

CAPÍTULO 21

Energía y recursos minerales

Recursos renovables y no renovables

Recursos energéticos

Carbón

Petróleo y gas natural

- Formación del petróleo
- Trampas petrolíferas

Algunos efectos ambientales de la combustión

de los combustibles fósiles

- Contaminación del aire urbano
- El dióxido de carbono y el calentamiento global

Arenas asfálticas y lutitas bituminosas:

- ¿petróleo para el futuro?
- Arenas asfálticas
- Lutitas bituminosas

Fuentes de energía alternativas

- Energía nuclear
- Energía solar
- Energía eólica

Energía hidroeléctrica

- Energía geotérmica
- Energía mareal

Recursos minerales

Recursos minerales y procesos ígneos

- Segregación magmática
- Diamantes
- Soluciones hidrotermales

Recursos minerales y procesos metamórficos

Meteorización y yacimientos de menas

- Bauxita
- Otros depósitos

Depósitos de placeres

Recursos minerales no metálicos

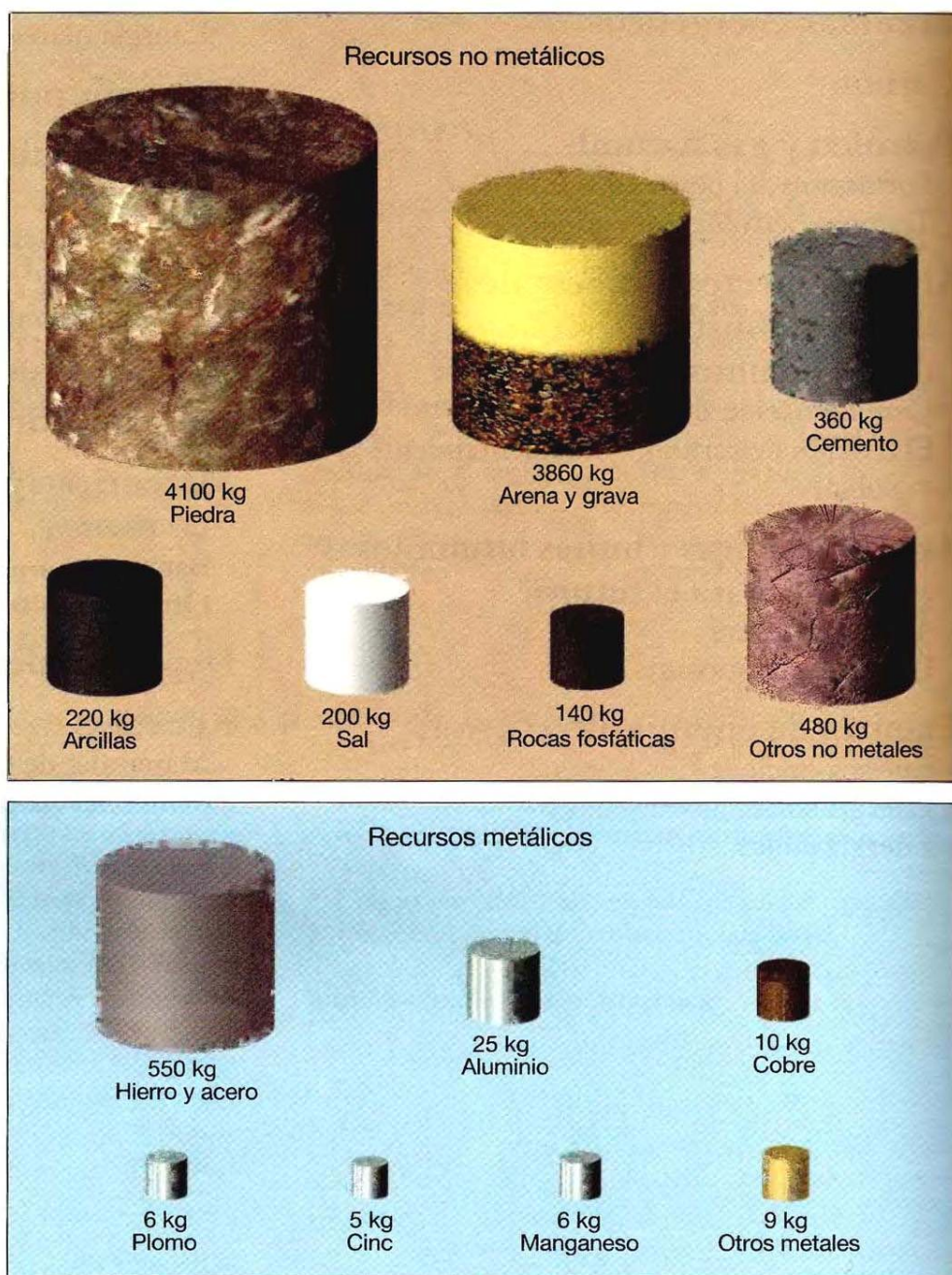
- Materiales de construcción
- Minerales industriales

Los materiales que extraemos de la Tierra son la base de la civilización moderna. Los recursos minerales y energéticos de la corteza son la materia prima a partir de la cual se fabrican los productos utilizados por la sociedad. Como la mayoría de las personas que vive en naciones muy industrializadas, quizá se dé cuenta de la cantidad de recursos que son necesarios para mantener su actual estilo de vida. En la Figura 21.1 se muestra el consumo anual *per capita* de varios recursos minerales metálicos y no metálicos en Estados Unidos. Se trata de la porción prorrateada para cada persona de los materiales que la industria necesita para proporcionar el enorme conjunto de casas, coches, electrodomésticos, cosméticos, enva-

ses, y así sucesivamente, que demanda la sociedad moderna. Las cifras son comparables a las de otros países muy industrializados, como Canadá, Australia y varias naciones de la Europa occidental.

El número de recursos minerales diferentes que necesitan las industrias modernas es grande. Aunque algunos países, entre ellos Estados Unidos, tienen depósitos sustanciales de muchos minerales importantes, ninguna nación es del todo autosuficiente. Esto refleja el hecho de que los yacimientos importantes están limitados en número y sean de aparición localizada. Todos los países deben depender del comercio internacional para satisfacer al menos alguna de sus necesidades.

► **Figura 21.1** El consumo anual *per capita* de recursos minerales metálicos y no metálicos para Estados Unidos es de casi 10.000 kilogramos (10 toneladas). Alrededor del 94 por ciento de los materiales utilizados son no metálicos. (Tomado del U. S. Bureau of Mines.)



Recursos renovables y no renovables

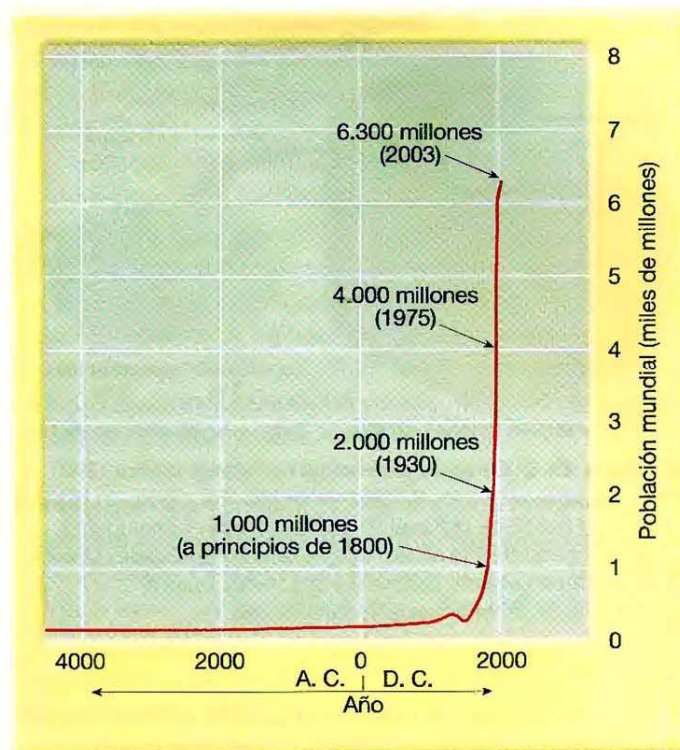
Los recursos suelen dividirse en dos amplias categorías: renovables y no renovables. Los **recursos renovables** pueden volver a recuperarse en tiempos relativamente cortos, de meses, años o decenios. Ejemplos comunes son las plantas y los animales que proporcionan alimento, las fibras naturales que sirven para la fabricación de ropas o los árboles para madera y papel. La energía procedente de las aguas de escorrentía, el viento y el sol se consideran también renovables.

Por el contrario, los **recursos no renovables** siguen formándose en la Tierra, pero los procesos que los crean son tan lentos que se tarda millones de años en acumular depósitos significativos. En lo que se refiere al ser humano, la Tierra contiene cantidades fijas de esas sustancias. Cuando se hayan extraído mediante bombeo o explotación minera los suministros actuales de la Tierra, no habrá más. Son ejemplos de estos últimos los combustibles (carbón, petróleo, gas natural) y muchos metales importantes (hierro, cobre, uranio, oro). Algunos de estos recursos no renovables, como el aluminio, pueden utilizarse una y otra vez; otros, como el petróleo no pueden reciclarse.

A veces, algunos recursos pueden pertenecer a cualquiera de las dos categorías, según cómo se utilicen. El agua subterránea es un ejemplo de ello. En los lugares donde se bombea del suelo a una velocidad que permita su recuperación, el agua subterránea puede clasificarse como recurso renovable. Sin embargo, en los lugares en los que el agua subterránea se extrae más deprisa de lo que se recarga, el nivel freático desciende de manera uniforme. En este caso se está «explotando» el agua subterránea exactamente igual que otros recursos no renovables*.

En la Figura 21.2 se pone de manifiesto el rápido crecimiento de la población de nuestro planeta. Aunque el número de habitantes no alcanzó 1.000 millones hasta el comienzo del siglo XIX, sólo 130 años después la población se duplicó hasta 2.000 millones. Entre 1930 y 1975 la cifra se volvió a duplicar, a 4.000 millones, y en 2015 más de 7.000 millones de personas poblarán la Tierra. Evidentemente, a medida que la población crece, la demanda de recursos también se amplía. Sin embargo, la velocidad de utilización de los recursos minerales y energéticos ha crecido más deprisa que la población. Esto es consecuencia de un nivel de vida cada vez mayor. En Estados Unidos, que sólo representa el 6 por ciento de la población mundial, utiliza aproximadamente el 30 por ciento de la producción anual mundial de recursos minerales y energéticos.

* El problema del descenso de los niveles freáticos se comenta en el Capítulo 11.

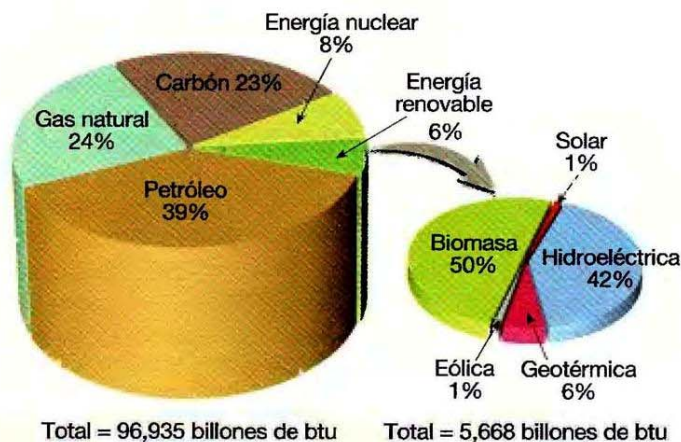


▲ **Figura 21.2** Crecimiento de la población mundial. Hasta el año 1800 no se alcanzó la cifra de 1.000 millones. En 2015, más de 7.000 millones de personas habitarán el planeta. La demanda de recursos básicos está creciendo más deprisa que la población. (Datos del Population Reference Bureau.)

¿Por cuánto tiempo los recursos que nos quedan nos permitirán mantener el nivel de vida cada vez mayor que caracteriza a los países industrializados actuales y seguirá abasteciendo las crecientes necesidades de las regiones en vías de desarrollo? ¿Cuánto deterioro ambiental estamos dispuestos a aceptar para conseguir recursos? ¿Pueden encontrarse alternativas? Si hemos de afrontar una demanda *per capita* creciente y una población mundial en crecimiento, debemos comprender cuáles son nuestros recursos y sus límites.

Recursos energéticos

El carbón, el petróleo y el gas natural son los principales combustibles de nuestra moderna economía industrial (Figura 21.3). Aproximadamente el 86 por ciento de la energía consumida en Estados Unidos en la actualidad procede de esos combustibles fósiles básicos. Aunque quizá no haya gran escasez durante muchos años, las reservas que conocemos están disminuyendo. Pese a las nuevas exploraciones, incluso en regiones muy remotas y ambientes muy severos, las nuevas fuentes de petróleo no mantienen el ritmo del consumo.



▲ **Figura 21.3** Consumo de energía de Estados Unidos, 2001. El total se aproximaba a los 97 billones de btu. Por cierto, un billón es 10^{12} , o un millón de millones. Un billón de btu es una unidad adecuada para referirse al uso total de energía en Estados Unidos. (Fuente: Departamento de Energía de Estados Unidos, Administración de Información sobre Energía.)

A menos que se descubran nuevas y grandes reservas de petróleo (lo que es posible, pero no probable), una porción mayor de nuestras necesidades futuras habrá de proceder del carbón y de fuentes de energía alternativa, como la energía nuclear, geotérmica, solar, eólica, mareal e hidroeléctrica (véase Recuadro 21.1). A veces se mencionan dos combustibles alternativos, las arenas asfálticas y las lutitas bituminosas, como nuevas fuentes prometedoras de combustibles líquidos. En las siguientes secciones, examinaremos brevemente los combustibles que han

abastecido tradicionalmente nuestras necesidades energéticas, así como las fuentes que proporcionarán una porción creciente de nuestros requisitos futuros.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

En la Figura 21.3 se muestra una biomasa como una forma de energía renovable. ¿Qué es exactamente la biomasa?

El término biomasa se refiere a la materia orgánica que puede quemarse directamente como combustible o transformarse para ser quemada. Biomasa es un término relativamente nuevo para los combustibles humanos más antiguos. Son ejemplos la madera de combustión, el carbón vegetal, los residuos de las cosechas y los restos de animales. La combustión de la biomasa tiene una importancia especial en las economías emergentes.

Carbón

Junto con el petróleo y el gas natural, al carbón se le suele denominar **combustible fósil**. Dicha designación es apropiada porque cada vez que quemamos carbón estamos utilizando la energía solar que fue almacenada por las plantas hace muchos millones de años. De hecho, estamos quemando un «fósil».



Recuadro 21.1 ► Entender la Tierra

Hidratos de gas: un combustible procedente de los sedimentos del fondo oceánico

Los *hidratos de gas* son estructuras químicas inusualmente compactas compuestas de agua y gas natural. El tipo más común de gas natural es el metano, que produce *hidrato de metano*. Los hidratos de gas natural aparecen debajo de zonas de permafrost en los continentes y bajo el fondo oceánico a profundidades inferiores a 525 metros.

La mayoría de los hidratos de gas oceánicos se crea cuando las bacterias descomponen la materia orgánica atrapada en los sedimentos del fondo oceánico, produciendo gas metano con pequeñas cantidades de etano y propano. Estos gases se combinan con el agua en los sedimentos de las profundidades oceánicas

(donde las presiones son elevadas y las temperaturas, bajas) de modo que el gas queda atrapado dentro de una jaula en forma de reja de moléculas de agua.

Los buques que han perforado los hidratos de gas han extraído núcleos de barro mezclados con fragmentos y capas de hidratos de gas que se consumen y se evaporan con rapidez cuando se exponen a las condiciones relativamente cálidas y de baja presión en la superficie oceánica. Los hidratos de gas parecen fragmentos de hielo, pero se prenden cuando los enciende una llama, ya que el metano y otros gases inflamables son liberados a medida que los hidratos de gas se evaporan.

En algunos cálculos se indica que hasta 20 billones de metros cúbicos de metano están atrapados en sedimentos que contienen hidratos de gas, lo que equivale aproximadamente al *doble* del carbono de las reservas combinadas de carbón, petróleo y gas convencional de la Tierra. Un gran inconveniente de la explotación de reservas de hidrato de gas es que éstas se descomponen rápidamente a las temperaturas y las presiones de la superficie. No obstante, en el futuro, estas enormes reservas de energía del fondo oceánico pueden ayudar a suministrar energía a la sociedad moderna.

El carbón ha sido un combustible importante durante siglos. En el siglo XIX y principios del XX, el carbón, barato y abundante, impulsó la revolución industrial. En 1900, el carbón proporcionaba el 90 por ciento de la energía utilizada en Estados Unidos. Aunque todavía importante, en la actualidad el carbón representa alrededor del 20 por ciento de las necesidades energéticas de esta nación (Figura 21.3).

Hasta la década de los años cincuenta, el carbón constituyó un combustible importante para proporcionar calefacción doméstica, así como una fuente de energía para la industria. Sin embargo, su uso directo en el hogar ha sido en gran medida sustituido por el petróleo, el gas natural y la electricidad. Se prefieren estos combustibles porque es más fácil disponer de ellos (se distribuyen a través de tuberías, tanques o cables) y más limpios de usar.

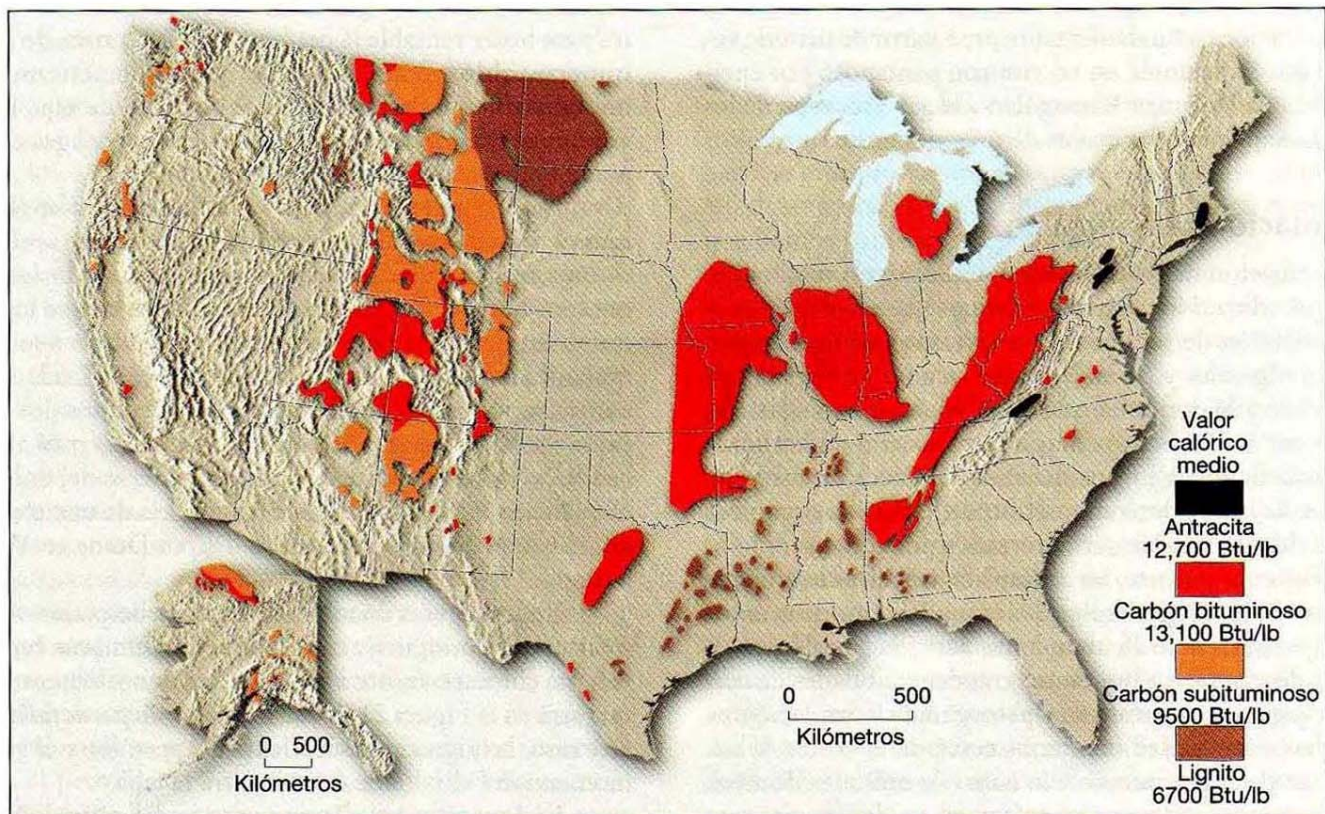
No obstante, el carbón sigue siendo el principal combustible utilizado en las centrales de energía para nuestros hogares. Más del 70 por ciento del carbón que se consume en la actualidad se utiliza para la generación de electricidad. A medida que las reservas de petróleo vayan disminuyendo en los años venideros, puede aumentar el uso del carbón. Es posible ampliar la producción de carbón, porque el mundo tiene enormes reservas, así como

la tecnología necesaria para extraerlo de manera eficaz de las minas. En Estados Unidos, los yacimientos de carbón son abundantes y su suministro duraría centenares de años (Figura 21.4).

Aunque el carbón es abundante, su recuperación y su uso representan una serie de problemas. La minería de superficie puede convertir el paisaje en un erial lleno de cicatrices si no se lleva a cabo una recuperación cuidadosa (y costosa) para restaurar el terreno. (En la actualidad, todas las canteras de Estados Unidos deben restaurar el terreno.) Aunque las minas subterráneas no crean cicatrices en el paisaje con la misma intensidad, han sido costosas en términos de salud y vidas humanas.

Además, la minería subterránea dejó de ser hace tiempo una operación de pico y pala, y en la actualidad es un proceso muy mecanizado e informatizado. Las firmes leyes federales de seguridad han hecho que la minería estadounidense sea bastante segura. Sin embargo, siguen existiendo los riesgos de hundimiento de los techos, y de explosiones de gas, así como los derivados de trabajar con equipo pesado.

La contaminación del aire es un problema importante asociado con la combustión del carbón. Mucho carbón contiene cantidades significativas de azufre. Pese a los esfuerzos por eliminar el azufre antes de quemar el carbón,



▲ **Figura 21.4** Yacimientos de carbón de Estados Unidos. (Datos del Bureau of Mines, Departamento de Interior de Estados Unidos.)

siempre queda algo; cuando el carbón se quema, el azufre se transforma en nocivos gases de óxido de azufre. A través de una serie de reacciones químicas complejas que ocurren en la atmósfera, los óxidos de azufre se convierten en ácido sulfúrico, que luego cae a la superficie terrestre en forma de lluvia o de nieve. Esta lluvia o nevada ácida puede tener efectos ecológicos adversos sobre áreas extensas (véase Recuadro 6.2).

Como probablemente ninguno de los problemas que se acaban de mencionar vaya a impedir una mayor utilización de este combustible, importante y abundante, deben hacerse esfuerzos más intensos para corregir los problemas asociados con la minería y el uso del carbón.

Petróleo y gas natural

El petróleo y el gas natural se encuentran en entornos similares y normalmente aparecen juntos. Los dos consisten en diversos compuestos de hidrocarburos (compuestos que contienen hidrógeno y carbono) mezclados entre sí. También pueden contener pequeñas cantidades de otros elementos, como azufre, nitrógeno y oxígeno. Como el carbón, el petróleo y el gas natural son productos biológicos derivados de los restos de organismos. Sin embargo, los ambientes en los que se formaron, así como los organismos de los que derivan, son muy diferentes. El carbón se forma fundamentalmente a partir de materia vegetal que se acumuló en un entorno pantanoso por encima del nivel del mar. El petróleo y el gas proceden de los restos de plantas y animales de origen marino.

Formación del petróleo

La formación del petróleo es compleja y no totalmente comprendida. No obstante, sabemos que empieza con la acumulación de sedimentos en áreas oceánicas ricas en restos vegetales y animales. Estas acumulaciones deben aparecer allí donde la actividad biológica es elevada, como en las áreas próximas a la costa. Sin embargo, la mayoría de los entornos marinos son ricos en oxígeno, lo que lleva a la descomposición de los restos orgánicos antes de que puedan ser enterrados por otros sedimentos. Por consiguiente, las acumulaciones de petróleo y de gas no están tan generalizadas como los entornos marinos que sustentan la abundante actividad biológica. A pesar de este factor limitante, grandes cantidades de materia orgánica se entierran y protegen de la oxidación en muchas cuencas sedimentarias cerca de la costa. Al aumentar el enterramiento a lo largo de millones de años, las reacciones químicas transforman gradualmente parte de la materia orgánica original en los hidrocarburos

líquidos y gaseosos que denominamos petróleo y gas natural.

A diferencia de la materia orgánica a partir de la cual se formaron, el petróleo y el gas natural recién creados son móviles. Esos fluidos son gradualmente exprimidos de las capas compactadas, ricas en fango, donde se originan, hacia lechos permeables adyacentes, como la arenisca, donde los poros entre los granos de sedimento son mayores. Dado que esto ocurre bajo el agua, las capas de roca que contienen el petróleo y el gas se saturan de agua. Pero el petróleo y el gas son menos densos que el agua, de manera que migran hacia arriba a través de los espacios porosos llenos de agua de las rocas que los encierran. A menos que algo obstaculice esta migración ascendente, los fluidos acabarán alcanzando la superficie momento en el cual los componentes volátiles se evaporarán.

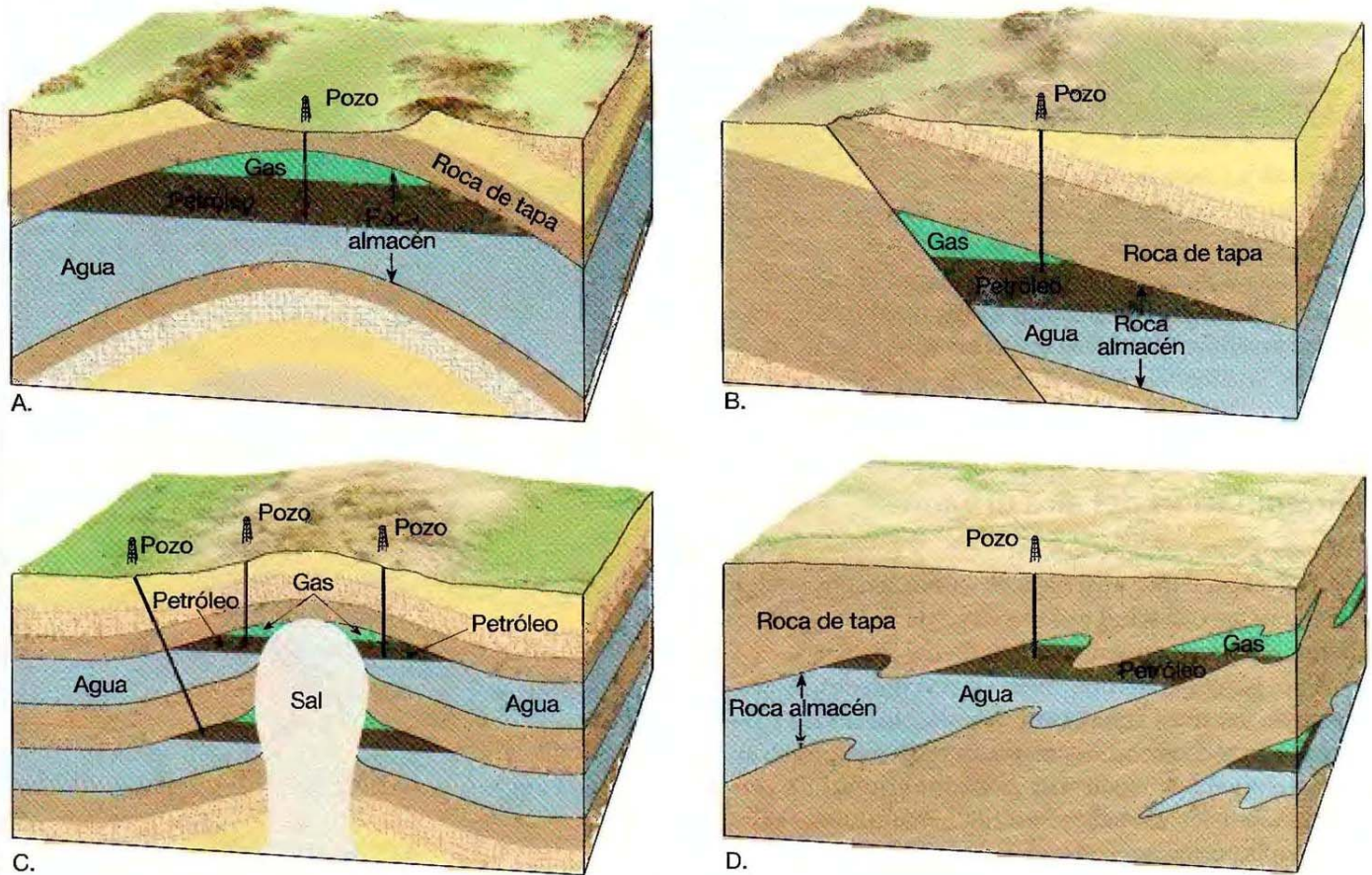
Trampas petrolíferas

A veces la migración ascendente se ve interrumpida. Un ambiente geológico que permite la acumulación de cantidades económicamente significativas de petróleo y gas bajo tierra se denomina **trampa petrolífera**. Diversas estructuras geológicas pueden actuar como trampas petrolíferas, pero todas tienen en común dos condiciones básicas: una **roca almacén**, permeable y porosa, que suministrará petróleo y gas natural en cantidades suficientes para hacer rentable la perforación; y una **roca de tapa impermeable**, como las lutitas, que son prácticamente impermeables al petróleo y al gas. La roca de tapa interrumpe el sentido ascendente del petróleo y el gas e impide que escapen a la superficie.

En la Figura 21.5 se ilustran algunas trampas comunes de petróleo y gas natural. Una de las más sencillas es un *anticlinal*, una serie de estratos sedimentarios arqueados hacia arriba (Figura 21.5A). A medida que los estratos se pliegan, el petróleo y el gas ascendentes se acumulan en su charnela. Debido a su menor densidad, el gas natural se acumula por encima del petróleo. Los dos descansan sobre el agua, más densa, que satura la roca almacén. Uno de los mayores campos petrolíferos del mundo, El Nala, en Arabia Saudí, es consecuencia de una trampa anticlinal, al igual que el famoso Teapot Dome en Wyoming.

En los lugares donde los estratos se desplazan de tal manera que consiguen arrastrar una roca almacén buzante hasta colocarla frente a una capa impermeable, como se muestra en la Figura 21.5B, se forman *trampas de falla*. En este caso, la migración ascendente del petróleo y el gas se interrumpirá allí donde se encuentra la falla.

En la región de la llanura costera del golfo de Estados Unidos, se producen acumulaciones importantes de



▲ **Figura 21.5** Trampas petrolíferas comunes. A. Anticinal. B. Trampa de falla. C. Domo salino. D. Trampa estratigráfica.

petróleo en asociación con *domos salinos*. Esas áreas tienen potentes acumulaciones de estratos sedimentarios, entre ellos los de salgema. La sal que aparece a grandes profundidades se ha visto forzada a ascender en columnas por la presión de los estratos situados por encima de ella. Estas columnas ascendentes de sal deforman gradualmente los estratos que tienen por encima. Dado que el petróleo y el gas migran al nivel más elevado posible, se acumulan en los estratos levantados de arenisca, adyacentes a la columna de sal (Figura 21.5C).

Aún hay otra importante situación geológica que puede inducir acumulaciones significativas de petróleo y gas, denominada *trampa estratigráfica*. Estas estructuras que contienen petróleo se forman principalmente como consecuencia del modelo original de sedimentación, más que como consecuencia de deformación estructural. La trampa estratigráfica ilustrada en la Figura 21.5D existe porque un estrato inclinado de arenisca se acuña lateralmente hasta desaparecer.

Cuando se perfora la cubierta creada por la roca de tapa, el petróleo y el gas natural, que están bajo presión, migran desde los espacios porosos de la roca madre hasta el orificio de perforación. En algunas ocasiones, aunque

raras, la presión del fluido es grande y puede obligar al petróleo a ascender por el orificio de perforación hasta la superficie creando un «pozo surgente», o fuente de petróleo en la superficie. Normalmente, sin embargo, se precisa una bomba para sacar el petróleo.

La perforación no es la única manera mediante la cual el petróleo y el gas pueden escapar de una trampa. Las trampas pueden romperse por las fuerzas naturales. Por ejemplo, los movimientos de la Tierra pueden crear fracturas que permitan la salida de los fluidos con hidrocarburos. La erosión en la superficie puede abrir una brecha en la trampa, con resultados similares. Cuanto más antiguos sean los estratos de roca, mayor será la probabilidad de que una tapadera se vea afectada por la deformación o la erosión. De hecho, no en todas las edades las rocas proporcionan petróleo y gas en las mismas proporciones. La mayor producción procede de las rocas más jóvenes, las del Cenozoico. Las rocas del Mesozoico, más antiguas, producen considerablemente menos, seguidas de los estratos aún más antiguos del Paleozoico, que producen cantidades aún menores. No se produce prácticamente petróleo en las rocas más antiguas, las del Precámbrico.

Algunos efectos ambientales de la combustión de los combustibles fósiles

La humanidad se enfrenta a una amplia diversidad de problemas ambientales causados por ella misma. Entre los más graves se cuentan los impactos sobre la atmósfera que son consecuencia de la combustión de los combustibles fósiles. La contaminación del aire urbano, la lluvia ácida y el calentamiento global (efecto invernadero) están estrechamente vinculados al uso de esos recursos energéticos básicos.

Contaminación del aire urbano

Los *contaminantes del aire* son partículas y gases transportados por el aire que aparecen en concentraciones que ponen en peligro la salud y el bienestar de los organismos y alteran el funcionamiento ordenado del ambiente.

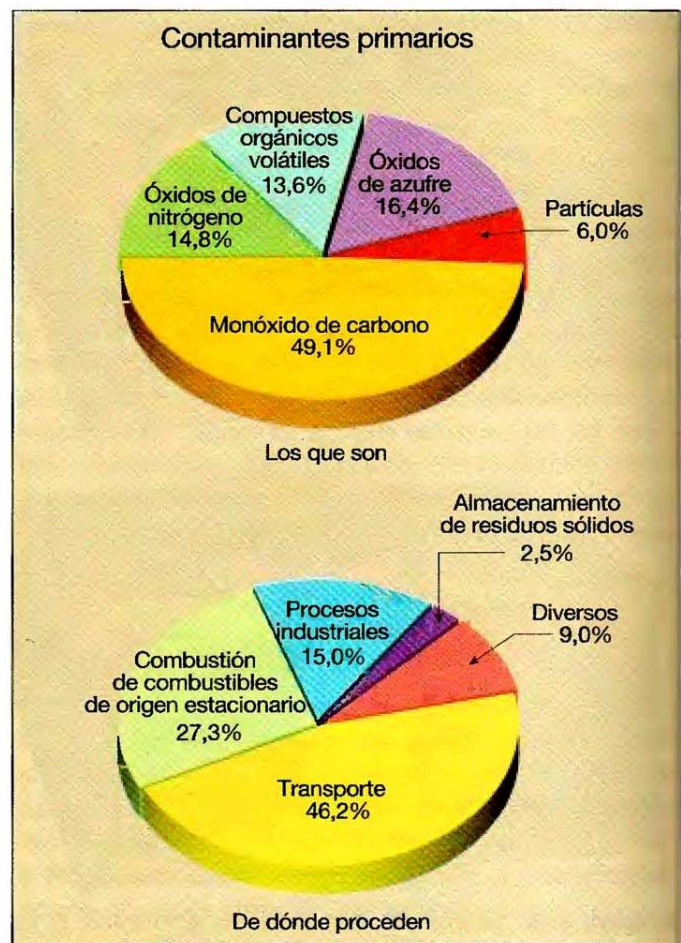
Para las personas que viven en las ciudades, la contaminación del aire es una cuestión grave. La ciudad se ha descrito, con toda precisión, como un reactor químico gigante que puede producir una notable variedad de productos indeseables. En la Figura 21.6 se muestran los principales contaminantes primarios y las fuentes que los producen. Los *contaminantes primarios* son emitidos directamente a partir de fuentes identificables. Contaminan el aire inmediatamente después de ser emitidos.

La importancia de la categoría de transporte es obvia. El consumo de combustibles para transporte representa casi la mitad de nuestra contaminación (en peso). Los centenares de millones de coches y camiones que circulan por las carreteras son los principales contribuyentes en esta categoría. En la Figura 21.6 se muestra también que la segunda gran fuente de contaminantes primarios es la combustión procedente de fuentes estacionarias, como las plantas generadoras de electricidad.

Cuando se producen reacciones químicas entre los contaminantes primarios, se forman los *contaminantes secundarios*. La nociva mezcla de gases y de partículas que constituyen el *smog* urbano es un ejemplo importante; el *smog* se crea cuando los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno procedentes de los tubos de escape de los vehículos reaccionan en presencia de la luz del sol (véase Recuadro 21.2).

El dióxido de carbono y el calentamiento global

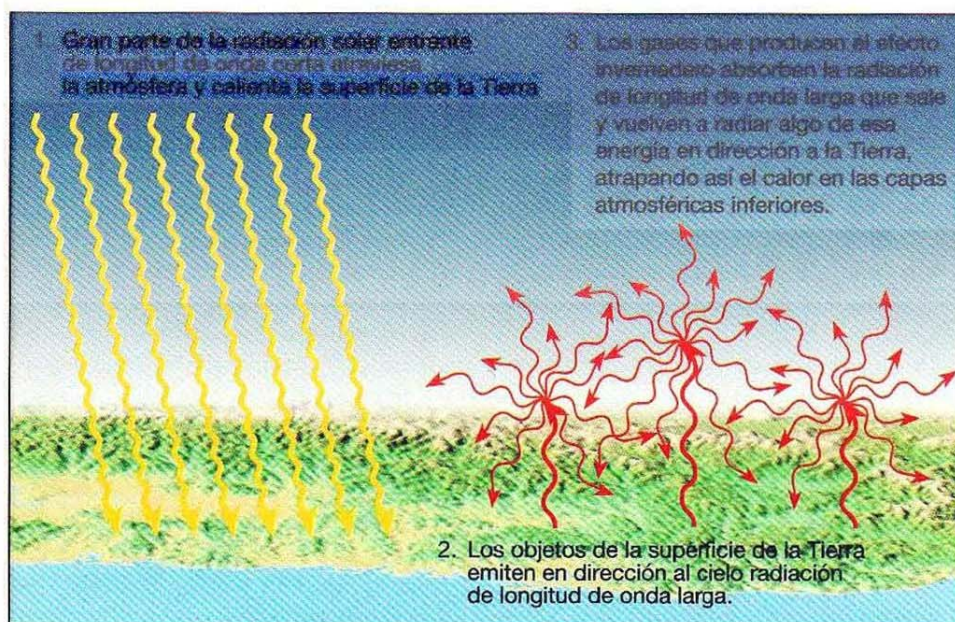
El calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera es un problema a escala mundial. A diferencia de la lluvia ácida y de la contaminación del aire urbano, esta cuestión no



▲ **Figura 21.6** Principales contaminantes primarios y sus fuentes. Los porcentajes se calculan en función del peso. (Datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.)

está asociada con ninguno de los contaminantes primarios de la Figura 21.6. Antes bien, la conexión entre el calentamiento global y la quema de combustibles fósiles está relacionada con un producto básico de la combustión, el dióxido de carbono.

Efecto invernadero El dióxido de carbono (CO_2) es un gas que se encuentra de forma natural en la atmósfera y que está aumentando como consecuencia de la quema de los combustibles. Aunque el CO_2 representa sólo alrededor del 0,037 por ciento (370 partes por millón) del aire limpio y seco, desde el punto de vista meteorológico este porcentaje es, sin embargo, significativo. La importancia del dióxido de carbono reside en el hecho de que es transparente a la radiación solar entrante de longitud de onda corta, pero no lo es a una parte de la radiación de longitud de onda más larga emitida por la Tierra (Figura 21.7). Una porción de la energía que abandona el suelo es absorbida por el dióxido de carbono y posteriormente reemitida en parte hacia la superficie, manteniendo con ello



◀ **Figura 21.7** El calentamiento de la atmósfera. La mayor parte de la radiación de longitud de onda corta procedente del Sol que no se refleja de vuelta al espacio atraviesa la atmósfera y es absorbida por la superficie continental y oceánica de la Tierra. Luego, esta energía se emite desde la superficie en forma de radiación de longitud de onda más larga; gran parte de esta radiación es absorbida por ciertos gases de la atmósfera. Una parte de la energía absorbida por la atmósfera se radiará en dirección a la Tierra. Este efecto, llamado efecto invernadero, es el responsable de mantener la superficie terrestre mucho más caliente de lo que estaría.

más caliente el aire que está cerca del suelo de lo que estaría sin dióxido de carbono. Por tanto, el dióxido de carbono es uno de los gases responsables del calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera. El proceso se denomina *efecto invernadero* (Figura 21.7). Dado que el dióxido de carbono es un absorbente calorífico importante, cualquier cambio en el contenido de dióxido de carbono del aire podría alterar las temperaturas de las capas inferiores de la atmósfera.

Los niveles de CO₂ están aumentando Aunque la proporción del dióxido de carbono del aire es relativamente uniforme en cualquier momento, su porcentaje ha ido aumentando de manera estable durante más de un siglo (Figura 21.8). Gran parte de este aumento es consecuencia de la quema de cantidades crecientes de combustibles fósiles*. Desde la mitad del siglo XIX hasta 2003, ha habido un incremento de más del 25 por ciento del contenido de dióxido de carbono en el aire.

Respuesta de la atmósfera Dado el aumento del contenido de dióxido de carbono de la atmósfera, ¿han aumentado en realidad las temperaturas a escala mundial? La respuesta es afirmativa. Un informe del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** indica lo siguiente:

* Aunque la utilización de los combustibles fósiles es el medio principal por el que los seres humanos añaden CO₂ a la atmósfera, el aclaramiento de los bosques, especialmente en los trópicos, contribuye también de manera sustancial. El dióxido de carbono se va liberando conforme la vegetación se quema o se descompone.

** Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2001, pág. 2.

- Durante el siglo XX, la temperatura superficial media del mundo aumentó alrededor de 0,6 °C.
- A escala mundial, es muy probable que los años noventa fueran la década más cálida y que 1998 fuera el año más caluroso desde 1861 (Figura 21.9).
- En los nuevos análisis de datos del hemisferio norte se indica que es probable que el aumento de la temperatura en el siglo XX haya sido el mayor de cualquier siglo durante los últimos 1.000 años.

¿Estas tendencias térmicas son provocadas por la actividad humana o habrían sucedido de todos modos? Los científicos son cautelosos, pero parecen convencidos de que la actividad humana ha representado un papel importante. En un informe del IPCC de 1996 se afirmaba que «el balance de las pruebas sugiere una influencia humana apreciable en el clima mundial»*. Cinco años después, el IPCC afirmó que «hay pruebas nuevas y más convincentes de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años es atribuible a la actividad humana»**. ¿Pero qué depara el futuro? En los modelos se proyectan unos niveles de CO₂ atmosférico de 540 a 970 ppm para el año 2100. Con un aumento de este tipo, ¿cómo cambiarán las temperaturas mundiales? A continuación se expone algo de lo que el informe de 2001 del IPCC tiene que decir al respecto***:

* Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Nueva York: Cambridge University Press, 1996.

** IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, pág. 10.

*** IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, pág. 13.



Recuadro 21.2 ▶ El hombre y el medio ambiente

Aerosoles procedentes del «Volcán humano»

El aumento de los niveles de dióxido de carbono y otros gases invernadero en la atmósfera es la influencia humana más directa en el clima mundial. Pero no es el único impacto. Las actividades humanas que contribuyen al contenido de aerosoles en la atmósfera también afectan al clima mundial. Los *aerosoles* son partículas pequeñas, a menudo microscópicas, líquidas y sólidas, que están suspendidas en el aire. Los aerosoles atmosféricos están compuestos por muchos materiales distintos, entre ellos el suelo, el humo, la sal marina y el ácido sulfúrico. Las fuentes naturales son numerosas e incluyen fenómenos como las tormentas de polvo y los volcanes. En el Capítulo 5 hemos aprendido que algunos volcanes explosivos (como el monte Pinatubo) emiten grandes cantidades de dióxido de azufre hacia la atmósfera. Este gas se combina con el vapor de agua y produce nubes de pequeños aerosoles de ácido sulfúrico que pueden provocar un descenso de las temperaturas del aire cerca de la superficie al reflejar la energía solar hacia el espacio. Por consiguiente, se debe a aerosoles de ácido sulfúrico producidos por las actividades humanas.

En la actualidad, la contribución humana de aerosoles a la atmósfera *iguala* la cantidad emitida por las fuentes naturales. La mayoría de aerosoles generados por el ser humano procede del dióxido de azufre emitido durante la combustión de combustibles fósiles y como una consecuencia de la combustión de vegeta-

ción para despejar los terrenos agrícolas. Las reacciones químicas de la atmósfera transforman el dióxido de azufre en aerosoles de azufre, el mismo material que produce la lluvia ácida (véase Recuadro 6.2).

Los aerosoles producidos por la actividad humana actúan directamente reflejando la luz solar hacia el espacio e indirectamente formando nubes, reflectores «más brillantes». El segundo efecto está relacionado con el hecho de que los aerosoles de ácido sulfúrico atraen agua y, por tanto, son especialmente eficaces como núcleos de condensación de nubes (pequeñas partículas sobre las que el vapor de agua se condensa). La gran cantidad de aerosoles producida por las actividades humanas (en especial las emisiones industriales) provocan un aumento de la cantidad de gotas que se forman en el interior de una nube. Un número mayor de gotitas aumenta el brillo de la nube, es decir, se refleja más luz solar hacia el espacio.

A través de la reducción de la cantidad de energía solar disponible para el sistema climático, los aerosoles tienen un claro efecto refrigerante. En algunos estudios se indica que el efecto refrigerante de los aerosoles generados por el ser humano podría compensar una parte del calentamiento mundial causado por las cantidades crecientes de gases invernadero en la atmósfera. La magnitud y la extensión del efecto refrigerante de los aerosoles son muy inciertas. Esta incertidum-

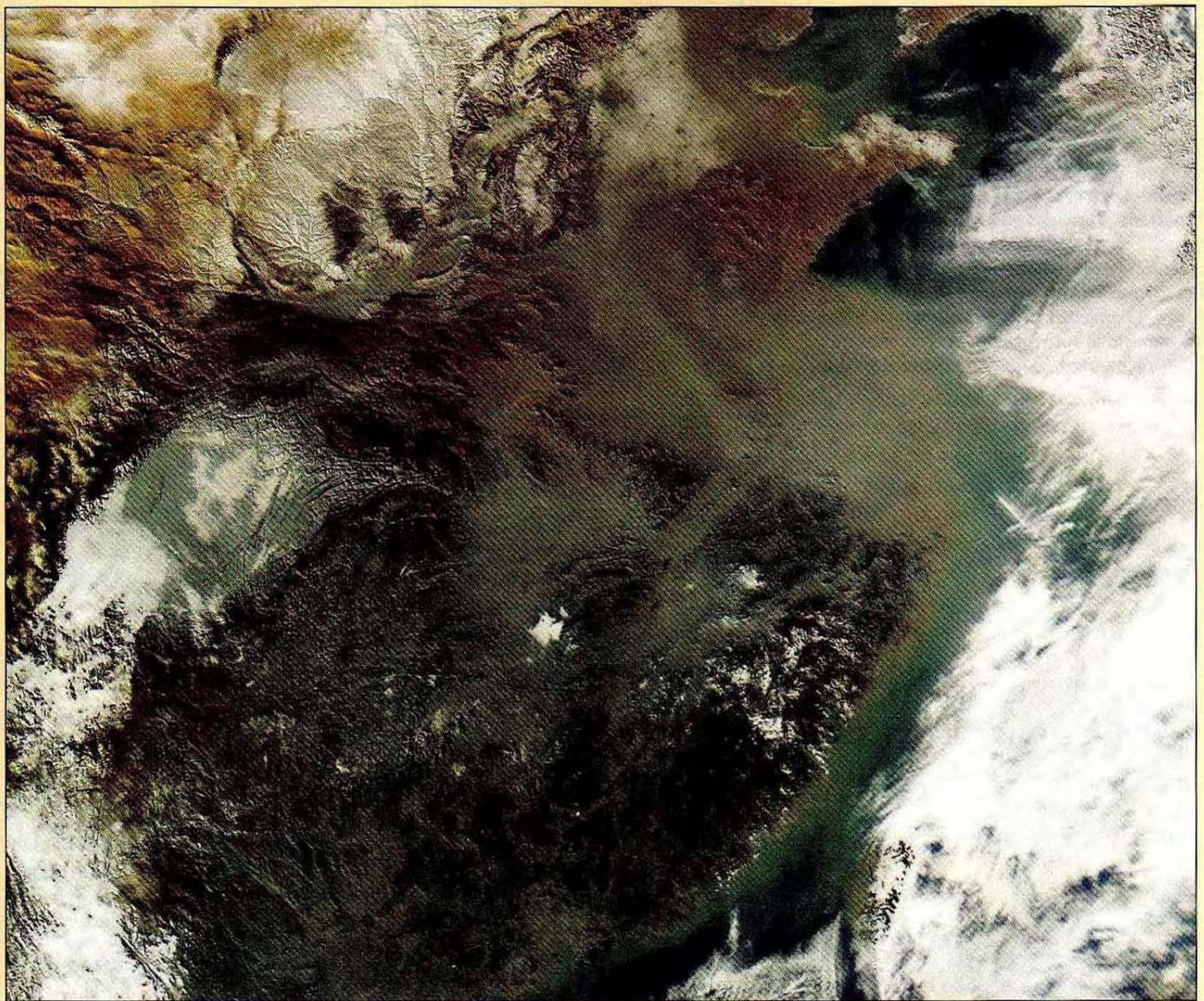
bre es un obstáculo importante en el avance de nuestro conocimiento de cómo los seres humanos alteran el clima terrestre.

Es importante señalar algunas diferencias significativas entre el calentamiento global por gases invernadero y el enfriamiento por aerosoles. Tras su emisión, los gases invernadero como el dióxido de carbono permanecen en la atmósfera durante muchas décadas. Por el contrario, los aerosoles liberados en la zona inferior de la atmósfera permanecen allí durante sólo unos pocos días o, como máximo, unas pocas semanas antes de que la precipitación los «limpie». A causa de su corta supervivencia en la atmósfera, los aerosoles generados por el ser humano se distribuyen de manera irregular por el mundo. Como cabía esperar, se concentran cerca de las áreas que los producen, es decir, las regiones industrializadas que queman combustibles fósiles y las zonas continentales donde se quema vegetación (Figura 21.A).

Dado que la supervivencia de los aerosoles generados por el ser humano en la atmósfera es corta, el efecto del «volcán humano» en el clima actual está determinado por la cantidad de material emitido durante las semanas anteriores. Por el contrario, el dióxido de carbono liberado en la atmósfera permanece durante períodos mucho más largos y, por tanto, influye en el clima durante muchas décadas.

- Se prevé que la temperatura superficial media de la Tierra aumentará entre 1,4 y 5,8 °C en 2100.
- La velocidad prevista de calentamiento es mucho mayor que los cambios observados durante el siglo XX y es muy probable que no tenga precedentes durante al menos los últimos 10.000 años.
- Es muy probable que casi todas las zonas continentales se calienten con más rapidez que la media mundial, en particular las zonas situadas en las latitudes altas septentrionales durante la estación fría.

Algunas posibles consecuencias Los efectos de un rápido cambio térmico son una cuestión muy preocupante e incierta. Dado que el sistema climático es tan complejo, la predicción de la distribución de cambios regionales concretos es todavía muy especulativa. Sin embargo, pueden darse escenarios plausibles para escalas mayores de espacio y tiempo. Un impacto importante del calentamiento mundial inducido por el ser humano es un probable aumento del nivel del mar. Este efecto se examina en el Capítulo 20, Recuadro 20.3. Entre los posibles cambios climáticos se cuentan las modificaciones en las trayectorias de las tormentas ciclónicas a gran escala, que, a



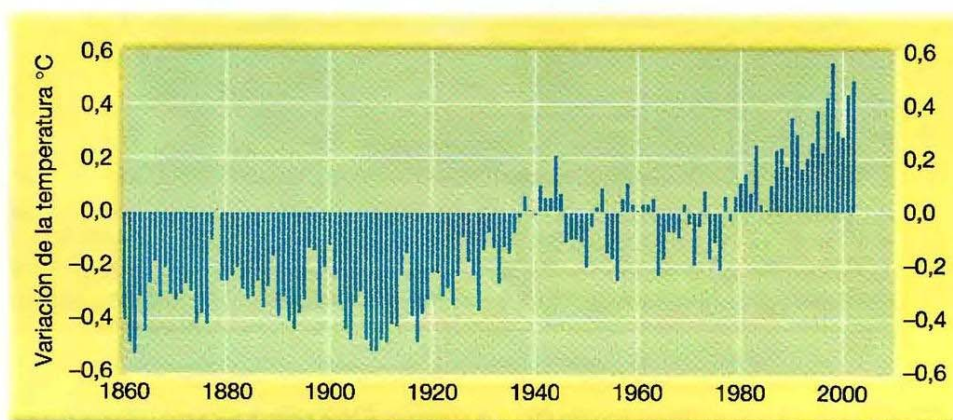
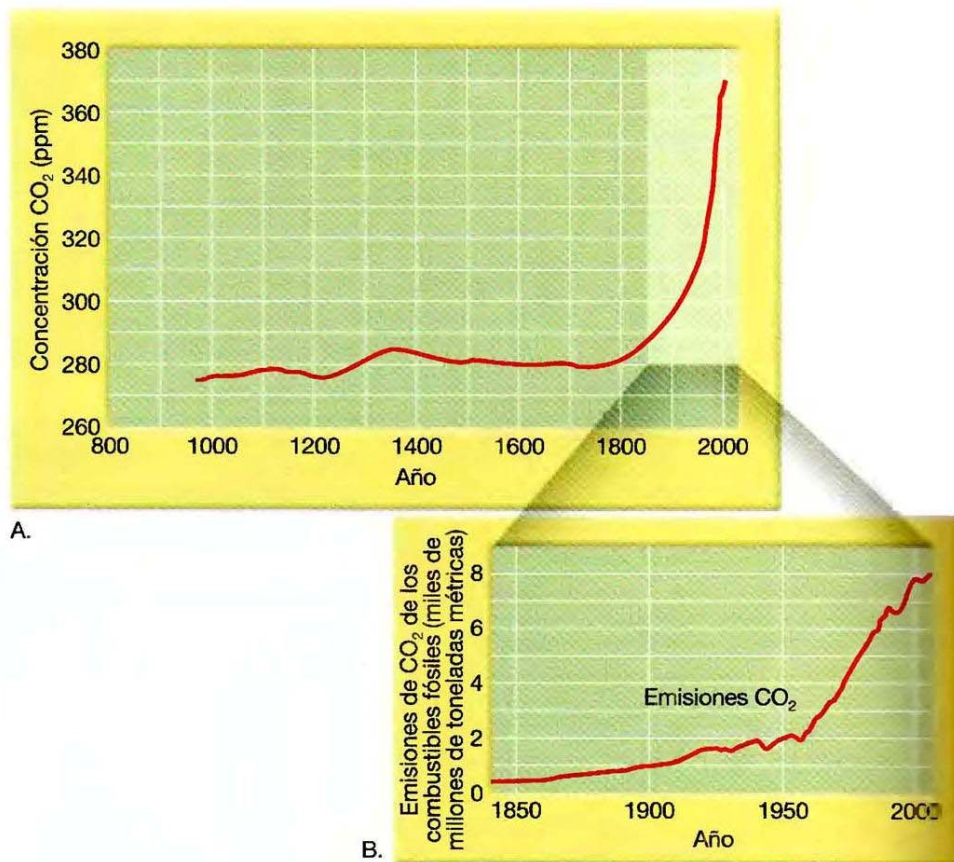
▲ **Figura 21.A** Los aerosoles generados por el ser humano se concentran cerca de las áreas que los producen. Dado que los aerosoles reducen la cantidad de energía solar disponible en el sistema climático, tienen un claro efecto refrigerante. En esta imagen por satélite se muestra una capa densa de contaminación sobre el centro de China; lo suficientemente densa como para que una parte de la línea de costa sea difícil de ver. Es fácil de distinguir la contaminación (gris) de las nubes (blanco brillante). (Imagen cortesía de la NASA.)

su vez, afectarán a la distribución de la precipitación y la aparición de un clima severo. Otras posibilidades son las tormentas tropicales más fuertes y el aumento de la frecuencia y la intensidad de las olas de calor y las sequías (Tabla 21.1).

Los cambios que se produzcan adoptarán probablemente la forma de modificaciones ambientales graduales que serán imperceptibles para la mayoría de las personas de un año para el otro. Aunque los cambios quizá sean graduales, los efectos tendrán claras e importantes consecuencias económicas, sociales y políticas.

El carbón, el petróleo y el gas natural son fuentes de energía vitales que impulsan el mundo moderno. Sin embargo, los beneficios que proporcionan esos combustibles básicos y de coste relativamente bajo no están exentos de costes ambientales. Entre las consecuencias de su uso se cuentan tres serios impactos atmosféricos: contaminación del aire urbano, lluvia ácida y calentamiento global. El ser humano está alterando claramente la composición del aire. No sólo se deja sentir esta influencia local y regionalmente, sino que se extiende a todo el mundo y a muchos kilómetros por encima de la superficie de la Tierra.

► **Figura 21.8 A.** Concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) en los últimos 1.000 años. Gran parte del registro se basa en datos obtenidos de muestras de hielo de la Antártida. Las burbujas de aire atrapadas en el hielo glaciario proporcionan testigos de sondeo de muestras de las atmósferas antiguas. El registro de 1958 procede de determinaciones directas del CO_2 atmosférico tomadas en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii. **B.** Emisiones de CO_2 de los combustibles fósiles. El rápido incremento de la concentración de CO_2 desde el comienzo de la industrialización ha ido paralelo al aumento de las emisiones de CO_2 procedentes de los combustibles fósiles.



▲ **Figura 21.9** Variaciones de la media anual de la temperatura global para el período 1860-2002. La base de comparación es la media del período 1961-1990 (la línea 0,0 del gráfico). Cada barra estrecha del gráfico representa la desviación de la temperatura media mundial con respecto a la media de 1961-1990 para un año. Por ejemplo, la temperatura media mundial de 1862 fue más de 0,5 $^{\circ}\text{C}$ inferior a la media de 1961-1990, mientras que la media mundial de 1998 fue más de 0,5 $^{\circ}\text{C}$ superior. (En concreto, 1998 fue 0,56 $^{\circ}\text{C}$ más caluroso.) En el gráfico de barras se indica con claridad que puede haber variaciones significativas de un año a otro. Pero en el gráfico también se muestra una tendencia. Las temperaturas medias mundiales estimadas han estado por encima de la media 1961-1990 todos los años desde 1978. En el ámbito mundial, los años 90 fueron la década más calurosa, y los años 1998 y 2002 los más calurosos, desde 1861. (Modificado y actualizado según G. Bell, *et al.* «Climate Assessment for 1998», *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, núm. 5, mayo 1999, pág. 54.)

Tabla 21.1 Previsión de cambios y efectos del calentamiento global en el siglo XXI (probabilidad estimada)*

Temperaturas máximas más elevadas; más días calurosos y olas de calor sobre casi todas las áreas continentales (*muy probable*)
 Temperaturas mínimas más elevadas; menos días fríos, de helada, y olas frías sobre casi todas las áreas continentales (*muy probable*)
 Precipitaciones más intensas (muy probable en muchas áreas)
 Aumento de la sequía estival sobre la mayoría de los interiores continentales de latitud media y riesgo de sequía asociada (*probable*)
 Aumento de las intensidades máximas del viento de los ciclones tropicales y las intensidades medias y máximas de la precipitación (*probable* en algunas áreas)
 Sequías e inundaciones intensificadas asociadas con El Niño en muchas regiones diferentes (*probable*)
 Aumento de la variabilidad de la precipitación monzónica veraniega en Asia (*probable*)
 Aumento de la intensidad de las tormentas de latitud media (incierto)

FUENTE: IPCC: 2001.

* *Muy probable* indica una probabilidad del 90-99 por ciento. *Probable* indica una probabilidad del 67-90 por ciento.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Es el dióxido de carbono el único gas responsable del calentamiento mundial?

No. Aunque el dióxido de carbono es el más importante, otros gases también representan un papel. En los últimos años, los científicos han descubierto que las actividades industriales y agrícolas humanas están provocando la formación de varios gases trazas que también pueden representar un papel importante. Se denominan así porque sus concentraciones son mucho menores que las del dióxido de carbono. Los gases trazas que parecen ser más importantes son el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los clorofluorocarbonos (CFC). Estos gases absorben ondas largas de radiación emitida desde la Tierra que, de otro modo, se escaparían al espacio. Aunque por separado su impacto es modesto, los efectos de la unión de estos gases trazas pueden ser casi tan grandes como el del CO_2 en el calentamiento de la atmósfera inferior.

Arenas asfálticas y lutitas bituminosas: ¿petróleo para el futuro?

En los próximos años el suministro mundial de petróleo disminuirá. Cuando esto suceda será sustituido por hidrocarburos de menor grado. Son los combustibles procedentes de las arenas asfálticas y las lutitas bituminosas.

Arenas asfálticas

Las *arenas asfálticas* suelen ser mezclas de arcilla y arena combinadas con agua y cantidades variables de un alquitrán negro, muy viscoso, conocido como *bitumen*. La utilización del término *arena* puede llevar a confusión, porque no todos los depósitos están asociados con arenas y areniscas. Algunos aparecen en otros materiales, entre ellos las lutitas y las calizas. El petróleo de esos depósitos es muy similar a los densos petróleos crudos bombeados de los pozos. La principal diferencia entre los depósitos de

petróleo convencional y los depósitos de arena asfáltica reside en la viscosidad (resistencia al flujo) del petróleo que contienen. En las arenas asfálticas, el petróleo es mucho más viscoso y no puede ser simplemente bombeado.

En muchas partes del mundo hay importantes depósitos de arenas asfálticas. Los dos mayores de estos depósitos son el yacimiento Athabasca, en la provincia canadiense de Alberta, y el depósito del río Orinoco, en Venezuela (Figura 21.10).



▲ **Figura 21.10** En Norteamérica, los mayores depósitos de arenas asfálticas aparecen en la provincia canadiense de Alberta. Conocidas como las arenas asfálticas de Athabasca, esos depósitos cubren un área de más de 42.000 kilómetros cuadrados. Los principales depósitos de arenas asfálticas de Alberta contienen más de 1,7 trillones de barriles de bitumen. Sin embargo, gran parte del bitumen no puede extraerse a un coste razonable. Con la tecnología actual, se calcula que sólo pueden extraerse unos 300.000 millones de barriles.

En la actualidad, las arenas asfálticas se extraen en superficie, de una manera similar a la explotación a cielo abierto del carbón mediante excavadoras. El material excavado se calienta a continuación con vapor a presión y el bitumen se ablanda y asciende. Una vez recogido, el material oleoso es tratado para eliminar las impurezas y luego se añade hidrógeno. Esta última etapa aumenta el grado de calidad hasta un crudo sintético, que luego puede refinarse. La extracción y el refinado de las arenas asfálticas requieren una gran cantidad de energía: ¡casi la mitad de la que se obtiene del producto final! No obstante, las arenas asfálticas de los enormes depósitos de Alberta son la fuente de alrededor del 15 por ciento de la producción petrolífera de Canadá.

La obtención de petróleo a partir de las arenas asfálticas tiene importantes inconvenientes ambientales. Con la minería de enormes cantidades de roca y sedimento se asocia una perturbación importante del terreno. Además, se precisan grandes cantidades de agua para el procesado, y cuando éste se ha completado, el agua y los sedimentos contaminados se acumulan en estanques de desecho tóxicos.

Sólo alrededor del 10 por ciento de las arenas asfálticas de Alberta puede recuperarse de manera económica mediante minería de superficie. La obtención de petróleo enterrado a más profundidad requerirá la recuperación in situ, es decir, sin trabajo de minería. Esto precisará probablemente la inyección de líquidos calientes para reducir la viscosidad y bombear luego el material a la superficie. Si se ponen en práctica dichas técnicas, la esperanza

es que la superficie de la Tierra se vea alterada sólo ligeramente y que se reduzca el impacto ambiental.

Lutitas bituminosas

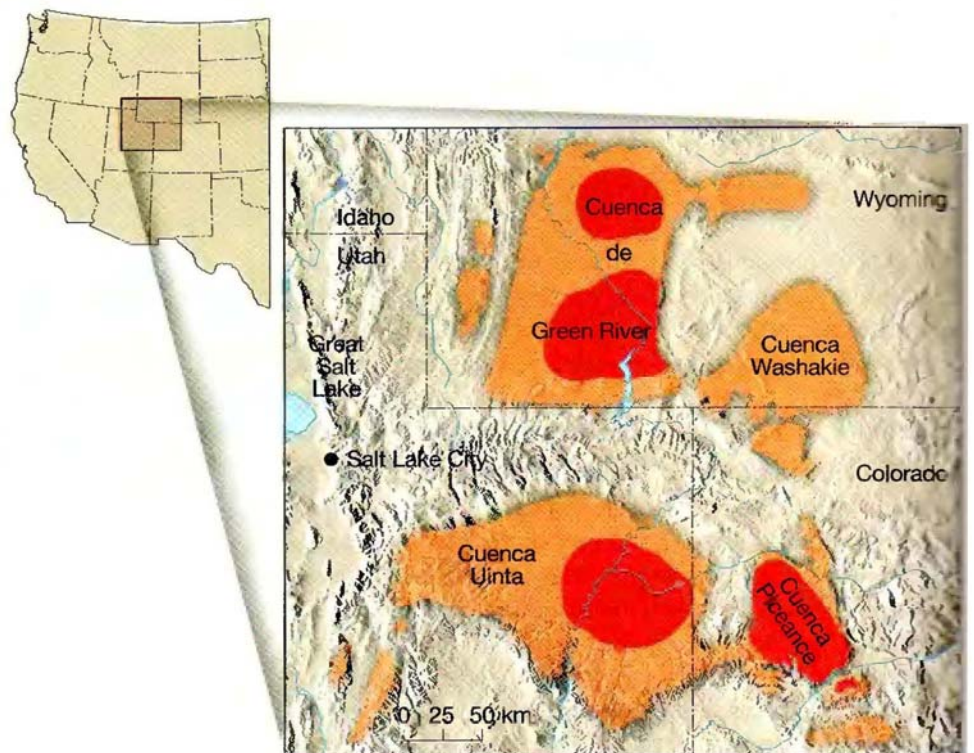
Las lutitas bituminosas contienen enormes cantidades de petróleo sin explotar. En todo el mundo, el US Geological Survey calcula que hay más de 3 billones de barriles de petróleo contenidos en lutitas, que producirían más de 38 litros de petróleo por tonelada de material. Pero esta cifra puede inducir a error porque se sabe que, con la tecnología actual, sólo pueden recuperarse menos de 200.000 millones de barriles. Aun así, los recursos calculados del petróleo convencionalmente recuperable, y las cifras aumentarán, probablemente a medida que se recoja más información geológica.

Aproximadamente la mitad del suministro mundial se encuentra en la formación Green River en Colorado, Utah y Wyoming (Figura 21.11). En esta región, las lutitas bituminosas forman parte de estratos sedimentarios que se acumularon en el fondo de dos enormes y someros lagos durante el Eoceno (hace entre 57 y 36 millones de años).

Las lutitas bituminosas se han sugerido como una solución parcial al agotamiento de los combustibles fósiles. Sin embargo, la energía calorífica de la lutita bituminosa es sólo una octava parte de la que contiene el petróleo crudo, debido a la gran proporción de materia mineral de las lutitas.

Esta materia mineral añade costo a la producción minera, el procesamiento y la eliminación de residuos. La

► **Figura 21.11** Distribución de las lutitas bituminosas en la formación Green River de Colorado, Utah y Wyoming. Las áreas sombreadas de color más oscuro representan los depósitos más ricos. El gobierno y la industria privada han invertido grandes cantidades para hacer que las lutitas bituminosas sean un recurso económico, pero los costes han sido siempre superiores al precio del petróleo. Sin embargo, a medida que aumenten los precios de los combustibles en competencia, estos enormes depósitos se volverán económicamente más atractivos. (Tomado de D. C. Duncan y V. E. Swanson, U. S. Geological Survey Circular 523, 1965.)



producción de petróleo a partir de las lutitas bituminosas tiene los mismos problemas que la producción de petróleo a partir de las arenas asfálticas. La minería de superficie produce trastornos generalizados del terreno y plantea problemas significativos de eliminación de residuos. Además, el procesamiento requiere grandes cantidades de agua, un elemento que es escaso en la región semiárida donde se encuentra la formación Green River.

En la actualidad, el petróleo es abundante y relativamente barato en los mercados mundiales. Por consiguiente, con las tecnologías actuales, no merece la pena obtenerlo de las lutitas bituminosas. La industria ha abandonado casi del todo la investigación y el desarrollo en el ámbito de las lutitas bituminosas. No obstante, el US Geological Survey sugiere que la gran cantidad de petróleo que podría extraerse, en potencia, de las lutitas bituminosas en Estados Unidos asegura probablemente su inclusión final en la mezcla energética nacional.

Fuentes de energía alternativas

Un examen de la Figura 21.3 muestra claramente que vivimos en la era de los combustibles fósiles. Más del 85 por ciento de las necesidades energéticas mundiales procede de esos recursos no renovables. Los cálculos actuales indican que la cantidad de combustibles fósiles recuperables puede alcanzar los 10 billones de barriles de petróleo, suficientes para 170 años al ritmo de consumo actual. Por supuesto, a medida que la población mundial aumente, la velocidad de consumo se disparará. Por tanto, las reservas acabarán por escasear. Mientras tanto, el impacto ambiental de la combustión de enormes cantidades de combustibles fósiles tendrá, sin lugar a dudas, un efecto adverso.

¿Cómo puede satisfacerse una demanda creciente de energía sin afectar de manera radical al planeta que habitamos? Aunque no se ha formulado todavía una respuesta clara, debe considerarse la necesidad de depender cada vez más de fuentes de energía alternativas. En esta sección examinaremos las diversas fuentes posibles, entre ellas la energía nuclear, solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y mareal.

Energía nuclear

Aproximadamente el 8 por ciento de la demanda de energía de Estados Unidos está siendo satisfecha por las centrales de energía nuclear. El combustible para esas centrales procede de materiales radiactivos que liberan energía por el proceso de **fisión nuclear**. La fisión se consigue bombardeando los núcleos de los átomos pesados, normalmente el uranio-235, con neutrones. Esto hace que los núcleos de uranio se escindan en núcleos menores y emitan neutrones y energía calorífica. Los neutrones

expulsados, a su vez, bombardean los núcleos de átomos de uranio adyacentes, produciendo una *reacción en cadena*. Si el suministro de material fisiónable es suficiente y se permite que la reacción transcurra de una manera no controlada, se liberaría una enorme cantidad de energía en forma de una explosión atómica.

En una central de energía nuclear, la reacción de fisión se controla moviendo varillas absorbentes de neutrones al interior y al exterior del reactor nuclear. El resultado es una reacción nuclear en cadena controlada que libera grandes cantidades de calor. La energía producida es transportada desde el reactor y utilizada para impulsar turbinas de vapor que mueven los generadores eléctricos, de una manera similar a lo que ocurre en las centrales productoras de energía más convencionales.

Uranio El uranio-235 es el único isótopo que aparece en estado natural y que es fácilmente fisiónable y, por consiguiente, es el combustible principal utilizado en las centrales de energía nuclear*. Aunque se han descubierto grandes cantidades de mena de uranio, la mayoría contiene menos del 0,05 por ciento de uranio. De esta pequeña cantidad, el 99,3 por ciento está constituido por el isótopo no fisiónable uranio-238 y sólo el 0,7 por ciento restante contiene el isótopo fisiónable uranio-235. Dado que la mayoría de los reactores nucleares funciona con combustibles que contienen al menos un 3 por ciento de uranio-235, deben separarse los dos isótopos para concentrar el uranio-235 fisiónable. El proceso de separación de los isótopos de uranio es difícil e incrementa de manera sustancial el coste de la energía nuclear.

Aunque el uranio es un elemento raro en la corteza terrestre, aparece en depósitos de enriquecimiento. Algunos de los depósitos más importantes están asociados con lo que se consideran antiguos depósitos de placeres en lechos de corrientes de agua**. Por ejemplo, en Witwatersrand, Sudáfrica, los granos de mena de uranio (así como importantes depósitos de oro) se concentraron como resultado de su elevada densidad en rocas compuestas fundamentalmente de granos de cuarzo. En Estados Unidos, los depósitos de uranio más ricos se encuentran asociados a areniscas jurásicas y triásicas en la plataforma del Colorado y en rocas más jóvenes en Wyoming. La mayor parte de esos depósitos se ha formado a través de la precipitación de compuestos de uranio procedentes del agua subterránea. La precipitación del uranio se produce aquí como consecuencia de una reacción química con la materia orgánica, como se pone de manifiesto por la concentración

* El torio, aunque no es capaz de mantener por sí mismo una reacción en cadena, puede utilizarse con el uranio-235 como un combustible nuclear.

** Los depósitos de placeres se tratan en una sección posterior de este capítulo.

de uranio en los troncos fósiles y lutitas negras ricas en materia orgánica.

Obstáculos al desarrollo Hubo una época en la que se proclamaba que la energía nuclear era la fuente de energía barata y limpia que sustituiría a los combustibles fósiles. Sin embargo, han surgido varios obstáculos que impiden el desarrollo nuclear como una importante fuente de energía. No es el menor de ellos el coste de construcción de las centrales nucleares, que contienen numerosos dispositivos de seguridad. Quizá más importante, sin embargo, es la preocupación ante la posibilidad de un accidente grave en cualquiera de las casi 200 centrales nucleares que existen en el mundo. El accidente ocurrido en Three Mile Island, cerca de Harrisburg, Pensilvania, en 1979, contribuyó a crear inquietud. En esa ocasión, una función defectuosa indujo a los operadores de la central a creer que había demasiada agua en el sistema primario, cuando era todo lo contrario. Esta confusión permitió que el núcleo del reactor estuviera descubierto durante varias horas. Aunque hubo poco peligro para el público, se produjo un daño sustancial en el reactor.

Por desgracia, el accidente ocurrido en 1986 en Chernobyl, en la antigua Unión Soviética, fue mucho más grave. En este incidente, el reactor estuvo fuera de control, y dos pequeñas explosiones levantaron el techo de la estructura, permitiendo que trozos de uranio fueran lanzados a las áreas inmediatas. Durante los 10 días consecutivos que se tardó en extinguir el fuego, niveles elevados de material radiactivo fueron transportados por la atmósfera y depositados en zonas tan alejadas como Noruega. Además de las 18 personas que murieron en las 6 semanas posteriores al accidente, muchos miles más se enfrentan a un mayor riesgo de fallecimiento como consecuencia de cánceres asociados con la lluvia radiactiva.

Debe destacarse que las concentraciones de uranio-235 fisionable y el diseño de los reactores son tales que las centrales de energía nuclear no pueden explotar como una bomba atómica. El riesgo surge de la posibilidad de escape de residuos radiactivos durante una fusión del núcleo o cualquier otro fallo. Además, riesgos como la eliminación de los residuos nucleares y la relación que existe entre los programas de energía nuclear y la proliferación de bombas nucleares deben considerarse cuando evaluemos los pros y los contras sobre el empleo de la energía nuclear.

Energía solar

La expresión *energía solar* se refiere generalmente a la utilización directa de los rayos del sol para el abastecimiento de la energía necesaria para cubrir las necesidades de la población. Los *colectores solares pasivos* más sencillos, y quizá más generalmente utilizados, son ventanas que miran

al sur. Conforme la luz solar atraviesa el vidrio, su energía es absorbida por los objetos de la habitación. Esos objetos, a su vez, irradian calor que calienta el aire. En Estados Unidos se utilizan a menudo ventanas que miran al sur, junto con construcciones mejor aisladas y más herméticas, para reducir de manera sustancial los costes de calefacción.

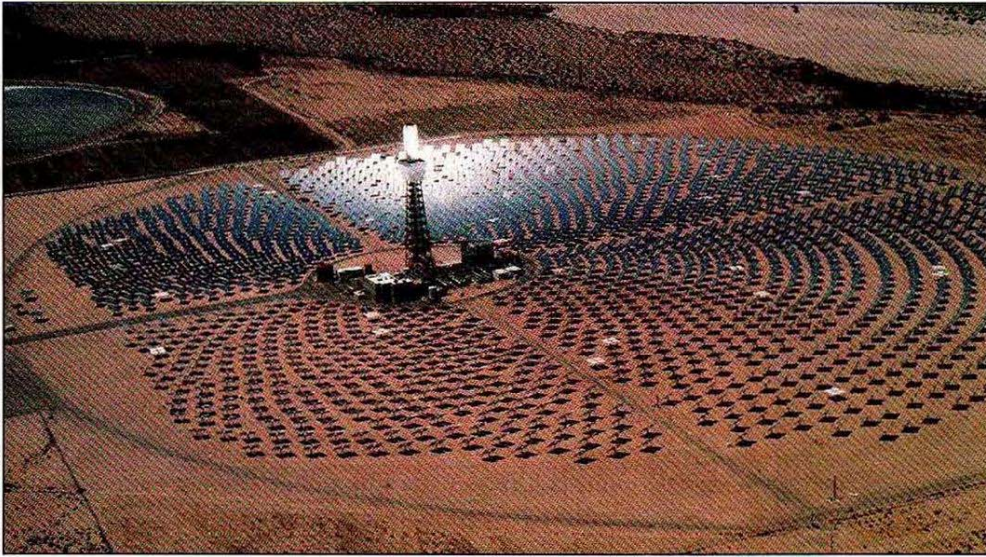
Los sistemas más elaborados utilizados para calentar los hogares precisan un *colector solar activo*. Esos dispositivos montados en los tejados suelen ser cajas grandes ennegrecidas y cubiertas con vidrio. El calor que acumulan puede ser transferido donde sea necesario mediante circulación de aire o líquidos a través de tuberías. Los colectores solares se utilizan también de manera satisfactoria para calentar el agua necesaria en los hogares y los comercios. Por ejemplo, los colectores solares proporcionan agua caliente a más del 80 por ciento de los hogares israelíes.

Aunque la energía solar es gratis, el equipo necesario y su instalación no lo son. Los costes iniciales de instalación de un sistema, entre ellos una unidad calorífica complementaria para los momentos en que disminuya la energía solar (días nublados e invierno) o no la haya (noches), puede ser sustancial. No obstante, a largo plazo, la energía solar es económica en muchas partes y será incluso más rentable a medida que aumenten los precios de los otros combustibles.

En la actualidad, la investigación está en vías de mejorar las tecnologías que permitan concentrar la luz solar. Un método que está siendo examinado es la utilización de espejos que recogen el sol y mantienen sus rayos enfocados sobre una torre receptora. Cerca de Barstow, California, se ha construido una central con 2.000 espejos (Figura 21.12A). La energía solar enfocada a la torre calienta el agua en paneles presurizados hasta más de 500 °C. El agua supercalentada es transferida luego a las turbinas, que impulsan generadores eléctricos.

Otro tipo de colector utiliza células fotovoltaicas (solares) que convierten la energía solar directamente en electricidad. Cerca de Sacramento, California, hay una central experimental en la que se utilizan células fotovoltaicas (Figura 21.12B).

Recientemente han empezado a aparecer pequeños sistemas fotovoltaicos para colocar encima de las azoteas en las casas rurales de algunos países del tercer mundo, entre ellos la República Dominicana, Sri Lanka y Zimbabue. Estas unidades son de un tamaño aproximado al de una maleta abierta y utilizan una batería para almacenar la electricidad que se genera durante las horas de luz diurna. En los trópicos, estos pequeños sistemas fotovoltaicos pueden permitir el funcionamiento de una televisión o de una radio, además de unas pocas bombillas, durante tres o cuatro horas. Aunque mucho más baratas que la construcción



◀ **Figura 21.12** Solar One, instalación solar utilizada para generar electricidad en el desierto de Mojave cerca de Barstow, California. (Foto de Thomas Braise/The Stock Market.)

de generadores eléctricos convencionales, estas unidades siguen siendo demasiado caras para las familias pobres. Por consiguiente, se calcula que unos 2.000 millones de personas todavía carecen de electricidad en los países en vías de desarrollo.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Son los vehículos eléctricos mejores para el medio ambiente?

Sí, pero probablemente no tanto como podríamos creer. Eso se debe a que gran parte de la electricidad que los coches eléctricos utilizan procede de las plantas productoras de energía que emplean combustibles fósiles no renovables. Por tanto, los contaminantes no proceden directamente del coche; sino que proceden de la planta energética que generó la electricidad para el vehículo. Sin embargo, los vehículos eléctricos modernos están diseñados para utilizar el combustible de una manera más eficaz que los vehículos tradicionales de gasolina, de modo que generan menos contaminantes por kilómetro.

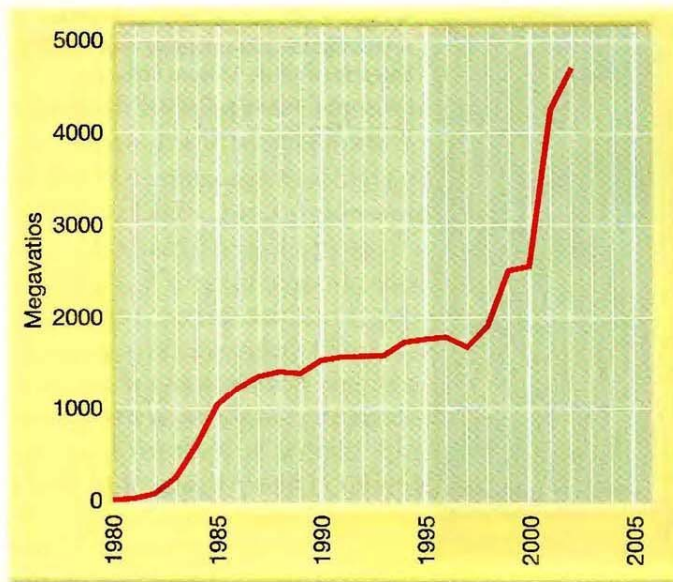
Energía eólica

Aproximadamente, el 0,25 por ciento de la energía solar que alcanza las capas inferiores de la atmósfera se transforma en viento. Aunque se trata de un porcentaje minúsculo, la cantidad absoluta de energía es enorme. Según se ha calculado, si se pudieran aprovechar los vientos de Dakota del Norte y del Sur, proporcionarían el 80 por ciento de la energía eléctrica utilizada en Estados Unidos.

El viento se ha utilizado durante siglos como una fuente de energía casi gratuita y no contaminante. Los barcos de vela y los molinos de viento representan dos de las primeras formas en que se aprovechó este recurso renovable. Además, en un primer momento, hubo una gran dependencia de la energía eólica para bombear agua y, después, para generar pequeñas cantidades de electricidad.

Después de la «crisis energética» incrementada por el embargo de petróleo de los años 70, el interés por la energía eólica, así como por otras formas alternativas de energía aumentó de manera notable. En 1980, Estados Unidos inició un programa para desarrollar sistemas de energía eólica. Los proyectos subvencionados por el Departamento de Energía de Estados Unidos implicaban el establecimiento de granjas eólicas experimentales en puertos en los que se sabía que había fuertes vientos persistentes. Una de estas instalaciones, situada en el puerto Altamont, cerca de San Francisco, hace funcionar más de 7.000 turbinas eólicas en la actualidad. En 2000, el viento proporcionó algo menos del 1 por ciento de la electricidad de California.

A medida que la tecnología ha mejorado, la eficacia ha aumentado y los costes de la electricidad generada por el viento se han vuelto más competitivos. Entre 1983 y 2003, los avances tecnológicos recortaron los gastos de la energía eólica en más del 85 por ciento. Como consecuencia, el crecimiento de la capacidad instalada en Estados Unidos (y en otros lugares) ha crecido de manera espectacular (Figura 21.13). Algunos expertos calculan que en los próximos 50 o 60 años la energía eólica podría satisfacer entre el 5 y el 10 por ciento de la demanda de energía eléctrica de Estados Unidos. Una zona de expansión de la energía eólica serán probablemente las islas y



▲ **Figura 21.13** Capacidad de energía eólica instalada en Estados Unidos (en megavatios). El crecimiento durante los últimos años ha sido espectacular. De acuerdo con la American Wind Energy Association, la capacidad instalada en enero de 2003 era de 4.700 megavatios. Un año después, en enero de 2004, se esperaba que esa cifra se elevara a unos 6.000 megavatios (suficientes para suministrar electricidad a 1,5 millones de hogares). (Datos del Departamento de Energía de Estados Unidos y la American Wind Energy Association.)

otras regiones alejadas de las redes eléctricas que deben importar combustible para generar energía.

Aunque el futuro de la energía eólica parece prometedor, no está exento de dificultades. Además de los avances técnicos que deben continuar realizándose, la contaminación acústica y el coste de las grandes extensiones de terreno en áreas muy pobladas representan obstáculos significativos para su desarrollo. En los Países Bajos, donde los molinos tienen una larga historia, las propuestas para colocar turbinas eólicas encima del sistema de diques del país han topado con una fuerte oposición. Una parte del problema es que los Países Bajos, como gran parte de Europa, están muy densamente poblados y, por tanto, tienen pocos lugares remotos.

Otra limitación significativa de la energía eólica es que es intermitente. Si el viento constituyera una gran proporción del suministro energético total, cualquier déficit provocaría grandes daños económicos. Mejores medios de almacenamiento permitirían al viento satisfacer un porcentaje significativamente mayor de nuestras necesidades energéticas. Según una propuesta, se utilizaría energía eólica para producir hidrógeno a través de la electrólisis del agua. Luego, este gas combustible se distribuiría y almacenaría de una manera parecida al gas natural.

Energía hidroeléctrica

La caída del agua ha sido una fuente de energía durante siglos. A lo largo de la mayor parte de la historia, la energía mecánica producida por las ruedas hidráulicas se utilizó para alimentar los molinos y otras maquinarias. En la actualidad, la energía generada por las caídas de agua se utiliza para impulsar las turbinas que producen electricidad; de ahí el término **energía hidroeléctrica**. En Estados Unidos, las centrales de energía hidroeléctrica aportan aproximadamente el 5 por ciento de las necesidades del país. La mayor parte de esa energía se produce en grandes presas que permiten un control del flujo de agua. El agua estancada represada en un embalse es una forma de energía almacenada que puede liberarse en cualquier momento para producir electricidad.

Aunque la energía hidráulica se considera un recurso renovable, las presas construidas para proporcionar electricidad tienen un tiempo de vida limitado. Todos los ríos transportan sedimento en suspensión que empieza a depositarse detrás de la presa nada más construirse ésta. Finalmente, el sedimento colmatará por completo el embalse. Esto tardará de 50 a 300 años, dependiendo de la cantidad de materia en suspensión transportada por el río. Un ejemplo es la enorme presa de Asuán, en Egipto, que se terminó en los años 60. Se estima que la mitad del embalse estará lleno de sedimentos del río Nilo en 2025.

La disponibilidad de lugares apropiados es un factor importante que limita el desarrollo de centrales hidroeléctricas a gran escala. Un buen sitio debe proporcionar una altura significativa para la caída del agua y un caudal elevado. Existen presas hidroeléctricas en muchas partes de Estados Unidos; la mayor concentración se sitúa en el sureste y noroeste del Pacífico. Casi todos los lugares idóneos de Estados Unidos ya han sido explotados limitando la expansión futura de la energía hidroeléctrica. Podría aumentarse la energía total producida por las centrales hidroeléctricas, pero la porción relativa proporcionada por esa fuente puede disminuir, porque otras fuentes de energía alternativa pueden incrementarse a un ritmo mayor.

En los últimos años ha empezado a utilizarse un tipo diferente de producción de energía hidroeléctrica. Denominado *sistema de almacenamiento de agua bombeada* es en realidad un tipo de control de la energía. Durante las épocas en las que la demanda de electricidad es baja la energía producida por fuentes no hidroeléctricas, que no es necesaria, se utiliza para bombear el agua de un embalse inferior a un área de almacenamiento situada a una mayor elevación. Luego, cuando la demanda de electricidad es grande, se dispone del agua almacenada en el embalse situado encima para impulsar las turbinas y producir electricidad que complementa el suministro de energía.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Cuál es el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo?

La distinción la merece el proyecto Three Gorges en el río Yangtze de China. La construcción empezó en 1994. Cuando se complete en 2009, se espera que genere 85.000 millones de kilovatios hora de electricidad cada año, lo que equivale a aproximadamente el 6,5 por ciento de las necesidades eléctricas de China en 2001. Supuestamente el principal motivo para construir el polémico dique era el control de las inundaciones. Su embalse inundará 632 kilómetros cuadrados de tierra que se extienden unos 660 kilómetros a lo largo del río.

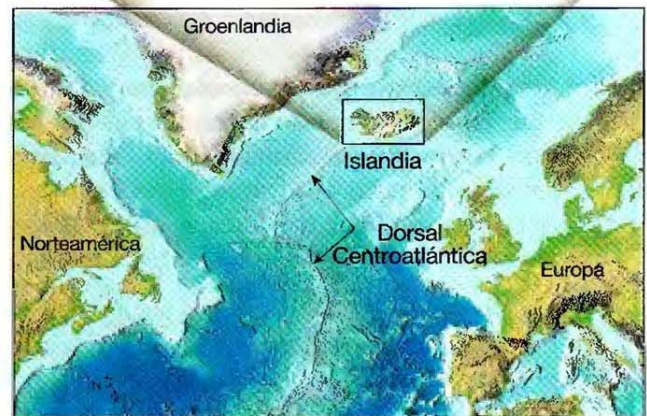
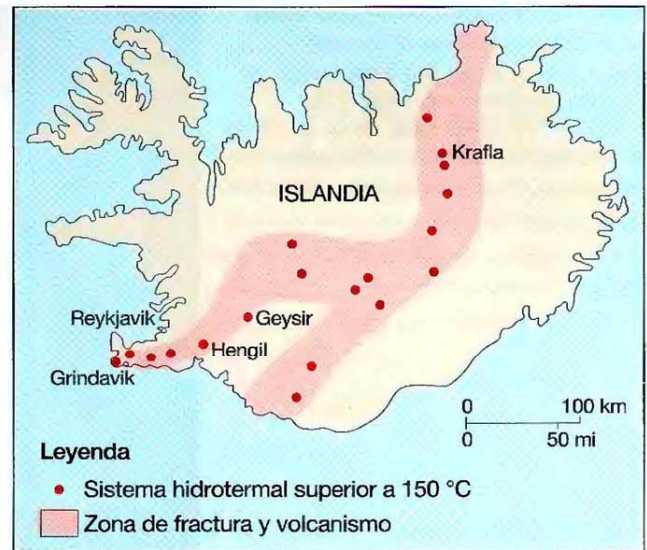
Energía geotérmica

Se aprovecha la **energía geotérmica** explotando los depósitos subterráneos naturales de vapor y agua caliente. Estos últimos aparecen en lugares donde las temperaturas bajo la superficie son elevadas debido a la actividad volcánica relativamente reciente. Se utiliza la energía geotérmica de dos maneras: el vapor y el agua caliente se emplean para calentar y para generar electricidad.

Islandia es una gran isla volcánica que tiene actividad magmática en la actualidad (Figura 21.14). En la capital islandesa, Reykjavik, el vapor y el agua caliente son bombeados a los edificios de la ciudad para calentar los interiores. También calientan los invernaderos, donde crecen todo el año frutas y verduras. En Estados Unidos, diversos estados occidentales utilizan el agua caliente de origen geotérmico para calefacción.

En lo que se refiere a la producción geotérmica de electricidad, los italianos fueron los primeros en hacerlo en 1904, de manera que la idea no es nueva. A finales del siglo XX y principios del XXI, más de 250 plantas de energía geotérmica en 22 países producían más de 8.000 megavatios (millones de vatios). Estas plantas proporcionan energía a más de 60 millones de personas. En la Tabla 21.2 se enumeran los principales productores de energía geotérmica.

La primera central de energía geotérmica comercial de Estados Unidos se construyó en 1960, en The Geysers, al norte de San Francisco (Figura 21.15). The Geysers es todavía la mayor planta de energía geotérmica del mundo y genera unos 1.700 megavatios o casi el 60 por ciento de la energía geotérmica de Estados Unidos. Además de The Geysers, se está produciendo desarrollo geotérmico en algunos otros lugares del oeste de Estados Unidos, entre ellos Nevada, Utah y el valle Imperial en el sur de California. La capacidad generadora de energía geotérmica de Estados Unidos, de más de 2.800 megavatios,



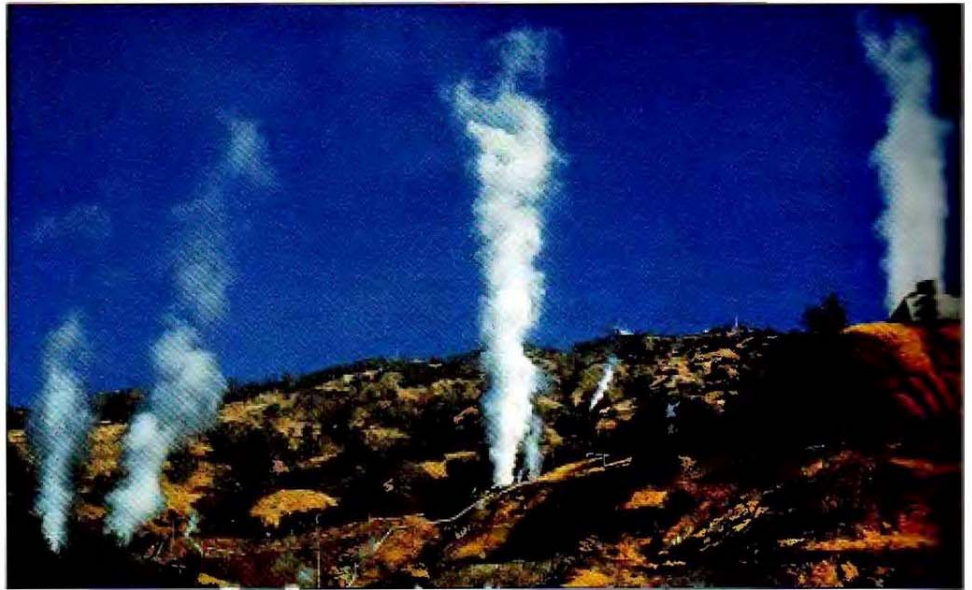
▲ **Figura 21.14** Islandia está a caballo de la dorsal Centroatlántica. Este borde de placa divergente es el centro de numerosos sistemas geotérmicos y volcánicos activos. Dado que todo el país está compuesto por rocas volcánicas geológicamente jóvenes, puede encontrarse agua caliente en casi cualquier agujero que se taladre en cualquier parte. Más del 45 por ciento de la energía islandesa procede de las fuentes geotérmicas.

Tabla 21.2 Producción mundial de energía geotérmica, 2000

País productor	Megavatios
Estados Unidos	2.850
Filipinas	1.848
Italia	7.68,5
México	743
Indonesia	589,5
Japón	530
Nueva Zelanda	345
Islandia	140
Costa Rica	120
El Salvador	105
Otros	178
Total	8.217

FUENTE: Geothermal Education Office.

► **Figura 21.15** The Geysers, cerca de la ciudad de Santa Rosa en el norte de California, es el mayor lugar del mundo en desarrollo geotérmico productor de electricidad. La mayor parte de los pozos de vapor se encuentra a unos 3.000 metros de profundidad. (Foto cortesía de la Pacific Gas and Electric Company.)



es suficiente para suministrar electricidad a unos 3,5 millones de hogares. Ésta es una cantidad de electricidad comparable a la combustión de unos 60 millones de barriles de petróleo cada año.

¿Qué factores geológicos favorecen un depósito geotérmico de valor comercial?

1. *Una fuente potente de calor*, como una gran cámara magmática lo suficientemente profunda como para asegurar una presión adecuada y un enfriamiento lento, pero no tan profunda que no pueda establecerse una circulación natural de agua. Esas cámaras magmáticas se encuentran con más probabilidad en regiones de actividad volcánica reciente.
2. *Depósitos grandes y porosos con canales conectados a la fuente de calor*, cerca de los cuales el agua puede circular y luego ser almacenada en el depósito.
3. *Una tapa con rocas de poca permeabilidad* que impida el flujo de agua y calor a la superficie. Un depósito profundo y bien aislado contiene almacenada mucha más energía que un depósito similar, pero no aislado.

Debemos reconocer que la energía geotérmica no es inagotable. Cuando los fluidos calientes son bombeados desde los depósitos que se han calentado gracias a la actividad volcánica, el agua no puede ser sustituida y luego calentada lo suficiente para recargar el depósito. La experiencia demuestra que el vapor y el agua caliente de cada pozo no duran normalmente más de 10 a 15 años, de manera que deben perforarse más pozos para mantener la producción de energía. Finalmente, el campo se agota.

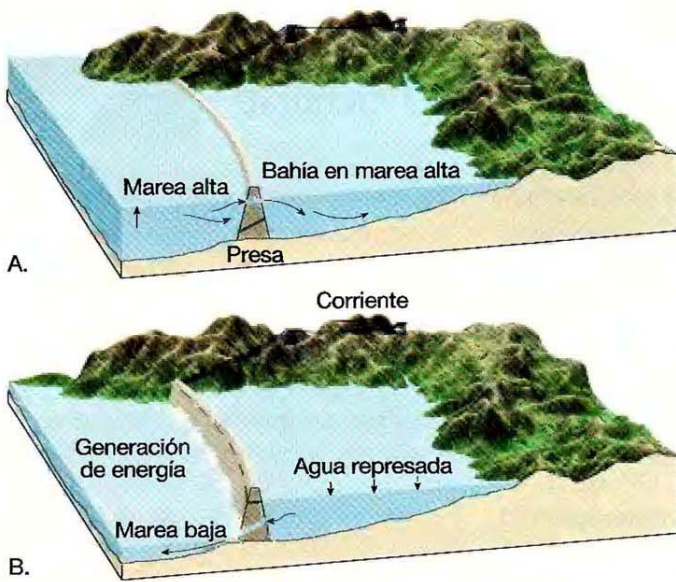
Como ocurre con otros métodos alternativos de producción de energía, no cabe esperar que las fuentes geotérmicas cubran un elevado porcentaje de las necesidades energéticas crecientes del mundo. No obstante, en regiones donde pueda desarrollarse su potencial, no cabe duda de que su uso seguirá en aumento.

Energía mareal

Se han propuesto varios métodos de producción de energía eléctrica a partir de los océanos, pero el potencial energético del océano sigue en gran medida sin explotar. El desarrollo de la energía mareal es el principal ejemplo de producción de energía a partir del océano.

Las mareas se han utilizado como una fuente de energía durante siglos. Empezando en el siglo XII, las turbinas hidráulicas impulsadas por las mareas se utilizaron para hacer funcionar los molinos harineros y los aserraderos. Durante los siglos XVII y XVIII, mucha de la harina de Boston se producía en un molino mareal. En la actualidad, deben satisfacerse demandas de energía mucho mayores y deben emplearse formas más sofisticadas para utilizar la fuerza creada por la subida y la bajada perpetua del océano.

La energía mareal se aprovecha construyendo una presa a través de la boca de una bahía o un estuario en un área costera que tenga un gran intervalo mareal (Figura 21.16). La estrecha apertura entre la bahía y el océano abierto aumenta las variaciones del nivel del agua que se producen cuando suben y bajan las mareas. El fuerte flujo de entrada y salida que se produce en ese lugar se utiliza luego para impulsar turbinas y generadores eléctricos.



▲ **Figura 21.16** Diagrama simplificado que muestra el principio de la presa mareal. La electricidad se genera sólo cuando hay una diferencia de altura de agua suficiente entre la bahía y el océano).

La central de energía mareal situada en la boca del río Rance, en Francia, es un ejemplo de la utilización de energía mareal. Con mucho, la mayor construida hasta ahora, esta central empezó a funcionar en 1966 y produce energía suficiente para satisfacer las necesidades de la Bretaña, además de contribuir también a las demandas de otras regiones. Cerca de Murmansk, en Rusia, y cerca de Taliang, en China, así como en la bahía de Fundy, en la provincia canadiense de Nova Scotia, se han construido centrales experimentales mucho más pequeñas.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Es la energía procedente de las olas oceánicas una fuente de energía alternativa práctica?

Se está explorando seriamente esta posibilidad. En noviembre de 2000, se puso en funcionamiento la primera estación comercial del mundo de obtención de la procedente de las olas en la isla escocesa de Islay, que suministraba energía a la red eléctrica del Reino Unido. La estación energética de 500 kilovatios utiliza una tecnología denominada columna de agua oscilante, en la que las olas que llegan empujan el aire hacia arriba y hacia abajo dentro de un tubo de cemento parcialmente sumergido en el océano. El aire que entra y sale del extremo superior del tubo se utiliza para hacer funcionar una turbina y producir electricidad. Si se demuestra que esta tecnología funciona, puede abrir la puerta a la energía de las olas para ser un contribuyente significativo de energía renovable en lugares adecuados de la costa.

No es posible aprovechar la energía mareal en la mayor parte de las costas del mundo. Si el intervalo mareal es menor de 8 metros o si no hay bahías estrechas y encerradas, el desarrollo de la energía mareal es antieconómico. Por esta razón, las mareas nunca satisfarán una porción muy elevada de nuestros requisitos en energía eléctrica, que son cada vez mayores. No obstante, puede merecer la pena intentar el desarrollo de energía mareal en sitios factibles, porque la electricidad producida por las mareas no consume combustibles agotables y no crea desechos nocivos.

Recursos minerales

La corteza de la Tierra es fuente de una amplia variedad de sustancias útiles y esenciales. De hecho, prácticamente todos los productos manufacturados contienen sustancias derivadas de los minerales. En la Tabla 21.3 se enumeran algunos ejemplos importantes.

Los **recursos minerales** son el conjunto de minerales útiles disponibles comercialmente. Entre estos recursos se cuentan yacimientos ya identificados de los que pueden extraerse provechosamente minerales, que se denominan **reservas**, así como depósitos conocidos que ya no son recuperables ni desde el punto de vista económico ni desde el tecnológico. Yacimientos que se supone que existen, pero todavía no se han descubierto, se consideran también recursos minerales. Además, se utiliza el término **mena** para indicar los minerales metálicos útiles que pueden extraerse, como beneficio, de las minas. En el uso habitual, el término *mena* se aplica también a algunos minerales no metálicos, como la fluorita y el azufre. Sin embargo, los materiales utilizados para propósitos como la piedra de construcción, agregados para las carreteras, abrasivos, cerámica y fertilizantes no suelen denominarse menas; en cambio, se clasifican como rocas y minerales industriales.

Recordemos que más del 98 por ciento de la corteza está compuesta sólo por 8 elementos. Excepto por lo que se refiere al oxígeno y al silicio, todos los demás elementos constituyen una fracción relativamente pequeña de las rocas habituales de la corteza terrestre (véase Figura 3.18). De hecho, las concentraciones naturales de muchos elementos son extraordinariamente pequeñas. Un depósito que contenga el porcentaje medio de un elemento valioso tiene menos valor si el coste de extraerlo es mayor que el valor del material recuperado. Para que se le considere valioso, un elemento debe encontrarse en una concentración superior al nivel de su abundancia media en la corteza. En general, cuanto menos abundante sea en la corteza, mayor debe ser su concentración.

Tabla 21.3 Aparición de minerales metálicos

Metal	Menas principales	Contexto geológico
Aluminio	Bauxita	Producto residual de la meteorización
Cinc	Esfalerita	Yacimientos hidrotermales
Cobre	Calcopirita Bornita Calcosina	Yacimientos hidrotermales; metamorfismo de contacto; enriquecimiento por procesos de meteorización
Cromo	Cromita	Segregación magmática
Estaño	Casiterita	Yacimientos hidrotermales; depósitos de placeres
Hierro	Hematites Magnetita Limonita	Formaciones bandeadas sedimentarias; segregación magmática
Magnesio	Magnesita Dolomita	Yacimientos hidrotermales
Manganeso	Pirolusita	Producto residual de meteorización
Mercurio	Cinabrio	Yacimientos hidrotermales
Molibdeno	Molibdenita	Yacimientos hidrotermales
Níquel	Pentlandita	Segregación magmática
Oro	Oro nativo	Yacimientos hidrotermales; depósitos de placeres
Plata	Plata nativa Argentita	Yacimientos hidrotermales; enriquecimiento por procesos de meteorización
Platino	Platino nativo	Segregación magmática, depósitos de placeres
Plomo	Galena	Yacimientos hidrotermales
Titanio	Ilmenita Rutilo	Segregación magmática; depósitos de placeres
Uranio	Uraninita (Petchblenda)	Pegmatitas; depósitos sedimentarios
Wolframio	Wolframita Scheelita	Pegmatitas; yacimientos de metamorfismo de contacto; depósitos de placeres

Por ejemplo, el cobre constituye alrededor del 0,0135 por ciento de la corteza. Sin embargo, para que un material sea considerado una mena de cobre, su concentración en ese elemento debe ser unas 50 veces esa cantidad. El aluminio, por el contrario, representa el 8,13 por ciento de la corteza y debe presentarse a una concentración de sólo unas 4 veces su porcentaje medio en la corteza para que su extracción resulte rentable.

Es importante darse cuenta de que la extracción de un yacimiento puede resultar lucrativa o perder su rentabilidad debido a cambios económicos. Si aumenta la demanda de un metal y los precios se elevan, el estado de un depósito previamente no lucrativo cambia, y se convierte en una mena. El estado de los depósitos no lucrativos puede cambiar también si un avance tecnológico permite la extracción del elemento útil a un coste menor que antes. Esto ocurrió en la mina de cobre localizada en Bingham Canyon, Utah, la mayor mina abierta que hay sobre la Tierra (Recuadro 21.3). La minería se interrumpió aquí en 1985, porque el equipo obsoleto había elevado el coste de

extracción del cobre por encima del precio de venta. Los propietarios respondieron sustituyendo un ferrocarril anticuado de 1.000 coches por cintas transportadoras y tuberías para transportar la mena y los productos de desecho. Esos dispositivos permitieron una reducción del coste de casi un 30 por ciento y consiguieron que el funcionamiento de la mina volviera a ser provechoso.

A lo largo de los años, los geólogos han intentado saber cómo los procesos naturales producen concentraciones localizadas de minerales metálicos necesarios. Un hecho bien establecido es que la aparición de recursos minerales valiosos está estrechamente relacionada con el ciclo de las rocas. Es decir, los mecanismos que generan rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, entre ellos los procesos de meteorización y erosión, desempeñan un papel importante en la concentración de elementos útiles. Además, con el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas, los geólogos añadieron aún otra herramienta para entender los procesos por medio de los cuales una roca se transforma en otra.



Recuadro 21.3 ▶ Entender la Tierra

Bingham Canyon, Utah: la mayor mina de fosa abierta

En Bingham Canyon, una montaña se elevaba donde ahora hay una enorme fosa. Se trata de la mina a cielo abierto más grande del mundo, la mina de cobre de Bingham Canyon, a unos 40 kilómetros al suroeste de Salt Lake City, Utah. El borde mide casi 4 kilómetros de diámetro y cubre casi 8 kilómetros cuadrados. Su profundidad es de 900 metros. Si se construyera una torre de acero en el fondo, ¡tendría que ser cinco veces más alta que la torre Eiffel para alcanzar el borde superior de la fosa!

Empezó a finales del siglo XIX como una mina subterránea para filones de plata y plomo. Más tarde se descubrió cobre. Se encuentran depósitos similares en varios puntos del suroeste norteamericano y en un cinturón que se extiende desde el sur de Alaska hasta el norte de Chile.

Como en otros puntos de este cinturón, la mena de Canyon Bingham está diseminada por las rocas ígneas *porfiríticas*; de ahí que se denominen *depósitos de cobre porfídico*. El depósito se formó después de la intrusión del magma a profundidades someras. La posterior rotura creó fracturas extensas en las que penetraron soluciones hidrotermales a partir de las cuales las menas precipitaron.

Aunque el porcentaje de cobre en la roca es pequeño, el volumen total de cobre es enorme. Desde que empezaron las operaciones de mina abierta en 1906, se han retirado unos 4.000 millones de toneladas de material, que representan más de 12 millones de toneladas de cobre. También se han extraído cantidades significativas de oro, plata y molibdeno.

En la actualidad, la mena está lejos de agotarse. Durante los próximos 25

años, los planes prevén la extracción y el procesamiento de 3.000 millones de toneladas adicionales de material. Esta excavación artificial, la mayor, ha generado la mayoría de la producción mineral de Utah durante más de 80 años y se ha denominado el «agujero más rico de la Tierra».

Como muchas minas antiguas, la mina Bingham no estuvo regulada durante la mayor parte de su historia. El desarrollo tuvo lugar antes de que se tuviera la conciencia actual de los impactos ambientales de la actividad minera y antes de la eficaz legislación ambiental. En la actualidad, los problemas de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, la contaminación del aire, los residuos sólidos y peligrosos, y la mejora del suelo están recibiendo en Bingham Canyon la atención que merecía hace mucho tiempo.

Recursos minerales y procesos ígneos

Algunas de las acumulaciones más importantes de metales, como el oro, la plata, el cobre, el mercurio, el plomo, el platino y el níquel, son originadas por procesos ígneos (véase Tabla 21.3). Estos recursos minerales, como la mayoría, son consecuencia de procesos que concentran los elementos deseables en cantidades que hacen económicamente factible su extracción.

Segregación magmática

Los procesos ígneos que generan algunos de esos depósitos de metales son bastante evidentes. Por ejemplo, a medida que un gran cuerpo magmático se enfría, los minerales densos, que cristalizan primero, tienden a depositarse en la parte inferior de la cámara magmática. Este tipo de segregación magmática es particularmente activa en los grandes magmas basálticos en los cuales a veces se generan cromita (mena de cromo), magnetita y platino. Capas de cromita, intercalada con otros minerales densos, se obtienen en depósitos de este tipo en el complejo Stillwater de Montana. Otro ejemplo es el complejo Bushveld, de Sudáfrica, que contiene más

del 70 por ciento de las reservas de platino conocidas del mundo.

La segregación magmática es también importante en las últimas etapas del proceso magmático. Esto es particularmente cierto para los magmas graníticos, en los cuales el fundido residual puede enriquecerse en elementos raros y metales pesados. Más tarde, dado que el agua y otras sustancias volátiles no cristalizan junto con la masa del cuerpo magmático, esos fluidos constituyen un elevado porcentaje del fundido durante la fase final de solidificación. La cristalización en un ambiente rico en fluidos, donde se intensifica la migración iónica, produce la formación de cristales de varios centímetros o incluso de unos pocos metros de longitud. Las rocas resultantes, denominadas **pegmatitas**, están compuestas por estos cristales inusualmente grandes (véase Recuadro 4.1).

La mayoría de las pegmatitas son de composición granítica y consisten en cristales grandes de cuarzo, feldespato y moscovita. El feldespato se utiliza en la producción de cerámica y la moscovita para el aislamiento eléctrico. Además, las pegmatitas contienen, a menudo, algunos de los elementos menos abundantes. Por tanto, además de los silicatos comunes, algunas pegmatitas contienen gemas semipreciosas, como el berilo, el topacio y la turmalina. Además, a menudo se encuentran minerales que contienen los elementos litio, cesio, uranio y las

tierras raras*. La mayoría de las pegmatitas está localizada dentro de grandes masas ígneas o en forma de diques o venas que cortan la roca de caja que rodea la cámara magmática (Figura 21.17).

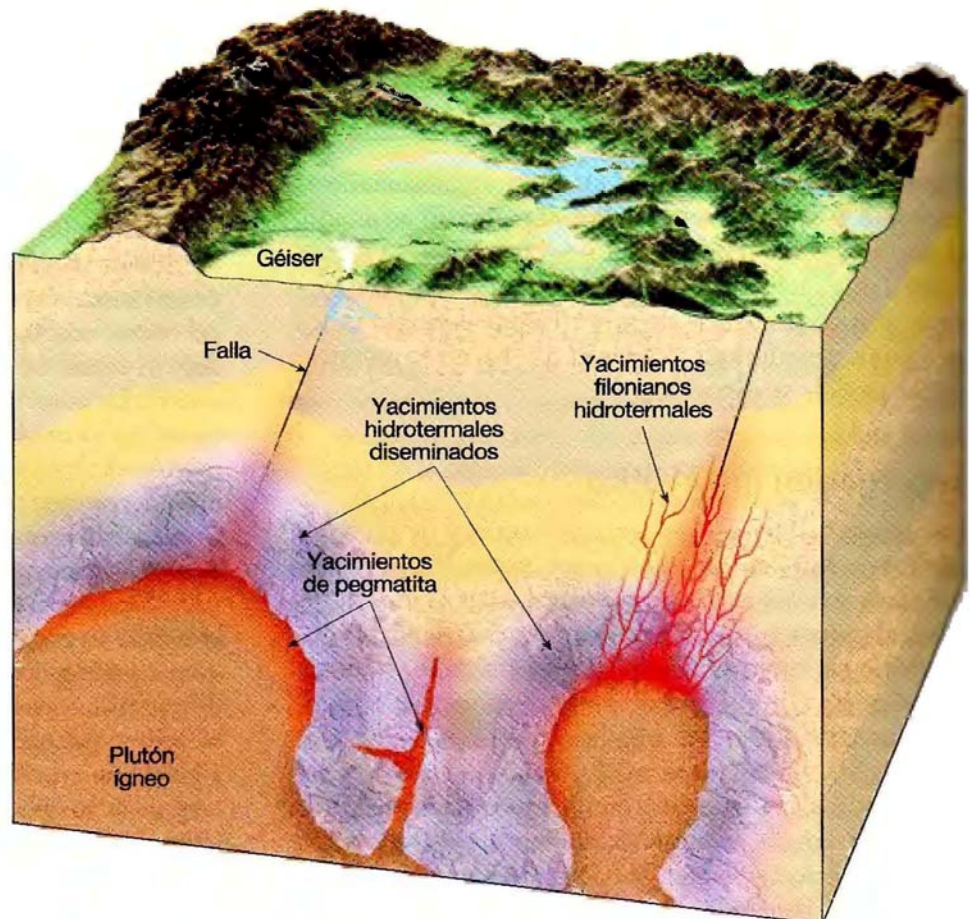
Los magmas no producen pegmatitas en todas las etapas de evolución; ni tampoco todos los magmas tienen una composición granítica. Antes bien, algunos magmas se enriquecen en hierro o, a veces, en cobre. Por ejemplo, en Kirava, Suecia, el magma compuesto por más del 60 por ciento de magnetita solidificó para producir uno de los depósitos de hierro más grandes del mundo.

Diamantes

Otro mineral importante desde el punto de vista económico y con origen ígneo es el diamante. Aunque mejor conocidos como gemas, los diamantes se utilizan mucho como abrasivos. Los diamantes se originan a profundidades de

* Las tierras raras son un grupo de 15 elementos (números atómicos comprendidos entre el 57 y el 71) que poseen propiedades semejantes. Son catalizadores útiles para el refinado del petróleo y se utilizan para mejorar la retención del color en los tubos de imagen de la televisión.

► **Figura 21.17** Ilustración que representa la relación entre un cuerpo ígneo y los yacimientos hidrotermales y de pegmatita asociados.



casi 200 kilómetros, donde la presión confinante es lo bastante grande como para generar esta forma de alta presión del carbono. Una vez cristalizados, son transportados hacia arriba a través de conductos denominados pipas cuyo diámetro aumenta hacia la superficie. En las pipas diamantíferas, casi todas ellas contienen cristales de diamante que están diseminados en una roca ultramáfica denominada *kimberlita*. Las pipas de kimberlita más productivas se encuentran en Sudáfrica. La única fuente equivalente de diamantes de Estados Unidos está localizada cerca de Murfreesboro, Arkansas; pero este depósito está agotado y en la actualidad se utiliza únicamente como atracción turística.

Soluciones hidrotermales

Entre los yacimientos de menas mejor conocidos y más importantes se encuentran los generados por las **soluciones hidrotermales** (agua caliente). Incluidos en este grupo se encuentran los depósitos de oro de la mina Homestake, en Dakota del Sur; las menas de plomo, cinc y plata cerca de Coeur d'Alene, Idaho; los depósitos de plata de Comstock Lode, en Nevada, y las menas de cobre de la península de Keweenaw, en Michigan (Figura 21.18).



▲ **Figura 21.18** El cobre nativo de la península Keweenaw, al norte de Michigan, es un ejemplo excelente de yacimiento hidrotermal. Hubo una época en que esta área constituyó una importante fuente de cobre, pero en la actualidad está muy agotada. (Foto de E. J. Tarbuck.)

La mayoría de los depósitos hidrotermales se origina a partir de fluidos calientes ricos en metales que son restos de procesos magmáticos en estadios tardíos. Durante la solidificación, se acumulan líquidos, más diversos iones metálicos, cerca de la parte superior de la cámara magmática. Debido a su movilidad, estas soluciones ricas en iones pueden migrar grandes distancias a través de las rocas circundantes antes de ser finalmente depositados, generalmente como sulfuros de varios metales (Figura 21.17). Algunos de estos fluidos se mueven a lo largo de aberturas, como fracturas o planos de estratificación, donde se enfrían y precipitan las menas metálicas para producir **depósitos filonianos**. La mayoría de los depósitos rentables de oro, plata y mercurio se producen como depósitos filonianos hidrotermales.

Otro tipo importante de acumulación generada por la actividad hidrotermal se denomina **depósitos diseminados**. En vez de concentrarse en venas estrechas y diques, estas menas se distribuyen en forma de pequeñas acumulaciones dispersas en la masa rocosa. La mayor parte del cobre mundial se extrae a partir de depósitos diseminados, entre ellos los situados en Chuquicamata, Chile, y la enorme mina de cobre Bingham Canyon, en Utah (véase Recuadro 21.2). Dado que esas acumulaciones contienen sólo del 0,4 al 0,8 por ciento de cobre, deben extraerse entre 125 y 250 kilogramos para conseguir un kilogramo de metal recuperado. El impacto ambiental de esas grandes excavaciones, incluido el problema de la eliminación de los residuos, es significativo.

Algunos depósitos hidrotermales se han generado por la circulación de aguas subterráneas en regiones donde el magma estaba emplazado cerca de la superficie. El

área del Parque Nacional Yellowstone es un ejemplo moderno de una situación de este tipo. Cuando el agua subterránea invade una zona de actividad ígnea reciente, su temperatura aumenta, intensificando en gran medida su capacidad para disolver minerales. Esas aguas calientes migratorias extraen los iones metálicos de las rocas ígneas intrusivas y los transportan hacia arriba donde pueden depositarse como un cuerpo de mena. Dependiendo de las condiciones, las acumulaciones resultantes pueden aparecer como depósitos filonianos, depósitos diseminados o, en los lugares donde las soluciones hidrotermales alcanzan la superficie en forma de géiseres o manantiales calientes, como depósitos superficiales.

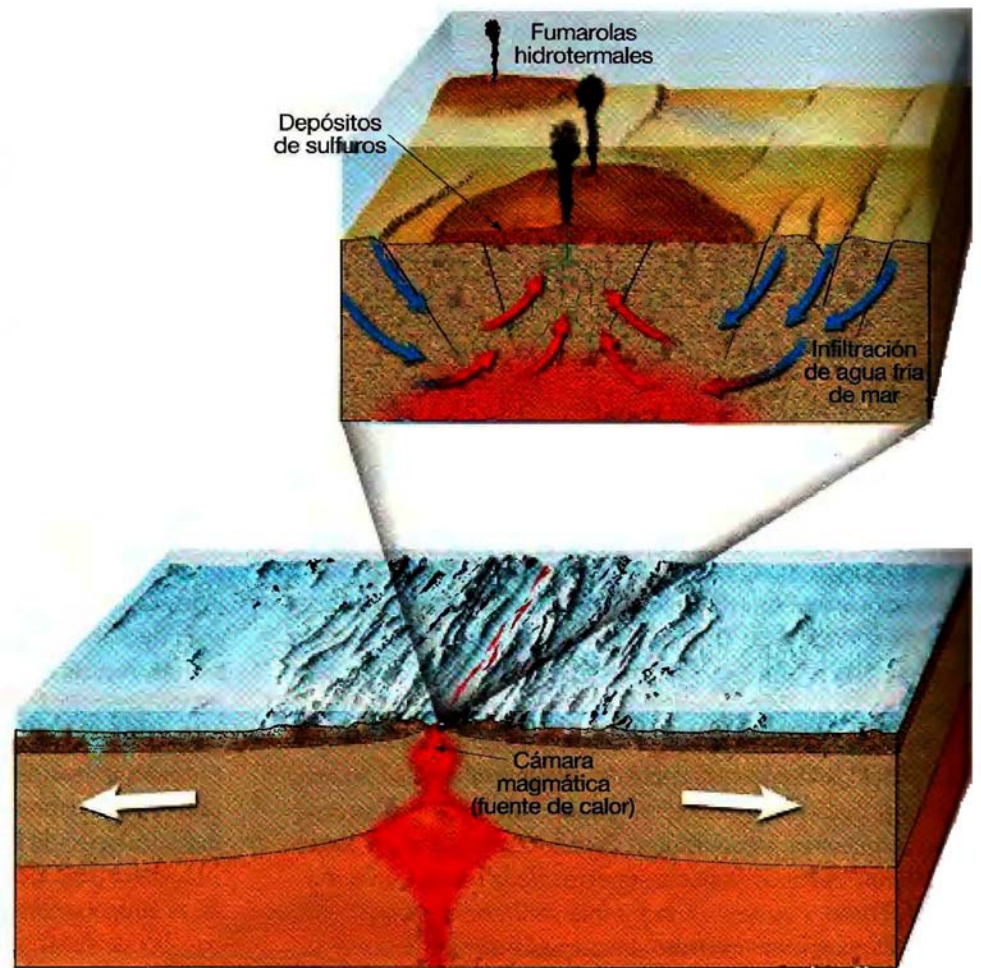
Con el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas resulta claro que algunos depósitos hidrotermales se originaron a lo largo de antiguas dorsales oceánicas. Un ejemplo bien conocido se encuentra en la isla de Chipre, donde se ha estado extrayendo cobre en minas durante más de 4.000 años. Aparentemente esos depósitos representan menas que se formaron en un centro de expansión de un antiguo fondo oceánico.

Desde mediados de los años setenta, se han detectado depósitos de sulfuros ricos en metales y fuentes termales en diversos lugares, incluidas áreas de estudio situadas a lo largo de la dorsal del Pacífico oeste y la dorsal de Juan de Fuca. Los depósitos se están formando allí donde el agua marina caliente, rica en metales y azufre disueltos, brota del fondo del océano en forma de nubes llenas de partículas denominadas *fumarolas hidrotermales*. Como se muestra en la Figura 21.19, el agua del mar se infiltra en la corteza oceánica caliente a lo largo de los flancos de la dorsal. Conforme el agua atraviesa el material recién formado, se calienta y reacciona químicamente con el basalto, extrayendo y transportando azufre, hierro, cobre y otros metales. Cerca del eje de la dorsal, el fluido caliente rico en metales se eleva a lo largo de las fallas. Tras alcanzar el suelo del océano, el líquido arrojado se mezcla con el agua fría del mar y los sulfuros precipitan para formar depósitos de sulfuros masivos.

Recursos minerales y procesos metamórficos

El papel del metamorfismo en la formación de yacimientos minerales suele ligarse a los procesos ígneos. Por ejemplo, muchos de los depósitos de menas metamórficas más importantes se producen mediante metamorfismo de contacto. La roca de caja es recrystalizada y alterada químicamente por el calor, la presión y las soluciones hidrotermales que emanan de un cuerpo ígneo en intrusión. El grado de alteración de la roca de caja depende de su naturaleza así como de la masa ígnea que haga intrusión.

► **Figura 21.19** Pueden producirse depósitos de sulfuros masivos como consecuencia de la circulación del agua de mar a través de la corteza oceánica a lo largo de centros de expansión activos. A medida que el agua del mar se infiltra en la corteza basáltica caliente, lixivia azufre, hierro, cobre y otros metales. El fluido enriquecido y caliente vuelve al fondo del mar cerca del eje de la dorsal a lo largo de las fallas y las fracturas. Algunos sulfuros metálicos pueden precipitar en esos canales a medida que el fluido ascendente empieza a enfriarse. Cuando el líquido caliente emerge del fondo del océano y se mezcla con el agua fría del mar, los sulfuros precipitan para formar depósitos masivos.



Algunos materiales resistentes, como las areniscas ricas en cuarzo, pueden mostrar muy poca alteración, mientras que otros, entre ellos las calizas, pueden exhibir los efectos del metamorfismo durante varios kilómetros desde el plutón ígneo. A medida que los fluidos calientes ricos en iones atraviesan la caliza, tienen lugar reacciones químicas que producen minerales útiles, como el granate y el corindón. Además, esas reacciones liberan dióxido de carbono, que facilita en gran medida la migración ascendente de los iones metálicos. Por tanto, extensas aureolas de depósitos ricos en metales, frecuentemente, rodean los plutones ígneos que han invadido los estratos de caliza.

Los minerales metálicos más comunes asociados con el metamorfismo de contacto son la esfalerita (cinc), la galena (plomo), la calcopirita (cobre), la magnetita (hierro) y la bornita (cobre). Los depósitos de menas hidrotermales pueden estar diseminados a lo largo de la zona alterada o existir como masas concentradas localizadas cerca del cuerpo intrusivo o en la periferia de la zona metamórfica.

El metamorfismo regional puede generar también depósitos minerales útiles. Recordemos que, en los bordes de placa convergentes, la corteza oceánica, junto con

los sedimentos que se han acumulado en los márgenes continentales, son transportados a grandes profundidades. En estos ambientes de alta temperatura y presión se alteran la mineralogía y la textura de los materiales subducidos, originando depósitos de minerales no metálicos como el talco y el grafito.

Meteorización y yacimientos de menas

La meteorización crea muchos depósitos minerales importantes concentrando cantidades pequeñas de metales, que están dispersos a través de la roca no meteorizada, en cantidades económicamente valiosas. Dicha transformación se denomina a menudo **enriquecimiento secundario** y tiene lugar de dos formas. En una situación, la meteorización química asociada con las aguas de percolación descendente, elimina los materiales indeseables de la roca en descomposición, dejando los elementos deseables enriquecidos en la zona superior del suelo. La otra forma es básicamente la opuesta de la primera. Es decir,

los elementos deseables que se encuentran en bajo contenido cerca de la superficie son extraídos y transportados a zonas inferiores, donde se concentran.

Bauxita

La formación de *bauxita*, la mena principal de aluminio, es un ejemplo importante de una mena creada como consecuencia de enriquecimiento mediante procesos de meteorización (Figura 21.20). Aunque el aluminio es el tercer elemento más abundante sobre la corteza terrestre, no es común encontrar concentraciones económicamente valiosas de este importante metal, porque la mayor parte del aluminio aparece en los silicatos de los que es extremadamente difícil extraer.

La bauxita se forma en los climas tropicales lluviosos, en asociación con las lateritas. (De hecho, a veces se hace referencia a la bauxita como la laterita de aluminio.) Cuando la roca madre rica en aluminio se ve sometida a la meteorización química intensa y prolongada de los trópicos, la mayor parte de los elementos comunes, entre ellos el calcio, el sodio y el silicio, son eliminados por lixiviación. Dado que el aluminio es extremadamente insoluble, se concentra en el suelo como bauxita, un óxido de aluminio hidratado. Por tanto, la formación de bauxita depende tanto de las condiciones climáticas, en las que la meteorización química y la lixiviación son intensas, como de la presencia de una roca madre rica en aluminio. También en suelos lateríticos se encuentran depósitos importantes de níquel y cobalto que se desarrollan a partir de rocas ígneas ricas en silicatos ferromagnesianos.



▲ **Figura 21.20** La bauxita es la mena de aluminio y se forma como consecuencia de procesos de meteorización bajo condiciones tropicales. Su color oscila entre el rojo o el marrón y el casi blanco. (Foto de E. J. Tarbuck.)

Otros depósitos

Muchos depósitos de cobre y plata se originan cuando los procesos de meteorización concentran los metales que están depositados a través de una mena primaria de bajo grado. Normalmente, dicho enriquecimiento se produce en depósitos que contienen pirita (FeS_2), el sulfuro más común y generalizado. La pirita es importante porque, cuando es meteorizada químicamente, forma ácido sulfúrico, que permite la disolución de los metales de la mena por las aguas de percolación. Una vez disueltos, los metales migran gradualmente hacia abajo a través de la mena primaria hasta que precipitan. El depósito tiene lugar debido a los cambios químicos que se producen en la solución cuando alcanza la zona de aguas subterráneas (zona debajo de la superficie donde todos los espacios porosos están ocupados por agua). De esta manera, el pequeño porcentaje de metal disperso puede eliminarse de un gran volumen de roca y volver a depositarse en forma de una mena de grado más alto en un volumen de roca menor.

Este proceso de enriquecimiento es responsable del éxito económico de muchos depósitos de cobre, entre ellos uno localizado en Miami, Arizona. Aquí la mena aumentó su valor desde menos de un 1 por ciento de contenido en cobre, en el depósito primario, hasta un 5 por ciento en algunas zonas localizadas de enriquecimiento. Cuando la pirita experimenta meteorización (se oxida) cerca de la superficie, quedan restos de óxido de hierro. La presencia de esas masas herrumbrosas en la superficie indica la posibilidad de que haya una mena enriquecida debajo, y esto representa una evidencia visual para los prospectores.

Depósitos de placeres

La selección origina normalmente que granos de tamaño similar se depositen juntos. Sin embargo, también se produce selección en función del peso específico de las partículas. Este último tipo de selección es el responsable de la creación de los **depósitos de placeres**, que son depósitos formados cuando los minerales pesados son concentrados mecánicamente por las corrientes. Los depósitos de placeres asociados con corrientes de agua se cuentan entre los más comunes y mejor conocidos, pero la acción selectiva de las olas también puede crear depósitos de placeres a lo largo de la costa. Estos yacimientos contienen normalmente minerales que no son sólo pesados, sino que también son duraderos (para resistir la destrucción física durante el transporte) y resistentes desde el punto de vista químico (para soportar los procesos de meteorización). Los depósitos de placeres se forman porque muchos minerales pesados se depositan rápidamente desde una corriente, mientras que las partículas menos

densas permanecen en suspensión y son transportadas. Entre los lugares habituales de acumulación se cuentan las **barras de meandro**, en los interiores de los meandros, así como las grietas, las depresiones y otras irregularidades en los lechos de los ríos.

Existen muchos depósitos de placeres económicamente importantes; los más conocidos son las acumulaciones de oro. De hecho, fueron los depósitos de placeres descubiertos en 1848 los que indujeron la famosa fiebre del oro californiana. Años después, depósitos similares crearon otra fiebre en Alaska. La búsqueda de oro lavando la arena y la grava en una cazuela plana para concentrar el fino «polvo» en el fondo fue el método habitual utilizado por los primeros prospectores para recuperar el metal precioso, siendo un proceso similar al que creó los depósitos de placeres.

Además del oro, otros minerales pesados y resistentes forman depósitos de placeres. Entre ellos se cuentan el platino, los diamantes y el estaño. Los Urales contienen depósitos de placeres ricos en platino, y son fuentes importantes de diamantes en Sudáfrica. Porciones importantes del suministro mundial de casiterita, la mena principal de estaño, se han obtenido a partir de depósitos de placeres en Malasia e Indonesia. La casiterita suele estar diseminada en rocas ígneas graníticas. En este estado, el mineral no está lo bastante concentrado como para ser extraído con provecho. Sin embargo, a medida que se disuelve y se desintegra la roca que la encierra, quedan libres los granos de casiterita, pesados y resistentes. Por último, las partículas liberadas alcanzan una corriente de agua donde crean depósitos de placeres estando significativamente más concentrados que en el depósito original. Circunstancias y acontecimientos similares son comunes para muchos minerales que se obtienen de depósitos de placeres.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Qué tamaño tenía la mayor pepita de oro jamás descubierta?

La mayor pepita de oro jamás descubierta fue la pepita Welcome Stranger, encontrada en 1869 como un depósito de placer en la región minera de extracción de oro de Victoria, Australia. Pesaba 95 kilogramos y, a los precios actuales del oro, valía más de 700.000 dólares. La mayor pepita de oro que se sabe que todavía existe en la actualidad es la pepita Hand of Faith, que se encontró en 1975 cerca de Wedderburn, Victoria, Australia. Se encontró con un detector de metales y pesa 33 kilogramos. Vendida en 1982, se exhibe ahora en el casino Golden Nugget de Las Vegas, Nevada.

En algunos casos, si puede localizarse la roca madre de un depósito de tipo placer, también puede convertirse en una mena importante. Siguiendo los depósitos de placeres corriente arriba, a veces pueden localizarse los depósitos originales. Así fue como se encontraron los filones de oro del Mother Lode en el batolito de la Sierra Nevada de California, así como las famosas minas de diamantes Kimberly de Sudáfrica. Los depósitos de placeres se descubrieron primero; su fuente algo más tarde.

Recursos minerales no metálicos

Los materiales de la Tierra que no se utilizan como combustibles ni se procesan debido a los metales que contienen se suelen denominar **recursos minerales no metálicos**. Nótese que el uso de la palabra «mineral» es muy amplio en este contexto económico, y es bastante diferente de la definición geológica estricta de mineral estudiada en el Capítulo 3. Los recursos minerales no metálicos se extraen y se procesan por los elementos no metálicos que contienen o por las propiedades químicas y físicas que poseen.

A menudo, no nos damos cuenta de la importancia de los minerales no metálicos, porque se consideran sólo los productos que resultaron de su utilización y no los minerales en sí mismos. Es decir, muchos minerales no metálicos se utilizan en el proceso de creación de otros productos. Son ejemplos la fluorita y la caliza, que forman parte del proceso de fabricación del acero, los abrasivos necesarios para fabricar una pieza de maquinaria y los fertilizantes necesarios para el crecimiento de una cosecha (Tabla 21.4).

Las cantidades de minerales no metálicos utilizados cada año son enormes. Un vistazo a la Figura 21.1 nos recuerda que el consumo *per capita* de recursos no combustibles en Estados Unidos constituye un total de cerca de 10 toneladas métricas, de las cuales alrededor del 94 por ciento son no metálicos. Los recursos minerales no metálicos se dividen normalmente en dos amplios grupos: *materiales de construcción* y *minerales industriales*. Dado que algunas sustancias tienen muchos usos diferentes, se encuentran en las dos categorías. La caliza, quizá la roca más versátil y utilizada de todas, es el mejor ejemplo. Como material de construcción, se utiliza no sólo como material aglomerante y piedra de construcción, sino también para fabricar el cemento. Además, como mineral industrial, la caliza es un ingrediente en la fabricación del acero y se utiliza en la agricultura para neutralizar los suelos.

Materiales de construcción

Los áridos naturales consisten en roca triturada, arena y grava. Desde el punto de vista de la cantidad y de su valor, los áridos son un material de construcción muy importante.

Tabla 21.4 Lugares donde aparecen y usos de los minerales no metálicos

Mineral	Usos	Lugares de aparición
Apatito	Fertilizantes fosfatados	Depósitos sedimentarios
Asbestos	Fibras incombustibles	Alteración metamórfica
Azufre	Productos químicos; fabricación de fertilizantes	Depósitos sedimentarios; yacimientos hidrotermales
Calcita	Agregados; fabricación del acero; acondicionamiento del suelo; productos químicos; cemento; piedra de construcción	Depósitos sedimentarios
Corindón	Gemas; abrasivos	Yacimientos metamórficos
Cuarzo	Ingrediente principal del vidrio	Intrusiones ígneas; depósitos sedimentarios
Diamante	Gemas; abrasivos	Pipas de kimberlita; depósitos de placeres
Fluorita	Fabricación de acero; purificación del aluminio; vidrio; productos químicos	Yacimientos hidrotermales
Grafito	Mina de los lápices; lubricantes; refractarios	Yacimientos metamórficos
Granate	Abrasivos; gemas	Yacimientos metamórficos
Halita	Sal de mesa; productos químicos; control del hielo	Depósitos de evaporitas; domos de sal
Minerales de la arcilla	Cerámica; porcelana	Producto residual de la meteorización
Moscovita	Aislante en aplicaciones eléctricas	Pegmatitas
Silvina	Fertilizantes de potasio	Depósitos de evaporitas
Talco	Polvo utilizado en las pinturas, los cosméticos, etc.	Yacimientos metamórficos
Yeso	Yeso blanco	Depósitos de evaporitas

Estados Unidos produce casi 2.000 millones de toneladas de áridos por año, lo que representa alrededor de la mitad del volumen minero no energético total del país. Se produce comercialmente en todos los estados y se utiliza casi en todo tipo de construcción de edificios y en la mayoría de los proyectos de obras públicas.

Además de los áridos, otros importantes materiales de construcción son el yeso para argamasa y recubrimiento de paredes, la arcilla para los ladrillos y las tejas, y el cemento, que está hecho de caliza y arcilla. El cemento y los áridos se reúnen en el hormigón, un material que es esencial prácticamente para todo tipo de construcciones. Los áridos proporcionan al hormigón su fuerza y su volumen, y el cemento une la mezcla dando una sustancia similar a una roca dura. Tan sólo 2 kilómetros de autopista precisan más de 85 toneladas métricas de áridos. A una menor escala, se necesitan 90 toneladas de áridos simplemente para construir una casa media de 6 habitaciones.

Dado que la mayoría de los materiales de construcción están ampliamente distribuidos y presentes en cantidades casi ilimitadas, tienen poco valor intrínseco. Su valor económico surge sólo después de que los materiales han sido extraídos del terreno y procesados. Dado que su valor por tonelada, en comparación con los metales y los minerales industriales, es bajo, las operaciones de minería y excavación se realizan normalmente para satisfacer las necesidades locales. Excepto para los tipos especiales de rocas ornamentales utilizadas para los edificios y los monumentos, los costes de transporte limitan en gran medida las distancias a que pueden moverse los materiales de construcción.

Minerales industriales

Muchos recursos no metálicos se clasifican como minerales industriales. En algunos casos, estos materiales son importantes, porque son fuente de elementos químicos o compuestos específicos. Dichos minerales se utilizan en la fabricación de productos químicos y en la producción de fertilizantes. En otros casos, su importancia está relacionada con las propiedades físicas que muestran. Son ejemplos minerales el corindón y el granate, que se utilizan como abrasivos. Aunque los suministros son abundantes, la mayoría de los minerales industriales no son tan abundantes como los materiales de construcción. Además, la extensión y la distribución de los depósitos están mucho más restringidas. Como consecuencia, muchos de esos recursos no metálicos deben transportarse a distancias considerables, que, por supuesto, incrementan su coste. A diferencia de la mayoría de los materiales de construcción, que necesitan un mínimo de tratamiento antes de estar listos para usarse, muchos minerales industriales precisan un considerable procesamiento para extraer la sustancia deseada en el grado de pureza adecuado necesario para su utilización final.

Fertilizantes El crecimiento de la población mundial, que se dirige hacia los 7.000 millones, exige que la producción de cosechas alimentarias básicas siga aumentando. Por tanto, los fertilizantes, sobre todo los compuestos de nitrato, fosfato y potasio, son extremadamente importantes para la agricultura. La industria de nitratos sintéticos, que deriva del nitrógeno atmosférico, es la fuente de prácticamente todos los fertilizantes nitrogenados del mundo. La

fuente principal de fósforo y de potasio, sin embargo, sigue siendo la corteza terrestre. El mineral apatito es la fuente primaria de fosfatos. En Estados Unidos, la mayor producción procede de los depósitos sedimentarios marinos de Florida y Carolina del Norte (Figura 21.21). Aunque el potasio es un elemento abundante en muchos minerales, las principales fuentes comerciales son los depósitos de evaporitas que contienen el mineral silvina. En Estados Unidos, los depósitos que hay cerca de Carlsbad, Nuevo México, han sido especialmente importantes.

Azufre Debido a sus diversos usos, el azufre es un importante recurso no metálico. De hecho, la cantidad de azufre utilizada se considera un índice del nivel de industrialización de un país. Más del 80 por ciento se utiliza para la producción de ácido sulfúrico. Aunque su uso principal es la fabricación de fosfatos para fertilizantes, el ácido sulfúrico tiene además un sinnúmero de otras aplicaciones. Entre sus fuentes se cuentan los depósitos de azufre nativo asociados con domos de sal y áreas volcánicas, así como los sulfuros de hierro común, como la pirita. En los últimos años una fuente cada vez más importante ha sido el

azufre extraído del carbón, el petróleo y el gas natural, para conseguir que esos combustibles sean menos contaminantes.

Sal La sal común, conocida por el mineral denominado *halita* es otro recurso versátil e importante. Se cuenta entre los minerales no metálicos más destacados utilizados como materia prima en la industria química. Además, se utilizan grandes cantidades para «ablandar» el agua y para eliminar el hielo de las calles y las carreteras. Por supuesto, todos nosotros sabemos que es también un nutriente básico y parte de muchos productos alimenticios.

La sal es una roca evaporítica común que se explota en potentes depósitos utilizando técnicas de minería subterránea. Los depósitos subsuperficiales se explotan también utilizando pozos de salmuera en los cuales se introduce una tubería en un depósito de sal y se inyecta agua hacia el interior. La sal disuelta por el agua es extraída a la superficie a través de una segunda tubería. Además, el agua de mar sigue sirviendo como fuente de sal, igual que ha ocurrido durante siglos. La sal se recoge después de que el sol evapora el agua.

► **Figura 21.21** Gran mina de fosfatos a cielo abierto en Florida. El mineral apatito, portador de fósforo, es un fosfato de calcio asociado con los huesos y los dientes. Los peces y otros organismos marinos extraen fosfato del agua marina y forman apatito. Estos depósitos sedimentarios están asociados con el fondo de un mar somero. (Foto de C. Davidson/Comstock.)



Resumen

- Los *recursos renovables* pueden recuperarse en lapsos de tiempo relativamente cortos. Son ejemplos de ellos las fibras naturales para la ropa, y los árboles para la obtención de madera. Los *recursos no renovables* se forman tan despacio que, desde un punto de vista humano, la Tierra contiene suministros fijos. Son ejemplos los combustibles como el carbón y el petróleo, y los metales como el cobre y el oro. Una población mundial en crecimiento rápido y el deseo de un mejor nivel de vida hace que los recursos no renovables se agoten a un ritmo creciente.
- El *carbón*, el *petróleo* y el *gas natural*, los *combustibles fósiles* de nuestra economía moderna, están todos asociados

con las rocas sedimentarias. El carbón se origina a partir de grandes cantidades de restos vegetales que se acumulan en un ambiente empobrecido en oxígeno, como un pantano. Más del 70 por ciento del carbón que se utiliza en la actualidad es para la generación de electricidad. La contaminación atmosférica producida por los gases de óxido de azufre que se forman por la combustión de la mayoría de los tipos de carbón constituye un problema ambiental destacable.

- El petróleo y el gas natural, que aparecen normalmente juntos en los poros de algunas rocas sedimentarias, consisten en mezclas de diversos *hidrocarburos* (compuestos de hidrógeno y de carbono). La formación del petróleo está asociada con la acumulación de sedimentos en áreas oceánicas ricas en restos animales y vegetales que son enterrados y aislados en un entorno deficitario en oxígeno. A medida que el petróleo y el gas natural se forman, migran y se acumulan en capas permeables adyacentes, como las areniscas. Si un estrato de roca impermeable, a la que se denomina *roca de tapa*, interrumpe la migración ascendente se desarrolla un ambiente geológico que permite la acumulación de cantidades económicamente significativas de petróleo y gas bajo tierra, denominada *trampa petrolífera*. Las dos condiciones básicas comunes para todas las trampas petrolíferas son: (1) una *roca almacén* porosa y permeable que suministrará petróleo, gas natural, o las dos cosas, en cantidades suficientes, y (2) una roca de tapa impermeable.
- Entre los problemas ambientales asociados con la combustión de los combustibles fósiles se cuentan la contaminación atmosférica y el calentamiento global. Los *contaminantes primarios* emitidos por fuentes como los vehículos de motor pueden reaccionar en la atmósfera para producir los *contaminantes secundarios* que constituyen el *smog* urbano. La combustión de los combustibles fósiles es una de las maneras mediante las cuales los seres humanos están incrementando el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera. Mayores cantidades de este gas absorbente de calor inducirían un calentamiento global.
- Cuando los recursos petrolíferos convencionales ya no sean adecuados, las *arenas asfálticas* y las lutitas bituminosas pueden sustituirlos. En la actualidad, las arenas asfálticas de la provincia de Alberta originan alrededor del 15 por ciento de la producción petrolífera de Canadá. La producción de petróleo a partir de las lutitas bituminosas en la actualidad es antieconómica. La producción de petróleo de las arenas asfálticas y lutitas bituminosas tiene importantes inconvenientes ambientales.
- Alrededor del 85 por ciento de nuestra energía se deriva de los combustibles fósiles. En Estados Unidos, las fuentes de energía alternativa más importantes son la *energía nuclear* y la *energía hidroeléctrica*. Otras fuentes de energía alternativas son localmente importantes, pero en conjunto proporcionan aproximadamente el 1 por ciento de la demanda energética de Estados Unidos. Entre ellas se cuentan la *energía solar*, la *energía geotérmica*, la *energía eólica* y la *energía mareal*.
- Los *recursos minerales* son el conjunto de minerales útiles disponibles comercialmente. Estos recursos abarcan los depósitos ya identificados a partir de los cuales pueden extraerse lucrativamente minerales, denominándose *reservas*, así como los depósitos conocidos que no son todavía económica ni tecnológicamente recuperables. Los depósitos que se supone que existen, pero todavía no se han descubierto, se consideran también recursos minerales. El término *mena* se utiliza para indicar esos minerales metálicos útiles que pueden ser explotados para obtener beneficio, así como algunos minerales no metálicos, como la fluorita y el azufre, que contienen sustancias útiles.
- Algunas de las acumulaciones más importantes de metales, como el oro, la plata, el plomo y el cobre, son generadas por procesos ígneos. Los depósitos de mena más importantes y mejor conocidos son generados a partir de *soluciones hidrotermales* (agua caliente). Los depósitos hidrotermales se originan a partir de fluidos calientes ricos en metales que son restos de procesos magmáticos en etapas tardías. Esas soluciones ricas en iones se mueven a lo largo de fracturas o de planos de estratificación, se enfrían y precipitan los iones metálicos para originar *depósitos filonianos*. En un *depósito diseminado* (por ejemplo, muchos de los depósitos de cobre del mundo) las menas de las soluciones hidrotermales se distribuyen en forma de pequeñas masas por toda la masa rocosa.
- Muchos de los depósitos de menas metamórficas más importantes se producen mediante metamorfismo de contacto. Extensas aureolas de depósitos ricos en metales rodean habitualmente los cuerpos ígneos donde los iones han invadido estratos de calizas. Los minerales metálicos más comunes asociados con el metamorfismo de contacto son la esfalerita (cinc), la galena (plomo), la calcopirita (cobre), la magnetita (hierro) y la bornita (cobre). De importancia económica similar son las propias rocas metamórficas. En muchas regiones, la pizarra, el mármol y la cuarcita se extraen para diversos tipos de construcción.

- La meteorización crea yacimientos de menas mediante la concentración de metales en depósitos económicamente valiosos. El proceso, frecuentemente denominado *enriquecimiento secundario*, se lleva a cabo: (1) por extracción de los materiales indeseables, dejando los elementos deseados enriquecidos en las zonas superiores del suelo, (2) por eliminación y transporte de los elementos deseados a zonas inferiores, donde se depositan y se concentran. La *bauxita*, la mena principal de aluminio, se ha formado como resultado del enriquecimiento mediante procesos de meteorización. Además, muchos depósitos de cobre y

plata se producen cuando los procesos de meteorización concentran los metales que estuvieron inicialmente dispersos en una mena primaria de bajo grado.

- Los materiales de la Tierra que no se utilizan como combustibles ni se procesan por los metales que contienen se denominan *recursos no metálicos*. Muchos son sedimentos o rocas sedimentarias. Los dos grupos grandes de recursos no metálicos son los *materiales de construcción* y los *minerales industriales*. La caliza, quizá la roca más versátil y utilizada de todas, se encuentra en ambos grupos.

Preguntas de repaso

1. Compare los recursos renovables con los no renovables. Dé uno o más ejemplos de cada uno.
2. ¿Qué población mundial se calcula para el año 2015? ¿Cómo se compara esto con las cifras de 1930 y de 1975? ¿Está creciendo la demanda de recursos tan deprisa como la población?
3. Más del 70 por ciento de la utilización actual del carbón se emplea ¿para qué propósito?
4. Describa dos impactos de la combustión de los combustibles fósiles sobre el ambiente atmosférico.
5. ¿Qué es una trampa petrolífera? Enumere dos condiciones comunes para todas las trampas petrolíferas.
6. Enumere dos desventajas asociadas con el procesamiento de las arenas asfálticas recuperadas mediante minería de superficie.
7. Estados Unidos tiene enormes depósitos de lutitas bituminosas, pero no produce petróleo de ellos de manera comercial. Explíquelo.
8. ¿Cuál es el combustible principal para los reactores de fisión nuclear?
9. Enumere dos obstáculos que han impedido el desarrollo de la energía nuclear como fuente de energía principal.
10. Describa brevemente dos métodos mediante los cuales la energía solar podría utilizarse para producir electricidad.
11. Explique por qué no duran indefinidamente las presas construidas para generar energía eléctrica.
12. ¿Se considera la energía geotérmica una fuente de energía inagotable? Explíquelo.
13. ¿Qué ventajas ofrece la producción de energía mareal? ¿Es probable que las mareas proporcionen siempre una parte significativa de los requerimientos de energía eléctrica mundiales?
14. Compare *recurso* con *reserva*.
15. ¿Qué podría hacer que un depósito mineral no considerado como mena fuera reclasificado como mena?
16. Nombre dos tipos generales de yacimientos hidrotermales.
17. Los yacimientos de menas metamórficas están relacionados a menudo con procesos ígneos. Proporcione un ejemplo.
18. Nombre la mena principal de aluminio y describa su formación.
19. Una zona con color de herrumbre de óxido de hierro en la superficie puede indicar la presencia de un depósito de cobre en profundidad. Explíquelo brevemente.
20. Describa brevemente cómo los minerales se acumulan en depósitos de placeres. Enumere cuatro minerales que se obtienen de estos depósitos.
21. ¿Cuál es mayor, el consumo *per capita* de recursos metálicos o el de recursos no metálicos?
22. Los recursos no metálicos suelen dividirse en dos grandes grupos. Nombre los dos grupos y algunos ejemplos de materiales que pertenezcan a cada uno. ¿Qué grupo está más ampliamente distribuido?

Términos fundamentales

combustible fósil
depósito de placeres
depósito diseminado
depósito filoniano
energía geotérmica

energía hidroeléctrica
enriquecimiento secundario
fisión nuclear
mena
pegmatita

recurso mineral
recurso mineral no
metálico
recurso no renovable
recurso renovable

reserva
roca almacén
roca de tapa impermeable
solución hidrotermal
trampa petrolífera

Recursos de la web



La página Web *Earth* utiliza los recursos y la flexibilidad de Internet para ayudarle en su estudio de los temas de este capítulo. Escrito y desarrollado por profesores de Geología, este sitio le ayudará a comprender mejor esta ciencia. Visite <http://www.librosite.net/tarbuck> y haga clic sobre la cubierta de *Ciencias de la Tierra*, octava edición. Encontrará:

- Cuestionarios de repaso en línea.
- Reflexión crítica y ejercicios escritos basados en la web.
- Enlaces a recursos web específicos para el capítulo.
- Búsquedas de términos clave en toda la red.

<http://www.librosite.net/tarbuck>