, incluso nula en ciertas regiones, e impredecible. Variaciones extremas de temperatura entre el día y la noche.</p>	<p>Principalmente en regiones de la Tierra situadas alrededor de los 30° de latitud Norte y Sur: desiertos de Arizona, Chihuahua, Sonora, Atacama, Sahara, Kalahari, Gobi, centro de Australia. Cubren casi la mitad del territorio mexicano.</p>	<p>Diferentes tipos de matorrales con plantas adaptadas a la aridez: cactus, agaves y euforbias, que tienen tallos carnosos y espinas, y carecen de hojas. En condiciones muy extremas de aridez casi no hay cubierta vegetal.</p>	<p>De hábitos nocturnos: arácnidos, roedores, serpientes, lagartijas, coyotes, monstruos de Gila, murciélagos y diversos tipos de aves.</p>
<p>Matorral mediterráneo</p>	<p>Templado con veranos muy cálidos y secos e inviernos fríos y lluviosos.</p>	<p>Áreas pequeñas de los continentes ubicadas en su porción occidental. Alrededor del Mar Mediterráneo. En México solamente en la porción noroccidental de Baja California.</p>	<p>Matorrales con plantas de hojas duras y perennes. Se le conoce como <i>chaparral</i> en México y California, <i>maquis</i> en Europa y <i>fynbos</i> en Sudáfrica. Los encinos son muy comunes. Muchas plantas toleran el fuego.</p>	<p>Fauna semejante a la de los bosques templados y, en ocasiones, a la de los desiertos. Muchas aves, liebres y serpientes.</p>
<p>Bosque tropical húmedo o selva húmeda</p>	<p>Cálido con precipitación abundante casi todo el año. Posiblemente el clima más favorable para la vida terrestre.</p>	<p>Regiones situadas alrededor del ecuador, cuenca del Amazonas, del Congo en África, sureste de Asia. En México principalmente en porciones de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Oaxaca.</p>	<p>Bosques bien desarrollados, con numerosas especies de árboles. Lianas, arbustos, palmas enanas y altas, hierbas terrestres y epífitas. Las hojas están presentes durante todo el año.</p>	<p>Numerosas aves (guacamayas rojas, águilas arpía, tucanes y pericos), mamíferos medianos (jaguars, jaguarundis, tigrillos y aguties), boas, ranas, anacondas y miles de insectos.</p>

(continúa...)

Bosque tropical estacional o selva seca	Cálido con lluvia concentrada en periodos de cuatro a seis meses y el resto del año muy seco.	En América, en las regiones tropicales situadas en la vertiente del Pacífico. Grandes extensiones en África, India y Australia. En México desde el sur de Sonora y Baja California Sur hasta Chiapas.	Bosques de baja a mediana estatura, ricos en especies leñosas pero sin muchas plantas epífitas. El follaje se pierde en la época de sequía; las cortezas pueden tener colores muy vistosos.	Muchas aves (pericos y chachalacas), mamíferos pequeños como el agutí. Iguanas y muchas lagartijas y serpientes. Numerosas especies se comparten con el bosque tropical húmedo, por ejemplo, el jaguar.
Sabana	Cálido, generalmente con lluvia estacional. La distribución de este bioma depende, más que del clima, de las condiciones del suelo.	Enormes extensiones entre los desiertos y las selvas en África, Sudamérica, India y Australia. Muy común en América Central (Nicaragua, Belice), pero poco extenso en México (porciones de Tabasco, Oaxaca, Campeche y Veracruz).	Dominada por pastos y otras monocotiledóneas. Arbustos dispersos. A veces se da la presencia de árboles que crecen de forma aislada. Con frecuencia la vegetación presenta rasgos de tolerancia al fuego.	En África hay grandes mamíferos tanto herbívoros como carnívoros: gacelas, jirafas, cebras, búfalos, ñúes, leones, guepardos y hienas. En América del Sur y otras partes del mundo son comunes las grandes aves no voladoras (como el ñandú y el avestruz). Caimanes y cocodrilos.
Mar	Muy variable. Las condiciones dependen de la temperatura y salinidad de las corrientes marinas. Poco afectado por condiciones atmosféricas a grandes profundidades.	Los mares y océanos cubren el 70% de la superficie del planeta y son extremadamente variados en sus condiciones de vida. El mar territorial mexicano abarca porciones del Océano Pacífico, el Golfo de México, el Golfo de California y el Mar Caribe.	Los organismos fotosintéticos son algas microscópicas y macroscópicas. En aguas poco profundas hay "pastos" marinos, que en realidad son angiospermas adaptadas a estos ambientes.	Una enorme diversidad de animales, entre los que destacan peces, corales, medusas, crustáceos, moluscos y muchos otros invertebrados.

(continúa...)

Litoral o costa	Muy variable. Las condiciones dependen del oleaje, tipo de sustrato, corrientes marinas que inciden en la costa, profundidad del agua, temperatura y salinidad.	Regiones costeras de todo el mundo. Incluye playas arenosas, dunas costeras, litorales rocosos, estuarios, lagunas costeras, pantanos costeros y manglares, entre otros. México tiene cerca de 10,000 km de costas.	Muy variable. Pastizales costeros, matorrales, bosques bajos, tulares, palmares, entre otros. En general, la vegetación presenta tolerancia a las inundaciones y a diversos grados de salinidad.	Cangrejos y otros crustáceos, moluscos, equinodermos, numerosos peces y aves marinas (bobos, cormoranes, gaviotas, flamencos, garzas, pelicanos).
Agua dulce	Muy variable. Las condiciones dependen de la temperatura y del movimiento del agua.	En todos los continentes y superficies emergidas, pero poco frecuentes en las regiones desérticas.	Los organismos fotosintéticos son algas dulceacuícolas y algunas plantas vasculares flotantes o enraizadas en el sustrato (como lirios, lotos, lentejuelas y nenúfares).	Peces (pirañas, anguilas eléctricas, truchas, pescado blanco, entre otros), crustáceos, moluscos, insectos acuáticos (patinadores, ninfas de moscas y libélulas). Algunos mamíferos (delfines rosados y manatíes), numerosos anfibios y cocodrilos.

3.8

Dinámica estacional de las comunidades: Fenología

La fenología es el estudio de los cambios estacionales de una comunidad a lo largo del año. Los ecólogos de comunidades describen estos cambios y tratan de descubrir sus causas. Por ejemplo, los huevos de algunos insectos eclosionan en los primeros días tibios después de que termina el invierno, en tanto que el inicio de la floración de algunas especies de plantas coincide con el aumento en el número de horas de luz en el día. Hay varios mecanismos que estimulan el inicio y el término de los procesos fenológicos. Entre los más estudiados están la temporalidad de las lluvias, del **fotoperiodo**, de la temperatura y de la disponibilidad de recursos. A continuación revisaremos brevemente la manera en que algunos de estos factores se modifican a lo largo del año.

El cambio de las estaciones a lo largo del año se debe a la inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano de su órbita, y al movimiento de traslación de nuestro planeta alrededor del Sol, lo cual afecta la manera en que los rayos solares inciden sobre la superficie de los dos hemisferios terrestres a lo largo del año (figura 3.10). La consecuencia más importante de este fenómeno es que en cada hemisferio el número de horas de luz por día (el **fotoperiodo**) es mayor en verano que en el invierno. Las

diferencias en la incidencia de los rayos solares en diferentes lugares del planeta provocan que la temperatura sea baja en el invierno, se vaya elevando en la primavera, alcance su nivel máximo en el verano y vaya disminuyendo de nuevo en el otoño.

Además de las condiciones de radiación lumínica y de temperatura, otro factor ambiental que determina los cambios estacionales es el régimen pluvial. Durante el verano, los mares tropicales de cada hemisferio se calientan considerablemente y las masas de aire húmedo se mueven hacia los continentes, iniciando así la época de lluvias. Este fenómeno es más marcado en las regiones intertropicales, donde las lluvias tienen carácter estacional y no es raro que la disponibilidad de agua sea alta durante una temporada, para luego desaparecer casi por completo en el resto del año. Por el contrario, a mayores latitudes (esto es, en las zonas más cercanas a los polos) no se distingue entre una época de lluvias y una de sequía, sino que la estacionalidad se aprecia como la alternancia entre una época muy fría y una más cálida.

El comportamiento fenológico de las comunidades asociado a la estacionalidad climática ha sido muy estudiado. En particular, la activación de algunos procesos suele ser rápida y de gran precisión. Por ejemplo, las selvas tropicales secas, comunidades típicas de la porción centro y sur del litoral mexicano del Pacífico, tienen un aspecto verde y exuberante en la época de lluvias, pero durante la época de sequía, prácticamente todos sus árboles tiran sus hojas (figura 3.11).

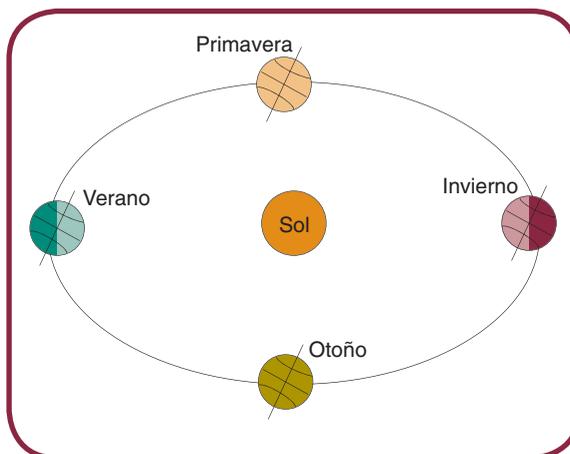


Figura 3.10

La inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano de su órbita y su movimiento de traslación alrededor del Sol dan lugar a las estaciones del año. En la figura se señalan las estaciones correspondientes al hemisferio norte. Recordemos que cuando en el hemisferio norte es verano, en el hemisferio sur es invierno. Durante el otoño del hemisferio norte ocurre la primavera en el sur, al iniciar el invierno del hemisferio norte, inicia el verano en el sur, y durante la primavera del hemisferio norte se presenta el otoño en el hemisferio sur.

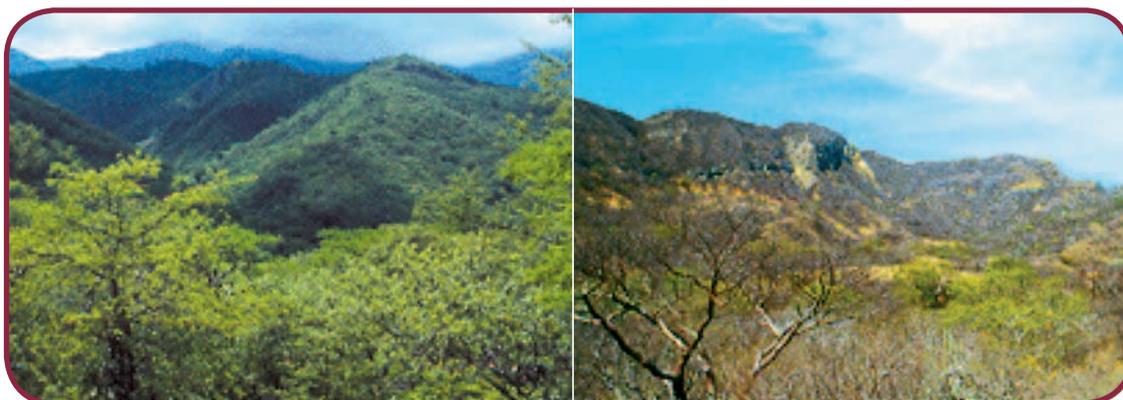


Figura 3.11 Selva baja de la región de San Juan Bautista Jayacatlán, Oaxaca. Se presenta una imagen tomada durante la época de lluvias y otra tomada durante la época de secas.

3.9 Dinámica sucesional de las comunidades

La noción de una naturaleza cambiante ya había sido planteada por filósofos y pensadores de la antigüedad. Sin embargo, a principios del siglo XVIII aún predominaba la idea de que los sistemas biológicos eran invariables, y no fue sino hasta finales del siglo XIX cuando se concibió la idea de que la naturaleza no es inmutable. Esto permitió el surgimiento del concepto de **sucesión ecológica**, término que se refiere a los cambios direccionales (es decir, no cíclicos) en la estructura de las comunidades conforme pasa el tiempo. Se reconoce que Henry C. Cowles fue el pionero en los estudios de la sucesión, aunque fue con el trabajo de Frederic Clements cuando el concepto se afianzó y adquirió importancia central en el estudio de las comunidades ecológicas.

3.9.1 Disturbio y perturbación

Todo proceso de sucesión ecológica se inicia con un **disturbio**, es decir, con un suceso que daña o provoca la muerte de los organismos de una comunidad, dejando espacios abiertos que pueden ser ocupados por nuevos organismos. Las alteraciones en la comunidad que son consecuencia del disturbio se conocen como **perturbaciones**. En muchos textos de ecología se utilizan los términos disturbio y perturbación como sinónimos, lo cual no es muy conveniente porque genera confusión entre la causa (el disturbio) y el efecto (la perturbación).

La variedad de disturbios incluye fenómenos naturales como incendios, huracanes, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas (figura 3.12), entre otros, así como procesos asociados a las actividades humanas (por ejemplo, contaminación, urbanización y extracción de madera, entre otros). A la vez, las perturbaciones se miden a través de las dimensiones del cambio en la estructura de la comunidad, como la disminución en la densidad de árboles después de un huracán.

Los disturbios se clasifican en función de cuatro características que determinan su efecto sobre una comunidad: tipo, intensidad, frecuencia y tamaño del área afectada. Los disturbios poco intensos son muy frecuentes, mientras que los de gran intensidad se presentan más esporádicamente, pues la energía que los mueve requiere de mucho más tiempo para acumularse. El término **catástrofe** se utiliza para referirnos a los disturbios poco frecuentes pero de gran intensidad.

Muchos ecólogos se han preguntado si los disturbios son realmente fenómenos adversos o si pueden considerarse elementos propios de la dinámica de las comunidades biológicas. La respuesta a esta interrogante parece estar en los organismos que viven en cada lugar y sus características, ya que algunos de ellos parecen estar adaptados morfológica o fisiológicamente a los disturbios. Por



Figura 3.12 Fotografía de la erupción de uno de los volcanes activos del Archipiélago de Hawái. Las erupciones volcánicas de lava constituyen una fuente de disturbio a partir del cual inicia un proceso de sucesión primaria.

ejemplo, las comunidades sometidas a fuegos recurrentes suelen contener plantas con adaptaciones particulares, como cortezas gruesas o resistentes al fuego, partes subterráneas bien desarrolladas o capacidad de rebrote después de un incendio. Estos rasgos sugieren que el fuego es un factor ecológico común en esta comunidad, aunque no garantizan la supervivencia de las plantas en caso de un incendio extremadamente intenso (figura 3.13).



Figura 3.13

Cuando los incendios son poco frecuentes, se acumula mucho combustible y entonces son de gran intensidad, por lo que se pueden clasificar como catástrofes (tomada de: <http://www.astro-mia.com/fotostierra/fotos/incendio.jpg>)

3.9.2

Sucesión primaria y sucesión secundaria

Al cesar el disturbio inicia el proceso sucesional. Este punto de partida inicial es muy variable y depende fundamentalmente de qué tan destructivo fue el disturbio. Los ecólogos distinguen dos tipos básicos de sucesión. El primer tipo se conoce como **sucesión primaria** y se presenta cuando el disturbio fue tan intenso que eliminó a todos los elementos vivos del hábitat e hizo desaparecer el suelo. Una erupción volcánica es un buen ejemplo de esta situación (figura 3.12). Por otra parte, el segundo tipo, conocido como **sucesión secundaria**, se lleva a cabo cuando el disturbio no hace desaparecer todos los organismos, además de que el suelo conserva las propiedades necesarias que hacen posible, aunque sea de forma mínima, la vida vegetal.

A lo largo de toda sucesión ecológica, ya sea primaria o secundaria, el desarrollo de la comunidad comprende etapas consecutivas suficientemente diferentes como para poder distinguirlas, llamadas **etapas serales**. Algunas comunidades se encuentran en **etapas serales tempranas**, como la que observó Javier sobre el deslizamiento de tierra en el caso narrado al inicio del capítulo, o las que se establecen sobre la roca basáltica después de una erupción volcánica. Otras comunidades se encuentran en **etapas serales maduras o tardías**, como es el caso de una parcela virgen de la selva tropical o de un bosque de oyameles. Sin embargo, es importante recordar que la sucesión es un proceso continuo, y que la estructura y composición de la comunidad cambian paulatinamente.

Sucesión primaria

La sucesión primaria se define como el cambio unidireccional (no estacional) de los componentes y la estructura de una comunidad, que se inicia después de un disturbio *que suprime todo indicio de vida y de suelo*.

La falta total de suelo en un sitio puede deberse a la acción de disturbios muy fuertes, como los deslizamientos de tierra y las erupciones volcánicas (figura 3.12), aunque las actividades humanas también pueden tener este efecto. Por ejemplo, las actividades agrícolas o forestales realizadas de forma inadecuada originan y aceleran la **erosión**, y terminan por formar ambientes carentes de vida y suelo. Asimismo, la probable desaparición de los glaciares como consecuencia de un aumento de la temperatura en toda la Tierra (véase el capítulo 8) podría crear muchas áreas yermas y sin suelo.

En estos sitios, la sucesión primaria transcurre más o menos de la siguiente forma. En un principio, sobre el sustrato rocoso aparecen **líquenes** y, si el clima es húmedo, se pueden establecer **musgos**,

cuya actividad biológica hace que las rocas se degraden en partículas más finas. La formación de suelo se acelera gracias al acarreo de partículas por el viento. Conforme aumenta la profundidad del suelo, también aumenta la cantidad y la diversidad de las plantas y los animales que forman la comunidad. Después de mucho tiempo, surge una comunidad semejante a la que había antes del disturbio.

La sucesión primaria transcurre con mucha lentitud debido a que la formación de suelo es un proceso natural que requiere de mucho tiempo. Por esta razón, el tiempo que dura un proceso de sucesión primaria abarca siglos o milenios.

Sucesión secundaria

La sucesión secundaria es el proceso de cambio de los componentes y la estructura de una comunidad que se inicia después de un disturbio *que no llega a destruir por completo ni al suelo ni a todos los componentes de la vegetación*. La sucesión secundaria es la que se da, por ejemplo, después de un incendio forestal o una inundación. A diferencia de la sucesión primaria, la sucesión secundaria inicia en un punto mucho más avanzado, es decir, más cercano a la etapa seral madura, y por ello transcurre en tiempos relativamente más cortos.



Figura 3.14

Muchos árboles producen rebrotes, lo cual constituye una parte importante de la regeneración de la vegetación durante un proceso de sucesión secundaria.

La permanencia del suelo hace posible el reestablecimiento de algunas poblaciones de plantas a partir de las semillas que se encuentran en él. Este reservorio de semillas almacenadas en el suelo se conoce como **banco de semillas**, y en él puede estar representada una proporción considerable de las plantas que conforman la comunidad. La regeneración de la vegetación también puede darse a partir de otros restos vegetales como raíces o **tocones** capaces de rebrotar (figura 3.14). Sin embargo, aparentemente la mayoría de las especies llegan al sitio desde otras partes a través de la **dispersión** de sus semillas, ya sea por el viento, el agua o los animales. Algunos estudios han mostrado, por ejemplo, que cuando una parcela abandonada se encuentra muy lejos de las fuentes de semillas, el proceso sucesional es mucho más lento.

3.9.3

Polémicas en torno a la teoría de la sucesión

A pesar de que los ecólogos que estudian las comunidades coinciden en general en que existen diversas fases serales en un proceso sucesional, el estudio de la sucesión no ha estado exento de polémica. Un ejemplo de ello es la discusión que sostuvieron dos grandes ecólogos estadounidenses de la primera mitad del siglo XX, Frederic Clements y Henry Gleason. Clements aseguraba que las comunidades eran comparables a un organismo, de manera que la sucesión podía concebirse como un proceso de desarrollo similar al de un ser vivo durante su ciclo de vida; así, tanto los seres vivos como las comunidades nacen, crecen y llegan a la madurez. Clements dio el nombre de **clímax** a la última etapa seral de este proceso, es decir, al estado de máximo desarrollo posible de una comunidad. Además, su teoría partía del supuesto de que al final de cualquier proceso sucesional existe *un* solo clímax posible, dependiendo de las condiciones climáticas de cada lugar, por lo cual a esta idea se le conoce como la teoría del **monoclímax** (del vocablo griego *monos*, que significa *uno*) (figura 3.15).

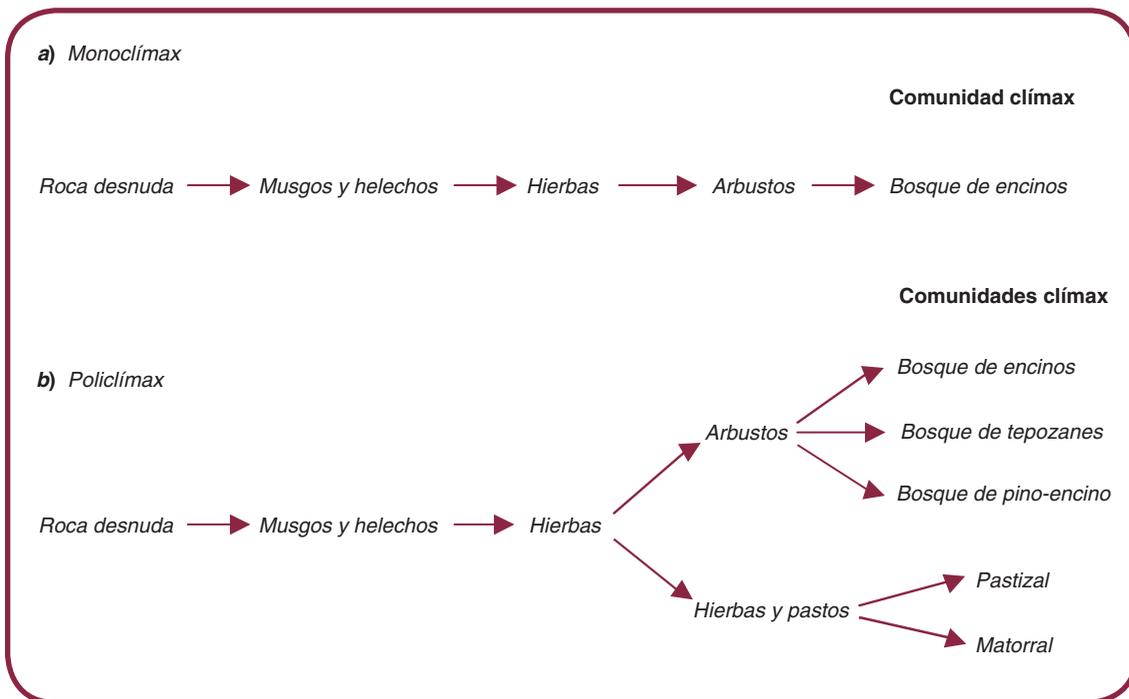


Figura 3.15 Esquema teórico de un proceso sucesional según a) la teoría del monoclímax, y b) la teoría del policlímax.

Por el contrario, Gleason reconocía que el azar desempeña un papel importante en la configuración de la composición y la estructura de las comunidades y, por lo tanto, de las rutas sucesionales. Así, él afirmaba que la sucesión no es predecible ni tiene un desenlace único. A partir de sus ideas, otros ecólogos postularon la teoría de que las comunidades pueden alcanzar al final del proceso sucesional uno de *varios* clímax posibles, por lo que a esta idea se le llamó teoría del **policlímax** (recordemos que *poli* significa *muchos*) (figura 3.15).

Además de esta polémica, también ha habido una fuerte discusión acerca del papel que desempeñan tres diferentes mecanismos que se consideran causantes de los cambios en la composición de especies durante el proceso sucesional: a) la *facilitación*, b) la *tolerancia* y c) la *inhibición*. En los siguientes párrafos veremos brevemente en qué consiste cada uno.

Facilitación

El modelo de *facilitación* postula que ciertos grupos de organismos *facilitan* la entrada de otros organismos a la comunidad durante el proceso sucesional. Al inicio de la sucesión las condiciones ambientales son muy adversas, de manera que sólo se puede establecer un reducido grupo de especies. Estas plantas, conocidas como **pioneras**, crean condiciones ambientales (suelo, nutrientes y sombra, entre otras) más benignas, en las que pueden prosperar ciertas especies con menor tolerancia. Es interesante hacer notar que estas nuevas condiciones suelen ser adversas para las especies establecidas inicialmente, por lo cual van desapareciendo hasta extinguirse en esa área. El proceso se repite con el segundo grupo de especies y así sucesivamente. En otras palabras, este modelo postula que la sucesión puede verse como una secuencia de colonizaciones y extinciones locales de muchas especies a través del tiempo.

Tolerancia

La base del modelo de tolerancia es que las especies dominantes en las etapas serales avanzadas se establecen desde el inicio de la sucesión. Estas especies permanecen como individuos jóvenes durante las etapas tempranas de la sucesión porque *toleran* la presencia de las especies pioneras, a las que después eliminan por **exclusión competitiva** (véase el capítulo 2). Una implicación importante de este modelo es que el rumbo de la sucesión está marcado desde el principio del proceso.

Inhibición

En contraste con el modelo de facilitación, el modelo de inhibición sostiene que las plantas que se establecen inicialmente modifican las condiciones ambientales de forma tal que *inhiben* la entrada de nuevos colonizadores. Las plantas pioneras sólo llegan a ser reemplazadas al morir, dejando espacios disponibles para otras plantas. Se conocen casos extremos de la operación del mecanismo de inhibición, en los que la sucesión se detiene; por esa razón, el fenómeno se conoce como *sucesión detenida*.



3.9.4

Aplicación de la teoría sucesional a la restauración ecológica

El estudio de la sucesión tiene gran relevancia en virtud de la necesidad de restaurar zonas afectadas por las actividades humanas. La **restauración ecológica** es la serie de acciones encaminadas a recuperar total o parcialmente la estructura y el funcionamiento de una comunidad deteriorada. A pesar de que con frecuencia se abandonan terrenos que fueron utilizados para actividades de las industrias agrícola, minera o ganadera, su recuperación suele ser lenta, sobre todo si el deterioro fue considerable. Por ello, sería deseable que la recuperación avanzara tan rápidamente como fuera posible, pues esto permitiría recobrar la estructura y el funcionamiento de las comunidades, e incluso hacer un nuevo aprovechamiento racional de ellas.

Los biólogos que se dedican a la restauración ecológica intentan aprender a controlar y acelerar el curso de la sucesión a través de la ejecución de una gran variedad de acciones, tales como detener la fuente de disturbio, extraer materiales contaminantes o ajenos a la comunidad, introducir plantas y animales, y modificar las condiciones para facilitar el establecimiento de organismos nativos. Esta actividad exigirá la participación de muchos ecólogos durante el siglo XXI, como lo veremos en detalle en el capítulo 9, sección 9.2.4. Ojalá que tú te incluyas entre ellos.



Para reflexionar...

1. ¿Qué pasaría si el terreno que ocupa tu escuela quedara abandonado durante 10, 100 o 1 000 años? ¿Dónde se presentarían los cambios más rápidos, en el patio, en los jardines o en el interior de los salones?
2. ¿Por qué será que distintas especies de plantas de una misma comunidad florecen en diferentes momentos del año?
3. Camina por la zona natural más cercana a tu casa. Reflexiona sobre cuántas comunidades puedes ver. ¿Son claros sus límites?
4. De los biomas que aparecen en el cuadro 3.1, ¿cuáles conoces?, ¿qué animales has visto en ellos?, ¿qué relación habrá entre estos animales y las plantas que observaste?



Actividades complementarias

1. En los alrededores de tu escuela o tu casa, busca un sitio que contenga un sistema formado por seres vivos. Considéralo como una comunidad ecológica y redacta una lista de las especies que la conforman (utiliza sus nombres comunes, o si no los conoces, asígnales un nombre según sus rasgos). Para ello, utiliza una concepción totalizadora de la comunidad, es decir, no la divides en subcomunidades de grupos específicos. Al terminar, especula sobre cuántas especies posiblemente falten en tu lista. ¿Por qué no las detectaste?
2. Investiga las temporadas en las que fructifican las plantas que producen tres tipos de frutas que se encuentran disponibles en el mercado de tu localidad. ¿Qué relación tienen las condiciones del año en las que se producen estas frutas con la fenología de esas especies?
3. Juan, Raúl y José son jóvenes que viven en ranchos donde se crían animales de granja. ¿Qué rancho presenta mayor diversidad y riqueza específica de animales según la siguiente tabla? Usa alguno de los índices de diversidad que se presentan en el recuadro 3.1, "Índices de diversidad y dominancia".

	Rancho de Juan	Rancho de Raúl	Rancho de José
Vacas	3	10	19
Borregos	4	5	17
Chivos	2	2	15
Cerdos	4	1	12
Guajolotes	3	1	0
Gallinas	4	1	0

4. Coloca flores en un recipiente con agua limpia. Cada semana, durante cuatro semanas, toma tres gotas de agua, teniendo cuidado de extraer una de la parte superior del recipiente, otra de la parte intermedia y una más del fondo (¡no mezcles el agua!). Coloca las gotas en sendos portaobjetos y revísalas al microscopio. Repite la operación durante tres o cuatro semanas. ¿Cuántas especies de microorganismos observaste cada semana? ¿La comunidad de microorganismos es diferente dependiendo de la profundidad? ¿Qué relación tienen tus resultados con la sucesión ecológica y con la estructura vertical de las comunidades?

● CAPÍTULO 4 ●

Los ecosistemas y la biosfera

4.1 Para la imaginación

Cuando Roberto era niño, su abuelita, una anciana bonachona, festejaba el día de la Candelaria preparando unos sabrosos tamales de maíz. Ella cocinaba los tamales a la antigua. Ponía leña de mezquite para hacer una fogata. Una vez hechos los tamales, de la leña de mezquite sólo quedaban las cenizas. A Beto le intrigaba dónde había ido a parar el resto de los materiales que conformaban la leña. Meses después, para el día de muertos, su abuelita preparó dulce de calabaza. Beto se fijó en lo que pasaba con la leña y vio el humo que despedía el mezquite junto con las llamas. Pensó que los materiales de la leña se desprendían en ese aromático humo y en las cenizas que dejaba el fogón. Su abuela colocaba las cenizas entre sus macetas de hierbabuena, ruda y chile. A Beto le fascinó la idea de que los materiales del mezquite se incorporaran a los chiles con los que su abuelita preparaba sus deliciosas salsas, que él comía con deleite. Beto pensó que ese humo también podría ser absorbido por las plantas de alguna manera. Sin embargo, le intrigaban varias cosas: ¿qué pasa con los materiales cuando se someten a un proceso de combustión?, ¿cómo pasan los componentes de la leña a las plantas?, ¿los materiales vegetales pueden degradarse de una forma que no incluya el fuego? Si Beto estudiara el funcionamiento de los ecosistemas, hallaría respuestas a estas preguntas.

4.2

Definición y propiedades emergentes de los ecosistemas

Un **ecosistema** es la suma de los elementos vivos y no vivos de un lugar particular del planeta. Este vocablo fue acuñado por el ecólogo inglés Arthur C. Tansley en 1935, quien distinguió los elementos vivos (o **bióticos**) del ecosistema (es decir, plantas, animales, hongos, bacterias y protistas) de los elementos no vivos (o **abióticos**), que comprenden las rocas, el aire, las sales minerales y el agua.

Como sugiere la palabra, un ecosistema es un **sistema**, es decir, un conjunto de elementos que interactúan dentro de un espacio tridimensional. Los sistemas pueden ser **abiertos** o **cerrados**, de acuerdo con la posibilidad de que sus componentes entren o salgan. En este contexto, un ecosistema se concibe como un sistema abierto formado por el conjunto de las **comunidades** vivas y los elementos abióticos de un lugar dentro del cual ocurren movimientos de materia y energía (figura 4.1). Estos componentes también pueden entrar y salir del ecosistema. Como ejemplos de ecosistemas podemos mencionar un lago, una cueva, una porción del Mar Caribe, así como una parcela de cultivo o incluso una ciudad. El ecosistema más grande que podemos concebir es la **biosfera**, la cual aglutina a todos los elementos bióticos y abióticos del planeta.

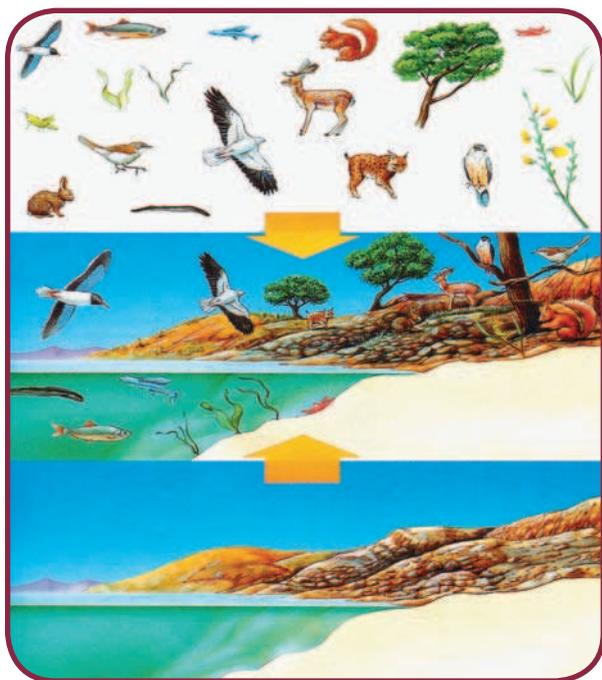


Figura 4.1

La definición de ecosistema integra los componentes bióticos y abióticos de un lugar particular. En la parte inferior de la figura están ilustrados los componentes abióticos y en la parte superior sólo los elementos bióticos. En el centro se ilustra un ecosistema que incorpora ambos componentes.

Algunas personas confunden el concepto de comunidad con el de ecosistema. La diferencia esencial entre ambos radica en que, mientras que el concepto de comunidad sólo incluye elementos bióticos de la naturaleza, el de ecosistema integra también sus componentes abióticos (figura 4.1).

Los ecosistemas, al igual que las comunidades y las poblaciones que revisamos en los capítulos anteriores, también tienen **propiedades emergentes** particulares, que son las siguientes:

- *Productividad primaria.* Es la velocidad (o tasa) de fijación de materia y energía por parte de los **productores primarios**, es decir, los organismos **autótrofos**, entre los que se encuentran los organismos fotosintéticos (plantas, algas y algunas bacterias) y quimiosintéticos (ciertas bacterias).
- *Productividad secundaria.* Es la tasa de fijación de materia o energía por parte de los organismos **heterótrofos**, es decir, todos aquellos que tienen que alimentarse de materia elaborada por otros organismos. Ejemplos de organismos heterótrofos son los protozoarios, los animales y los hongos.

- *Velocidad y patrón de movimiento de la materia.* Es la rapidez y la ruta que siguen los elementos y compuestos químicos (como el agua y el nitrógeno, entre otros) dentro del ecosistema y a través de la biosfera.
- *Velocidad y patrón de movimiento de la energía.* Es la rapidez y la ruta que sigue la energía a través de los componentes del ecosistema.
- *Estructura trófica.* Se refiere a la manera en la que se organizan los organismos en un ecosistema de acuerdo con el tipo de alimento que consumen, es decir, de qué forma se alimentan unos de otros. La estructura trófica de un ecosistema tiene ciertas características. Las más importantes son el número de **niveles tróficos** (es decir, el número de veces que la energía o materia pasa de un organismo a otro) y el nivel de **conectancia** de la **red trófica** (esto es, el número de enlaces alimentarios entre las especies).
- *Tasa de descomposición.* Es la velocidad a la cual los materiales producidos por los organismos (cadáveres, hojarasca, heces, etcétera) se desintegran para formar fracciones más pequeñas y compuestos químicos más sencillos.
- *Eficiencias ecológicas.* Las eficiencias ecológicas de un ecosistema se refieren a la eficacia con la que la energía se transfiere de un nivel trófico al siguiente y la eficacia con la que se consume. La *eficiencia de transferencia* es el porcentaje de la energía que se produce en un nivel trófico y que se consume en el siguiente, en tanto que la *eficiencia de uso* es la forma en la que esa energía se destina a la asimilación y a la formación de tejidos.
- *Biomasa en pie.* Es la cantidad de materia por unidad de área que se almacena en los seres vivos de un ecosistema.
- *Especies clave.* Son las especies que tienen una influencia muy marcada sobre los patrones de movimiento de materia y energía en un ecosistema. Un ejemplo de especie clave es la estrella de mar (*Pisaster ochraceous*) de las zonas costeras del Pacífico de América del Norte (figura 4.2). Estas estrellas de mar son **depredadores tope** que se alimentan de varias especies de presas, reduciendo la competencia entre ellas e incrementando la diversidad de la comunidad.



Figura 4.2

La estrella de mar (*Pisaster ochraceous*) constituye una especie clave en las costas rocosas de América del Norte. Estos depredadores tienen una gran influencia sobre la red trófica por actividades depredadoras sobre muchos animales invertebrados que compiten entre sí. En su ausencia, una comunidad de 15 especies de animales puede reducirse a sólo ocho (tomada por: Dave Cowles, en http://rosario.wvc.edu/inverts/Echinodermata/Class%20Asteroidea/Pisaster_ochraceus.html).

El planteamiento del concepto de ecosistema constituyó un gran avance del pensamiento ecológico, ya que reconoce la *complejidad* de la naturaleza incorporando las actividades del ser humano. De hecho, los ecosistemas constituyen la *base* de la existencia humana, ya que proveen materias primas y condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de las sociedades humanas. Además, este concepto permite reconocer las *conexiones* que existen entre componentes y fenómenos que pueden estar separados en el espacio o en el tiempo.

Otro gran logro del concepto de ecosistema es que se enfoca en una unidad de la naturaleza que es bastante real, pues sus elementos presentan una cierta cohesión entre sí a través del intercambio de materia y energía. La materia y la energía presentan diferencias en la forma en que se mueven a través de un ecosistema. La materia puede moverse en forma de *ciclos* potencialmente infinitos a través de un ecosistema particular, entre ecosistemas o en toda la biosfera, mientras que la energía pasa *una sola vez* por el ecosistema y no regresa a su origen (que generalmente es el Sol). Por ejemplo, un átomo de carbono o de plomo y una molécula de agua o de nitrógeno se reciclan muchas veces; en contraste, la energía del Sol, capturada en los tejidos de las plantas gracias a la **fotosíntesis**, se disipa al pasar de un organismo a otro mediante la producción de calor emitida durante la respiración de todos los organismos implicados (figura 4.3). En conclusión, la materia se mueve en *ciclos*, mientras que la energía lo hace en un *flujo* unidireccional; sin embargo, ambos procesos están íntimamente vinculados.

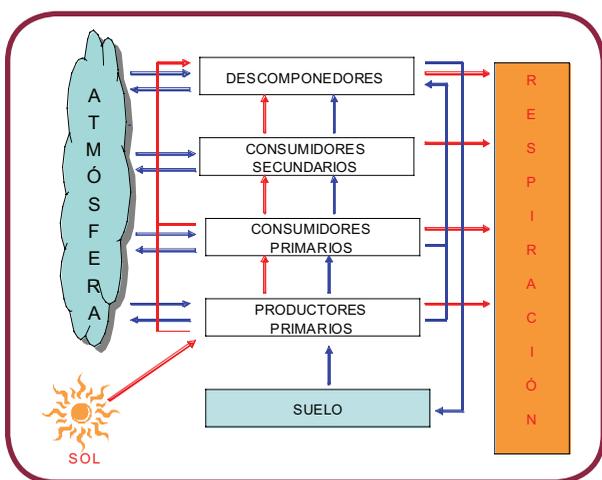


Figura 4.3

Esquema del movimiento de materia y energía en un ecosistema terrestre. Se observa que mientras la materia (flechas azules) se mueve a través de ciclos, la energía (flechas rojas) fluye una sola vez a través del ecosistema.

4.3 El flujo de energía

La **energía** se define como la capacidad de efectuar trabajo y puede ser de varios tipos: calorífica (como la que emana del gas que se quema en una estufa), química (la que está almacenada en los enlaces químicos de los compuestos) o lumínica (como la que irradia el Sol), entre otras.

La energía se mide en **calorías** o **julios**. Una caloría (que se abrevia cal) se define como la cantidad de energía que se requiere para que la temperatura de un gramo de agua aumente de 14.5 a 15.5°C. Por su parte, un julio (o **joule**, que se abrevia J) es la energía necesaria para levantar una masa de 1 gramo a 1 cm de altura contra la fuerza de gravedad de la Tierra. Una caloría equivale a 4.184 J, por lo que 1 J = 0.239 cal. Los ecólogos miden la energía en kilocalorías (1 kcal = 1000 cal) o en kilojulios (1 kJ = 1000 J). En general, los materiales vivos contienen entre 2.0 y 6.0 kcal/g (de 10 a 20 kJ por g; cuadro 4.1).

Los ecosistemas están sujetos a las leyes de la termodinámica. La **termodinámica** es la ciencia que estudia los procesos relacionados con el intercambio de calor. Esta ciencia se basa en dos conocidas leyes físicas. Una de ellas, la *primera ley de la termodinámica*, establece que la energía no se crea ni se destruye, sino sólo se transforma. La *segunda ley de la termodinámica*, por su parte, sostiene que las transformaciones de energía de un tipo a otro nunca tienen una eficiencia de 100%. La fotosíntesis y la respiración ejemplifican estos principios, como veremos a continuación.

Cuadro 4.1 Contenido de energía en diversos materiales.

Material	kJ/g	kcal/g
Aceite vegetal	38.0	9.0
Arroz (semillas)	14.3	3.4
Chocolate confitado	21.4	5.1
Hojas de fresno	20.1	4.8
Hojuelas de maíz azucaradas	16.8	4.0
Frijol (semillas)	13.9	3.3
Leche entera de vaca	2.4	0.6
Leña de tepozán (<i>Buddleia cordata</i>)	18.9	4.5
Nopalitos (<i>Opuntia</i> sp.)	11.1	2.6
Saltamontes machos	22.9	5.5

4.3.1 Fotosíntesis

Los organismos **autótrofos** (véase la sección 4.3.3) pueden ser quimiosintéticos o fotosintéticos. La **quimiosíntesis** es el proceso por el cual algunos microorganismos obtienen energía a partir de los enlaces químicos de los compuestos ricos en hidrógeno presentes en algunos minerales de las rocas. La quimiosíntesis se presenta sobre todo entre las bacterias que viven en las **ventilas hidrotermales** del fondo de los océanos, o bien, en algunas cuevas. Este proceso no es muy importante en términos de la cantidad de energía que aporta a la biosfera, pues representa solamente 0.1% del total.

La **fotosíntesis** consiste en la fijación de la energía lumínica proveniente del Sol mediante la síntesis de compuestos orgánicos elaborados a partir de dióxido de carbono y una sustancia donadora de hidrógeno (generalmente agua; véase el recuadro 1.2, “La fotosíntesis y los distintos metabolismos fotosintéticos”, en el capítulo 1). Este proceso se presenta en todas las plantas, las algas y muchos otros microorganismos que contienen pigmentos fotosintéticos (como la clorofila). De hecho, representa el mecanismo más extendido de fijación de energía en el planeta, pues aporta 99.9% de la energía que ingresa a la biosfera.

La fijación de energía en enlaces químicos (en moléculas de glucosa) es poco eficiente, ya que del total de la energía proveniente del Sol que incide en un ecosistema terrestre, sólo 1.3% se aprovecha por parte de las plantas, almacenándose en enlaces químicos (figura 4.4). La mayor parte de la energía solar que recibe el ecosistema se refleja o se disipa en forma de calor.

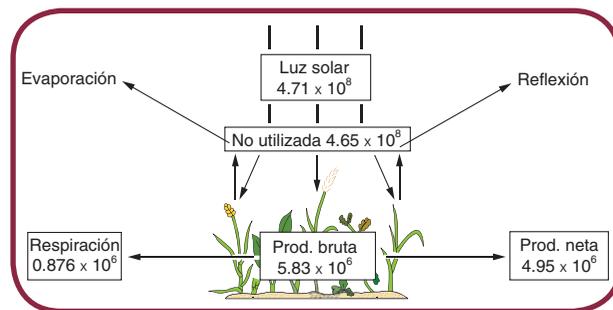


Figura 4.4

Destino de la luz solar que incide sobre un ecosistema terrestre. Las plantas aprovechan sólo una pequeña fracción de la energía solar. Medidas dadas en calorías por m² por año.

4.3.2 Respiración

La respiración constituye un proceso fisiológico inverso al de la fotosíntesis; consiste en la absorción de oxígeno con la finalidad de oxidar moléculas ricas en hidrógeno (glucosa y otras sustancias contenidas en los alimentos). Durante este proceso se libera la energía necesaria para mantener las funciones orgánicas y se desecha CO_2 y agua. A excepción de las bacterias anaerobias obligadas, todos los organismos realizan este proceso.

Los organismos aerobios respiran a través de un proceso llamado **glucólisis**, durante el cual se libera la energía química almacenada en la glucosa. Esta reacción libera 646 kcal por cada mol de glucosa (esto es, 180 gramos). La energía liberada durante la glucólisis permite que las células de los organismos funcionen, esto es, que se muevan y mantengan sus reacciones enzimáticas. Durante esos procesos gran parte de la energía química se disipa en forma de calor.

4.3.3 Producción y productividad

Los **productores primarios** son organismos que sintetizan sus propios alimentos a través de la fotosíntesis o la quimiosíntesis, por lo cual también se les conoce como **autótrofos** (de los vocablos *auto*, propio, y *trofos*, alimentación); tal es el caso de las plantas, las algas y las bacterias quimiosintéticas. Por otro lado, los **consumidores** son los organismos que necesitan alimentarse de otros seres vivos para sobrevivir. Ejemplos de organismos consumidores son los hongos, los animales y los protozoarios no fotosintéticos. A estos organismos también se les conoce como **heterótrofos** (del vocablo *hetero*, distinto). Otra forma de designar a los organismos consumidores o heterótrofos es con el término de **productores secundarios** porque también producen tejidos, aunque ellos lo hacen a partir de la asimilación de los nutrientes presentes en sus alimentos.

En un ecosistema existe una cierta cantidad de materia viva presente en un momento dado, que se conoce como **biomasa en pie**, la cual puede medirse también en términos de energía, puesto que la materia está formada por enlaces químicos que contienen energía. Esta biomasa en pie, a la vez, forma nuevos tejidos de manera constante. En el caso de los productores primarios, la producción de biomasa es el resultado de la fotosíntesis y la quimiosíntesis; mientras que en el caso de los productores secundarios, se da como consecuencia del consumo de alimentos. Así, la **producción** de un ecosistema es la cantidad de materia o energía acumulada por unidad de área en los tejidos elaborados por los seres vivos en determinado periodo. Por ejemplo, la producción de tejidos vegetales en un bosque de pino a lo largo de un año es de 1.3 kg/m^2 ; mientras que la producción de energía contenida en tejidos nuevos de una población de elefantes en una sabana africana es de 747 kcal/m^2 acumuladas en un año.

Un concepto estrechamente relacionado con el de producción de un ecosistema es el de **productividad**. Este último se refiere a la *velocidad* a la cual se acumula la materia o la energía en los tejidos producidos por los organismos. Por ser una medida de velocidad (es decir, una tasa), la productividad se mide en unidades de masa o energía por unidad de superficie *por unidad de tiempo*. Por ejemplo, un pastizal natural en Durango tiene una productividad de $600 \text{ g/m}^2/\text{año}$, mientras que una población de chapulines en el Pedregal de San Ángel (Distrito Federal) muestra una productividad de $24 \text{ kJ/m}^2/\text{año}$. La relación entre biomasa en pie, producción y productividad se explica con mayor detalle en el recuadro 4.1, “Biomasa, producción y productividad”.

Recuadro 4.1

Biomasa, producción y productividad

La materia viva almacenada en un ecosistema se conoce como **biomasa en pie**. En la figura 4.5 se muestra la biomasa en pie en un ecosistema en dos momentos distintos. En este ecosistema la biomasa en pie se incrementa en el lapso transcurrido entre el tiempo 1 y 2. La biomasa que se acumula en este lapso denota la producción (señalada en color verde oscuro). La inclinación de la línea roja, por su parte, indica la velocidad a la cual la biomasa se acumuló en ese lapso; si la línea está poco inclinada la productividad es baja, pero si se inclina mucho, entonces se indica un valor alto de productividad. La **producción** es la *cantidad* de materia o energía acumulada por unidad de área en los organismos en el lapso señalado, en tanto que la **productividad** indica la *velocidad* a la cual se acumula la materia o la energía en los tejidos de los organismos. Como la biomasa contiene energía, tanto la producción como la productividad pueden medirse también en términos de energía. La figura no indica la posibilidad de que en un ecosistema cierta cantidad de biomasa en pie abandone los tejidos de los organismos como consecuencia de la muerte y descomposición de la materia viva, así como por los gases (CO_2 y vapor de agua) emitidos durante la respiración (véase la figura 4.3).

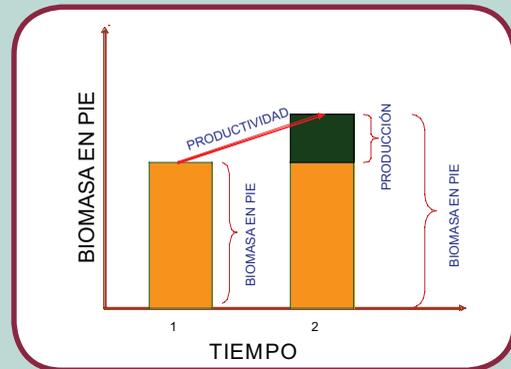


Figura 4.5 Biomasa en pie en un ecosistema en dos momentos distintos con la producción y la productividad.

Productividad primaria

La tasa o velocidad a la que los organismos autótrofos fijan energía y materia se denomina **productividad primaria**. Los productores primarios utilizan la energía que fijan para dos procesos: 1) el metabolismo (básicamente la respiración) y 2) el crecimiento (a través de la producción de tejidos nuevos). La cantidad total de energía o materia fijada que se utiliza para estos dos procesos se conoce como **productividad primaria bruta** (que se abrevia *PPB*), en tanto que la fracción destinada únicamente para el crecimiento de los productores primarios (que se lleva a cabo a través de la producción de nuevos tejidos) es la **productividad primaria neta** (que se abrevia *PPN*). La *PPN* se calcula de la siguiente manera:

$$PPN = PPB - \text{Respiración vegetal}$$

La productividad primaria neta es una variable de suma importancia, ya que representa la velocidad a la que se produce la energía alimenticia con la que cuentan los organismos heterótrofos —incluido el hombre— para su sostén. La *PPN* varía entre los diferentes ecosistemas naturales desde 0 (en las dunas desérticas de arena y en los casquetes polares) hasta $4 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ en los arrecifes de coral (cuadro 4.2). En contraste, en algunos ecosistemas manejados por el hombre, se han llegado a alcanzar niveles de *PPN* de hasta $9.4 \text{ kg/m}^2/\text{año}$ (en un cultivo de caña de azúcar en Indonesia) gracias al uso de tecnología agrícola como riego y fertilizantes.

Cuadro 4.2 Productividad primaria neta (g por m² por año) en algunos ecosistemas del mundo.

Ecosistema	PPN (g por m ² por año)	
	intervalo	promedio
Arrecife	500-4,000	2,500
Selva tropical	1,000-3,500	2,200
Bosque templado	600-2,500	1,300
Matorral	250-1,200	700
Pastizal	200-1,500	600
Mar abierto	2-400	125
Desierto	10-250	90

Los factores que afectan la productividad primaria neta de los ecosistemas terrestres son los siguientes:

Radiación solar. La fotosíntesis no puede llevarse a cabo en ausencia de una fuente de energía lumínica. Por ello, la calidad y la cantidad de radiación solar que reciben las plantas de un ecosistema es uno de los principales determinantes de su *PPN*.

Temperatura del aire. Puesto que las temperaturas relativamente elevadas estimulan el crecimiento de las plantas, en general, los ecosistemas que se encuentran en zonas cálidas presentan una mayor *PPN* que los de zonas frías.

Nutrientes minerales. Para crecer, las plantas requieren nutrientes minerales que absorben del suelo. El nitrógeno y el fósforo son dos de los más importantes, aunque también necesitan potasio, cloro, azufre, sodio y magnesio, entre otros.

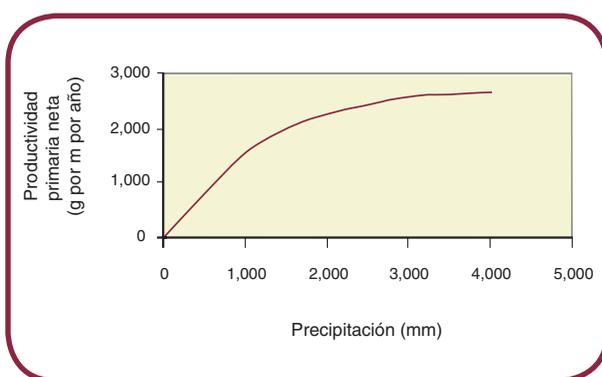


Figura 4.6

La precipitación pluvial anual tiene un efecto muy marcado sobre la productividad primaria neta de los ecosistemas terrestres. Observa cómo al aumentar la precipitación, la productividad primaria neta parece alcanzar un límite.

Agua. El agua es indispensable para la vida. La mayor parte del agua que utilizan las plantas para llevar a cabo la fotosíntesis proviene de la lluvia; por ello, existe una relación directa entre la **precipitación pluvial** y la *PPN* de los ecosistemas terrestres (figura 4.6). Otra fracción del agua que pueden capturar las plantas proviene de los ríos, la neblina, la nieve y el rocío.

Por otra parte, los factores que afectan la *PPN* en los ecosistemas acuáticos son los siguientes:

Profundidad del agua. El agua absorbe cierta proporción de la radiación solar, de tal manera que a medida que aumenta la profundidad, disminuye notablemente la disponibilidad de luz (véase la figura 1.9,

en el capítulo 1). Por eso, los organismos fotosintéticos acuáticos (fitoplancton) viven cerca de la superficie.

Distancia a la costa o a la orilla. La *PPN* es mayor en las zonas cercanas a las costas (en el caso de los mares) o las orillas (en el caso de los lagos), pues en éstas hay una mayor concentración de nutrientes provenientes de los ríos que desembocan en los cuerpos de agua.

Surgencias. La **surgencia** es la emergencia de masas de agua fría provenientes del fondo del mar hacia la superficie; éstas aumentan la *PPN* porque contienen una gran cantidad de nutrientes. Las surgencias se presentan en las costas occidentales de los continentes, en donde los vientos procedentes de la tierra empujan el agua superficial hacia el oeste, lo que a la vez favorece el movimiento del agua del fondo del mar hacia arriba y convierte estas costas en regiones muy productivas (como las costas de Perú, Chile y Baja California).

Disponibilidad de nutrientes. Como se desprende de los dos factores anteriores, la presencia de nutrientes aumenta la *PPN* de los ecosistemas acuáticos, pues las algas y el fitoplancton requieren de nutrientes minerales para llevar a cabo la fotosíntesis. En estos ecosistemas los nutrientes más importantes son el nitrógeno, el fósforo y el hierro.

Otros factores de menor importancia que afectan la *PPN* son:

Concentración de CO₂. A pesar de que el CO₂ se encuentra en bajas concentraciones en la atmósfera terrestre, en el último siglo se ha incrementado su concentración, de 0.028% a mediados del siglo XIX a 0.035% en 1985, lo cual podría llevar a un incremento global de la *PPN*.

Duración del follaje en las plantas. Los ecosistemas dominados por árboles **caducifolios** (que pierden sus hojas en la temporada seca o fría) tienen una *PPN* más baja que los dominados por árboles **perennifolios** (que no pierden sus hojas en ninguna estación del año).

Tipo de metabolismo fotosintético. Los ecosistemas dominados por plantas C₄ presentan una *PPN* alta en comparación con los dominados por plantas C₃ o CAM, pues las primeras tienen una tasa fotosintética mayor.

Herbivoría. A niveles intermedios de herbivoría el crecimiento de las plantas se ve estimulado ligeramente, favoreciendo un incremento de la *PPN* (figura 4.7).

Como dos de los factores más importantes que afectan la *PPN* son la precipitación y la temperatura, es posible observar patrones geográficos en la *PPN* de los ecosistemas terrestres. En regiones ubicadas cerca del ecuador la *PPN* es más alta que a mayores latitudes. De manera análoga, en tierras bajas la *PPN* es mayor que en tierras altas.

Productividad secundaria

La **productividad secundaria** es la velocidad a la que los organismos heterótrofos producen nuevos tejidos a partir de la materia y la energía que obtienen de sus alimentos. En la figura 4.8 se indican

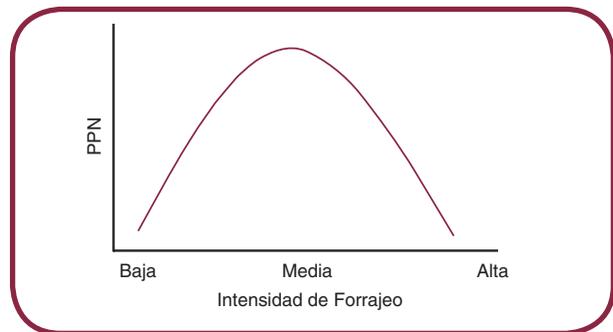
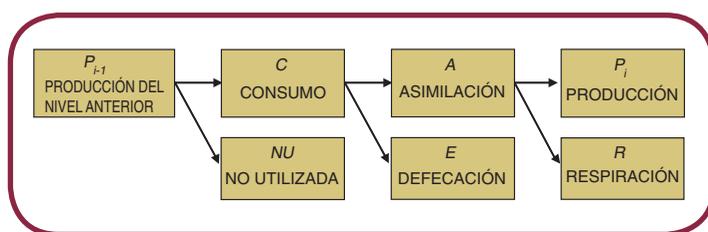


Figura 4.7

La productividad primaria neta se ve afectada por las actividades de remoción de tejidos de los herbívoros. A niveles intermedios de forrajeo la productividad primaria alcanza sus valores máximos.


Figura 4.8

Ruta que sigue la energía a través de los organismos consumidores. De la biomasa que se produce en un nivel trófico, sólo una fracción se convierte en producción en el siguiente nivel trófico, ya que parte de la energía se pierde en el proceso.

las rutas que sigue la energía que los consumidores obtienen de sus alimentos, desde que ésta entra a su cuerpo. La energía disponible en el nivel trófico anterior (que denotamos con el subíndice $i - 1$) representa la producción —ya sea primaria o secundaria— de esos organismos (P_{i-1}). De ésta, una fracción es ingerida (C) por los consumidores, mientras que la restante no es utilizada (NU). A la vez, la energía consumida tiene dos posibles destinos: se asimila o se excreta. La energía asimilada

(A) es la que el consumidor absorbe durante la digestión, en tanto que la energía excretada (E) es la que desecha en forma de heces y orina. Por su parte, la energía asimilada se dirige hacia uno de dos procesos: la respiración o la producción de tejidos nuevos. La energía acumulada en los tejidos nuevos corresponde a la **producción secundaria** (P_i). La energía que se utiliza para la respiración (R) se destina al mantenimiento de los tejidos y a la actividad de los organismos móviles, la cual se disipa finalmente en forma de calor.

4.3.4 Estructura trófica

La estructura trófica es un atributo ecosistémico que se refiere a la forma en la que se organizan los organismos en un ecosistema, de acuerdo con el tipo de alimento que consumen. Los rasgos centrales de la estructura trófica son el número de **niveles tróficos** y la **conectancia** de la **red alimentaria**.

Niveles tróficos y cadenas alimentarias

La energía almacenada en los tejidos de los productores primarios constituye la base para alimentar a todos los organismos heterótrofos. Así, el nivel trófico 1 corresponde a los productores primarios. Todos los organismos que se alimentan de plantas o de otros organismos fotosintéticos son los **consumidores primarios** y representan el nivel trófico 2, en el cual se ubican los herbívoros. Los carnívoros, que se alimentan de animales herbívoros, representan el nivel trófico 3 y constituyen el grupo de los **consumidores secundarios**. Continuando con esta misma lógica, se distinguen organismos que ocupan los niveles tróficos 4 y 5, que se consideran consumidores de tercer y cuarto grados respectivamente. Sin embargo, las cadenas tróficas son más bien cortas, en virtud de las restricciones que se describen en el recuadro 4.2, “¿Por qué son tan cortas las cadenas tróficas?”.

Algunos organismos consumen más de un tipo de alimento. Por ejemplo, hay animales que consumen tanto plantas como otros animales, lo cual significa que ocupan más de un nivel trófico. Por lo tanto, un nivel trófico no representa la posición que ocupa un organismo, sino una de sus posibles actividades alimentarias en la **cadena trófica**.

Recuadro 4.2

¿Por qué son tan cortas las cadenas tróficas?

El número de niveles tróficos de un ecosistema no es infinito, sino que tiene límites (de uno a cinco niveles en ecosistemas reales) por las razones que se exponen a continuación:

a) *La productividad primaria neta tiene límites.* La base de la pirámide trófica, como la de un edificio, determina su altura. Si la base (esto es, la productividad primaria neta) no se ensancha, el número de niveles tróficos no crece. En la actualidad se sabe que un ecosistema difícilmente puede alcanzar una PPN mayor a $10 \text{ kg/m}^2/\text{año}$.

b) *Las eficiencias de transferencia trófica son bajas.* Estas eficiencias están por debajo del 25% (con un promedio del 10%), lo cual significa que la producción de cada nivel trófico será *al menos* un 75% más baja que la del nivel anterior.

c) *Límites físicos en el tamaño corporal de los depredadores.* Como resultado de la evolución, los depredadores han alcanzado tallas corporales superiores a las de sus presas; de esta forma, cobra vigencia el refrán de que “el pez grande se come al chico”. Sin embargo, hay leyes físicas que impiden que haya organismos demasiado grandes, ya que tendrían serios problemas fisiológicos para respirar y sostener su gran peso contra la fuerza de gravedad. En este sentido, no habría podido existir un animal de mayor tamaño que el terrible *Tyrannosaurus rex* para convertirse en su depredador. Una alternativa evolutiva que reduce la importancia de este argumento es el hecho de que algunos depredadores de pequeño tamaño pueden cazar grandes presas mediante la cooperación en grupo.

d) *El tipo de ambiente.* En relación con lo anterior, en ambientes acuáticos viven animales de gran tamaño, gracias a las virtudes de flotabilidad del agua que no se encuentran en ambientes terrestres. Esto explica por qué en ambientes acuáticos es más frecuente encontrar un mayor número de niveles tróficos que en ambientes terrestres. Asimismo, en el ambiente acuático los organismos fotosintéticos del **fitoplancton** son de pequeño tamaño, puesto que los tejidos de sostén del tallo no son necesarios en estos ecosistemas. Como los productores primarios son de pequeño tamaño, sus consumidores primarios (el **zooplancton**) también son relativamente pequeños. Esto permite la presencia de consumidores secundarios (los peces **zooplanctívoros**) y de consumidores terciarios (peces **piscívoros**), sin que estos últimos tengan problemas físicos por su tamaño.

e) *La alta probabilidad de que desaparezcan poblaciones de niveles tróficos superiores.* Al modelar matemáticamente el comportamiento numérico de una especie de depredador y de su presa, se obtienen oscilaciones poblacionales de las dos especies implicadas. Si se añaden otras poblaciones pertenecientes a niveles tróficos superiores, aumenta la probabilidad de que alguna de las poblaciones se extinga como producto de esas oscilaciones.

f) *El tamaño del ecosistema.* Ciertos ecosistemas presentan límites bien definidos. Tal es el caso de las islas, las cuevas y los lagos, entre muchos otros. Se sabe que cuanto más grande es un hábitat, mayor será el número de especies que albergue y, por ende, mayor será la complejidad de las redes tróficas. De lo anterior se intuye que un factor que puede limitar la longitud de las cadenas tróficas es precisamente el tamaño del ecosistema. Así, cuanto más grande sea un ecosistema, mayores serán sus posibilidades de sostener un mayor número de niveles tróficos.

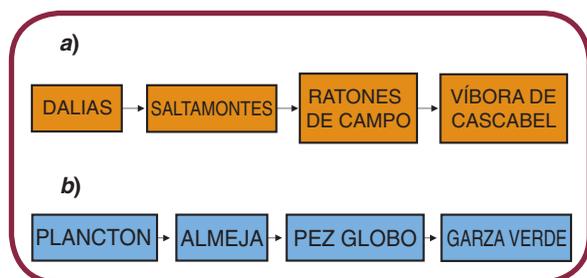


Figura 4.9 Ejemplos de **cadena trófica** en a) un ecosistema terrestre y b) un ecosistema acuático.

Una cadena trófica o **cadena alimentaria** puede representarse como un esquema lineal que indica el paso de energía de una especie a otra dentro de un ecosistema (figura 4.9).

Red alimentaria y pirámide trófica

En los ecosistemas naturales, las relaciones alimentarias son mucho más complejas de lo que se puede representar en una cadena trófica. En realidad, las cadenas tróficas se encuentran enlazadas unas con otras, pues muchos organismos comen varios tipos de alimentos.

Esta serie de cadenas tróficas entrelazadas forma una compleja **red trófica** o **red alimentaria** (figura 4.10). Las redes tróficas tienen dos atributos fundamentales: 1) el número de especies que la componen, y 2) el nivel de **conectancia**, que es una medida del número de “enlaces” alimentarios que hay entre los organismos que la conforman (figura 4.11). Por ejemplo, si todas las especies fueran capaces de alimentarse de todas las restantes, la conectancia de la red trófica sería de 100%. Sin embargo, esto no sucede en los ecosistemas naturales. Por ejemplo, nunca se da el caso de que un productor primario (un pino) se alimente de un consumidor (un escarabajo descortezador). Además, muchos consumidores tienen una dieta bastante restringida y sólo comen ciertos alimentos.

Para describir el flujo de energía a través del ecosistema es necesario entender su red trófica; para ello, debemos conocer los hábitos alimentarios de todas las especies que componen el ecosistema, que en la mayoría de los casos son muchísimas (de cientos a miles). Para resolver este problema, Charles

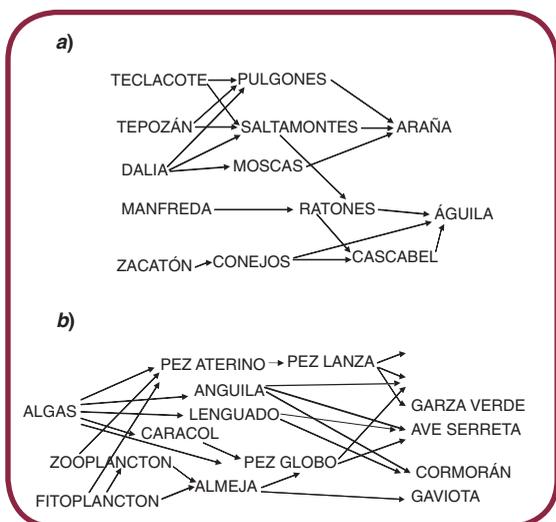


Figura 4.10 Ejemplos de **redes tróficas** en a) un ecosistema terrestre y b) un ecosistema acuático.

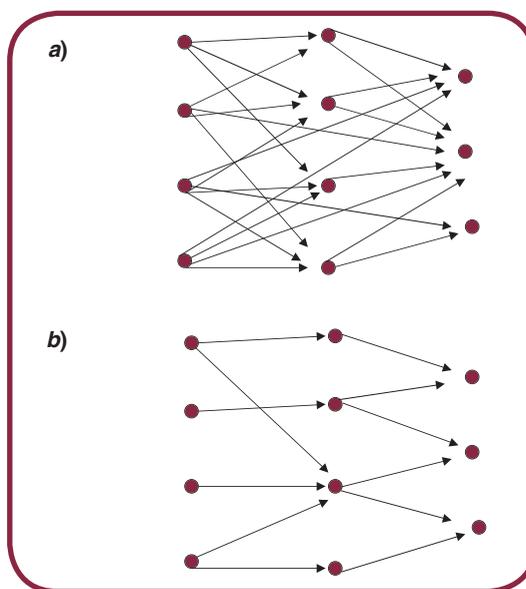


Figura 4.11 Esquemas de **redes tróficas** con distinta conectancia. a) red con alta conectancia y b) red con baja conectancia.

Elton y Raymond Lindeman generaron un modelo sencillo, conocido como **pirámide trófica**, que representa la productividad relativa de los niveles tróficos del ecosistema (figura 4.12). Esta pirámide tiene una base de gran tamaño, que representa la productividad de los productores primarios. En el segundo piso se sitúa la productividad de los consumidores primarios; en el tercero la de los consumidores secundarios, y así sucesivamente. Se aprecia que el tamaño de los pisos de la pirámide trófica se reduce paulatinamente conforme se asciende, lo cual refleja el hecho de que en los primeros niveles tróficos la productividad es mayor y disminuye al avanzar hacia los niveles tróficos superiores. La importancia del modelo de la pirámide trófica es que logra expresar la complejidad del funcionamiento alimentario de los ecosistemas en un esquema sencillo, independientemente del número de especies que alberguen.

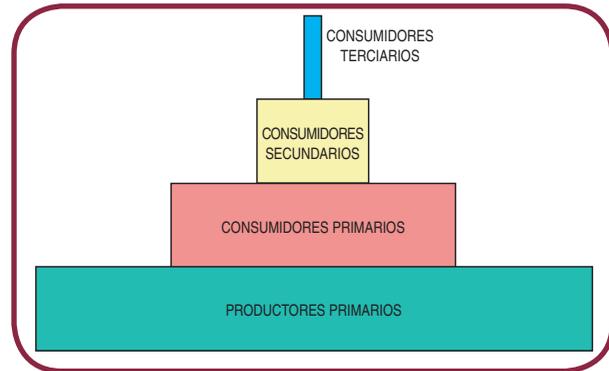


Figura 4.12 Esquema de una pirámide trófica. La productividad de los niveles tróficos se reduce notablemente al avanzar hacia la cúspide.

La ley del 10%

El modelo de la pirámide trófica reconoce que la energía disminuye al pasar de un nivel trófico a otro. Elton postuló que del total de la energía disponible en un nivel trófico, sólo 10% pasa al siguiente nivel, por lo cual este fenómeno se conoce como la **ley del 10%**. Este 10% representa la **eficiencia de transferencia trófica** (véase la sección 4.3.5). Por ejemplo, supongamos que en un ecosistema la PPN de las plantas es de $100 \text{ kJ/m}^2/\text{año}$. De acuerdo con esta ley, se esperaría que la productividad de los herbívoros fuera de $10 \text{ kJ/m}^2/\text{año}$ y que la de los depredadores del tercer nivel trófico fuera de sólo $1 \text{ kJ/m}^2/\text{año}$.

A pesar de que Elton supuso que esta ley era bastante general, se ha visto que no se cumple de manera precisa, pues la eficiencia de transferencia trófica varía entre 2 y 24%. No obstante, sorprendentemente los datos de campo con los que se cuenta arrojan un promedio de 10.13%, valor muy cercano al propuesto por Elton.

4.3.5 Eficiencias ecológicas

Como esbozamos en el apartado correspondiente a productividad secundaria en la sección 4.3.3, sólo una pequeña fracción de la energía disponible en un nivel trófico es *consumida* por los organismos del siguiente nivel; luego, sólo una pequeña porción de la energía consumida es *asimilada* y, finalmente, sólo una fracción de la energía asimilada se destina a la *producción* de tejidos nuevos. En este sentido, las **eficiencias ecológicas** de un ecosistema se refieren a la eficacia con la que se transfiere la energía entre niveles tróficos y con la que se aprovecha en cada uno de ellos. Una alta eficiencia ecológica se logra cuando no se “desperdicia” energía, sino que se aprovecha al máximo. Así, se puede decir que la energía no utilizada (NU), la excretada (E) y la respirada (R) son formas de “desperdicio” de energía, ya que los organismos no la aprovechan (figura 4.8).

Las eficiencias ecológicas se resumen en cuatro índices que se calculan de la siguiente forma (véase los símbolos en la figura 4.8):

Eficiencia de consumo = $(C_i \times 100)/P_{i-1}$. Es el porcentaje de la energía producida por un nivel trófico que es consumida por los organismos del siguiente nivel. La eficiencia de consumo de los herbívoros en ecosistemas terrestres es de aproximadamente 7% y del zooplancton en ecosistemas marinos es de casi 40%, lo que implica que el resto (93 y 60%, respectivamente) es energía no utilizada (*NU*) por los herbívoros.

Eficiencia de asimilación = $(A \times 100)/C$. Es el porcentaje de la energía consumida que es asimilada por los organismos heterótrofos. Los hongos y las bacterias alcanzan una eficiencia de asimilación de 100% porque no defecan. Los carnívoros llegan a tener eficiencias de asimilación de cerca de 80% y los herbívoros que se alimentan de hojas alcanzan un valor de alrededor de 50%.

Eficiencia de producción = $(P \times 100)/A$. Representa el porcentaje de la energía asimilada que se invierte en la producción de tejidos nuevos (producción secundaria). Los invertebrados presentan valores de eficiencia de producción que varían entre 17 y 63%. Los vertebrados **ectotérmicos** alcanzan escasamente 10% y los vertebrados **endotérmicos** presentan valores bajísimos, que varían entre 1 y 2%, pues invierten una parte considerable de la energía que asimilan para mantener la temperatura de su cuerpo.

Eficiencia de transferencia trófica = $(P_i \times 100)/P_{i-1}$. Es el porcentaje de la energía producida por un nivel trófico que se destina a la producción secundaria de los organismos del siguiente nivel. Se ha propuesto que esta eficiencia es, en general, de alrededor de 10% (véase el apartado de la **ley del 10%**).

En la figura 4.13 se muestran las eficiencias ecológicas de dos herbívoros muy diferentes: un ectotermo (saltamontes) y un endotermo (vaca). Como se aprecia, las eficiencias ecológicas de los saltamontes son más altas que las de las vacas.

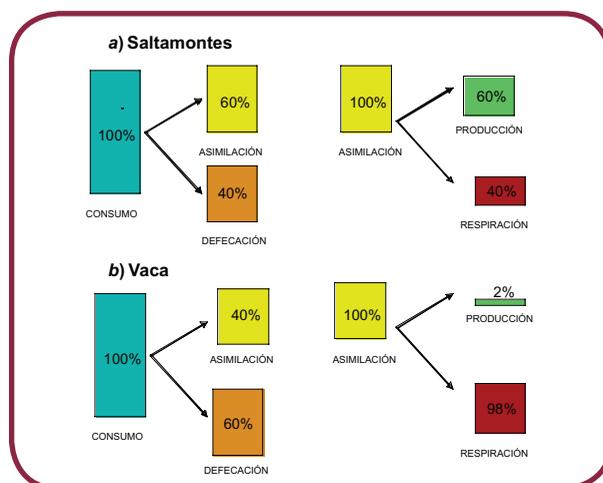


Figura 4.13

Rutas del flujo de la energía alimenticia a través de dos tipos de consumidores: a) un ectotermo (un saltamontes) y b) un endotermo (una vaca). En los cuadros de la izquierda se muestran las eficiencias de asimilación y en los de la derecha las eficiencias de producción. El tamaño de cada cuadro representa la cantidad de energía que se destina a cada función.

4.3.6 Los saprófagos

Los **saprófagos** son los organismos que se alimentan de tejido muerto o de sustancias de desecho de otros organismos. Comprenden un grupo inmenso de organismos heterótrofos, entre los que se encuentran muchos hongos, insectos y bacterias, así como vertebrados **carroñeros**, entre otros.

Los saprófagos se dividen en dos grupos: los **detritívoros** y los **descomponedores** (también llamados **desintegradores**). Los detritívoros reducen la materia orgánica a través de procesos mecánicos

y digestivos. Todos los organismos detritívoros son animales y entre ellos están las lombrices de tierra, los escarabajos estercoleros (figura 4.14), las cochinillas, las hienas y los buitres. Por su parte, entre los organismos descomponedores están las bacterias y los hongos que desintegran la materia orgánica gracias a la acción enzimática de sus células.

Los saprófagos son muy importantes en un ecosistema, pues reincorporan las sustancias nutritivas que hay en los cadáveres, los excrementos y las hojas secas, de tal forma que puedan ser reutilizadas por las plantas. De hecho, un alto porcentaje de la materia y energía de un ecosistema pasa a través de los saprófagos. Además, éstos posibilitan la degradación de materiales difíciles de digerir, participan en el proceso de formación de suelo e inmovilizan nutrientes en sus cuerpos impidiendo que sean arrastrados por el agua.



Figura 4.14 Los escarabajos estercoleros son un ejemplo de animales saprófagos detritívoros (tomada de: <http://www.insecta-inspecta.com/beetles/scarab/index.html>).

4.4 El movimiento de la materia

Poco más de 70% de los cuerpos de los organismos está constituido por agua. De la masa seca restante, 95% de las moléculas lo integran compuestos de carbono (proteínas, azúcares y grasas, entre otros). Estas moléculas están formadas por tan sólo 27 de los 109 elementos de la tabla periódica (véase el cuadro 4.3), los cuales se clasifican en **esenciales** (también conocidos como macronutrientes) y **no esenciales** (o micronutrientes). Los macronutrientes se llaman así porque se requieren en cantidades relativamente grandes, en tanto que los micronutrientes son necesarios sólo en concentraciones muy pequeñas.

Cuadro 4.3 Elementos que están contenidos en los seres vivos. Se presenta su clasificación de acuerdo con las concentraciones requeridas (macronutrientes y micronutrientes). Se muestra también la distribución y función de algunos de estos elementos.

Macronutrientes	Micronutrientes
azufre	arsénico
calcio	boro
carbono	cloro
fósforo	cromo
hidrógeno	cobalto
magnesio	cobre
nitrógeno	estaño

(continúa...)

Macronutrientes	Micronutrientes
oxígeno	flúor
potasio	hierro
	manganeso
	molibdeno
	níquel
	selenio
	silicio
	sodio
	vanadio
	yodo
	zinc
Elemento	Distribución y función
Carbono, oxígeno e hidrógeno	Constitutivos de grasas, carbohidratos y proteínas.
Nitrógeno	Constitutivos de proteínas y ácidos nucleicos (ADN y ARN).
Fósforo	Elemento del NADPH, del ATP y de los ácidos nucleicos, así como de los fosfolípidos de las membranas celulares.
Potasio	Activador de enzimas.
Calcio	Elemento estructural de las paredes celulares de las plantas y del esqueleto de moluscos, artrópodos y vertebrados.
Magnesio	Componente de la clorofila de los organismos fotosintéticos.
Sodio	Regula el contenido de agua y la acidez del medio extracelular.
Cloro	Regula el contenido de agua dentro y fuera de la célula.
Hierro	Componente de la hemoglobina.

Si bien es cierto que la materia no se crea ni se destruye en un ecosistema, sí puede salir o entrar, ya que los ecosistemas son *abiertos*. La materia que sale de un ecosistema pasa al ecosistema adyacente y la que entra a un ecosistema proviene de otro. Este hecho determina que varios ecosistemas, incluso distantes en tiempo y espacio, funcionen de manera integrada, como se verá en la sección 4.5.

La materia entra a un ecosistema a través de las siguientes vías:

- Los ríos, que, además de agua, introducen al ecosistema animales muertos, heces, troncos, ramas y otros materiales vegetales.
- La caída de partículas de la atmósfera, en la que se acarrean cenizas volcánicas, arenas de desiertos distantes, hollín producido por incendios, esporas y granos de polen.
- La inmigración de animales y la dispersión de semillas.
- La fijación de nitrógeno por las bacterias del suelo.
- La liberación de sales minerales por el **intemperismo** y la degradación de la **roca madre**.

- La contaminación, incluyendo la relacionada con la fertilización del suelo, la aplicación de pesticidas y la deposición de desechos sólidos.

Por otro lado, las vías de salida de la materia de los ecosistemas son:

- Los ríos, que se llevan diversos materiales, como vimos en la lista anterior.
- La emigración de animales y dispersión de semillas.
- La liberación de gases a la atmósfera.
- La erosión de suelo y rocas.
- La extracción o cosecha de materiales por seres humanos, incluyendo suelo, agua, minerales y organismos.

Se observa que los mecanismos de movimiento de la materia son tanto de naturaleza biótica (por el movimiento de los organismos o por sus actividades alimentarias), como abiótica (a través del aire o del agua). Esto implica que, en el movimiento de la materia, intervienen procesos geológicos, químicos y biológicos. Por esa razón, los ciclos de materia que ocurren en los ecosistemas se denominan **ciclos biogeoquímicos**, los cuales son de dos tipos: sedimentarios y atmosféricos (figura 4.15).

- **Ciclos sedimentarios**, también conocidos como ciclos locales, en los que intervienen elementos que no pueden moverse a través de la atmósfera, sino que se acumulan principalmente en el suelo. Tal es el caso del calcio, el cloro, el fósforo y el potasio, entre otros.
- **Ciclos atmosféricos**, también conocidos como ciclos gaseosos o globales, en los que participan elementos y compuestos que, en estado gaseoso, se mueven por toda la biosfera gracias a las corrientes de aire en la atmósfera. El agua, el carbono y el nitrógeno se mueven en este tipo de ciclos.

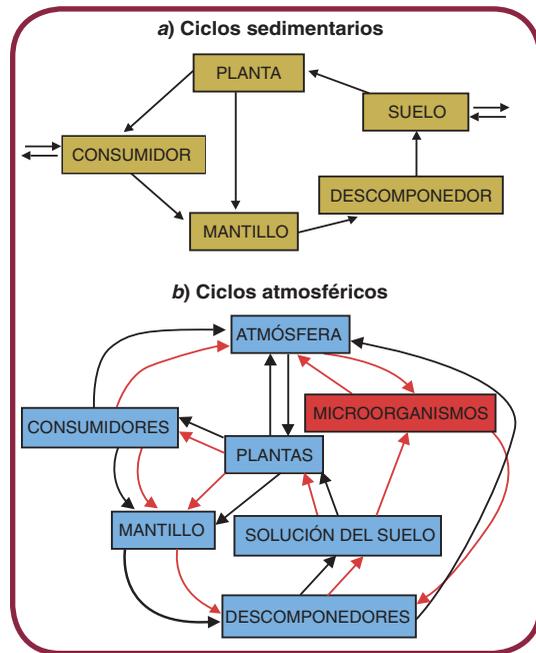


Figura 4.15

Ciclos biogeoquímicos generales. a) Ciclos sedimentarios o locales; por ejemplo, del calcio, el fósforo y el potasio. b) Ciclos atmosféricos, también conocidos como gaseosos o globales (del azufre, el carbono, el hidrógeno y el oxígeno, representados por las líneas negras, y del nitrógeno, ilustrado por las líneas rojas).

4.4.1 Ciclos sedimentarios

En los ciclos sedimentarios los nutrientes pasan de las plantas a los consumidores, de éstos al mantillo y de ahí al suelo, de donde pueden ser absorbidos de nuevo por las plantas. Los nutrientes que participan en los ciclos sedimentarios también pueden salir y entrar al ecosistema a través de las migraciones de los consumidores o disueltos en agua (figura 4.15a).

Ciclo del fósforo

El fósforo es un nutriente escaso en la naturaleza. Este elemento pasa de las plantas a los animales herbívoros y a las bacterias del suelo (figura 4.16). El compartimiento bacteriano también es

alimentado por la degradación química de algunas rocas. Los fosfatos del suelo pueden ser absorbidos por las plantas o transportados por el agua de lluvia hacia el mar. Hasta aquí corresponde la parte sedimentaria del ciclo del fósforo. En el mar los fosfatos recorren las cadenas tróficas costeras hasta llegar a las aves marinas que defecan en tierra. El fósforo contenido en el guano de las aves se libera por la acción de las bacterias en el suelo, de donde lo retoman las plantas.

Ciclo del potasio

La figura 4.17 ilustra el ciclo del potasio en un bosque de pinos. Una gran cantidad de potasio pasa por los helechos, mientras que los pinos requieren una cantidad mucho menor. En un bosque conservado se pierden pocos nutrientes por cosecha o lixiviación (el proceso del lavado del suelo por filtración de agua). Las plantas pueden perder potasio si el agua de lluvia pasa sobre sus hojas, diluyendo el que hay en su interior.

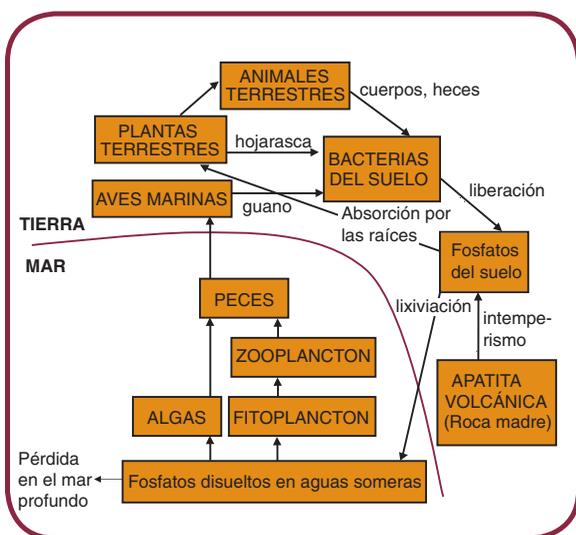


Figura 4.16 Ciclo del fósforo. A diferencia de otros elementos, el fósforo se mueve muy intensamente entre los ambientes marino y terrestre.

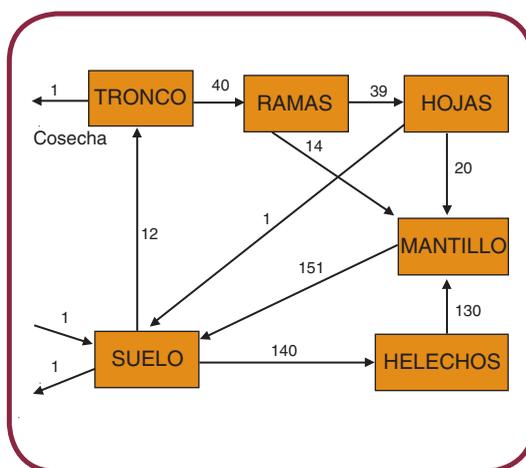


Figura 4.17 Ciclo del potasio en un bosque de pinos. Los números señalan la cantidad de este elemento (en kilogramos por hectárea) que se mueve de un compartimiento a otro. En este ecosistema se almacena una gran cantidad de potasio en los helechos y las hojas de los árboles.

4.4.2 Ciclos atmosféricos

Los ciclos atmosféricos o globales, a diferencia de los sedimentarios, incluyen a la atmósfera como compartimiento de estancia. En este tipo de ciclos participan gases que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. En la figura 4.15b se muestra un esquema de las rutas generales de los ciclos atmosféricos. En el caso del C, H y O, los consumidores, los productores y los descomponedores intercambian gases con la atmósfera, generalmente en forma de dióxido de carbono y vapor de agua. En el caso del nitrógeno, dos procesos importantes que conectan a los compartimientos terrestres con la atmósfera son la fijación y la liberación de este elemento por la microbiota del suelo, mediante sus rutas metabólicas de **nitrificación** y **desnitrificación**.

Ciclo del agua

El ciclo del agua en la biosfera se esquematiza en la figura 4.18. En general, el agua se almacena en cinco reservorios fundamentales: el mar, las aguas continentales (ríos y lagos), los glaciares (las masas de hielo de las montañas y los polos), los depósitos subterráneos y la atmósfera. Además, una gran proporción del agua está almacenada en capas profundas de la litosfera; esta agua se incorpora en cantidades mínimas a la biosfera a través de las emanaciones volcánicas.

Una de las rutas que sigue el agua es la siguiente: se evapora en el mar y pasa a la atmósfera; de allí cae en forma de lluvia sobre los continentes, donde escurre hacia los ríos para regresar al océano. Además de la evaporación del agua del mar, la atmósfera capta agua en forma de vapor de los ecosistemas terrestres mediante dos procesos importantes: 1) la evaporación del agua contenida en el suelo y en los cuerpos de agua dulce, y 2) la **transpiración** de las plantas, que es el proceso por el cual éstas pierden agua a través de sus **estomas**. Los animales terrestres también transpiran, aunque en comparación con el agua que pierden las plantas, su contribución a la humedad de la atmósfera es mínima.

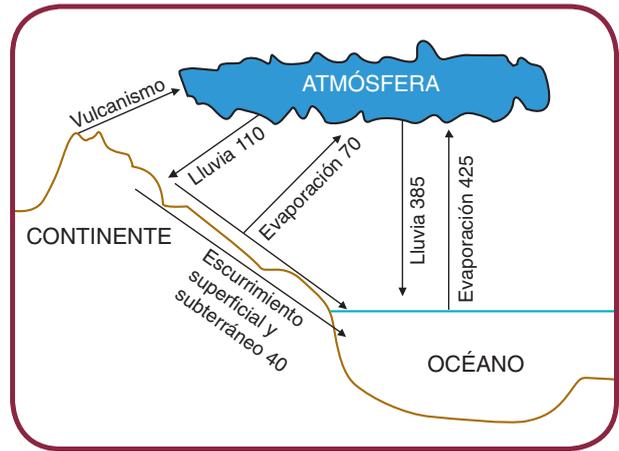


Figura 4.18 Ciclo del agua. Los números denotan la cantidad (en miles de km³ por año) que se mueve de un compartimiento a otro.

Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para la vida, ya que es un componente indispensable de proteínas, ácidos nucleicos, la **clorofila** y otras moléculas orgánicas importantes. Este elemento se encuentra en concentraciones muy bajas en los ecosistemas naturales. Sin embargo, el nitrógeno es muy abundante en la atmósfera, donde constituye el 78% de los gases que la componen (figura 4.19). Sin embargo, el nitrógeno atmosférico es una molécula gaseosa de dos átomos (N₂) que la mayoría de los organismos no pueden asimilar directamente. Por ejemplo, para que las plantas lo absorban es necesario que se encuentre en el suelo en forma de iones de nitrato (NO₃) o amonio (NH₄).

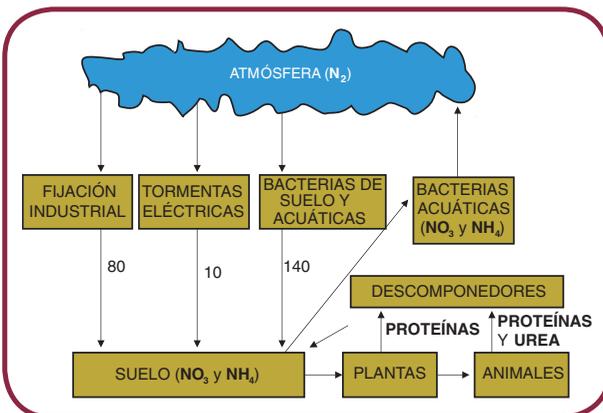


Figura 4.19 Ciclo del nitrógeno. Los números indican la cantidad de N (en millones de toneladas por año) fijada por cada fuente.

Las bacterias **fijadoras de nitrógeno** son capaces de transformar el nitrógeno atmosférico y convertirlo en nitratos o en amonio. Otro mecanismo de transformación del nitrógeno atmosférico hacia compuestos químicos aprovechables por las plantas son los relámpagos que se producen durante las tormentas eléctricas.

La aplicación de fertilizantes de origen industrial constituye otra fuente de nitrógeno que se libera al suelo. Esta fuente contribuye con 35% del total del nitrógeno que se incorpora al suelo en todo el planeta.

Ciclo del carbono

El carbono es el principal elemento estructural de los seres vivos y su ciclo está estrechamente vinculado al flujo de energía. El carbono que no forma parte de los cuerpos de los seres vivos se encuentra sobre todo en forma gaseosa como dióxido de carbono (CO_2). Por estar contenido en un gas, este elemento se mueve por medio de ciclos atmosféricos. El carbono contenido en el CO_2 es atrapado por los organismos fotosintéticos (plantas, algas y bacterias) para constituir moléculas elaboradas (azúcares, grasas y proteínas) con ayuda de la energía solar. Estas moléculas ricas en carbono se almacenan en los tejidos de estos organismos y una pequeña fracción de él se libera de nuevo a la atmósfera como CO_2 como resultado de la respiración de estos organismos.

El carbono almacenado en los tejidos de las plantas y otros seres fotosintéticos pasa a los animales consumidores, cuando éstos se alimentan de tejidos vivos. Sin embargo, la mayor parte pasa a través de tejidos muertos (cadáveres, heces, pelo, plumas, uñas, escamas o exuvias, es decir, los exoesqueletos que abandonan los artrópodos luego de la muda) al suelo, en el caso de los ecosistemas terrestres, o bien, al bentos, o queda suspendido en el agua, en el caso de los ecosistemas acuáticos. Los organismos saprófagos toman el carbono del suelo, del bentos o del agua para alimentarse y lo transforman en CO_2 mediante la respiración. De esta manera, el CO_2 liberado por todos los organismos aerobios (es decir, los que respiran oxígeno produciendo CO_2 , como los animales y los saprófagos) puede ser tomado de nuevo por los organismos fotosintetizadores, cerrando el ciclo.

4.5 La biosfera y sus procesos

Los procesos que rigen el funcionamiento de la biosfera son los mismos que rigen el funcionamiento de un ecosistema particular del planeta. La **biosfera** es el ecosistema más grande que se puede concebir; por esta razón, describir sus propiedades es una tarea difícil. La biosfera muestra un patrón de flujo de energía entre ecosistemas, con su propia estructura trófica global, su *PPN* promedio y sus eficiencias ecológicas particulares. Asimismo, manifiesta un patrón de movimiento de la materia a través de los ciclos biogeoquímicos atmosféricos.

La materia y la energía que salen de un ecosistema pasan al ecosistema adyacente, y las que entran a un ecosistema provienen de otro. Este hecho determina que varios ecosistemas, aun cuando se encuentren distantes en tiempo y espacio, funcionen de manera integrada. Esta integración permite que la biosfera, como un todo, registre procesos que ocurren a una escala global. Veamos dos ejemplos de fenómenos biosféricos. El primero se refiere a la cadena de eventos que determinan que el insecticida liberado en Europa Central para controlar mosquitos termine acumulándose en el tejido graso de los pingüinos de la Antártida, a 15,000 km de distancia. El segundo ejemplo se refiere al metano liberado por las flatulencias del ganado criado en el sureste de México que incrementa la temperatura del planeta y contribuye al derretimiento de los hielos en Groenlandia y Siberia.

Vale la pena reflexionar en que las sustancias tóxicas y de desecho producidas por las actividades humanas se mueven mediante los ciclos biogeoquímicos, tanto sedimentarios como atmosféricos. El

conocimiento de las rutas que siguen las sustancias tóxicas por estos ciclos en los ecosistemas permite entender y predecir la manera en la que éstas circulan a través de la biosfera, como sucede con los compuestos radioactivos, los metales pesados y los desechos industriales y domésticos, entre otros. Entre ellos están incluidos productos de uso cotidiano de los que dependemos por completo, como los plásticos, fertilizantes, pesticidas e hidrocarburos, sin los cuales no sería posible el modo de vida de las sociedades humanas actuales. El conocimiento profundo del funcionamiento de la biosfera constituye una herramienta fundamental en la búsqueda de soluciones para estos problemas.



Para reflexionar...

1. En muchas cuevas oscuras y profundas la productividad primaria neta es cero. Según la definición de ecosistema presentada en este capítulo, ¿podríamos considerar a una de estas cuevas como un ecosistema? ¿Por qué?
2. Si el Sol dejara de emitir energía lumínica, ¿qué pasaría con la vida en la Tierra? Explica tu respuesta.
3. En un cultivo de maíz muy productivo se obtuvieron en un año 4 kg/m^2 . Si te pidieran incrementar esta producción al triple para el año siguiente, ¿qué tendrías que hacer? Considerando la información de la sección 4.3.4 y el cuadro 4.2, ¿crees que podrías alcanzar esta meta?
4. ¿De dónde proviene la energía para que lleves a cabo tus actividades cotidianas (jugar, estudiar, caminar, hablar, oír y pensar)? ¿Qué papel tuvo la fotosíntesis en todo esto?
5. En la sección 4.5 vimos cómo un insecticida rociado en Europa Central puede terminar acumulándose en los tejidos grasos de los pingüinos de la Antártida. Trata de imaginar los procesos y las rutas que siguen los insecticidas para llegar a ese lejano destino.



Actividades complementarias

1. En la despensa de tu casa revisa los contenidos energéticos de 10 productos. Elabora un cuadro comparativo de sus contenidos energéticos en kJ/g y kcal/g. Investiga por qué algunos productos tienen mayor contenido energético que otros.
2. Elabora un esquema de la ruta que seguirá durante un siglo una molécula de agua que bebe tu perro.
3. ¿Qué diferencia hay entre producción secundaria y productividad secundaria?
4. Una población de elefantes defeca $40.2 \text{ kcal/m}^2/\text{año}$, disipa en su metabolismo respiratorio $31.3 \text{ kcal/m}^2/\text{año}$ y tiene una productividad secundaria de $0.3 \text{ kcal/m}^2/\text{año}$. *a)* ¿cuánto consumió esa población de elefantes?; *b)* ¿cuánto asimiló?; *c)* calcula las eficiencias de asimilación y de producción; *d)* ¿los niveles de desperdicio de estos animales te parecen altos o bajos?; *e)* ¿qué característica fundamental tienen estos animales que explica tales niveles de desperdicio?
5. Investiga las funciones de cinco de los 27 elementos del cuerpo de los seres vivos que no se hayan descrito en el cuadro 4.3.

CAPÍTULO 5

Biodiversidad

5.1 Para la imaginación

Seguro habrás oído alguno de esos chistes que hablan de personas de diferentes nacionalidades que entran a un concurso y que tienen que enfrentar diferentes retos o pruebas. Bueno, pues he aquí un cuento de ese tipo, muy adecuado para la ocasión. Una vez hubo un concurso en el que participaron un chino, un cubano y un mexicano. Como parte del concurso, les hicieron varias preguntas. La primera fue: “¿Cuántas razas de maíz diferentes se cultivan en su país?”. El chino dijo: “Pues creo que como cuatro”. El cubano contestó: “¡Ah!, pues en mi país se cultivan alrededor de seis”. Por su parte, el mexicano afirmó: “Pues en mi país, sólo en la zona central, en la Cuenca de México, ¡se cultivan más de doce!” (figura 5.1).

Segunda pregunta: “De los seis grandes biomas terrestres (desierto, selva tropical, sabana, bosque templado, taiga y tundra; véase el capítulo 3, sección 3.7), ¿cuántos están representados en su país?”. El chino, seguro de que ganaría esta sección del concurso, contestó sonriendo: “¡Pues todos ellos!”. El cubano humildemente contestó: “Pues mi país es una isla tropical, chico, así es que sólo hay tres tipos de biomas”. Por último, el mexicano dijo: “Mmmm..., en México tenemos cuatro de ellos; aunque pensándolo bien, tenemos equivalentes de la taiga y la tundra en nuestras montañas más altas”.

Tercera pregunta: “¿Cuántas especies nativas de mamíferos existen en su país?”. El chino contestó: “En China tenemos exactamente 394 especies de mamíferos”. El cubano dijo: “En Cuba hay 42, entre ellos el murciélago mariposa (*Natalus lipidus*) y el almiquí (*Solenodon cubanus*),

¡orgullosamente endémicos de nuestra isla!”. Y el mexicano afirmó: “En México viven ni más ni menos que 530 especies de mamíferos, que pertenecen a 157 géneros, 35 familias y 10 órdenes. Entre ellos, nueve géneros y 140 especies son endémicas de nuestro país. ¿Cómo les quedó el ojo?”.

Y por fin, ¿quién ganó el concurso? ¡Tú decídelo!

5.2 ¿Qué es la biodiversidad?

La vida tiene muy diversas formas de expresarse. Por ejemplo, existen organismos de diferentes especies. Además, en cada especie encontramos mucha variedad de formas y colores. Por ejemplo, entre los seres humanos (especie *Homo sapiens*) existen individuos de diferentes razas, y en cada raza hay personas de diferentes complejiones y con distintos rasgos. Por otro lado, los organismos no son la única manera en la que la vida se expresa; la ecología reconoce que diferentes grupos de organismos (es decir, los niveles de organización de la vida, como las poblaciones, las comunidades y los ecosistemas; véase el capítulo 1, sección 1.4) forman unidades distinguibles que también son muy variables en sus características.

Los biólogos adoptaron el concepto de **biodiversidad** precisamente para abarcar o describir las diferentes formas en las que la vida se presenta. Así, la biodiversidad se define como toda la variedad de formas en las que la vida se expresa a todos niveles en el planeta. Como ilustra la última parte del cuento de la sección “Para la imaginación” en este capítulo, es común que la biodiversidad de un lugar se asocie con el número de especies animales y vegetales que habitan en él. Sin embargo, como explicaremos en los siguientes párrafos, la biodiversidad es mucho más que eso, pues también abarca las diferencias genéticas entre especies, así como entre individuos de una misma especie, al igual que los distintos paisajes que se presentan en un lugar. En resumen, la biodiversidad comprende al menos cuatro niveles de expresión: los genes, las poblaciones, las especies y los ecosistemas.

La **diversidad genética** se refiere a las diferencias que se presentan en el material genético de distintas especies y a las variaciones genéticas entre poblaciones y entre individuos de una misma especie (figura 5.1). Los genes de cada individuo determinan tanto sus características morfológicas (por ejemplo, el tamaño, el color del pelo, la presencia de escamas o plumas, el tipo de hojas o la rugosidad de la corteza), como sus rasgos fisiológicos (por ejemplo, la tasa respiratoria o la tasa fotosintética) y sus patrones conductuales (como las conductas de cortejo, el cuidado parental y las formas de forrajeo). Todas estas características, en conjunto, determinan las probabilidades que tendrá un organismo de sobrevivir y reproducirse en un hábitat particular y en determinadas condiciones ambientales.

La **diversidad de poblaciones** se refiere a las diferencias que existen entre los grupos de organismos de la misma especie que ocupan diferentes localidades. Si estas poblaciones están aisladas unas de otras, es posible que presenten dinámicas poblacionales independientes, además de diferencias genéticas entre ellas. Por ejemplo, en la Selva Lacandona existen varias poblaciones de monos araña (*Ateles goeffry*, figura 5.2), cada una con características demográficas y genéticas particulares. Los individuos de una población específica generalmente se aparean con otros individuos de esa misma población, aunque de vez en cuando haya contacto entre poblaciones y algún mono se aparee con otro de una población diferente. Este contacto genético entre poblaciones es muy importante, pues homogeniza en cierta medida la variabilidad genética entre poblaciones y permite que se mantenga la variabilidad genética global de la especie.

La **diversidad de especies**, como se explicó en el capítulo 3 (secciones 3.3 y 3.5), se refiere a la variedad de organismos que forman una comunidad. Aunque en ese capítulo mencionamos que, en sentido



Figura 5.1

La diversidad genética que existe en una población se expresa a través de diferencias en la morfología, la coloración, el tamaño y la forma de los individuos. En la fotografía de la izquierda se muestran diferentes razas de maíz, las cuales son una expresión de su diversidad genética; en la imagen de la derecha se ejemplifican diferencias genéticas entre individuos de una población de lechuzas. (Imagen de las lechuzas tomada de: <http://www.hbw.com>).

estricto, la diversidad de especies (es decir, la diversidad alfa) tiene dos componentes (la riqueza de especies y sus abundancias relativas), es común que el término *diversidad* se use como sinónimo de *riqueza*, sobre todo cuando nos referimos a grandes extensiones de tierra. Así, cuando se habla de este nivel de la biodiversidad de una región del planeta, se hace referencia al número de especies que habitan en esa región.

Por último, la **diversidad de ecosistemas** se refiere a la variedad de sistemas ecológicos que se presentan en una región. Hay algunas regiones que son poco diversas en este sentido, pues los ecosistemas que las forman no son muy diferentes entre sí, como sucede en el Desierto de Arabia. En contraste, hay otras regiones, como la de Los Tuxtlas, en Veracruz, en las que se presentan ecosistemas muy diversos, tales como la selva tropical perennifolia, pastizales naturales e inducidos, lagunas, ríos, manglares y playas; en consecuencia, Los Tuxtlas es una región con una gran diversidad de ecosistemas.

En las siguientes secciones analizaremos con más detalle algunos de los componentes de la biodiversidad —en particular el que tiene que ver con la diversidad de especies— y analizaremos su origen, sus causas y la manera en la que se distribuye en el planeta.



Figura 5.2

Las diferentes poblaciones de monos araña (*Ateles sp.*) de la Selva Lacandona tienen características particulares en cuanto a su demografía, patrones de comportamiento y variabilidad genética (tomada de: www.galeriade.com/jmramon/details.php?image_i...).

5.3

¿Cuántas especies diferentes existen y cuándo surgieron?

Por muchos años, los organismos vivos se clasificaron únicamente en dos reinos: los animales (Animalia) y los vegetales (Plantae). En las últimas décadas del siglo xx se reconoció que esta clasificación era muy artificial y no reflejaba la realidad de la diversidad de la vida en el planeta. Por esa razón, se propuso agrupar a los organismos vivos en cinco reinos: Monera (las bacterias), Protista (los organismos unicelulares **eucariontes**), Fungi (los hongos), Plantae (las plantas) y Animalia (los animales) (figura 5.3). Algunos biólogos piensan que esta nueva clasificación tampoco refleja adecuadamente la diversidad de la vida, por lo que dividieron al grupo de las bacterias en dos reinos: Bacteria y Archaea. Los demás grupos se han mantenido como tales, aunque existen ciertas discrepancias al respecto; por ejemplo, no hay acuerdo sobre la pertinencia de ubicar a las algas en uno u otro reino.

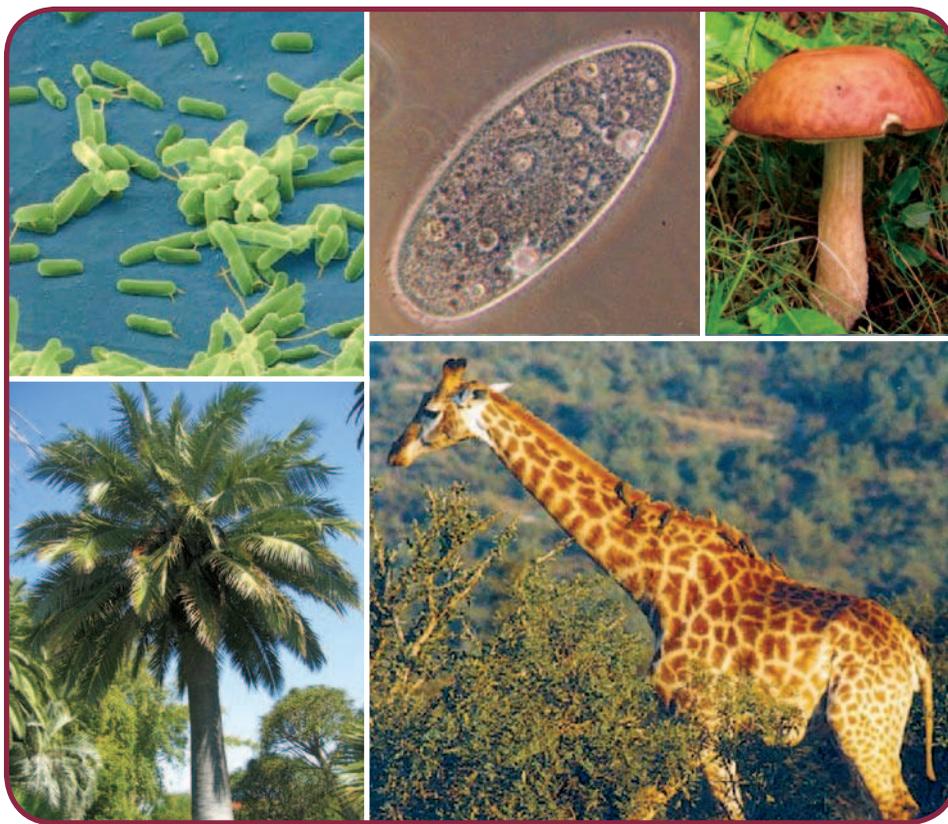


Figura 5.3

Ejemplos de organismos de los cinco reinos. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: el reino Monera (una bacteria del género *Pseudomonas*); el reino Protista (un protozooario del género *Paramecium*); el reino Fungi (un hongo basidiomiceto); el reino Plantae (la palmera, *Jubaea chilensis*); y el reino Animalia (la jirafa africana, *Giraffa camelopardalis*) (tomadas de: Bacteria: www.sciencemuseum.com/.../talking-bacteria.html; Protozooario: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cb/Paramecium.jpg/225px-Paramecium.jpg>; Hongo: <http://danny.oz.au/travel/iceland/flora.html>; Palmera: http://www.huntingtonbotanical.org/Palm/lgpics/Jubaea%20chilensis_1.jpg; Jirafa: <http://www.cathouse-fcc.org/images/southafrica01/giraffe.jpg>).

El resultado es que ahora se reconocen seis reinos: Arqueas (o Arqueobacterias), Bacterias, Protistas, Hongos, Animales y Plantas.

La característica distintiva de los reinos Bacteria y Archaea es que se trata de organismos unicelulares, pero en los que las células no tienen un núcleo bien definido, ni tampoco organelos, es decir, son **procariontes** (Prokaryotae). Los organismos de los demás reinos (protistas, hongos, animales y plantas) sí poseen un núcleo claramente definido, por lo que se les llama **eucariontes** (Eukaryotae). En una categoría totalmente diferente se ubica todo el grupo de los virus, que no se consideran *organismos* vivos en el mismo sentido que los ya mencionados, pues no tienen vida propia, sino que dependen del aparato bioquímico y estructural de las células a las que infectan. Por esta razón, los virus no quedan incluidos en estas clasificaciones.

La vida en la Tierra surgió hace muchísimo tiempo. Se calcula que los primeros seres vivos aparecieron en nuestro planeta hace unos 3,500 o 4,500 millones de años. Posiblemente durante los primeros mil millones o 2 mil millones de años sólo había organismos procariontes. Los primeros fósiles eucariontes unicelulares datan de hace más de 2,000 millones de años y desde entonces empezaron a proliferar muy rápidamente (cuadro 5.1). A partir de ellos pronto evolucionaron los eucariontes multicelulares. Los primeros animales surgieron hace aproximadamente 700 millones de años y probablemente fueron similares a algunos invertebrados marinos actuales, como las esponjas, las medusas, los corales suaves y algunos tipos de gusanos. En los registros fósiles que datan de hace 400 a 500 millones de años ya se reconocen los invertebrados marinos con exoesqueleto (como los moluscos y los crustáceos), así como algunos vertebrados y plantas; posteriormente surgieron todos los **phyla** que existen en la actualidad (cuadro 5.1). Los grupos más recientes, como los mamíferos, las aves y las plantas con flor (angiospermas) aparecieron en el planeta hace unos 200 millones de años, aunque se diversificaron más intensamente apenas hace unos 60 millones de años. Entre los grupos más recientes de mamíferos se encuentra el de los homínidos, al que pertenece la especie humana. Los primeros restos de seres humanos primitivos datan de hace 7 millones de años, aunque las primeras evidencias del hombre moderno datan de hace sólo 100 mil a 200 mil años. Estas escalas temporales nos dan una idea del tiempo tan prolongado que ha transcurrido desde que surgió la vida en el planeta, en contraste con el poco tiempo que lleva la especie humana en el mismo (cuadro 5.1). A pesar de su corta existencia, los seres humanos son los organismos que han provocado las mayores transformaciones sobre la naturaleza y sobre el resto de los seres vivos.

Los biólogos evolutivos consideran que todas las formas de vida que existen actualmente en nuestro planeta surgieron a partir de ancestros comunes que, con el paso del tiempo, se fueron diversificando para formar distintos grupos biológicos. Algunos mecanismos que dieron lugar a esta diversificación fueron: el aislamiento geográfico de poblaciones de la misma especie (alopatría) que a la larga fueron evolucionando en diferentes direcciones; las divergencias entre poblaciones de la misma especie causadas por distintas adaptaciones locales a lo largo de gradientes ambientales (parapatría); y fenómenos genéticos como la duplicación de cromosomas, la cual puede dar lugar a especies distintas a partir de una misma población en un mismo lugar (simpatría). El conjunto de eventos que llevan a la formación de nuevas especies a partir de ancestros comunes se conoce como **especiación**. A lo largo de los últimos 4,500 a 3,500 millones de años, la especiación ha dado lugar a todas las especies que existen y han existido en el planeta. Hasta la fecha se han descrito cerca de dos millones de especies, entre protistas, hongos, plantas y animales que viven en nuestro planeta en la actualidad. Esta gran diversidad de formas de vida es parte de la biodiversidad de la Tierra y, a la vez, encierra una riqueza extraordinaria de rutas evolutivas independientes que han desembocado en esta variedad de expresiones. De esta forma, cada una de las especies que encontramos hoy en nuestro planeta es el representante más reciente de una larga historia de aventuras evolutivas. ¡Algo realmente fascinante!, ¿no crees?

Cuadro 5.1 Épocas en las que aparecieron diferentes grupos de organismos en la historia geológica de nuestro planeta. El tiempo más remoto está representado en la parte más baja y va avanzando hacia arriba hasta llegar a la época reciente.

Era	Periodo	Época	Inició hace X millones de años	Eventos notables en la evolución de la vida
Cenozoica	Cuaternario	Reciente (Holoceno)	0.01	Surgen el <i>Homo erectus</i> y el <i>H. sapiens</i> Extinción de mamíferos
		Pleistoceno	1.8	
	Terciario	Plioceno	5.2	Ser humano primitivo
		Mioceno	23.8	Diversificación de mamíferos, aves, insectos polinizadores y angiospermas
		Oligoceno	33.5	
		Eoceno	55.6	
		Paleoceno	65	
Mesozoica	Cretácico		144	Desaparición de los dinosaurios
	Jurásico		206	Diversificación de dinosaurios, primeros mamíferos y aves, diversificación de angiospermas
	Triásico		251	Dominan las gimnospermas; surgen los dinosaurios
Paleozoica	Pérmico		290	Diversificación de reptiles
	Carbonífero		354	Insectos alados. Primeros reptiles
	Devónico		409	Primeros anfibios, helechos y plantas con semilla
	Silúrico		439	Primeras plantas vasculares y artrópodos terrestres (insectos)
	Ordovícico		500	Primeros peces
	Cámbrico		543	Surge el resto de los phyla de animales
Proterozoica			2500	Anélidos, cnidarios y artrópodos Primeros eucariontes
Arqueana			3600	Primeros seres vivos (procariontes)

Después de toda esta reflexión, sigue vigente nuestra pregunta inicial: ¿cuántas especies existen en la Tierra? Por desgracia, es imposible responder con precisión a esta pregunta y lo más probable es que nunca logremos hacerlo. Como comentamos en el párrafo anterior, los naturalistas y biólogos han descrito, hasta ahora, casi dos millones de especies diferentes de eucariontes (es decir, protistas, hongos, animales y plantas). Este número no incluye a los organismos de los reinos Bacteria y Archaea, de los que se sospecha que también son muy diversos.

Las especies conocidas se han descrito a partir de expediciones, estudios e investigaciones de naturalistas y biólogos, durante los cuales se han recolectado especímenes diversos. Estos últimos pasan a formar parte de colecciones científicas (como museos y herbarios) y se estudian en detalle para definir

a qué grupo pertenecen. La actividad de recolección se realiza en todos los países y, en la medida de lo posible, intenta abarcar todos los ecosistemas existentes. Sin embargo, debemos reconocer que la recolección de organismos de ciertos grupos taxonómicos (quizá porque nos resultan particularmente llamativos) es más intensa, como es el caso de los vertebrados y las plantas con flor; entre los insectos, que constituyen un grupo muy diverso, las mariposas y los escarabajos son los grupos que han recibido más atención, mientras que de otros grupos se sabe muy poco. Además, la exploración biológica ha sido insuficiente en algunos ecosistemas, tanto terrestres (por ejemplo, los bosques húmedos de algunas regiones montañosas y las cuevas) como acuáticos (por ejemplo, las profundidades del mar). En México la actividad de los biólogos se concentra en algunas regiones, como el Eje Neovolcánico en el centro del país, mientras que otras, como los estados de Durango y Chihuahua, permanecen poco exploradas (figura 5.4).



Figura 5.4

Algunas zonas de México están mucho mejor exploradas biológicamente que otras. Por ejemplo, en este mapa se presenta la distribución de proyectos de investigación del CIEco (Centro de Investigaciones Ecosistémicas, UNAM), en el que se nota una mayor concentración en el Eje Neovolcánico Transversal, en comparación con otras regiones, como Durango o Baja California (*tomada de: www.oikos.unam.mx/cieco/invcieco.htm*).

A partir del número de especies que se conocen en la actualidad (cuadro 5.2), algunos investigadores han realizado extrapolaciones para estimar lo que todavía falta por conocer. Sin embargo, las cifras que surgen de estas estimaciones son muy variables: desde 5 millones de especies, según las estimaciones más conservadoras, hasta 30 millones, de acuerdo con los cálculos más audaces. La gran diferencia entre estas dos

Cuadro 5.2 Número aproximado de especies conocidas en todo el planeta de los principales grupos biológicos.

GRUPO TAXONÓMICO	NÚMERO DE ESPECIES
Insectos	933,000
Plantas vasculares	270,000
Otros artrópodos	115,000
Otros invertebrados	100,000
Hongos	72,000
Algas	36,000
Peces	27,977
Musgos	12,800
Aves	9,721
Reptiles	8,240
Anfibios	6,035
Mamíferos	5,130

cifras no es más que un reflejo de la enorme incertidumbre que todavía tenemos en nuestro conocimiento; sin embargo, señala un hecho indudable: lo que conocemos es todavía una porción muy pequeña de la gran diversidad de especies que comparten el planeta con nosotros.

En el cuadro 5.2 se indican los números de especies conocidas en la actualidad de los principales grupos taxonómicos. Debe recordarse, además, que el número de especies que viven en el mundo actual no es más que una pequeña fracción de todas las que han existido en nuestro planeta a lo largo de miles de millones de años de evolución. Pero, ¿cómo sabemos que hubo tantas especies si actualmente están extintas? La respuesta está en el registro **fósil**, en el cual quedó grabado su paso por la Tierra. En la larga historia de nuestro planeta ha habido eventos de **extinción en masa** en repetidas ocasiones. Uno de ellos ocurrió hace aproximadamente 260 millones de años, al final de la era Paleozoica, cuando desapareció cerca de 50% de las especies que existían en ese momento en la Tierra, la mayoría de las cuales eran invertebrados marinos. Otro evento de extinción en masa, el más reciente, ocurrió hace aproximadamente 65 millones de años (al final del Cretácico) e implicó la desaparición de todo el grupo de los dinosaurios, entre otros. Algunos científicos afirman que se avecina otra extinción en masa, de dimensiones similares a las anteriores, como consecuencia del **cambio climático** que el ser humano está provocando en el planeta (véase el capítulo 8).

A pesar de que los datos relacionados con la variedad de especies en la Tierra son impresionantes, no debemos olvidar que el número de especies es sólo uno de los aspectos de la biodiversidad. Otro aspecto muy importante es la variedad de ecosistemas que forman los diferentes grupos o especies en conjunto con el medio ambiente abiótico en el que habitan. Podemos intuir las diferentes expresiones que adquiere este aspecto de la biodiversidad si pensamos en la gran diversidad de paisajes que podemos encontrar sobre la Tierra. Hay paisajes áridos, húmedos, boscosos, rocosos, helados, montañosos, planos, etcétera. A la vez, entre los paisajes húmedos, por ejemplo, encontramos algunos caracterizados por su vegetación alta, o vegetación baja, o vegetación densa, o bien, más rara. En realidad, es imposible encontrar dos paisajes idénticos en este “planeta azul” en el que vivimos.

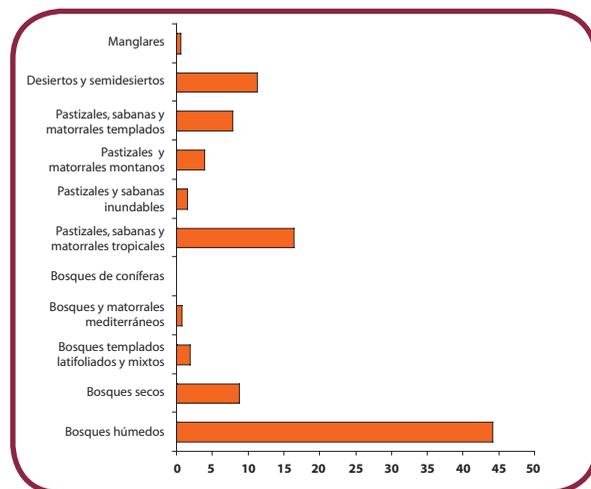
Los científicos han intentado clasificar la gran diversidad de comunidades y ecosistemas que existen en la Tierra tomando en cuenta sus características (como estructura, composición y funcionamiento). Existen clasificaciones muy diversas, y sin duda todas ellas simplifican la abrumadora variedad de la naturaleza; sin embargo, una clasificación ampliamente aceptada por su sencillez y aplicabilidad es la que se basa en el concepto de **bioma** (véase el capítulo 3, sección 3.7). Un bioma es un tipo general de comunidad característico de una región climática del planeta. Como vimos en el capítulo 3, los biomas terrestres más conocidos son la selva tropical húmeda y la sabana (en climas de tipo A); el desierto (en climas de tipo B); el bosque templado (en climas de tipo C); el bosque boreal o taiga (en climas de tipo D); y la tundra (en climas de tipo E). Otras clasificaciones más detalladas distinguen entre los diferentes tipos de bosques dependiendo de si son tropicales (selvas) o templados, y de si están formados sólo por especies de hojas anchas (latifoliadas) o sólo por coníferas, o bien, por una combinación de latifoliadas y coníferas (bosques mixtos). Además, se distinguen diferentes tipos de vegetación arbustiva. Como se observa en el cuadro 5.3, los bosques en conjunto representan un poco más de la mitad de los ecosistemas terrestres, seguidos por los desiertos y los pastizales; por el contrario, el bioma que ocupa la menor proporción de la superficie emergida de la Tierra es la tundra, con menos de 5%. En la figura 5.5 se presenta una clasificación más detallada de los biomas y la superficie que ocupan en América Latina.

Cuadro 5.3 Los diferentes biomas terrestres y la superficie que ocupan en el mundo. Nota que en esta clasificación los bosques se dividen de acuerdo a si están formados por árboles de hojas anchas (latifoliadas), o por coníferas; cuando un bosque tiene especies tanto latifoliadas como coníferas, se le conoce como mixto. Además, estos biomas están clasificados como tropicales, subtropicales o templados, dependiendo del tipo de clima en el que se presentan.

BIOMA TERRESTRE	SUPERFICIE (en millones de km ²)
Bosques húmedos de latifoliadas tropicales y subtropicales	23.2
Bosques secos de latifoliadas tropicales y subtropicales	3.2
Bosques templados de latifoliadas y mixtos	13.5
Bosques y matorrales mediterráneos	4.5
Bosques de coníferas tropicales y subtropicales	1.6
Bosques templados de coníferas	4.2
Pastizales, sabanas y matorrales tropicales y subtropicales	21.6
Pastizales y sabanas inundables	1.1
Pastizales y matorrales montanos	5.5
Pastizales, sabanas y matorrales templados	14.7
Desiertos y matorrales xéricos	34.9
Manglares	0.4
Tundra	11.6
Bosque boreal, taiga	11.9

Figura 5.5

Proporción (porcentaje, en el eje de las abscisas) de la superficie terrestre de América Latina cubierta por diferentes tipos de biomas. Las latifoliadas son plantas de hojas anchas, a diferencia de las coníferas, cuyas hojas son aciculadas.



5.4

¿Dónde se distribuye la biodiversidad?

Si desde un transbordador espacial pudiéramos observar con detalle la distribución de los ecosistemas y de las especies en todo nuestro planeta, desde los polos hasta el ecuador, veríamos que la diversidad y el tipo de especies que ocupan cada zona geográfica, así como la variedad de los ecosistemas que forman estos conjuntos de especies, cambian de una región a otra. En el capítulo 3 (sección 3.6) vimos que hay ciertos patrones en la distribución de la diversidad a nivel global. Ahí comentamos que

uno de los patrones más notables es la reducción paulatina de la riqueza biológica desde el ecuador hacia los polos, es decir, el número de especies por kilómetro cuadrado aumenta al acercarnos al ecuador y se reduce al acercarnos a los polos. Éste es un ejemplo claro de que la biodiversidad no se distribuye de manera uniforme en el planeta sino que, por el contrario, hay algunas regiones que son biológicamente más ricas que otras, tanto por el número total de especies que albergan, como por la variedad de ecosistemas que las componen.

Una de las formas de observar los patrones de variación global de la biodiversidad es a través de mapas en los que se dibuja la distribución de diversos grupos taxonómicos. Se han realizado algunos mapas de este tipo, pero sólo para los grupos biológicos más conocidos, como los vertebrados y las plantas; de la distribución de muchos invertebrados se sabe todavía muy poco. A partir de mapas como éstos, se ha logrado identificar que los bosques tropicales, los cuales se distribuyen a ambos lados del ecuador, son el tipo de bioma que alberga el mayor número de especies. Se estima que cerca de 70% de las especies de todo el mundo se encuentran en estos ecosistemas. En el mar ocurre algo semejante con los arrecifes coralinos, conocidos por albergar una gran diversidad de muchos grupos biológicos.

El área de distribución de cada especie es uno de sus rasgos importantes y resulta de gran interés

para los biólogos. Existe una gran variación en el tamaño de las áreas de distribución de las especies; hay especies que viven en áreas geográficas muy extensas, que ocupan diversos tipos de ecosistemas y que forman poblaciones muy grandes, es decir, son especies comunes. Un ejemplo de una especie común es el venado cola blanca (figura 5.6), que se distribuye casi a todo lo largo del continente americano (con excepción de los extremos norte y sur), habita en diversos tipos de ecosistemas y forma poblaciones bastante numerosas (aunque la caza y la reducción de sus áreas naturales de distribución han provocado su desaparición en algunas regiones). Entre los vertebrados, las aves son el grupo que presenta especies con mayores áreas de distribución, como resultado de la alta movilidad que poseen muchas de ellas. En el otro extremo están las especies raras, las cuales se distribuyen en áreas muy restringidas del planeta; con frecuencia son específicas de un ecosistema en particular y pueden formar poblaciones muy reducidas. Un ejemplo de especie rara es la planta *Lacandonia schismatica* (figura 5.6), cuya distribución está restringida a una pequeña área de la Selva Lacandona, en Chiapas, donde tiene una población poco numerosa.

Cuando una especie presenta una distribución restringida sólo a una pequeña región del planeta, se dice que es una especie **endémica** de esa región. Por ejemplo, la planta *Lacandonia schismatica* es endémica de la Selva

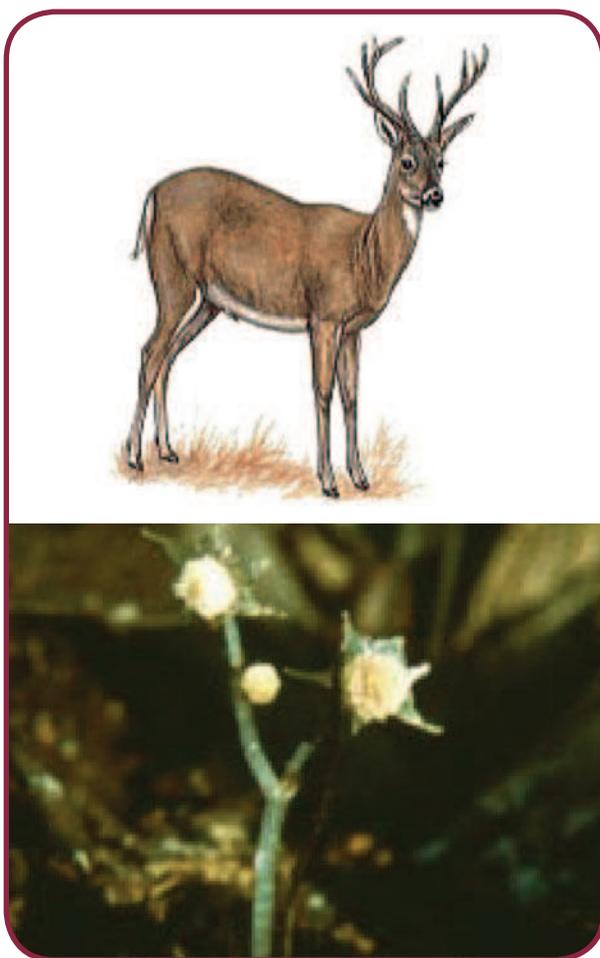


Figura 5.6

Una especie común, el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), y una rara, la planta *Lacandonia schismatica*.

Lacandona (figura 5.6). Cuando nos referimos al endemismo de una especie, debemos hacer referencia a la región en la que se distribuye. Por ejemplo, la planta *Furcraea parmentieri* (figura 5.7) es endémica del Eje Neovolcánico Transversal, y el ajolote (*Ambistoma mexicanum*) es endémico de los cuerpos de agua de Xochimilco y Chalco, en el centro de México (figura 5.7).

Hay lugares en la Tierra que se caracterizan por albergar una gran cantidad de especies endémicas. Estas regiones se conocen como **centros de endemismo**. Por lo común, se trata de áreas que están aisladas geográficamente por barreras montañosas, o porque están rodeadas total o parcialmente por el mar, como es el caso de las penínsulas y las islas. Las regiones biogeográficas del Neotrópico y el Afrotrópico son en las que más especies endémicas existen, aunque Australasia también es notable por su endemismo, en virtud de su alto nivel de aislamiento geográfico (figura 5.8 y cuadro 5.4).

Por estas razones, la importancia de cada área del planeta para la conservación de la biodiversidad puede evaluarse tanto en términos del número de especies diferentes que alberga, como del número de especies endémicas que posee. Por ejemplo, en México los ecosistemas que presentan la mayor diversidad de especies son los bosques tropicales húmedos; sin embargo, sus zonas semiáridas y regiones montañosas son las que tienen un mayor número de especies endémicas. Por esta razón es importante contar con reservas ecológicas y áreas protegidas en diferentes zonas del país, como veremos en el capítulo 9 (sección 9.2.2).

El aspecto de la biodiversidad que tiene que ver con la variedad de ecosistemas que existen en nuestro planeta puede representarse en un mapamundi de los diferentes biomas terrestres. Un tipo de bioma particular, por ejemplo, un desierto, tiene una fisonomía y un aspecto similar en África y en América. Sin embargo, las especies que encontramos en uno u otro continente son muy diferentes, pues representan toda una historia evolutiva asociada a una **región biogeográfica** específica. Por ejemplo, en los desiertos de América encontramos cactus y agaves (que son plantas de dos familias exclusivamente americanas), mientras que en los desiertos africanos existe una gran diversidad de plantas de la familia Euphorbiaceae, aunque éstas tienen formas similares a las de los cactus y agaves americanos (figura 5.9).

La flora y la fauna de cada región del mundo, así como los biomas en los que viven, se distribuyen en ocho diferentes zonas biogeográficas: Neártica, Neotropical, Paleártica, Afrotropical, Indo-Malaya, Oceanía, Australasia y Antártica.



Figura 5.7

El ajolote (o "axolotl", en náhuatl; de nombre científico *Ambistoma mexicanum*), endémico de Xochimilco y Chalco; y a la izquierda *Furcraea parmentieri*, planta endémica del Eje Neovolcánico Transversal perteneciente a la familia de los magueyes.

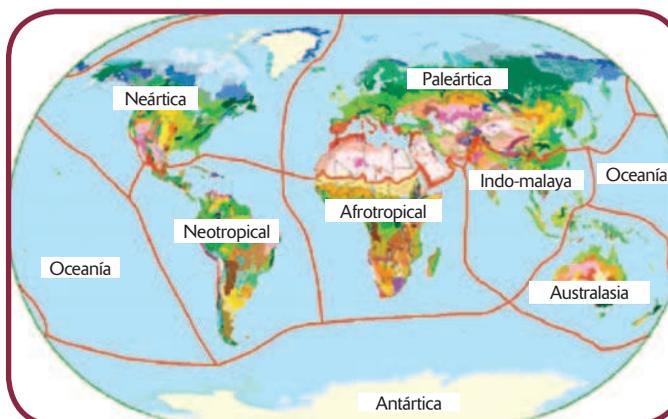


Figura 5.8

Regiones biogeográficas del mundo. En cada región, los diferentes biomas aparecen señalados con distintos colores.


Figura 5.9

A la izquierda, una planta euforbiácea (*Euphorbia valida*, originaria de Sudáfrica) y a la derecha una cactácea (*Astrophytum ornatum*, originaria del norte de México). Las coincidencias en la morfología de las plantas que evolucionaron en el mismo tipo de bioma, pero en diferentes partes del mundo, confieren a estos biomas una fisonomía particular (tomadas de: www.desert-tropicals.com/Plants/Euphorbiaceae/Euphorbia_valida.html, www.infojardin.com/imagenes-subir/getimg/Astrophytum_ornatum).

Antártica (figura 5.8). Las regiones más extensas son la Paleártica, la Afrotropical, la Neártica y la Neotropical. Si bien en cada región biogeográfica están representados varios biomas, es en las regiones Indo-Malaya, Neotropical y en Oceanía donde predominan los bosques tropicales, mientras que los pastizales y las sabanas están mejor representados en las regiones Paleártica y Afrotropical, y las tundras en las regiones Paleártica, Neártica y Antártica. La región Neotropical es, por mucho, la más diversa del mundo. Esto se debe, en parte, a que los bosques tropicales —los cuales tienen una

Cuadro 5.4 Distribución del número de especies y endemismos en las regiones biogeográficas terrestres del planeta.

Región biogeográfica	Superficie (millones de km ²)	Riqueza de especies				Endemismos			
		Anfibios	Aves	Mamíferos	Reptiles	Anfibios	Aves	Mamíferos	Reptiles
Australasia	0.92	545	1669	688	1,305	515	1,330	614	1,209
Antártica	3.28	0	36	0	0	0	15	0	0
Afrotropical	21.73	930	2,228	1,161	1,703	913	1,746	1,049	1,579
Indo-malaya	8.52	882	2,000	940	1,396	722	758	544	1,094
Neártica	20.42	298	696	481	470	235	58	245	175
Neotropical	19.38	2,732	3,808	1,282	2,561	2,660	3,217	1,061	2,258
Oceanía	0.05	3	272	15	50	3	157	10	26
Paleártica	52.74	395	1,528	903	774	255	188	472	438

alta diversidad de especies— cubren una proporción muy grande de la superficie de esta región. Sin embargo, la gran variedad de sus hábitats —que van desde los más secos hasta los más húmedos, desde el nivel del mar hasta la cimas de los Andes y a través de un intervalo latitudinal muy amplio— y una historia orográfica muy compleja son factores que también contribuyen a su gran diversidad. A pesar de que las áreas que ocupan las regiones Paleártica, Afrotropical y Neártica son mayores que las de la región Neotropical, los números de especies que aquéllas albergan son considerablemente menores (cuadro 5.4).

5.5 Los países megadiversos

Las naciones que albergan la mayor diversidad de especies en el mundo se conocen como **países megadiversos**. Para considerar que un país es megadiverso se utilizan varios criterios. El más sencillo es el hecho de que albergue al menos 5,000 especies de plantas superiores que sean endémicas de ese país. Actualmente se reconocen 17 países que cumplen con este criterio y que, por lo tanto, se consideran megadiversos. Entre ellos destacan Brasil, Indonesia, Colombia y México (cuadro 5.5). En conjunto, esos 17 países albergan entre 66 y 75% de la diversidad de especies del mundo, a pesar de que ocupan menos de 40% de la superficie del planeta. Estas últimas cifras ejemplifican otro de los criterios para determinar si un país es megadiverso: si la proporción de especies que alberga (respecto del número total que se conoce en el mundo) rebasa la proporción de tierra emergida que poseen (con respecto al área total de tierra emergida de todo el mundo).

Cuadro 5.5 Países megadiversos y número de especies de plantas y vertebrados que viven en cada uno.

País	Mamíferos	Aves	Reptiles	Anfibios	Plantas (en miles)
Brasil	524	1622	468	517	50–60
Indonesia	515	1531	511	270	37
Colombia	456	1815	520	583	45–81
México	530	1107	804	361	23.5
Australia	282	751	755	196	16
Madagascar	105	253	300	178	11–12
China	499	1244	387	274	27–30
Filipinas	201	556	193	63	8–12
India	350	1258	408	206	17
Perú	460	1760	365	315	18–20
Papua Nueva Guinea	242	760	305	200	15–21
Ecuador	369	1616	394	421	17–21
Estados Unidos de América	428	768	261	194	19
Venezuela	288	1360	239	204	15–21
Malasia	286	738	268	158	15
Sudáfrica	247	774	299	95	23
República del Congo	415	1094	268	80	11
Total mundial	5130	9721	8240	6035	270

En América Latina existen seis países megadiversos: Brasil, Colombia, Ecuador, México, Perú y Venezuela (cuadro 5.5). En cuanto a México, sabemos que en las dos terceras partes de su territorio en las que todavía hay cobertura vegetal natural (aunque no toda en buen estado de conservación), se presentan prácticamente todos los biomas del mundo (excepto la tundra, como vimos en la historia con la que inicia este capítulo). Este hecho contrasta con la escasa diversidad de otros países como Arabia Saudita que, a pesar de tener más o menos las mismas dimensiones y poseer una ubicación con una latitud similar a la de México, tiene una diversidad de biomas considerablemente menor. Se calcula que en los ecosistemas de México habita alrededor de 10% de las especies que hay en el mundo, a pesar de que el territorio mexicano representa alrededor de 1% de la superficie emergida del planeta (cuadro 5.5).

México tiene una importancia clave en la biodiversidad mundial. Por ejemplo, ocupa el primer lugar en el mundo en cuanto al número de especies de reptiles; además, 40% de las plantas y 66% de los anfibios que viven en México son endémicos del país. Asimismo, la mitad de las especies de pino, el 40% de los cactus conocidos y casi la mitad de los encinos del mundo se encuentran en México. Debe recordarse que, además de las especies ya descritas y cuya distribución se conoce, aún faltan muchas regiones del territorio nacional por explorar, por lo que el número real de especies que viven en México debe ser mucho mayor que el que actualmente se conoce (cuadro 5.6). La enorme biodiversidad que tiene México se debe a su compleja historia geológica, su accidentada topografía, su gran diversidad de climas y suelos, y su localización entre dos de los grandes océanos del mundo. Además, por su situación geográfica, en nuestro país coinciden especies originarias del norte y del sur del continente americano. La figura 5.9 muestra cómo el territorio de México corresponde a dos regiones biogeográficas diferentes. Estos factores crean un mosaico muy complejo de condiciones ambientales en el que un gran número de especies con características de vida, tolerancias y requerimientos muy diferentes encuentran posibilidades de establecerse y prosperar.

Cuadro 5.6 Número de especies conocidas y esperadas de los principales grupos taxonómicos en México.

GRUPO TAXONÓMICO	NÚMERO DE ESPECIES	
	conocidas	esperadas
Insectos	77,307	425,000
Plantas vasculares	23,522	31,000
Otros artrópodos	10,000	75,000
Otros invertebrados	15,000	23,846
Hongos	6,000	7,200
Algas	2,702	3,600
Peces	2,200	2,420
Musgos	1,480	2,000
Aves	1,107	1,167
Reptiles	804	812
Anfibios	361	371
Mamíferos	530	600

En el norte y parte del centro del país se encuentran las zonas áridas y semiáridas, caracterizadas por los distintos tipos de matorrales xerófilos y pastizales; en las planicies costeras y secas del Pacífico y del Golfo de México, así como en el noroeste de Yucatán, se localizan los bosques tropicales secos y semisecos; en las zonas más húmedas ubicadas por debajo de 900 m de altitud se presentan los bosques tropicales perennifolios, y por arriba de esa altitud, los bosques mesófilos de montaña o bosques de niebla. Finalmente, en las partes más elevadas de las grandes sierras de México se encuentran los bosques templados de coníferas y de encinos (figura 5.10).

México también es excepcional en su diversidad de ecosistemas marinos, ya que es uno de los países con mayor extensión de costas, tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico, incluyendo el Golfo de México y el Mar Caribe. Además, tiene un mar exclusivo, el Mar de Cortés o Golfo de California. Los ecosistemas marinos abarcan desde las aguas profundas hasta los ambientes costeros, incluyendo estuarios, lagunas costeras, marismas, manglares y arrecifes coralinos.

México no sólo es rico en cuanto al número total de especies que viven en su territorio, sino que en él también habitan numerosas especies endémicas. Se estima que en el país existen unas 15,000 especies de plantas endémicas, es decir, entre 50 y 60% de las especies conocidas hasta ahora en México son exclusivas del territorio mexicano. Esto significa que si provocáramos la desaparición de algunas de estas especies de los lugares donde existen, se extinguirían del planeta. En algunos grupos de plantas, como las cactáceas, el endemismo alcanza valores tan altos como 83%. Entre los reptiles y anfibios de México, 57 y 65%, respectivamente, corresponden a especies endémicas, mientras que en el caso de los mamíferos es de alrededor de 30%.



Figura 5.10 Mapa de la distribución de los principales biomas de México (tomado de http://www.tareas-ya.com/web_anterior/www/recursos/cn6_p_31.gif).

La biodiversidad a todos sus niveles (es decir, diversidad genética, de poblaciones, de especies y de ecosistemas) provee a la sociedad los bienes y servicios ambientales indispensables para su desarrollo, como veremos en el capítulo 6. Sin embargo, es una pena que, como sociedad, no hayamos logrado todavía concebir a la biodiversidad como parte del patrimonio natural de cada nación de forma que podamos sentir orgullo por ella. Si pudiéramos apreciar nuestra biodiversidad, también sentiríamos un gran sentido de responsabilidad en cuanto a su protección y buen uso.

El empleo que el ser humano hace de la biodiversidad ha llevado a una transformación profunda de la naturaleza. En muchos casos, la intervención humana ha sido la causa de la extinción de especies, así como de la pérdida y deterioro de los ecosistemas naturales. Nos ocuparemos de estos temas en los capítulos 7 y 8.

Si no llegamos a comprender la importancia de la biodiversidad, nunca lograremos valorarla y, mucho menos, conservarla. En la mayoría de los países, la biodiversidad y su conservación son temas que no tienen una alta prioridad en la agenda de los gobiernos, ni tampoco de las organizaciones sociales; por desgracia, ni la sociedad ni los gobiernos le conceden la prioridad que merece. Por eso, es urgente impulsar formas de desarrollo diferentes que permitan hacer un uso adecuado de la biodiversidad para lograr el bienestar social, pero sin destruir los recursos naturales que le dan sustento. Estudiaremos estos temas en los capítulos 9 y 10.



Para reflexionar...

1. ¿Por qué crees que el número de especies que habitan en un lugar sea la característica que más se asocia con su biodiversidad? ¿Por qué los componentes de variabilidad genética y diversidad de poblaciones con frecuencia se pasan por alto?
2. ¿Cómo afectan tu vida cotidiana los organismos de cada uno de los cinco reinos que mencionamos en la sección 5.3?
3. Elabora una lista de los productos agrícolas que consumes a lo largo de un día. ¿En qué medida crees que esta lista refleja la gran biodiversidad de nuestro país?
4. En cualquier lugar del planeta el estado del tiempo cambia constantemente y las condiciones climáticas nunca son iguales de un año a otro. ¿Qué importancia crees que tenga la variabilidad genética entre los individuos de una población de animales o plantas ante esta realidad?
5. ¿Crees que los países megadiversos tienen una mayor responsabilidad en el cuidado de sus ecosistemas naturales que los países que tienen una biodiversidad menos rica? ¿Consideras que los países con una baja biodiversidad deben tener injerencia en el manejo de la biodiversidad de los países megadiversos?



Actividades complementarias

1. Menciona tres ejemplos de organismos de cada uno de los cinco reinos que mencionamos en la sección 5.3. ¿Cuáles de estos reinos te son más familiares?
2. Investiga cuántas especies de mamíferos, reptiles, anfibios y plantas superiores son endémicas de la entidad federativa de la República Mexicana en la que vives.
3. Averigua cuántos biomas están representados en la entidad federativa en la que habitas. Traza un mapa de tu entidad federativa en el que representes la delimitación aproximada de esos biomas.
4. Elabora una lista de los productos agrícolas que consumes a lo largo de un día. Investiga cuáles de ellos provienen de plantas nativas de México y cuáles provienen de otras regiones del mundo (recuerda que un organismo nativo de una región es aquel que surgió por primera vez en ese lugar, aunque después los seres humanos lo hayan llevado a otras partes del mundo).
5. Visita un mercado de plantas de ornato en tu localidad. Pregunta a los vendedores el nombre y el origen de las plantas que venden. ¿Qué tan bien refleja este mercado de plantas la biodiversidad de la región en la que vives?

UNIDAD II

Recursos naturales y deterioro ambiental

● CAPÍTULO 6 ●

Recursos naturales y servicios ambientales

6.1 Para la imaginación

Mi hermanita Rosa tiene 8 años y está en la edad del “por qué”. Se la pasa preguntando todo tipo de cosas extrañas y ¡se le ocurre cada pregunta...! El otro día, a la hora de la comida, preguntó si la sopa de coditos venía de la planta de los coditos. Yo le dije que cómo se le ocurría tal locura y que siguiera comiendo. Pero después me quedé pensando...: “¿de dónde viene la sopa de coditos?” Pues de la tierra, ¡claro!: la pasta con la que se cocina la sopa se hace de trigo, y el trigo se siembra en la tierra; una vez que está maduro, se cosecha el grano y con él se produce harina, con la que después se elabora la pasta, la cual se empaqueta, se transporta y termina en un estante del supermercado. Además, para hacer el paquete de cartón en el que se vende la sopa de pasta, se requiere papel, que viene de la madera de los árboles de nuestros bosques. Y el proceso de empaquetado y transporte de la pasta utiliza máquinas hechas de hierro, acero y otros metales, los cuales también se extraen de la tierra. Y por último, los camiones que transportan el trigo a la fábrica de pasta y después llevan los paquetes de sopa al supermercado utilizan diésel o gasolina, que se deriva del petróleo, el cual también se extrae del subsuelo. ¡Qué complejo y a la vez qué maravilloso! Y si me pongo a pensar en todo lo que consumo y todo lo que tengo: desde mi desayuno en el que acostumbro incluir huevos revueltos, hasta la camiseta de algodón y los zapatos de cuero que traigo puestos, me doy cuenta que todo viene finalmente de la tierra.

Mi hermanita Rosa también preguntó una vez: “¿Y si se acabara la gasolina de las gasolineras?”. Ese día también le dije: “¿Cómo crees?”. Pero de verdad me hace pensar... ¿Qué pasaría si se acabara

el petróleo, como algunos científicos aseguran que va a suceder? ¿O si la tierra se erosionara y perdiera su capacidad para producir maíz y trigo? En ese caso, ¡lo de menos será que dejemos de comer sopa de coditos!

6.2 Servicios ambientales

Desde nuestro origen, los seres humanos hemos dependido, directa o indirectamente, de los ecosistemas naturales, pues hacemos uso de ellos para resolver nuestras necesidades básicas y para nuestro desarrollo. De los ecosistemas obtenemos alimentos, agua, madera, fibras, tintes, combustibles, energía y minerales, entre muchos otros productos que satisfacen nuestras necesidades. A estos bienes que se extraen de la naturaleza les hemos llamado históricamente **recursos naturales** y los revisaremos en detalle en la sección 6.3. Pero antes de entrar en ese tema, es importante tener conciencia de que la disponibilidad y la existencia misma de muchos de estos recursos naturales dependen de que los ecosistemas de los que provienen funcionen de manera sana y continua. En otras palabras, la disponibilidad y la existencia de los recursos naturales dependen de que los procesos naturales que los producen, tales como los ciclos de nutrientes, la formación de suelo, el ciclo del agua y la polinización de las plantas, entre muchos otros, se lleven a cabo sin interrupción.

Además de los recursos naturales, que generalmente podemos reconocer y apreciar fácilmente como miembros de la sociedad moderna, la presencia misma de los ecosistemas también brinda a la sociedad un conjunto de beneficios importantes que son menos tangibles. Entre ellos podemos mencionar la purificación del aire y del agua, la regulación de los ciclos hidrológicos y el mantenimiento del equilibrio de gases en la atmósfera que determina el clima regional. De hecho, la humanidad no sólo ha obtenido de los ecosistemas naturales una gran cantidad de bienes materiales necesarios para su desarrollo y bienestar social, sino que también ha encontrado en la naturaleza los elementos necesarios para su bienestar espiritual y cultural. Los diferentes elementos que componen la naturaleza han estado siempre y en todas las culturas vinculados a las creencias, a nuestro placer de observar los paisajes naturales y los seres vivos y, más recientemente, al profundo respeto por el proceso que conocemos como evolución biológica, que durante un tiempo increíblemente largo ha permitido el surgimiento de millones de especies.

Al conjunto de elementos que el ser humano obtiene de la naturaleza y a las múltiples funciones que desempeñan los ecosistemas naturales proveyendo estabilidad climática, belleza paisajística, equilibrio ecológico, espacios de recreación, entre otros, se les denomina **servicios ambientales** o **servicios ecosistémicos**, pues de ellos se benefician las sociedades humanas para lograr desarrollo y bienestar. En virtud de la complejidad y diversidad de los procesos y fenómenos reconocidos como servicios ambientales, éstos se han clasificado en cuatro grandes subconjuntos con la finalidad de comprenderlos, estudiarlos y valorarlos mejor: 1) servicios de aprovisionamiento o suministro; 2) servicios de regulación; 3) servicios culturales, y 4) servicios de soporte. En el cuadro 6.1 se presentan definiciones y ejemplos de cada uno.

Una característica importante de los servicios ambientales es que todos ellos interactúan entre sí y dependen unos de otros. Esto significa que si queremos contar con ellos de forma permanente, es fundamental mantener las funciones de los ecosistemas en armonía. Por ejemplo, la polinización de las plantas (un servicio de regulación) es esencial en la producción de alimentos y fibras (un servicio de soporte); los insectos herbívoros son esenciales para el control de las plagas (servicio de regulación); los arrecifes de coral ofrecen hábitat y alimento para los peces (servicio de aprovisionamiento) y al

Cuadro 6.1 Clasificación de los servicios ambientales. (Fuente: Millenium Ecosystems Assessment (2006). *Ecosystems and Human Well-being*. Island Press, Washington, D. C.)

Tipo	Definición	Ejemplos
Servicios de aprovisionamiento o suministro	Productos que se obtienen de los ecosistemas	Alimentos Agua pura Madera/leña Combustibles Fibras Bioquímicos Recursos genéticos
Servicios de regulación	Beneficios obtenidos a partir de la regulación de los procesos de los ecosistemas	Servicios climáticos Control de enfermedades Regulación de agua Purificación del agua Polinización
Servicios culturales	Beneficios intangibles que se obtienen de los ecosistemas	Enriquecimiento espiritual y religioso Recreación y ecoturismo Belleza escénica Educativo Herencia de valores
Servicios de soporte	Servicios necesarios para la producción de todos los demás servicios ambientales	Formación del suelo Ciclo de nutrientes Producción primaria

mismo tiempo protegen las costas, evitan la erosión de las playas, estabilizan los sedimentos y contribuyen a la fijación de carbono (servicios de regulación y soporte).

La red de interacciones de las que dependen los servicios ambientales es extraordinariamente compleja y, al mismo tiempo, vulnerable. Sin embargo, por lo general damos por hecho que la naturaleza se encarga de llevar a cabo todas estas funciones y las concebimos como algo que siempre ha existido y existirá, y pocas veces reflexionamos sobre su origen o sobre los fenómenos que amenazan su permanencia.

Los beneficios que proveen los servicios ambientales son evidentes para muchos científicos, en especial para los ecólogos, así como para los conservacionistas y algunos miembros de otros sectores de la sociedad. No obstante, es innegable que la mayoría de los seres humanos todavía no reconocen la importancia vital de estos beneficios; más bien, es común que las sociedades se den cuenta de la función que desempeñaban los ecosistemas naturales sólo cuando éstos han desaparecido o se encuentran sumamente dañados. Veamos un ejemplo de esta situación. Los bosques que se encuentran en las partes altas de las montañas ofrecen el servicio ambiental de conservar el suelo y evitar su **erosión**. Cuando los árboles se talan y los bosques desaparecen, este servicio ambiental se suspende: como ya no hay una cubierta vegetal que dé cohesión al suelo, el agua de la lluvia lo arrastra hacia las partes

bajas de las montañas. La eliminación de la cubierta vegetal, fenómeno conocido como **deforestación**, y sus consecuencias sobre la erosión del suelo causan a su vez el **azolve** de ríos y presas. De hecho, muchas presas hidroeléctricas, cuya construcción impone costos altísimos a la sociedad, tienen una vida útil considerablemente más corta que la calculada durante su planeación debido a la deforestación y la consecuente erosión. A pesar de que las sociedades intentan resolver estos problemas por medio de la aplicación de diferentes tecnologías, en muchas ocasiones no hay soluciones tecnológicas, y cuando las hay, su aplicación puede ser tan costosa que sencillamente no resultan viables.

En lo que resta de este capítulo nos centraremos en el análisis y la discusión de los recursos naturales que constituyen los servicios ambientales de aprovisionamiento. Más adelante, hablaremos de los problemas asociados con el deterioro y la desaparición de éstos y otros servicios ambientales (capítulos 7 y 8), así como de las opciones de manejo de los ecosistemas que nos permitirán lograr un desarrollo sostenible, gozando de la permanencia de los servicios ambientales en su conjunto (capítulos 9 y 10).

6.3 Recursos naturales

El término **recursos naturales** se utiliza para referirse a los servicios ambientales de aprovisionamiento o suministro, es decir, a aquellos elementos que el ser humano extrae de la naturaleza y que constituyen la base material del sostén de las sociedades humanas. El desarrollo de toda nación depende en gran medida de sus recursos naturales, pues éstos son la base de las actividades productivas y éstas, a la vez, constituyen el sustento de su economía. Las actividades productivas son aquellas que permiten la acumulación de capital y se dividen en actividades primarias (como la ganadería y la agricultura, que se dedican directamente a la extracción de los recursos), actividades secundarias (como la industria, que transforma los recursos) y actividades terciarias, relacionadas con los servicios (por ejemplo, los talleres mecánicos, los restaurantes, las tintorerías, las peluquerías, las clínicas de salud, entre muchos otros). Todas ellas tienen una relación estrecha con los recursos naturales pero, por su naturaleza, las actividades primarias son las que dependen más directamente de los recursos naturales.

Los recursos naturales se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos: *renovables* y *no renovables*. Entre los **recursos renovables** encontramos a aquellos que, aun cuando los seres humanos los extraigan de la naturaleza, tienen la capacidad de reponerse a sí mismos, o mejor dicho, de reaprovisionarse de manera natural. Ejemplos de recursos naturales renovables son los que provienen de organismos vivos (como los peces marinos que comemos o la madera para la construcción), así como el suelo y el agua. Por el contrario, los **recursos no renovables** no se reconstituyen una vez que se les extrae de la naturaleza (o lo hacen muy lentamente), de tal manera que su extracción conduce poco a poco a su agotamiento; tal es el caso de los minerales, entre ellos el petróleo (figura 6.1). En la actualidad muchas personas piensan que esta división entre recursos naturales renovables y no renovables es cada vez menos clara y hasta cierto punto engañosa, ya que el mal uso de algunos recursos naturales que se consideraban renovables los puede convertir en no renovables si se rebasa su capacidad de renovación o si se extraen a una velocidad mayor de la que la naturaleza es capaz de regenerarlos.

La obtención de los recursos naturales de la naturaleza puede hacerse de forma directa y sin necesidad de transformar profundamente los ecosistemas (por ejemplo, como ocurre con la extracción de agua de un río, la tala de árboles para la producción de madera, o con la extracción de algunas especies de peces marinos), o bien, transformando los ecosistemas por completo para utilizar el suelo fértil en la obtención de productos agrícolas y ganaderos. Los impactos que tienen las actividades humanas sobre

la naturaleza, ya sea al utilizarla directamente o al transformarla de una u otra manera para obtener los recursos necesarios, pueden ser muy variados y diferentes, dependiendo de la magnitud de la intervención y de la tecnología utilizada. Sus repercusiones y efectos sobre ciertas funciones de los ecosistemas dependerán de estos factores, como se explica en los capítulos 7 y 8. Por ejemplo, el aprovechamiento de la capacidad productiva de los suelos fértiles de los ecosistemas naturales permite la obtención de alimentos indispensables para la población humana, pero con ello se afecta la captación de agua, disminuye la captura de carbono, se erosiona el suelo, se empobrece la calidad del hábitat para la flora y la fauna nativas, y disminuye la propia disponibilidad de bienes y otros servicios. En algunos casos no hay alternativa y los efectos de la intervención humana son inevitables, aunque su impacto puede mitigarse empleando tecnologías adecuadas. Sin embargo, en otros casos, los daños provocados a la naturaleza son irreversibles y la disminución de sus efectos negativos es muy costosa, como sucede con la deforestación en las partes altas de las cuencas o la contaminación de las aguas de las lagunas costeras por agroquímicos.

En las siguientes secciones haremos una revisión general de los principales recursos naturales que el ser humano obtiene de la naturaleza, ya sea directamente o a través de su transformación y manejo.

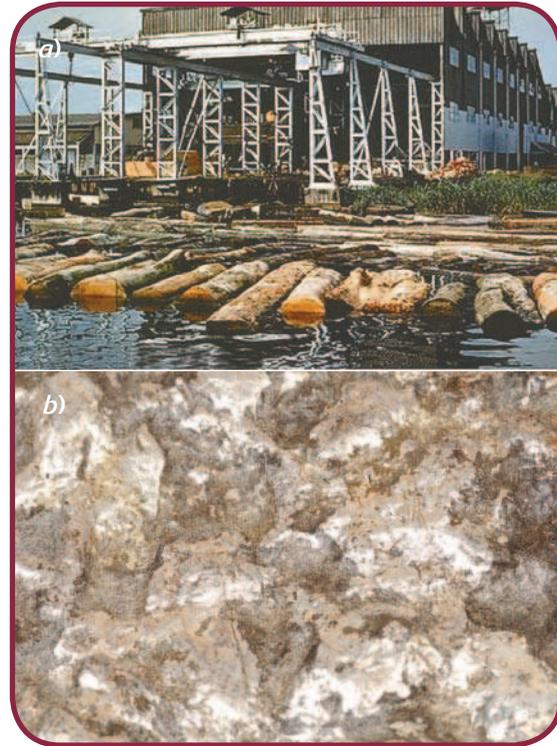


Figura 6.1

a) La madera que se extrae de los bosques es un ejemplo de recurso natural renovable. b) La plata es un recurso natural no renovable. En esta imagen se muestra un fragmento de roca con incrustaciones de plata, que es la forma en que se encuentra este mineral en la naturaleza.

6.3.1 El agua como recurso

La importancia del agua como recurso para los seres humanos es evidente. No hay ninguna duda de que las sociedades humanas dependen del acceso al agua, pues ésta se utiliza tanto para consumo directo como para la manutención de actividades agrícolas y ganaderas, para la industria, la generación de energía y un sinnfín de otras actividades. Analicemos la problemática que rodea al uso del agua como recurso.

Disponibilidad del agua

Al ver una imagen de la Tierra tomada desde el espacio, destaca su color azul. Esto se debe a que 70% de su superficie se encuentra cubierta por agua, mientras que el resto corresponde a los continentes. Por esta razón uno podría pensar que la disponibilidad de agua en el planeta es infinita, es decir, que

este recurso sería suficiente e incluso ilimitado para cubrir las necesidades humanas y para garantizar el funcionamiento permanente de los ecosistemas, en particular el de los terrestres. Sin embargo, hoy sabemos que esta idea es completamente errónea. Veamos por qué.

Una altísima proporción del agua que existe en nuestro planeta (97.5%) es salada y únicamente 2.5% es agua dulce. Esto representa una seria limitación, pues sólo el agua dulce es útil para beber, así como para regar nuestros cultivos y mantener a nuestro ganado. Además, de esta pequeña fracción del agua de la Tierra que corresponde a agua dulce, la mayor parte no puede utilizarse porque está congelada en los casquetes polares y en las nieves perpetuas de las montañas, o bien, porque se encuentra en depósitos subterráneos a profundidades inaccesibles. De hecho, el agua disponible en el planeta para abastecer a los ecosistemas y a la población humana, entre aguas subterráneas accesibles y superficiales, corresponde sólo a 0.55% del total de agua dulce y a 0.01% del agua total del planeta (figura 6.2).

La demanda total de agua ha crecido mucho en los últimos años ante el vertiginoso crecimiento de la población humana en todo el mundo. En un periodo de 100 años esta demanda pasó de cerca de 80 a 6,000 km³ por año. En consecuencia, la cantidad de agua disponible

por habitante es actualmente una tercera parte de la que se tenía en 1970, y muchos países ya sufren una aguda escasez de agua (cuadro 6.2). Si esta tendencia no cambia, para el año 2025 dos terceras partes de la población mundial vivirán en países con recursos hídricos insuficientes. En México, cuyo territorio presenta naturalmente una alta proporción de regiones semiáridas, el panorama también es

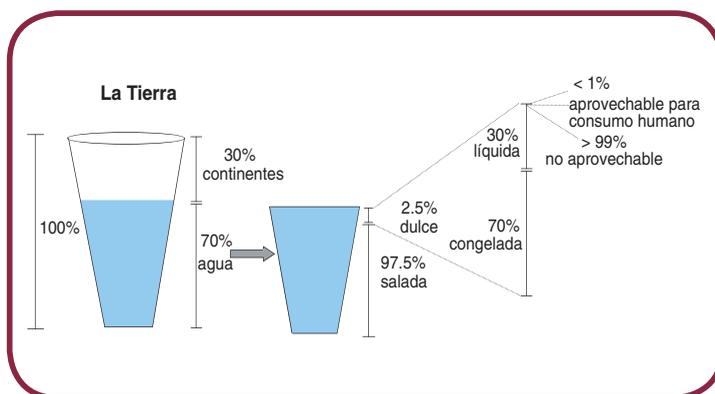


Figura 6.2

Disponibilidad de agua dulce en el mundo. Sólo una pequeña fracción del agua de la Tierra es adecuada para el consumo humano y se encuentra disponible.

Cuadro 6.2 Disponibilidad promedio de agua per cápita en diversos países.

País	Disponibilidad (miles de m ³)
Canadá	99.7
Brasil	43.3
Argentina	29.1
Bangladesh	20.0
Indonesia	13.3
Estados Unidos de América	9.5
México	4.9
Japón	4.4
Turquía	3.3
Nigeria	2.9
China	2.4
India	2.3
Egipto	1.0

alarmante. La disponibilidad total de agua en el país es de 72.6 km³. Como consecuencia del incremento de la población humana y del mal uso que se ha dado a este recurso, en los últimos 10 años la cantidad de agua disponible por habitante ha descendido de 11,000 a 4,900 m³ anuales. A este ritmo, se espera que en 25 años sea de 2,500 m³ anuales por persona. Como es evidente, esta disminución resulta alarmante y puede llegar a provocar conflictos sociales muy importantes, tanto en México como en el resto del mundo.

Distribución del recurso hídrico

El agua no se distribuye de manera homogénea ni en el espacio ni en el tiempo. La desigualdad en su distribución en las diferentes regiones del mundo hace que haya diferencias muy marcadas tanto entre continentes como entre naciones, al igual que entre las distintas regiones de algunos países. Así como hay regiones que cuentan con grandes cantidades de agua, hay otras, quizá la mayoría, que sufren escasez. En realidad, las grandes acumulaciones de agua dulce superficial en forma de lagos y ríos se concentran en muy pocos lugares del planeta; por ejemplo, el lago Baikal, localizado en Siberia, en Asia Central, contiene casi la quinta parte (18%) del agua de todos los lagos del mundo. Asimismo, los ríos que forman el sistema amazónico en América del Sur ocupan el primer lugar mundial por la magnitud de su descarga promedio de agua (175,000 m³/segundo).

Además de esta notable heterogeneidad espacial, en la mayor parte de la superficie del planeta la distribución del agua también varía dependiendo de la época del año. Por ejemplo, en algunas regiones las lluvias se registran en el verano, mientras que los inviernos suelen ser muy secos. Otras regiones, por el contrario, reciben la mayor cantidad de lluvia en el invierno. Son pocas las regiones donde la lluvia se distribuye de forma homogénea a lo largo del año. En la mayor parte del territorio mexicano los meses con mayores cantidades de precipitación son los del verano, como se observa en la figura 6.3, mientras que la cantidad de lluvia que cae durante la primavera suele ser mínima.

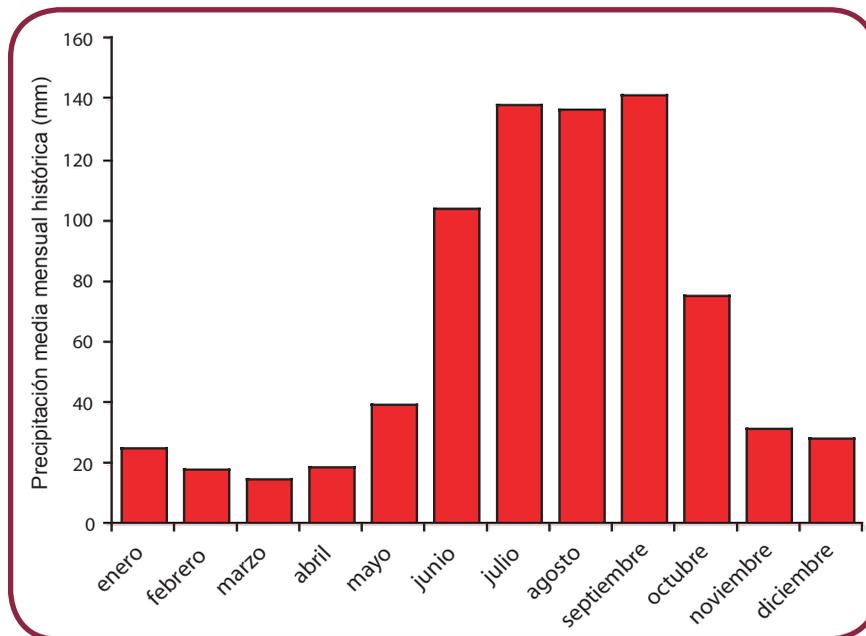


Figura 6.3

Distribución temporal de la precipitación en México, con base en datos de un periodo de 65 años (1941-2005). (Fuente: Comisión Nacional del Agua (2006), *Estadísticas del Agua en México*, CNA, México).

En muchos países la precipitación pluvial también se distribuye de manera desigual dentro de su territorio, dando lugar a diferencias en la disponibilidad del recurso hídrico para los habitantes de cada región. En México, por ejemplo, la disponibilidad de agua en el estado de Baja California es de 100 m³ por habitante al año, mientras que en Chiapas es de 17,000 m³/habitante/año. En el sur del país, en una zona que abarca sólo 20% del territorio nacional y donde habita 24% de la población, se recibe 80% de la precipitación pluvial total de México. En contraste, en el centro y el norte del país (80% del territorio; 76% de la población) la precipitación equivale únicamente a 20% del total.

Uso del agua

Durante el siglo XX el consumo de agua en el mundo se incrementó de manera drástica. En la actualidad, del agua que utilizan las poblaciones humanas a nivel mundial, la mayor cantidad se destina a la agricultura (83%) y proporciones menores se destinan al consumo urbano (12%) y a las industrias (5%) (figura 6.4). El uso agrícola del agua implica básicamente el riego que se aplica a los cultivos, mientras que el uso urbano se refiere mayoritariamente al agua que se utiliza para el funcionamiento doméstico. El agua destinada a las industrias tiene funciones muy diversas y, como se observa en la figura 6.4, el incremento en la demanda de agua por parte de este sector también ha sido notable en los últimos 60 años. En México el panorama no es muy diferente: de los 72.6 km³ de agua que están disponibles de forma natural, más de tres cuartas partes (77%) se utilizan para uso agropecuario, mientras que 13% se destina para el abastecimiento público (urbano) y otro 10% para la industria autoabastecida, es decir, la que no utiliza agua de la red urbana, sino que la obtiene de fuentes naturales (figura 6.5).

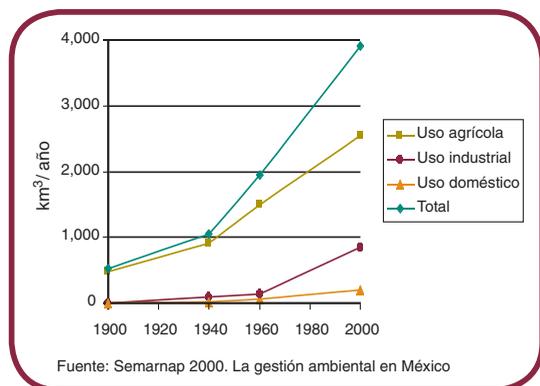


Figura 6.4

Distribución porcentual de los distintos usos del agua. En las últimas décadas la demanda mundial de agua ha aumentado notablemente, en particular por parte de los sectores agrícola e industrial.

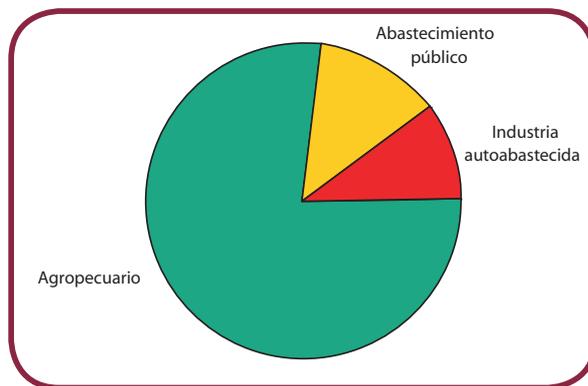


Figura 6.5

Distribución porcentual de los distintos tipos de uso del agua en México. (Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2004).

6.3.2 El suelo como recurso

El suelo es el sustrato sobre el que se establece la vegetación. Se trata de un componente ecosistémico de gran importancia, pues es fuente de minerales y alimentos, además de que desempeña un papel como filtrador del agua, manteniendo los **mantos freáticos** y el medio físico donde se establece la

infraestructura para el desarrollo humano. Por ello, el suelo también constituye un recurso natural indispensable para la vida en el planeta y para el desarrollo de la humanidad.

En un sistema ecológico bien conservado, el suelo se renueva constantemente: el proceso de formación del suelo involucra el intemperismo de las rocas (es decir, la desintegración de las rocas en fragmentos más pequeños), así como la descomposición de la materia orgánica proveniente de los seres vivos, como vimos en el capítulo 4. El proceso de formación o renovación del suelo, así como las funciones que cumple a nivel ecosistémico, se consideran servicios ambientales de soporte. Por esta razón, el suelo se concibe como un recurso natural renovable. Sin embargo, debido al largo tiempo que lleva su formación, y en caso de alteración, al tiempo que le lleva recuperarse, se le ha comenzado a reconocer como un recurso natural no renovable en la escala humana de tiempo. Esta situación ilustra de nuevo la dificultad de poner una línea divisoria clara entre los recursos naturales renovables y los no renovables.

Las sociedades humanas han aprovechado la capacidad de los ecosistemas naturales para generar suelos ricos en nutrientes sobre los cuales se puede establecer vegetación, pues han utilizado los suelos fértiles para cultivar un sinnúmero de especies de plantas que sirven como alimento ya sea directa o indirectamente. Este uso del suelo implica la transformación del ecosistema original eliminando la vegetación natural, con la finalidad de utilizar ese sustrato como fuente de nutrientes para la producción de cultivos agrícolas o de forrajes de uso ganadero. La magnitud de los efectos de esta transformación de los ecosistemas naturales, así como su reversibilidad, dependen de las tecnologías que se utilicen, como se verá en el capítulo 7. A continuación analizaremos brevemente el tipo de productos que se obtienen de la agricultura y la ganadería como derivados del uso del suelo, con especial énfasis en los sistemas agrícolas y ganaderos de México.

Sistemas agrícolas

La agricultura consiste en el cultivo de especies vegetales de las cuales se obtienen diversos productos, entre los que destacan los granos básicos, las legumbres, las frutas, las hortalizas (frecuentemente denominadas verduras) y el forraje. En general, los sistemas agrícolas tienen una mayor productividad (es decir, de ellos se obtienen mayores rendimientos) en tierras relativamente planas y fértiles, así como en regiones con climas húmedos. Sin embargo, a causa de la complejidad orográfica de México y de su posición geográfica en el planeta (es decir, con su territorio dividido por el Trópico de Cáncer en dos partes más o menos iguales), es frecuente que se practique la agricultura en terrenos inclinados, poco fértiles y localizados en regiones de clima semiárido. Cultivar en terrenos inclinados es una de las principales causas de la erosión.

En México, que cuenta con casi 200 millones de hectáreas de superficie, el área dedicada a las actividades agrícolas cubre aproximadamente 25 millones de hectáreas. Unas tres cuartas partes de las tierras agrícolas son de temporal, es decir, dependen totalmente del agua de la lluvia para su producción, mientras que sólo 25% corresponde a agricultura de riego (figura 6.6). La superficie de riego está concentrada en el norte del país. De hecho, 72% de la superficie agrícola de riego se encuentra en los estados de Michoacán, Sinaloa, Guanajuato, Baja California, Coahuila, Tamaulipas y Sonora. Por su parte, la agricultura de temporal se practica en todos los estados, aunque con mayor frecuencia en los ubicados en la parte sur del país.

Una forma muy importante de agricultura de temporal en muchas regiones indígenas y campesinas de México es la conocida como **agricultura de roza, tumba y quema**. Esta técnica consiste en preparar el terreno a partir de “rozar, tumbar y quemar” la vegetación original, abriendo así superficies de tierra para la siembra. Estas superficies generalmente miden de 2 a 5 hectáreas y se siembran anualmente por un periodo más o menos corto (de dos a cinco años). Al cabo de este tiempo, los terrenos se abandonan para que se recuperen mediante un proceso de regeneración o **sucesión secundaria**


Figura 6.6

a) Tierras agrícolas de riego y
b) tierras agrícolas de temporal.

(véase el capítulo 3, sección 3.9.2). Durante ese periodo de descanso, que se conoce como **barbecho**, la parcela comienza a cubrirse de nuevo por la vegetación natural de la zona, la cual empieza a establecerse poco a poco. El cultivo principal que se siembra en las parcelas de roza, tumba y quema en México es el maíz, aunque es frecuente que se le siembre junto con otros productos (por ejemplo, frijol y calabaza), lo que da lugar a los **policultivos**.

Por sus características, la agricultura de roza, tumba y quema se practica de manera *itinerante*, es decir, las tierras cultivadas se van moviendo de un lugar a otro. En los tiempos en que la vegetación natural era abundante, las parcelas agrícolas se encontraban siempre inmersas en grandes extensiones de masas forestales (por ejemplo, en las selvas tropicales). Cuando este sistema se aplicaba con cuidado de acuerdo con las pautas de movilidad y descanso de las parcelas, resultaba ecológicamente ventajoso, pues como la tierra nunca se dejaba desnuda por tiempos prolongados, el suelo no se perdía por erosión; además, como no se utilizaba el mismo terreno por mucho tiempo, sus nutrientes no se agotaban. Sin embargo, después de muchos años de este tipo de prácticas, la vegetación original se ha perdido en una alta proporción,

de manera que en la actualidad es muy escasa y se encuentra muy fragmentada; las parcelas ya no están rodeadas de vegetación natural, sino de otros cultivos o potreros. Además, los periodos de descanso de la tierra son cada vez más cortos. Como resultado de estas modificaciones, la vegetación no alcanza a recuperarse totalmente, lo que da lugar a **bosques secundarios** jóvenes y con escaso desarrollo. Asimismo, como la vegetación está poco desarrollada, la hojarasca que cae y el mantillo que produce no son suficientes para permitir un adecuado reciclaje de los nutrientes.

Numerosas comunidades campesinas de diversos países del mundo, en particular las de Mesoamérica, utilizaron ampliamente la agricultura de roza, tumba y quema. Sin embargo, actualmente éste se ha convertido en un sistema de producción insostenible, ya que se originó y desarrolló en condiciones radicalmente diferentes de las actuales. Por ejemplo, la superficie con la que cuenta cada campesino para llevar a cabo esta práctica se ha reducido, la mano de obra es cada vez más escasa y más cara, y es frecuente la aplicación de agroquímicos con la finalidad de prolongar el tiempo de uso del suelo. Además, el uso del fuego en la apertura y preparación de las tierras se ha convertido en la causa más importante de generación de incendios forestales y la tumba es uno de los principales factores de deforestación en los ecosistemas tropicales.

En general, tomando en cuenta tanto la agricultura de riego como la de temporal (en donde entra la práctica de roza, tumba y quema), la mayor parte de la superficie agrícola de México se destina a la producción de maíz, trigo, sorgo y frijol. Otros cultivos importantes en términos de la derrama

económica que producen, aunque no ocupan una superficie muy amplia, son el tomate (o jitomate), el algodón, la soya y la papa (que son cultivos anuales), así como el café, la caña de azúcar y la alfalfa (que son cultivos perennes). Los productos agrícolas más importantes de México incluyen tanto granos básicos como oleaginosas, frutas y hortalizas, y especies forrajeras.

Granos básicos. Los principales granos básicos que se cultivan en nuestro país son el maíz, el frijol y el trigo.

- **Maíz:** El maíz es el cultivo más importante en México, tanto por su producción en términos económicos, como por la superficie que ocupa y el consumo que se hace de él (figura 6.7). A la fecha, entre 7 y 8 millones de hectáreas están dedicadas a la producción de este grano, de las que se cosecha un poco más de 20 millones de toneladas de maíz anualmente. Sin embargo, la producción de maíz es fluctuante dependiendo de los precios y de la introducción de otros cultivos que lo desplazan, como los forrajeros, entre los que se incluye el sorgo. De la superficie dedicada a la producción de maíz, 87% corresponde a tierras de temporal y sólo 13% a tierras de riego. La mayor parte de las tierras productoras de maíz a través de agricultura de temporal se concentran en Chiapas, Jalisco y el Estado de México. Un dato interesante es que la mayor parte del maíz mexicano es producido por ejidatarios y campesinos, mientras que la agricultura empresarial contribuye con menos de 10% de la producción nacional de este grano básico.



Figura 6.7

El maíz es el producto agrícola más importante de México.

Como el maíz se cultiva principalmente en tierras de temporal, su productividad es muy baja, cercana a 1.7 ton/ha, mientras que los terrenos de riego llegan a rendir cerca de 4 ton/ha.

- **Frijol:** En México cerca de 12% de la superficie de temporal se encuentra dedicada a la producción de diversas variedades de frijol. Casi la tercera parte del área cultivada con este producto se concentra en San Luis Potosí, Zacatecas, Durango y Chihuahua. La producción anual de frijol es de 1.2 millones de toneladas en 1.7 millones de hectáreas.
- **Trigo:** Este cultivo se siembra principalmente en áreas de riego, pues en terrenos de temporal su producción es muy baja. La superficie sembrada cada año oscila alrededor de 654 mil hectáreas. En años recientes el trigo ha ocupado áreas que antes estaban sembradas por maíz, especialmente porque su consumo ha aumentado en los estratos socioeconómicos medios de la población. Cerca de 15% de la superficie de riego se dedica a la producción de trigo. En total se producen cerca de 635 mil toneladas anuales de este grano básico.

Oleaginosas. En este grupo se incluyen las especies vegetales que producen semillas con altos contenidos de grasas, razón por la cual se utilizan para la extracción de aceites. Entre estos cultivos se cuentan el ajonjolí, el algodón (por su semilla), el cártamo, el girasol, la soya y el cacahuate. Desde la década de 1940 a la fecha, la superficie dedicada al cultivo de oleaginosas se ha incrementado

notablemente. Por ejemplo, en 1940 los sembradíos de oleaginosas ocupaban 1.2% de toda el área agrícola, mientras que para 2005 ya ocupaban 5.5%, es decir, alrededor de 500,000 hectáreas.

Frutas y hortalizas. Algunos de los productos más importantes en México en este rubro son el ajo, la cebolla, el chile (figura 6.8), la calabaza, el haba, la papa, el jitomate, la fresa, el melón, la sandía y el mango. Su cultivo se lleva a cabo mayoritariamente en terrenos de riego y una gran parte de la producción a nivel nacional se dedica a la exportación. La superficie sembrada para frutas es de 1,200,000 hectáreas y para hortalizas de 600,000 hectáreas.



Figura 6.8 El chile es una de las verduras (o legumbres) que más se consumen en México.

Especies forrajeras. Una gran parte del área agrícola de México se utiliza para producir forraje, es decir, material vegetal destinado a la alimentación del ganado de diversos tipos. Entre las especies de mayor uso forrajero se encuentran

el sorgo, la alfalfa, la cebada, la avena, el maíz forrajero y otros tipos de pastos (figura 6.9). La cebada también se destina a la producción de cerveza, pero la proporción que se utiliza para este fin (30%) es mucho menor que la que se destina al uso forrajero (70%). Por otra parte, sólo 10% de la avena que se produce se destina al consumo humano directo, mientras que 90% se utiliza como forraje.



Figura 6.9 Muchas de las especies de pastos que se siembran en tierras de temporal se utilizan como forraje.

Sistemas ganaderos. La ganadería consiste en la cría de diversas especies de animales con la finalidad de obtener de ellos carne u otros productos (huevo, leche, queso, cuero, etcétera). Existen dos maneras muy diferentes de llevar a cabo actividades ganaderas: la *ganadería extensiva*, que consiste en utilizar grandes superficies de terreno, en su mayor parte cubiertas por vegetación silvestre, de donde el ganado obtiene directamente sus recursos alimenticios al ir pastando de un lugar a otro, y la *ganadería intensiva*, que consiste

en la cría de ganado en áreas confinadas a las que se hacen llegar recursos alimenticios apropiados para los animales, como forrajes, alimentos industriales y complementos nutritivos específicos.

El ganado se clasifica en diferentes tipos, según las especies de animales de que se trate. En términos generales, se reconoce al ganado bovino o vacuno (vacas), al ovino (ovejas), al caprino (cabras) y al porcino (cerdos). La avicultura también forma parte de la actividad ganadera.

Ganado bovino. Actualmente, la superficie dedicada a la ganadería bovina en México varía entre 90 y 125 millones de hectáreas (¡alrededor de la mitad del territorio del país!). El crecimiento de la ganadería bovina ha sido notable en México durante los últimos 50 años y es reflejo de la concentración cada vez mayor de la población en las ciudades, en donde las costumbres alimentarias de la gente presentan una tendencia hacia un mayor consumo de carne de res.

La cría extensiva de ganado se reconoce como una de las causas más importantes de **deterioro ambiental**, como veremos en los capítulos 7 y 8, pues provoca deforestación, así como erosión y compactación del suelo, entre otros efectos. Para controlar de alguna manera este deterioro de los ecosistemas naturales, la Secretaría encargada de los asuntos ganaderos (actualmente la Sagarpa) establece límites al número de cabezas de ganado que pueden mantenerse por unidad de superficie. Estos límites se conocen como *coeficientes de agostadero* y definen el número máximo de cabezas de ganado que se puede alimentar en una hectárea de terreno sin el uso de tecnología. Desde luego, como las condiciones climáticas y de suelo varían considerablemente a lo largo del territorio de México, el coeficiente de agostadero varía entre regiones. Por ejemplo, en las zonas tropicales de clima húmedo este coeficiente indica que se puede alimentar a una cabeza de ganado por cada 0.8 hectáreas de terreno, mientras que en las zonas más áridas el coeficiente de agostadero es de una cabeza de ganado por cada 50 hectáreas. Sin embargo, diferentes estudios demuestran que en muchos municipios del país el número de cabezas de ganado rebasa el límite máximo del coeficiente de agostadero, lo que da como resultado una sobrecarga de cabezas de cría en los terrenos de ganadería extensiva y el deterioro ambiental (véase el capítulo 8).

En México se crían alrededor de 15 variedades diferentes de ganado bovino; una de las características en que difieren estas variedades es su resistencia a climas cálidos. Entre las variedades más resistentes a estas condiciones podemos mencionar al cebú, que es originario del sur de Asia; en contraste, una de las variedades más importantes para la producción de leche es el ganado Holstein, que es originario de Europa (figura 6.10).

Las regiones cálido-húmedas de México se han visto muy afectadas durante las últimas décadas por la expansión de la frontera ganadera. En la actualidad se tienen evidencias de que más de 90% del área originalmente cubierta por selvas húmedas (principalmente en el sureste del país) se encuentra ahora transformada en potreros (esto es, pastizales inducidos) que se utilizan para la cría de ganado bovino. Estados como Tabasco, Veracruz, Chiapas y Campeche se encuentran entre los más afectados en ese sentido. Por ejemplo, Tabasco es un estado que originalmente estuvo cubierto en su mayor parte por selvas húmedas; sin embargo, actualmente menos de 5% de su territorio se encuentra cubierto por este tipo de vegetación.



Figura 6.10

La cría de ganado bovino de diferentes variedades ocupa grandes extensiones en todas las regiones climáticas de México.

Ganados ovino y caprino. En México la producción de carne a partir de estos tipos de ganado es muy limitada en comparación con la del ganado bovino o porcino. Además de su uso para la producción de carne, el ganado caprino se utiliza frecuentemente para la producción de algunos lácteos y el ganado ovino para la extracción de lana. Generalmente estos tipos de ganadería se practican de manera extensiva, en terrenos poco productivos y con pendientes pronunciadas. En particular, las cabras (figura 6.11) son capaces de desplazarse por terrenos escarpados, pedregosos

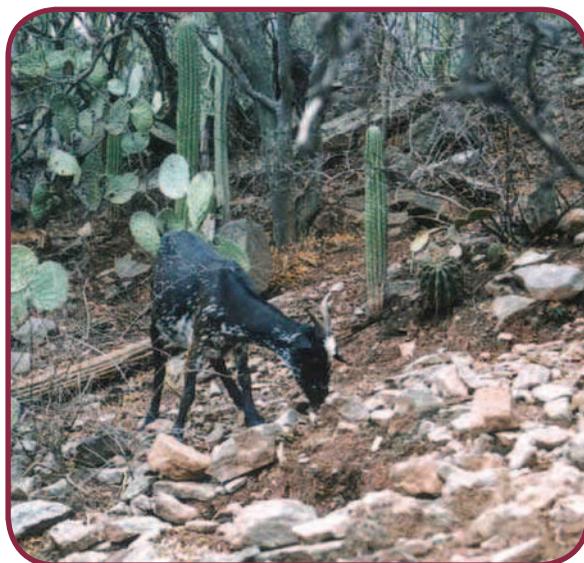


Figura 6.11

El ganado caprino en México se cría de manera extensiva, particularmente en regiones semiáridas.

e inaccesibles. Por consiguiente, la cría de ganado caprino es más frecuente en zonas marginadas y montañosas de libre pastoreo. La falta de control sobre este tipo de ganado ha provocado erosión muy intensa en algunas regiones del país.

Ganado porcino. La porcicultura es el tercer sistema productor de carne del país (los dos primeros son la cría de ganado bovino y la producción avícola), pues aporta la cuarta parte de la producción total de cárnicos. Comúnmente se practica de forma intensiva, lo que requiere a su vez del cultivo de especies forrajeras en grandes extensiones de terreno, así como de su cosecha, preparación y transporte. Esto lleva a que la porcicultura, en general, se considere como una actividad cara y poco eficiente.

Uno de los alimentos que se utilizan para la alimentación del ganado porcino es el sorgo. El cultivo de sorgo ha desplazado

a los granos básicos en grandes extensiones de terreno fértil en el país (por ejemplo, en El Bajío y en la planicie costera del Istmo de Tehuantepec). Además, un problema ambiental importante que genera la porcicultura en granjas es la contaminación del agua, ya que los residuos de esta actividad (principalmente las excretas de los cerdos) son acarreados por el agua, contaminando tanto mantos freáticos como cuerpos de agua superficiales, como ocurre en La Piedad, Michoacán.

Avicultura. Casi toda la población urbana (98%) y una cuarta parte de la población rural de México es consumidora frecuente de aves (principalmente de pollo y pavo; figura 6.12), las cuales se crían mayoritariamente de forma intensiva o en los traspatios de las casas rurales. De la avicultura se obtiene también el huevo, una fuente muy importante de proteína animal para gran parte de la población de nuestro país. Uno de



Figura 6.12

El pollo y el pavo son los principales productos avícolas que se consumen en México.

los problemas actuales de la producción avícola intensiva está relacionado con el uso indiscriminado de hormonas y otras sustancias químicas que se suministran a los pollos para que crezcan y maduren con rapidez, lo que aumenta las ganancias económicas de los productores. Sin embargo, estas sustancias llegan a tener efectos sobre la salud de los consumidores. Por esa razón, en algunos mercados se ha empezado a favorecer la entrada de “huevo de granja” y de “pollo orgánico”, es decir, huevo y carne provenientes de pollos que crecieron libres, sujetos a una alimentación sin productos químicos. Adicionalmente, en algunas zonas del país se ha empezado a criar el avestruz para el consumo de su carne.

6.3.3 Recursos forestales

De todos los ecosistemas terrestres, el ser humano obtiene un conjunto muy amplio de bienes que pueden clasificarse como recursos forestales maderables (madera en rollo) y no maderables (resinas, fibras, hojas, cortezas, frutos, cogollos, tubérculos, etcétera; figura 6.13). En realidad, toda especie vegetal aprovechable que forme parte de un ecosistema natural puede clasificarse como recurso forestal. Por esta razón, el área forestal con la que cuenta un país no se calcula simplemente como la superficie cubierta por ecosistemas arbolados (bosques y selvas), sino que también incluye la superficie en donde se presentan matorrales, chaparrales y diferentes tipos de selvas, es decir, todos los ecosistemas naturales terrestres que se presentan en su territorio. Como hemos visto, la superficie de México es de casi 200 millones de hectáreas, de las cuales cerca de 140 millones corresponden a ecosistemas naturales; entre ellos, algunos se encuentran en buen estado de conservación, mientras que otros tienen un cierto nivel de disturbio o deterioro. Como se concluye a partir de estas cifras, el área forestal de México constituye un importante potencial para su desarrollo.

Sin embargo, la apertura de nuevas tierras agrícolas y ganaderas (es decir, la ampliación de la frontera agropecuaria) está llevando a una pérdida constante de tierras forestales (**deforestación**; véase el capítulo 8). Por desgracia, la mayoría de los árboles que se derriban durante los desmontes para abrir terrenos agropecuarios, y cuya madera podría utilizarse para diversos fines, no se aprovechan como producción forestal, sino que generalmente se queman (por ejemplo, durante la práctica de la **agricultura de roza, tumba y quema**).



Figura 6.13

La resina obtenida de las coníferas, utilizada ampliamente en muchos tipos de industria, es un producto forestal no maderable muy importante.

México se considera un país eminentemente forestal, debido, por una parte, a la gran diversidad de sistemas forestales con los que cuenta y, por otra, al hecho de que gran parte de su territorio consiste en abruptas pendientes no aptas para la agricultura y la ganadería. Sin embargo, la producción forestal del país presenta cada año un déficit, y la vocación forestal de la tierra se está perdiendo a pasos agigantados como producto de una profunda **degradación** de sus bosques. A pesar del gran potencial forestal de México, menos de 1% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional proviene del uso forestal.

En el caso de la producción maderable, a pesar de la gran diversidad de especies que crecen en las áreas arboladas de las selvas tropicales y los bosques templados de México, alrededor de 78% de la producción se basa únicamente en la extracción de pinos de diferentes especies (figura 6.14) y se concentra en sólo cinco estados de la República: Durango, Chihuahua, Michoacán, Oaxaca y Jalisco, que son los que cuentan con grandes superficies de bosques templados (cuadro 6.3). Otras especies menos importantes por su volumen de producción son algunos encinos o robles (árboles del género *Quercus*) y ciertas especies tropicales consideradas maderas preciosas (como el cedro o la caoba), cuyo valor comercial es muy considerable. El resto de las especies forestales maderables, sobre todo las provenientes de las regiones tropicales, se desperdician por falta de mercado.

El destino principal de la producción maderable es la madera para aserrío (68%), que se utiliza para la fabricación de muebles, además de vigas y tablonés para la construcción. Otra buena parte de la madera se destina a la producción de celulosa (para la fabricación de papel, aunque una fracción importante de la celulosa que utilizamos en México se importa), carbón, leña, tableros y postes (figura 6.15).

En cuanto a los productos forestales no maderables de México, existe cierto desconocimiento de cuáles son exactamente (su número varía entre 1,000 y 7,000, según diversas fuentes), qué valor de producción representan y qué volúmenes se extraen. Por desgracia, no se cuenta con registros

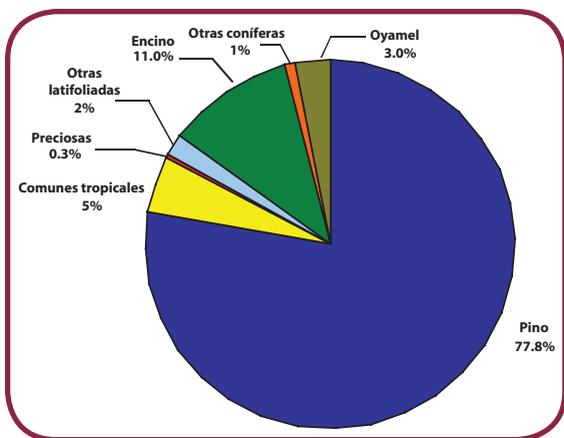


Figura 6.14 Las numerosas especies del género *Pinus*, conocidas como pinos, constituyen el recurso maderable más importante en México, mientras que las especies tropicales como el cedro y la caoba se utilizan en menor proporción. (Fuente: Semarnat (2005) *Anuario Estadístico de la Producción Forestal*. México).

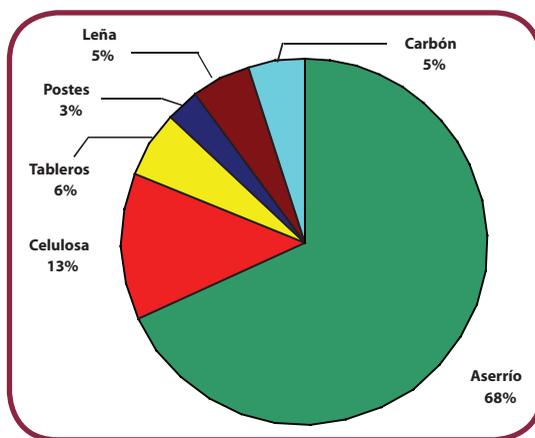


Figura 6.15 La producción forestal maderable en México se destina a diferentes fines, el principal de los cuales es la madera de aserrío, que es la que se utiliza para la producción de muebles y para la construcción de casas. (Fuente: Semarnat (2005) *Anuario Estadístico de la Producción Forestal*. México).

oficiales confiables que nos permitan evaluar claramente su importancia real. Algunas estimaciones de la producción forestal no maderable se presentan en la figura 6.16. Generalmente sólo se reportan los productos que se industrializan (resinas, ceras, gomas, chicle) ya que se extraen en grandes cantidades, por lo que se tiene cierto registro de su aprovechamiento en las estadísticas oficiales. Estos productos, más que un aporte significativo a la economía nacional, constituyen un apoyo muy importante para muchas familias de poblaciones rurales, tanto para la economía doméstica como para la de subsistencia. Si bien la venta de estos productos no es la que genera el ingreso económico más importante para la mayoría de estas familias, no hay duda de que sí constituye un complemento significativo, sobre todo para las más marginadas.

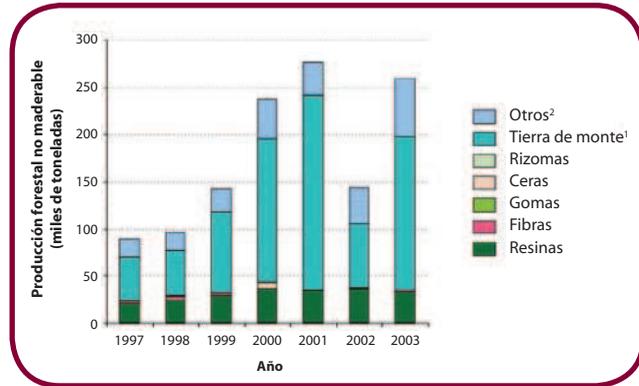


Figura 6.16

Existe una amplia gama de productos forestales no maderables en México. Entre ellos destacan, por su gran volumen de producción anual, la tierra de monte y las resinas. La gráfica muestra la producción forestal no maderable, desglosada por productos, para el período 1997-2003. El rubro "otros" incluye hojas, frutos, cortezas, plantas ornamentales y esencias, entre otros. (Fuentes: Semarnat (varios años) *Anuario Estadístico de la Producción Forestal*, México; Semarnat (2002) Dirección General de Federalización y Descentralización de Servicios Forestales y de Suelo, México.)

Cuadro 6.3 Producción de madera (m³ en rollo) en diferentes estados de la República Mexicana. Los estados más productivos son los que cuentan con grandes extensiones de bosques templados. (Fuente: Semarnat (2005). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2003*, México.)

Estado	Producción maderable		Variación (%)	Destino de la producción maderable				
	2002	2003		Aserrío	Celulosa	Tableros	Postes	Combustible
Durango	1 696 318	2 177 286	+ 28	1 114 484	375 237	283 959	114 594	289 012
Chihuahua	1 407 102	1 435 899	+ 2	1 291 324	0	120 780	19 621	4 174
Michoacán	821 627	826 975	+ 1	655 140	96 225	41 200	7 005	27 405
Oaxaca	456 433	465 395	+ 2	393 304	60 539	0	1 291	10 262
Jalisco	398 870	435 950	+ 9	316 790	82 706	0	364	36 090
Otros	2 056 345	1 655 265	- 20	1 034 529	230 035	3 170	37 247	350 285
Total	6 664 720	6 996 770	5	4 805 571	844 742	449 109	180 120	717 228

6.3.4 Recursos pesqueros

En este rubro se incluyen el pescado y los mariscos que se obtienen de cuerpos de agua tanto marinos como continentales. El potencial pesquero de México es muy alto ya que, de todos los estados que forman su territorio, 17 tienen costas. De esta forma, el país cuenta con 11,593 kilómetros de litoral marino (7,828 km en el Pacífico y 3,294 km en el Golfo de México y Mar Caribe). La superficie mexicana de mares territoriales (es decir, la que abarca desde la costa hasta una distancia de 22.2 km mar adentro) es de 231,813 km²; y la superficie de la Zona Económica Exclusiva (a partir de una distancia de 22.2 km de la costa hasta una distancia de 370.6 km) es de 2,715,012 km². Además, México posee 29 mil km² de aguas interiores (ríos, lagos, presas y lagunas). Un hecho interesante para el caso de México es que cuenta tanto con aguas templadas (en el noroeste del país, en la costa occidental de Baja California y en el Mar de Cortés), como con aguas tropicales (en la costa del Pacífico desde Mazatlán hasta Chiapas, en toda la costa del Golfo de México y en la del Mar Caribe).

En los mares mexicanos existen alrededor de 2,500 especies de peces. A pesar de esta gran riqueza, sólo 350 especies se explotan regularmente. Más aún, la mayor producción pesquera del país está basada tan sólo en 25 especies de peces, crustáceos y moluscos. Entre los peces que más se consumen podemos mencionar a la sardina, el atún, la anchoveta, el pargo, el mero, el pámpano, el guachinango y el tiburón.

El aprovechamiento de estas especies se realiza a través de **pesquerías**, concepto que se refiere al conjunto de actividades que rodean la extracción de productos pesqueros de cierto tipo, asociadas a una zona geográfica particular. En México existen tres tipos de pesquerías: 1) las pesquerías de altura, que operan a grandes distancias de las costas oceánicas, como la del atún, el camarón, la sardina y el tiburón; 2) las pesquerías ribereñas, cuyas actividades extractivas se llevan a cabo en bahías y sistemas lagunares hasta un límite de 3 millas náuticas (5.6 km) de la costa, como son la del camarón, los peces

de escama (cuyos cuerpos están cubiertos por placas duras llamadas escamas), la langosta y el pulpo, y 3) pesquerías de acuicultura o cultivo de peces o mariscos en estanques controlados, entre las que se encuentran la del camarón, el ostión, la carpa y la trucha. Como puede verse, hay productos pesqueros, como el camarón, que se obtienen de los tres tipos de pesquerías.

La producción pesquera de México fluctúa entre 1.2 y 1.5 millones de toneladas al año. De esta producción, aproximadamente 75% corresponde a peces, 15% a crustáceos (como el camarón, la langosta y la jaiba) y 10% a moluscos (como el pulpo, la almeja y el caracol).

La producción pesquera fluctúa mucho de un año a otro, debido principalmente a variaciones en las temperaturas del agua; como resultado, algunas especies se extraen en mayor abundancia en unos años que en otros. Sin embargo, de manera general se puede decir que la sardina es un producto pesquero de gran importancia, pues representa alrededor de 35% de la producción pesquera (figura 6.17a), que se utiliza amplia-



Figura 6.17

a) Los productos pesqueros son de gran relevancia para la nutrición de la población mexicana. b) La pesca del camarón es un componente importante de la actividad pesquera en México.

mente para la elaboración de harinas con las que se fabrican diversos productos para consumo animal. En México se explotan seis especies de sardina. Estos peces son **pelágicos** y se les encuentra en mayor abundancia en mares templados, como el Mar de Cortés.

Entre los mariscos más consumidos en México están el camarón, el ostión y el abulón, que en conjunto suman cerca de 9% de la producción pesquera total. En México se explotan alrededor de 15 especies de camarón. Estos crustáceos viven en fondos marinos arenosos. Setenta por ciento del camarón mexicano se obtiene de las costas del Pacífico y se pesca utilizando redes de arrastre (figura 6.17b). Por desgracia, en la pesca del camarón se desperdician muchos otros recursos pesqueros: por cada tonelada de camarón suelen pescarse en las redes hasta ocho toneladas de otros productos (fundamentalmente peces) que las pesquerías no tienen la capacidad de absorber, por lo que estos animales frecuentemente se regresan muertos al mar y no se aprovechan. Asimismo, las redes de arrastre que se utilizan en la pesca del camarón pueden llegar a producir un importante daño en el fondo del mar, ya que se les jala a lo largo de muchos kilómetros, de manera que arrancan todo a su paso y remueven los sedimentos.

De la pesca proviene 10% de la proteína animal que se consume en México. Sin embargo, el beneficio económico que aporta la pesca difícilmente alcanza un valor equivalente a 1% del Producto Interno Bruto del país.



6.3.5

Los recursos minerales

Los minerales son sustancias inorgánicas (aunque su origen puede ser orgánico) localizadas en el interior o en la superficie de la Tierra. Muchos minerales, con la importante excepción del petróleo, son los componentes esenciales de las rocas. Algunos contienen exclusivamente un elemento químico (como el cobre o el azufre), mientras que otros están constituidos por dos o más elementos que forman compuestos (como el cuarzo o la bauxita).

Hay tres grupos principales de rocas: las **ígneas**, que provienen directamente de la solidificación del magma que se encuentra debajo de la corteza terrestre y que emergen a la superficie a través de los volcanes; las **sedimentarias**, formadas por el depósito y consolidación de material acumulado en el fondo de cuerpos de agua; y las **metamórficas**, que son rocas de cualquiera de estos dos orígenes, pero que sufrieron transformaciones subsecuentes en condiciones de alta temperatura y presión.

En el territorio de cada país hay una representación diferente de cada uno de los tres tipos de roca mencionados en el párrafo anterior. Alrededor de dos tercios del territorio de México, por ejemplo, están constituidos por rocas ígneas y metamórficas; tales características geológicas confieren al territorio mexicano un alto potencial minero. Esto se refleja en la amplitud de la actividad minera, que se practica en 28 de las 32 entidades federativas. Aunque en la producción minera destacan por su valor el oro y la plata, los minerales que aportan mayores ingresos son los que se transforman industrialmente (59.7%). En términos del volumen extraído destacan el hierro, el carbón mineral, el yeso, el coque, el azufre y el sílice (cuadro 6.4). Una parte importante de la producción minera se destina a la exportación, en especial la producción de plata, cobre, azufre, zinc, plomo y sal.

La extracción de minerales ha acompañado el desarrollo de las sociedades humanas desde fases muy tempranas de la historia, aunque su auge no se registró sino hasta el siglo XX, cuando la extracción minera se volvió muy eficiente gracias al avance de la tecnología. Por desgracia, este aumento en la eficiencia de la explotación minera también se tradujo en un incremento notable en sus efectos negativos, particularmente en cuanto a la contaminación y el deterioro ambiental asociados a esta actividad.

Cuadro 6.4 Los minerales que se producen en México. Su ubicación en las diferentes categorías depende de su valor y de su uso, así como de su composición química. Por ejemplo, en los dos primeros grupos sólo hay metales constituidos por un elemento químico puro, mientras que en el tercero y cuarto grupos se incluyen algunos minerales de composición química más compleja.

Metales preciosos	Metales industriales no ferrosos	Metales y minerales siderúrgicos	Minerales no metálicos
Oro	Plomo	Carbón mineral	Azufre
Plata	Cobre	Coque	Barita
	Zinc	Fierro	Dolomita
	Antimonio	Manganeso	Fluorita
	Arsénico	Caolín	
	Bismuto	Sílice yeso	
	Estaño	Fosforita	
	Cadmio	Wollastonita	
	Selenio	Celestita	
	Tungsteno	Feldespatos	
	Molibdeno		

Como se detallará en el siguiente capítulo, prácticamente todas las actividades humanas producen un deterioro ambiental. En particular, los efectos directos de la minería sobre el ambiente se agrupan en dos categorías. En primer lugar, la extracción de minerales produce contaminación del agua y del suelo, pues esta actividad genera desechos y produce la liberación de compuestos, por lo general muy tóxicos, derivados de la industrialización de los minerales. El segundo grupo de efectos tiene que ver con la destrucción parcial o total de los ecosistemas, ya que la actividad minera implica la remoción de la vegetación y del suelo. Una vez que concluye la actividad extractiva, ésta deja “cicatrices” ambientales muy profundas, que rara vez se restauran o se reforestan.

6.3.6 Petróleo

El petróleo es un mineral combustible de origen **fósil**, constituido básicamente por hidrocarburos formados al paso de mucho tiempo como producto de la descomposición de la materia orgánica, generalmente vegetal. Este mineral también contiene cantidades pequeñas de azufre, nitrógeno y oxígeno, así como trazas de plomo, arsénico y algunos metales pesados, como níquel y vanadio. Como su formación requiere condiciones de muy alta presión, sus yacimientos se encuentran en capas de rocas sedimentarias, algunas veces bastante profundas.

Cuando un país cuenta con reservas de hidrocarburos, es frecuente que su economía esté basada en la explotación y exportación del petróleo, o inclusive en su transformación industrial en una multitud

de productos: turbosina, gas licuado, kerosina, diésel, combustible, asfaltos, parafinas, grasas y lubricantes y, desde luego, gasolina, sin los cuales la vida moderna no existiría como la conocemos.

En México las reservas petroleras han sido abundantes, por lo que la industria petrolera constituye un sector fundamental para la economía nacional (figura 6.18). Nuestro país es el séptimo productor de petróleo a nivel mundial. Por esta razón, la extracción petrolera fue la actividad productiva más importante del país por varias décadas. Actualmente esto ya no es así, pues otras actividades productivas de los sectores secundario y terciario (industria manufacturera y comercio) han adquirido más importancia en años recientes. Sin embargo, el petróleo sigue siendo la principal fuente de recursos financieros que sostiene el gasto público del gobierno mexicano, ya que representa aproximadamente 30% de los ingresos netos del país, los cuales se obtienen por concepto de venta y exportación de gas, petróleo y sus derivados.

Los efectos de la actividad petrolera sobre el ambiente han sido muy graves y notorios, desde las labores de exploración de mantos de hidrocarburos y de extracción de petróleo hasta los derrames accidentales en ecosistemas marinos, costeros y terrestres (véase el capítulo 8, sección 8.5.2). Por otro lado, otros efectos muy importantes de la industria petrolera no están relacionados con la extracción, sino con la combustión del petróleo y sus derivados. Esta combustión, que básicamente consiste en extraer la energía almacenada en los hidrocarburos del petróleo para utilizarla en un sinnúmero de actividades, representa la mayor fuente generadora del dióxido de carbono que se acumula en la atmósfera de nuestro planeta. Muchos científicos han investigado durante años las consecuencias de tal acumulación. Gracias a ello ahora sabemos con certeza que el dióxido de carbono (CO_2) —al igual que otros gases con los que éste se mezcla en la atmósfera— desempeña un papel determinante en la intensificación del llamado **efecto invernadero**. El aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera ha llevado a un calentamiento anormal de ésta y ha dado lugar al fenómeno del **cambio climático** (véase el capítulo 8, sección 8.3.1).

Ante este panorama, a partir de la última década del siglo XX muchos gobiernos iniciaron acciones encaminadas a disminuir los efectos nocivos de la actividad petrolera y de la quema de combustibles fósiles. Entre otras cosas, se han promulgado y fortalecido leyes ambientales y se han introducido mejoras tecnológicas subvencionadas (es decir, financiadas por los gobiernos). En México la empresa paraestatal Petróleos Mexicanos (Pemex) ha cumplido con auditorías ambientales de las que han surgido numerosas recomendaciones para corregir estos problemas. Sin embargo, muchas de estas acciones se ven interrumpidas por la falta de recursos financieros.

La industria petroquímica mundial, al igual que Pemex, ya dispone de tecnologías ambientales muy avanzadas. No obstante, aún es necesario mejorar las técnicas de extracción de tal manera que no generen contaminación, así como mejorar la calidad de los productos de la industria petroquímica y evitar al máximo que los desechos de los procesos productivos asociados al petróleo contaminen el agua, el aire y el suelo. A pesar de los avances en la industria petroquímica, ésta tiene todavía una enorme deuda ambiental por la contaminación que provocó en el pasado, la cual debe remediar paulatina y constantemente.



Figura 6.18

El petróleo es uno de los recursos naturales no renovables más importantes en virtud de su potencial para generar energía.

Además de las mejoras que se pueden hacer en la industria petroquímica actual, es importante tener presente que las reservas de petróleo de nuestro planeta son finitas y que en un futuro cercano ya no serán suficientes para atender la demanda de producción de energía de nuestras sociedades. Por esa razón, debe ser prioritario desarrollar tecnologías que permitan poner a disposición de la población humana otras fuentes de energía, que aunque ya se utilizan en cierta medida (como la eólica o la solar), todavía se explotan de forma muy limitada.



Para reflexionar...

1. Averigua cuáles son las fuentes de agua cerca de tu localidad y reflexiona acerca de si se hace un uso adecuado de este recurso natural.
2. Imaginemos que hablas con un habitante de una ciudad que tiene poco contacto con la naturaleza. ¿Cómo le harías ver que su vida depende de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas?
3. Ante la posibilidad de que se agoten las reservas de petróleo, ¿de qué otras fuentes energéticas podríamos depender en el futuro para producir y transportar los alimentos que consumimos?
4. Una porción de tierra en el campo puede destinarse a la agricultura o a la ganadería. ¿Crees que esta disyuntiva representa un conflicto ambiental? En términos generales, ¿sabes cuál de estas dos actividades está asociada a una mayor ganancia económica en nuestro país?



Actividades complementarias

1. Investiga dónde se concentran las áreas ganaderas de México. De acuerdo con las zonas en las que se ubican, ¿qué tipo de vegetación crees que se haya eliminado para establecer allí la ganadería?
2. Elige uno de los siguientes temas: *a)* agricultura chinampera; *b)* sistema de cultivo de roza, tumba y quema; *c)* extracción de cera candelilla, o *d)* camaronicultura. Investiga en qué consiste la actividad productiva que elegiste y, en función de ello, determina qué repercusiones tiene sobre la biodiversidad. ¿Qué características debería tener esa actividad para que se le considere sostenible?
3. Realiza una investigación sobre fuentes de energía que podrían llegar a reemplazar al petróleo. ¿Qué efectos tendrían en el ambiente? ¿Cómo serían estos efectos comparados con los de la extracción petrolera y la industria petroquímica?
4. Elabora una lista de lo que comes en un día e intenta averiguar la procedencia de cada uno de los productos que ingieres o que se utilizan para la preparación de tus alimentos.

● CAPÍTULO 7 ●

Deterioro ambiental

7.1 Para la imaginación

Cuenta mi tío Paco que cuando era niño, en la década de 1950, iba a la escuela primaria en la colonia Mixcoac, en la ciudad de México. En aquel entonces esa colonia quedaba en la zona limítrofe de la ciudad, al igual que otros lugares como Coyoacán, San Ángel y Tlalpan, que todavía eran pueblos separados de la ciudad. Mi tío Paco decía que al salir de la escuela primaria, pasaba por las vegas del río Churubusco, que bajaba de las montañas que rodean el Distrito Federal por su lado oeste. Parece que en época de lluvias el río Churubusco era muy caudaloso y a veces se producían inundaciones cuando su nivel subía demasiado. El resto de las tierras que rodeaban al río estaban cubiertas por milpas y algunos manchones de vegetación natural. Cuando mi tío Paco salía temprano de la escuela, se iba a recorrer la vega del río acompañado de sus amigos; se quitaban los zapatos y se metían a las orillas del río, para ver de cerca los ajolotes y los peces que recorrían sus aguas cristalinas. Se echaban a la sombra de los pirules a tomar el fresco y contemplaban un sinnúmero de mariposas diferentes que revoloteaban por allí. En aquel entonces la ciudad de México tenía menos de tres millones de habitantes y las áreas naturales que la rodeaban estaban bien conservadas.

Cuando paso por la avenida Río Churubusco (figura 7.1), me cuesta trabajo creer que en poco más de 50 años las cosas hayan cambiado tanto. Las aguas del río Churubusco viajan ahora entubadas y altamente contaminadas debajo del asfalto. Las montañas de donde viene este río ya casi no tienen bosques. En su lugar hay casas, edificios, banquetas, calles y postes. A la vez, el aire de la ciudad está muy contaminado y las áreas verdes que quedan son sólo algunos parques y camellones, fre-

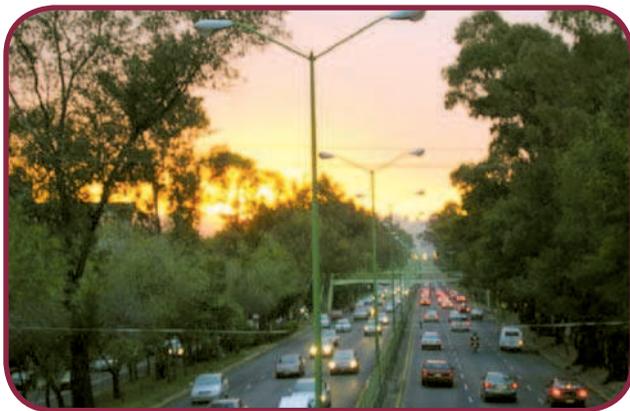


Figura 7.1

La Avenida Río Churubusco, en la ciudad de México, actualmente es el escenario de un movimiento urbano muy intenso. Hace apenas 50 años por ahí pasaba el río Churubusco, y sus vegas estaban rodeadas de vegetación natural.

cuentemente con basura y poca cubierta vegetal. Bueno... es que actualmente, en el año de 2008, la ciudad de México y su área metropolitana cuenta con más de 20 millones de habitantes. A veces me pregunto, ¿habría sido posible mantener en buen estado este valle magnífico algún día descrito como “la región más transparente” por el poeta Alfonso Reyes, a pesar de tal explosión demográfica? Si lo hubiéramos tratado con más cuidado, ¿se habría mantenido más limpio y conservado?

7.2

¿En qué consiste el deterioro del ambiente?

A lo largo de la historia de la humanidad el deterioro de los ecosistemas y sus recursos naturales se ha considerado como un mal necesario para obtener a cambio los beneficios que trae consigo el desarrollo y el progreso. De acuerdo con esa lógica se acepta que se deforesten los bosques y las selvas para abrir espacios a la agricultura y la ganadería, que se interrumpan los cauces de los ríos para construir carreteras y presas, que se destruyan y rellenen los manglares para edificar casas y hoteles, que se contaminen los ríos para transportar basura, y que se erosionen los suelos de las pendientes al eliminar su cubierta vegetal para dedicarlos a la siembra efímera de productos agrícolas. El daño y desequilibrio que los seres humanos provocamos a los ecosistemas al utilizarlos para satisfacer nuestras necesidades se conoce como **deterioro ambiental**.

El deterioro ambiental es el resultado del mal uso que los seres humanos hemos hecho de los ecosistemas, de su **biodiversidad** y de los **servicios ambientales** que nos prestan. Actualmente el deterioro ambiental ha llegado a niveles extremos, lo que representa un gran riesgo para el equilibrio de la naturaleza e incluso podría significar el estancamiento o retroceso del desarrollo de las sociedades humanas.

Las manifestaciones de este deterioro se dejan sentir en diferentes componentes bióticos y abióticos del ambiente, como es el caso de la disminución de la calidad del suelo, el agua y la atmósfera, o la reducción de la biodiversidad. La variedad de manifestaciones o expresiones del deterioro ambiental se examinarán con detalle en el capítulo 8. En el presente capítulo analizaremos y discutiremos los factores que han llevado a este deterioro.

Entre los grandes problemas de deterioro ambiental que enfrentamos en la actualidad se encuentran: el incremento de la frecuencia de huracanes, sequías e inundaciones como consecuencia de los

cambios en el clima; el abatimiento de las pesquerías de todo el mundo a causa de la sobreexplotación y contaminación de los mares; el incremento en la incidencia de enfermedades respiratorias en las grandes ciudades como resultado de la contaminación atmosférica; la falta de agua de buena calidad que lleva, año con año, a la muerte de miles de personas; el aumento en la frecuencia de casos de cáncer de piel por el adelgazamiento de la capa de ozono; la disminución de los recursos disponibles para ser utilizados como alimento, madera, fibras y medicamentos; el desecamiento de manantiales por la deforestación; y el aumento en la incidencia de enfermedades en los seres humanos provocadas por diversas formas de contaminación. En realidad, podríamos llenar muchas páginas de ejemplos como éstos que ilustran algunos de los muchos efectos del deterioro ambiental.

Es importante resaltar que los efectos del deterioro ambiental no se limitan sólo *al ambiente* en sentido estricto pues, como se desprende de los ejemplos mencionados, produce efectos negativos en la salud humana, la economía y el bienestar social. Por si esto fuera poco, el deterioro ambiental también acarrea importantes problemas sociales y económicos para las naciones debido a la falta de alimento y al menoscabo de las condiciones de vida de la población en general. Más aún, los efectos del deterioro no sólo se presentan en la localidad en la que se producen sino que, por el carácter global de la naturaleza, afectan a todo el planeta, y no nada más a las generaciones del presente, sino también a las generaciones futuras. Por ello, aunque se emitan gases que incrementan el efecto invernadero en Moscú en el año 2008, el resultado, que es el calentamiento de la atmósfera, afectará a todo el planeta durante muchos años por venir. Asimismo, aunque se arrojen desechos en las aguas del río Amazonas, éstos alcanzarán lugares muy remotos, pues su cauce desemboca en el mar, y el agua de los mares circula por todo el mundo. Así, se puede concluir que el deterioro ambiental no conoce fronteras entre los países, ni tampoco tiene fecha de caducidad a corto plazo.

Como veremos en la siguiente sección, los principales factores que provocan el deterioro del ambiente son: el crecimiento de la población humana, los patrones de consumo, las tecnologías y la gobernabilidad.

7.3 Factores de deterioro

Sin duda, uno de los factores de deterioro más importantes ha sido el crecimiento desmesurado de la población humana, la cual demanda cada vez más recursos de los ecosistemas. Como es evidente, cuanto mayor sea el número de personas que habiten en el planeta, más presión habrá sobre la naturaleza. Si bien esto es cierto en términos generales, el **crecimiento demográfico** no es la causa única de deterioro. El impacto que la población humana ejerce sobre la naturaleza depende de sus costumbres en cuanto a la producción y el consumo de alimentos y otros satisfactores, así como en cuanto al uso de energía, agua y otras materias primas. Estas costumbres se pueden englobar en lo que se conoce como los **patrones de consumo** de una sociedad. Las sociedades con diferentes patrones de consumo producen distintos tipos e intensidades de deterioro ambiental. Así, por ejemplo, un millón de personas que circulan en bicicleta producen un daño mucho menor al ambiente que un número igual de individuos que circulan en automóviles. Una familia que tiene muchos aparatos electrodomésticos malgasta el agua y la energía, derrocha alimentos y produce decenas de kilos de basura a la semana genera un efecto mucho más negativo para el ambiente que una familia que vive en la pobreza, sin acceso a la red de luz eléctrica ni de agua potable y que se alimenta de lo que produce. Por esta razón, una población con pocos habitantes pero con patrones de consumo

elevados puede tener un impacto mayor sobre el ambiente que una población más grande pero con bajas tasas de consumo.

Sin embargo, la explosión demográfica y los patrones de consumo tampoco explican en 100% el deterioro ambiental. El tercer factor que tiene un efecto muy notable sobre el deterioro del ambiente son las **tecnologías** en las que está fincado el funcionamiento de la sociedad. Aquí nos referimos tanto a las tecnologías asociadas al uso y la extracción de los recursos bióticos (por ejemplo, las agrícolas, ganaderas y pesqueras), como a las tecnologías industriales y de uso doméstico. Así, aunque una población sea pequeña y tenga patrones de consumo moderados, puede tener un gran efecto sobre el ambiente si para producir sus alimentos deforesta amplias extensiones de selva o usa grandes cantidades de agroquímicos. O bien, una familia que tiene un refrigerador viejo que consume mucha energía eléctrica y produce gases que dañan la capa de ozono, y que además usa un auto descuidado que emite muchos gases nocivos a la atmósfera, tiene un efecto mucho más agresivo para el ambiente que otra familia que tenga un refrigerador nuevo y un auto en buenas condiciones, pues éstos contaminan menos y consumen menos energía. Así que las **tecnologías** también son un factor que debe tomarse en cuenta para entender y evitar el deterioro.

Por último, debemos señalar que el deterioro ambiental también depende de las reglas que adopte una sociedad, es decir, de las leyes y normas que la rijan, así como de las instituciones que dirigen las políticas ambientales y de la manera en la que se organice la gente para tener una mejor calidad de vida. Todos estos aspectos se engloban en el concepto de **governabilidad**. En las siguientes secciones analizaremos con más detalle los primeros tres factores que provocan el deterioro ambiental: el crecimiento de la población humana, los patrones de consumo y las tecnologías. Los aspectos que tienen que ver con la gobernabilidad se tratarán con detalle en el capítulo 10.

7.3.1

Población humana

En el capítulo 2 hablamos de la ecología de poblaciones. Ahí vimos que para estudiar una población podemos analizar cómo se comporta numéricamente: si está creciendo o decreciendo, y a qué velocidad, según sus tasas de natalidad, mortalidad, inmigración y emigración (capítulo 2, sección 2.2.2). En ese capítulo expusimos una serie de ejemplos sobre el comportamiento de diversas poblaciones de animales y plantas. Pero, ¿qué sucede con la población humana? ¿Cómo se comporta en términos numéricos? ¿Qué factores afectan su crecimiento? Éstos son temas que entran en el ámbito de estudio de los demógrafos de poblaciones humanas, los geógrafos y, en cierta medida, los actuarios. Sin embargo, no deja de ser un tema de gran interés desde el punto de vista ecológico, pues la influencia que ejerce el ser humano sobre la naturaleza ha transformado por completo la faz de la Tierra. Esa transformación está relacionada, sin duda, con el intenso incremento de la población humana en los últimos 200 años.

Durante la mayor parte de la historia, el tamaño de la población humana fue relativamente constante. Uno de los acontecimientos que favoreció un aumento importante de la población humana fue la invención de la agricultura y la domesticación de animales hace alrededor de 12,000 años. Esto permitió a la población humana crecer hasta llegar a unos 300 millones de habitantes cerca del siglo I de nuestra era, y a unos 800 millones alrededor del año 1750 (figura 7.2). La tasa de crecimiento de la población humana empezó a aumentar a pasos agigantados aproximadamente a partir del año 1750. Entre 1750 y 1900 la población humana creció a una tasa promedio de 0.5% anual. Posteriormente, durante la primera mitad del siglo XX la tasa de crecimiento anual fue de 0.8% y durante la segunda

mitad fue de 1.7% anual. Esto dio lugar a que en el año 2000 la población humana llegara a 6,000 millones de habitantes (figura 7.2).

El aumento notable de la población humana durante este periodo tuvo que ver con los avances de la medicina y de las formas de producción de alimentos y energía que se dieron desde comienzos de la Revolución Industrial, y que se aceleraron a principios del siglo XX con el auge petrolero. A la fecha, el crecimiento poblacional ha iniciado un periodo de desaceleración, sobre todo en los países más industrializados (figura 7.3). De hecho, de acuerdo con la tasa de crecimiento poblacional de 1988, se había estimado que la población humana alcanzaría casi 8,000 millones para el año 2000, pero por fortuna no fue así, como pudimos constatar. Según cálculos más recientes (de 2002), se proyecta que la población humana alcance esa cifra hacia el año 2025. Para ese momento, se espera que el crecimiento poblacional de los países más industrializados sea prácticamente nulo. De esta forma, la población humana estará creciendo exclusivamente a causa del incremento demográfico de los países menos desarrollados, sobre todo de su sector urbano (figura 7.3).

De acuerdo con los modelos de crecimiento poblacional que presentamos en el capítulo 2 (sección 2.3), el crecimiento de la población humana ha sido de tipo exponencial. Dijimos entonces que ese tipo de crecimiento sólo se presenta cuando hay una gran abundancia de recursos y las condiciones se mantienen constantes durante largos periodos. ¿Es ése el caso de la población humana o, por el contrario, alcanzaremos en algún momento un límite máximo, tal como predice el modelo logístico (esto es, la *capacidad de carga*)? véase la sección 2.3.2). Hasta el momento, la humanidad ha generado una situación que parece corresponder a una disponibilidad ilimitada de recursos, en gran medida como resultado de la tecnificación de la producción agropecuaria. Con el uso de fertilizantes, pesticidas y maquinaria pesada para arar, sembrar, regar y cosechar, se ha logrado que una hectárea de terreno produzca muchas veces más de lo que produciría en condiciones menos tecnificadas. Lo mismo ha ocurrido con la producción de carne, leche, huevo y otros productos animales, cuyo crecimiento se acelera mediante la administración de hormonas y otras sustancias. Sin embargo, el abuso de estas tecnologías también genera problemas

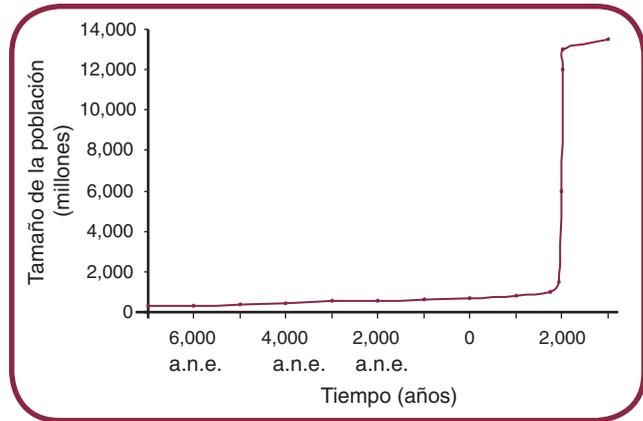


Figura 7.2

El crecimiento de la población humana en los últimos 9,000 años. Las unidades del eje de las ordenadas representan millones de seres humanos. Los datos de 2002 en adelante son proyectados; a.n.e. = antes de nuestra era.

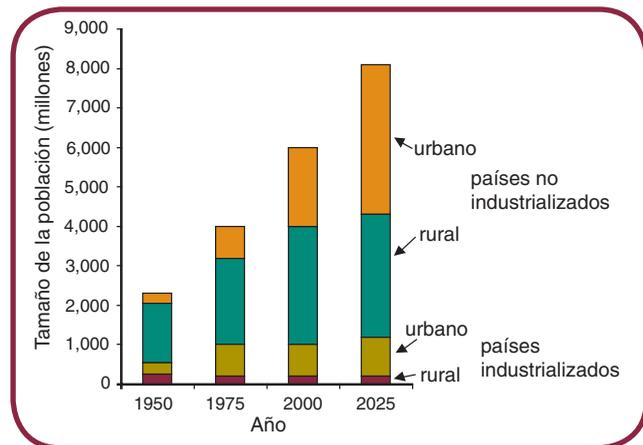


Figura 7.3

Crecimiento de la población humana de países desarrollados y países menos industrializados. En cada grupo se separa el sector urbano del rural. Como es evidente, los datos para el año 2025 son estimaciones.

de deterioro de los recursos naturales y el ambiente, que son la base natural del desarrollo. Como veremos más adelante, estos problemas tarde o temprano se traducirán en un freno al desarrollo.

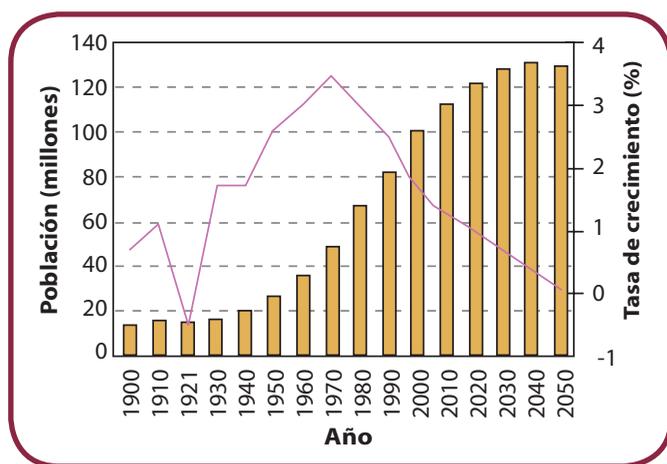


Figura 7.4

Crecimiento de la población de México entre 1900 y 2050. Las barras indican el tamaño de la población, y la línea representa la tasa de crecimiento poblacional (en porcentaje). (Fuentes: INEGI, *Censos de población y vivienda*. Varios años. INEGI, *Conteo de población y vivienda 1995*. México, 1996. Conapo. *Proyecciones de la población de México, 2000-2050*. México, 2002).

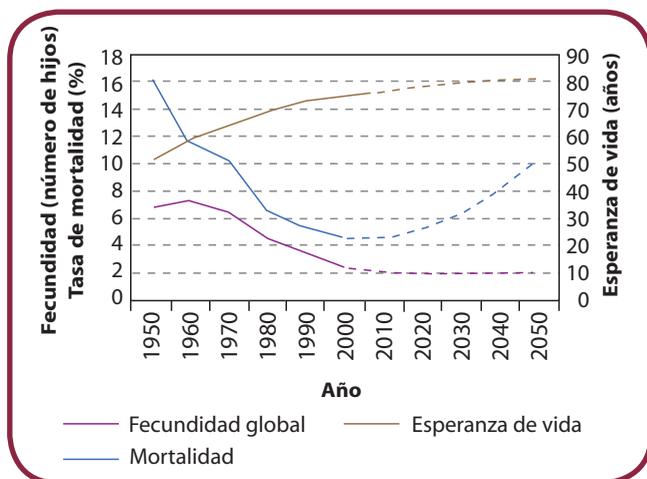


Figura 7.5

Tasas de fecundidad y mortalidad, y esperanza de vida de la población de México; las proyecciones (al 2050) se representan con líneas punteadas. (Fuente: Conapo. *Proyecciones de la población de México, 2000-2050*. México, 2002).

La población de México

En México el crecimiento de la población humana fue muy intenso durante el siglo XX. En 1950 había alrededor de 20 millones de mexicanos, y sólo 55 años después ya éramos 103.3 millones (figura 7.4). De acuerdo con las proyecciones, la población de México seguirá creciendo más allá del año 2030; sin embargo, en la actualidad su crecimiento es mucho más lento de lo que era durante la segunda mitad del siglo XX. Por ejemplo, la tasa de crecimiento poblacional era de 3% anual en 1970, mientras que en la actualidad es de 1.2% anual. Según esta tendencia, se estima que para el año 2040 la población mexicana se estabilice en cerca de 130 millones de habitantes (figura 7.4).

La disminución de la tasa de crecimiento de la población mexicana se debe básicamente a que se han reducido los índices de fecundidad, es decir, el número promedio de hijos que tiene una mujer es ahora mucho menor que en 1970 (figura 7.5). En la actualidad este promedio es de dos hijos por mujer, mientras que en la década de 1970 era de seis. No obstante esta notable reducción, entre los años 2000 y 2005 se incorporaron a la población 4.9 millones de nuevos mexicanos. Es importante mencionar, además, que este decremento de la fecundidad no se ha reflejado tan notoriamente en una disminución de la tasa de crecimiento de la población porque también se ha reducido la mortalidad y ha aumentado la esperanza de vida, gracias a los avances de la medicina (figura 7.5).

La estructura de la población mexicana también ha cambiado notoriamente en las últimas décadas (figura 7.6). Cada vez hay una menor proporción de niños en comparación con el número de jóvenes y adultos; la proporción de estos dos últimos grupos ha ido en aumento, de tal manera

que en un futuro cercano (en 2025) la categoría de edad más numerosa será la de los adultos de 30 a 35 años de edad. Se estima que para el año 2050 el número de adultos mayores a 65 años aumentará notablemente, para conformar alrededor de 20% de la población (figura 7.6).

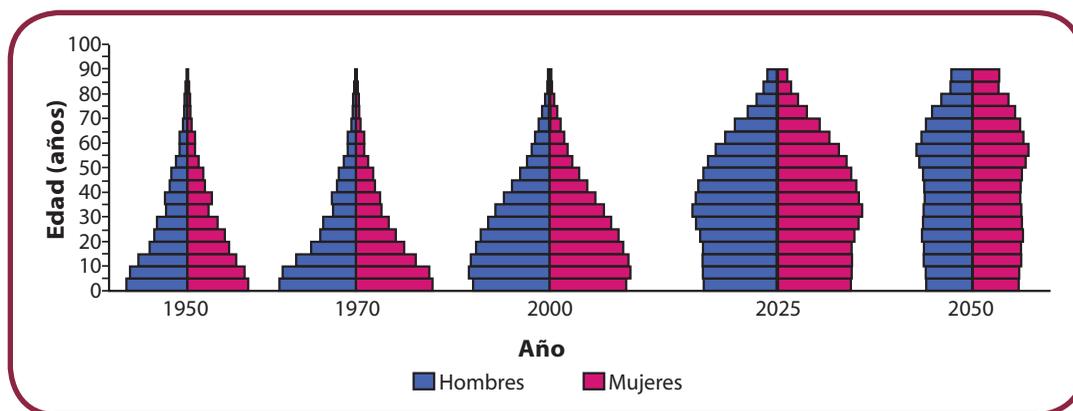


Figura 7.6

Estructura poblacional en México para diferentes momentos en el tiempo. Desde luego, las gráficas de 2025 y de 2050 se elaboraron con base en estimaciones. (Fuentes: INEGI, *Estadísticas Históricas de México*, México, s/a; INEGI, *XII Censo General de la Población y Vivienda 2000*, México, 2001; Conapo, *Proyecciones de la Población de México, 2000-2050*, México, 2002).

Para entender el impacto que el crecimiento de la población humana ha tenido sobre el medio ambiente en México es muy importante analizar no sólo el tamaño poblacional, sino también su distribución en el territorio nacional. Una tendencia importante que se observa en México es una concentración cada vez mayor de gente en unas cuantas grandes ciudades, a la vez que una baja proporción de la población permanece dispersa en muchos poblados pequeños. Mientras que en el año de 1900 tres cuartas partes de la población mexicana vivían en el campo, en 2005 la población rural era de sólo una cuarta parte, a la vez que 75% restante era población urbana. En la actualidad existen nueve grandes ciudades que cuentan con más de un millón de habitantes, y se espera que para 2030 otras siete ciudades superen ese número de habitantes. Tales ciudades demandan grandes cantidades de bienes y servicios ambientales, por lo que ejercen una gran presión sobre los ecosistemas.

En el otro extremo tenemos a los pequeños poblados de menos de 2,500 habitantes. En 2005 había en México alrededor de 185 mil de esos poblados. Si bien la demanda de recursos naturales por parte de las pequeñas poblaciones es mucho menor que la demanda de los grandes centros de población, los efectos que ejercen sobre los ecosistemas suelen ser muy significativos ya que, como la población está dispersa en un espacio relativamente grande, las presiones de **cambio de uso de suelo** (por ejemplo, para que las áreas de vegetación natural se conviertan en tierra agrícolas) actúan en muchos ecosistemas a la vez. Además, la dispersión espacial de los poblados, que se traduce en grandes distancias entre ellos, hace muy difícil y costoso brindar los servicios básicos a la población, tales como los de salud, educación y comunicaciones. Por estas razones, las ciudades de tamaños intermedios son la mejor opción desde el punto de vista ambiental, ya que no ejercen una presión tan fuerte sobre los ecosistemas naturales y manejados; además, las ciudades de dimensiones intermedias permiten la planeación y el ordenamiento de su desarrollo de manera que sus habitantes cuenten con los servicios necesarios para su bienestar. Por otro lado, desde el punto de vista del desarrollo humano, una ciudad de tamaño intermedio también es la opción más deseable, pues está en condiciones de mantener una

rica vida social y cultural, sin sufrir los efectos indeseables del estrés urbano característico de las grandes metrópolis.

Una característica adicional de la población mexicana es su movilidad, la cual se refleja en las tasas de inmigración y emigración. El movimiento de los mexicanos, tanto dentro del país como hacia el extranjero, ha cambiado notablemente en las últimas décadas. En la década de 1980 la migración más importante fue el movimiento de la gente del campo hacia las ciudades. Sin embargo, para finales del siglo XX estos flujos migratorios fueron más intensos entre ciudades, sobre todo de las ciudades grandes a las de tamaño intermedio. La migración de mexicanos hacia Estados Unidos también es muy intensa (figura 7.7); se estima que, en promedio, 400 mil mexicanos dejan el país cada año.



Figura 7.7

La migración de mexicanos, sobre todo hacia Estados Unidos, es una de las fuerzas que ha modelado fuertemente la demografía de la población de México durante las últimas décadas. Actualmente se estima que cerca de 400 mil mexicanos dejan el país cada año (tomada de: u.univision.com/contentroot/uol/art/images/noticias/mexico/2007/07/070701_cruce_ilegal_3.jpg)

En síntesis, la población de México ha reducido su tasa de crecimiento en los últimos años debido principalmente a un aumento de la emigración y una disminución tanto de la natalidad como de la mortalidad; como resultado, la tasa de crecimiento poblacional actual es muy cercana a 1% anual.

Un rasgo muy importante de la población de México es su alto componente indígena. Puesto que existen diferentes criterios para considerar este rasgo poblacional, el número exacto de indígenas mexicanos es incierto. Se estima que entre 6 y 12% de la población total nacional es indígena. La etnia más numerosa es la de habla náhuatl, seguida por la maya, la zapoteca y la mixteca. Estas etnias habitan principalmente en Oaxaca, Veracruz, Chiapas, Yucatán, Estado de México y Puebla. Por desgracia, es precisamente en la población indígena donde se concentran los mayores niveles de pobreza, a pesar de ser la dueña de la mayor riqueza natural del país, pues las diferentes etnias indígenas habitan en los bosques y selvas que se mantienen

en mejor estado de conservación y que constituyen nuestras principales áreas de captación de agua. Por otro lado, algunas prácticas indígenas de uso de los recursos naturales —aunque ciertamente no todas— son armónicas y amigables con el medio ambiente. No obstante, las relaciones que caracterizan a su economía y las formas originales de organización interna se están perdiendo; la consecuencia de ello es la desarticulación de la capacidad de estas sociedades para desarrollarse de manera sostenible.

7.3.2

Patrones de consumo

Durante la segunda mitad del siglo XX, cuando la población mundial de seres humanos crecía a las tasas más aceleradas que se han registrado en la historia, se generalizó la idea de que era precisamente la explosión demográfica la que estaba causando los mayores problemas de deterioro ambiental. Desde entonces surgió la preocupación de que, de continuar esa tendencia de crecimiento, en pocos

años los recursos del planeta no serían suficientes para sostener a la población humana. El postulado del que parten estas concepciones es que, desde una perspectiva funcional, la relación de los seres humanos con el ambiente es similar a la que mantienen todos los otros millones de especies que viven en el planeta, pues las sociedades humanas, al igual que otros seres vivos, dependen completamente de la energía y los recursos que obtienen de la naturaleza. Las porciones que no se utilizan tarde o temprano regresan al ambiente en forma de desechos (en el caso de la materia) o se disipan de diversas maneras (en el caso de la energía). De acuerdo con este postulado, la interacción entre la humanidad y la naturaleza tiene lugar independientemente de los cambios tecnológicos, económicos y culturales que ocurran en las sociedades humanas a través de la historia.

Sin embargo, la manera en la que el hombre interactúa con la naturaleza tiene ciertas peculiaridades que la distinguen de las formas de interacción de otras especies. La más importante es su patrón de consumo, que es mucho más elevado que el de cualquier otra especie. Aunque la biomasa de la población humana no llega a 1% de la biomasa total de los **heterótrofos** que habitan el planeta, el ser humano es, por mucho, el principal consumidor de recursos de la Tierra. Según diversas estimaciones, el hombre se apropia de una parte, que varía entre 16 y 40%, de la **productividad primaria neta** de los ecosistemas terrestres; además, se apropia de la mayor proporción de recursos de los océanos a través de sus actividades pesqueras. Este consumo es de tal magnitud que se estima que las demandas humanas, medidas en términos de los recursos que se consumen y de la superficie de tierras y aguas necesarias para purificar sus desechos, sobrepasaron la capacidad de carga del planeta desde la década de 1980 y en la actualidad están 20% por encima de ella.

Como vimos en el capítulo 6, los seres humanos requerimos para nuestra subsistencia de un conjunto de bienes y servicios que obtenemos de la naturaleza para satisfacer nuestras necesidades básicas. Entre estos bienes y servicios podemos nombrar al agua, los alimentos, la energía, la madera, las medicinas y las áreas de esparcimiento, entre muchos otros. Durante muchos siglos la intensidad y la manera en la que se usaban estos recursos naturales no alteraban tan significativamente el equilibrio de los ecosistemas, pues la cantidad de recursos extraídos no superaba la capacidad de los ecosistemas para renovarlos; además, los desechos que se desprendían de este manejo de los recursos podían reincorporarse al ambiente sin generar alteraciones importantes. Con el paso del tiempo, como resultado del crecimiento de la población humana y del desarrollo tecnológico, las sociedades empezaron a demandar cada vez más productos del medio ambiente, y la tecnología fue transformando estos productos en otros manufacturados, algunos de los cuales no se degradan tan fácilmente o no llegan a degradarse jamás.

Con el surgimiento de nuevos productos manufacturados aparecieron nuevas necesidades, la mayoría de las cuales no pueden considerarse realmente como básicas o de supervivencia, sino que responden a patrones culturales y educativos (figura 7.8). La vida moderna se puede caracterizar como *la era del consumo*, ya que funciona de acuerdo con la lógica de adquirir bienes y servicios por medio de transacciones monetarias, en muchos casos con la finalidad de satisfacer nuestras necesidades básicas, pero también para complacer desde nuestros deseos más refinados hasta nuestros antojos más insignificantes y absurdos.

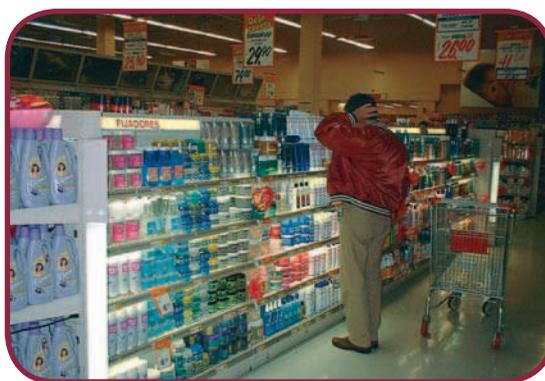


Figura 7.8

Los actuales patrones de consumo favorecen la producción y venta de artículos que no satisfacen necesidades reales, sino las creadas por la moda, la publicidad y otras fuerzas sociales.

El consumismo

El consumo, concebido como un resultado inevitable de las actividades de una sociedad, no es ni positivo ni negativo en términos ambientales. El problema es que, en nuestra sociedad actual, el consumo en sí mismo se ha convertido en una nueva necesidad. Es muy común que la gente se dedique a comprar productos que no le son indispensables, como una forma de desahogo, diversión o pasatiempo, en el contexto de una vida cotidiana llena de estrés, conflictos y enajenación, característica de las grandes ciudades. Además, en algunos círculos de la sociedad actual la escala de valores se ha deformado y tergiversado profundamente, de tal manera que es común que la gente sea valorada no por lo que es, sino por lo que posee. Esto se ve agravado por la economía de mercado que domina en el mundo actual. Estas tendencias sociales llevan a las personas a adquirir productos en exceso, percibiendo que necesitan lo que en realidad es superfluo. A esta actividad de *comprar por comprar* se le llama **consumismo** y se caracteriza por ser un consumo excesivo e irracional que no responde a necesidades reales. El concepto de **patrones de consumo** es un tanto más complejo, pues engloba varios aspectos del consumo, como los tipos de productos que se adquieren, la frecuencia con la que se compran y los hábitos que implica la adquisición de tales productos.

Los medios de comunicación masiva, como la televisión y la radio, desempeñan un papel importante en la determinación de los patrones de consumo de una población pues, a través de las campañas publicitarias, inducen a la gente a consumir diferentes productos. La publicidad, que se expresa en anuncios de radio y televisión, o en las imágenes que vemos en revistas, periódicos y anuncios espectaculares (figura 7.9), tiene por objetivo ofrecer y promover productos, sugiriendo al público que éstos son los mejores

en el mercado. De esta manera, la publicidad influye en la forma de pensar de la gente e induce en ella la necesidad de comprar los productos ofrecidos para convertirlos en una moda. Ciertos productos se han convertido en un símbolo de estatus en la sociedad, y la gente los adquiere no por su función, sino por su imagen y significado. Cuanto más atractiva es la publicidad asociada con un producto, más se favorecerá su consumo; esta demanda, a la vez, fomentará un incremento en la producción. Éste es el objetivo final del productor: *producir más, vender más y ganar más*. El bombardeo publicitario del que todos somos blanco no sólo genera una actitud consumista en la gente, sino que además, promete algo que no se cumple con la compra del producto: una mejor calidad de vida e incluso hasta la felicidad.



Figura 7.9

La publicidad que vemos todos los días en las calles ofrece y promueve ciertos productos, influyendo en la forma de pensar de la gente e induciéndola a comprarlos.

Es una pena ver que, en estos días, una

gran cantidad de personas han caído en la trampa de suponer que la felicidad y el bienestar se alcanzan al poseer o consumir bienes materiales, mientras que valores como la amistad, el amor y la compasión por otros seres vivos quedan un segundo plano, al igual que otros valores éticos, culturales y estéticos. La única manera de modificar esta actitud consumista que se basa en el valor social asociado a la capacidad de consumo es a través de la educación, la cual puede ayudar a las personas a que se formen un juicio crítico y sensato, basado en el análisis y la reflexión de información objetiva que les permita tomar las mejores decisiones sobre cómo relacionarse con el entorno.

Muchas sociedades actuales han adquirido el hábito de concentrarse en el consumo y producción excesiva de sólo unos cuantos bienes. Paradójicamente, al mismo tiempo se desaprovecha una vasta cantidad de recursos de otros tipos. Así, mientras se sobreexplotan algunas especies de plantas y animales, muchas otras se utilizan muy poco o incluso se desperdician. Esto es un claro síntoma de que hay una falta de armonía entre la sociedad y la naturaleza, lo que ha conducido paulatinamente a un gran desequilibrio entre lo que la naturaleza produce y lo que el ser humano consume. Si no hacemos nada por modificar estas tendencias, la crisis ambiental actual se podría agravar hasta alcanzar niveles realmente dramáticos.

Uno de los grandes problemas que genera el consumismo sobre el medio ambiente es que muchos de los productos que se consumen ocasionan un deterioro importante del agua, el suelo, la atmósfera y la biodiversidad, tanto por la forma de producirlos como por los desechos que se generan a partir de su producción. Las tecnologías utilizadas en esta producción casi siempre ignoran los costos ambientales de su actividad, entre los que se encuentra la **sobreexplotación** de materias primas (es decir, su extracción por encima de la capacidad de los ecosistemas de renovarlas), la emisión de gases y líquidos contaminantes a la atmósfera y a los cuerpos de agua, y la producción de desechos sólidos peligrosos que afectan tanto a la salud humana como a la de los ecosistemas (véase el capítulo 8). Como consecuencia, estos daños se revierten a la larga y acaban por afectar al propio consumidor, ya que al reducirse la calidad de los ecosistemas naturales, disminuye también la calidad de vida de las sociedades que dependen de ellos.

El transporte y la presentación de los productos manufacturados para su venta también representan serios problemas ambientales; por ejemplo, los empaques son un problema muy importante por su cantidad y calidad. La mayoría de las veces, los empaques no son **biodegradables**, lo que implica que no se descomponen a corto plazo, o bien, que al intentar destruirlos generan mucha contaminación. Por eso, es necesario que en las formas de producción se tome en cuenta el ciclo de vida de cada producto. Para ello, se deben cumplir las normas ambientales del país en que se elaboran, de tal manera que se restrinja en alguna medida el deterioro a los ecosistemas y sus componentes relacionados con los procesos productivos. Sin embargo, en muchos países aún no existen suficientes normas ambientales, por lo que es necesario que sus gobiernos se aboquen a emitir las. En el capítulo 10 hablaremos con más detalle de la normatividad y de la función que desempeñan los gobiernos en esta área.

Otros factores que definen los patrones de consumo

Otros factores adicionales que determinan los patrones de consumo en una población son las influencias culturales de cada sociedad o país, la distribución de la población entre rural y urbana, el poder adquisitivo de las personas, y los sistemas de producción.

Los patrones de consumo crean formas de vida, y cada país y cultura tiene las suyas. La forma de vida (y los patrones de consumo asociados) de una persona que vive en Nueva York sin duda es muy diferente de la de alguien que vive en una zona rural de Kenia. Por otro lado, es cierto que la **globalización** es una fuerza que ha llevado a que las formas de vida de diferentes países sean cada vez más parecidas. Sin embargo, en cada país hay diferencias claras entre la población rural y la población urbana en cuanto a sus patrones de consumo: un consumidor urbano típico gasta una cantidad muy superior de recursos energéticos e hídricos que uno que vive en una comunidad rural.

El poder adquisitivo de las personas es otro de los factores que definen los patrones de consumo. El poder adquisitivo se refiere a la cantidad de dinero del que dispone la gente para adquirir productos, el cual depende, a la vez, de su salario y otros ingresos. En general, las personas que tienen un mayor poder adquisitivo son las que tienen patrones de consumo más altos y, consecuentemente, más dañinos para el medio ambiente. Sin embargo, no sólo las personas de los niveles socioeconómicos más elevados adquieren malos hábitos de consumo; mucha gente de bajos ingresos tiene también patrones

de consumo que son dañinos para el medio ambiente. Un ejemplo de ello es el consumo de “alimentos chatarra”, que se presenta en todos los niveles sociales y genera grandes cantidades de basura; no produce el mismo efecto ambiental consumir unas papas fritas comerciales que un elote con chile piquín. Una proporción importante de los desechos producidos por los “alimentos chatarra” se arroja en sitios públicos como parques, calles, avenidas, carreteras, ríos y cañadas. Por eso, cuando nos preguntamos cuánta gente puede vivir de manera sostenible en un lugar, debemos tomar en cuenta no sólo el número de habitantes, sino también sus patrones de consumo.

En cada sociedad hay **sistemas de producción** particulares, los cuales se refieren a qué bienes se producen, en qué cantidades y de qué manera se lleva a cabo esa producción. Los sistemas de producción se modelan y definen en gran medida a partir de los patrones de consumo de la población, pues lo que la población demanda es lo que tiene mayor éxito en el mercado, y cuando un producto deja de ser consumido por la gente, tarde o temprano se deja de producir. Por esta razón, si nos hacemos cada día más conscientes de nuestro efecto sobre el medio ambiente y, como resultado, modificamos nuestros patrones de consumo, a la larga estaremos cambiando también nuestros sistemas de producción. Realmente es indispensable que cambiemos nuestro patrón de consumo, de tal manera que evitemos consumir en exceso y no adquiramos productos que en sí mismos o en su proceso de producción son dañinos para el ambiente. Esto no significa que debamos renunciar a todas las comodidades y ventajas de la vida moderna, gracias a la cual tenemos acceso a productos tecnológicos que hacen posible una mejora en el bienestar social y en la calidad de vida. Pero hay que estar conscientes de que los seres humanos debemos restringir nuestro consumo, pues nuestro planeta no sería capaz de mantener a una humanidad con los niveles de consumo que tienen actualmente las personas de los países desarrollados. Por ejemplo, si todos los adultos del planeta tuvieran un automóvil, el petróleo del mundo se agotaría en unos cuantos meses. Por supuesto, en vista de que las personas de los países desarrollados son las que más consumen, son ellas las que más deben reducir su consumo. Lo más deseable sería que los países desarrollados redujeran su consumo per cápita, y que se favoreciera el desarrollo de los países menos industrializados, pero manteniendo siempre niveles de consumo acordes con la conservación de la naturaleza.

Productos “verdes”

Los productos verdes son aquellos que, en su proceso de producción, utilizan recursos bióticos que fueron manejados y extraídos de manera sostenible, es decir, sin agotarlos y respetando el ritmo al que la naturaleza los renueva; además, la producción de este tipo de bienes no genera desechos contaminantes para la atmósfera, el suelo o el agua (figura 7.10).

Cada vez hay en el mercado un mayor número de productos que fueron elaborados con tecnologías adecuadas que no dañan el ambiente. Muchos de esos productos se cosechan o se extraen de terrenos de cultivo; otros, como la madera, las resinas y el chicle, se obtienen directamente de los ecosistemas naturales; otros más son manufacturados y se derivan de recursos no renovables como los minerales y el petróleo. Los procesos de producción de estos diferentes bienes varían mucho por el hecho de que algunos son más caros que otros, y algunos generan más contaminantes que otros. Sin embargo, en muy pocos casos se toma en cuenta el costo ambiental de la producción. Para que la producción sea más “amigable” con el ambiente (es decir, para que sus daños sean nulos o muy bajos) es necesario invertir dinero, ya que se requiere hacer un gasto económico para tratar las aguas contaminadas, para instalar dispositivos que reduzcan la emisión de contaminantes en la maquinaria, o para utilizar fertilizantes derivados de la composta y no de la producción industrializada de agroquímicos, entre otras posibilidades.

El gasto económico necesario para que la producción sea más amigable con el medio ambiente debe ser absorbido tanto por los consumidores como por aquellos productores que tengan ganancias altas. Es claro que los productores de bajos recursos, como ciertos agricultores, ejidatarios y comuneros

forestales, no pueden absorber estos costos adicionales. Pero hay alternativas. Una de ellas son los mercados especiales que se han ido creando para la venta de productos “verdes”, también llamados sostenibles o sustentables, orgánicos o amigables con el ambiente (figura 7.10). Estos productos tienen que obtener una certificación por parte de algún organismo que evalúa el proceso de producción y se asegura de que éste cumpla (es decir, lo certifica) de acuerdo con una serie de lineamientos y normas ambientales. Muchos de estos organismos certificadores son organizaciones no gubernamentales de carácter internacional. La certificación otorga al producto una “etiqueta verde” que da constancia del carácter sostenible del proceso de producción y del producto mismo. Pero como estos productos a menudo son más caros que sus equivalentes no verdes (pues el proceso de certificación y la producción sostenible requieren de una inversión económica), sólo unos cuantos están dispuestos a pagar este sobreprecio, así que poca gente los adquiere. No sólo las personas de bajos recursos económicos toman esta actitud, sino incluso las de clases socioeconómicas altas, en parte por desconocimiento y en parte por desinterés.

Es necesario que tanto los países desarrollados como los que están en vías de desarrollo cambien sus formas de producción y de consumo por otras que sean más amigables con el ambiente y que no causen tantos daños a la naturaleza. Para esto se requiere de un cambio cultural sustancial que impulse a la gente a modificar sus escalas de valores y a concebir el cuidado del ambiente como un asunto prioritario. Un primer paso es que todos los ciudadanos contemos con información suficiente y oportuna para que podamos comprender tanto los problemas ambientales como el papel que cada uno de nosotros desempeña en ellos. De esta manera, tendremos los elementos necesarios para tomar las decisiones más adecuadas en cuanto a qué consumimos, cómo lo consumimos y en qué cantidades.

Como se concluye de este análisis, la información es una herramienta clave para cambiar la forma de pensar de la gente y sensibilizarla para que consuma productos “verdes”. Primero que nada, es necesario conocer qué productos de este tipo existen en el mercado de cada localidad. Entre los productos agrícolas hay ya una serie de productos “verdes” (u orgánicos) que se cultiva-



Figura 7.10

Actualmente podemos encontrar productos orgánicos o “verdes” en la mayoría de los supermercados. En general, la elaboración de estos productos no genera desechos contaminantes para la atmósfera, el suelo o el agua (*tomadas de:* http://www.fondeso.df.gob.mx/comercializacion/fotos/cafe_uciri.jpg; <http://www.interempresas.net/FotosArtProductos/P33034.jpg>; http://www.gyborganics.com.ar/images/fotografias/productos/estragon_300490.jpg; <http://cp06.virtuabyte.com/~olave/images/stories/titulos/organico2.gif>)

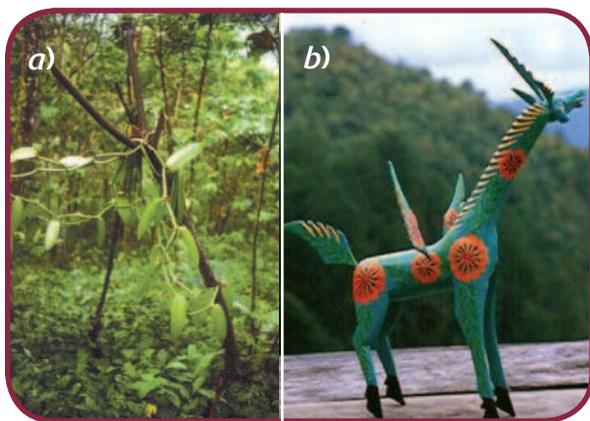


Figura 7.11

a) La vainilla es uno de los productos orgánicos mexicanos más favorecidos en el mercado internacional. b) Muchas artesanías talladas (como este alebrije) se elaboran a partir de madera certificada, extraída de forma sostenible.

ron sin utilizar fertilizantes ni pesticidas de origen industrial, por lo cual su producción no implica la contaminación del agua o del suelo. Un ejemplo notable es el caso del café orgánico, del cual México es uno de los principales productores en el mundo. Asimismo, nuestro país es un productor importante de vainilla (figura 7.11a) y cacao orgánicos. Otros productos “verdes” nacionales no son cultivados, sino que se extraen directamente de la naturaleza tomando medidas especiales para no dañarla y para no sobreexplotarla, como en el caso de la madera certificada (figura 7.11b) y del atún. Por desgracia, la producción “verde” en México sigue siendo muy limitada, tanto por la escasa variedad y cantidad de productos disponibles, como por el hecho de que muy pocos compradores favorecen estos mercados.

El papel de la información y la educación ambiental

Como mencionamos antes, el acceso a información objetiva y completa sobre lo que se produce es fundamental para ayudar a que las personas tomen las decisiones más adecuadas para cuidar su medio ambiente. Existen diversas organizaciones de consumidores que se encargan de promover la elaboración de productos “verdes”, así como de favorecer su consumo e informar al público de sus ventajas y de su relevancia para mantener un planeta más sano y limpio. Los medios de comunicación masiva podrían desempeñar un papel muy importante en la educación ambiental del público en general, en vez de sólo incluir un tipo de publicidad que impulse a las personas a consumir de manera irracional. Por desgracia, los medios de comunicación no parecen estar conscientes de su responsabilidad y hacen muy poco por cambiar la mentalidad de los ciudadanos en cuanto a sus patrones de consumo. Sería deseable que la publicidad promoviera un consumo responsable y moderado que enfatizara, por ejemplo, la necesidad, o incluso la urgencia, de ahorrar agua y energía; además, podría divulgar más activamente el sinnúmero de opciones o alternativas a través de las cuales se puede lograr este ahorro. ¿Quieres conocer algunas de ellas? Cuando te vayas a bañar, puedes poner una cubeta bajo la regadera mientras esperas a que salga el agua caliente; después, puedes utilizar esa agua para el inodoro o para regar las plantas. Y con respecto a la energía: durante el invierno, tal vez no haga falta que tengas el sistema de calefacción encendido en casa durante todo el día; tal vez sea suficiente con ponerte una cobija de más o un suéter. Lo mismo se aplica para el sistema de aire acondicionado durante las épocas de calor: no lo enciendas, tal vez sea suficiente con ventilar bien las habitaciones.

También es fundamental que la gente cuente con información sobre las características de los productos que adquiere, en particular sobre cómo se elaboraron y qué efectos tienen sobre el ambiente. Los productos no deben cumplir sólo con un parámetro de calidad y con la función para la que fueron elaborados, sino también con las normas de producción que garanticen el cuidado del medio ambiente. En México, la Procuraduría Federal del Consumidor (Profeco) ha hecho algunas campañas en este sentido, pero los logros aún son muy limitados. Debería ser una obligación de todos los productores informar al público sobre los daños al ambiente que implica la elaboración y utilización de los productos que ven-

den. Con esta información, los ciudadanos tendrían mejores posibilidades de decidir lo que consumen y, en la medida en que la educación ambiental tenga un mayor alcance y sus posibilidades económicas lo permitan, elegirán productos cada vez más limpios y amigables con el ambiente. Así, los productos “verdes” empezarán a competir realmente con los productos no verdes o que se producen de forma no sostenible y, con el paso del tiempo, los productos “verdes” y limpios desplazarán a los otros, gracias a la demanda del público. A la vez, una mayor demanda permitirá que los precios de los productos “verdes” se reduzcan y sean más accesibles en el mercado. Lo mejor sería que estos cambios se llevaran a cabo a nivel mundial. Por fortuna, muchas instituciones están promoviendo globalmente sistemas de manejo ambiental que reorientan los procesos de adquisición de bienes y servicios, y que ahorran energía, agua y gasolina, lo cual no sólo deriva en ahorros económicos directos para las instituciones, sino también en un mejor ambiente.

Los mercados libres de los países con economías abiertas pueden ayudar a que los productos “verdes” encuentren nuevas opciones para comercializarse y que, por consiguiente, su demanda se incremente. Sin embargo, con las tendencias actuales hacia la globalización, se corre el riesgo de que se reduzca la diversidad y la especificidad de la oferta de cada país, ya que una de las tendencias de los mercados globalizados es la homogeneización y simplificación de los productos. Sería muy desafortunado e indeseable que se redujera la diversidad de los productos que ofrece cada país, pues cada uno debería tener sus patrones de consumo en función de sus potencialidades naturales, los cuales podrían modelarse de tal manera que protejan su diversidad y patrimonio natural, en vez de copiar los patrones de consumo de otras naciones.

Por consiguiente, es necesario regular tanto la producción como el consumo y, para ello, urge que la educación ambiental se imparta a todos niveles, empezando por el hogar, el jardín de niños y las escuelas primarias, y se refuerce posteriormente en todos los demás niveles de enseñanza. Además, es fundamental que el gobierno empiece por dar el ejemplo, mostrando una conducta responsable, ya que es el principal usuario de los recursos bióticos y el consumidor más importante a nivel nacional.

Existen también otros mecanismos a través de los cuales se puede favorecer que la gente modifique sus hábitos de consumo cuando éstos son inadecuados, promoviendo además el consumo de productos más sanos y sostenibles. Algunos de estos mecanismos son de carácter económico. Tal es el caso del establecimiento de costos adicionales o multas que deben pagar las empresas o industrias que contaminan, o bien, el cobro de impuestos ambientales. Por otro lado, también hay instrumentos jurídicos, como las normas oficiales mexicanas y otro tipo de leyes ambientales que establecen lineamientos para el manejo de recursos y las formas de producción. En el capítulo 10 nos ocuparemos del tema de la normatividad y los aspectos jurídicos de la interacción entre el ser humano y la naturaleza.

En resumen, uno de los principales retos de la educación ambiental es lograr que los consumidores adopten buenos hábitos de consumo. Esto incluye alentar a la gente a que asuma responsabilidad, haga conciencia en tres áreas fundamentales: de su vida: vigilar el gasto familiar, velar por la salud personal y familiar, y cuidar de la naturaleza y conservar los ecosistemas naturales.

Las tres erres

¿Qué podemos hacer los ciudadanos en cuanto a nuestros hábitos individuales de consumo para mejorar la situación ambiental de nuestro planeta? Primero que nada, recuerda que no sólo nos debemos preocupar por la calidad de los productos que adquirimos, o por su duración, su funcionamiento y su precio; también debemos tomar en cuenta los impactos ambientales que se generan en su producción, transporte, manejo y presentación para la venta. Para esto, es deseable promover la cultura de *las tres erres*, que son las siguientes: 1) reducir el consumo; 2) reusar los productos; y 3) reciclar los desechos.

Aunque parezca muy difícil cambiar a corto plazo los patrones de consumo y los sistemas de producción de toda la población humana, sí es posible avanzar en esta dirección. Para lograrlo, sería necesario que ocurriera lo siguiente: *a*) que la población deje de consumir las grandes cantidades de productos innecesarios que ahora consume (figura 7.8); *b*) que la gente no compre productos contaminantes o productos que, por su forma de elaboración, amenazan a la biodiversidad [por ejemplo, debemos evitar comprar animales o plantas de especies en peligro de extinción (figura 7.12) o adquirir madera cortada de forma ilegal, o consumir peces y mariscos derivados de prácticas ecológicamente no sostenibles]; y *c*) que la gente compre y demande productos de calidad, que beneficien su salud y que se produzcan a través de métodos ecológicamente sostenibles y no contaminantes. Otro elemento que se puede añadir a nuestros criterios de decisión es el consumo de productos derivados del **comercio justo**, en el que se busca dar un precio justo a los productores, reduciendo el pago a los intermediarios y permitiendo que las ganancias lleguen a los que menos tienen; o bien, favoreciendo a los productos derivados de los mercados socialmente sostenibles, en los que la certificación que reciben los productos asegure que fueron producidos de manera justa (por ejemplo, que los trabajadores reciban un salario justo y tengan acceso a la salud pública y a la educación; que no se contrate a niños y que las jornadas de trabajo no rebasen ocho horas al día, entre otros criterios).

Si el público demandara sólo productos “verdes”, elaborados en condiciones justas y de forma sostenible, las cadenas productivas tendrían que empezar a fabricarlos. En la actualidad sucede lo contrario: el productor estimula la demanda por medio de la publicidad. Ojalá que en el futuro, gracias a la educación, sean los consumidores los que definan la demanda y, por consiguiente, la producción. Los patrones de consumo cambiarán sólo a partir de las decisiones conscientes de cada persona y de la sociedad en su conjunto, pues en general, no es suficiente con tener una buena legislación ambiental o con que se creen instituciones ambientales en los gobiernos.

En el siglo XXI las nuevas generaciones tienen ante sí un gran reto: crear conciencia en la población de la importancia de preservar nuestros recursos naturales y, a partir de ello, modificar sus patrones de consumo para generar nuevas fuerzas de mercado que contribuyan al desarrollo sostenible. Por otro lado, también es fundamental que las universidades e instituciones de investigación formen profesionistas y generen conocimientos para desarrollar **tecnologías limpias** y sostenibles que ayuden a lograr este objetivo. Esto nos lleva al tercer factor de deterioro que analizaremos a continuación.



Figura 7.12

La extracción ilegal y la venta en mercados negros de plantas en peligro de extinción son unas de las amenazas más importantes para la conservación de estos organismos. En esta fotografía se observa un cargamento de cactus y otras plantas suculentas recién extraídas de su ecosistema natural para su venta.

7.3.3 Tecnologías

Como mencionamos al inicio de este capítulo, el deterioro del medio ambiente no puede explicarse sólo por la explosión demográfica y los patrones de consumo de la población, ya que también las tecnologías que se utilizan para la extracción, la producción y el manejo de los bienes que se

obtienen de la naturaleza tienen efectos muy importantes sobre su deterioro. Aunque una población sea pequeña y tenga bajas tasas de consumo, es capaz de producir un alto impacto sobre la naturaleza si utiliza una tecnología muy contaminante, o que no sea acorde con el medio ambiente. Tal es el caso de muchas poblaciones de campesinos que son muy pequeñas y están dispersas en algunas regiones del país. Estas poblaciones viven bajo economías de subsistencia y pueden llegar a provocar una gran deforestación al utilizar inadecuadamente el fuego en sus actividades agropecuarias (figura 7.13); como resultado, provocan grandes incendios en los bosques y las selvas en las que están enclavadas, dejando el suelo desprovisto de vegetación, lo que provoca su erosión. Por desgracia, este tipo de incendios accidentales son muy comunes en la actualidad. En contraste, hay poblaciones de mayor tamaño y que además tienen mayores niveles de consumo, pero que causan un bajo impacto en la naturaleza porque utilizan tecnologías amigables con el medio ambiente. Como ejemplo de ello, en nuestro país hay muchos ejidos y comunidades indígenas de Oaxaca, Michoacán o el Estado de México, que realizan un manejo sostenible de sus recursos forestales (figura 7.11b).



Figura 7.13 Como muchas actividades agropecuarias implican el uso del fuego, es común que su falta de control provoque accidentes y origine incendios forestales de graves consecuencias. (tomada de: www.elobservatodo.cl/admin/render/noticia/8084)

Durante décadas, y más aún a partir de la revolución industrial, el ser humano ha tenido la convicción de que el desarrollo de la tecnología puede resolver todos sus problemas, cubrir todas sus necesidades y superar las dificultades asociadas a los procesos de producción. Sin embargo, esta concepción es un grave error. Si bien es cierto que la tecnología ha sido la herramienta de las sociedades humanas para transformar los productos de la naturaleza en los bienes y servicios que permiten su desarrollo y bienestar social, también es cierto que muchas de estas tecnologías generan impactos negativos severos en el ambiente. Y lo que es aún peor, el deterioro ambiental que se desprende de estos impactos no sólo lo padecen las sociedades que utilizan y aplican las tecnologías, sino el planeta entero. El uso de tecnologías inadecuadas o mal aplicadas a las condiciones específicas de los distintos ecosistemas ha generado profundos daños a la naturaleza, la cual tarde o temprano acabará por cobrar este deterioro, una vez que ya no pueda ofrecer los satisfactores en los que se basa el desarrollo de las sociedades humanas.

Existen varios ejemplos en la historia reciente de la humanidad del uso inadecuado de la tecnología, el cual ha tenido consecuencias desastrosas sobre el ambiente. Uno de ellos es el modelo tecnológico de la **revolución verde**, que estuvo en boga en el sector agrícola durante la década de 1970. Este modelo planteaba que la productividad de la tierra se puede elevar sustancialmente a través de la aplicación intensiva de fertilizantes y pesticidas industriales, la utilización de maquinaria para arar, sembrar y cosechar, así como el uso de sistemas de riego tecnificados (figura 7.14). Este tipo de tecnologías se adoptaron en México, en convenio con la Fundación Rockefeller de Estados Unidos, para utilizarlas en las zonas semiáridas en donde existen terrenos planos y condiciones climáticas contrastantes a lo largo del año (esto es, una marcada temporada de lluvias, seguida de una temporada seca). Como este modelo tecnológico



Figura 7.14

El modelo de la revolución verde planteaba que la productividad de la tierra se puede elevar gracias al uso intensivo de fertilizantes y pesticidas industriales, así como de maquinaria agrícola y sistemas de riego tecnificados. (tomada de: <http://www.sedarh.gob.mx/images/noticias/zonacentro/irrigacion600.jpg>)

resultó muy exitoso, ya que efectivamente elevó la productividad agrícola de este tipo de tierras, y por lo tanto, la producción de alimentos, su aplicación se extendió por todo el mundo, pero sin llevar a cabo modificaciones acordes a cada región.

La aplicación del modelo de la revolución verde sin duda contribuyó a disminuir la intensidad y la frecuencia de hambrunas en el mundo. Sin embargo, también es cierto que el uso intensificado y generalizado de fertilizantes y pesticidas industriales produjo agudos efectos sobre la salud humana (por ejemplo, aumentó la incidencia de cáncer en las localidades en las que se aplicaban), a la vez que contaminó el agua y los suelos, y llevó a la incorporación de sustancias químicas peligrosas a las cadenas tróficas de los ecosistemas naturales. Asimismo, este modelo tecnológico ha sido la causa de

la sobreexplotación de muchos mantos acuíferos, así como de la erosión y salinización de los suelos. Como se concluye de esta descripción, la revolución verde es un ejemplo de un modelo tecnológico que resultó exitoso en el corto plazo, pero que también generó problemas de deterioro ambiental muy serios que la humanidad aún no ha podido resolver.

Otro ejemplo de tecnologías novedosas que resultaron contraproducentes desde el punto de vista ambiental fue la invención de los productos químicos clorofluorocarbonados, que se utilizaron en la fabricación de aerosoles, pinturas, refrigeradores y aparatos de aire acondicionado, entre otros. Si bien estos productos representaron una revolución tecnológica muy apreciada en su momento, a la larga se comprobó que estas sustancias provocan el adelgazamiento de la capa de ozono de la estratosfera (véase el capítulo 8, sección 8.3.2), pues estos gases son de vida muy larga, manifiestan una alta volatilidad y producen una serie de reacciones químicas que transforman el ozono (O_3) en oxígeno molecular (O_2). De esta forma, la capa de ozono deja de cumplir con su función de absorber los rayos ultravioleta que llegan del Sol a la atmósfera de la Tierra. En este caso, los países que desarrollaron esta tecnología y las regiones en las que más se utilizaron no fueron los más afectados, pues los clorofluorocarbonados tienden a concentrarse en los polos (particularmente en la Antártida), de manera que son estas regiones las que resienten más sus efectos.

En los últimos años se han diseñado tecnologías alternativas más amigables con el medio ambiente, tanto en la industria agrícola, como en la ganadera, pesquera y forestal. Algunas de estas tecnologías tienen bajos consumos energéticos o utilizan fuentes alternativas de energía (como la energía solar o la eólica). Muchas otras evitan el uso de agroquímicos industriales o tienen el cuidado de fertilizar la tierra con sustancias degradables y controladas, como es el caso de la agricultura orgánica. En otros casos, los dueños de la tierra deciden llevar a cabo actividades productivas que no transformen los ecosistemas naturales (como el manejo forestal sostenible o el ecoturismo). Estas actividades, además de que pueden ser muy productivas y mejorar sustancialmente los ingresos de la población, son compatibles con la conservación de la naturaleza. En el capítulo 9 expondremos con mayor detalle diversas alternativas productivas que son amigables con el ambiente.

7.3.4 Gobernabilidad

El último factor de deterioro que mencionaremos en este capítulo es el que tiene que ver con el conjunto de reglas, formales e informales, que determinan la manera en la que los seres humanos hacemos uso de los ecosistemas. Las reglas, normas y leyes que se formulan en cada país y que regulan la transformación de la naturaleza por parte de la sociedad imponen un orden a los procesos de producción y al aprovechamiento de la naturaleza. Todo esto se traduce en códigos de conducta social, en instituciones específicas de gobierno y en organizaciones no gubernamentales regidas por estatutos y reglamentos acordes a las condiciones de cada país y región. A todo lo que se relaciona con estos aspectos de la interacción entre el ser humano y la naturaleza se le denomina **gobernabilidad**.

El concepto de gobernabilidad del sector ambiental (también conocido como gobernanza o gobernanación), al incorporar a la sociedad en general, incluyendo a las organizaciones no gubernamentales y a las diferentes fundaciones y patronatos locales, reconoce que el gobierno de un país no es el único sector que debe responsabilizarse de la gestión y el manejo de los problemas ambientales, sino que debe hacerlo en acuerdo con los diferentes actores sociales, políticos y económicos que conforman a la sociedad. Al reconocer el nivel de responsabilidad que tiene la sociedad en su conjunto, se han ideado diversos mecanismos de participación privada y social para que la sociedad tenga participación en los temas ambientales. Por consiguiente, gobernar en materia ambiental consiste en lograr una interdependencia entre los actores públicos, privados, políticos y civiles de una sociedad.

La gobernabilidad en materia ambiental ha avanzado mucho en las últimas décadas en todos los países. Sin embargo, si se le compara con otros aspectos de la vida social de cada nación, podemos ver que su origen y su evolución en realidad son muy recientes. Como este tema es de gran relevancia, pues ha llevado a la creación de nuevas instituciones, políticas, programas e instrumentos ambientales que tienen la posibilidad de repercutir sustancialmente en la relación hombre-naturaleza, lo analizaremos en detalle en el capítulo 10.



Para reflexionar...

1. Se calcula que para el año de 2020 la población humana alcanzará 8,000 millones de personas, lo que significa que en menos de 20 años la población humana se habrá multiplicado 1.3 veces. ¿Cómo te imaginas que se verán nuestras grandes ciudades para entonces? ¿Qué problemas se agudizarán y qué nuevos retos anticipas que enfrentaremos?
2. ¿Cuáles son tus hábitos de consumo actuales? Es decir, ¿qué productos compras y cuáles de esos productos son realmente necesarios? ¿Cómo podrías cambiar tus hábitos de consumo de tal manera que favorezcas un ambiente más limpio y mejor conservado?
3. ¿Cómo podrías evaluar si eres o no un consumista? ¿Qué criterios tomarías en cuenta?
4. Reflexiona si, en el medio social en el que te desenvuelves, el hecho de poseer ciertos artículos (un automóvil, un iPod, un par de tenis, un tipo de chamarra, un DVD, algún perfume o loción) te hace sentir (a ti o a tus compañeros) más seguro, más valorado, más importante o más atractivo. Por otro lado, reflexiona si tu grupo de amigos valora el que las personas sean leales, sensibles, generosas y caritativas, que participen en proyectos sociales o de conservación de la naturaleza. ¿A qué conclusión llegas sobre el sistema de valores de la sociedad de la que formas parte?



Actividades complementarias

1. Investiga cómo ha sido el crecimiento de la población en la ciudad o poblado donde vives durante los últimos 100 años. Si es posible, obtén las tasas de natalidad, mortalidad, inmigración y emigración para ese periodo, y compáralas. ¿Cuál de ellas explica en mayor medida los cambios en la tasa de crecimiento de tu población?
2. Investiga de qué tamaño es la población del estado de la República Mexicana en el que vives. Describe qué proporción de esta población es rural y qué proporción es urbana. ¿Qué actividades productivas son más comunes en las ciudades y cuáles en el campo? ¿Cómo repercuten en el medio ambiente estas actividades productivas?
3. Haz una lista de la comida chatarra que consumen tú y todos tus compañeros de clase durante un día. Obtén las envolturas de esta comida chatarra y pésalas en una balanza. Calcula qué cantidad de basura (en kilogramos) produce en un día toda tu clase a partir de este consumo. Ahora elabora el cálculo de la cantidad de basura generada en todo un año.
4. Busca en el supermercado local qué productos “verdes” u orgánicos se venden y haz una lista de ellos. Investiga en tu casa si tus papás, cuando hacen las compras de la semana, adquieren algunos de estos productos. Si no los compran, pregúntales por qué.
5. Investiga en qué regiones de México se aplicó la tecnología de la revolución verde y documenta cómo incrementó la productividad (en comparación con las tierras en las que no se aplicó) y qué efectos tuvo sobre las condiciones ambientales.

● CAPÍTULO 8 ●

Cómo se manifiesta el deterioro ambiental

8.1 Para la imaginación

José preparó su equipaje para irse de viaje con su familia y visitar algunos pueblos del centro de México; así aprovecharía el final de sus vacaciones. El primer día visitaron un bosque muy bonito cerca de la ciudad de México; pero le molestó mucho encontrar una gran cantidad de visitantes que arrojaban basura al suelo. Para alejarse de ellos, se internó en el bosque, donde se topó con un rebaño de vacas que pastaban y simultáneamente depositaban sus excrementos por todos lados. José siguió caminando, internándose más en el bosque, y observó una tuza asustada que corrió a meterse en su madriguera. Un poco más adelante vio cinco casas, cada una con su estacionamiento y su antena parabólica, que se conectaban con la carretera por un camino pavimentado. Curiosamente, al internarse más en el bosque, se encontraba con más señales de vida humana.

Al día siguiente José y su familia visitaron una hermosa cascada que se formaba en un risco en el cual se observaban unas llamativas pinturas rupestres. Además, José pudo ver ranas, acociles, peces y renacuajos en la corriente de agua, lo cual le llenó de sorpresa. Sin embargo, no pudo ocultar su horror al notar que algunas viviendas, situadas arriba de la cañada, arrojaban sus aguas negras a la corriente a través de un gran tubo. Más adelante encontró un tiradero de basura en el que yacían viejas llantas de automóviles y una gran cantidad de envases de bebidas gaseosas. José intentó recoger algunos de estos envases para llevarlos a la planta de reciclaje, y se maravilló al encontrar en medio de ellos un cangrejo de agua dulce que, sorprendido, trató de defender su territorio moviendo agitadamente sus pinzas. José pensó que, frente a tal deterioro del hábitat, llegará un momento en el que el

cangrejito tendrá que defenderse con algo más que sus pequeñas pinzas. Así, se dio cuenta de que el problema del deterioro ambiental iba más allá de las posibilidades que él —una sola persona— tenía para revertirlo: solamente si *todos* los seres humanos se comprometen en esa tarea será posible detener la destrucción de la naturaleza.

8.2 Las escalas del deterioro

El deterioro de la naturaleza se expresa en distintas escalas espaciales. Un envase de repelente de insectos tirado en el suelo de un bosque causa daños a los organismos que viven en una pequeña porción de terreno: los compuestos químicos tóxicos que libera impiden la germinación de ciertas semillas y afectan a los ácaros e insectos del suelo. Un campamento de excursionistas afecta al entorno natural a una escala mayor (tanto como un cuarto de hectárea), pues los



Figura 8.1

Muchos incendios provocados por el hombre son tan intensos que pueden ser detectados desde el espacio.

exploradores suelen pisotear las plantas, extraer leña para hacer fogatas y producir ruido con aparatos de sonido. Esto altera, por ejemplo, el comportamiento de las hormigas que cosechan hojas, reduce el hábitat disponible de los escarabajos que se alimentan de la madera y contamina auditivamente el ambiente, alterando las actividades de aves y mamíferos nocturnos. Otros factores del deterioro ambiental se expresan a escalas espaciales mucho mayores, como es el caso de los grandes incendios forestales, los cuales destruyen cientos de hectáreas de bosques; algunos incendios se ven desde el espacio, desde donde los satélites han fotografiado cómo el humo que producen se extiende por grandes regiones del planeta (figura 8.1).

Los ecólogos analizan los efectos del deterioro ambiental a varias escalas espaciales, pero reconocen dos muy evidentes que afectan la vida de los seres vivos: la

escala global, que corresponde a una dimensión espacial en la que los efectos del deterioro se presentan a nivel de todo el planeta, y la **escala local**, que representa la dimensión espacial circunscrita a una localidad en la que estos efectos se dejan sentir, por ejemplo, en el delta de un río, en una cañada particular, en una laguna, en un cerro o en una ciudad, entre otras. Estas localidades, en general, son zonas con una superficie de entre 1 y 100 hectáreas (lo que equivale aproximadamente a la extensión de una a 140 canchas de fútbol). A continuación hablaremos de cómo se manifiesta el deterioro ambiental en esas dos escalas.

8.3 Deterioro a nivel global

El deterioro ambiental puede manifestarse a escala global o planetaria. Las principales formas en las que se expresa el deterioro a esta escala son el cambio climático, el adelgazamiento de la capa de ozono en la estratosfera, la desertificación y la reducción de la biodiversidad, como se explicará a continuación.

8.3.1 Cambio climático

La atmósfera es una capa de gases de 700 a 1,200 kilómetros de espesor que envuelve a la Tierra. Al estado promedio de la atmósfera en un lugar particular se le conoce como **clima**, mientras que al estado de la atmósfera en un momento dado de un lugar de la Tierra se le conoce como **estado del tiempo**, o simplemente **tiempo**. Así, por ejemplo, podemos escuchar a un pescador de camarón decir que su barco no salió ese día debido al mal tiempo, o a un campesino hablar de su trabajo en la milpa durante el tiempo de lluvias. Sin embargo, a veces la diferencia entre el clima y el estado del tiempo no se maneja con claridad en el lenguaje cotidiano, pues cuando empieza a hacer frío al atardecer, o cuando comienza a llover después de una mañana soleada y calurosa, la gente habla de que cambió el clima, cuando en realidad lo que cambió fue el estado del tiempo.

Hay nueve atributos de la atmósfera que definen el clima en un lugar y también establecen el estado del tiempo, por lo que se les denomina **elementos del clima** y del estado del tiempo. Éstos son: *a)* la temperatura del aire; *b)* la precipitación; *c)* la humedad del aire; *d)* la dirección del viento; *e)* la fuerza del viento; *f)* la presión atmosférica; *g)* la nubosidad; *h)* la radiación solar, e *i)* la visibilidad a través del aire.

La temperatura mide la intensidad de calor que emite un cuerpo y está relacionada en cierta medida con la radiación solar, en tanto que la precipitación es la cantidad de agua que cae sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo, nieve o aguanieve. La humedad del aire, por su parte, es la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera, y la presión atmosférica se refiere a la fuerza que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la Tierra.

Tanto el clima como el estado del tiempo son dinámicos, es decir, cambian constantemente, pero a diferentes escalas temporales. Algunos de estos cambios forman parte de un patrón de comportamiento de la atmósfera y, por lo tanto, son predecibles. Por ejemplo, todos sabemos que generalmente hace más frío al amanecer que al mediodía. Asimismo, podemos entender que un habitante de la ciudad de Zacatecas vista ropa abrigadora para ir a la escuela en las mañanas frías de enero, o que la mayoría de los habitantes de la ciudad de México lleven consigo un paraguas para protegerse de la lluvia entre junio y septiembre. Otras formas en las que cambian el clima o el estado del tiempo son menos predecibles. Por ejemplo, durante la temporada de lluvias, hay días en los que llueva y otros en los que no; por otro lado, hay unos años más lluviosos o más cálidos que otros. Indudablemente, estos cambios en el estado de la atmósfera afectan las actividades humanas y al resto de los organismos del planeta.

A lo largo de la historia de la Tierra el clima de muchos lugares ha cambiado drásticamente. Por ejemplo, regiones que actualmente poseen climas templados gozaron de climas tropicales en otras



Figura 8.2

Durante las glaciaciones la fuerza ejercida por las capas de hielo esculpió la superficie de los continentes cubierta por glaciares (erosión glacial). En la foto se aprecia un valle glaciar en Escocia.

épocas, y áreas donde actualmente la precipitación es abundante fueron mucho más secas en el pasado. Los grandes cambios climáticos que han ocurrido en nuestro planeta a lo largo de cientos o miles de años han dejado profundas huellas sobre los paisajes y sobre la distribución actual de los organismos. Por ejemplo, durante las glaciaciones, la erosión glacial esculpió las montañas y los valles de las Islas Británicas; actualmente en estos lugares ya no se forman placas permanentes de hielo, pero su aspecto nos permite identificar las huellas de un clima glacial en el pasado (figura 8.2).

Además de las variaciones climáticas que ocurren en escalas de tiempo de cientos y miles de años, también hay fenómenos que producen alteraciones climáticas en periodos más cortos. Un ejemplo bien conocido es el fenómeno de “El Niño”, que cada cierto número de años provoca, entre otras manifestaciones, lluvias abundantes en las costas de Perú y altas temperaturas en el Océano Pacífico tropical oriental y una aguda sequía en el centro y sur del territorio mexicano. Otro fenómeno, menos conocido que el anterior, es la “Oscilación Decadal del Pacífico”, que es una fluctuación climática de altas y bajas temperaturas en el norte del Océano Pacífico que ocurre con un espaciamento de 20 a 30 años, el cual afecta principalmente al clima de América del Norte (véase el recuadro 8.1, “El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico”).

Recuadro 8.1

El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico

Los científicos han observado que existen grandes ciclos climáticos en el planeta los cuales determinan que haya años más secos o más húmedos, o más calientes o más fríos que el promedio. Uno de los ciclos climáticos más estudiados es el llamado “El Niño/Oscilación del Sur” (ENSO), o simplemente “El Niño”, como se le conoce en América Latina, pues se presenta cerca de la Navidad, cuando se celebra el nacimiento del *niño* Jesús.

No se conocen bien las causas que dan inicio al fenómeno. Por lo general, éste comienza con el decremento de la fuerza de los vientos alisios que corren sobre el Pacífico tropical, de manera que la corriente ecuatorial que se desplaza de este a oeste a la altura del ecuador en este océano pierde fuerza. Las costas de América del Sur suelen estar bañadas por las frías aguas de la corriente de Humboldt (figura 8.3), que allí aflora a la superficie llevando una enorme cantidad de nutrientes que recoge del fondo. Al perder fuerza la corriente ecuatorial, ésta se regresa debido a la pequeña diferencia en el nivel de la superficie del océano que hay entre el sureste asiático (un poco más alto) y América del Sur (un poco más bajo). Esto hace que en muy poco tiempo las costas sudamericanas se vean bañadas por aguas mucho más cálidas que lo habitual, provocando fuertes lluvias en regiones donde normalmente casi no llueve.

El Niño tiene repercusiones en áreas más allá de estas partes del mundo; por ejemplo, en el sureste de México, que por lo regular es húmedo, la precipitación disminuye considerablemente. Este fenómeno se expresó con gran intensidad en 1998, cuando una fuerte sequía fue la causa indirecta de cientos de incendios devastadores en todo el país.

Un ciclo parecido al ENSO, pero que no se ha estudiado con tanto detalle, es la llamada “Oscilación Decadal del Pacífico”. Ésta consiste en que cada 20 o 30 años las aguas del Océano Pacífico se calientan y se enfrían alternadamente, afectando sobre todo al clima de América del Norte. Cuando el ciclo se encuentra en su fase caliente, aumenta la incidencia de huracanes en las costas del Pacífico mexicano; por el contrario, cuando está en su fase fría, la frecuencia y la intensidad de los huracanes son mayores en el Océano Atlántico.

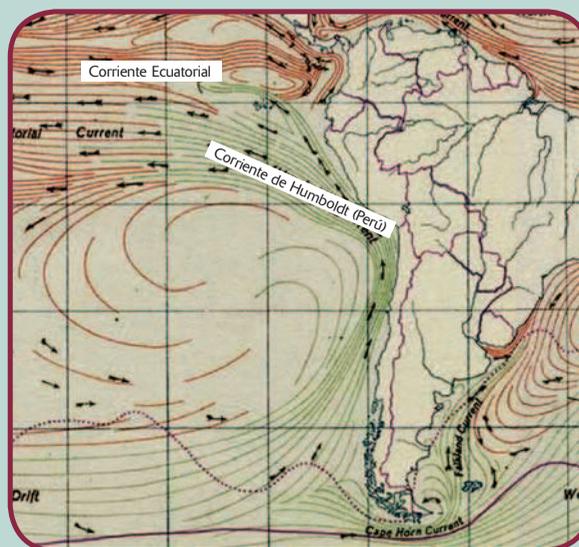


Figura 8.3

La corriente de Humboldt es una corriente de aguas frías procedentes del Océano Antártico. Esta corriente lleva muchos nutrientes procedentes de aguas profundas, lo que convierte a las costas de Chile y Perú en una zona pesquera importante. El fenómeno de *El Niño* interfiere con el clima generado por esta corriente y provoca una disminución en las poblaciones de peces, así como inundaciones en las costas occidentales sudamericanas.

En resumen, el clima de la Tierra se encuentra naturalmente en constante cambio y, a lo largo de su historia, nuestro planeta ha pasado por épocas de enfriamiento (como las glaciaciones) y de calentamiento. En estos años se habla de que estamos en una nueva época de **cambio climático**, el cual consiste primordialmente en el aumento de la temperatura en todo el mundo. Por desgracia, en esta ocasión no se trata de un fenómeno natural, sino provocado por las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la quema de la vegetación natural para abrir tierras agrícolas y ganaderas, y la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera.

El principal producto de la combustión de compuestos orgánicos es el CO_2 . Este gas, que se presenta naturalmente en la atmósfera a una concentración muy baja, es uno de los principales causantes del **efecto invernadero**, responsable del calentamiento global, como explicaremos a continuación.

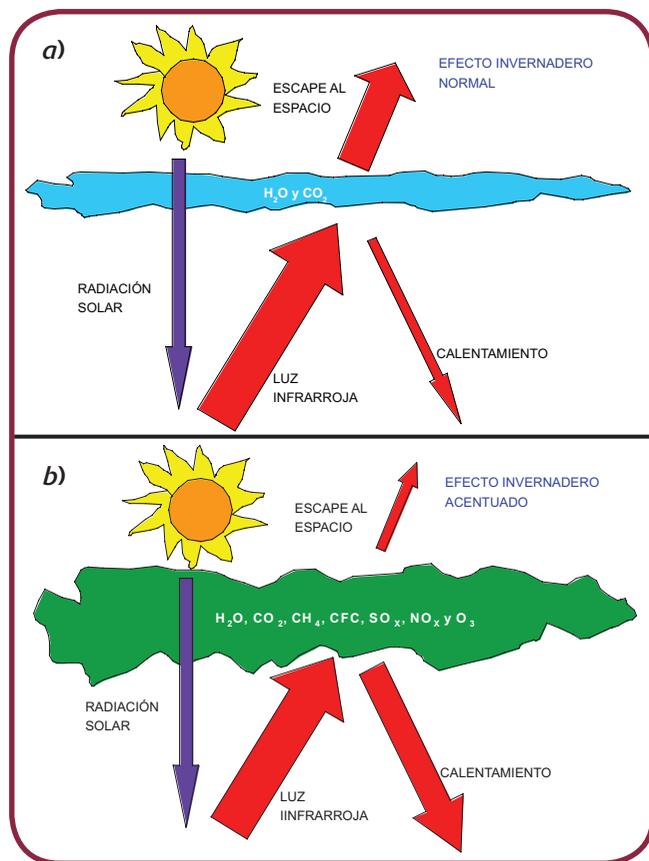


Figura 8.4

El efecto invernadero es un fenómeno natural que permite el mantenimiento de temperaturas atmosféricas adecuadas para sostener la vida. En situaciones normales *a*) una fracción considerable de la radiación infrarroja (de longitud de onda larga) que emite la Tierra escapa al espacio. Sin embargo, *b*) el incremento en la emisión de gases de invernadero producidos por las actividades humanas hace que una gran parte de la energía absorbida por estos gases regrese a la atmósfera baja, calentando el planeta de forma excesiva.

La atmósfera de la Tierra está formada por 78% de nitrógeno (N_2) y 21% de oxígeno (O_2); el 1% restante está constituido por vapor de agua, metano y dióxido de carbono (CO_2 , que antes de la Revolución Industrial tenía una concentración de 0.028%), entre otros.

Los gases atmosféricos permiten el paso de la radiación solar hacia la Tierra; ésta se calienta y emite radiación de onda larga (infrarroja) hacia el espacio. Pero muchos gases atmosféricos no dejan pasar este tipo de radiación, sino que la absorben o la reflejan de nuevo hacia la superficie terrestre, calentándola aún más. Este fenómeno es el mismo que tiene lugar dentro de un invernadero, y gracias al cual la temperatura interior es mayor que la exterior (figura 8.4). Por esta razón se le conoce como el **efecto invernadero**; si no fuera por él, la Tierra sería un planeta helado, como lo es la superficie de la Luna. Entonces, si el efecto invernadero es un fenómeno natural, gracias al cual se amortigua la temperatura de la atmósfera terrestre, ¿por qué los científicos, los gobiernos y el público en general se preocupan tanto por él? El problema es que en las últimas décadas se ha intensificado notablemente, lo cual tiene graves consecuencias. Ahora veremos por qué.

Muchos de los gases que se liberan a la atmósfera como producto de las actividades humanas provocan que se intensifique el efecto invernadero. Por esa razón se les llama **gases de efecto invernadero**, y entre ellos están el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, el ozono y los **compuestos**

clorofluorocarbonados (CFC), entre otros. El aumento en la concentración de estos gases en la atmósfera hace que ésta retenga cantidades cada vez mayores de calor (en forma de radiación infrarroja). Uno de los principales gases de invernadero, el CO_2 , ha aumentado su concentración notablemente: de 280 ppm (partes por millón) antes de la revolución industrial a más de 380 ppm en la actualidad. En conjunto, el CO_2 y los demás gases de invernadero se encuentran ahora en una concentración de 430 ppm. Este valor es la concentración más alta de gases de invernadero que se ha presentado en la atmósfera en los últimos 650 mil años. Como resultado, se está produciendo un calentamiento de la atmósfera en todo el planeta. Se estima que entre 1906 y 2005 la temperatura atmosférica promedio se incrementó en 0.74°C y, si las tendencias actuales continúan, podría llegar a incrementarse hasta en 5°C .

Pareciera que un aumento de 0.74°C es muy leve. Pero recuerda que nos estamos refiriendo a la temperatura *promedio* de la atmósfera, que es como un resumen de las temperaturas que se registran en todos los lugares de la Tierra durante todo el año. En realidad, un aumento de esa magnitud es muy considerable y los problemas que ha traído consigo son muy graves; algunos de ellos apenas empiezan a vislumbrarse.

A pesar de que la temperatura es el elemento del clima que se ha visto más claramente afectado por el fenómeno del cambio climático, se reconoce que la intensificación del efecto invernadero también ha provocado cambios en otros elementos del clima, como la precipitación y la velocidad de los vientos. Por ejemplo, en los últimos 100 años se han observado incrementos en la precipitación en el este del continente americano, el norte de Europa, así como en el norte y el centro de Asia; por otro lado, ha disminuido la precipitación en el Mediterráneo, en el sur, norte y oeste de África, y en algunas partes del sur de Asia. Además, se ha registrado una mayor frecuencia de ciclones y huracanes de alta intensidad, pues la energía calórica que los mueve cada vez es mayor. Ante este panorama, se reconoce que el calentamiento de la atmósfera está provocando un cambio climático global.

Otras consecuencias del calentamiento de la atmósfera son la disminución de los casquetes polares y la retracción de los glaciares, pues el hielo que los forma se está derritiendo. Esto provoca la liberación de grandes cantidades de agua dulce a los océanos, lo cual disminuye su salinidad y aumenta el nivel del mar. Por ejemplo, muchos glaciares de los Andes, los Alpes, las Rocallosas y los Himalayas se están derritiendo a una velocidad alarmante (figura 8.5), y cada año los casquetes ártico y antártico pierden enormes bloques de hielo que flotan hacia aguas más cálidas hasta derretirse.



Figura 8.5

Una consecuencia del calentamiento global es la retracción de los glaciares por el derretimiento del hielo que los forma. Esto provoca, entre otras cosas, que la disponibilidad de agua dulce para las comunidades humanas asentadas al pie de las zonas montañosas del planeta esté disminuyendo de manera alarmante. La fotografía muestra la magnitud de la retracción de un glaciar en Suiza.

Se calcula que de 1960 a la fecha, se derritió el 10% del hielo y la nieve del hemisferio norte, y se sabe que el nivel del mar aumentó 4 cm y que seguirá aumentando a razón de 3 mm por año. De continuar este proceso, a la larga se afectarán ciudades enteras que hoy se encuentran a nivel del mar, como es el caso de Nueva York, Ámsterdam, Veracruz y Ciudad del Carmen.

Por desgracia, el cambio climático global se está dando a una velocidad tal que no tendremos que esperar mucho tiempo para ver sus consecuencias de manera tangible. Muchos de los fenómenos climáticos de consecuencias catastróficas que han ocurrido en las últimas décadas, como inundaciones, huracanes y sequías intensas, parecen estar relacionados con el calentamiento de la atmósfera (figura 8.6).



Figura 8.6

La frecuencia con la que los huracanes azotan las costas de las regiones tropicales y subtropicales en todos los continentes ha aumentado como resultado de la elevación de la temperatura de los océanos.

En las últimas cuatro décadas el número de desastres vinculados a eventos climáticos se ha multiplicado por cuatro, y el costo económico de los mismos ha crecido 10 veces. ¿Cuánto más habremos de esperar antes de tomar acciones realmente efectivas para evitarlo? Este problema no podrá resolverse en el corto plazo, ni depende de uno o unos cuantos países. Definitivamente se necesita de la participación de cada persona y del acuerdo de todas las naciones para evitar que los efectos sean catastróficos. La humanidad empieza a moverse en este sentido, pero las soluciones que hasta el momento se han puesto en marcha aún son insuficientes, como explicaremos en el capítulo 10.

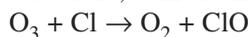
8.3.2

Adelgazamiento de la capa de ozono

En las partes más altas de la atmósfera terrestre existe una capa de ozono (O_3) que rodea a la Tierra por completo; esta capa se encuentra en la estratosfera, en una franja que se ubica entre 20 y 40 km por encima del nivel de la corteza terrestre. El ozono se forma como producto de una reacción fotoquímica que se da a partir de la interacción del oxígeno atmosférico con la luz solar. Esta reacción consiste en que el oxígeno molecular (O_2) se disocia en dos átomos por acción de la luz (fotólisis); posteriormente uno de estos átomos de oxígeno (O) se une a una molécula de O_2 para formar O_3 (ozono). La capa de ozono de la estratosfera es muy importante para el desarrollo de la vida en la Tierra, pues los rayos ultravioleta del Sol son altamente dañinos para los seres vivos (son potencialmente mutagénicos, cancerígenos e inmunodepresores) y la capa de ozono los absorbe, evitando que lleguen a las partes más bajas de la atmósfera y causen daños a los organismos.

Desde la década de 1970 se sabe que ciertas sustancias que produce el ser humano, en particular los óxidos de nitrógeno y los CFC, destruyen la capa de ozono de la estratosfera. Durante muchos años los CFC se usaron extensivamente en aparatos de refrigeración, aerosoles y solventes. Estos contaminantes provocan un adelgazamiento en la capa de ozono, pues son compuestos que pueden alcanzar las capas altas de la atmósfera con el movimiento natural de las masas de aire.

Ahí, al entrar en contacto con la radiación UV liberan átomos de cloro que reaccionan con el ozono para producir oxígeno molecular y óxido de cloro, como lo muestra la siguiente ecuación química:



Este fenómeno es más evidente en las regiones polares, sobre todo en el hemisferio sur (figura 8.7).

Al adelgazarse la capa de ozono de la estratosfera, se presenta un incremento en la radiación ultravioleta de tipo B (UV-B) que llega a la superficie terrestre. La radiación UV-B tiene una longitud de onda comprendida entre 280 y 320 nm. Su mayor incidencia causa un aumento en la frecuencia de casos de cáncer de piel en las personas y produce ceguera en las ovejas de las regiones más australes de Argentina y Australia. Si bien este problema ha provocado una mayor amenaza en el hemisferio sur, también se han detectado incrementos en la frecuencia de casos de cáncer de piel en los habitantes de los Alpes y Canadá.

El incremento de la radiación UV-B también tiene consecuencias en los ecosistemas, sobre todo porque afecta las interacciones entre especies. Por ejemplo, se ha demostrado que la radiación UV-B afecta la competencia entre plantas superiores al incidir sobre su susceptibilidad ante los ataques de insectos herbívoros y patógenos. Además, se sabe que el incremento en los niveles de radiaciones UV-B disminuye la tasa de crecimiento de algunas plantas de cultivo, como la soya y el arroz.

En 1994 se alcanzó el nivel máximo histórico en la concentración de las sustancias que adelgazan la capa de ozono en la atmósfera inferior, que es donde se concentran antes de elevarse a la estratosfera. A partir de entonces, ese nivel ha disminuido gradualmente gracias al protocolo de Montreal (1987), en el que se reguló el uso de CFC (véase la sección 10.2.2). A pesar de que empieza a disminuir la gravedad de este problema y de que probablemente para el año 2050 la capa de ozono se haya recuperado, aún se espera que haya consecuencias negativas de su adelgazamiento sobre la salud humana, pues los efectos de la radiación UV-B muchas veces tardan en manifestarse. Por ejemplo, se cree que la frecuencia de cáncer de piel comenzó a disminuir sólo desde 2006, aunque la regulación del uso de CFC data de 1987.

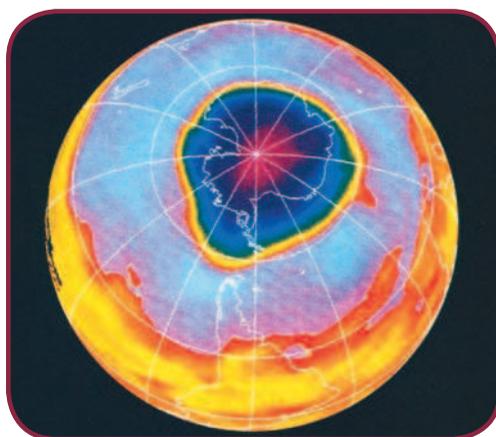


Figura 8.7

El adelgazamiento de la capa de ozono es más evidente en las regiones de los polos, sobre todo del polo sur. Durante algunos años en esta región el crecimiento del agujero en esta capa produjo un aumento considerable de los casos de cáncer de piel y ceguera. Por fortuna, el esfuerzo conjunto de muchas naciones de la comunidad internacional ha permitido revertir este fenómeno.

8.3.3

Desertificación

La desertificación es el proceso mediante el cual ciertas regiones del planeta que originalmente no correspondían a zonas desérticas y semidesérticas, adquieren las características fisonómicas de éstas como resultado de su degradación ante la pérdida de vegetación natural y la consecuente erosión del suelo. Cuando la desertificación se presenta en zonas naturalmente secas, la pérdida de vegetación acentúa su aridez y determina que se desarrolle un paisaje aún más yermo.

La desertificación es un proceso causado por el ser humano y se ha agravado como producto del cambio climático. Este proceso conlleva a la degradación de las tierras de cultivo por la pérdida de fertilidad, sobre todo en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas del planeta (figura 8.8).

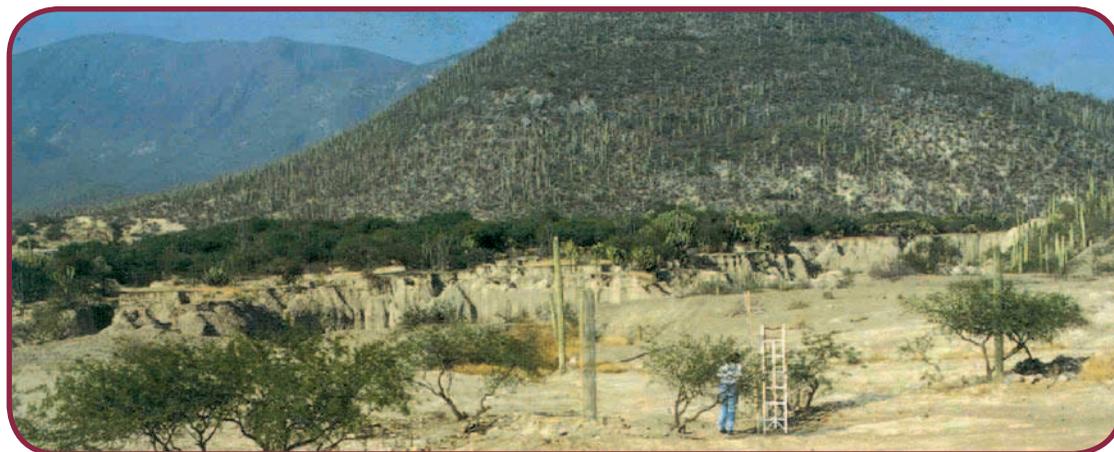


Figura 8.8

Cuando la desertificación se presenta en áreas naturalmente áridas, sus efectos acentúan su aridez y originan un paisaje aún más yermo. Muchos investigadores de zonas áridas han documentado cómo la erosión en estos sistemas es un fenómeno sumamente grave.

Es muy común que se piense que el origen de todos los desiertos está relacionado con el proceso de desertificación. Esto es una equivocación, ya que los desiertos son ecosistemas que se presentan naturalmente en las regiones secas del planeta, y los organismos que habitan en ellos están adaptados a estas condiciones. Muchos desiertos tienen una diversidad de plantas y animales relativamente alta, y en particular los desiertos mexicanos presentan, además, un alto número de endemismos. Por el contrario, la desertificación es un proceso causado por el ser humano y constituye un problema de dimensión mundial que afecta a la gran mayoría de los países en todos los continentes.

Alrededor de 40% de la superficie terrestre mundial se encuentra desertificada. 70% de todas las tierras áridas están afectadas por la desertificación, que corresponde a una superficie de 36 millones de km² en donde habitan más de 1000 millones de personas. Aunque los alcances de la desertificación son de escala mundial, es en el continente africano donde se presenta de manera más aguda. En este caso, la combinación de pobreza extrema y degradación severa de las tierras está creando una situación dramática, ya que cerca de la mitad de la población africana —que representa más de 300 millones de personas— está amenazada por la hambruna asociada a la desertificación.

Como dijimos antes, la desertificación es un fenómeno antropogénico, ya que tiene su origen en el inadecuado uso del suelo, como la sobreexplotación de la tierra, el pastoreo excesivo, la agricultura mecanizada, las prácticas incorrectas de irrigación, la tala de árboles ilegal y excesiva, los incendios de matorrales y bosques, y la deforestación. Además del efecto de esas actividades humanas, hay toda una serie de factores climáticos que influyen en el proceso de degradación de la tierra, como son las sequías prolongadas, la alta variabilidad del régimen de precipitación y las ondas cálidas.

Puesto que el suelo es la base de la producción de alimentos, como se comentó en el capítulo 6 (sección 6.3.2), si continúa su degradación se podrían agudizar los problemas de hambre, malnutrición, pobreza y migración. Si no se atiende este fenómeno de manera integral, sus consecuencias podrían desatar una severa crisis mundial. Actualmente se estima que la pérdida de ingresos económicos en las áreas afectadas directamente por la desertificación es de unos 42 mil millones de dólares. Como puede

concluirse, el suelo es un recurso natural que tiene fuertes implicaciones económicas. De hecho, en términos de costos económicos, conviene más frenar la degradación de las tierras y la desertificación, que remediar sus consecuencias ambientales, socioeconómicas y políticas.

8.3.4 Pérdida de la biodiversidad

Otro de los graves problemas ambientales que enfrentamos por causa de la acción humana y que se agudizará en este siglo XXI es la pérdida de la **biodiversidad**, es decir, la desaparición de ecosistemas naturales, de especies y de su variabilidad genética. La pérdida de biodiversidad se debe principalmente al cambio de uso de suelo (pérdida de los hábitats naturales), la sobreexplotación de recursos bióticos, la introducción de especies exóticas invasivas, la contaminación y el cambio climático. Particularmente, la reducción de la variabilidad genética de algunas especies cultivadas se produce al eliminar ciertas variedades y razas naturales que se encontraban en los hábitats que han sido degradados o destruidos.

Uno de los procesos más preocupantes de la pérdida de la biodiversidad es la extinción de especies. Pero veamos este tema con más detalle. En realidad, la extinción de especies es un fenómeno natural que ha acompañado a la historia de la vida en el planeta. Así como constantemente surgen nuevas especies, otras desaparecen, ya sea de forma paulatina o abrupta. Por ejemplo, uno de los eventos de extinción masiva de especies ocurrió hace cerca de 65 millones de años, cuando los dinosaurios y miles de otras especies desaparecieron, al parecer por la colisión de un meteorito contra la Tierra en lo que hoy es el litoral norte de Yucatán. Sin embargo, hay una diferencia enorme entre esos episodios de extinción y el que está ocurriendo en la actualidad. Por un lado, la mayoría de las extinciones actuales son producto de las actividades de una sola especie, la humana, y no de causas naturales. Por el otro, la velocidad de extinción actual es entre 100 y 1,000 veces mayor que la que se ha presentado, en promedio, a lo largo de la historia de la Tierra, de acuerdo con las estimaciones a partir del registro fósil. Se estima que el tiempo de permanencia de una especie en la Tierra es, en promedio, de 5 a 10 millones de años. Tomando en cuenta el número de especies extintas y actuales, este tiempo de permanencia implica que durante la historia de la Tierra la tasa de extinción ha sido, en promedio, de una especie por año. Sin embargo, en épocas recientes la tasa de extinción es de 100 a 1,000 especies por año, según las estimaciones de algunos investigadores. Esta tasa de extinción actual es tan grande, que inevitablemente llevará a una pérdida global de la riqueza de especies, pues no es posible que los procesos naturales de evolución originen nuevas especies al mismo ritmo.

Puesto que se desconoce el número de especies que han existido y existen actualmente en la Tierra (véase el capítulo 5), es imposible saber con precisión cuántas se han extinguido, o cuántas están actualmente en proceso de desaparición. Sin embargo, sabemos que entre las especies de plantas y vertebrados la gran mayoría está disminuyendo su área de distribución, su abundancia, o ambas, en todas las regiones y en todos los ecosistemas. Los casos particulares más preocupantes se ubican entre los primates (figura 8.9), en las



Figura 8.9

Los primates constituyen un grupo de seres vivos que se encuentran en serio peligro de extinción por los cambios de uso de suelo en las regiones donde habitan.

zonas tropicales, en los ecosistemas de agua dulce y en las islas. Por ejemplo, de las casi 1,000 especies registradas como extintas desde el siglo XVIII hasta la fecha, la mayoría habitaba en ecosistemas insulares (es decir, en islas).

El grado de amenaza que sufren muchos grupos de organismos en la actualidad es muy alto. Por ejemplo, 70% de las plantas superiores de distribución restringida (esto es, endémicas de regiones específicas) están en riesgo, al igual que 35% de los vertebrados. Entre estos últimos se encuentra una



Figura 8.10

Algunos programas de protección de fauna silvestre han tenido cierto éxito. Un ejemplo es el que tiene por objetivo proteger al berrendo (*Antilocapra americana peninsularis*) en la Península de Baja California, México (tomada de: <http://www.conanp.gob.mx/anp/noroeste/Vizcaino/BERRENDO.jpg>)

tercera parte de todos los anfibios conocidos, casi la cuarta parte de los mamíferos y un poco más de la décima parte de las aves. Sin embargo, algunos programas de protección de especies han tenido cierto éxito, como es el caso del que se puso en marcha para la conservación del berrendo peninsular (*Antilocapra americana peninsularis*) en la Península de Baja California, México (figura 8.10).

En lo que se refiere a los ecosistemas terrestres, se estima que particularmente los tropicales son los más amenazados por el cambio de uso de suelo o la degradación. La pérdida de la cubierta vegetal conlleva a la desaparición de poblaciones de especies silvestres que conforman la vegetación misma, así como de todas las demás especies que tienen en la vegetación su hábitat natural, las cuales, en conjunto, conforman el componente biótico del ecosistema. Además del cambio de uso de suelo, otros procesos que reducen la cubierta vegetal y, por ende, la biodiversidad, son la recolección de leña y la sobreexplotación de otros recursos bióticos, la producción de carbón vegetal, la explotación petrolera y la minería. En las zonas semiáridas, estas actividades tienen repercusiones más acentuadas, ya que las plantas son de lento crecimiento y, por consiguiente, la cubierta vegetal tarda mucho tiempo en recuperarse después de un disturbio. Las actividades mineras no sólo eliminan la cobertura vegetal, sino que producen un gran deterioro por la fuerte contaminación que generan sus desechos, conocidos como **jales** (figura 8.11).

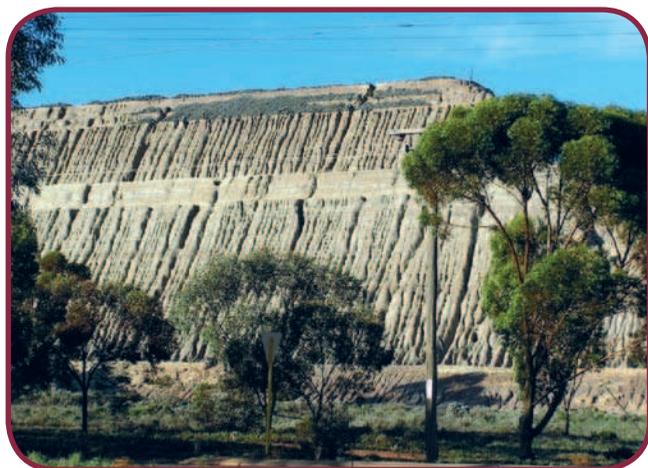


Figura 8.11

La acumulación de desechos de las actividades mineras —conocidos como jales— produce un gran deterioro ambiental difícil de revertir mediante la restauración ecológica.

Los incendios forestales también contribuyen de manera importante a la

pérdida de los ecosistemas naturales (cuadro 8.1). En 1997 y 1998 se registraron los incendios más intensos de la historia reciente en el mundo. Durante esos años se quemaron prácticamente todo tipo de bosques, incluso los tropicales húmedos, los cuales normalmente no se incendian. Los incendios más importantes en el mundo se registraron en Indonesia, México, Centroamérica, Brasil y Estados Unidos.

Cuadro 8.1 Tasas de deforestación en México, por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Deforestación		Causas principales de la deforestación (en orden de importancia)
	Miles ha/año	% anual*	
Bosque templado	167	0.65	Incendios, pastoreo, agricultura, tala ilegal
Selva húmeda	195	2.00	Pastoreo, agricultura, infraestructura, incendios, tala ilegal.
Selva subhúmeda	306	1.90	Pastoreo, agricultura, tala ilegal, incendios.
Total	668	1.29	

* Este valor representa el porcentaje de la superficie de cada tipo de vegetación que se deforesta en un año. (Fuente: Makumdi, Sathaye y Maser, 1992. "Carbon emissions and sequestration in forests. Case studies for seven developing countries", Reporte núm. LVL-33119, Environmental Protection Agency).

Los incendios son provocados principalmente por el uso del fuego en las actividades agropecuarias. Una de las prácticas más comunes para eliminar la vegetación de una área y convertirla en una parcela de cultivo es tumbarla y quemarla, proceso que se conoce como **roza, tumba y quema** (véase el recuadro 9.2, "Tecnología tradicional y tecnología moderna", en el capítulo 9). El fuego también se usa para propiciar el crecimiento de los pastos de los que se alimenta el ganado. Es común que estas quemas escapen de control, sobre todo en años secos, dando lugar a verdaderas catástrofes ambientales (véase la figura 7.13, en el capítulo 7).

La biodiversidad de los ecosistemas acuáticos no se ha salvado de la acción destructiva del ser humano. Los océanos constituyen una fuente fundamental de recursos alimenticios. Las aguas interiores (ríos, lagos, presas y lagunas) también son importantes reservorios de biodiversidad, con alto potencial productivo y un gran valor biológico y cultural, que contribuyen al bienestar humano. Sin embargo, la sobreexplotación pesquera, así como el uso de "artes de pesca" (tecnologías) inadecuadas han provocado que muchas especies comerciales de peces y otros organismos acuáticos estén a punto de agotarse y que otras hayan llegado a su límite de aprovechamiento. Más de 60% de las pesquerías comerciales del mundo sufren de pesca excesiva (figura 8.12). Este grave problema suele verse agravado por la captura incidental, es decir, la extracción de organismos que carecen de valor comercial y no son el objetivo de la pesca, pero que al convivir con las especies comerciales son arrastrados en las mismas

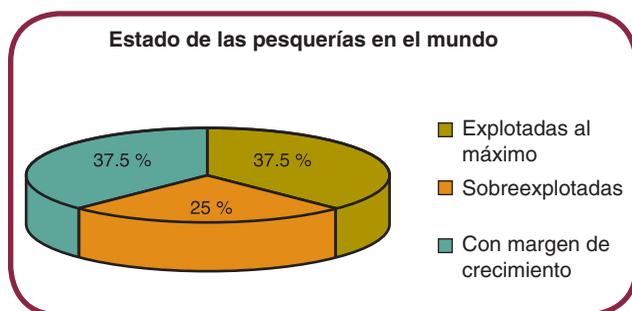


Figura 8.12 Es alarmante que la cuarta parte de las pesquerías del mundo hayan alcanzado niveles de sobreexplotación.



Figura 8.13 La construcción de presas para la producción de energía eléctrica tiene efectos muy negativos sobre el ambiente de la región. En la foto se muestra la construcción de una presa en el río Yangtzé en China (tomada de: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Three_gorges_dam_locks_view_from_vantage_point.jpg)

mática, actualmente se planea la construcción de 46 presas en el río Yangtzé, en China (figura 8.13), 27 en el Río de la Plata, Argentina, y 26 en los ríos Tigris y Éufrates en Asia Menor.

redes. Además, las actividades asociadas a la pesca del camarón dañan a las comunidades de algas y de animales del fondo del mar, pues la técnica de pesca en este caso consiste en el arrastre de las redes por el lecho marino.

La **fragmentación** también constituye un severo problema que causa la pérdida de la biodiversidad (véase el recuadro 8.2, “La fragmentación y el efecto de borde”). En los ecosistemas acuáticos la fragmentación puede ocurrir por la interrupción de un río, la construcción de una presa, el transvaso de agua entre cuencas, o la extracción excesiva de agua para riego u otros usos. Se estima que 60% de los ríos más importantes del mundo tienen algún nivel de fragmentación. Estos procesos de fragmentación traen como consecuencia la desaparición de cascadas, la eliminación de vegetación ribereña, la disminución de rápidos en los ríos, y la desecación de manantiales y humedales. La construcción de presas ha traído consigo muchos de estos problemas ambientales, a pesar de que éstas son un elemento importante para el desarrollo de la humanidad. Por esa razón, Estados Unidos y varios países europeos están desmantelando algunas de sus presas. La construcción de futuras presas deberá considerar muy cuidadosamente sus impactos ambientales, sociales y económicos, así como las acciones pertinentes para prevenirlos. A pesar de esta proble-

Recuadro 8.2

La fragmentación y el efecto de borde

La fragmentación consiste en la división del terreno de un ecosistema natural (matorral, bosque, lago o caverna) en porciones más pequeñas realizada por la acción del hombre. Este proceso se puede llevar a cabo mediante varios mecanismos, los cuales están representados gráficamente en la figura 8.14.

a) *Fragmentación regresiva*. Se presenta cuando las acciones de pérdida de terreno ocurren sobre un borde del ecosistema, reduciéndolo cada vez más en extensión desde un solo flanco.

(continúa...)

b) *Fragmentación envolvente*. Tiene lugar cuando la pérdida de superficie se lleva a cabo por todo el borde del ecosistema.

c) *Fragmentación divisiva*. Ocurre cuando un ecosistema queda dividido por el desarrollo de infraestructura humana (por ejemplo, una carretera).

d) *Fragmentación intrusiva*. Se presenta cuando un ecosistema es reducido en extensión por acciones humanas realizadas en el interior de éste, como por ejemplo, apertura de campos de cultivo o construcción de granjas.

e) *Fragmentación invasiva*. Se presenta cuando la reducción de superficie de un ecosistema se debe a la acción del hombre en un borde muy pequeño, a partir del cual se “invade” el área natural.

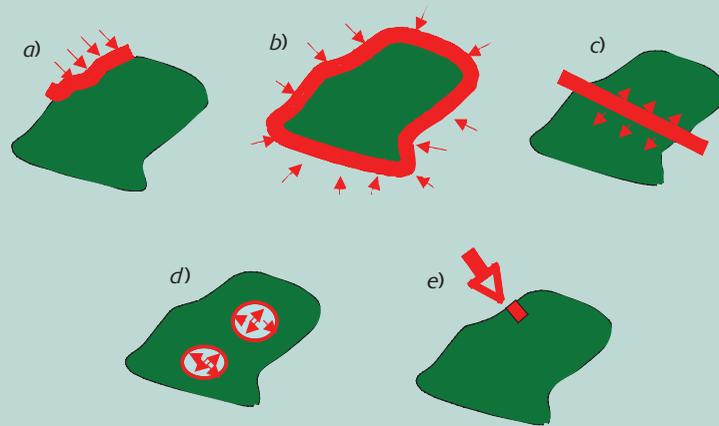


Figura 8.14 Diferentes tipos de fragmentación: a) regresiva, b) envolvente, c) divisiva, d) intrusiva y e) invasiva.

Una de las consecuencias de la fragmentación es que se acentúa el llamado **efecto de borde**, que consiste en el cambio de las condiciones bióticas y abióticas en las orillas en los ecosistemas. Durante la fragmentación, el efecto de borde se acentúa puesto que una mayor superficie de un ecosistema natural permanece cerca del borde de éste y es afectado por el cambio de condiciones. Existen consecuencias benéficas del efecto de borde, como el aumento en la disponibilidad de luz y de nutrientes, por lo que se incrementa la diversidad y abundancia de ciertos organismos; sin embargo, también provoca efectos nocivos, ya que allí son más elevadas las posibilidades de depredación, parasitismo y competencia. Se ha detectado que en los bordes de los bosques las aves que construyen sus nidos sufren una mortalidad hasta de 80%, causada por depredadores como zorrillos, mapaches y zorras. Por esta razón, se piensa que los bordes de los ecosistemas representan **trampas ecológicas** donde los organismos tienen más posibilidades de morir. Asimismo, se reducen los tamaños poblacionales de especies no tolerantes al borde, como los escarabajos copronecrófagos (que se alimentan de heces y de cadáveres), lo cual provoca una reducción en las tasas de descomposición en los bordes, acumulándose allí cadáveres y heces.

La fragmentación de los ecosistemas trae como consecuencias la pérdida de especies nativas intolerantes al borde, la colonización de especies exóticas, la reducción de tamaños poblacionales y la disminución de la variabilidad genética poblacional. Por estas razones, cuando se presenta un cambio en las condiciones ambientales, las poblaciones no tienen la capacidad de responder por la falta de variabilidad genética y se vuelven vulnerables a la extinción.

La pérdida de biodiversidad se expone aquí como un problema ambiental de dimensión global, ya que se trata de una tendencia generalizada. Por otro lado, no se vislumbra un cambio en esta tendencia en el corto plazo, pues los ritmos de pérdida de biodiversidad no parecen estar disminuyendo, sino que seguirán acelerándose si no se reducen las tasas actuales de cambio de uso de suelo y de deterioro ambiental. Por último, la pérdida de biodiversidad se ve acelerada por los procesos locales de deforestación y fragmentación de los ecosistemas terrestres, los cuales se revisarán en el siguiente apartado.

8.4 Deterioro a nivel local

Como mencionamos antes, muchas formas en las que se manifiesta el deterioro ambiental se perciben a una escala local, que es más parecida a la escala en la que llevamos a cabo nuestra vida cotidiana. Entre estas manifestaciones, las más importantes son la deforestación, la pérdida de suelo, los problemas de uso de agua y la contaminación. Como este último factor tiene más diversidad de expresiones que los otros, se analizará más adelante (sección 8.5).

8.4.1 Deforestación

La deforestación consiste en la remoción de la cubierta vegetal natural de una localidad o una región. Se estima que 40% de la superficie terrestre está deforestada, y las dimensiones de esta superficie siguen aumentando cada año. Se calcula que entre 1980 y 1995 se perdieron en el mundo alrededor de 200 millones de hectáreas de cobertura forestal, lo cual equivale a una superficie como la de todo el territorio mexicano. Esto significa que se perdieron más de 13 millones de hectáreas de vegetación natural por año en ese periodo. Los países en los que la superficie deforestada fue mayor fueron Brasil, Colombia e Indonesia (véase el cuadro 8.2).

En México la tasa anual de deforestación en el periodo de 1976 a 1993 fue de alrededor de 1.2%, una de las más altas entre los países megadiversos (véase la sección 5.5). Durante ese periodo se perdieron cada año unas 615,000 hectáreas de cobertura vegetal, lo que equivale aproximadamente a la deforestación de una superficie como la del estado de Aguascalientes en un año, o a una tasa de pérdida de unas 100 canchas de fútbol cada hora (cuadro 8.2). Por fortuna, la tasa de deforestación ha empezado a disminuir, pues en el periodo de 1993 a 2002 la tasa de pérdida fue de 405,000 hectáreas anuales.

Se han identificado numerosas causas de la deforestación de los ecosistemas naturales del mundo. Entre ellas se encuentran las siguientes: el incremento de la población humana, la aceleración de la explotación de los recursos naturales, el incremento en las áreas de distribución de las poblaciones humanas, el uso de sistemas productivos y tecnologías inadecuadas, la pobreza, los patrones de consumo excesivo y la incidencia de incendios forestales.

La causa más importante de la pérdida de los hábitats naturales es la expansión de la agricultura y la ganadería. En todo el mundo, la agricultura ocupa 20 millones de km², lo que equivale más o menos a la superficie de América Latina, en tanto que la ganadería ocupa 35 millones de km². Esto significa que el ser humano ha transformado más de 40% de las tierras emergidas del planeta para dedicarlas a las actividades agropecuarias, desplazando a los ecosistemas naturales. Los europeos acabaron hace

Cuadro 8.2 Superficie deforestada y tasa de deforestación en diferentes países durante el periodo 1980-1990.

País	Superficie (en miles de hectáreas)	Tasa*
República Democrática del Congo	370	0.6
Brasil	2,530	0.6
Colombia	890	0.6
México	615	1.2
Ecuador	340	1.7
Madagascar	156	0.8
Indonesia	620	1.0
Malasia	255	1.8

* La tasa anual representa el porcentaje de la superficie de cada país que se deforestó en un año.

(Fuente: "Food and Agriculture Organization of the United Nations", citado en Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, *Inventario nacional forestal periódico, 1992-1994*).

mucho tiempo con la mayoría de sus bosques y, salvo algunas excepciones, los terrenos forestales con los que cuentan ahora son plantaciones relativamente recientes.

En América Latina y los países del Caribe los procesos de expansión ganadera más agudos se registraron durante las décadas de 1970 y 1980, cuando los gobiernos y las agencias de financiamiento internacionales, entre ellas el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), otorgaron importantes estímulos económicos para esta actividad. El incremento de las áreas dedicadas a la ganadería ocurrió fundamentalmente en el trópico húmedo. México y Brasil son ejemplos de este fenómeno (figura 8.15, cuadros 8.1 y 8.2). En el sureste de México, el estado de Tabasco perdió 90% de sus selvas durante esas décadas. La expansión agrícola todavía es muy activa en 70% de los países, mientras que en otro 25% se encuentra sin cambios, y sólo en 5% restante está disminuyendo.

Otra causa importante de deforestación es el manejo forestal inadecuado. Pocos bosques de América Latina se manejan de manera sostenible. Desde el siglo XIX la explotación forestal se ha centrado en la extracción de especies de valor comercial. La vegetación restante se tala y se quema, al considerarse carente de valor, lo que da lugar a cambios en el uso de suelo, es decir, los

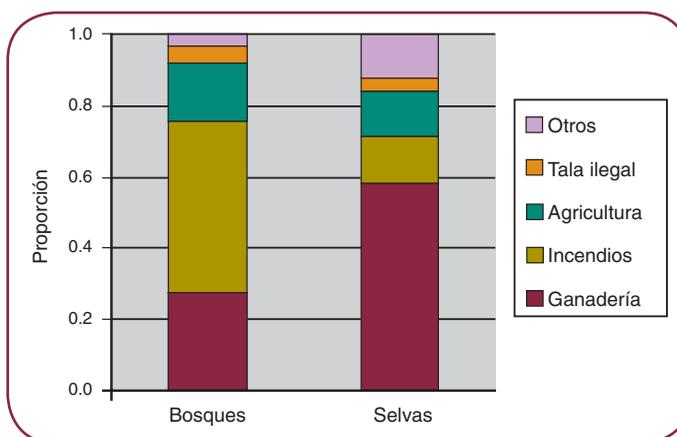


Figura 8.15

La ganadería ha sido la causa más importante de la pérdida de las selvas tropicales en México. En contraste, los bosques templados de nuestro país se han perdido principalmente como resultado de los incendios provocados por el hombre.

terrenos originalmente forestales se convierten en agrícolas o ganaderos. De igual forma, el impulso otorgado al establecimiento de plantaciones forestales comerciales durante las últimas décadas ha llevado al reemplazo de extensos bosques nativos muy diversos por sistemas más homogéneos.

La mayor superficie de bosques densos en el mundo se localiza precisamente en la región de América Latina y el Caribe. En México se estima que hay 21 millones de hectáreas con potencial forestal, las cuales son suficientes para resolver la demanda nacional de madera. Sin embargo, este potencial se desaprovecha por la tala inmoderada y por la deforestación que determina el uso de las tierras para otras actividades productivas.

Un problema importante derivado de la deforestación es la **fragmentación** de los ecosistemas remanentes (véase el recuadro 8.2, “La fragmentación y el efecto de borde”), la cual impide que las poblaciones de animales y vegetales se mantengan sanas y con altos niveles de diversidad genética. Muchas poblaciones requieren superficies muy extensas para reproducirse y mantenerse. Por ejemplo, se estima que una pareja de jaguares o de águilas arpía necesitan más de 6,000 hectáreas de terreno para vivir, lo cual equivale a más de 8,500 canchas de fútbol. Además, los bordes de los fragmentos tienen condiciones ambientales diferentes de las del hábitat original (en cuanto a temperatura, evapotranspiración y nivel de insolación, entre otras), lo cual favorece la entrada de otras especies no características del ecosistema en cuestión. Estas nuevas especies (muchas veces consideradas **ruderales**) están adaptadas a las condiciones del borde y representan una fuente de competencia para las especies características del ecosistema original, afectando así al fragmento completo. Cuanto más pequeño sea el fragmento remanente, más intenso y perjudicial será el **efecto de borde**.

A la fecha se calcula que la mitad de los bosques templados del mundo y una cuarta parte de los tropicales se han eliminado o se encuentran fuertemente fragmentados.

8.4.2

Pérdida y degradación del suelo

La pérdida de la capa de suelo fértil que cubre la superficie de los continentes se conoce como *erosión*. La preocupación en torno al proceso de erosión está asociada al hecho de que la enorme mayoría de las actividades agropecuarias que se llevan a cabo en el mundo dependen por completo del suelo para producir alimentos (la hidroponía, un sistema de cultivo muy especializado en el que se hace crecer a las plantas en un sustrato acuoso, constituye una excepción).

Diversos factores acrecientan las presiones sobre el uso del suelo para dirigirlo hacia actividades agropecuarias. Entre éstos se destaca el incremento de la población humana, la falta de planeación del desarrollo, la urbanización, el aumento de la infraestructura, la aplicación de tecnologías agrícolas inadecuadas y la pobreza. Se estima que el suelo agrícola en el mundo constituye cerca de 12% de la superficie terrestre y que más de una quinta parte de éste se encuentra degradado por el mal uso, lo cual reduce enormemente su productividad.

Gran parte de la degradación de los suelos se debe a su pérdida como resultado del proceso de erosión. Pero en realidad la erosión es un proceso natural que ocurre constantemente, y la principal fuerza responsable de su existencia es la fuerza de gravedad. Veamos cómo se forma el suelo y cómo ocurre el proceso de erosión.

Desde hace más de un siglo los geólogos saben que la corteza terrestre no es un sistema estático, sino que está en constante transformación. Los seres humanos podemos apreciar los resultados de esta transformación, aunque nos resulta difícil verla en acción porque sucede a un ritmo extremadamente lento. Algunas evidencias de este constante cambio son las colinas y montañas que observamos a nuestro alrededor, que no son más que plegamientos de la corteza terrestre resultado de colisiones entre

las **placas tectónicas** que conforman los continentes y los fondos marinos. Los volcanes, que surgen como resultado de la salida de magma u otros materiales provenientes del **manto** de la Tierra, también constituyen ejemplos de la dinámica de la corteza terrestre.

La formación de colinas, montañas, sierras y volcanes provoca la elevación del terreno; a partir de que esto ocurre, la gravedad comienza a asumir un papel activo, pues todo lo que sube invariablemente vuelve a bajar. En este caso lo que baja es precisamente el suelo, los sedimentos y las partículas de roca, entre otros. En este ciclo interminable de subidas y bajadas intervienen de manera central el agua y el viento, los agentes erosivos por excelencia. Al quedar expuestas a la acción de estos agentes, las partículas de rocas y del suelo van moviéndose poco a poco hacia partes más bajas y, al ser acarreadas por el agua, se dirigen hacia los ríos, que son vías muy eficientes de transporte de materiales; de esta forma, las partículas de rocas y de suelo terminan en el mar. El viento también ejerce una acción mecánica significativa, sobre todo cuando sopla con fuerza, arrancando materiales y transportándolos a otros lugares.

A la erosión provocada por la acción del viento se le conoce como *erosión eólica* (figura 8.16), mientras que a la que está ligada a la acción del agua, ya sea en forma de lluvia o a manera de corrientes (ríos o arroyos), se le llama *erosión hídrica*. Una forma de erosión hídrica es también la que produce el oleaje en la interfase tierra-mar de las zonas costeras, cuyo efecto da origen a las playas arenosas.

A pesar de que los agentes erosivos actúan constantemente, cuando el suelo está cubierto por vegetación, ésta tiene un efecto amortiguador muy efectivo contra la erosión. Las plantas ejercen esta protección de varias maneras. Por ejemplo, su follaje impide que las gotas de lluvia caigan directamente en el suelo y así lo protegen de que el golpeteo de las mismas levante las partículas edáficas e inicie su transporte terreno abajo. Además, los sistemas radiculares de las plantas y la presencia del

mantillo (la capa de desechos vegetales que cubre al suelo) le confieren una alta estabilidad a la matriz de suelo. De esta manera, puede decirse que existe un control natural sobre la magnitud de la erosión que ocurre en los ecosistemas, con lo que se mantiene un cierto equilibrio entre sus componentes bióticos y abióticos. En contraste, en las regiones desprovistas de vegetación, la erosión hídrica provoca altas tasas de pérdida de suelo, sobre todo en las zonas con grandes pendientes. Asimismo, en ecosistemas como los desiertos, la ausencia de una capa robusta de vegetación permite que la erosión eólica llegue a ser muy intensa.

Cuando los seres humanos deciden utilizar un terreno para la siembra de algún cultivo, generalmente necesitan preparar la tierra y comienzan por eliminar la vegetación natural que existe en el lugar. Este tipo de manipulación de la naturaleza es tan antiguo como la invención de la agricultura. Al desaparecer las plantas silvestres para introducir las cultivadas, recae sobre estas últimas la función de amortiguar la erosión. Sin embargo, las plantas cultivadas en general no son muy eficientes para tal fin, ya que suelen ser de menor tamaño y, lo que es más importante, no permanecen durante todo el



Figura 8.16

La erosión eólica es capaz de formar bellos paisajes como estas rocas en forma de hongo, pero también es responsable de la pérdida de una enorme cantidad de suelo fértil cada año.

año, pues una vez que se realiza la cosecha y hasta que el terreno se vuelve a sembrar (a veces muchos meses después), el suelo queda completamente expuesto a la acción de los agentes erosivos. Si estas tierras no se vuelven a utilizar con fines agrícolas, el suelo permanecerá desnudo hasta que comience a ser repoblado poco a poco por plantas silvestres, iniciándose un proceso de **sucesión secundaria**.

En muchas imágenes de la superficie terrestre tomadas desde aviones o satélites se distinguen los ríos que atraviesan las regiones agrícolas de muchos países. Es común que estas corrientes de agua aparezcan de color café intenso en las fotografías, lo cual permite darnos una idea de la magnitud del proceso de erosión que ocurre en estas tierras: el color café de los ríos indica que éstos llevan una gran cantidad de sedimentos. Al llegar al mar, la mancha colorida proveniente de los ríos se extiende por decenas de kilómetros. Los sedimentos de suelo fértil que la componen terminarán por depositarse en el fondo marino y se habrán perdido por completo para el desarrollo de actividades agrícolas.

Como hemos visto, el mal uso del suelo agrícola puede llevar a su erosión y pérdida, provocando la degradación de los terrenos de cultivo. En general, se recomienda que los cultivos agrícolas se ubiquen en terrenos con pendientes de menos de 12°. Los terrenos más inclinados deben permanecer cubiertos por su vegetación original. A pesar de esta recomendación, muchas zonas montañosas con grandes pendientes se utilizan para la agricultura o la ganadería y, lo que es peor aún, los surcos que se abren al arar la tierra se trazan paralelos a la pendiente (figura 8.17). Esto determina que el suelo se pierda a tasas muy rápidas, sobre todo en zonas en las que las lluvias son torrenciales y arrastran consigo grandes cantidades de sedimentos.

Un país o una región que carecen de suelo fértil sencillamente no producen alimentos para sus habitantes. Por lo tanto, se esperaría que las sociedades



Figura 8.17

La agricultura que se lleva a cabo en pendientes muy pronunciadas es una de las principales causas de la pérdida de suelos fértiles por erosión.

humanas tuvieran conciencia de la importancia de evitar la erosión. Sin embargo, paradójicamente la gravedad del fenómeno de la erosión pocas veces se menciona en las noticias de los diarios, la radio o la televisión. A pesar de que está ocurriendo constantemente, se ignora su existencia, cuando deberíamos de estar muy preocupados por buscar soluciones a este serio problema, pues a pesar de que se habla del suelo como un recurso renovable, la realidad es que la velocidad con la que se forma (a través del proceso conocido como **pedogénesis**) es extremadamente lenta. En consecuencia, cuando la erosión lleva a la pérdida total del suelo, pueden pasar

cientos o hasta miles de años antes de que éste se forme de nuevo. La pedogénesis implica el proceso de rompimiento, trituración y desgaste (**intemperismo**) del material rocoso que existe en la región, así como la incorporación de materiales orgánicos y minerales provenientes de los organismos (los cuales producen hojarasca, heces, cadáveres, etcétera). En regiones cálidas y lluviosas la pedogénesis puede ser relativamente rápida, pero en regiones secas o de climas fríos ocurre con mucho mayor lentitud.

Algunas sociedades humanas han aprendido a controlar la erosión en mayor o menor medida. Un ejemplo muy notable de ello es la labor que se llevó a cabo en el valle del Colca, en el sur de Perú. Ésta es una región agrícola que se ha logrado mantener activa desde hace miles de años hasta la actualidad

gracias a la construcción de un vasto sistema de terrazas que cubre las laderas del valle hasta donde alcanza la vista (figura 8.18). De esta forma, al transformar las laderas inclinadas de los cerros en miles de escalones horizontales, la capacidad de la gravedad para transportar las partículas de suelo hacia abajo se ve prácticamente nulificada. Otra manera de proteger el suelo contra la erosión es a través de los llamados cultivos de cobertura, es decir, el cultivo simultáneo de varias especies, entre las que destacan las de porte arbóreo o arbustivo (como árboles frutales), cuyo follaje protege al suelo de la erosión cuando está ausente el cultivo principal (como la avena o la soya). Una forma más de proteger al suelo es mediante la creación de cortinas de árboles alrededor de los campos agrícolas, las cuales se conocen como cercas vivas o cortinas rompeviento, ya que impiden que el viento golpee directamente la superficie desnuda del suelo y que éste se pierda por erosión eólica.

En contraste, en muchas partes del mundo no se aplican medidas para el control de la erosión, de manera que el suelo se pierde a una tasa muy alta. La preocupación crece cuando la pérdida de suelo tiene efectos colaterales muy nocivos, tales como el azolve de presas, ríos y lagos, la eutroficación de cuerpos de agua (es decir, el exceso de minerales y nutrientes en los ecosistemas acuáticos), la reducción de la disponibilidad de agua subterránea, la contaminación del agua y la incidencia de inundaciones, entre otros.

Los ecosistemas con suelos erosionados y una cubierta vegetal escasa no tienen la capacidad de retener el agua de lluvia, sobre todo cuando ésta cae torrencialmente. En esos casos, el volumen de agua que descende con rapidez de las partes altas de cerros y montañas adquiere una fuerza incontrolable y llega a tener efectos devastadores en las partes bajas, como pudieron atestiguar tristemente los pobladores del estado de Tabasco, sobre todo los de la ciudad de Villahermosa, en noviembre de 2007, cuando se inundaron grandes extensiones de terreno como resultado de las torrenciales lluvias que provocaron que los ríos se desbordaran de su cauce (figura 8.19).

Se calcula que 15% de la superficie terrestre está erosionada y que 70% de las tierras de las regiones secas están afectadas por la erosión. En el caso particular de México, se estima que 45% de su territorio sufre algún grado de erosión (véase el cuadro 8.3).

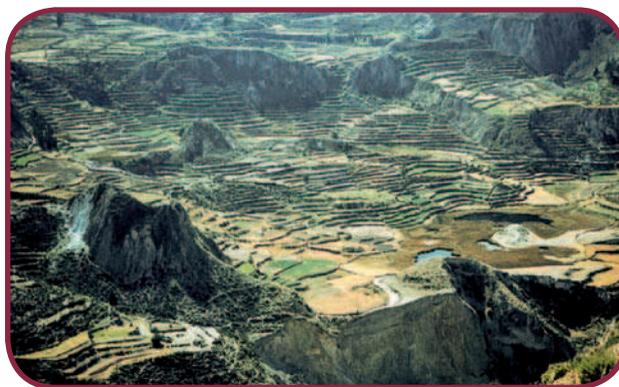


Figura 8.18

La construcción de terrazas de cultivo en el valle del Colca, Perú, ha permitido desarrollar actividades agrícolas en esta región durante miles de años (tomada de: <http://www.rutahsa.com/ColcaVal.jpg>)



Figura 8.19

Las inundaciones son eventos catastróficos que son el resultado de la pérdida de la vegetación y la erosión excesiva del suelo en una región. En la foto se observa la inundación que afectó a la ciudad de Villahermosa, Tabasco, en 2007.

Cuadro 8.3 Grado de erosión de los suelos en México.

Grado de erosión	Porcentaje del territorio
Sin erosión	54.8
Ligero	23.2
Moderado	19.7
Severo	1.4
Extremo	0.9

El uso de tecnologías agropecuarias inadecuadas causa otros problemas del suelo, como la acumulación de sales (**salinización**), la acidificación, la compactación por el pisoteo del ganado, la contaminación por agroquímicos y el depósito de desechos sólidos. La salinización provoca el abandono de cerca de 10 millones de hectáreas irrigadas cada año. En México 10% de la superficie irrigada está salinizada, cinco millones de hectáreas sufren acidificación y otra extensión considerable está deteriorada por el pisoteo del ganado. Por otro lado, el uso indiscriminado y excesivo de fertilizantes y otros agroquímicos provoca una aguda contaminación, tanto del suelo como de los cuerpos de agua. Sólo en América Latina se utilizan ocho millones de toneladas de fertilizantes al año y, en promedio, se aplican 90 kg de fertilizantes por hectárea de terreno cultivado al año en todo el mundo.

A nivel mundial se estima que 35% de la degradación del suelo se debe al sobrepastoreo, 29% a la deforestación, 28% a las prácticas agrícolas inadecuadas, 7% a la extracción de leña y 1% restante al desarrollo urbano e industrial.

8.4.3 Problemas por el uso del agua

En el capítulo 6 se explicó que del agua dulce que utiliza el ser humano en sus actividades, la mayor proporción (83%) se usa para la agricultura, mientras que sólo 12% se consume en las ciudades y 5% se dedica a la industria (véase la figura 6.4, en el capítulo 6). Por desgracia, el uso que se da al agua en la agricultura es muy ineficiente, pues 55% se desperdicia a causa del uso de sistemas de riego poco funcionales u obsoletos. De hecho, la cantidad de agua que se pierde en la agricultura es mayor que la que se canaliza para todos los demás usos.

La contaminación del agua y la disminución de su disponibilidad por habitante causan problemas de salud en casi todos los países, limitan el desarrollo económico y agrícola, y producen daños irreversibles a los ecosistemas. El desvío de los cauces de los ríos para construir grandes obras de infraestructura (por ejemplo, carreteras, aeropuertos o industrias) ha destruido ecosistemas enteros, como manglares y otros humedales costeros. Por otro lado, la alteración de los ecosistemas como producto de la deforestación repercute gravemente en los procesos naturales que dan lugar al ciclo del agua. Por ejemplo, cuando se pierde la vegetación de un lugar, la erosión del suelo que se deriva de su pérdida lleva a que los ríos y lagos se azolven; a la vez, la ausencia de vegetación determina que disminuya la cantidad de precipitación (pues ya no hay plantas que absorban el agua de la lluvia y la devuelvan a la atmósfera por evapotranspiración) por lo que, a la larga, los ríos y manantiales se secan.

El estilo de vida actual, el crecimiento de las ciudades y el consumo excesivo de agua para la agricultura han provocado la sobreexplotación de los **mantos acuíferos** del subsuelo, los cuales tardaron millones de años en formarse. Por si esto fuera poco, una proporción muy alta del agua que se devuelve a la naturaleza está contaminada, ya que se usa como medio para el transporte de desechos. Por ello, cuatro de cada 10 personas en el mundo utilizan aguas contaminadas, tanto para beber como para bañarse, lo cual provoca serios problemas de salud.

De los 617 acuíferos que existen en México, 100 están sobreexplotados y muchos están contaminados por las descargas de aguas residuales. Los acuíferos que se encuentran en estado más crítico son el del Valle de México, el de la cuenca del río Lerma (en el occidente de México; que abarca áreas de los estados de Nayarit, Zacatecas, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Michoacán, Querétaro y Estado de México) y el de la región de La Laguna (en la zona limítrofe de los estados de Coahuila y Durango). Además, prácticamente todos los cuerpos de agua superficiales más importantes del territorio (esto es, los ríos y lagos) están contaminados por plaguicidas, fertilizantes, metales pesados y otras sustancias tóxicas, así como por materia orgánica y bacterias patógenas. Estas sustancias irremediablemente terminan en los océanos, que es donde la mayoría de los ríos desembocan depositando los desechos que recolectan durante su recorrido.

Un efecto indirecto de la alteración de los ciclos hidrológicos regionales es el aumento de la frecuencia e intensidad con la que ocurren desastres naturales, tales como tormentas, ciclones e inundaciones. Además, los efectos de este tipo de eventos se agravan por la ubicación inadecuada de muchos asentamientos humanos y otras construcciones, que a veces se establecen incluso sobre los cauces de los ríos, lo que entorpece el flujo natural del agua y pone en riesgo a sus habitantes.

8.5 Contaminación

La contaminación es el proceso de acumulación y mantenimiento de elementos que dañan al ambiente, tales como sustancias químicas, organismos patógenos, ruido o iluminación artificial, en un lugar particular, por lo cual se le considera como una de las formas en las que se manifiesta localmente el deterioro ambiental.

Los **contaminantes** son sustancias tóxicas o condiciones ambientales que, al alcanzar niveles elevados, alteran las condiciones originales de los ecosistemas y dañan a los organismos, reduciendo su desempeño y en ocasiones provocando su muerte. Muchas de las sustancias químicas que se consideran contaminantes están presentes de manera natural en la biosfera. Sin embargo, el efecto tóxico de estas sustancias se hace evidente sólo cuando se concentran en grandes cantidades, esto es, cuando las actividades humanas las producen en tal cantidad que los ecosistemas ya no las pueden absorber y modificar. Otras sustancias químicas contaminantes han aparecido recientemente en la biosfera a raíz del acelerado desarrollo tecnológico que inició en el siglo XIX con la Revolución Industrial. Estas sustancias tienen ahora sus propios ciclos biogeoquímicos a través del aire, el agua y las cadenas tróficas. Por ejemplo, el isótopo radiactivo cesio 137, emitido como resultado de las pruebas nucleares que muchos países llevan a cabo desde mediados del siglo XX, es absorbido por los líquenes de los bosques boreales de América del Norte. Los alces consumen estos líquenes, con lo cual incorporan átomos de cesio 137 en sus tejidos. Después, los esquimales los cazan para comérselos, por lo que también se contaminan con este isótopo.

Otro ejemplo de un contaminante de origen humano que se integró a los ciclos biogeoquímicos es el insecticida conocido como DDT. En este caso, cuando las avionetas esparcen el insecticida en



Figura 8.20

El insecticida conocido como DDT se rocía sobre los cultivos con avionetas. Sólo 50% de este insecticida llega al suelo; el resto viaja por la atmósfera y se deposita en otros lugares.

el norte de África para controlar las plagas de insectos que atacan a algunos cultivos (figura 8.20), sólo 50% llega al suelo. La otra mitad se mueve con las masas de aire hasta depositarse en el Océano Atlántico y ha llegado incluso hasta las Antillas en el Mar Caribe, a más de 7,000 km de distancia. Asimismo, este insecticida se mueve a través de las cadenas tróficas marinas. Primero lo absorben las algas macroscópicas y el fitoplancton. De éstos pasa al zooplancton, los peces, las aves marinas, los delfines y las focas. De esta manera, el DDT rociado en el norte de África puede acabar en los tejidos grasos de los seres humanos que consumen productos marinos en otras partes del mundo.

8.5.1

Clasificación de los contaminantes

Los contaminantes se clasifican por su *naturaleza* en químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos son todas las sustancias químicas que, en cierta concentración, causan daño a los organismos. Los contaminantes físicos son aquellos que alteran de manera nociva las condiciones físicas del ambiente; entre ellos se encuentran los contaminantes térmicos que alteran la temperatura de un sitio, como lámparas, hogueras, depósitos de hielo o enfriadores. Otros tipos de contaminación física son la contaminación auditiva, la visual y la luminosa. El ruido afecta el desempeño de los animales de oído sensible reduciendo su capacidad para localizar a sus presas, a su pareja o para evadir a los depredadores. La luz artificial tiene un efecto negativo sobre los organismos nocturnos o cavernícolas, haciéndolos visibles a los depredadores o atrayéndolos hacia las fuentes de luz; de esta forma, afecta sus actividades de forrajeo o apareamiento. La contaminación visual se refiere a la presencia de paisajes artificiales que resultan desagradables para la mayoría de las personas, por lo cual afectan su bienestar psicológico. Ejemplos de contaminación visual son los grandes espectaculares que inundan las vías públicas en las ciudades. Los contaminantes biológicos, por su parte, son los microorganismos que afectan la calidad del agua, del aire y de los alimentos, como es el caso de muchos virus, bacterias, protozoarios y hongos.

Los contaminantes también se clasifican, *por su origen*, en **naturales** y **artificiales**. Los **contaminantes naturales** no son producidos por el ser humano (figura 8.21), como ocurre en las erupciones volcánicas que expelen a la atmósfera cenizas, CO_2 , sulfuros, nitrógeno, monóxido de carbono (CO), ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF). Otros contaminantes de origen natural son las sustancias emanadas de los incendios provocados por tormentas eléctricas y derrames de lava, así como los metales pesados que se liberan al medio ambiente por la erosión de las rocas que los contienen. Por ejemplo, la erosión de rocas con altos contenidos del mineral llamado serpentina da origen a suelos muy tóxicos para las plantas, pues contiene níquel, cromo y magnesio.

Los **contaminantes artificiales** son aquellos que se originan a partir de las actividades humanas (figura 8.22) tales como la industria, los transportes, la agricultura, la ganadería y la construcción. Entre los contaminantes artificiales más importantes se encuentran los plásticos, los detergentes, los insecticidas, los herbicidas, los fertilizantes y muchos desechos domésticos e industriales. El problema de la mayoría de estos productos es que, además de que se producen en grandes cantidades, no se degradan fácilmente una vez que se desechan, lo cual hace que su tasa de acumulación sea muy elevada. Esto se debe, en gran medida, a que los organismos **saprófagos** de los ecosistemas naturales no degradan este tipo de compuestos.

Los contaminantes también se clasifican de acuerdo con el *estado físico en que se liberan al ambiente*. Así, existen contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos. Los contaminantes gaseosos más importantes son el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x), los compuestos volátiles orgánicos (como el metano, CH_4), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O_3) y el óxido de cloro (ClO), entre otros. Muchos de estos contaminantes gaseosos se han agrupado bajo el nombre de **gases de efecto invernadero** pues contribuyen al calentamiento de la atmósfera como parte del fenómeno conocido como **efecto invernadero** (véase la sección 8.3.1). Entre los contaminantes líquidos se encuentran las aguas residuales, los aceites y los solventes, así como el petróleo y sus derivados líquidos. Ejemplos de contaminantes sólidos son el vidrio, los plásticos y los metales pesados (algunos de los cuales son radiactivos).

El estado físico en el que se liberan los contaminantes nos puede dar una idea de qué parte del planeta contaminan. Por ejemplo, los contaminantes gaseosos afectan sobre todo a la atmósfera, los contaminantes líquidos a los cuerpos de agua y los sólidos al suelo. Sin embargo, ésta no es una regla general, pues con frecuencia encontramos contaminantes sólidos (partículas suspendidas) y líquidos (aerosoles) en la atmósfera. También es posible encontrar contaminantes sólidos en los cuerpos de agua (figura 8.23) y contaminantes líquidos en el suelo. Por lo anterior, otra forma común de clasificar a los contaminantes es de acuerdo con *la parte del planeta en la que se acumulan*. En este sentido, tenemos contaminantes atmosféricos, del agua y del suelo.

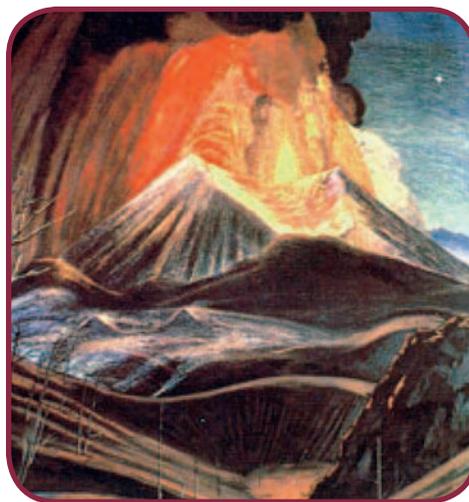


Figura 8.21

Las erupciones volcánicas son una fuente de contaminantes naturales. Aquí vemos una famosa pintura del Dr. Atl que representa la erupción del volcán Parícutín, en el estado de Michoacán, México.

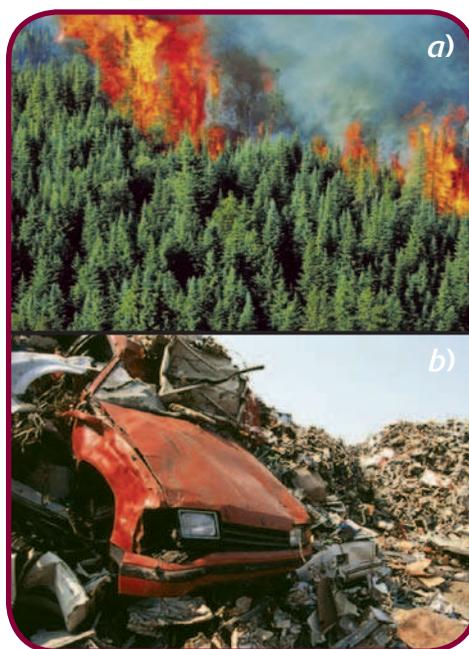


Figura 8.22

El humo producido por a) los incendios forestales provocados por el hombre, así como b) los desechos industriales, son ejemplos de contaminantes artificiales.



Figura 8.23 Muchos contaminantes sólidos, como plásticos y metales, terminan acumulándose en diversos cuerpos de agua, como ríos, lagos y océanos.

8.5.2 Generación de residuos: Fuentes de la contaminación

El planeta cambia drásticamente conforme el ser humano añade nuevos materiales a los ecosistemas o libera sustancias naturales en tales cantidades que ahora abundan en la biosfera. A continuación describimos las principales fuentes de las que han surgido esta infinidad de sustancias contaminantes.

Quema de combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son los que se derivan de la descomposición de la materia orgánica proveniente de organismos (principalmente plantas) que vivieron en épocas muy remotas y que se depositaron en las capas profundas del subsuelo. Estos combustibles son el petróleo, el gas natural, el carbón mineral y sus derivados, entre los que sobresalen la gasolina, el gasóleo y el queroseno.

Los combustibles fósiles se queman en los motores de combustión interna que permiten moverse a los vehículos de transporte, en los generadores de energía termoeléctrica, en las máquinas de las que depende el funcionamiento de las industrias y en los aparatos que hacen nuestra vida más cómoda en casa, por ejemplo las estufas, los calentadores de agua y los sistemas de calefacción. La quema de estos combustibles libera a la atmósfera diversos contaminantes, entre los que se encuentran el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y los compuestos de plomo. El plomo en realidad no forma parte de los combustibles fósiles, sino que se añade después de la refinación para mejorar el rendimiento de los motores.

Además de la liberación directa de sustancias contaminantes, la quema de combustibles fósiles también favorece la producción de ozono en las capas bajas de la atmósfera. Este gas se produce por la reacción del oxígeno con otros compuestos contaminantes (como los óxidos de nitrógeno) en presencia de luz solar. El ozono que se acumula en las partes bajas de la atmósfera se considera un contaminante porque a altas concentraciones resulta irritante para las mucosas de las vías respiratorias. Por su elevado peso molecular, este gas no sube fácilmente hacia las capas superiores de la atmósfera,

donde forma la **capa de ozono** que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta B que provienen del Sol (véase la sección 8.3.2).

En las grandes ciudades los contaminantes que se producen como resultado de la quema de combustibles fósiles se acumulan en la atmósfera y se mezclan con el vapor de agua, dando lugar a lo que se conoce como *smog*. Este término se deriva de dos palabras del inglés: *smoke* (humo) y *fog* (niebla), y se acuñó en Inglaterra a raíz de la fuerte contaminación atmosférica que, en conjunto con la elevada humedad del aire, impedía la visibilidad en Londres a mediados del siglo XX. Actualmente se utiliza la palabra *smog* para referirse a la contaminación atmosférica en general, sin que esté asociada necesariamente a la presencia de niebla o a la reducción en la visibilidad atmosférica. La carga de automóviles en algunas ciudades es tan elevada que un alto porcentaje del *smog* proviene de esta fuente y, a veces, éste forma una capa que se extiende por cientos de kilómetros. Por ejemplo, el *smog* que se produce en la ciudad de Los Ángeles, California, llega a extenderse hasta los estados de Nevada y Arizona. En la ciudad de México, el aumento en el parque vehicular durante los últimos 30 años ha elevado los niveles de *smog*. Esto, aunado al fenómeno natural de **inversión térmica** (véase el recuadro 8.3, “El fenómeno de la inversión térmica”), ha llegado a producir situaciones graves de **contingencia ambiental** (figura 8.24), que han obligado a los gobiernos locales a tomar decisiones drásticas sobre el uso de automóviles particulares, entre las que se cuentan el programa “Hoy no circula” y la verificación vehicular obligatoria.



Figura 8.24

En la ciudad de México ocurren contingencias ambientales (es decir, situaciones en que se rebasan los niveles tolerables de contaminación atmosférica) con cierta frecuencia, sobre todo durante el invierno, cuando el efecto de la contaminación se acentúa por el fenómeno de inversión térmica.

Actividades industriales

Las industrias emiten una serie de contaminantes que se integran a la atmósfera, muchos de ellos derivados de la quema de combustibles, como se detalló en los párrafos anteriores. Pero hay otros contaminantes gaseosos derivados de las actividades industriales. Las fábricas de refrigeradores y de componentes electrónicos, por ejemplo, liberan al ambiente CFC, metales pesados (como el plomo y el mercurio), ácidos concentrados, solventes, lodos y aguas residuales. En particular, los CFC son muy contaminantes porque destruyen paulatinamente la capa de ozono que protege a nuestro planeta de los dañinos rayos ultravioleta provenientes del Sol (véase la sección 8.3.2).

Las industrias textil, papelera y siderúrgica requieren de grandes cantidades de agua para funcionar, de modo que producen aguas residuales de desecho en las que se acumulan sustancias contaminantes, como metales, aceites industriales, materia orgánica e incluso sustancias radiactivas. Otros residuos peligrosos derivados de la industria son los cianuros, los éteres, los hidrocarburos aromáticos, el fósforo y los compuestos inorgánicos fluorados (es decir, derivados del flúor).

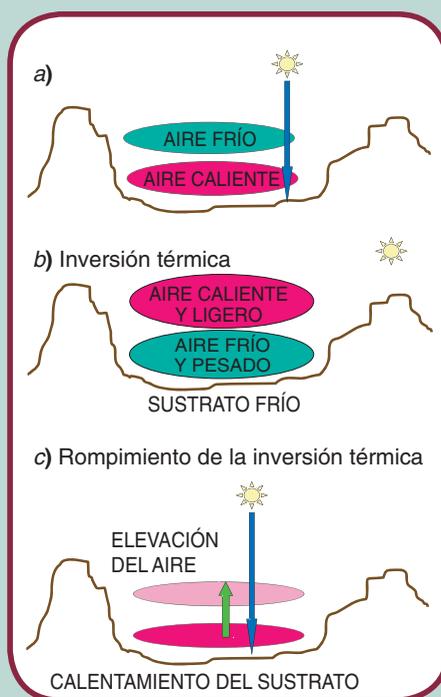
Recuadro 8.3

El fenómeno de la inversión térmica

Los efectos nocivos de la contaminación atmosférica se agudizan cuando se presenta una inversión térmica. Este fenómeno consiste en la inversión de las capas que se encuentran en la parte baja de la atmósfera. Normalmente las capas más cálidas de aire se encuentran en la parte inferior y las más frías en la parte superior (figura a). Sin embargo, en los días secos de invierno pueden presentarse inversiones térmicas, en las que la escasa humedad del aire no logra retener el calor que irradia el suelo y, por lo tanto, el calor escapa al espacio, de manera que las capas bajas de la atmósfera se enfrían. Al día siguiente, si la radiación solar no alcanza a calentar esas capas frías de aire, éstas se comportan como si fueran un fluido frío y pesado que no puede escapar hacia arriba debido a la ausencia de corrientes de aire horizontales y a la presencia de las cadenas montañosas (figura b). Éste es un fenómeno meteorológico que se presenta en ciudades ubicadas en valles profundos, como la ciudad de México, Santiago de Chile y Los Ángeles, California, en donde hay muchos automóviles e industrias que emiten gases contaminantes a la atmósfera. Durante una inversión térmica los gases contaminantes se mantienen en las capas bajas de aire frío y, como no se dispersan, se incrementa notablemente su concentración. De 1985 a 1995 la ciudad de México sufrió con mucha frecuencia este problema, del cual se liberó parcialmente cuando entró en vigor el programa "Hoy no circula", que consiste en que cada vehículo debe dejar de transitar un día a la semana. Además de este programa, se mejoró la calidad de las gasolinas para reducir las emisiones de gases contaminantes y se aplicó un plan semestral de verificación de las emisiones de gases de los vehículos, entre otras acciones.

El rompimiento de una inversión térmica (figura c) se produce cuando los rayos solares logran calentar el sustrato y el aire subyacente, con lo cual éste se eleva.

Antes de que se reconociera que las inversiones térmicas llevan a una concentración de contaminantes atmosféricos, ciertas ciudades como Londres y Donora, en Pensilvania, Estados Unidos, pagaron con vidas humanas este fenómeno.



Agricultura

Existen en el mundo grandes extensiones de tierra dedicadas al cultivo de legumbres, cereales, frutas, café y otros productos agrícolas. La agricultura moderna casi siempre incluye el uso de insecticidas, herbicidas y fertilizantes que contaminan el suelo, el aire y el agua. Además de la liberación de estas

sustancias químicas como producto de las actividades agrícolas, algunos cultivos favorecen la emisión de gases que tienen efectos nocivos. Por ejemplo, los cultivos de arroz generan **gases de efecto invernadero** ya que se siembran en zonas que se inundan para este propósito. La descomposición de la materia orgánica se ve acelerada en estas zonas inundadas, con lo que también se acelera la producción de metano, uno de los principales gases de invernadero. Por otro lado, el cultivo de plantas leguminosas (como frijol, alfalfa, chícharo, soya y haba), que se asocian con microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico, y el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados incrementan la concentración de nitrógeno en el suelo, provocando efectos indeseables (véase el recuadro 8.4, “Contaminación por nitrógeno”).

Recuadro 8.4

Contaminación por nitrógeno

El exceso de nitrógeno actúa como un fuerte contaminante, ya que los ecosistemas naturales han evolucionado en condiciones de poca disponibilidad de este elemento. Entre los problemas más graves que ocasiona el exceso de nitrógeno en los ecosistemas se encuentran los siguientes:

1. Produce un color amarillento en las hojas de los árboles de pino, las cuales terminan por caerse.
2. Provoca la acidificación de los suelos.
3. Reduce la fertilidad de los suelos, ya que la abundancia de nitrógeno reduce por diversos mecanismos la disponibilidad de calcio, potasio y magnesio.
4. Mengua la diversidad de plantas en los ecosistemas terrestres y acuáticos afectados.
5. Reduce la calidad del agua superficial y subterránea en términos de sus posibilidades de ser utilizada por el ser humano. De hecho, el agua rica en nitrógeno produce daño cerebral y la muerte de niños pequeños.
6. Provoca la eutofricación de ecosistemas dulceacuícolas, pues el incremento en la cantidad de nutrientes en el agua provoca un crecimiento desmedido del fitoplancton y de las plantas en la superficie de los cuerpos de agua. Esto reduce la capacidad de los cuerpos de agua para ser navegables, al tiempo que reduce su oxigenación, lo que constituye una causa de muerte para muchos peces en estos ecosistemas.

Ganadería

Las vacas, las cabras, las ovejas y los cerdos, de los que se derivan muchos productos que utiliza el ser humano para alimentarse, requieren extensas áreas de pastizales y de tierras en las que se cultivan productos forrajeros (como sorgo, alfalfa y maíz). Para aumentar la productividad de estos cultivos, es común que se empleen fertilizantes y pesticidas, que como ya vimos, son sustancias muy contaminantes.

Por otro lado, el ganado produce grandes cantidades de orina y excrementos que aumentan la concentración de nutrientes en el suelo. Estos nutrientes, en altas concentraciones, resultan nocivos para los ecosistemas (véase el recuadro 8.4, “Contaminación por nitrógeno”).

Además, el ganado produce grandes cantidades de metano, uno de los principales **gases de efecto invernadero**. El metano es un producto natural de la digestión de las vacas que se libera a través de la



Figura 8.25 Las vacas son una fuente importante de metano. Se estima que los 1,200 millones de vacas que habitaban en el planeta en 1970 produjeron 16 millones de toneladas de metano.

boca o el ano en forma de flatos. En 1970, por ejemplo, se calculó que los aproximadamente 1,200 millones de vacas que habitaban en todo el planeta (figura 8.25) produjeron 16 millones de toneladas de metano, lo cual representó 30% del total de las emisiones de ese gas en aquel año.

Actividades domésticas

La vida de cualquiera de nosotros en el hogar tiene consecuencias contaminantes. En los hogares se queman combustibles fósiles y como parte de las actividades propias de cualquier hogar se consumen y desechan textiles, aparatos electrónicos, baterías, papel, cartón, insecticidas y plásticos. Por otro lado, los refrigeradores pueden sufrir fugas que aumentan la concentración de CFC en la atmósfera. Ade-

más, en cada casa se produce una gran cantidad de desechos orgánicos (excrementos, orina y desperdicios de alimentos) y se desechan jabones y detergentes en solución, que terminan depositándose como aguas y lodos residuales en diversos cuerpos de agua dulce, así como en el mar. Además, muchos cultivos son irrigados con estas aguas que contaminan los alimentos que consumimos.

Muchos de los productos no comestibles que compramos para usar en el hogar se desechan sin ser utilizados por completo; por ejemplo, insecticidas, barnices, fijadores de pelo, pinturas, detergentes, champús y cremas.

Derrames de petróleo

La corrosión de los oleoductos submarinos, los desperfectos de buques pesqueros, el deterioro de las instalaciones petroleras en zonas marinas y terrestres, pero sobre todo los accidentes de los buques cisterna que transportan el crudo, son la causa del derrame de enormes cantidades de petróleo en los eco-



Figura 8.26 Los derrames de petróleo ocasionan la muerte de miles de peces, aves y otros animales marinos.

sistemas marinos, costeros y terrestres del planeta. Entre los accidentes náuticos más graves se encuentra el del *Exxon Valdez*, que derramó 30,000 toneladas de crudo frente a las costas de Alaska en 1989, y el del buque griego *Prestige*, que ocasionó el derrame de casi 65,000 toneladas de petróleo cerca de la costa del norte de España en 2002 (figura 8.26). Este último ocasionó el cierre de toda la industria pesquera de la costa gallega durante por lo menos un año.

Las guerras constituyen otra fuente importante de derrames de petróleo. Por ejemplo, la guerra del Golfo Pérsico, ocurrida en 1991, provocó el derrame de cerca

de medio millón de toneladas de crudo. Asimismo, la invasión de Estados Unidos e Inglaterra a Irak en 2003 provocó daños en pozos petroleros, así como extensos derrames del hidrocarburo cuyas consecuencias aún no conocemos.

Energía nuclear

Desde poco antes de que terminara la Segunda Guerra Mundial se empezó a utilizar la energía nuclear con fines bélicos; y poco después como fuente de energía para la industria y para la producción de energía eléctrica. Los **isótopos radiactivos** que se emplean con mayor frecuencia para la producción de energía nuclear son el uranio 235 y 238, así como el plutonio 239. La producción de energía nuclear está asociada a la emisión de radiaciones dañinas y a la acumulación de residuos radiactivos entre los que se cuentan el rubidio 86, el estroncio 89 y 90, el itrio 90, el circonio 95, el niobio 95, el yodo 131, el cesio 134 y 137, el cerio 144, el rutenio 106, el torio 232 y el mismo plutonio 239. Muchos de estos isótopos radiactivos se incorporan paulatinamente en los tejidos de los seres vivos. Por esta razón, numerosas personas opinan que el manejo de la energía nuclear con fines pacíficos dista mucho de ser seguro o confiable, tal como lo demuestran los accidentes ocurridos en las plantas nucleoelectricas de Kyshtym (1955) y Chernobyl (1986) en la ex Unión Soviética, y la de Three Mile Island (1979) en Pensilvania, Estados Unidos.

Incendios

Los incendios liberan a la atmósfera los mismos gases que se desprenden durante la quema de combustibles fósiles. El fuego se sigue utilizando intensamente en muchas regiones del planeta para eliminar la vegetación natural de una área y transformarla para uso agrícola o ganadero. Con frecuencia, el fuego se sale de control e incinera zonas mucho más grandes que las que se pretendía quemar. Las consecuencias de estos accidentes son catastróficas en sistemas donde se ha acumulado una gran cantidad de combustible en forma de ramas, troncos y hojas secas debido a un disturbio previo, como un huracán o una sequía prolongada. En México tenemos en nuestra historia reciente dos ejemplos muy dramáticos de esta situación. Uno es la serie de incendios que ocurrieron en Quintana Roo en 1989, al año siguiente del paso del huracán Gilberto. El otro ejemplo es el de los incendios en diversas partes del país, sobre todo en la región de Los Chimalapas (Oaxaca) en 1998, cuando se registró una de las sequías más prolongadas del siglo XX. La espesa capa de humo que se produjo a raíz de estos últimos incendios alcanzó lugares tan lejanos como el sur de Estados Unidos y ocasionó problemas de salud a todo lo largo de su trayectoria.

La frecuencia de los incendios forestales ha aumentado en las últimas décadas debido a la expansión de las actividades humanas hacia zonas naturales boscosas y de matorrales. Estos incendios, tanto los accidentales como los intencionales, llegan a tener consecuencias trágicas, tal como se registró en California y Baja California en octubre de 2007, donde los incendios quemaron 2,150 km² de terreno durante 19 días, con un saldo de 14 muertos, 85 heridos, 1,500 casas destruidas y medio millón de personas evacuadas.

8.5.3

Consecuencias de la contaminación

Las consecuencias de la contaminación son muy diversas, según los contaminantes de que se trate y la susceptibilidad de los organismos que afecten. Sin embargo, todavía no conocemos en detalle todos los posibles efectos de la contaminación sobre la salud humana ni sobre el funcionamiento de la biosfera en general. En parte, esto se debe a que constantemente aparecen nuevos tipos de

contaminantes y a que muchos de sus efectos sólo se detectan a largo plazo. Por ejemplo, aún no se sabe cuál será el efecto de los residuos radiactivos que fueron depositados en diferentes lugares del planeta, sobre todo considerando que su tasa de desintegración es tan baja que seguirán liberando radiactividad por más de un milenio.

A continuación mencionaremos algunos de los efectos más tangibles de la contaminación.

Efectos directos sobre la salud humana

Una de las consecuencias más preocupantes de la contaminación es el deterioro de la salud de los seres humanos. Por ejemplo, el ozono acumulado en las capas inferiores de la atmósfera irrita los ojos y las mucosas del aparato respiratorio, lo que aumenta la susceptibilidad de las personas afectadas a enfermedades producidas por virus y bacterias. El dióxido de azufre y el monóxido de carbono también irritan las vías respiratorias y llegan a provocar asma bronquial, bronquitis, enfisema pulmonar, cáncer del aparato digestivo, afecciones del corazón y, en casos extremos, la muerte por arteriosclerosis.

Los metales pesados son sumamente tóxicos, en especial el plomo y el mercurio. Cuando estos metales se encuentran en el medio acuático, los peces los absorben y acumulan en sus tejidos, de manera que pueden afectar a los seres humanos al comer pescado. Esta contaminación tiene consecuencias graves, ya que la acumulación de plomo en el cuerpo de una persona puede provocar retraso mental, parálisis parcial, pérdida de audición y hasta la muerte.

Puesto que los pesticidas se inventaron para causar la muerte de organismos indeseables, resulta obvio que su uso tenga graves consecuencias en otros seres vivos. Por ejemplo, el DDT se acumula en los tejidos grasos de los animales y del hombre, y provoca daños genéticos. En los campos agrícolas de Sinaloa cada año se intoxican cientos de personas por exposición a insecticidas agrícolas, y muchas de ellas mueren de cáncer por esta razón. Diversos pesticidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas) producen esterilidad y son causa de defectos congénitos en los bebés. El malatión y el paratión, que son insecticidas agresivos, inhiben la actividad de la enzima colinesterasa, la cual participa en la transmisión de los impulsos nerviosos.

La contaminación por sustancias radiactivas también acarrea graves problemas de salud. Por ejemplo, el estroncio 90 se acumula en los huesos, sobre todo en los niños, quienes lo ingieren a través de la leche producida por vacas que se alimentan de pastos contaminados. Este isótopo radiactivo afecta la producción de glóbulos rojos en la médula ósea y produce varios tipos de cáncer.

A pesar de todos estos ejemplos, es difícil probar los efectos de los contaminantes sobre la salud humana, pues los datos disponibles únicamente sugieren tendencias. Por otro lado, es difícil adjudicar a algún contaminante en particular la incidencia de una enfermedad, ya que muchos actúan juntos. Además, las enfermedades causadas por la exposición a ciertos contaminantes se manifiestan en el largo plazo. Por ejemplo, la inhalación de asbesto puede provocar daños a la salud hasta unos 25 años después de que una persona estuvo expuesta a ese contaminante.

Efectos sobre otros organismos

Así como los contaminantes afectan la salud humana, también tienen consecuencias negativas en el desempeño de muchos animales, plantas, hongos y bacterias. El efecto más grave que provoca la contaminación sobre estos organismos es la muerte a corto plazo. Dos tipos de contaminantes que producen este efecto extremo son los pesticidas y los derrames de petróleo. Estos últimos matan muchísimos animales en poco tiempo, ya que el hidrocarburo cubre completamente sus cuerpos, lo que les impide moverse, alimentarse y realizar cualquier otra actividad (figura 8.26).

Otras veces los contaminantes alteran la fisiología de los organismos. Por ejemplo, el DDT interfiere en el metabolismo del calcio de las aves inhibiendo la acción de la enzima anhidrasa

carbónica, que es esencial para la formación del cascarón de sus huevos. De igual forma, el ozono y el dióxido de azufre dañan los tejidos de las plantas y reducen su capacidad fotosintética y su tasa de crecimiento, lo que aumenta la susceptibilidad de estos organismos al ataque de insectos y hongos. Además, las concentraciones excesivas de nitrógeno y fósforo en el suelo incrementan la solubilidad del aluminio, lo cual provoca que éste sea absorbido por las raíces de las plantas; el aluminio es sumamente tóxico, pues inhibe el crecimiento radicular y afecta la absorción de agua. El depósito de aguas residuales (fecales e industriales), basura y desechos radiactivos en las zonas costeras de las grandes ciudades ribereñas reduce las poblaciones de invertebrados bentónicos, destruye los lechos de algas y provoca graves enfermedades a los peces.

El hecho de que la contaminación afecte el desempeño de las plantas produce efectos a nivel de todo el ecosistema. Un ejemplo de ello es el fenómeno de la **declinación de los bosques**, que consiste en el deterioro paulatino de estos ecosistemas causado por la incidencia de enfermedades que provocan la muerte de los árboles (figura 8.27). Una de las causas de la declinación de los bosques es la **lluvia ácida**, como se explicará más adelante.

En ocasiones, en un mismo grupo de organismos encontramos especies que son más sensibles a la contaminación que otros, por lo cual se les considera **bioindicadores** de ciertos niveles y tipos de contaminación. Por ejemplo, las lombrices y las larvas de moscas llegan a ser los organismos dominantes en las comunidades que habitan en cavernas afectadas por aguas residuales.

Alteración de las propiedades ecosistémicas. Tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres, los contaminantes del agua y del aire producen reducciones importantes en la **productividad primaria**, la biomasa de los productores primarios y la **diversidad**, y producen alteraciones de la **estructura trófica**.

Los derrames de petróleo reducen la productividad y la biomasa del fitoplancton, lo cual lleva al colapso de las redes tróficas de los ecosistemas marinos y costeros. En el caso de los ecosistemas terrestres, se ha registrado la reducción de la productividad forestal a causa de la contaminación. Asimismo, se ha demostrado que la contaminación radioactiva proveniente del cesio 137 disminuye la productividad y la diversidad de los bosques templados. Tanto en los ecosistemas terrestres como acuáticos, el incremento de la concentración de contaminantes reduce la diversidad de las comunidades de organismos fotosintéticos y de algunos animales. Por ejemplo, en aguas residuales se observa una disminución marcada en la diversidad de diatomeas, que son algas unicelulares con cubiertas de silicatos. Asimismo, la adición de grandes cantidades de materia orgánica a los cuerpos de agua provoca la muerte masiva de invertebrados, tales como moscas de mayo (Ephemeroptera), libélulas, caballitos del diablo (Odonata) y moluscos, entre otros.



Figura 8.27

La lluvia ácida es una de las principales causas de la declinación de muchos bosques localizados cerca de las regiones industriales de Europa y Estados Unidos. En esta fotografía se observan piceas rojas muertas y otras en proceso de muerte en el estado de Maine, Estados Unidos (tomada por: Paul Donahue).

Como dijimos, una consecuencia importante de la contaminación es la alteración de la estructura trófica. Al parecer, los contaminantes afectan más drásticamente a los depredadores superiores (es decir, a los consumidores secundarios de los niveles tróficos 3 y 4; véase el capítulo 4, sección 4.3.4), y muchas veces les provocan la muerte. La disminución en la densidad de estos consumidores incrementa la intensidad de la competencia entre organismos de niveles tróficos inferiores, lo que lleva a la desaparición de algunos de ellos por **exclusión competitiva**. En términos generales, la ausencia de grandes carnívoros en un ecosistema reduce la estabilidad de este último y da lugar a comunidades simples dominadas por unas cuantas especies. Por ejemplo, las langostas marinas son depredadores que se encuentran en la cúspide de la pirámide trófica de los ecosistemas costeros. Estos animales son muy sensibles a la contaminación, de tal manera que cuando los ecosistemas costeros se contaminan, sus poblaciones se ven mermadas. La disminución de las poblaciones de langostas marinas permite que las poblaciones de erizos de mar, que son sus presas favoritas, crezcan considerablemente.

La alta susceptibilidad de los depredadores superiores a la contaminación se debe, entre otras cosas, al fenómeno denominado **amplificación trófica**, que consiste en que la concentración de contaminantes (como el DDT y los isótopos radiactivos) se incrementa paulatinamente hacia los organismos de los niveles tróficos superiores (figura 8.28).

Lluvia ácida. El fenómeno de la **lluvia ácida** se produce a partir de la reacción química entre el agua de lluvia y algunos gases contaminantes que se encuentran en la atmósfera (dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno), los cuales se emiten por la quema de combustibles fósiles. El resultado de estas reacciones es la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3). La presencia de estos ácidos en la atmósfera reduce el pH del agua de lluvia, llevándolo de sus valores normales, que fluctúan entre 5.0 y 5.5, a valores comprendidos entre 3.5 y 4.5, los cuales corresponden a una mayor acidez. Este fenómeno es particularmente grave en las áreas afectadas por los vientos que atraviesan zonas industriales donde se queman combustibles fósiles. La precipitación ácida tiene efectos en muchos niveles, desde los individuos, las poblaciones y la organización de las comunidades, hasta el funcionamiento mismo de los ecosistemas. Un ejemplo de esto último es la **declinación de los bosques**, de la que hablamos antes. Además, la lluvia ácida provoca un deterioro importante a los edificios, el mobiliario urbano, las estatuas y los monumentos erigidos en las ciudades, pues corroe los materiales que se utilizan para su construcción.

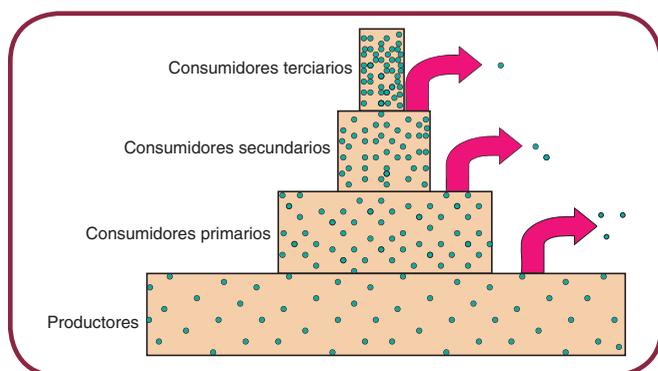


Figura 8.28

El fenómeno conocido como amplificación trófica consiste en que la concentración de contaminantes se incrementa hacia los organismos de los niveles tróficos superiores. En este esquema de una pirámide alimentaria se observa que los contaminantes se encuentran poco concentrados en los productores y alcanzan una concentración máxima en los consumidores terciarios.

El fenómeno conocido como amplificación trófica consiste en que la concentración de contaminantes se incrementa hacia los organismos de los niveles tróficos superiores. En este esquema de una pirámide alimentaria se observa que los contaminantes se encuentran poco concentrados en los productores y alcanzan una concentración máxima en los consumidores terciarios.

Eutrofización. La eutrofización o eutrofización consiste en un incremento anormal en la concentración de nutrientes de un ecosistema acuático, lo cual produce un crecimiento explosivo del fitoplancton, las algas y las plantas acuáticas que viven en él, dándole al agua una tonalidad verdosa y un aspecto turbio. La eutrofización se ve favorecida por los siguientes procesos: 1) la entrada de aguas residuales ricas en materia orgánica y detergentes provenientes de asentamientos humanos; 2) el depósito de desechos industriales orgánicos e inorgánicos; 3) el uso masivo de fertilizantes en la agricultura y su posterior

escurrimiento hacia los cuerpos de agua; 4) la entrada de óxidos de nitrógeno provenientes de la quema de combustibles fósiles e incendios, y 5) la deforestación y consecuente erosión de los suelos. Los compuestos que fomentan la eutrofización son los nitratos, los fosfatos, el potasio, el hierro, el azufre, el molibdeno, el zinc y el manganeso.

Entre las principales consecuencias de la eutrofización en ecosistemas dulceacuícolas y costeros están la reducción de la diversidad, el incremento en la productividad primaria neta debido al crecimiento masivo de algas y plantas acuáticas, la reducción en la disponibilidad de oxígeno (**hipoxia**) en el agua o su ausencia total (**anoxia**) y la consecuente muerte de animales acuáticos aerobios (peces y moluscos).



Para reflexionar...

1. ¿Qué zonas del mundo resultarían más afectadas por un aumento en los niveles de los océanos como resultado del efecto invernadero? Comenta cuáles serían las consecuencias de esto.
2. ¿Cuáles crees que sean los efectos más graves de la extinción de especies? ¿Cómo afectarán la vida de los seres humanos?
3. Piensa cuál es la relación entre los siguientes factores de deterioro: deforestación, fragmentación, erosión, pérdida de especies y calentamiento global. Haz un cuadro sinóptico que te permita describir de manera gráfica cómo están relacionados estos factores y cómo se afectan mutuamente. ¿A qué conclusión llegas con respecto a la complejidad de estos fenómenos?
4. ¿Puedes concebir un grado de contaminación tal que la vida resulte prácticamente imposible? Trata de imaginar una situación así. Describe el tipo de contaminación en el que estás pensando y los niveles que alcanzaría. ¿Crees que ya hay lugares así en nuestro planeta?
5. Reflexiona sobre las enfermedades que se han presentado en tu familia en los últimos dos años. ¿Consideras que es posible que algunas de ellas hayan sido causadas por contaminantes? ¿Por qué?
6. Haz una lista de acciones *concretas* que podrían emprender tú y tu familia para aminorar el problema de la contaminación.

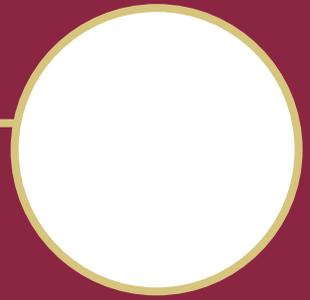


Actividades complementarias

1. De los elementos del clima que revisamos, investiga qué significa “nubosidad”, “radiación solar”, “fuerza y dirección del viento” y “visibilidad a través del aire”. ¿Cómo se mide cada uno de ellos? ¿Por qué son importantes para definir el clima de una localidad?
2. Investiga cuáles especies se han declarado como extintas en los últimos 200 años en el planeta. Elige cinco de ellas y documenta dónde se distribuían, cuándo se observaron en la naturaleza por última vez y qué factores llevaron a su extinción.
3. Realiza una investigación sobre las tasas de deforestación que se presentan en diferentes tipos de ecosistemas en México. ¿Cuáles son los ecosistemas que se están perdiendo a una mayor velocidad?
4. Busca en los periódicos del último año noticias relacionadas con inundaciones y huracanes. Anota si se hace referencia al cambio climático global como una de las posibles causas de este tipo de eventos catastróficos.
5. Haz el penoso trabajo de revisar los botes de basura de tu casa. Elabora una lista de los productos que se desecharon. *a)* Comenta si habría sido preferible no comprar algunos productos para evitar su desecho. *b)* Ordena los productos de la basura de acuerdo con los efectos dañinos que ocasionan al ambiente. *c)* ¿Cuáles podrían reutilizarse? *d)* ¿Cuáles podrían reciclarse? *e)* Además de lo que se depositó en la basura, ¿qué otros contaminantes produjeron las actividades de tu familia en la última semana?
6. Pon a germinar semillas de frijol. Una vez que aparezcan las plántulas, toma 15 y siébralas en vasitos de poliuretano (unicel) con tierra de jardín. Haz un pequeño orificio en el fondo del vasito para que el agua drene. Deja que las plantas crezcan en las mismas condiciones de luz y riégalas cada tres días (o según haga falta). A cinco de estas plántulas riégalas sólo con agua de la llave (con suficiente agua para saturar la tierra). Riega otras cinco con agua y agrega con un gotero una gota de petróleo o aceite para coche, cerca de la base de cada planta. A las últimas cinco plantas riégalas con agua a la que hayas agregado detergente en polvo (media cucharadita en un litro de agua). Sigue el experimento durante un mes y medio y evalúa el efecto de los tres tratamientos que aplicaste: mide la altura de las plantas, su número de hojas y su peso seco final (de raíces y partes aéreas). ¿Qué efecto tuvo el petróleo? ¿Qué efecto tuvo el detergente? ¿Cuál será el efecto de estos dos contaminantes en los ecosistemas naturales?
(* Nota: no uses gasolina para este experimento; es muy peligroso.)
7. Investiga por qué a algunas gasolinas se les añadía plomo. Describe el proceso por el cual el plomo termina en la atmósfera. ¿De qué manera se ha logrado eliminar el plomo de las nuevas gasolinas?
8. Investiga la gama de productos que se clasifican como *plásticos*. ¿Qué características comparten? ¿Por qué se consideran contaminantes?

UNIDAD III

Ecología y sociedad



CAPÍTULO 9

Desarrollo sostenible

9.1 Para la imaginación

Don Raúl siempre ha vivido en un pueblito ubicado en una región muy húmeda de la sierra de Oaxaca. Recuerda que desde pequeño le emocionaba observar la belleza y la vastedad de los bosques propios de esa región. Por ello, siempre le preocupó ver cómo algunas áreas de bosque eran desmontadas cada año para establecer cultivos de maíz. “No tenemos alternativa”, le decían las personas del pueblo con quienes compartía su preocupación; “debemos cultivar maíz, como lo hicieron nuestros mayores desde que tenemos memoria”. A pesar de todo el empeño que ponían en cuidar sus milpas, generalmente lograban cosechas magras y la gente seguía viviendo en condiciones muy precarias. A don Raúl le inquietaba el futuro de sus tres nietos, ya que de seguir así las cosas —pensaba—, los hijos de sus nietos no llegarían a conocer los hermosos bosques de su región y, lo que era más preocupante, no lograrían vivir en mejores condiciones de las que ahora prevalecen en la comunidad. “Tendrán que irse para la ciudad, o peor aún, para el norte”, pensaba don Raúl con tristeza.

Una serie de eventos cambió la historia. La comunidad donde vive don Raúl recibió la visita de unas personas que pertenecían a una organización también preocupada por el futuro de los bosques y el bienestar de los habitantes. Les propusieron organizarse para crear una empresa dedicada a recibir turistas interesados en la naturaleza. Al principio, la idea les pareció extravagante, por lo que no tuvo mucha aceptación. Poco después, los pobladores se enteraron de que algunas comunidades cercanas estaban recibiendo asesoría forestal con la finalidad de aprender a explotar sus bosques de una forma cuidadosa, sin llevarlos a la desaparición. Quizá ellos podrían hacer lo mismo; así que buscaron

asesoría. Se enteraron de que el uso racional del bosque era compatible con la posibilidad de impulsar un turismo amigable con el ambiente en su comunidad.

Ahora la situación del poblado es mucho más promisoría. Junto con varios de sus compañeros, don Raúl dirige una pequeña empresa de ecoturismo que atiende a varias decenas de visitantes al año. Esas personas van para admirar los bellos bosques y dejan en la comunidad una cantidad no despreciable de dinero al pagar por alojamiento, comida y el servicio de guías que se encargan de conducirlos por los hermosos senderos. Además, los visitantes se van sorprendidos de ver el buen manejo al que están sometidos los bosques. Por si fuera poco, un grupo de personas formaron una cooperativa para fabricar muebles con parte de la madera cosechada. El dinero fluye más intensamente hacia la comunidad y muchos jóvenes ya no piensan en emigrar. Por supuesto, los proyectos no están exentos de problemas y, sin duda, se desarrollarían mejor si contaran con más apoyo institucional. Sin embargo, al final del día, don Raúl piensa con beneplácito: “Después de todo, creo que los hijos de mis nietos sí van a vivir aquí y van a conocer estos bosques”.

9.2 Desarrollo sostenible: Definiciones e historia del concepto

El uso de los recursos naturales ha permitido el desarrollo de las sociedades. Sin embargo, con el paso de los años ha tenido consecuencias notables en el medio. Desde los orígenes de la humanidad hemos alterado la naturaleza, pero es evidente que este efecto ha sido cada vez más intenso y profundo, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XX. Ante esta tendencia, tenemos que aceptar que somos los habitantes actuales del planeta los que estamos transformando y deteriorando la naturaleza de forma más radical. Algunas de estas transformaciones son irreversibles, como la extinción de especies. Sin embargo, como veremos más adelante, muchos otros procesos de deterioro se podrían revertir en alguna medida.

A partir de la década de 1970 muchos gobiernos y miembros de la sociedad empezaron a sentir una seria preocupación por el deterioro de la naturaleza. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) convocó en 1972 a la primera Conferencia sobre Medio Ambiente Humano, mejor conocida como la *Conferencia de Estocolmo* (véase el capítulo 10). Más tarde, a mediados de la década de 1980, se desencadenó una crisis económica mundial que llevó a muchas personas a cuestionar y revisar las nociones del desarrollo que prevalecían en ese momento. Hasta aquella época el desarrollo de las naciones se medía únicamente en términos económicos, es decir, por la riqueza que generaban, de acuerdo con las cifras del **producto interno bruto** (PIB). En el mejor de los casos, también se utilizaban indicadores de bienestar social, como el acceso a vivienda, salud, alimentación y educación. Sin embargo, estas dos vertientes, la social y la económica, eran insuficientes para evaluar el desarrollo. Actualmente se reconoce que el estado de los recursos naturales constituye una variable fundamental que se debe tomar en cuenta para evaluar el desarrollo de un país (figura 9.1). El agotamiento, la destrucción y la contaminación de los recursos naturales reducen la disponibilidad o la calidad de las materias primas sobre las que se basa el desarrollo económico y social de las naciones.

En este contexto, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU llevó a cabo una consulta mundial sobre el papel de los recursos naturales en el desarrollo. De esta consulta surgió una obra titulada *Nuestro futuro común*, publicada en 1987, en la que se acuñó el término **desarrollo sostenible** (también conocido como **desarrollo sustentable**) como un modelo de crecimiento que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. En otras palabras, el desarrollo sostenible consiste en un mejoramiento de las condiciones de

vida de las sociedades humanas actuales que permite satisfacer sus necesidades, sin que esto represente una merma de los recursos naturales de los cuales dependerá el bienestar futuro de la humanidad. El desarrollo sostenible busca superar la pobreza actual, de forma que tanto en el presente como en el futuro sea posible que las sociedades humanas mantengan una calidad de vida adecuada. Aunque la idea parezca muy elemental, sus implicaciones son muy importantes y profundas. El desarrollo sostenible tiene como condición básica y fundamental que los recursos naturales no se agoten ni se deterioren, lo cual implica estar comprometidos y sentir solidaridad con las generaciones de seres humanos que aún no están presentes en el planeta. Para hacer esto posible, se requiere necesariamente que cambien las formas actuales de extracción, producción y consumo de recursos naturales por parte de la sociedad.

¿Cómo se puede lograr esto? Al menos en teoría, la respuesta parece ser sencilla. En el caso de los recursos naturales renovables, no se debe extraer más de lo que la propia naturaleza puede renovar o reponer. Para el caso de los recursos no renovables, mientras no se descubran productos nuevos que los sustituyan, es necesario que su extracción se restrinja, lo que evitaría que las generaciones futuras se vean privadas de ellos. Además, no deben incorporarse desechos sólidos, líquidos o gaseosos a la naturaleza en mayores cantidades de las que ésta puede asimilar (véase el capítulo 7).

La idea del desarrollo sostenible ha tenido gran aceptación a nivel mundial y, de hecho, se adoptó como un compromiso de la Segunda Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, que tuvo lugar en Río de Janeiro en 1992, mejor conocida como la Cumbre de la Tierra. Este compromiso fue refrendado una vez más en la Tercera Conferencia Mundial sobre Desarrollo Sostenible en Johannesburgo en 2002 (véase el capítulo 10).

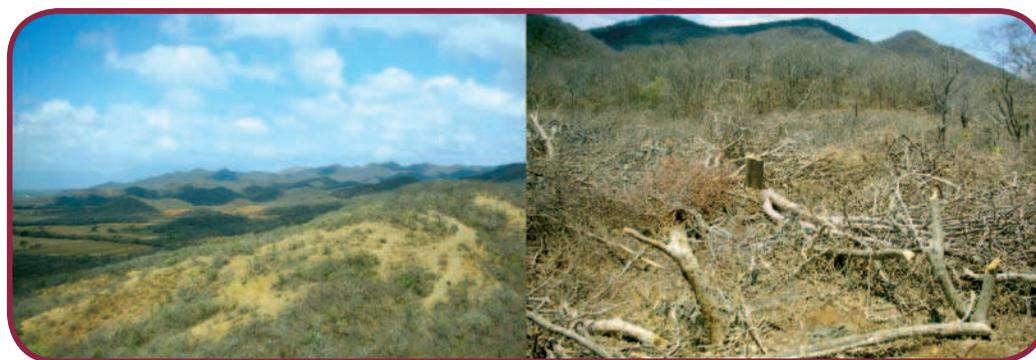


Figura 9.1

El grado de conservación de los recursos es una medida del nivel de desarrollo de un país. En los países poco desarrollados, los recursos naturales suelen estar muy deteriorados. Aquí se observa una selva deteriorada en la región tropical seca del sur de México: están afectados el paisaje, el suelo, la posibilidad de obtener más madera y la calidad del agua.

9.3 Alternativas sostenibles de conservación y uso de los recursos naturales

La creciente preocupación por la destrucción de los recursos naturales ha llevado a las sociedades y los gobiernos a impulsar alternativas encaminadas hacia la conservación y el uso adecuado de los recursos naturales. Estas alternativas se pueden clasificar en los siguientes rubros:

- La protección y conservación de los ecosistemas naturales y su biodiversidad en áreas naturales protegidas.

- El uso sostenible y equitativo de los recursos naturales, encaminado a mejorar las condiciones de vida de la población, interviniendo los ecosistemas naturales de manera adecuada, sin transformarlos. Ejemplos de esto son el uso de algunas tecnologías indígenas tradicionales de manejo de ecosistemas de eficiencia comprobada, el manejo y uso de la vida silvestre, el manejo forestal sostenible, el ecoturismo, la pesca responsable, el manejo integral del agua, y la protección y recuperación del suelo.
- La aplicación de tecnologías amigables con el medio ambiente en los sistemas productivos de áreas transformadas por el hombre, como la agroecología y los sistemas silvopastoriles, la acuicultura y la generación de energía alternativa.
- La restauración ecológica de las áreas deterioradas para mejorar o recuperar sus servicios ambientales.
- La reducción de la tasa de emisión de contaminantes de corta vida y la supresión total de la producción de contaminantes de larga duración. Entre otras cosas, esto se puede lograr mediante la **regla de las tres erres**: reducir, reutilizar y reciclar los productos que consumimos diariamente.

A continuación exploraremos de manera detallada estas distintas estrategias.

9.3.1 Áreas naturales protegidas

Las áreas naturales protegidas son, hasta ahora, la mejor opción para conservar la biodiversidad, y se definen como las porciones de un país, tanto marítimas como terrestres, destinadas especialmente a la protección de la diversidad biológica y de sus recursos naturales y culturales. En estas áreas también se pretende garantizar la provisión de bienes y servicios ambientales indispensables para la sociedad.



Figura 9.2

La zona arqueológica de Tikal forma parte de la Reserva de la Biosfera Maya, en la Región de El Petén, en Guatemala. Esta reserva protege ecosistemas de selva alta perennifolia. Este tipo de sitios son aprovechados para actividades de ecoturismo.

Actualmente, cerca de 30,000 zonas se encuentran bajo algún régimen de protección, las cuales en conjunto equivalen a 10% de la superficie de la Tierra. Estas áreas tienen diversas características, por lo que se les ubica en distintas categorías: parques nacionales, reservas de la biosfera, áreas de protección de flora y fauna, monumentos naturales y paisajes protegidos, entre otras (figura 9.2; véase el recuadro 9.1, “Definición de las categorías de áreas protegidas de acuerdo con la legislación mexicana”).

Los gobiernos y las sociedades de diferentes países han dado una atención muy desigual a las áreas naturales protegidas. En general, a pesar de una larga tradición en el establecimiento formal de estas áreas en América Latina, iniciada desde el siglo XIX, la atención real es una preocupación más bien reciente e insuficiente. Si bien algunas áreas

Recuadro 9.1

Definición de las categorías de áreas protegidas de acuerdo con la legislación mexicana

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define las siguientes áreas naturales protegidas:

- a) *Reservas de la biosfera*. Localizadas en áreas de importancia biogeográfica a nivel nacional, en las que se encuentran representados uno o más ecosistemas no alterados significativamente por la acción del ser humano o que requieren ser preservados y restaurados, en los cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. Dentro de las reservas de la biosfera se definen las **zonas núcleo**, que son las áreas mejor conservadas en las que no se permite ninguna intervención humana, y las **zonas de amortiguamiento**, en donde se pueden realizar actividades productivas sostenibles.
- b) *Parques nacionales*. En los parques nacionales se representan uno o más ecosistemas que forman áreas importantes por su belleza escénica, su valor científico, educativo, recreativo o histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien, por otras razones análogas de interés general. En estas áreas no se permite la extracción de recursos naturales.
- c) *Monumentos naturales*. Son áreas que contienen uno o varios elementos, consistentes en lugares u objetos naturales que por su carácter único o excepcional, interés estético, valor histórico o científico están incorporados a un régimen de protección absoluto.
- d) *Áreas de protección de recursos naturales*. Son las áreas destinadas a la preservación y protección del suelo, de las cuencas hidrológicas, el agua y, en general, los recursos naturales localizados en terrenos de aptitud preferentemente forestal.
- e) *Áreas de protección de flora y fauna*. Son las áreas que albergan los hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, la transformación y el desarrollo de las especies de flora y fauna silvestre.
- f) *Santuarios*. Contienen una considerable riqueza de flora y fauna, o se caracterizan por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Tales áreas incluyen cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas u otras unidades topográficas o geográficas que interesa preservar o proteger.

cumplen cabalmente con su función de proteger la biodiversidad y los servicios ambientales, muchas otras están protegidas sólo “en el papel”, es decir, no se garantiza de ninguna manera su estatus de protección.

En México, hasta el año 2007, se tenían registradas 161 áreas naturales protegidas que ocupaban una superficie de 22.7 millones de hectáreas. Esta cifra corresponde a 7% de la superficie terrestre del país y a 17% de la superficie del mar territorial (cuadro 9.1). Las áreas protegidas terrestres más extensas son las reservas de la biosfera El Vizcaíno (Baja California Sur), Calakmul (Campeche), El Pinacate y Gran Desierto de Altar (Sonora) y el área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (Campeche). Entre las áreas protegidas marinas están las reservas de la biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Baja California y Sonora), el Archipiélago de Revillagigedo en el Océano Pacífico, los parques nacionales Arrecifes de Alacranes frente a la costa de Yucatán y Bahía Loreto en Baja California Sur (figura 9.3).

Cuadro 9.1 Áreas naturales protegidas por categoría en México hasta 2007.

Categoría	Número	Superficie (ha)
Reservas de la biosfera	37	11,581,344
Parques nacionales	68	1,505,643
Monumentos naturales	4	14,093
Áreas de protección de recursos naturales	6	3,350,654
Áreas de protección de flora y fauna	29	6,259,861
Santuarios	17	689
TOTAL	161	22,712,133


Figura 9.3

Localización de las 21 áreas protegidas de mayor importancia en México. En conjunto, estas áreas representan alrededor de 75% de la superficie total de las áreas naturales protegidas del país. 1. Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Valle de los Cirios, 2. Reserva de la Biosfera (RB) El Vizcaíno, 3. Cuenca Alimentadora del Distrito de Riego (CADNR) 043 Estado de Nayarit, 4. CADNR 04 Don Martín, 5. RB Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, 6. RB Calakmul, 7. RB El Pinacate y Gran Desierto de Altar, 8. APFF Laguna de Términos, 9. RB Islas Mariás, 10. RB Archipiélago de Revillagigedo, 11. APFF Laguna y delta del Río Bravo, 12. RB Sian Ka'an, 13. RB Tehuacán-Cuicatlán, 14. RB Isla Guadalupe, 15. RB Bahía de los Ángeles, Canales de Ballenas y Salsipuedes, 16. RB Sierra Gorda, 17. APFF Tutuaca, 18. RB Mapimí, 19. Parque Nacional Arrecife Alacranes, 20. RB Montes Azules y 21. APFF Islas del Golfo de California.

Para que las reservas cumplan con sus objetivos se requiere de: 1) un decreto legal que defina sus límites y categoría; 2) un programa de manejo que especifique las actividades que pueden realizarse

y las que están prohibidas; 3) personal que las atienda y dirija; 4) infraestructura para la operación del personal y los visitantes, y 5) recursos económicos suficientes para cumplir con estas funciones.

9.3.2 Uso de los ecosistemas naturales sin transformarlos

El desarrollo de las sociedades se basa en los ecosistemas naturales como fuentes de un sinnúmero de recursos. Cuando se realiza adecuadamente, la extracción de organismos de la naturaleza no implica la transformación profunda o la destrucción de los ecosistemas; por el contrario, hace posible que los usemos de forma permanente. A continuación revisaremos algunos enfoques encaminados hacia un uso sostenible de los recursos naturales.

Conocimiento indígena tradicional

A lo largo de su historia, las culturas han acumulado conocimientos empíricos sobre los usos que se pueden dar a las especies y sobre el funcionamiento de los ecosistemas. Este conocimiento es la base de tecnologías tradicionales amigables con el ambiente, es decir, que no dañan los ecosistemas naturales (figura 9.4). Por ejemplo, sabemos que más de 5,000 especies de plantas de las más

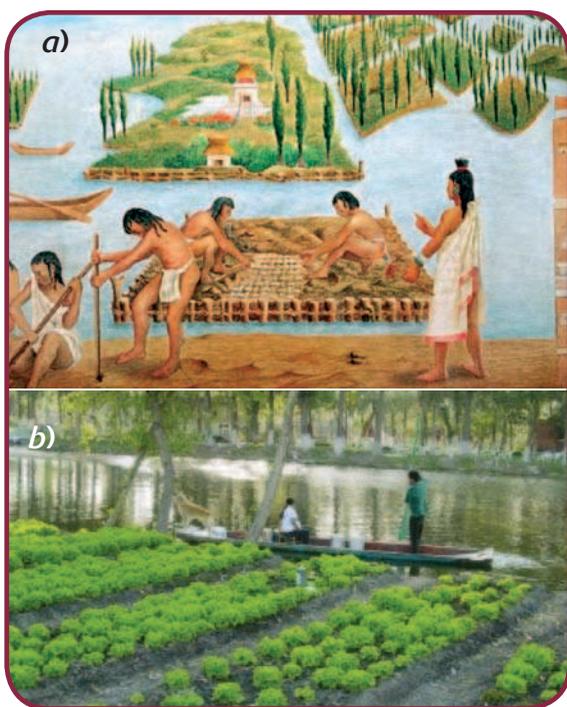


Figura 9.4

Algunas comunidades indígenas usan tecnologías que no dañan a la naturaleza. Tal es el caso de las chinampas del centro de México, las cuales fueron utilizadas por los aztecas *a)* y se siguen utilizando actualmente en las zonas lacustres de Xochimilco y Tláhuac en el Distrito Federal *b)*.



Figura 9.5

En los mercados tradicionales es posible encontrar una enorme variedad de plantas utilizadas para diferentes fines. Aquí se observan diversas plantas medicinales.

de 25,000 que existen en México son utilizadas para diferentes fines por las comunidades indígenas y campesinas (figura 9.5).

Una característica distintiva de las formas tradicionales de uso de los recursos naturales es el aprovechamiento de varios recursos de un mismo ecosistema, sin especializarse en extraer una sola especie o unas cuantas. Esta práctica conserva la integridad de los ecosistemas y también permite aprovechar mejor el potencial de los recursos disponibles en las diferentes épocas del año, de forma que se satisfagan distintas necesidades. Por ejemplo, los indígenas seris de las zonas áridas de Sonora utilizan, por medio de la caza, la pesca y la recolección, 75 especies de animales y plantas del desierto y del mar, mientras que los purépechas de Michoacán utilizan alrededor de 115 especies. Sin embargo, no se debe hacer la generalización de que todas las tecnologías tradicionales son benéficas; algunas, como la de roza, tumba y quema, provocan severos efectos negativos en la naturaleza, sobre todo en las regiones tropicales húmedas (véase el recuadro 9.2, “Tecnología tradicional y tecnología moderna”).

Recuadro 9.2

Tecnología tradicional y tecnología moderna

Muchas formas tradicionales del uso de los recursos naturales, surgidas del conocimiento empírico de las comunidades indígenas y campesinas, no dañan el ambiente y se han mantenido vigentes a lo largo de varios siglos. Por otro lado, hay muchos ejemplos de tecnologías modernas que elevan la productividad pero a costa del medio, ya sea porque demandan más materias primas de las que la naturaleza puede renovar o porque desechan contaminantes líquidos, sólidos y gaseosos en cantidades mayores de las que se degradan de manera natural.

Estos ejemplos, documentados en la bibliografía especializada y citados con frecuencia por los **ecologistas**, han llevado a una falsa polarización: se generaliza que la tecnología moderna es destructora del ambiente y que la tradicional siempre es sostenible. No obstante, ninguna de estas dos aseveraciones tienen fundamentos, ya que hay muchos ejemplos de tecnologías tradicionales que no son sostenibles y de tecnologías modernas que sí lo son.

Por ejemplo, el sistema de **roza, tumba y quema**, que es una tecnología tradicional utilizada en muchas comunidades rurales, hoy se ha convertido en un factor importante de destrucción de los bosques y selvas. Esta tecnología, que antes se aplicaba en condiciones muy diferentes de las actuales, requiere de superficies extensas de tierra, ya que se quema una parcela para sembrarla y después de unos cuantos años se abandona para que se regenere naturalmente. El campesino entonces tumba y quema otra parcela y deja descansar la anterior. Esto implica que cada familia campesina necesitaría ser propietaria o tener asignada una superficie extensa de tierra. Antiguamente, en el estado de Yucatán esta superficie era de al menos 25 hectáreas por familia. Esto ya no es posible en las condiciones actuales de densidad poblacional. La realidad es que la mayoría de las familias campesinas poseen apenas entre dos y cinco hectáreas. No pueden dejar descansar la tierra y el suelo se agota. Esto, aunado a la dificultad de controlar el fuego durante las quemas y el consecuente aumento de los incendios forestales hace que esta tecnología tradicional ya no sea sostenible.

Lo contrario podríamos decir de tecnologías modernas que aumentan la productividad sin dañar los ecosistemas, lo que ocurre en algunos ejemplos de la biotecnología, como el control biológico de plagas y las técnicas de **biorremediación**. El reto es encontrar la manera de integrar el conocimiento tecnológico y científico moderno con el conocimiento empírico tradicional, con la finalidad de crear tecnologías sostenibles orientadas a resolver las necesidades de la población sin dañar el ambiente.

Manejo productivo de la vida silvestre

En la actualidad se realizan esfuerzos para diversificar el uso de los ecosistemas. Cuando los dueños de la tierra extraen de manera racional algunas especies silvestres de los ecosistemas y reciben una retribución justa y competitiva por la venta de estos recursos, se logra el doble propósito de resolver una necesidad de ingreso económico para la gente y de conservar el ecosistema.

Un ejemplo de este enfoque lo tenemos en México con el establecimiento de un programa para la creación y operación de las denominadas Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA). Las UMA son espacios delimitados en el campo, de propiedad privada, ejidal o comunal, en donde se autoriza la extracción de especies animales y vegetales para su comercialización, siempre y cuando exista un programa de manejo aprobado por las autoridades ambientales. Este programa favorece la protección y conservación de los recursos bióticos, asegurando la continuidad de los procesos ecológicos y la conservación de los hábitats de los organismos. Se espera que a mediano plazo esta práctica reduzca la probabilidad de extinción de especies y que fomente la recuperación de aquellas que se encuentran en riesgo. Sin embargo, debemos reconocer que proyectos como las UMA no están exentos de problemas. En particular, aún se carece de un plan de acción que permita comercializar los productos extraídos de manera sostenible en los mercados regional y nacional.

Si bien la madera representa una alta proporción de los recursos vegetales que se extraen de los bosques, hay otro grupo de productos forestales, los **recursos no maderables**, que pueden ser un complemento sustancial de la economía de los campesinos. Algunos ejemplos notables de estos productos son las hojas de palma camedor o de las palmeras, la cera de candelilla y las fibras de lechuguilla en las zonas áridas o de pita en las selvas húmedas (figura 9.6). Es difícil impulsar economías basadas en estos productos, pues los precios que se pagan a los campesinos por ellos generalmente son muy bajos.

Algunos productos forestales no maderables han sido la base de industrias que producen cuantiosas ganancias. Un ejemplo muy conocido fue la extracción de la planta llamada barbasco de las zonas tropicales de México en la década de 1960, a partir de la cual comenzó la producción masiva de anticonceptivos hormonales. La falta de una reglamentación justa impidió que los beneficios derivados de estos recursos se distribuyeran equitativamente entre la población que habitaba en esas regiones. En la actualidad, el barbasco ya no se utiliza porque la industria farmacéutica sintetizó químicamente el principio activo de la planta y ya no se emplea la materia prima directamente extraída de la naturaleza.



Figura 9.6

La pita es una planta que crece en las selvas húmedas de México y de la que se obtiene fibra para la fabricación de diversos objetos y artesanías. Esta planta constituye un ejemplo de un producto forestal no maderable. La imagen muestra las plantas de pita en su ambiente natural. La fibra obtenida de las hojas se pone a secar antes de utilizarse.

Manejo forestal sostenible

Desde finales del siglo XX se agudizó la preocupación por hacer sostenible la extracción de madera de los ecosistemas forestales, tanto templados como tropicales. Esto se debe en gran medida a que se reconoce el valor de estos ecosistemas, más allá de la propia madera. Es decir, la sociedad también empieza a valorar los bosques y selvas por los servicios ambientales que proporcionan, los cuales hemos revisado en otras secciones: producción de agua, conservación del suelo fértil, purificación del aire, provisión de hábitats para las especies silvestres y de sitios de esparcimiento y recreo.

Este cambio de actitud se ha traducido en una reducción de la intensidad de la explotación maderera y ha modificado las prácticas de **manejo silvícola**, haciéndolas menos dañinas para el entorno. En México la tendencia comienza a dar resultados positivos, como lo demuestra la creación de algunos programas gubernamentales que promueven la organización y la participación de los productores campesinos y que ofrecen, entre otras cosas, una capacitación adecuada. De esta manera, se garantiza que haya programas de manejo forestal en los que se define cuánta madera se puede extraer, cuáles son los árboles que se autoriza cortar y qué acciones deben emprenderse para promover la regeneración del bosque. Se estima que en el país existen más de 900 comunidades y ejidos que realizan un manejo forestal sostenible.

Un factor clave del éxito del manejo forestal sostenible es el hecho de garantizar que las comunidades campesinas forestales, dueñas de los terrenos donde se ubican los bosques y selvas, obtengan mayores ganancias de las que recibirían si se talaran los bosques para establecer sistemas agropecuarios. Esto se logra creando las condiciones para que los productores forestales, además de vender madera en rollo, la trabajen y la transformen en productos con mayor valor de mercado, como muebles, mangos para herramientas, artesanías, vigas y tablones, entre otros (figura 9.7). Este aumento

en las ganancias de los productores reduce la cantidad de madera que deben extraer de los bosques para subsistir.

La extracción de manera sostenible puede certificarse a través de organizaciones nacionales e internacionales. Esta posibilidad permite que los productos así obtenidos tengan mejores opciones de llegar a los mercados internacionales. Se estima que más de 50 comunidades campesinas e indígenas en México han sido certificadas por hacer un manejo forestal sostenible en una superficie aproximada de 800,000 hectáreas. La certificación les ha permitido insertarse con éxito en los mercados, mejorando los ingresos de las comunidades y de las familias que se dedican a estas actividades, al mismo tiempo que conservan sus bosques y selvas. Entre estos ejemplos se pueden citar la comunidad de San Juan Nuevo, en Michoacán, y la del ejido Noh Bec, en Quintana Roo. En particu-



Figura 9.7

La elaboración de muebles y otros objetos permite a las comunidades humanas que viven de los ecosistemas forestales obtener un valor agregado por la madera que se extrae de sus bosques.

lar, la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, produce y vende muebles escolares certificados al gobierno de ese estado, mientras que la del ejido Pueblo Nuevo, Durango, realiza algunas ventas de madera certificada a una empresa transnacional de muebles.

Pesca sostenible

El aumento en la intensidad de la actividad pesquera en todo el mundo ha provocado la sobreexplotación de muchas especies comerciales y de regiones marinas completas. Ante esta situación han surgido alternativas de pesca sostenible, las cuales arrojan las mismas ganancias económicas que las técnicas no sostenibles.

Para que la pesca sostenible tenga éxito, no debe centrarse en una especie o en unas cuantas, sino que debe tomar en cuenta su impacto en el resto del ecosistema marino. Para ello, es necesario conocer el estado de las poblaciones y la biología de las especies que se explotan. Esto permite definir los límites de explotación, evitando consumir tales recursos hasta rebasar el límite más allá del cual su regeneración natural se ve imposibilitada. Asimismo, hace falta fomentar el uso de tecnologías más benignas con el ambiente y los seres vivos. Por ejemplo, anteriormente la pesca del atún en México ocasionaba la muerte de un gran número de delfines que quedaban atrapados en las redes. Las tecnologías cambiaron y en la actualidad la mortalidad de delfines es eventual y poco significativa en términos estadísticos. Sin embargo, esto no sucede en el caso de la pesca del camarón, ya que las redes de arrastre que todavía se usan para esta actividad son muy destructivas de las comunidades de algas y animales establecidas en el lecho marino. Como puedes imaginar, esto tiene graves consecuencias para las cadenas tróficas del ecosistema.

En México existen ordenamientos de algunas pesquerías, y en el año 2000 se elaboró y publicó en el *Diario Oficial de la Federación* la *Carta Nacional Pesquera*. En este documento se define el esfuerzo pesquero permisible y se proponen las mejores estrategias, tanto para el manejo y la conservación de cada recurso, como para el cuidado de los ecosistemas acuáticos.

A nivel internacional existen esfuerzos equivalentes. Uno de los más notables es el elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en el que se conmina a todos los países a que realicen una pesca con carácter sostenible (véase el capítulo 10).

Ecoturismo y otras formas no convencionales de turismo

A diferencia del turismo convencional, el ecoturismo y el turismo no convencional se centran principalmente en la contemplación y la comprensión de la naturaleza. En los últimos años este tipo de turismo ha crecido en forma muy dinámica e incluso llegó a superar la tasa de crecimiento del turismo convencional. El ecoturismo tiene como fundamento la conservación de la biodiversidad y los valores escénicos que ofrece la riqueza natural de los países. Por lo tanto, su impulso está fuertemente ligado al estado del ambiente en cada localidad, región y nación.

En ocasiones, las comunidades locales participan de los beneficios generados por el ecoturismo. Cuando es así, esta actividad mejora sus condiciones de vida. Esto es muy importante, ya que constituye un requisito esencial del ecoturismo: es precisamente esta mejoría lo que garantiza la protección del ambiente.

En realidad, hay una gran coincidencia entre los objetivos del ecoturismo y los de la conservación ambiental. Las dos actividades tienen en común que se basan en la existencia de áreas naturales protegidas, o en ecosistemas en buen estado de conservación, en el manejo de visitantes a estas áreas de acuerdo con su capacidad de carga, en la promoción de programas de educación ambiental dirigidos a las partes interesadas y en el fomento del conocimiento del área protegida y su biodiversidad (figura 9.2).

El proyecto de desarrollo turístico conocido como la Ruta Maya es un buen ejemplo de la coordinación internacional orientada en esta dirección. Este proyecto se lleva a cabo en Belice, Guatemala, El Salvador, Honduras y los estados mexicanos de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán. En su recorrido por esta región, el turista tiene acceso a una combinación inusitada de sitios arqueológicos y áreas naturales protegidas, además de contar con una creciente infraestructura hotelera

de bajo impacto, cada vez más benigna con el ambiente. Por desgracia, una porción considerable de estos territorios se han transformado en sistemas agropecuarios y sus espacios naturales conservados se restringen casi exclusivamente a las áreas naturales protegidas. En la medida en que el ecoturismo se fortalezca en estas zonas y sus habitantes encuentren en esta actividad una alternativa económica efectiva que mejore sus ingresos y sus condiciones de vida, podemos esperar que se frene la deforestación de la región.

Manejo integral del agua

La escasez creciente de agua puede llegar a causar problemas sociales y conflictos internacionales que hoy debemos prevenir. Esto todavía es posible si garantizamos una planeación adecuada de su uso. Para ello, las políticas nacionales de manejo sostenible del agua deben incluir algunas de las siguientes acciones: 1) Fomentar una cultura social del agua, para valorarla y entender su importancia y los riesgos de su uso inadecuado; 2) definir políticas claras y de largo plazo que garanticen el interés público en el uso del agua y que aseguren la conservación de los ecosistemas naturales; 3) adecuar las leyes y fortalecer las instituciones que administran el agua, garantizando la participación de la sociedad; 4) crear tecnologías apropiadas para las condiciones de cada país y región; 5) cambiar las formas de producción para disminuir el consumo de agua y eliminar la liberación de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua; 6) cuidar los procesos naturales que permiten reponer los recursos hídricos; y 7) invertir suficientes recursos financieros para apoyar todas estas acciones.

Protección y recuperación del suelo

En nuestra revisión del estado de conservación y deterioro del suelo se demuestra que tenemos un problema grave y complejo (véase la sección 8.2). Por ello, es urgente que fijemos políticas encaminadas a evitar la pérdida del suelo y para revertir su deterioro. Algunas acciones que se pueden llevar a cabo son las siguientes: 1) Crear tecnologías y fomentar actividades productivas sostenibles que eviten el depósito de desechos y contaminantes; 2) planear el uso del suelo de acuerdo con sus aptitudes naturales, evaluando continuamente el estado de este recurso; 3) elaborar leyes adecuadas para el manejo de este recurso; y 4) restaurar los componentes bióticos, físicos y químicos de los suelos con bases científicas, para devolverles su productividad, su diversidad y sus funciones ecosistémicas.

8.3.3

Uso de tecnologías amigables

En general, las prácticas productivas convencionales de la agricultura y la ganadería implican el cambio de uso de suelo de los ecosistemas originales, al pasar de un uso de sistema natural a uno de explotación agrícola y ganadera. Esta deforestación provoca la pérdida de los hábitats de la flora y la fauna, la erosión del suelo y la alteración del ciclo hidrológico. Asimismo, el uso del fuego con fines agropecuarios suele generar incendios forestales, mientras que el alto consumo de agroquímicos produce la contaminación del suelo y del agua (véase el capítulo 8). En las últimas décadas se han impulsado otros sistemas productivos más amigables con el medio ambiente, conocidos como **ecotecnias** o **ecotécnicas**, entre las que se encuentran la agroecología y los sistemas silvopastoriles.

Agricultura sostenible o agroecología

Si bien por lo general la agricultura es una actividad productiva que implica la remoción de la cobertura vegetal natural, vale la pena mencionar que la agricultura sostenible es una opción menos dañina para el ambiente que la agricultura intensiva, la cual depende del uso de **agroquímicos** y de maquinaria pesada. Para que la agricultura sea sostenible hay que manejar adecuadamente el suelo, el agua y las especies que se cultivan, de manera que la capacidad productiva del **agrosistema** no se agote.

Algunas personas sostienen la opinión de que la base de la agricultura sostenible se encuentra en el conocimiento tradicional indígena. El argumento es que, mediante diferentes técnicas de producción, los indígenas mantuvieron durante muchos años la productividad de las parcelas, sobre todo cuando la densidad de la población humana era baja (véase el recuadro 9.2, “Tecnología tradicional y tecnología moderna”). Como ejemplos citemos las parcelas de cultivo múltiple —o policultivos— que aún encontramos entre los chinantecos del trópico húmedo de Oaxaca o los lacandones de Chiapas. Estos grupos cultivan varias especies en una parcela y obtienen diversos productos a lo largo del año. Además, intercalan el maíz con el frijol, que es una especie que favorece la fijación de nitrógeno atmosférico de manera natural, enriqueciendo el suelo. Asimismo, usan semillas de variedades seleccionadas a lo largo de décadas que son resistentes a las condiciones locales. Además, algunos campesinos no queman el suelo, sino que lo preparan a mano para cultivarlo y dejan descomponer los restos vegetales para que sus nutrientes se reincorporen al suelo, de forma que pueden prescindir de fertilizantes.

Estas prácticas tradicionales han sobrevivido en diferentes partes del mundo durante siglos. Sin embargo, las políticas de producción agrícola masiva promovidas por los gobiernos de muchos países, sobre todo a partir de la década de 1970, las han desplazado a favor de cultivos dependientes de agroquímicos, semilla mejorada y maquinaria pesada. En el corto plazo esto incrementó el rendimiento agrícola, pero también se ha demostrado que estas tecnologías modernas no son sostenibles a largo plazo, ya que contaminan los suelos y el agua, producen erosión y agotan los nutrientes, y muchas veces obligan a los campesinos a abandonar las parcelas en un estado de gran deterioro.

La combinación de tecnologías tradicionales y modernas constituye una alternativa agrícola sostenible, conocida como **agroecología**. En Latinoamérica hay ejemplos de esta integración, como las **plantaciones orgánicas** de café, de plátano y de vainilla, en las que no se usan agroquímicos y donde se conservan algunos árboles nativos del ecosistema original. En los últimos años han surgido mercados importantes para estos productos orgánicos, lo cual representa un fuerte estímulo para los productores.

A pesar de las obvias ventajas ambientales de la agroecología, esta alternativa productiva todavía no forma parte de las políticas de desarrollo rural impulsadas por los gobiernos, por lo que sus alcances aún son limitados.

México se ubica entre los 15 mayores productores de alimentos derivados de la agricultura orgánica, práctica que llevan a cabo campesinos que cultivan dos hectáreas en promedio. Los estados de Oaxaca y Chiapas concentran 70% de la superficie de cultivos orgánicos del país. El mercado nacional aún es muy reducido, pero tiene un gran potencial de crecimiento, sobre todo en la medida en que los consumidores vayan siendo cada vez más exigentes de productos de mejor calidad, amigables con el medio ambiente y con la gran ventaja de ser completamente saludables.

Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son los que mantienen una mezcla de cultivos perennes (árboles o arbustos) junto con pastos forrajeros de buena calidad que no requieren de fuego para rebrotar e incrementar su productividad. En este caso, los cultivos perennes sirven tanto de forraje para los animales, como

de cercas vivas para delimitar los predios de cada propietario. Estos sistemas son una alternativa a la ganadería extensiva de alto impacto ambiental y de baja productividad. Sólo se han probado con fines experimentales, ya que los programas gubernamentales aún no los incorporan, a pesar de que son más productivos y más amigables con el medio ambiente al utilizar menos espacio. Por desgracia, el mercado para los productos derivados de la ganadería sostenible aún es incipiente, pero esta actividad resulta muy prometedora para el futuro.

Acuicultura

La acuicultura consiste en la crianza de organismos acuáticos (peces, almejas, acamayas, entre otros) en cuerpos de agua naturales o artificiales (figura 9.8). Tanto la acuicultura comercial como la de autoconsumo constituyen alternativas muy prometedoras para la producción de alimentos, ya que además generan empleos y promueven el desarrollo regional. Sin embargo, esta actividad necesita organizarse para evitar los conflictos ocasionados por la competencia por el uso de agua y suelo con las actividades agrícolas de cada región. Asimismo, es necesario utilizar tecnologías que eviten el uso excesivo de alimento balanceado para los peces, ya que esto eleva de manera



Figura 9.8

La acuicultura es una de las actividades productivas que, cuando se practica de manera sostenible, contribuye a satisfacer la necesidad de producir alimentos reduciendo los daños al ambiente.

perjudicial la concentración de nutrientes en el agua, lo que afecta al resto de las cadenas alimentarias. Además, es importante poner en práctica medidas preventivas, de manera que el establecimiento de granjas acuícolas en zonas costeras no afecte los ecosistemas marinos.

Fuentes alternativas de energía

Existe una fuerte problemática asociada con el tipo de combustibles que se usan actualmente. El uso de combustibles fósiles en la industria, el transporte, los servicios y los hogares acarrea problemas de contaminación y calentamiento global. Además, existe la certeza de que este recurso no renovable se agotará en algún momento del presente siglo.

Otra forma de energía que causa efectos muy dañinos a los ecosistemas y a los seres humanos es la energía nuclear, ya que no existen garantías para usarla de manera segura y porque sus residuos, que son muy peligrosos, permanecen activos en sus lugares de confinamiento durante siglos, lo que constituye un serio peligro para las generaciones futuras.

La construcción de presas para generar energía hidroeléctrica, las cuales aprovechan la energía cinética del agua al moverse hacia tierras bajas, provoca la fragmentación de los ecosistemas dulceacuícolas y afecta profundamente a las comunidades de organismos que viven en ese tipo de ambientes.

Ante este escenario, se está fomentando en muchos países el uso de fuentes alternativas de energía que sean menos contaminantes, que no fragmenten los ecosistemas y que minimicen la generación de residuos peligrosos, como es el caso de la energía eólica, la energía solar y la energía biomásica.

La energía eólica es aquella que genera el viento. Las masas de aire poseen una carga importante de energía cinética, cuya potencia a nivel mundial suma 10^{11} gigavatios (GW). En el año 2004 se registró una producción mundial de 47.6 GW (= 47.6 gigajulios por segundo) y la cantidad de energía de este

tipo aumenta cada año, aunque sólo representa una fracción minúscula (0.3%) de la energía que se genera. Los países europeos generan casi tres cuartas partes (73%) de este tipo de energía, mientras que en México su producción se inició recientemente (figura 9.9). Esta tecnología tiene la ventaja de que no genera contaminación química ni térmica: se calcula que 1 kilovatio de electricidad (esto es, 1 kilojulio por segundo) de energía eólica evita la liberación a la atmósfera de 600 g de CO₂, 1.3 g de dióxido de azufre y 1.7 g de óxidos de nitrógeno. Sin embargo, esta tecnología no está exenta de desventajas; en primer lugar, altera profundamente el aspecto del paisaje, afectando la estética de un lugar; además, produce contaminación sonora y, lo que es más preocupante, causa la muerte de muchas aves que chocan con las palas.

La energía solar, por su parte, constituye la primera gran fuente de energía sobre la Tierra: el carbón, la madera, el petróleo, el viento y la energía potencial del agua en las montañas tienen su origen en la energía solar. En particular, el carbón, la madera y el petróleo existen gracias a la fotosíntesis vegetal; el viento se genera por las diferencias de temperatura del aire ocasionadas por su calentamiento diferencial, y el agua que baja de las montañas por los ríos llegó a la parte alta en forma de vapor por acción de los rayos solares. La radiación solar que recibe la Tierra es del orden de 7×10^{11} kilovatios por hora (equivalente a 2.5×10^{14} kilojulios), lo que corresponde a recibir de 80 a 300 vatios por cada metro cuadrado, dependiendo de la hora del día y las condiciones meteorológicas. La energía solar se usa para calentar viviendas y agua, extraer sal del mar, destilar el agua, cocer alimentos y generar energía eléctrica. La destilación del agua se lleva a cabo en aparatos denominados alambiques o destiladores solares. La generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante tecnologías de conversión fotovoltaica, las cuales consisten en el uso de semiconductores. Una celda solar es un ejemplo de un dispositivo semiconductor que permite la transformación de energía solar en energía eléctrica (figura 9.10). Las ventajas del sistema fotovoltaico es que no



Figura 9.9

La energía eólica constituye una fuente alternativa que no libera contaminantes químicos, aunque afecta la estética del paisaje y genera ruido. En la fotografía se observan generadores eólicos de tres palas en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, en el corazón de la ruta migratoria de aves más importante entre América del Norte y América del Sur.

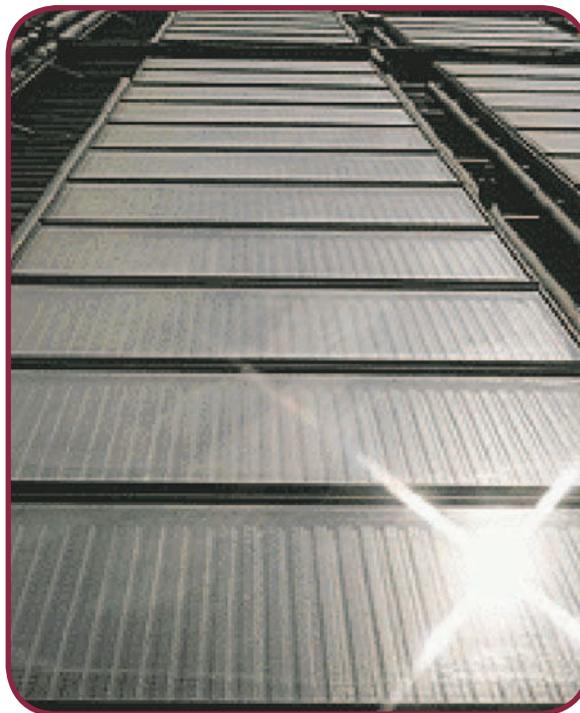


Figura 9.10

Las tecnologías de uso de la energía solar no producen contaminantes químicos ni físicos. En la fotografía se observa un sistema de celdas solares.

produce residuos ni consume combustibles y, como no hay movimiento mecánico, tampoco hay desgaste, lo que garantiza una larga duración con un mantenimiento mínimo. La principal desventaja que tiene es que la incidencia de luz solar no es continua, así que se requiere de un acumulador eléctrico. Por otro lado, el precio de este tipo de tecnología es muy elevado actualmente.

La energía biomásica es la que proviene de los materiales que componen y desechan los seres vivos, como tallos, troncos, hojas, plumas, pelo, huesos, heces, etcétera. Esta energía es muy ventajosa por ser renovable, relativamente barata y susceptible de almacenarse. Desde el descubrimiento del fuego y hasta nuestros días se usa la biomasa como fuente de energía, ya sea en forma de leña, carbón vegetal y, en ocasiones, heces secas de ganado. Se calcula que 44.5% de la energía utilizada por los países en vía de desarrollo es de origen biomásico y que a nivel mundial este tipo de energía aporta 14% del total consumido. La biomasa puede convertirse en energía a través de distintos procesos de naturaleza bioquímica y termoquímica, los cuales incluyen combustión directa, fermentación, licuefacción, gasificación e hidrólisis enzimática; a partir de estos procesos se puede obtener como combustible secundario carbón vegetal, gas, metanol, etanol o ácidos orgánicos. En contraste, en el caso de la combustión directa no se obtiene otro tipo de combustible, ya que la biomasa seca es el combustible *per se* (cuadro 9.2).

Cuadro 9.2 Fuentes de energía biomásica y procesos de conversión de este tipo de energía a otros combustibles.

Fuente de energía biomásica	Proceso de conversión	Tipo de combustible
Madera	Pirólisis	Carbón vegetal
	Gasificación	Gas
	Licuefacción	Metanol
	Combustión directa	No hay
Residuos orgánicos sólidos (heces, desechos de comida, huesos, plumas, cadáveres de animales)	Digestión anaérobica	Biogás
	Pirólisis	Biogás y ácidos orgánicos
	Combustión directa	No hay
Cultivos sacaroides (caña de azúcar, su bagazo y frutos)	Fermentación alcohólica	Etanol
Cultivos amiláceos (papa y granos)	Hidrólisis enzimática	Etanol
	Fermentación alcohólica	Etanol
Cultivos celulósicos y similares (forraje, hojarasca y ramas)	Hidrólisis enzimática	Etanol
Algas	Combustión directa	No hay

No existe una tecnología general y única que pueda emplearse para todos los productos biomásicos. Por ejemplo, la fermentación anaerobia se lleva a cabo en reactores digestores anaerobios, también conocidos como **biodigestores**. Para la combustión directa se dispone de cocinas, estufas y calderas que usan leña, paja y residuos vegetales urbanos. Finalmente, para llevar a cabo los procesos de gasi-

ficación y pirólisis se usan los **gasificadores** que emplean madera, hojas, residuos agrícolas y carbón vegetal, entre otros insumos.

9.3.4 Restauración ecológica

La restauración ecológica o restauración ambiental consiste en una serie de acciones encaminadas a la recuperación parcial o total de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas que se han alterado, casi siempre como resultado de las actividades humanas. En décadas recientes se ha impulsado la búsqueda de métodos de restauración, entre los que destaca la **reforestación**. Muchas veces la reforestación no incorpora el conocimiento científico ni tiene una visión de recuperación del funcionamiento original del ecosistema. Por ello, tanto en México como en otros países se han utilizado erróneamente **especies exóticas** para este fin. Como estas especies no están adaptadas a las condiciones locales, la reforestación tiene poco éxito o, cuando lo tiene, las consecuencias sobre la diversidad nativa llegan a ser graves.

Sin embargo, cada vez encontramos más programas de reforestación basados en el conocimiento científico, el uso de **especies nativas** y muchas veces con la participación de los habitantes locales. La única desventaja es que es indispensable contar con la capacidad y la tecnología para manejar un gran número de especies nativas.

En México se reforestan anualmente alrededor de 100,000 hectáreas por medio de la siembra de unos 200 millones de árboles. Para ello se cuenta con viveros manejados por instituciones federales, estatales, municipales y comunitarias, así como con **bancos de germoplasma**, los cuales son lugares donde se almacenan semillas de las especies nativas de cada región.

9.3.5 Reducción y supresión de contaminantes

En la actualidad, los gobiernos de prácticamente todos los países del mundo, junto con la sociedad en general, se preocupan cada vez más por encontrar soluciones al problema de la contaminación. Sin embargo, ésta no es tarea sencilla. En primer lugar, la velocidad a la que un ecosistema se recupera del deterioro ocasionado por los contaminantes varía de acuerdo con el tipo y la cantidad del contaminante. Por ejemplo, la contaminación atmosférica podría reducirse considerablemente en el corto plazo si pudiéramos disminuir la emisión de contaminantes. En contraste, las sustancias radiactivas y los plaguicidas permanecen en el ambiente durante mucho tiempo, lo que hace que se acumulen en el suelo y el agua. Los contaminantes del suelo que generan mayor preocupación son los metales pesados, que son prácticamente indestructibles.

Como se aprecia, el efecto negativo de los contaminantes depende de la velocidad con la que se emiten y, además, del tiempo que permanecen en el ambiente. Por ello, para controlar los efectos de la contaminación es necesario atacar ambos procesos de forma simultánea, reducir la tasa de emisión de contaminantes y evitar al máximo la producción de contaminantes de larga duración. Con respecto a esto último, también es necesario reutilizar y reciclar los productos que así lo permitan, para poder disminuir su producción y acumulación en el ambiente. En este contexto, se reconoce que hay tres medidas fundamentales de control de la contaminación, a las que nos podemos referir de manera coloquial como la **regla de las tres erres**: reducir, reutilizar y reciclar.

Reducir se refiere a disminuir al máximo la emisión de contaminantes, incluso suprimir por completo el uso de ciertas sustancias. Por ejemplo, los CFC ya no se utilizan para elaborar productos en aerosol y sólo se emplean de forma muy limitada en otras industrias; esta acción permitió disminuir sus efectos negativos sobre la capa de ozono. Entre los plaguicidas, el uso del DDT está prohibido en muchos países y en su lugar se utilizan insecticidas menos contaminantes. Por otro lado, desde hace más de 20 años se ha estado trabajando en la industria petroquímica para lograr reducir el contenido de plomo en las gasolinas. En México se cuenta con las gasolinas Magna-Sin y Premium desde de la década de 1990; de esta manera, se logró reducir notablemente el nivel de contaminación por plomo.

Reutilizar se refiere a volver a aprovechar las cosas que se mantienen en buen estado después de su uso inicial, sin necesidad de modificarlas o procesarlas. Tal es el caso, por ejemplo, de los envases de vidrio y de plástico, de partes de automóviles, aparatos electrodomésticos y computadoras, de los muebles y algunos materiales de construcción, entre otros. En muchas sociedades existe una cultura de reutilización más o menos desarrollada, pero en otras, las personas desechan cotidianamente materiales que se encuentran aún en buen estado y que podrían aprovechar por más tiempo.

Por último, *reciclar* se refiere al proceso de reincorporación de los materiales de desecho en la fabricación de nuevos productos. Por ejemplo, los envases de vidrio se pueden reciclar industrialmente para producir platos, vasos, ventanas, artesanías y un sinnúmero de objetos. Otros materiales que se pueden reciclar son los metales, la madera y muchos plásticos (figura 9.11). De las tres *erres*, la que resulta más económica es la reducción, mientras que el reciclaje representa la alternativa más costosa.

La solución al problema de la contaminación depende de todos los integrantes de las sociedades humanas: gobernantes, científicos, maestros, industriales, productores agrícolas y ganaderos y, a fin de cuentas, de cada uno de nosotros. De los *gobiernos* depende elaborar leyes ambientales que restrinjan el uso de cierto tipo de sustancias, vigilar su aplicación y motivar a la sociedad a que reutilice y recicle materiales. A los *científicos* les corresponde investigar nuevos materiales y desarrollar procesos industriales no contaminantes, así como proponer alternativas al uso de fertilizantes y pesticidas para



Figura 9.11 Ejemplos de productos elaborados con plástico reciclado.

la producción agrícola y ganadera. Los *maestros* tienen la responsabilidad de educar y crear conciencia entre los estudiantes sobre el problema de la contaminación. Los *industriales*, así como los *productores agrícolas y ganaderos*, deben observar la legislación ambiental para reducir al máximo la emisión de contaminantes al ambiente, haciendo su trabajo de manera responsable. Nosotros, como miembros de la sociedad, podemos cambiar nuestros hábitos de vida de muchas formas: usar productos poco contaminantes, reutilizar o reciclar los productos que desechamos, disminuir el consumo de energía y reducir nuestras compras al mínimo necesario para evitar la generación de desperdicios.



Para reflexionar...

1. En la actualidad se habla mucho en los medios de comunicación masiva del desarrollo sostenible. ¿Crees que ésta es una meta alcanzable? ¿Crees que este concepto nos pone en la ruta adecuada para mejorar nuestra interacción con la naturaleza?
2. Muchas áreas naturales protegidas en nuestro país han funcionado mal y no han logrado su objetivo de conservar la diversidad biológica. ¿Qué acciones crees que habría que poner en práctica para cambiar esta situación?
3. ¿Cuál es la función de las áreas verdes urbanas (prados, parques, camellones, etcétera) en la conservación de la biodiversidad?
4. Supongamos que vas a hacer un viaje en tus próximas vacaciones. ¿Qué tomarías en cuenta para elegir entre un viaje de ecoturismo y uno de turismo convencional?
5. ¿Qué elementos de la sociedad deben participar para hacer posible el desarrollo sostenible? ¿Qué pasa si alguno no cumple con su parte?
6. ¿La energía biomásica es “limpia”?



Actividades complementarias

1. Investiga cuál es el área natural protegida más cercana al lugar donde vives. Elabora una lista de sus características principales (tipo de área protegida, extensión, fecha de decreto, tipos de vegetación, valor para la conservación de la biodiversidad y si existen posibilidades de visitarla).
2. Investiga qué empresas venden tecnología para aprovechar la energía solar y cuáles son sus costos.
3. Investiga en qué regiones del país existen comunidades que ofrezcan actividades ecoturísticas y compara sus precios con ofertas de turismo convencional publicadas en medios de comunicación.
4. Investiga cuáles son los países que están a la vanguardia en el desarrollo de la energía eólica y cuál es la reacción de sus habitantes ante esta alternativa energética.
5. Investiga cuántas personas entre tus amigos y familiares tiran a la basura objetos que podrían reciclarse. Haz una lista de estos productos y ofrece tres argumentos para convencerlos de que deben reciclar más objetos.

● CAPÍTULO 10 ●

Respuestas y soluciones institucionales al problema del deterioro ambiental

10.1 Para la imaginación

Qwerty tenía muy clara su misión: el Supremo Consejo Sideral le había encargado elaborar un informe completo sobre lo que estaban haciendo los habitantes del planeta Azul para mitigar los cambios físicos, químicos y biológicos que los miembros del Consejo habían detectado por espectrofotometría celeste desde su galaxia (figura 10.1). No era la primera vez que le encargaban un informe de ese tipo; ya le habían encomendado misiones similares para reconocer las acciones que habían emprendido los habitantes de Avles, Laroc y Anabas para revertir los peligrosos cambios en la estructura planetaria, producto del crecimiento poblacional desproporcionado de sus especies dominantes. Qwerty informó con beneplácito cómo los habitantes de Avles y Laroc habían logrado tener éxito en revertir los cambios, pero se estremeció al recordar lo que había pasado con Anabas: los cambios físico-químicos atmosféricos condujeron a la extinción a 80% de sus especies, incluida la famosa especie dominante causante de la catástrofe.

Después de conectarse a 50 satélites del planeta Azul e infiltrarse en la World Wide Web, Qwerty logró obtener información importante. Ese aún bello planeta está dividido en tribus de la especie dominante, y muchas de esas tribus tienen costumbres y lenguas diferentes, lo que dificulta la toma de decisiones. Sin embargo, encontró evidencias de cómo comenzaban a ponerse de acuerdo para revertir poco a poco el problema que ellos mismos habían detectado con el descenso en la concentración de ozono en uno de sus polos, y tomó nota de los esfuerzos para reducir la emisión de los peligrosos



Figura 10.1 El planeta Azul, tal como lo vio Qwerty.

gases de efecto invernadero que calentaban su atmósfera y que fueron la causa de la catástrofe de Anabas.

Qwerty regresó tranquilo. Los habitantes del planeta Azul hacían esfuerzos modestos pero firmes. El Supremo Consejo Sideral probablemente vería con agrado que una significativa proporción de las maravillosas especies de ese planeta podría subsistir. Súbitamente, Qwerty se estremeció imaginando los arrecifes de coral, los paisajes nevados, las selvas, un gorila, una mariposa, un tucán y una ballena azul... ¿Y si no lo logran?

10.2 El contexto mundial

Como vimos en capítulos anteriores, estamos atestiguando un deterioro generalizado de la naturaleza, la escasez de agua, alimentos y materias primas, la afectación de la salud de la población y un aumento en la incidencia de desastres naturales. Estos fenómenos han incrementado la preocupación por los problemas ambientales en todos los países del mundo. Muchos de estos problemas no pueden resolverse dentro del ámbito de competencia de un solo país, sino que es indispensable la acción conjunta de todas las naciones para que, mediante acuerdos multilaterales, se puedan encontrar soluciones para revertir los problemas. De la misma manera en la que el cuidado de una casa depende de toda la familia, el cuidado del planeta depende de todos los países. Para que esto sea posible, debe existir un organismo internacional que permita llegar a acuerdos entre los países; para ello contamos con la Organización de las Naciones Unidas (ONU). (Véase la figura 10.2 y el recuadro 10.1, “El papel de la Organización de las Naciones Unidas en los acuerdos multilaterales sobre medio ambiente y recursos naturales”).

10.2.1 Conferencia de Estocolmo

Como se comentó en el capítulo 9, el primer esfuerzo multilateral en materia ambiental se remonta a la *Conferencia sobre Medio Ambiente Humano* convocada por la ONU, la cual tuvo lugar en Estocolmo en 1972; de ahí que se le conozca comúnmente como *Conferencia de Estocolmo*. El principal objetivo de este encuentro internacional fue analizar los efectos de las actividades industriales sobre la salud humana. Un resultado notable de esa reunión fue la formulación de recomendaciones que tendrían que seguirse en todo el mundo, con la finalidad de promover la creación de instituciones y la formulación de leyes que enfrentaran el tema ambiental en todos los países. Fue así como nació el *Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente* (PNUMA), organiza-

Recuadro 10.1

El papel de la Organización de las Naciones Unidas en los acuerdos multilaterales sobre medio ambiente y recursos naturales

Durante décadas, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha promovido la cooperación internacional para enfrentar de manera colectiva y organizada los problemas ambientales mundiales. En muchas ocasiones esta cooperación se ha logrado mediante acuerdos formales entre los países participantes, dando lugar a un marco jurídico internacional. Los acuerdos se concretan con reuniones que se organizan entre los representantes de cada país. Así se llega a **convenios** o **convenciones**, de los cuales se desprenden protocolos sobre temas específicos.

Un convenio o convención es un acuerdo multilateral formal que suscriben muchos países, a los que se llama **partes** o **participantes**. Estos acuerdos tardan muchos meses y aun años en negociarse. Cuando las partes se ponen de acuerdo, se lleva a cabo una reunión formal en la que los representantes oficiales de los países firman el texto del acuerdo negociado. Por lo general, estos representantes son los cancilleres o los ministros del área respectiva (en el caso de México y de temas ambientales, el secretario de Relaciones Exteriores o el secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Cuando los jefes de Estado (como presidentes o primeros ministros) asisten a tales reuniones, a éstas se les llama **cumbres**.

Al firmar un acuerdo, cada país expresa su voluntad de dar los pasos concretos marcados en su constitución política para ratificar el convenio y que éste se convierta en legalmente **vinculante**, es decir, obligatorio, a nivel nacional. En el caso de algunos países, basta con que firmen y ratifiquen el convenio para que éste adquiera el rango de ley nacional e internacional. En otras naciones, aun cuando se haya ratificado el convenio en el plano internacional, no entra en vigor sino hasta que se expida una ley nacional que adopte los acuerdos y compromisos del convenio. El convenio o convención entra en vigor de manera definitiva a nivel internacional cuando cierto número o porcentaje de los países lo ratifican, o bien, a partir de una fecha definida.

De los convenios o convenciones se desprenden instrumentos más específicos conocidos como **protocolos**, en los que se definen compromisos puntuales acompañados de metas y fechas de cumplimiento. Estos protocolos dan más formalidad y precisión a ciertos aspectos de las convenciones y permiten acelerar el cumplimiento de los objetivos. El seguimiento de los acuerdos de los convenios o convenciones se realiza en reuniones de las partes conocidas como **conferencias de las partes**.



Figura 10.2 Sede de la Organización de las Naciones Unidas en Nueva York.



ción encargada hasta la fecha de los temas ambientales en el mundo entero. La creación del PNUMA, la evidencia científica acumulada que demostraba el deterioro de los ecosistemas y la creciente conciencia ambiental ciudadana indujeron a muchos países a adecuar sus leyes y crear instituciones que fijaran políticas y estrategias encaminadas a frenar y revertir el deterioro ambiental (figura 10.3).

Figura 10.3

Un resultado muy importante de la Conferencia de Estocolmo fue la creación del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, cuyo logotipo se aprecia en el fondo.

10.2.2 Protocolo de Montreal

Posteriormente, ante el reconocimiento internacional del enorme problema que representaba el agujero en la capa de ozono, se convocó a los países a la llamada *Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono* en 1985. Con base en los artículos 2 y 8 de esa convención, se firmó en 1987 uno de los primeros acuerdos internacionales en materia ambiental, conocido como *Protocolo de Montreal*. En ese documento se establecieron compromisos sobre el control de las sustancias que adelgazan la capa de ozono. El tratado estableció medidas jurídicas de carácter obligatorio para la reducción del uso de **compuestos clorofluorocarbonados** (CFC), que son las

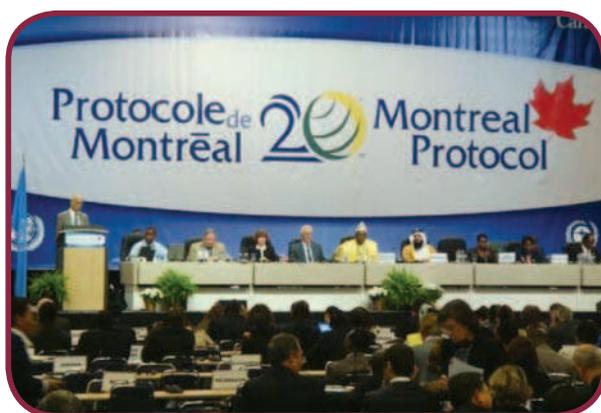


Figura 10.4

El Protocolo de Montreal ha tenido un efecto muy positivo para la protección de la capa de ozono en nuestro planeta.

sustancias que dañan la capa de ozono. Un aspecto notable del Protocolo de Montreal es que en él quedaron establecidas metas y fechas de cumplimiento. Además, se generaron apoyos económicos para que los países en vías de desarrollo pudieran cumplirlas. México fue uno de los primeros países en firmar este tratado y cumplió la meta antes de tiempo. En general, se considera que este protocolo ha sido muy exitoso, pues los resultados ya comienzan a hacerse evidentes: la capa de ozono empieza a cicatrizar y es muy probable que en algunas décadas el problema se revierta. Esta historia constituye un ejemplo muy alentador de que los acuerdos multilaterales sí son útiles para resolver los problemas ambientales del planeta.

10.2.3 Conferencia de Río

Veinte años después de la Cumbre de Estocolmo, la ONU volvió a congregarse a la comunidad de países para evaluar los avances logrados desde 1972. Fue así que en 1992 tuvo lugar en Río de Janeiro la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo*, conocida también como *Cumbre de la Tierra* o *Conferencia de Río*. Esta reunión tuvo una enorme trascendencia en el contexto ambiental del planeta, pues de ella surgieron seis acuerdos de gran relevancia, ya que impulsaron muchos temas ambientales vinculados con el desarrollo. Estos acuerdos son: 1) la Declaración de Principios; 2) la Convención sobre la Diversidad Biológica; 3) la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; 4) la Declaración de los Bosques; 5) la Agenda XXI; y 6) la Carta de la Tierra.

La Declaración de Principios, la Agenda XXI y la Carta de la Tierra son documentos no **vinculantes**, es decir, no obligatorios para su cumplimiento, y por lo tanto se limitan a ofrecer orientaciones de cómo encaminarse hacia el desarrollo sostenible.

A continuación revisaremos las características generales de los principales acuerdos multilaterales derivados de esa Cumbre.



Figura 10.5

La Cumbre de Río marcó un hito en las relaciones de los seres humanos con el ambiente.

Agenda XXI

Este documento reviste particular importancia, pues constituye un programa de acciones muy amplio en todos los aspectos ambientales, sociales y económicos relacionados con el desarrollo sostenible.

Carta de la Tierra

Este documento plantea 16 principios generales sobre el medio natural y el desarrollo, y en él se refrenda y adopta el concepto de **desarrollo sostenible** (véase el recuadro 10.2, “Principios de la Carta de la Tierra”).

Convención sobre la Diversidad Biológica

Para enfrentar la pérdida de la biodiversidad, 153 países —con la oposición de Estados Unidos— firmaron en la Cumbre de la Tierra la Convención de Diversidad Biológica. Ésta plantea tres objetivos fundamentales: 1) conservar la diversidad nativa *in situ*, es decir, en su hábitat natural; 2) manejar de forma sostenible los múltiples componentes de la biodiversidad; y 3) compartir los beneficios de usar los recursos genéticos de manera justa y equitativa.

El seguimiento de estos acuerdos se ha hecho a través de las conferencias de las **partes**, es decir, las reuniones de los países firmantes, en las que se han adoptado programas de acción y metodologías comunes. Como una derivación de este trabajo, en 2003 se firmó el *Protocolo de Bioseguridad de Cartagena*.

Recuadro 10.2

Principios de la Carta de la Tierra

I. RESPETO Y CUIDADO DE LA COMUNIDAD DE VIDA

1. Respetar la Tierra y la vida en toda su diversidad.
2. Cuidar la comunidad de vida con entendimiento, compasión y amor.
3. Construir sociedades democráticas que sean justas, participativas, sostenibles y pacíficas.
4. Asegurar que los frutos y la belleza de la Tierra se preserven para las generaciones presentes y futuras.

II. INTEGRIDAD ECOLÓGICA

5. Proteger y restaurar la integridad de los sistemas ecológicos de la Tierra, con especial preocupación por la diversidad biológica y los procesos naturales que sustentan la vida.
6. Evitar dañar, como el mejor método de protección ambiental, y cuando el conocimiento sea limitado, proceder con precaución.
7. Adoptar patrones de producción, consumo y reproducción que salvaguarden las capacidades regenerativas de la Tierra, los derechos humanos y el bienestar comunitario.
8. Impulsar el estudio de la sostenibilidad ecológica y promover el intercambio abierto y la extensa aplicación del conocimiento adquirido.

III. JUSTICIA SOCIAL Y ECONÓMICA

9. Erradicar la pobreza como un imperativo ético, social y ambiental.
10. Asegurar que las actividades e instituciones económicas, a todo nivel, promuevan el desarrollo humano de forma equitativa y sostenible.
11. Afirmar la igualdad y equidad de género como prerequisites para el desarrollo sostenible y asegurar el acceso universal a la educación, el cuidado de la salud y la oportunidad económica.
12. Defender el derecho de todos, sin discriminación, a un entorno natural y social que apoye la dignidad humana, la salud física y el bienestar espiritual, con especial atención a los derechos de los pueblos indígenas y las minorías.

IV. DEMOCRACIA, NO VIOLENCIA Y PAZ

13. Fortalecer las instituciones democráticas en todos los niveles y brindar transparencia y rendimiento de cuentas en la gobernabilidad, participación inclusiva en la toma de decisiones y acceso a la justicia.
14. Integrar en la educación formal y en el aprendizaje a lo largo de la vida, las habilidades, el conocimiento y los valores necesarios para un modo de vida sostenible.
15. Tratar a todos los seres vivos con respeto y consideración.
16. Promover una cultura de tolerancia, no violencia y paz.

A pesar de todos estos logros, es lamentable el hecho de que esta convención carezca de metas específicas acompañadas de calendarios de cumplimiento. Por ello, no se ha podido avanzar en la

solución de este problema ambiental a la velocidad requerida. En consecuencia, el proceso de pérdida de especies continúa a una tasa preocupante.

Otros acuerdos multilaterales de gran importancia para la protección de la biodiversidad y relacionados con esta conferencia son la *Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres* (CITES), la *Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres* y la *Convención de Humedales*.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Esta convención desempeña un papel muy importante en la búsqueda de soluciones ante los problemas inminentes asociados con el cambio climático a nivel del planeta (véase el capítulo 8). Esta convención también contó con la oposición de Estados Unidos, que es una de las naciones que más ha contribuido a la generación de este problema. El objetivo principal de la convención es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera.

En 1997 se negoció en la tercera conferencia de las partes el *Protocolo de Kioto*, con la finalidad de definir metas muy específicas que los países deben cumplir para no agravar más este problema (figura 10.6). Entre ellas, la más importante es que los países desarrollados, inscritos en una lista conocida como Anexo I (véase el cuadro 10.1), tienen la obligación de reducir las emisiones de gases de invernadero para el año 2012 en 5.2% por debajo de los volúmenes que emitían en 1990.

La historia alrededor del Protocolo de Kioto es particularmente complicada, pues ha sido muy controvertido y durante años generó polémicas y fuertes tensiones entre las naciones. La razón de esto es que para conseguir una verdadera reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero es necesario que haya cambios muy profundos en las formas de producción y consumo de los países desarrollados. Estos cambios requieren, a la vez, de inversiones cuantiosas para lograr una reconversión tecnológica que aumente la eficiencia en el uso de la energía. En este contexto, el papel de Estados Unidos fue particularmente pernicioso, ya que su activa oposición a comprometerse con este Protocolo terminó provocando un gran retraso en la ratificación por parte del resto de las naciones y, por lo tanto, en su entrada en vigor. Quizá no resulte claro por qué la decisión de un solo país puede tener un efecto tan grande sobre la de muchos otros. Sin embargo, basta con pensar en las dimensiones de la economía de Estados Unidos para comprenderlo: los países del Anexo I que estaban de acuerdo en firmar el Protocolo desde un principio temieron que se encontrarían en desventaja económica frente a la potencia de Estados Unidos, un país que al no comprometerse con el Protocolo, no tendría que hacer el esfuerzo económico requerido para reducir sus emisiones de gases de invernadero. Finalmente, las negociaciones siguieron su curso y se alcanzaron acuerdos que permitieron la entrada en vigor del Protocolo en 2005. Así, se espera que para 2012 disminuyan



Figura 10.6

El protocolo de Kioto tiene entre sus metas lograr que los países, sobre todo los más desarrollados, reduzcan sus emisiones de gases a la atmósfera.

Cuadro 10.1 Países del Anexo I del Protocolo de Kioto

La segunda columna corresponde a emisiones de dióxido de carbono de los países del Anexo I (<http://unfccc.int/resource/kpco2.pdf>) y la tercera corresponde al porcentaje de emisiones de ese gas con respecto al total, de acuerdo con los reportes de cada país en diciembre de 1997.

País	Emisiones (miles de toneladas)	Porcentaje
Alemania	1,012,443	7.4
Australia	288,965	2.1
Austria	59,200	0.4
Bélgica	113,405	0.8
Bulgaria	82,990	0.6
Canadá	457,441	3.3
Dinamarca	52,100	0.4
Eslovaquia	58,278	0.4
España	260,654	1.9
Estados Unidos de América	4,957,022	36.1
Estonia	37,797	0.3
Finlandia	53,900	0.4
Francia	366,536	2.7
Grecia	82,100	0.6
Hungría	71,673	0.5
Islandia	2,172	0.0
Irlanda	30,719	0.2
Italia	428,941	3.1
Japón	1,173,360	8.5
Letonia	22,976	0.2
Liechtenstein	208	0.0
Luxemburgo	11,343	0.1
Mónaco	71	0.0
Noruega	35,533	0.3
Nueva Zelanda	25,530	0.2
Países Bajos	167,600	1.2
Polonia	414,930	3.0
Portugal	42,148	0.3
Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte	584,078	4.3
República Checa	169,514	1.2
Rumania	171,103	1.2
Rusia	2,388,720	17.4
Suecia	61,256	0.4
Suiza	43,600	0.3
Total	13,728,306	100.0

las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera y que sus efectos no sean tan graves (véase el capítulo 8).

Para lograr los acuerdos de la convención Marco fue decisiva la participación del *Panel Intergubernamental de Cambio Climático* (IPCC, siglas de *Intergovernmental Panel on Climate Change*), constituido en 1988. El IPCC es un grupo de expertos que genera la información científica y tecnológica necesaria para comprender, documentar, explicar y proyectar este fenómeno, así como para ofrecer soluciones. Por sus importantes aportaciones a la humanidad, el IPCC fue distinguido con el Premio Nobel de la Paz en 2007.

Declaración de los Bosques

La presión social internacional de muchos sectores de la sociedad en favor de la protección de los bosques va en constante aumento. Aun así, en la Cumbre de la Tierra sólo fue posible aprobar el documento de principios al respecto, la llamada *Declaración de los Bosques*, que carece de fuerza jurídica obligatoria. A pesar de que el tema de los bosques tiene trascendencia mundial, ha quedado casi completamente restringido a las agendas nacionales de los distintos países. En 1997 se estableció el *Panel Intergubernamental sobre los Bosques* y en 2002 se constituyó el *Foro Intergubernamental de Bosques*, pero estas organizaciones no han podido avanzar en la formulación de compromisos concretos.

10.2.4 Cumbre de Johannesburgo

En 2002 se organizó la *Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible* en Johannesburgo (figura 10.7). Su propósito fue revisar el grado de avance que el mundo había logrado desde la Cumbre de la Tierra. Entre otras cosas, en Johannesburgo se ratificó un conjunto de metas denominadas *Metas del Milenio*, que el Secretario General de la ONU había expuesto en el año 2000. El cuadro 10.2 menciona los acuerdos más significativos alcanzados en esta cumbre, agrupados de acuerdo con los temas principales (agua, pesca, biodiversidad y bosques).

El logro de estas metas requerirá de esfuerzos mayúsculos en los países no sólo en términos de inversión económica, sino también en cuestión de cambio tecnológico, reorientación de políticas, arreglos institucionales e incluso de ajustes a sus marcos normativos. Todos los países han dado pasos firmes en este sentido; en las siguientes secciones de este capítulo revisaremos algunos de ellos.



Figura 10.7

En la cumbre de Johannesburgo se evaluó el avance de las naciones en el mejoramiento del ambiente durante la década previa a su realización.

Cuadro 10.2 Principales acuerdos logrados en la Cumbre de Johannesburgo (2002). En particular, los compromisos relativos al uso del agua deberán alcanzarse en 2015.

Tema	Acuerdos y compromisos
Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir a la mitad la proporción de gente sin acceso a agua segura para beber y a saneamiento básico. • Reducir en 20% el número de habitantes urbanos que no tienen acceso a drenaje. • Poner en práctica un manejo integrado de cuencas en 90% de los países. • Promover reformas en las leyes de aguas nacionales en 50% de los países para 2005 y en 90% para 2015. • Desarrollar mecanismos de cooperación y ponerlos en práctica, con apoyo nacional e internacional, para la atención de una tercera parte de los 64 ecosistemas marinos más grandes del mundo y de las 276 cuencas transfronterizas mayores. • Alcanzar una eficiencia de 30% en el uso de agua para irrigación para el año 2015 sin incremento de la cantidad de agua usada en el 2000.
Pesca	<ul style="list-style-type: none"> • Promover la aplicación del enfoque ecosistémico para el desarrollo sostenible de los océanos. • Con urgencia y en donde sea posible, mantener y restaurar para 2015 los <i>stocks</i> pesqueros agotados a niveles que puedan volver a producir cosechas máximas sostenibles. • Poner en ejecución los planes de acción acordados en el seno de la FAO: 1. sobre el manejo de la capacidad de pesca para 2005, y 2. para prevenir y eliminar la pesca ilegal, no reportada e irregular para 2004. • Desarrollar y facilitar el uso de diversos enfoques y herramientas, incluyendo el enfoque ecosistémico, la eliminación de prácticas pesqueras destructivas, el establecimiento de áreas protegidas marinas consistentes con las leyes internacionales y basadas en información científica, incluyendo redes representativas, para 2012. • Establecer para 2004 un sistema regular de reporte y evaluación ante la Organización de las Naciones Unidas sobre el estado de los ecosistemas marinos. • Eliminar los subsidios que contribuyan a rebasar la capacidad pesquera, así como a fomentar la pesca ilegal, no reportada e irregular.
Biodiversidad	<ul style="list-style-type: none"> • Alcanzar para el año 2010 una reducción significativa en las actuales tasas de pérdida de la diversidad biológica.
Bosques	<ul style="list-style-type: none"> • Acelerar la puesta en marcha de las propuestas de acción del Panel Intergubernamental de Bosques y del Foro Intergubernamental de Bosques por parte de los países y de la Sociedad de Colaboración de los Bosques; intensificar los esfuerzos de reportar al Foro de Bosques de las Naciones Unidas para contribuir a la evaluación en curso para 2005.

10.2.5 Otros esfuerzos internacionales

Además de los múltiples logros alcanzados en las reuniones internacionales mencionadas hasta ahora, vale la pena analizar otros esfuerzos que, aunque de dimensiones menores, tienen una importancia innegable. Tal es el caso de la *Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación*, el *Foro Mundial del Agua* y el *Código de Conducta para la Pesca Responsable*.

Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación

El tema de la degradación del suelo se analizó en la Cumbre de la Tierra. Sin embargo, de ella no surgió ningún acuerdo específico, sino simplemente se señaló la importancia de seguir analizando el tema hasta llegar a acuerdos multilaterales. No fue sino hasta 1994 que se adoptó la *Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación*, la cual entró en vigor en 1996. Su objetivo es contrarrestar la degradación de la tierra y, para ello, reconoce los aspectos físicos, biológicos y socioeconómicos del problema. Asimismo, instruye a los gobiernos a elaborar los planes de acción nacionales contra la desertificación.

En realidad, esta convención no ha logrado tener la fuerza suficiente a pesar de que se ocupa de uno de los problemas ambientales mundiales más serios, pues la desertificación agrava los problemas de pérdida de la biodiversidad, disminución en la disponibilidad de agua, deforestación, cambio climático y pobreza. Pese a su gran importancia, esta convención ha recibido poca atención y carece de metas e instrumentos obligatorios.

Foro Mundial del Agua

El planeta enfrenta una grave crisis por la escasez y calidad del agua; sin embargo, no hay acuerdos vinculantes (obligatorios) multilaterales que atiendan estos problemas. La reunión más importante de carácter internacional es el *Foro Mundial del Agua*. En 2006 se realizó en la ciudad de México la cuarta edición del foro (figura 10.8). Al Foro Mundial asisten todos los países de manera voluntaria, representados ya sea por los gobiernos o por organizaciones sociales, privadas y académicas. Aunque no se trata de un foro resolutorio, emite recomendaciones que ofrecen un plan de acción. En el marco del foro se lleva a cabo una reunión de ministros y secretarios de Estado, pero no se establecen compromisos. El principal responsable de la organización de este foro es el *Consejo Mundial del Agua*.

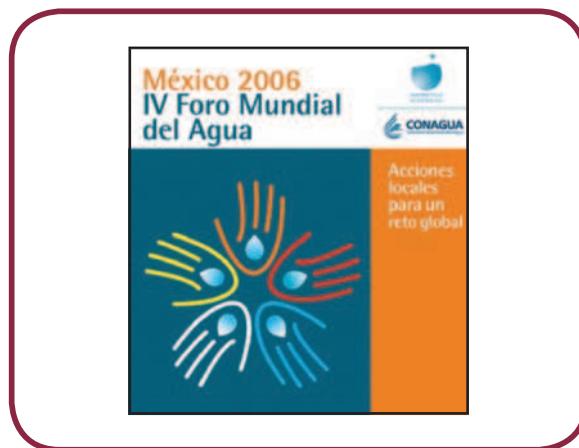


Figura 10.8

El Foro Mundial del Agua más reciente se celebró en la ciudad de México.

Código de Conducta para la Pesca Responsable

La pesca con frecuencia es motivo de serios conflictos internacionales, ante la falta de una clara definición de las fronteras nacionales en los ecosistemas marinos y en virtud de la integración

estrecha de éstos a nivel planetario. Ha habido diversos intentos por definir orientaciones multilaterales para controlar esta situación, ya que por lo general los conflictos no pueden resolverse binacionalmente.

Con la finalidad de solucionar este problema, en 1995 se aprobó en el seno de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) el *Código de Conducta para la Pesca Responsable*. Se trata de un instrumento internacional de carácter voluntario que establece los principios para el desarrollo y aprovechamiento sostenible de los recursos pesqueros. Sin embargo, no es un instrumento vinculante, de manera que con mucha frecuencia sus lineamientos no se cumplen. México adoptó este Código y, con base en él, publicó en el año 2000 la Carta Nacional Pesquera.

10.3 Gobernabilidad ambiental

La solución de los problemas ambientales requiere forzosamente de un conjunto de reglas, formales e informales, que determinen el uso y la conservación de los ecosistemas. Este conjunto de reglas, normas, reglamentos, leyes e instituciones de gobierno se conoce con el nombre de gobernabilidad ambiental. Ésta es muy importante para que puedan entenderse los distintos sectores de la sociedad que participan en el uso y cuidado de la naturaleza, y para que sus actividades se desarrollen de la manera más ordenada posible.

La gobernabilidad ambiental (también denominada gobernanza o gobernación por diferentes autores) reconoce que el Gobierno no es la única entidad social responsable de la gestión de los problemas ambientales, sino que toda la sociedad en su conjunto comparte esta responsabilidad. Gracias a este principio han surgido muchos mecanismos de participación privada y social que permiten que muchos sectores de la sociedad participen en los temas ambientales. En última instancia, gobernar consiste en establecer vínculos estrechos entre los diferentes sectores (públicos y privados, políticos y civiles) interesados en los problemas del ambiente. Esta gobernabilidad requiere que el gobierno sea capaz de crear y coordinar las condiciones adecuadas para la participación de una gran diversidad de actores, ya sea individuos u organizaciones tales como centros de investigación científica y tecnológica, organizaciones no gubernamentales, organizaciones de productores y medios de comunicación, entre otros.

La gobernabilidad ambiental ha avanzado mucho en las últimas décadas, a pesar de ser muy reciente en comparación con la gobernabilidad en las áreas económica, social o política. Con el tiempo, esta gobernabilidad se ha traducido en la aparición de nuevas instituciones, políticas más modernas y programas e instrumentos muy específicos, como se describirá en las siguientes secciones, donde iremos poniendo cada vez mayor énfasis en el caso de México.

10.4 Instrumentos ambientales

En las últimas décadas, la mayoría de los países han hecho grandes avances en la formulación de políticas ambientales orientadas, por un lado, hacia la protección y el uso adecuado de la naturaleza, y por el otro, hacia la prevención, el control y la reversión del agudo deterioro que se observa en la actualidad. Algunas de estas políticas han tenido éxito, pero otras no; sin embargo, en todos los casos,

en el curso de su diseño y aplicación se adquieren experiencias y se aprenden lecciones, y además se acumula una gran cantidad de conocimientos técnicos y científicos. Gracias a esto, se han ideado numerosos procedimientos para llevar a la práctica la política ambiental. Estos procedimientos, conocidos como **instrumentos ambientales**, son de tres tipos: 1) jurídicos; 2) de planeación; y 3) económicos, y se definen en el cuadro 10.3.

Cuadro 10.3 Definición de los instrumentos ambientales. La aplicación complementaria del conjunto de estos instrumentos ambientales es la mejor manera de que la política ambiental sea eficaz.

Tipo de instrumentos	Definición
<i>Instrumentos jurídicos o regulatorios</i>	Son aquellos que establecen las reglas que definen lo que se puede hacer y lo que se prohíbe en la intervención de la naturaleza, con la finalidad de garantizar su preservación y evitar su deterioro.
<i>Instrumentos de planeación</i>	Son aquellos que orientan a la sociedad hacia las mejores formas de intervención de la naturaleza en el futuro para garantizar que las alteraciones no dañen su funcionamiento y permanencia, es decir, asegurando que deriven en acciones sostenibles.
<i>Instrumentos económicos</i>	Son los que estimulan a los diferentes sectores a otorgar un valor efectivo a los recursos naturales y a los servicios ecosistémicos, al tiempo que ayudan a incentivar conductas ambientales más adecuadas.

10.4.1 Instrumentos jurídicos o regulatorios

Para que las personas puedan vivir en paz, ejerciendo sus derechos y respetando los derechos de otros, las sociedades se rigen por ciertas reglas de entendimiento y convivencia. Es una situación análoga a la que se presenta en un partido de fútbol: hay reglas que nos dicen cuándo se realiza un tiro de esquina, cómo se cobra un penal y qué atribuciones tiene el portero. Sólo si se siguen las reglas, el juego es ordenado y divertido (figura 10.9). En las sociedades las reglas funcionan de manera equivalente. Las reglas que ordenan la conducta de los individuos y las comunidades humanas de una sociedad en una nación constituyen el **marco jurídico**.

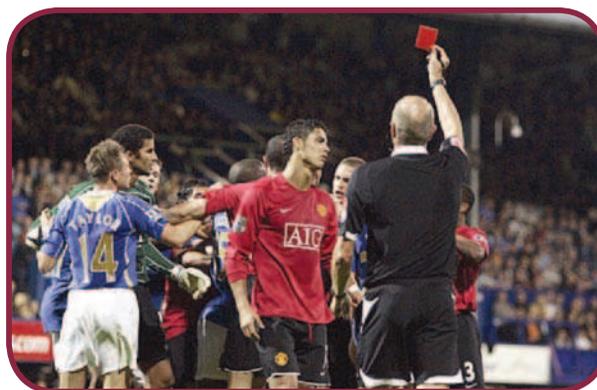


Figura 10.9

En un partido de fútbol, al igual que en la vida cotidiana de una sociedad, es esencial seguir las reglas acordadas previamente.

En todas las naciones el marco jurídico está compuesto por **leyes, reglamentos y normas**. Cada uno de estos instrumentos legales tiene un nivel jerárquico y expone el tema que es su razón de ser con distinto nivel de detalle. En México, las leyes son promulgadas por el Congreso de la Unión, mientras que los reglamentos y las normas son expedidos por las secretarías de Estado y sus respectivos institutos.

Las leyes, los reglamentos y las normas existentes abarcan una enorme gama de temas, desde los relacionados con los derechos civiles y laborales, hasta los relacionados con el tránsito y el comportamiento de los seres humanos en la sociedad. Sin embargo, a principios de la década de 1970 todavía eran pocas las naciones que contaban con leyes y normas para regular el manejo del ambiente y de los recursos naturales. Uno de los resultados de la Conferencia de Estocolmo, a la que nos referimos en párrafos anteriores, fue la recomendación de que los países participantes establecieran un marco jurídico que permitiera regular la interacción entre las sociedades y el ambiente natural. Desde entonces, estos países han establecido gradualmente su **legislación ambiental** y, de manera simultánea, han creado instituciones y organismos administrativos que se encargan de la aplicación y vigilancia de esas leyes. En esta tarea intervienen los Tribunales de Justicia, cuya función es buscar soluciones a los conflictos jurídicos que surgen de la aplicación de la ley.

En México y en otros países de América Latina la legislación ambiental es muy reciente. Mientras que otros temas, como el derecho penal o el laboral, tradicionalmente han sido de gran interés social y se han regulado desde hace siglos, el derecho ambiental surgió apenas hace tres décadas.

La base del sistema jurídico de protección ambiental de nuestro país se remonta al año de 1917, al quedar plasmada en el artículo 27 de la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Ese artículo declara la propiedad originaria de la nación sobre las tierras y aguas del territorio nacional y consagra su derecho de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación con la finalidad de preservarlos y evitar su destrucción, así como el derecho de lograr el desarrollo equilibrado del país. Si bien este artículo de la Constitución fue pionero, particularmente en el contexto de los países en desarrollo, en las décadas que siguieron a la promulgación constitucional no se construyó un marco jurídico sólido que permitiera concretar estos principios básicos.

Las primeras leyes referentes a los recursos naturales que se expidieron fueron la *Ley Forestal* (1926), la *Ley de Aguas Propiedad de la Nación* (1929), la *Ley de Caza* (1940) y la *Ley de Conservación del Suelo y Agua* (1946). Sin embargo, estas leyes no eran propiamente ambientales, sino que enfatizaban el aspecto utilitario del uso de los recursos, dejando de lado los aspectos relacionados con su conservación, recuperación y cuidado.

En la década de 1970 se comenzó a consolidar un marco legal que incluía una perspectiva ambiental. La primera ley referente a asuntos ambientales que se promulgó fue la *Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación*, expedida en 1971, a la cual le siguió la *Ley Federal de Protección al Ambiente*, de 1982. Por desgracia, el fuerte sesgo que ambas tenían hacia el tema de la contaminación dejaba poco espacio para tratar muchos otros asuntos ambientales.

Más tarde, en 1988 se promulgó la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA). Ésta fue una ley de vanguardia, considerada como pionera en América Latina y la región del Caribe por su manera de enfrentar los temas ambientales. Por esta razón, muchos países latinoamericanos tomaron esta ley mexicana como base para elaborar su propia legislación ambiental, adecuándola a su realidad nacional. La LGEEPA definió el modelo de derecho ambiental vigente hasta nuestros días. Entre otras cosas, distribuyó diferentes competencias entre los diversos niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), estableció los principios de la política general ambiental y los instrumentos para su aplicación, dictó los criterios ecológicos para la realización de diferentes actividades productivas, incluyó las reglas que deben seguirse para garantizar la participación social y estableció las sanciones por incumplimiento de la normatividad ambiental (figura 10.10).

En 1996 la LGEEPA fue reformada profundamente para adecuarla a los criterios de sostenibilidad que surgieron de la *Conferencia de Río* (sección 10.2.3) y a los avances que el país había tenido en los asuntos ambientales durante la década anterior. De esta reforma se derivaron los reglamentos relacionados con la evaluación de impacto ambiental, la auditoría ambiental y las áreas naturales protegidas.

Otros hechos importantes fueron la reforma de 1997 a la *Ley Forestal* y la promulgación en 2000 de la *Ley General de Vida Silvestre*, la cual reemplazó a la *Ley de Caza* que en ese momento ya era obsoleta. En esos años también se reformaron el *Reglamento de Pesca* y el *Reglamento de Aguas Nacionales*. Estos cambios permitieron avanzar mucho en los aspectos técnicos de la legislación, y se reguló el uso y el manejo de los recursos a través de las normas oficiales mexicanas (NOM). En estas normas se detallan los criterios y requisitos que deben cubrir quienes quieran aprovechar recursos naturales como el agua, el suelo, la flora, la fauna y el aire. Un ejemplo muy importante de este tipo de instrumentos es la *Norma Oficial Mexicana de Especies en Peligro de Extinción*, la cual incluye una lista de especies de flora y fauna asignadas a diferentes categorías que señalan su estatus de conservación (en riesgo, vulnerable o rara, entre otras). De esta manera, al realizar un estudio de impacto ambiental (véase la sección 10.4.2) para decidir, por ejemplo, si es razonable construir una carretera en una región particular, es obligatorio consultar la norma para verificar si alguna de las especies silvestres de flora o fauna que allí habitan aparecen en la lista (figura 10.11). Si así fuera, se deben tomar medidas directas para evitar la desaparición local de las especies en peligro y, en caso de ser necesario, se prohibiría la construcción de la carretera para proteger a las especies amenazadas.

Las normas oficiales mexicanas están inmersas en un proceso permanente de creación y revisión, pues conforme se genera nueva información se dispone de elementos adicionales para fortalecerlas y fundamentarlas.

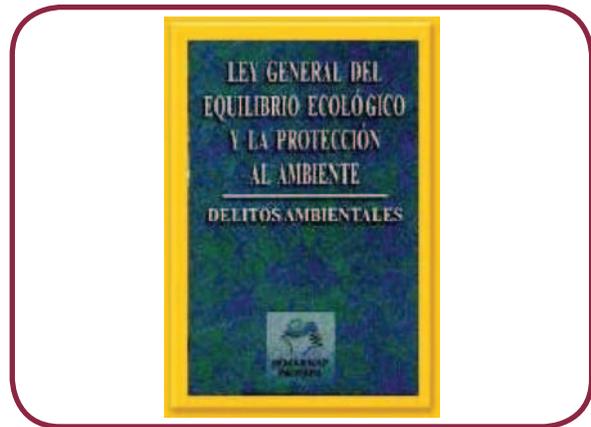


Figura 10.10 Desde su publicación, la LGEEPA definió el modelo de derecho ambiental vigente hasta nuestros días.



Figura 10.11 *Mammillaria crucigera* es un pequeño cactus en forma de globo, endémico de la región de Tehuacán-Cuicatlán, que se encuentra en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059) en la categoría de *vulnerable*. El objetivo de esta norma es identificar a las especies vulnerables y amenazadas para tomar medidas que ayuden a su conservación.

Además de las leyes generales de nivel federal que mencionamos en los párrafos anteriores, también los estados y municipios del país han hecho avances considerables en la formulación de su propia legislación ambiental. A la fecha, todos los estados de la República ya cuentan con sus propias leyes ambientales. Asimismo, hubo cambios muy relevantes en la Constitución; por ejemplo, en 1998 nuestra Carta Magna fue sometida a dos modificaciones que amplían las bases constitucionales de la ley ambiental. Una de ellas fue la que elevó a rango constitucional el derecho de todas las personas a un ambiente adecuado; la otra hizo explícito que el desarrollo de la nación debe ser **sostenible**.

Los avances más recientes, ocurridos en este nuevo siglo, y que fueron muy significativos por incorporar los criterios de la sostenibilidad ambiental en la normatividad fueron la promulgación de la *Ley de Desarrollo Forestal Sustentable* de 2003 (que sustituyó a la *Ley Forestal*), la *Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados*, aprobada en 2003, la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (también aprobada en 2003), y la reforma a la *Ley de Aguas Nacionales* (aprobada en 2004).

Como podemos ver, el marco jurídico relacionado con los temas ambientales evolucionó sustancialmente en las dos últimas décadas. Sin duda, los avances son muy relevantes y constituyen la base para inducir una efectiva gobernabilidad ambiental. Por desgracia, persiste un problema muy importante: el insuficiente cumplimiento de esta legislación.

10.4.2 Instrumentos de planeación

En México contamos con dos instrumentos de planeación muy importantes: el *Ordenamiento Ecológico del Territorio* y la *Evaluación de Impacto Ambiental*. A continuación revisaremos sus características y su utilidad.

Ordenamiento Ecológico del Territorio

Si queremos avanzar hacia la meta de lograr un desarrollo sostenible es necesario, en primer lugar, organizar la intervención humana sobre la naturaleza, es decir, organizar la forma en que las diferentes actividades productivas y la ocupación del territorio utilizan los recursos y los espacios naturales. Para este fin se creó el instrumento conocido como *Ordenamiento Ecológico del Territorio*, que consiste en una serie de procedimientos que permiten planear el desarrollo de manera compatible con la conservación de los ecosistemas naturales y los recursos y servicios ambientales que ofrecen.

La población de México continúa creciendo y una gran parte de la población actual vive en situaciones de pobreza. Esto nos obliga como nación a intentar fortalecer el desarrollo económico del país con la finalidad de superar esta situación y atender las necesidades de la población, tanto la presente como la futura. No debemos olvidar que estas necesidades se incrementarán sustancialmente en las próximas décadas. Sin embargo, este desarrollo requiere de cuidado y planeación para evitar que se generen más presiones sobre nuestros recursos naturales, que ya de por sí son escasos y se encuentran muy deteriorados. Por ello, necesitamos evaluar cuál es el potencial y la capacidad de los ecosistemas de las diferentes regiones del país para tolerar las distintas actividades productivas. Sólo así será posible obtener todos los beneficios ambientales que nos ofrece la naturaleza, pero sin agotar ni dañar los recursos naturales ni los servicios que nos brinda. Además, necesitamos identificar las tecnologías más adecuadas para producir y extraer los recursos sin afectar su capacidad de regeneración natural y sin deteriorar el ambiente.

La base jurídica del *Ordenamiento Ecológico del Territorio* está sustentada de manera indirecta en la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*, y de manera directa en la LGEEPA. El artículo 3° de esta última ley, en su fracción XXIII, define al ordenamiento ecológico como:

"...el instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos."

Hay cuatro tipos de ordenamientos ecológicos: 1) el *Ordenamiento Ecológico General del Territorio* (OEGT), formulado por la Federación a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2) el *Ordenamiento Ecológico Regional*, que es de competencia de los gobiernos de los estados y del Distrito Federal cuando abarcan la totalidad o una parte del territorio de una entidad federativa; 3) el *Ordenamiento Ecológico Local*, expedido por las autoridades municipales o, en su caso, por el Distrito Federal; y 4) el *Ordenamiento Ecológico Marino*, cuya realización es facultad de la Federación.

Para elaborar el ordenamiento ecológico del territorio es necesario conocer en detalle cómo son las condiciones ambientales en cada región del país. Para ello se utiliza una amplia gama de fuentes de información, incluyendo imágenes de satélite, fotografías aéreas y datos tomados directamente en el campo. Además, se incorpora información sobre diversos aspectos sociales y económicos de la región, como la densidad demográfica, el tipo de producción de la localidad y la infraestructura disponible, entre otros aspectos. Todo este conjunto de información se analiza mediante una serie de herramientas denominadas **sistemas de información geográfica**, los cuales son paquetes de cómputo que sirven, entre otras cosas, para mostrar en un mapa las regiones donde coinciden ciertas características. Por ejemplo, supongamos que queremos identificar las regiones propicias para el cultivo de la vid (figura 10.12); si tenemos la información suficiente capturada en la computadora, podríamos localizar con el sistema de información geográfica aquellas regiones en las que coincidan las características más adecuadas para este cultivo: 1) terrenos más o menos planos; 2) temperatura media anual de alrededor de 16°C;



Figura 10.12

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten combinar información de muchas fuentes para localizar, por ejemplo, las áreas del país que serían adecuadas para el cultivo de la vid. En este mapa se ejemplifica el área que presenta clima de tipo mediterráneo, en la costa noroccidental de Baja California (en color amarillo), en donde se cultiva este producto.

Evaluación del impacto ambiental

Cuando una persona o institución pretende llevar a cabo una actividad productiva en alguna región o localidad, es necesario hacer una evaluación de impacto ambiental, es decir, un análisis de las consecuencias negativas que esa actividad podría tener sobre las condiciones ambientales y los sistemas naturales de la región. Por ejemplo, si una empresa quiere construir un hotel en la costa del Mar Caribe, hay que realizar una serie de análisis para determinar cuáles serían las consecuencias de este proyecto turístico sobre el ambiente (figura 10.14). Estos análisis deben tomar en cuenta las dimensiones del proyecto, su localización, la infraestructura necesaria, entre otros elementos. En particular, se requiere saber qué especies de flora y fauna se verían afectadas; qué alteraciones sufrirían el suelo, el flujo del agua y la entrada y salida de nutrientes del ecosistema; cómo cambiarían las condiciones de temperatura y salinidad del mar; y cómo se eliminarían los desechos, es decir, las aguas residuales y la basura. Todas estas cuestiones deben analizarse al realizar una evaluación de impacto ambiental.

En las últimas décadas muchos gobiernos han reconocido la importancia de evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas. Por esta razón, se han promulgado leyes y reglamentos para que en todos los casos se practiquen estos estudios de la manera más integral y uniforme posible. En México la reglamentación que define qué es una evaluación de impacto ambiental es la LGEEPA, según la cual,

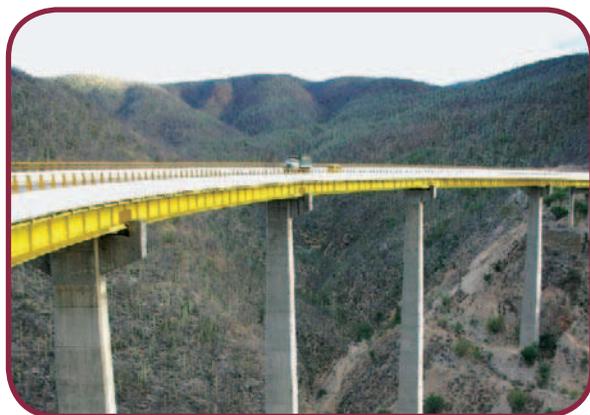
“Una evaluación de impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría [Semarnat] establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente.”

¿Qué actividades u obras requieren de evaluaciones de impacto ambiental? Particularmente las que están relacionadas con la creación de infraestructura (como carreteras, líneas eléctricas, drenajes, etcétera), con la actividad minera y petrolera, el manejo de residuos peligrosos, algunos aspectos del manejo forestal (como el establecimiento de plantaciones o el uso de las selvas tropicales), así como con las actividades que se desea desarrollar en áreas naturales protegidas y zonas costeras (por ejemplo, recreación, reintroducción de especies, etcétera) (figura 10.15). En el recuadro 10.3, “Actividades y obras que requieren evaluación de impacto ambiental según la Ley General del Equilibrio Ecológico



Figura 10.14

La construcción de hoteles, centros recreativos y otras infraestructuras turísticas en la costa del Caribe mexicano sólo procede luego de realizar evaluaciones de impacto ambiental para valorar los posibles efectos de estas iniciativas sobre los ecosistemas naturales de la región.



y Protección al Ambiente”, se presenta una lista más completa de las actividades que requieren este tipo de evaluaciones, de acuerdo con la LGEEPA.

Figura 10.15

Este puente en la autopista Cuacnopalan-Oaxaca, que cruza la Reserva de la Biosfera del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, requirió de un cuidadoso estudio de impacto ambiental.

Recuadro 10.3

Actividades y obras que requieren evaluación de impacto ambiental según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

Quienes pretenden llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades requerirán previamente de la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría (Semarnat):

1. Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gaseoductos y poliductos.
2. Actividades relacionadas con las industrias del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica.
3. Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación, en los términos de las leyes mineras y la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear.
4. Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como de residuos radiactivos.
5. Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración.
6. Plantaciones forestales.
7. Cambios de uso de suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas.
8. Parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas.
9. Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros.
10. Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales y zonas federales.
11. Obras en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación.
12. Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas.
13. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal que puedan causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidas en las disposiciones jurídicas referentes a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.

Para planear cuáles zonas serán destinadas a las actividades productivas o qué obras se pueden o deben construir en cada lugar, lo ideal es contar primero con estudios de ordenamiento ecológico que definan e indiquen el mejor uso que se puede dar a cada región. Así, si una persona, empresa o institución tiene interés en realizar alguna actividad productiva o erigir una obra en un lugar, primero debería revisar si es compatible con lo que señala el ordenamiento ecológico; por supuesto, esto sólo es posible en caso de que éste exista, ya que por desgracia aún hay pocos ordenamientos ecológicos decretados. Después de comprobarlo, debe procederse a realizar la evaluación de impacto ambiental requerida por la LGEEPA para asegurar que la actividad u obra no provocará daños significativos al ambiente.

10.4.3 Instrumentos económicos

Los instrumentos económicos complementan a los instrumentos regulatorios en la generación de nuevas conductas positivas entre quienes realizan intervenciones en la naturaleza. Unos estimulan prácticas productivas ambientalmente sostenibles o acciones que favorezcan la conservación de la naturaleza; otros, en cambio, desincentivan la destrucción, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos naturales. Recientemente, estos instrumentos se comenzaron a aplicar en muchos países y ya se pueden ver algunos resultados positivos. Entre tales instrumentos podemos citar: el pago por servicios ambientales, las tarifas de agua y el pago por derechos de descarga de aguas residuales. Veamos en qué consisten.

Pago por servicios ambientales

Se trata de estímulos económicos otorgados a los dueños de la tierra para evitar el cambio de uso de suelo y garantizar la conservación de los ecosistemas naturales (figura 10.16). Hay varios pagos de este tipo, pero aquí sólo mencionaremos tres ejemplos:

- Pago por servicios ambientales hidrológicos. Está enfocado a conservar la cobertura vegetal de cuencas y ecosistemas que favorecen el ciclo hidrológico.
- Pago por captura de carbono. Pretende estimular la recuperación de ecosistemas naturales con la finalidad de capturar cantidades adicionales de dióxido de carbono, contribuyendo a mitigar el cambio climático. Además, esta actividad ofrece el beneficio de conservar los hábitats de la flora y fauna y evitar la erosión del suelo.
- Pago por protección de la biodiversidad. Se otorga a los dueños de terrenos con ecosistemas naturales que albergan una gran biodiversidad y están en riesgo de ser deforestados.



Figura 10.16

Esquema del pago por servicios ambientales en Perú (*fente: peru.blogalaxia.com*). En muchos países estos programas han comenzado a beneficiar a la población indígena.

Tarifas de agua

Se llaman así a los instrumentos económicos que pretenden desincentivar el consumo excesivo e ineficiente del agua. Este instrumento se basa en la idea de que el consumidor que paga por el agua la cuidará sin derrocharla, es decir, sólo utilizará la necesaria —ya sea para sus necesidades personales o para realizar actividades productivas— porque esto le representará un ahorro económico.

Pago por derechos de descarga de aguas residuales

Es el pago que hace quien contamina el agua y la descarga a los cuerpos de agua naturales. El objetivo del pago de derechos de descarga de estas aguas es desincentivar la descarga contaminante y, en última instancia, hacer que el usuario opte por utilizar un sistema de tratamiento para la limpieza del agua, ahorrándose de esa forma el gasto que implica el pago de derechos.

10.5

Instituciones relacionadas con el ambiente en México

La primera institución en México que se ocupó de temas propiamente ambientales fue la *Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente*, creada en 1972 como parte de la *Secretaría de Salubridad y Asistencia* (figura 10.17). Sin embargo, en aquel tiempo las preocupaciones centrales de esa institución estaban relacionadas casi exclusivamente con los problemas de contaminación urbana producida por las industrias y los vehículos automotores. En realidad, la década de 1970 se caracterizó por esta visión limitada de los problemas ambientales.

En 1982 se creó la *Secretaría de Ecología y Desarrollo Urbano* (Sedue), la cual contaba con una *Subsecretaría de Ecología* (figura 10.17). Los temas ambientales que anteriormente administraba la Secretaría de Salubridad y Asistencia pasaron a esta nueva dependencia, junto con otras atribuciones que correspondían a la *Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas* (SAHOP). De esta manera, la visión sobre los temas ambientales se hizo más integral, pues no sólo se trataban problemas relacionados con la salud humana, sino también con el funcionamiento de los ecosistemas naturales, a la vez que se intentaba evitar su deterioro y se reconocían los daños que el ser humano infringía a la naturaleza.

Diez años más tarde, en 1992, la Sedue se transformó en la *Secretaría de Desarrollo Social* (Sedesol), dependencia que durante dos años tuvo en sus manos los temas ambientales (figura 10.17). En esa época se crearon dos instituciones importantes dentro de esta dependencia: el *Instituto Nacional de Ecología* (INE), encargado de planear, gestionar y ejecutar proyectos relacionados con el ambiente, y de elaborar la normatividad ambiental; y la *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente* (Profepa), cuya función es vigilar la aplicación de las leyes ambientales y las referentes al manejo de los recursos naturales renovables.

A pesar de todos estos cambios institucionales, la **gestión ambiental** no se agilizó lo suficiente para estar a la par de los problemas crecientes de deterioro ambiental. Por ejemplo, la LGEEPA ofrecía muchas oportunidades para una buena gestión ambiental, pero la dinámica y la organización de las propias instituciones no permitían que éstas se aprovecharan plenamente. En ese entonces, la administración de los recursos naturales se encontraba dispersa en varias instituciones gubernamentales, lo cual constituyó un grave obstáculo para su buena gestión. Algunos recursos naturales, como el agua y los recursos forestales, dependían de la *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos*, mientras

que otros, como los recursos pesqueros, eran manejados por la *Secretaría de Pesca*. Por otra parte, los temas ambientales estaban en manos de la Sedesol.

En diciembre de 1994 se creó una nueva institución, la *Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca* (Semarnap; figura 10.17). Esta nueva secretaría representó un encomiable intento por integrar los sectores relacionados con el ambiente y con el manejo de recursos naturales renovables, unificando el sector forestal, el agua, la pesca y todo lo relacionado con el medio ambiente. Esta nueva institución permitió por primera vez hacer una gestión integral del manejo de la naturaleza para transitar hacia el desarrollo sostenible. La Semarnap contó con tres subsecretarías (*Planeación, Recursos Naturales y Pesca*) y un conjunto de órganos desconcentrados: la *Comisión Nacional del Agua* (CNA), el *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* (IMTA), el *Instituto Nacional de la Pesca* (INP), el *Instituto Nacional de Ecología* (INE), la *Procuraduría Federal de Protección al Ambiente* (Profepa), la *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* (Conabio), y finalmente la *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas* (Conanp), esta última creada en 2000.



Figura 10.17

Desde 1972 se han creado y transformado en México instituciones gubernamentales encargadas de la gestión de los recursos naturales y los aspectos relacionados con el ambiente. El ancho de cada barra es proporcional a la amplitud de la gestión de cada institución.

En 2001 tuvo lugar un hecho muy lamentable para lo política ambiental en México: el desmembramiento de una parte de la Semarnap. Todo lo relacionado con los recursos pesqueros pasó a formar parte de la *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (Sagarpa) y su nombre se redujo a *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Semarnat; figura 10.17). En este esquema, la pesca, que constituye una actividad extractiva comparable a la explotación de recursos forestales, quedó asociada a una dependencia que regula otro tipo de actividades productivas, las cuales se llevan a cabo en ecosistemas drásticamente modificados por el hombre. La consecuencia

más negativa de este cambio es que se perdió el énfasis en el carácter sostenible de la actividad pesquera.

La Semarnat creó en 2001 la *Comisión Nacional Forestal* con la finalidad de atender todos los programas de fomento forestal. Además, transformó las subsecretarías en las de *Planeación y Política Ambiental*, de *Fomento y Normatividad Ambiental* y de *Gestión para la Protección Ambiental*, pero mantuvo la Conanp, la Conabio, el INE, la Profepa y la Conagua. Ésta es la estructura institucional que mantiene la Semarnat hasta la fecha (figura 10.18).



Figura 10.18

La Semarnat engloba varias dependencias encargadas de inventariar, estudiar y proteger la mayoría de los recursos bióticos de México, con excepción de los pesqueros.

10.6 Procesos adicionales de gobernabilidad ambiental

Podemos identificar un conjunto adicional de procesos que pueden acelerar nuestro tránsito hacia la sostenibilidad ambiental. Éstos son: 1) la descentralización de la gestión ambiental; 2) el impulso de la participación social hacia los temas ambientales; 3) el incremento en el flujo de la información hacia los actores involucrados con el ambiente; y 4) el financiamiento adecuado para llevar a cabo las acciones necesarias para la protección de la naturaleza. Cada uno de estos procesos será revisado en detalle a continuación.

10.6.1 Descentralización

Históricamente, la gestión gubernamental de la política ambiental y de los recursos naturales ha sido sobre todo una responsabilidad del Gobierno Federal, con poca participación de los gobiernos estatales y municipales. Esta situación comenzó a cambiar con la promulgación de la LGEEPA en 1988, y el cambio se consolidó en 1996 con la reforma a esta ley. Fue entonces cuando se definieron claramente las atribuciones y facultades que tienen los distintos niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) en los asuntos ambientales.

La descentralización consiste en transferir facultades y atribuciones a las autoridades locales, con la perspectiva de fortalecer las capacidades locales de desarrollo y de acuerdo con el principio de que el conocimiento de los problemas a nivel local permite encontrar mejores soluciones.

La descentralización no debe limitarse a la transferencia de una lista de funciones de la Federación a los gobiernos locales, sino que debe llevar a construir verdaderos espacios de participación ciudadana, a informar adecuadamente para sustentar la toma de decisiones y para rendir cuentas que permitan lograr la transparencia de la función pública. Todo esto, en conjunto, permite impulsar el desarrollo regional sostenible, incorporando las modalidades de cada región.

La descentralización puede ser un riesgo cuando no se realiza con el cuidado necesario y cuando no es posible garantizar que las autoridades locales cumplan con sus nuevos compromisos. Con la finalidad de evitar estos problemas, es necesario acompañar la descentralización con la creación de capacidades locales por medio de instituciones, leyes y normas, formación de especialistas y recursos financieros. La descentralización debe extenderse no sólo a los gobiernos de los estados, sino también a los municipales.

10.6.2 Impulso de la participación social

En las últimas décadas se ha probado que la mejor forma de avanzar en la solución de problemas ambientales es contar con la participación organizada de la sociedad. Cuanto más participen los ciudadanos en la toma de decisiones y en la ejecución de proyectos, tendremos mayor certeza de que alcanzaremos los objetivos planteados. Ahora bien, esto no es una tarea sencilla, pues la participación requiere de mucha organización y de reglas claras, pues sólo de esta manera los intereses privados o de grupo no dominarán sobre el interés común.

En los últimos años México ha vivido un proceso de fortalecimiento de su democracia y esto se extiende cada vez más a un mayor número de ámbitos en la sociedad. Este proceso ha creado sistemas de participación social en la planeación, aplicación y evaluación de las políticas públicas ambientales. Para que estas actividades tengan éxito es fundamental que la sociedad cuente con información veraz, completa y oportuna sobre los temas ambientales.

En las últimas décadas han surgido muchos grupos sociales constituidos específicamente para formular y ejecutar programas de desarrollo, difusión, capacitación e investigación aplicada, así como para cuidar asuntos ambientales. Estos grupos, conocidos como **organizaciones no gubernamentales** (ONG) cumplen un importante papel. Por ejemplo, algunas ONG emplean biólogos, químicos y oceanógrafos que hacen evaluaciones de impacto ambiental. Otras colaboran con diversas organizaciones campesinas para plantear nuevos métodos de uso y manejo de **recursos forestales no maderables**, como la vainilla, las hojas de palma, las resinas y las flores (figura 10.19), entre otros productos. Otras más asesoran a productores agrícolas para introducir los procedimientos conocidos como **tecnologías orgánicas** o, en un sentido más amplio, como tecnologías ambientalmente inocuas.

Actualmente, en México hay muchas entidades tales como consejos consultivos, ONG, organizaciones de productores, segmentos de los sectores privado y académico, instituciones gubernamentales y legisladores que se ocupan de la gestión ambiental y de los recursos naturales. Como ejemplos podemos mencionar al *Consejo Consultivo Nacional para el Desarrollo Sustentable*, el *Consejo Consultivo Nacional para las Áreas Naturales Protegidas* y el *Consejo Técnico Consultivo Nacional Forestal*. Estos consejos, que funcionan a nivel nacional, cuentan también con sus equivalentes en los estados de la República.



Figura 10.19 *Laelia speciosa* es una orquídea epífita apreciada por sus bellas flores que se usan para adornar altares durante festividades religiosas en el centro de México. Las hojas de la palma *Chamaedorea elegans*, que vive en las selvas húmedas de México y Centroamérica, son colectadas como elementos de ornato para arreglos florales. Éstos son ejemplos de recursos forestales no maderables.

En resumen, durante los últimos 20 años se ha conformado en México una amplia base participativa en el sector ambiental, con varios cientos de consejos consultivos en los que participan miles de ciudadanos organizados. Es necesario que estas estructuras se fortalezcan y que intensifiquen su injerencia en la toma de decisiones a nivel nacional para que funcionen como un motor activo que lleve al país hacia un desarrollo sostenible.

10.6.3 Flujo de información

Es evidente que el diseño de la política orientada a resolver los problemas ambientales, la evaluación de si ésta funciona correctamente o no, y la participación de la sociedad para la toma de decisiones requieren de conocimientos basados en la información ambiental. Esta información debe ser suficiente, confiable, oportuna, accesible y apropiada para el tema. Sin ella, la sociedad no puede construir conocimiento ni cultura y no sería posible tener una política ambiental adecuada.

Las decisiones que deben tomarse para formular políticas ambientales y para resolver conflictos siempre implican una gran complejidad debido a las numerosas variables, no sólo ambientales sino también las de carácter social, económico y político, que interactúan en estos procesos. Sin embargo, cuando tales decisiones se toman con certeza técnica y científica y en ellas participa la sociedad de manera organizada, el resultado suele tener éxito.

Por desgracia, no siempre sucede de esta manera. En muchas ocasiones no se cuenta con los conocimientos técnicos y científicos necesarios para entender plenamente los procesos socioambientales y orientar de manera correcta las soluciones a los problemas. En otras ocasiones, a pesar de haber información y conocimiento, éstos no se aplican porque no llegan a traducirse en recomendaciones concretas, adecuadas a la realidad cotidiana, o porque están dispersos y no son accesibles al público y a los encargados de tomar las decisiones. También se da el caso de que, ante el temor de sanciones en un clima adverso o de fuertes presiones sociales, los funcionarios públicos prefieren mantener en

reserva información que debería ser pública. Sin duda, existe una brecha entre los individuos y las instituciones que generan la información y quienes deben tenerla para decidir y actuar.

Parte de la información ambiental requerida se genera por parte del gobierno en el INE, en la Conabio, en la Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental y en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; figura 10.20). Otra parte se genera a partir de la actividad de las instituciones académicas y de investigación.



Figura 10.20

El INEGI es una institución muy importante en la generación de información ambiental en México. En la fotografía se muestra su sede en la ciudad de Aguascalientes.

10.6.4 Financiamiento

Quizá se cuente con buenos planes, leyes e instituciones para conservar los recursos naturales, resolver el problema de la contaminación, producir alimentos de manera sostenible y alcanzar otras metas deseables, pero sin dinero suficiente para ejecutar estos planes y proyectos no será posible ver sus resultados. Muchos países con gran biodiversidad y, a la vez, con graves problemas de deterioro ambiental son países pobres, que han pasado durante muchos años por situaciones económicas extremadamente difíciles. Éste es el caso de México y de numerosas naciones latinoamericanas, africanas y asiáticas.

Muchas personas sostienen la idea de que mientras haya pobreza en nuestros países, es necesario dar prioridad a ciertos rubros para superarla, y que los temas “secundarios”, como el del ambiente, pueden posponerse para atenderlos una vez que los asuntos “prioritarios” estén resueltos. Este razonamiento parte de una premisa falsa. En realidad, nunca se podrá superar la pobreza si agotamos o deterioramos la base material en la que se sostiene el desarrollo, es decir, los recursos naturales. La historia se ha encargado de demostrar cómo funciona ese círculo vicioso: la pobreza trae un fuerte deterioro ambiental, el cual a su vez agudiza la pobreza. Por eso, los asuntos ambientales deben ser prioritarios en la agenda de desarrollo de las naciones, junto con los temas sociales y económicos.

El reconocimiento de la enorme importancia de los asuntos ambientales debe reflejarse en un aumento considerable del financiamiento gubernamental, de forma que se asegure la protección, la conservación y la restauración de los ecosistemas naturales, ya que son éstos los que proporcionan los recursos bióticos y los servicios ambientales de los que disfruta la sociedad (véase el capítulo 6, sección 6.2). Por desgracia, éste no es el caso de México y de otros países en vías de desarrollo. A lo largo de la historia, el financiamiento destinado a la solución de problemas ambientales siempre ha sido reducido, y aunque se hacen grandes esfuerzos para incrementarlo, sigue siendo insuficiente. Sin embargo, también debemos aclarar que el financiamiento para proyectos ambientales no puede venir únicamente del gobierno. La iniciativa privada y la sociedad deben participar más intensamente en los asuntos ambientales. El esfuerzo de estos grupos, junto con el del gobierno y los legisladores, traerá el financiamiento suficiente para garantizar un desarrollo sostenible.

10.7 ¿Adónde vamos?

El material que estudiamos en este libro nos deja ver claramente la magnitud de los retos que las sociedades humanas enfrentaremos durante el siglo XXI para consolidar nuestro desarrollo, superar la pobreza y mantener la base de recursos naturales que permitan su funcionamiento. Hemos perdido innumerables recursos naturales, deteriorado nuestros suelos, deforestado grandes regiones, agotado el agua de muchos sitios y contaminado el suelo, el agua y el aire. Sin embargo, también mencionamos que hay soluciones viables a estos problemas y que la conservación y el desarrollo ya no pueden verse más como alternativas permanentemente antagónicas y excluyentes. En el caso de México hemos podido definir políticas, promulgar leyes e impulsar instituciones que nos ayudan a manejar más adecuadamente los recursos y a mejorar la manera en que nuestra sociedad se relaciona con el medio natural. Además, ahora contamos con instrumentos ambientales sumamente valiosos que aún no aprovechamos al máximo. Ahora más que nunca, la participación de la sociedad es cada vez más intensa y responsable, y la información más amplia y oportuna. Vemos que se forma una conciencia colectiva que valora cada vez más nuestro patrimonio natural. *No olvides que tú también puedes contribuir a este esquema de acción y de participación para acercarnos de verdad a un manejo adecuado de los recursos naturales y a la protección integral del ambiente de nuestro planeta.*



Para reflexionar...

1. Reflexiona sobre la utilidad y la importancia de la legislación ambiental. a) ¿Crees que se podrían obtener los mismos resultados con otros métodos diferentes de la promulgación de leyes? b) ¿Qué necesidades de conservación y manejo de recursos te gustaría ver reflejadas en la legislación ambiental?
2. Piensa qué consecuencias tendría para el ambiente en nuestro país el hecho de que nuestra Constitución Política no hubiera incluido el artículo 27.
3. ¿A qué crees que se deba que las leyes ambientales no se apliquen cabalmente? ¿Cómo podríamos incrementar su aplicación?
4. Imagina que se va a construir una autopista a través de la Selva Lacandona. Suponiendo que se hiciera una evaluación de impacto ambiental, ¿cuáles crees que serían las consecuencias ambientales previsibles de tal obra según esta evaluación?



Actividades complementarias

1. Investiga en qué años se firmaron los siguientes convenios y qué ofrecen:
 - a) La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).
 - b) La Convención sobre la Conservación de Especies Migratorias de Animales Silvestres.
 - c) La Convención de Humedales.
2. Haz una breve investigación en la que documentes un caso real en el que se haya realizado una evaluación de impacto ambiental. ¿Qué se pensaba construir? ¿En dónde? ¿Qué información se obtuvo durante la evaluación de impacto ambiental? ¿Cuáles fueron sus resultados y recomendaciones? ¿Qué se hizo al respecto?
3. Revisa periódicos de los últimos meses y busca alguna noticia referente a la actividad de los legisladores en cuestión ambiental. ¿Qué aspectos relacionados con asuntos ambientales o uso de recursos se trataron? ¿Cuáles eran las preocupaciones centrales? ¿Qué se decidió?
4. En un puesto de periódicos o una librería compra la LGEEPA, lee uno de los artículos de la ley y explica si el contenido del artículo resuelve el problema al que se refiere. Si lo prefieres, consulta el texto de la LGEEPA en internet.
5. Busca el texto de la Norma Oficial Mexicana sobre Especies en Peligro de Extinción e investiga la definición de las distintas categorías que se usan para clasificar a las especies de plantas y animales que aparecen listadas en ese documento.

GLOSARIO

Abierto (sistema)	Sistema que permite la entrada y salida de materia y energía.
Abiótico	Relacionado con el ambiente fisicoquímico (no biológico) del medio.
Aclimatarse	Proceso de ajuste fisiológico de un organismo a nuevas condiciones ambientales.
Adaptado	Organismo que presenta rasgos que son producto del cambio evolutivo que ocurre como resultado de la acción de la selección natural.
Agricultura de roza, tumba y quema	<i>Véase</i> Roza, tumba y quema.
Agroecología	Ecología aplicada a los sistemas agrícolas.
Agroquímicos (productos)	Sustancias químicas de origen industrial que se utilizan como fertilizantes o pesticidas en los campos de cultivo.
Agrosistema	Tipo de ecosistema conformado por campos dedicados a actividades agrícolas, pastoriles o silvícolas.
Aleatorio	Proceso que ocurre al azar.
Alelopatía	Producción de sustancias repelentes (alelopáticas) que impiden el establecimiento de otras especies en la cercanía.
Altitud	Elevación con respecto al nivel del mar.
Amaranto	Planta herbácea malezoide del género <i>Amaranthus</i> , de cuyas semillas se obtiene el alimento tradicional conocido como “alegría”.
Amensalismo	Tipo de interacción (-, 0) en la que una especie sale perjudicada y la otra no resulta afectada en ningún sentido.
Amplificación trófica	Fenómeno que consiste en el aumento de la concentración de contaminantes (como el DDT y sustancias radiactivas) en los organismos conforme éstos pertenecen a niveles tróficos cada vez más altos.

Anoxia	Condición de ausencia total de oxígeno.
Artrópodos	Grupo (<i>phylum</i>) de invertebrados al que pertenecen los insectos, crustáceos, arañas y ácaros, caracterizado por la presencia de apéndices articulados.
Autoaclareo	Disminución de la densidad de una población conforme los individuos crecen.
Autótrofos	Organismos capaces de generar sus propios carbohidratos a partir de la fotosíntesis o la quimiosíntesis.
Azolve	Obstrucción del cauce de un río o de un cuerpo de agua con lodo o basura.
Azúcares	Carbohidratos. Compuestos orgánicos que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno.
Banco de germoplasma	Reservorio de propágulos (generalmente semillas) que almacena parte de la riqueza biótica.
Banco de semillas	Conjunto de semillas acumuladas en el suelo con el potencial de dar origen a nuevos individuos que se establezcan en la comunidad.
Barbecho	Proceso que consiste en arar la tierra y prepararla para la siembra, o bien, para que se meteorice y descanse.
Bentónico	Referente a los habitantes del piso de un cuerpo de agua marino y de agua dulce.
Biodegradable	Capacidad que tienen ciertos productos elaborados por el hombre de desintegrarse por la acción de los organismos saprófagos.
Biodigestor	Dispositivo usado para producir biogás y residuos que se usan como fertilizantes a partir de desechos orgánicos.
Biodiversidad	Variedad de expresiones de la materia viva que incluye diversidad de genes, poblaciones, especies y ecosistemas, entre otras.
Bioindicadores	Especies cuya presencia en un ambiente dado está asociada a la incidencia de algún factor ambiental particular (por ejemplo, incendios, contaminación por plomo, o altos niveles de perturbación).
Bioma	Región amplia del planeta que tiene elementos bióticos similares y que corresponde a una región climática particular.
Biomasa	Contenido de materia que compone a un ser vivo. Se mide obteniendo el peso de los organismos después de extraerles toda el agua.
Biomasa en pie	Cantidad de biomasa por unidad de superficie que contiene un ecosistema.
Biorremediación	Proceso que implica el uso de seres vivos (por ejemplo, bacterias, algas, plantas, etcétera) con la finalidad de recuperar la salud y el buen estado de un ecosistema.
Biosfera	Parte del planeta habitada por seres vivos.
Biótico	Referente a los seres vivos.
Bosque mesófilo de montaña	Tipo de vegetación común en las zonas montañosas húmedas de regiones tropicales, ubicado en franjas de mediana altitud. En ellos convergen especies tropicales y de zonas templadas. Se caracteriza por tener una gran abundancia de helechos y epífitas.
Bosque secundario	Bosque que se desarrolla después de un disturbio, esto es, mediante un proceso de sucesión secundaria.

Cadena alimentaria	Cadena trófica. Ruta lineal que siguen la materia y la energía alimenticia dentro de un ecosistema a través del paso de un individuo a otro que se alimenta del primero.
Cadena trófica	Véase Cadena alimentaria.
Caducifolio	Característica de la vegetación que consiste en que ésta pierde las hojas durante una época del año, generalmente la más fría o la más seca.
Caloría	Unidad utilizada para la medición de la energía. Una caloría equivale a la energía necesaria para elevar la temperatura de 1 litro de agua de 15 a 16°C.
Cambio climático	Modificación de las condiciones climáticas globales de la Tierra. En las últimas décadas este cambio ha sido producto de las actividades de los seres humanos. Como resultado del cambio climático, se prevé un aumento global de la temperatura de la atmósfera en el mediano plazo provocado por el efecto invernadero.
Cambio de uso de suelo	Proceso mediante el cual una sociedad humana cambia el uso de un terreno; por ejemplo, cuando un terreno de vegetación natural se destina a la agricultura, la ganadería, o bien, para uso habitacional o comercial, entre otros.
Capa de ozono	Capa externa de la atmósfera con una alta concentración de ozono, que es oxígeno triatómico (O ₃). La presencia de esta capa disminuye la intensidad de la radiación ultravioleta proveniente del Sol que llega a la superficie de la Tierra.
Capacidad de carga	Tamaño o densidad máxima de una población que puede soportar un ambiente dado. Es la densidad poblacional a la cual la tasa de nacimientos es igual a la tasa de muertes y, por lo tanto, el crecimiento poblacional es de cero.
Carroñero	Animal que se alimenta de organismos muertos.
Catástrofe	Disturbio ambiental de gran escala que por lo general se presenta muy esporádicamente.
Celulosa	Carbohidrato complejo que forma la madera y otros tejidos duros de las plantas.
Centro de endemismo	Lugar del planeta que alberga una gran cantidad de especies endémicas.
Cerrado (sistema)	Sistema que no permite la entrada ni salida de materia o energía.
Ciclos atmosféricos	Ciclos biogeoquímicos de elementos y compuestos que forman gases, los cuales tienen la capacidad de moverse alrededor de la Tierra a través de la atmósfera. También se conocen como ciclos gaseosos o globales. Por ejemplo, el ciclo del nitrógeno y del agua.
Ciclos biogeoquímicos	Rutas por las que se desplaza la materia a través de los componentes biológicos, geológicos y químicos de los ecosistemas y de la biosfera.
Ciclos sedimentarios	Ciclos biogeoquímicos de elementos no gaseosos que se llevan a cabo en zonas muy localizadas de los ecosistemas, pues se trata de elementos incapaces de moverse por la atmósfera. También se les llama ciclos locales.
Clima	Estado promedio de las condiciones de la atmósfera en un determinado lugar.

Clímax	Comunidad estable hipotética que representa el estado final de la sucesión.
Clorofila	Compuesto presente en los cloroplastos de las células vegetales; es el principal responsable de la captación de energía luminosa durante la fotosíntesis.
Cohorte	Conjunto de individuos que nacieron aproximadamente al mismo tiempo en una población.
Comensalismo	Tipo de interacción (+, 0) en el que una especie sale beneficiada y la otra no resulta afectada en ningún sentido.
Comercio justo	Tipo de comercio en el que se busca pagar un precio adecuado a los productores, reduciendo el pago a intermediarios y permitiendo que las ganancias lleguen a los que menos tienen.
Compensación	Amortiguamiento del efecto negativo que producen los herbívoros (o algún otro tipo de interacción biótica).
Competencia	Interacción entre individuos (ya sea de la misma especie o de diferentes especies) que surge porque requieren de un mismo recurso, en tanto que la disponibilidad de éste es limitada.
Competencia por explotación	Competencia entre dos o más poblaciones que se da conforme cada una de ellas consume un recurso y, por lo tanto, hace que disminuya su disponibilidad para la otra población (o las otras poblaciones).
Competencia por interferencia	Competencia entre dos o más poblaciones en la que cada una de ellas obstaculiza directamente a las otras el acceso a los recursos.
Compuestos clorofluorocarbonados	Hidrocarburos, también llamados CFC, que contienen cloro y flúor; se usan para formar aerosoles. El uso de estos compuestos se ha prohibido ya que provocan el adelgazamiento de la capa de ozono.
Comunidad	Conjunto de poblaciones que coexisten en tiempo y espacio que mantienen interacciones entre sí.
Comunidad biótica	<i>Véase</i> Comunidad.
Comunidad ecológica	<i>Véase</i> Comunidad.
Condiciones	Factores ambientales a los cuales responden los organismos.
Conectancia	Propiedad de un ecosistema que mide el grado de enlace entre poblaciones que se alimentan unas de otras.
Conferencias de las partes	Reuniones en las que participan varios países (partes) que tienen como finalidad dar seguimiento a los acuerdos alcanzados en materia ambiental.
Conífera	Árboles y arbustos del orden Pinophyta, como los pinos, los cipreses y las araucarias; tienen conos (o piñas) como estructuras reproductivas y el contorno de su copa es cónico.
Consumidores	Organismos que para sobrevivir requieren alimentarse de otro organismo. También se les llama heterótrofos.
Consumidores primarios	Organismos heterótrofos que se alimentan de los productores primarios.
Consumidores secundarios	Organismos heterótrofos que se alimentan de los consumidores primarios.
Consumismo	Actitud de comprar de manera compulsiva.

Contaminación	Presencia de un factor ambiental físico (como el ruido), químico (como los ácidos) o biológico (como las bacterias patógenas), que por encima de cierto nivel causa un daño notorio a los organismos.
Contaminantes	Sustancias tóxicas o condiciones ambientales que, al rebasar determinados niveles, alteran las condiciones originales de los ecosistemas y dañan a los organismos, reduciendo su desempeño y en ocasiones provocando su muerte.
Contaminantes artificiales	Son aquellos que se originan a partir de las actividades humanas, tales como la industria, los transportes, la agricultura, la ganadería y la construcción.
Contaminantes naturales	Son aquellos que se originan a partir de acontecimientos en los que no interviene el ser humano (por ejemplo, erupciones volcánicas e incendios naturales).
Contingencia ambiental	Periodo en el que las condiciones de contaminación atmosférica son tan altas que ponen en riesgo la salud de los habitantes de un lugar.
Control biológico	Tipo de control de plagas que se basa en el uso de depredadores, parasitoides, parásitos, así como patógenos tales como hongos, bacterias y virus, para combatir a una especie indeseada.
Convención	<i>Véase</i> Convenio.
Convenio	Serie de acuerdos formales en materia ambiental que se suscriben en reuniones en las cuales participan representantes de varios países.
Crecimiento demográfico	Es el cambio en el número de habitantes que viven en un determinado territorio.
Crustáceos	Grupo de organismos invertebrados del phylum Arthropoda, fundamentalmente acuáticos, al que pertenecen los camarones, langostinos y cangrejos.
Cuidado parental	Conducta que tienen los padres de muchos animales, consistente en el cuidado y la atención que prodigan a sus crías.
Cumbre	Reunión internacional en la que participan los jefes de Estado (presidentes o primeros ministros) de cada país.
Curva de supervivencia	Representación gráfica del comportamiento que tiene la supervivencia de una población a través del tiempo.
Curvas de tolerancia	Curva generalmente con forma de campana que indica el nivel de desempeño de los organismos en un gradiente de condiciones ambientales.
Declinación de los bosques	Deterioro paulatino del bosque causado por la incidencia de enfermedades que llevan a la muerte de los árboles.
Deforestación	Remoción de la capa de vegetación natural en un ecosistema natural terrestre.
Degradación	Retroceso de la capacidad de un ecosistema natural para recuperarse después de un disturbio.
Densodependiente	Se dice de aquello que depende o cambia en función de la densidad poblacional.
Densoindependiente	Se dice de aquello que es independiente o que no se modifica al cambiar la densidad poblacional.

Depredación	Consumo de un organismo por otro.
Depredador	En una interacción de depredación, es el organismo consumidor, el cual se ve beneficiado por el consumo.
Depredador tope	Especie que al interior de la cadena trófica de un ecosistema se ubica en el nivel superior, de forma que no hay depredadores por encima de ella.
Desarrollo sostenible	<i>Véase</i> Sostenible.
Desarrollo sustentable	<i>Véase</i> Sostenible.
Descomponedor	Organismo que reduce la materia viva a constituyentes cada vez más simples. También se les llama organismos desintegradores.
Desempeño	Medida del éxito de los organismos en términos de su supervivencia, crecimiento y reproducción.
Desintegrador	<i>Véase</i> Descomponedor.
Desnitrificación	Proceso de conversión de nitratos, nitritos y amonios a nitrógeno atmosférico por parte de ciertas bacterias.
Deterioro ambiental	Modificación de las propiedades del ambiente que da lugar a una reducción de su calidad para los seres vivos y para el ser humano.
Detritívoro	Organismos que se alimentan de restos orgánicos.
Dispersión	Transporte o movimiento de los organismos a través del espacio, a veces a grandes distancias.
Disturbio	Acontecimiento o fenómeno que produce cambios en un sistema ecológico, muchas veces provocando la muerte de algunos organismos, entre otros efectos.
Diversa (comunidad)	Comunidad biológica que presenta una gran variedad de especies.
Diversidad	Variedad de especies. En un sentido más amplio, representa la variedad de cosas u organismos distintos. En ocasiones contempla la distribución numérica de los individuos entre las especies.
Diversidad alfa	Variedad de especies que existen en una localidad particular.
Diversidad beta	Medida de la variación de la composición de especies que hay entre localidades.
Diversidad de ecosistemas	Variedad de ecosistemas que presenta una región del planeta.
Diversidad de especies	Variedad de especies que presenta una comunidad.
Diversidad de poblaciones	Variedad de poblaciones distintas que registra una especie particular.
Diversidad gamma	Medida de la variedad de organismos existentes en una zona muy amplia del planeta, como una región o un país.
Diversidad genética	Variedad de genes que presenta una población.
Dosel	Parte alta de la vegetación; generalmente se refiere a las copas de los árboles. A veces se le define como el conjunto de todas las partes aéreas de la vegetación, excluyendo sólo a las raíces y otras partes subterráneas.
Ecofisiología	Rama de la autoecología que estudia las características fisiológicas de los individuos y su relación con el ambiente en el que viven.
Ecologista	Persona de la sociedad civil que sostiene acciones de protección y defensa del ambiente y los ecosistemas naturales.

Ecosistema	Sistema abierto conformado por el conjunto de las comunidades vivas y su entorno abiótico, dentro del cual ocurren movimientos de materia y energía.
Ecotecnias	Conjunto de técnicas amigables con el medio ambiente y acordes con las políticas de desarrollo sustentable de las comunidades humanas, como la agroecología y los sistemas silvopastoriles.
Ecotécnicas	<i>Véase</i> Ecotecnias.
Ectotérmicos	Organismos cuya temperatura corporal está determinada por la del medio externo.
Ectotermos	<i>Véase</i> Ectotérmico.
Edáfico	Adjetivo que concierne al suelo.
Efecto de borde	Cambio en las condiciones bióticas y abióticas en las orillas de los ecosistemas.
Efecto invernadero	Calentamiento de la atmósfera como producto de la absorción de la energía calorífica por parte de ciertos gases (como el dióxido de carbono) que no permiten su disipación hacia el espacio exterior.
Eficiencia de transferencia trófica	Porcentaje de la energía producida por un nivel trófico que se destina a la producción secundaria de los organismos del siguiente nivel.
Eficiencia ecológica	Medida de la cantidad de energía que puede ser transferida entre niveles tróficos, y de la proporción de la energía que se usa en cada nivel trófico respecto a la que se desperdicia por diferentes razones.
Elementos del clima	Serie de variables que describen las propiedades físicas de la atmósfera, tales como temperatura, precipitación, humedad, fuerza del viento y radiación solar, entre otras.
Empírico	Interpretación del funcionamiento de la naturaleza que se basa únicamente en la experiencia.
Endémica	Especie que se presenta sólo en una área geográfica restringida del planeta.
Endotérmicos	Organismos capaces de mantener fisiológicamente su temperatura corporal, independientemente de la temperatura del ambiente.
Endotermos	<i>Véase</i> Endotérmicos.
Energía	Capacidad de un sistema físico para realizar trabajo.
Epífita	Planta que vive sobre otras plantas, sin consumir nada de ellas. Las epífitas rara vez sobreviven cuando se encuentran en contacto con el suelo.
Erosión	Pérdida parcial o total del suelo fértil que se debe al acarreo de partículas hacia el exterior del sitio por efecto del viento, de la lluvia y del agua de escurrimiento, o por la gravedad.
Escala global	Nivel de gran extensión geográfica en el que ocurren procesos ecológicos, como el deterioro ambiental.
Escala local	Nivel de extensión espacial muy localizado en el que ocurren procesos ecológicos, como el deterioro ambiental.
Esencial (nutriente)	Nutriente que es requerido por los organismos en cantidades relativamente grandes y que es necesario para que éstos puedan vivir.
Especiación	Proceso evolutivo de formación de nuevas especies.

Especie	Conjunto de individuos parecidos morfológicamente y entre los cuales existe la posibilidad de reproducirse y dejar descendencia fértil.
Especie dominante	Especie que, al interior de una comunidad, tiene una alta densidad, frecuencia o biomasa, en comparación con las demás.
Especie exótica	Especie que está presente en un sitio o una región, pero que no es nativa o propia del lugar, sino que fue transportada de forma deliberada o accidental por los seres humanos desde sus regiones de origen.
Especie indicadora	Véase Bioindicadores.
Especie nativa	Especie que está presente en un sitio o una región, la cual corresponde con el sitio en el que esa especie ha evolucionado.
Estado del tiempo	Véase Tiempo.
Estomas	Estructuras presentes en las hojas en forma de aberturas que permiten regular el intercambio gaseoso entre el interior y el exterior de la hoja.
Estructura cuantitativa	Número relativo de individuos o biomasa relativa de cada especie dentro de una comunidad ecológica.
Estructura espacial	Modo en el que están distribuidas las poblaciones en el espacio tridimensional que ocupa una comunidad.
Estructura horizontal	Manera en la que se distribuyen en el espacio los organismos de una población o una comunidad dentro del área que ésta ocupa.
Estructura trófica	Tejido o red de conexiones entre los diferentes organismos de un ecosistema que se alimentan unos de otros.
Estructura vertical	Distribución diferencial de los organismos o de las partes de organismos (como las copas de los árboles) de una comunidad a lo largo de un eje vertical de altura respecto al suelo.
Etapas serales	Fase de desarrollo de una comunidad que corresponde a un cierto tiempo o edad a partir del inicio de un proceso sucesional.
Etapas serales maduras	Fases avanzadas de desarrollo de una comunidad dentro de un proceso sucesional.
Etapas serales tardías	Véase Fases serales maduras.
Etapas serales tempranas	Fases iniciales de desarrollo de una comunidad dentro de un proceso sucesional.
Eucariontes	Organismos unicelulares o pluricelulares que tienen células con núcleo y otros organelos; ejemplos de ellos son los protozoarios, las algas, los hongos, las plantas y los animales.
Evolución	Proceso de cambio de los organismos a través del tiempo.
Exclusión competitiva	Proceso que ocurre como consecuencia de la competencia entre dos especies de requerimientos ecológicos muy similares y que culmina con la desaparición de una de ellas.
Extinción en masa	Desaparición simultánea de una gran cantidad de especies en el planeta en algunos momentos de su historia geológica.
Factor limitante	Recurso que se encuentra en baja disponibilidad, o condición que se encuentra en un nivel extremo. En cualquier caso, el resultado es el desempeño subóptimo de los organismos.
Facultativo	No necesario. Se puede referir a procesos, a características o a interacciones bióticas.

Fecundidad	Capacidad de producir descendencia. Número de descendientes que deja un organismo.
Fijadores de nitrógeno	Bacterias que poseen un metabolismo capaz de transformar el nitrógeno molecular atmosférico (N ₂) a nitratos y nitritos.
Fitoplancton	Conjunto de organismos fotosintéticos microscópicos que viven suspendidos en el agua en los ecosistemas acuáticos.
Foliolo	Cada uno de los segmentos de la lámina foliar que conforman en conjunto una hoja compuesta.
Fósil	Evidencias de la presencia y las actividades de los organismos que vivieron hace más de 10,000 años, las cuales generalmente se hallan en las rocas.
Fotoperiodo	Relación entre las horas de luz y de oscuridad en un día.
Fotosíntesis	Proceso fisiológico mediante el cual las plantas, las algas y muchos organismos unicelulares utilizan la luz solar para convertir el CO ₂ y el agua en carbohidratos.
Fragmentación	División de la superficie de un ecosistema natural en porciones más pequeñas.
Gases de efecto invernadero	Gases que se presentan en la atmósfera y que absorben calor, evitando que éste se emita hacia el espacio exterior. Son responsables del calentamiento de la atmósfera conocido como efecto invernadero.
Gasificador	Aparato que convierte los desechos orgánicos en gas para consumo humano.
Generación	Grupo de organismos que nacieron más o menos al mismo tiempo.
Gestión ambiental	Realización de acciones encaminadas a lograr un ambiente adecuado para la conservación de los ecosistemas.
Globalización	Tendencia de las empresas comerciales a extenderse a escala mundial, por encima de las fronteras de cada país. También se refiere a la tendencia a homogeneizar la cultura, la lengua y las costumbres de los seres humanos, incluyendo los hábitos de consumo.
Glucólisis	También conocida como glicólisis. Secuencia enzimática que consiste en la oxidación de carbohidratos y la liberación de dióxido de carbono.
Gradiente ambiental	Variación progresiva creciente o decreciente de una variable ambiental a través del espacio.
Gramínea	Familia de angiospermas a la que pertenecen los pastos, los bambúes y la caña de azúcar.
Hemiparásitas	Plantas parásitas que producen sus propios fotosintatos gracias a que poseen tejido fotosintético, al tiempo que obtienen algunos recursos (como ciertos nutrientes) tomándolos directamente del sistema vascular de la planta sobre la que viven.
Heterótrofos	Organismos que no pueden fabricar sus propios alimentos. Productores secundarios.
Hipoxia	Reducción en la disponibilidad de oxígeno.
Holoparásitas	Plantas parásitas que carecen de tejidos fotosintéticos y, por lo tanto, dependen totalmente de los recursos que pueden obtener de las plantas a las que parasitan.

Hospedero	Organismo que alberga parásitos y parasitoides.
Ígneas (rocas)	Rocas que se formaron directamente a partir del magma, ya sea sobre la corteza terrestre, como producto de erupciones volcánicas (rocas ígneas extrusivas), o en el interior del manto, bajo la corteza terrestre, y emergieron posteriormente (intrusivas).
Índice de diversidad	Medida de la diversidad de especies de una comunidad biótica.
Individuo	Cada ser vivo que no puede descomponerse en otros más simples.
Instrumentos ambientales	Procedimientos legales, regulatorios o indicativos que están orientados a la prevención del deterioro ambiental.
Intemperismo	Erosión que se produce como resultado de la exposición a la intemperie, es decir, a las condiciones meteorológicas.
Inversión térmica	Fenómeno meteorológico que consiste en que el aire más frío y más pesado se acumula en el fondo de valles y cuencas, mientras que el aire caliente se mantiene en partes relativamente más altas de la atmósfera.
Isótopo radiactivo	Forma de algún elemento químico que se caracteriza por la emisión de partículas subatómicas (radiactividad). Los isótopos de un elemento tienen el mismo número de protones en su núcleo atómico, pero varían en el número de neutrones.
Jale	Acumulación de material de desecho producto de la actividad minera.
Joule	Unidad energética que representa la energía necesaria para levantar una masa de 1 gramo a 1 cm de altura contra la fuerza de gravedad de la Tierra.
Latitud	Posición sobre la Tierra (hacia el norte o hacia el sur) con respecto al ecuador.
Legislación ambiental	Conjunto de leyes formuladas con la finalidad de proteger el ambiente.
Ley	Precepto dictado por la autoridad de un país en el que se ordenan o prohíben ciertas conductas y acciones.
Ley de la tolerancia de Shelford	Principio de la ecofisiología que sostiene que el rendimiento de un organismo varía en un gradiente de condiciones en forma de campana: el desempeño es máximo en condiciones intermedias y muy bajo en condiciones extremas.
Ley del 10%	Principio formulado por Elton que sostiene que el porcentaje de energía producida en un nivel trófico que se transfiere al siguiente es de alrededor del 10%.
Ley del mínimo	Principio de la ecofisiología que dice que el rendimiento de un organismo depende del recurso que presenta menor disponibilidad en un hábitat, es decir, del que más limita su desempeño.
Líquenes	Organismos constituidos por una asociación mutualista entre algas fotosintéticas y hongos que capturan nutrientes.
Longevidad	Duración de la vida, ya sea de un organismo o de las partes de éste (por ejemplo, de las hojas).
Lluvia ácida	Caída de agua que acarrea consigo ácidos dañinos para el suelo, los reservorios de agua dulce y los organismos.

Macroparásitos	Parásitos detectables a simple vista, como las lombrices intestinales, las pulgas y los piojos.
Manejo silvícola	Conjunto de prácticas orientadas a la explotación ordenada de los bosques.
Mantillo	Capa de desechos vegetales que cubre el suelo.
Manto	Parte del globo terrestre ubicada entre el núcleo y la corteza.
Mantos acuíferos	Capas de agua dulce que yace en el subsuelo.
Mantos freáticos	<i>Véase</i> Mantos acuíferos.
Marco jurídico	Conjunto de reglas que ordenan la conducta de los individuos y las comunidades humanas de una sociedad dentro de una nación.
Matorral xerófilo	Tipo de vegetación propio de zonas áridas y semiáridas, caracterizado por la presencia de especies suculentas, espinosas y generalmente de baja estatura.
Meristemo	Conjunto de células indiferenciadas que se presentan en algunas partes de las plantas, a partir de las cuales puede producirse tejido nuevo.
Metamórficas (rocas)	Rocas cuyas características originales han sido modificadas por la presión y las altas temperaturas que se registran en las profundidades de la corteza terrestre. Comúnmente durante la orogénesis (proceso de formación de las montañas), las rocas originalmente ígneas o sedimentarias se transforman en metamórficas.
Meteorología	Estudio científico de las propiedades físicas de la atmósfera, muy relacionado con el análisis del clima, el cual, a la vez, es el objeto de estudio de la climatología.
Microparásitos	Parásitos microscópicos como virus, bacterias y protozoarios.
Monoclímax	Teoría que establece que el final de un proceso sucesional se asienta una sola comunidad.
Musgo	Plantas briofitas que forman una alfombra de cortos y apretados tallos que viven en ambientes húmedos y sombríos sobre el suelo, los troncos, las rocas y las paredes.
Mutualismo	Interacción entre individuos de diferentes especies que implica un beneficio para ambas, pues cada una mejora su desempeño en presencia de la otra.
Nicho ecológico	Conjunto total de condiciones y recursos que definen el papel ecológico que desempeña una especie en la naturaleza y determinan en dónde puede vivir. No debe confundirse con hábitat.
Nicho fundamental	También llamado nicho ecológico precompetitivo. Es aquel que resulta exclusivamente de las características fisiológicas de las especies.
Nicho realizado	También llamado nicho ecológico postcompetitivo. Es la modificación del nicho fundamental que resulta de la interacción con otras especies, en particular de la competencia.
Nitrificación	Proceso metabólico que llevan a cabo algunas bacterias y que consiste en la captura y fijación de nitrógeno atmosférico, formando sales de nitrógeno asimilables para las plantas.

Nivel de organización	Grado de complejidad con el que se estudia la materia viva y que está definido por un conjunto de propiedades específicas (propiedades emergentes). En orden de complejidad creciente, se reconocen los siguientes: moléculas orgánicas, organelos, células, tejidos, órganos, individuos, poblaciones, comunidades, ecosistemas y biosfera.
Nivel trófico	Posición que guardan los organismos o sus actividades alimenticias en la cadena alimentaria. Los organismos del primer nivel trófico son los productores primarios, los del segundo nivel son los consumidores primarios y los del tercero son los consumidores secundarios.
No esencial (nutriente)	Nutriente que es necesario para los organismos sólo en concentraciones muy pequeñas. También se le conoce como oligoelemento.
Norma	Regla general sobre la manera en que se debe proceder o no en materia ambiental, social, política, etcétera.
Obligado	Necesario o forzoso (a diferencia de lo facultativo). Se aplica a procesos, características o interacciones bióticas.
Organizaciones no gubernamentales (ONG)	Grupos sociales constituidos específicamente para formular y ejecutar programas de desarrollo, difusión, capacitación e investigación aplicada. En el contexto de las cuestiones ambientales, existen ONG que buscan investigar o cuidar ciertos asuntos ambientales en particular.
Ovipositar	Acto de depositar los huevecillos.
Países megadiversos	Son aquellos que tienen una diversidad de especies mayor de la esperada de acuerdo con el tamaño de su territorio, en términos de la proporción de la tierra emergida que representan.
Partes	Cada uno de los países participantes que suscriben convenios o convenciones en materia ambiental.
Participantes	Cada uno de los países que acuden a suscribir un convenio en materia ambiental.
Patrones de consumo	Modo típico mediante el cual las comunidades humanas producen y consumen satisfactores para llevar a cabo su vida cotidiana utilizando energía, agua y materias primas.
Pedogénesis	Proceso de formación del suelo.
Pelágicos	Organismos acuáticos que viven lejos de las costas en aguas superficiales e intermedias.
Perennifolio	De hojas perennes. Característica de la vegetación que consiste en que ésta no pierde las hojas en alguna época particular del año.
Permafrost	Capa de hielo presente en las capas superficiales de suelo de lugares fríos y glaciares.
Perturbación	Consecuencia (siempre dañina) de un disturbio sobre una comunidad o ecosistema.
Pesquerías	Conjunto de actividades encaminadas a la captura y comercialización de recursos marinos.
Phyla	Filos; plural de <i>phylum</i> (o filo). Es una categoría taxonómica que está entre el Reino y la Clase, utilizada para subdividir el Reino Animal y el Reino Protistas; para el Reino Plantae se emplea el término División.

Pioneras	Especies que colonizan los espacios que se abren en una comunidad en las primeras fases de sucesión ecológica.
Pirámide trófica	Representación gráfica formada por rectángulos horizontales superpuestos que representan los niveles tróficos de un ecosistema. Ésta adquiere la forma aproximada de una pirámide por el hecho de que las abundancias relativas, la productividad y la biomasa de los organismos disminuyen conforme se avanza hacia niveles tróficos superiores.
Piscívoro	Animal que se alimenta de peces.
Placas tectónicas	Grandes bloques de la corteza terrestre (litosfera) que forman masas semisólidas, las cuales se mueven como una unidad, desplazándose sobre el manto terrestre.
Plancton	Conjunto de organismos que flotan en aguas marinas o dulces.
Plantaciones orgánicas	Cultivos de especies arbóreas con la finalidad de obtener productos forestales, a base solamente de productos naturales (es decir, sin utilizar fertilizantes ni pesticidas de origen sintético).
Plántula	Organismo que emerge de una semilla recién germinada. Se trata de una planta muy joven, cuyo metabolismo aún depende de los nutrientes contenidos en el endospermo o los cotiledones de la semilla.
Población	Conjunto de organismos de una sola especie que viven en el mismo espacio y tiempo.
Policlímax	Teoría que establece que el final de un proceso sucesional no es forzosamente una sola comunidad, sino que éste puede terminar en una de varias comunidades hipotéticas.
Policultivo	Sistema agrícola en el cual se siembran varios cultivos simultáneamente en un mismo terreno.
Precipitación pluvial	Lluvia. Volumen de agua que cae en una zona por unidad de área.
Presa	En una relación de depredación, es el organismo que es consumido por el depredador.
Presión de selección	Acción que ejerce un factor ambiental sobre los organismos, dando lugar a un proceso de selección natural en el que sólo algunos miembros de la población sobrevivirán y dejarán descendencia. El resultado de este proceso es un cambio evolutivo.
Principio de exclusión competitiva	<i>Véase</i> Principio de Gause.
Principio de Gause	Principio de exclusión competitiva que dice que dos especies no pueden ocupar el mismo nicho, sino que sólo pueden coexistir gracias a la diferenciación de nichos. Cuando dos especies ocupan el mismo nicho, una de ellas excluye a la otra.
Procariontes	Organismos unicelulares con células que carecen de núcleo y otros organelos, como las bacterias y las algas cianofitas.
Producción	Cantidad de materia o energía por unidad de área que almacenan los seres vivos de un ecosistema.
Producción secundaria	Cantidad de materia o energía por unidad de área que almacenan los organismos heterótrofos.
Productividad	Velocidad a la que la materia o energía es almacenada por los seres vivos de un ecosistema.

Productividad primaria	Tasa de fijación de materia o energía por parte de los organismos autótrofos, es decir, los productores primarios.
Productividad primaria bruta	Velocidad de fijación de materia o energía por parte de los organismos autótrofos que será destinada a la producción de tejidos nuevos y al metabolismo.
Productividad primaria neta	Velocidad de fijación de materia o energía por parte de los organismos autótrofos destinada a la producción de tejidos. Esta materia es la que está disponible para ser consumida por los heterótrofos.
Productividad secundaria	Velocidad de fijación de materia o energía por parte de los organismos heterótrofos, es decir, los consumidores.
Producto interno bruto (PIB)	Cantidad de dinero que valen los servicios y bienes producidos por un país durante un año.
Productor primario	Organismo autótrofo que produce sus propios alimentos por fotosíntesis o quimiosíntesis.
Productor secundario	Organismo heterótrofo, es decir, que produce sus tejidos a partir del consumo de otros organismos.
Propiedad emergente	Característica propia de un nivel de organización; se presenta sólo en ese nivel, es decir, “emerge” al cambiar de un nivel de organización a otro.
Protocolo	Convenio internacional en los que se definen compromisos puntuales que se precisan mediante metas y fechas de cumplimiento.
Protozoarios	Organismos unicelulares que presentan un núcleo verdadero (es decir, son eucariontes); muchos se desplazan con la ayuda de cilios, flagelos o pseudópodos.
Quelites	Plantas herbáceas malezoides que son comestibles cuando son tiernas.
Quimiosíntesis	Proceso metabólico que presentan algunas bacterias, mediante el cual obtienen energía química a partir de los compuestos que contienen las rocas.
R_0	<i>Véase</i> Tasa reproductiva neta.
Recurso	Componente del ambiente que los organismos consumen para sobrevivir y cuya disponibilidad disminuye al ser consumido por éstos.
Recursos forestales no maderables	Productos que se obtienen de los bosques, pero que no se utilizan para producir madera en rollo. Ejemplos de ellos son los frutos, las semillas, las hojas y las resinas.
Recursos naturales	Bienes de aprovisionamiento o suministro que ofrecen los ecosistemas, los cuales constituyen la base material del sostén de las sociedades humanas.
Recursos no maderables	<i>Véase</i> Recursos forestales no maderables.
Recursos no renovables	Componentes de la naturaleza que el ser humano extrae para satisfacer sus necesidades y que la naturaleza misma no tiene la capacidad de reponer. Ejemplos de ellos son la plata y el petróleo.
Recursos renovables	Componentes de la naturaleza que el ser humano extrae para satisfacer sus necesidades y que la misma naturaleza va reponiendo a un cierto ritmo, como resultado de sus procesos naturales.
Red alimentaria	<i>Véase</i> Red trófica.

Red trófica	Trama de conexiones entre los organismos de un ecosistema, basada en las rutas de transferencia de materia y energía entre ellos.
Reforestación	Acción de reintroducir árboles y otras plantas en áreas deforestadas.
Región biogeográfica	Zona amplia del planeta representativa de una unidad ecológica, caracterizada por sus elementos bióticos y abióticos particulares.
Regla de las tres erres	Reducir, reutilizar y reciclar son las acciones que se deben tomar en cuenta para controlar el problema de la contaminación mundial.
Reglamento	Conjunto ordenado de reglas o preceptos.
Regulación	Proceso que impide que las poblaciones crezcan indefinidamente; a bajas densidades la población crece, pero a altas densidades la población decrece, manteniéndose siempre cerca de su capacidad de carga.
Respuesta inmune	Identificación y eliminación de patógenos mediante los mecanismos de protección que tiene un organismo que se enfrenta a infecciones.
Restauración ecológica	Conjunto de acciones encaminadas a recuperar total o parcialmente la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas deteriorados por algún disturbio.
Revolución verde	Modelo tecnológico basado en el empleo de técnicas de producción avanzadas, como el uso de maquinaria, la selección genética de cultivos, el riego artificial y el uso masivo de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, que provocó un incremento de la producción agrícola en países subdesarrollados en la segunda mitad del siglo xx .
Riqueza	Véase Riqueza específica.
Riqueza específica	Número de especies que tiene una comunidad biótica.
Roca madre	Sustrato rocoso presente en una región, de cuya erosión depende la formación del suelo; por consiguiente, determina muchas de las características de este último, como el tipo de sales minerales que contiene.
Roza, tumba y quema (agricultura de)	Tecnología agrícola tradicional de apertura y preparación de campos de cultivo. Consiste en el derrumbe de árboles, el corte de arbustos y hierbas, y la quema de todo este material vegetal. A la larga, estos los campos se abandonan para su regeneración natural, por lo que también se le conoce como <i>agricultura trashumante</i> .
Ruderal	Plantas que crecen en sitios perturbados, por lo que se encuentran en comunidades de etapas serales tempranas.
Salinización	Acumulación de sales en el suelo, frecuentemente como producto del riego con agua que presenta altos contenidos de sales. Este proceso lleva a la pérdida de la productividad del suelo, al impedir el establecimiento de muchas especies de plantas.
Saprófago	Organismos que se alimentan de productos sin vida (como cadáveres, hojarasca y heces fecales) derivados de otros seres vivos.
Savia	Líquido de composición variable que circula por el interior de las plantas. Muchas veces transporta carbohidratos, aminoácidos y hormonas.
Sedimentarias (rocas)	Rocas compuestas por materiales transformados; se forman por la acumulación y consolidación de material mineral pulverizado, depositado por la acción del agua.

Selección natural	Fuerza evolutiva que consiste en que, en ciertas condiciones ambientales, algunos de los organismos que componen una población sobreviven y dejan más descendencia que otros, dando como resultado un cambio en la composición genética de la población.
Selva tropical húmeda	Tipo de vegetación que se presenta en climas cálidos y lluviosos. Es exuberante y en ella dominan árboles de gran altura, lianas y plantas epífitas. También se le conoce como bosque tropical perennifolio o selva alta perennifolia.
Servicios ambientales	Beneficios que ofrecen los ecosistemas al ser humano y que incluyen tanto el acceso a productos particulares (madera o frutos), como el control y regulación de procesos biogeoquímicos a nivel regional (por ejemplo, el control de la erosión).
Servicios ecosistémicos	Véase Servicios ambientales.
Sésil	Se dice de los organismos que son incapaces de desplazarse de un lado a otro.
Sistema	Conjunto de partes que forman una unidad.
Sistemas de Información Geográfica (SIG)	Sistemas especializados de cómputo para el almacenamiento, la manipulación y la presentación de información geográfica.
Sistema de producción	Patrón que determina la cantidad y la manera en la cual se lleva a cabo la producción de bienes; depende necesariamente de los patrones de consumo.
Sobreexplotación	Extracción intensiva de materias primas de un ecosistema por encima de su capacidad de renovarlas.
Sombra orográfica	Efecto que consiste en que una cadena montañosa impide el paso, hacia tierra adentro, del viento húmedo proveniente de la costa. Esto provoca mayores niveles de precipitación en la ladera donde choca el viento, en comparación con la ladera opuesta.
Sostenible	Se dice de las actividades que pueden mantenerse hacia el futuro sin agotar los recursos presentes, es decir, sin afectar la posibilidad de que las generaciones futuras hagan uso de tales recursos. En ocasiones se utiliza en su lugar el término <i>sustentable</i> , que se considera un anglicismo (proveniente del inglés <i>sustainable</i>).
Subcomunidad	Componente de una comunidad biótica, delimitada por su identidad taxonómica o los recursos que utiliza.
Sucesión	Véase Sucesión ecológica.
Sucesión ecológica	Proceso de cambio direccional (es decir, no cíclico) en una comunidad ecológica a través del tiempo. Su inicio generalmente está asociado a un disturbio.
Sucesión primaria	Proceso de cambio direccional de una comunidad a partir de un disturbio que elimina todos los elementos bióticos.
Sucesión secundaria	Proceso de cambio direccional de una comunidad a partir de un disturbio que permite la permanencia de una fracción de elementos bióticos.
Suculento	Tejidos vegetales que tienen la capacidad de almacenar una gran cantidad de agua. Se llama plantas suculentas a las que presentan este tipo de tejidos, como es el caso de los cactus, los magueyes (agaves) y las crasuláceas.

Surgencia	Fenómeno que consiste en la elevación de aguas profundas cargadas de sedimentos. Se presentan en regiones costeras donde hay corrientes marinas que se alejan de la costa.
Sustentable	<i>Véase</i> Sostenible.
Tabla de vida	Formato en el que se registra la supervivencia y reproducción de organismos de diferentes categorías (de edad, de tamaño, etcétera) de una población.
Tasa de emigración	Número de individuos que salen de una población por unidad de tiempo.
Tasa de inmigración	Número de individuos que entran a una población por unidad de tiempo.
Tasa de mortalidad	Número de individuos que mueren en una población por unidad de tiempo.
Tasa de natalidad	Número de individuos que nacen en una población por unidad de tiempo.
Tasa reproductiva neta	Se abrevia como R_0 y constituye una medida de la velocidad de crecimiento de una población de una generación a otra. También se expresa como del número de descendientes que puede dejar un organismo a largo de toda su vida.
Tecnologías	Conjuntos de instrumentos y técnicas que permiten el aprovechamiento, la extracción y el uso de los recursos naturales.
Tecnologías limpias	Conjunto de técnicas de producción que no contaminan a los ecosistemas.
Tecnologías orgánicas	Conjunto de técnicas que se basan en el uso de productos (como fertilizantes y pesticidas) de origen natural, es decir, que se derivan de organismos, o que hacen uso de interacciones bióticas naturales.
Termodinámica	Rama de la física que estudia la energía y las formas de transferencia de calor.
Tiempo	Estado instantáneo de las condiciones de la atmósfera en un punto del planeta.
Tiempo generacional	Tiempo promedio que transcurre entre el nacimiento de un individuo y el nacimiento de su descendencia.
Tocón	Parte del tronco de un árbol que queda unida a la raíz cuando lo cortan.
Trampa ecológica	Lugares, como los bordes de los ecosistemas, en donde se aglutinan ciertas poblaciones, facilitando el ataque de depredadores y parásitos.
Transpiración	Liberación de vapor de agua a través de la piel de los animales o de las hojas de las plantas.
Vegetación	Conjunto de todas las plantas que crecen en una localidad o región.
Vinculante	Acuerdo de carácter obligatorio.
Ventilas hidrotermales	Grietas en la corteza terrestre que se presentan en el fondo del mar, a través de las cuales emerge agua caliente, por su cercanía con el magma.

Zona de amortiguamiento	Zona de una área natural protegida, que alberga a las zonas núcleo, dentro de la cual ciertas actividades humanas son permitidas, incluyendo las de aprovechamiento de recursos naturales.
Zona núcleo	Zona mejor conservada de una área natural protegida que aloja elementos bióticos de especial importancia, los cuales requieren protección especial; dentro de esta zona se limitan las actividades humanas que alteren sus ecosistemas.
Zooplanctívoro	Animal acuático que se alimenta de zooplancton.
Zooplancton	Conjunto de protozoarios y animales microscópicos que viven suspendidos en el agua en los ecosistemas acuáticos.