CAPÍTULO 6

Meteorización y suelo

Procesos externos de la Tierra

Meteorización

Meteorización mecánica
- Fragmentación por el hielo (gelifracción)
- Descompresión
- Expansión térmica
- Actividad biológica

Meteorización química
- Disolución
- Oxidación
- Hidrólisis
- Alteraciones causadas por la meteorización química

Velocidades de meteorización
- Características de la roca
- Clima
- Meteorización diferencial

Suelo
- Una interfase en el sistema Tierra
- ¿Qué es el suelo?

Factores formadores del suelo
- Roca madre
- Tiempo
- Clima
- Plantas y animales
- Topografía

El perfil del suelo

Clasificación de los suelos

Erosión del suelo
- Cómo se erosiona el suelo
- Velocidad de erosión
- Sedimentación y contaminación química

La superficie terrestre cambia continuamente. La roca se desintegra y se descompone, es desplazada a zonas de menor elevación por la gravedad y es transportada por el agua, el viento o el hielo. De este modo se esculpe el paisaje físico de la Tierra. Este capítulo se concentra en el primer paso de este proceso interminable, la meteorización. ¿Qué hace que la roca sólida se desmorone y por qué el tipo y la velocidad de la meteorización varían de un lugar a otro? También se examina el suelo, un producto importante del proceso de meteorización y un recurso vital.

Procesos externos de la Tierra

Meteorización y suelo
▼ Procesos externos de la Tierra

La meteorización, los procesos gravitacionales y la erosión se denominan **procesos externos** porque tienen lugar en la superficie terrestre o en sus proximidades y porque se alimentan de la energía solar. Los procesos externos son una parte básica del ciclo de las rocas porque son los responsables de la transformación de la roca sólida en sedimento.

Al observador casual puede parecerle que la superficie de la Tierra no cambia, que no le afecta el tiempo. De hecho, hace 200 años la mayor parte de la gente creía que las montañas, los lagos y los desiertos eran rasgos permanentes de una Tierra de la que se creía que no tenía más de unos pocos millares de años. En la actualidad sabemos que la Tierra tiene 4.500 millones de años y que las montañas acaban por ceder a la meteorización y la erosión, los lagos se llenan de sedimentos o son drenados por corrientes, y los desiertos vienen y van con los cambios climáticos.

La Tierra es un organismo dinámico. Algunas partes de la superficie terrestre se elevan de una manera gradual por la formación de montañas y la actividad volcánica. Estos **procesos internos** obtienen su energía del interior de la Tierra. Mientras tanto, procesos externos opuestos están continuamente rompiendo la roca y desplazando los derrubios a zonas de menor elevación. Estos últimos procesos son:

1. **Meteorización:** fragmentación física (desintegración) y alteración química (descomposición) de las rocas de la superficie terrestre, o cerca de ella.
2. **Procesos gravitacionales:** transferencia de roca y suelo pendiente abajo por influencia de la gravedad.
3. **Erosión:** eliminación física de material por agentes dinámicos como el agua, el viento o el hielo.

En este capítulo nos concentraremos en la meteorización de las rocas y en los productos generados por esta actividad. Sin embargo, no es fácil separar la meteorización de los procesos gravitacionales y de la erosión porque, conforme la meteorización separa las rocas, la erosión y los procesos gravitacionales retiran los derrubios. Este transporte del material mediante la erosión y los procesos gravitacionales desintegran y descomponen aún más la roca.

Meteorización

Meteorización y suelo
▼ Meteorización

Se produce meteorización continuamente a todo nuestro alrededor, pero parece un proceso tan lento y sutil que es fácil subestimar su importancia. No obstante, hay que recordar que la meteorización es una parte básica del ciclo de las rocas y, por tanto, un proceso clave del sistema Tierra.

Todos los materiales son susceptibles de meteorización. Consideremos, por ejemplo, el producto fabricado hormigón, que se parece mucho a una roca sedimentaria denominada conglomerado. Una pared de hormigón recién dado tiene un aspecto liso, fresco, inalterado. Sin embargo, no muchos años después, la misma pared aparecerá desconchada, agrietada y rugosa, quedando expuestos, en su superficie, los cantos. Si hay un árbol cerca, sus raíces pueden también desplazarse horizontalmente y combar el hormigón. Los mismos procesos naturales que acaban separando una pared de hormigón actúan también para desintegrar la roca.

La meteorización se produce cuando la roca es fragmentada mecánicamente (desintegrada) o alterada químicamente (descompuesta), o ambas cosas. La **meteorización mecánica** se lleva a cabo por fuerzas físicas que rompen la roca en trozos cada vez más pequeños sin modificar la composición mineral de la roca. La **meteorización química** implica una transformación química de la roca en uno o más compuestos nuevos. Se pueden ilustrar estos dos conceptos con un trozo de papel. El papel puede desintegrarse rompiéndolo en trozos cada vez más pequeños, mientras que la descomposición se produce cuando se prende fuego al papel y se quema.

¿Por qué se meteoriza la roca? Dicho en términos sencillos, la meteorización es la respuesta de los materiales terrestres a un ambiente cambiante. Por ejemplo, después de millones de años de levantamiento y erosión, las rocas situadas encima de un gran cuerpo ígneo intrusivo pueden ser eliminadas, dejándolo expuesto a la superficie. Esta masa de roca cristalina (formada bajo la superficie en zonas profundas donde las temperaturas y las presiones son elevadas) queda ahora sometida a un ambiente super-

ficial muy diferente y comparativamente hostil. Como respuesta, esta masa rocosa cambiará de manera gradual. Esta transformación de la roca es lo que denominamos meteorización.

En las siguientes secciones comentaremos los diversos modos de meteorización mecánica y química. Aunque vamos a considerar estos dos procesos por separado, debe tenerse en cuenta que en la naturaleza normalmente actúan a la vez.

Meteorización mecánica

Meteorización y suelo
▼ Meteorización mecánica

Cuando una roca experimenta *meteorización mecánica*, se rompe en fragmentos cada vez más pequeños, que conservan cada uno las características del material original. El resultado final son muchos fragmentos pequeños procedentes de uno grande. En la Figura 6.1 se muestra que la ruptura de una roca en trozos más pequeños aumenta el área superficial disponible para el ataque químico. Una situación análoga se produce cuando se añade azúcar a un líquido: un cubito de azúcar se disolverá mucho más despacio que un volumen igual de gránulos de azúcar porque el cubito tiene mucha menos área superficial disponible para su disolución. Por consiguiente, al romper las rocas en fragmentos más pequeños, la meteorización mecánica incrementa la cantidad de área superficial disponible para la meteorización química.

En la naturaleza, hay cuatro procesos físicos importantes que inducen la fragmentación de la roca: fragmentación por helada, expansión provocada por la descompresión, expansión térmica y actividad biológica. Además, aunque la acción de los agentes erosivos, como el viento, el hielo de glaciar y las aguas corrientes, se considera independiente de la meteorización física, ésta es, sin embargo, importante. Conforme estos agentes dinámicos retiran los restos rocosos, desintegran inexorablemente estos materiales.

Fragmentación por el hielo (gelifracción)

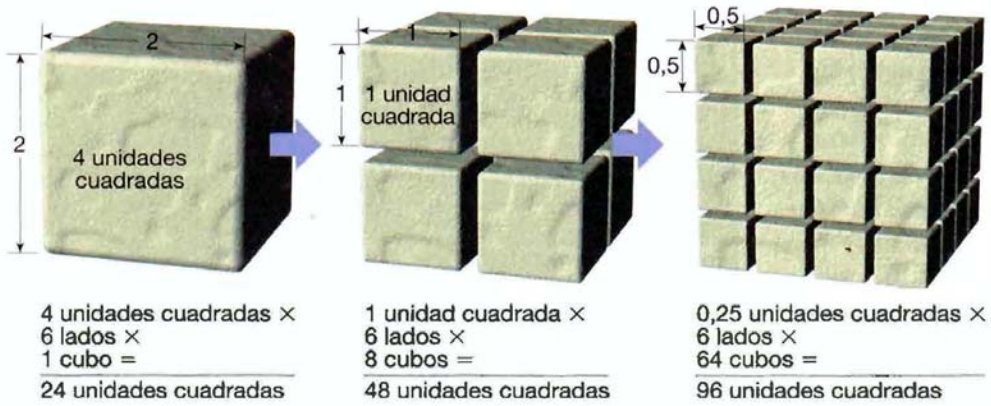
Ciclos repetidos de congelación y deshielo representan un proceso importante de meteorización mecánica. El agua líquida tiene la propiedad única de expandirse alrededor de un 9 por ciento cuando se congela, porque en la estructura cristalina regular del hielo, las moléculas de agua están más separadas de lo que están en el agua líquida próxima al punto de congelación. Como consecuencia, la congelación del agua en un espacio confinado ejerce una tremenda presión hacia fuera sobre las paredes del lugar donde se encuentra. Para verificar esto, consideremos una jarra de vidrio herméticamente sellada llena de agua. Cuando el agua se congela, el envase se rompe.

En la naturaleza, el agua se abre camino a través de las grietas de las rocas y, tras su congelación, expande y aumenta el tamaño de esas aberturas. Después de muchos ciclos de congelación-deshielo, la roca se rompe en fragmentos angulares. Este proceso se denomina, con toda propiedad, rotura por **cuñas de hielo (gelifracción)**. La acción de las cuñas de hielo es más notable en las regiones montañosas, donde suele existir un ciclo diario de congelación-deshielo (*véase* Recuadro 6.1). En esas regiones, las secciones de roca se desmenuzan por acción del acuñamiento y pueden caer desordenadamente en grandes montones denominados **canchales** o **pedregales** que se forman a menudo en la base de afloramientos de roca empinados.

Los acuñamientos de hielo también producen gran destrucción en las carreteras del norte de Estados Unidos, en particular al principio de la primavera cuando el ciclo congelación-deshielo está bien establecido. Las carreteras se llenan de baches y a veces se levantan y se abomban por esta fuerza destructiva.

Descompresión

Cuando grandes masas de roca ígnea, en particular granito, quedan expuestas a la erosión, empiezan a soltarse losas concéntricas. El proceso que genera estas capas semejantes a las de una cebolla se denomina **lajeamiento.** Se piensa que esto ocurre, al menos en parte, debido a la



◀ **Figura 6.1** La meteorización química puede ocurrir sólo en aquellas porciones de una roca que quedan expuestas a los elementos. La meteorización mecánica rompe la roca en fragmentos cada vez más pequeños, lo que aumenta el área superficial disponible para el ataque químico.

Recuadro 6.1 ▶ Entender la Tierra

El Hombre Viejo de la Montaña

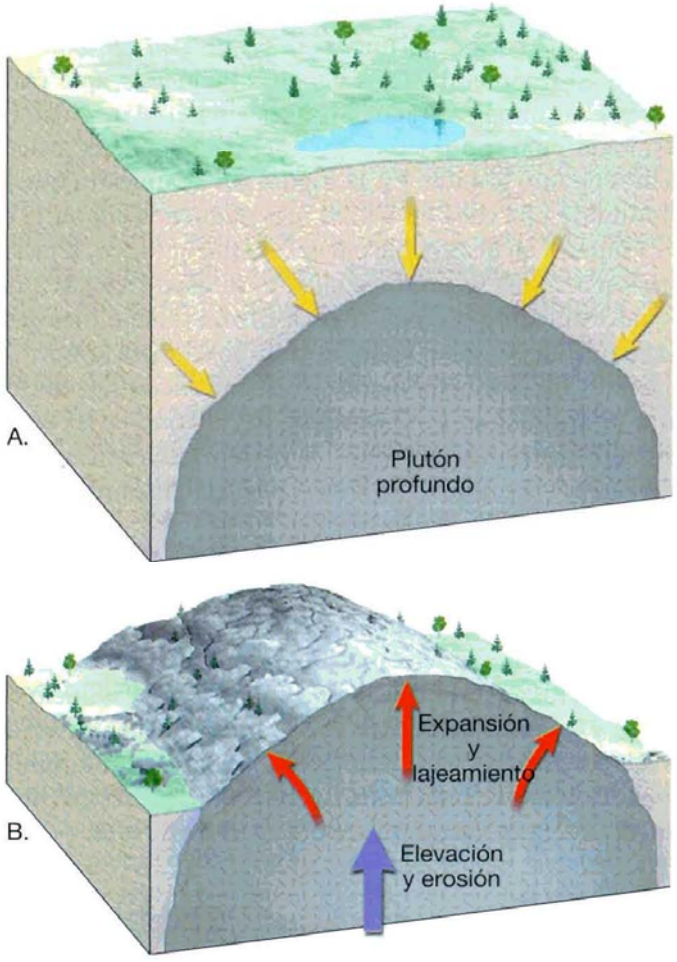
El Hombre Viejo de la Montaña, también conocido como la Gran Cara de Piedra o, simplemente, el Perfil, era uno de los símbolos más conocidos y más duraderos de New Hampshire (el *Estado de granito*). Al principio de 1945, aparecía en el centro del emblema oficial del estado. Era una formación rocosa natural esculpida del granito rojo de Conway que, cuando se miraba desde el lugar adecuado, parecía un anciano. Cada año cientos de miles de personas viajaban hasta allí, para ver al Hombre Viejo, que sobresalía a una altura de la montaña Cannon, 360 metros por encima del lago Profile en el Franconia Notch State Park, en el norte de New Hampshire.

La mañana del sábado 3 de mayo de 2003, los habitantes de New Hampshire recibieron la noticia de que el famoso punto de referencia había sucumbido a la naturaleza y se había hundido. El hundimiento acabó con décadas de esfuerzos para proteger el símbolo estatal de los mismos procesos naturales que lo había creado antes. Al final se impusieron la gelifracción y otros procesos de meteorización.

gran reducción de la presión que se produce cuando la roca situada encima es erosionada, un proceso denominado *descompresión*. Acompañando a esta descompresión, las capas externas se expanden más que la roca situada debajo y, de esta manera, se separan del cuerpo rocoso (Figura 6.2). La meteorización continua acaba por separar y desgajar las lajas, creando los **domos de exfoliación** (*ex* = fuera; *folium* = hoja).

La minería profunda nos proporciona otro ejemplo de cómo se comportan las rocas una vez que se ha eliminado la presión de confinamiento. Se conocen casos de estallidos de grandes bloques de roca de las paredes de las galerías de minas recién cortadas debido a la abrupta reducción de la presión. Pruebas de este tipo, más el hecho de que la fractura se produce en paralelo al suelo de una cantera cuando se eliminan grandes bloques de roca, apoyan con fuerza el proceso de descompresión como causa del lajeamiento.

Aunque muchas fracturas se crean por expansión, otras se producen por contracción durante la cristalización del magma, y otras son debidas a las fuerzas tectónicas que actúan durante la formación de montañas. Las fracturas producidas por estas actividades forman generalmente un modelo definido y se denominan *diaclasas*. Las diaclasas son estructuras rocosas importantes que permiten la penetración del agua hasta zonas profundas y el comienzo del proceso de meteorización mucho antes de que la roca quede expuesta.



▲ **Figura 6.2** El lajeamiento es provocado por la expansión de la roca cristalina a medida que la erosión se lleva el material suprayacente. Cuando el plutón enterrado en la profundidad de A queda expuesto en la superficie después de la elevación y la erosión de B, la masa ígnea se fractura en capas delgadas.

Expansión térmica

El ciclo diario de temperatura puede meteorizar las rocas, en particular en los desiertos cálidos donde las variaciones diurnas pueden superar los 30 °C. El calentamiento de una roca produce expansión y el enfriamiento causa contracción. La dilatación y reducción repetida de minerales con índices de expansión diferentes deben ejercer lógicamente cierta tensión sobre la capa externa de la roca.

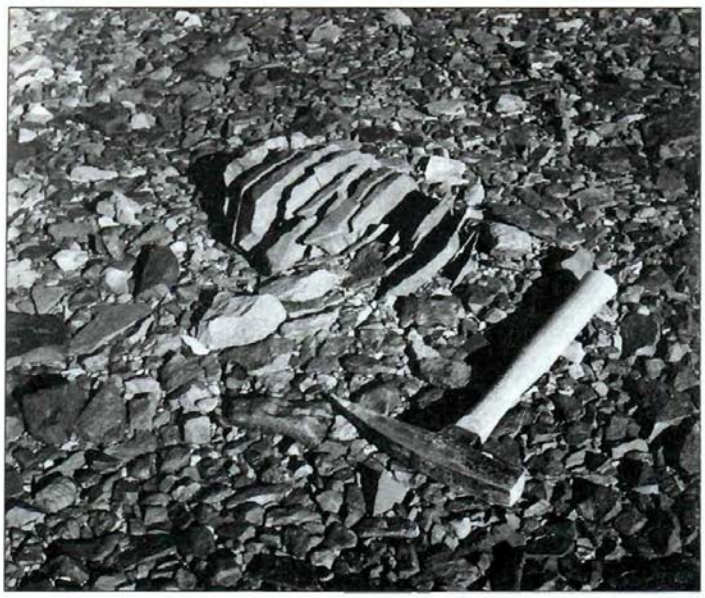
Aunque en alguna ocasión se pensó que este proceso era de gran importancia para la desintegración de las rocas, los experimentos de laboratorio no han respaldado

esta opinión. En una prueba, se calentaron rocas no meteorizadas a temperaturas mucho más elevadas que las normalmente experimentadas en la superficie de la tierra y luego se enfriaron. Este proceso se repitió muchas veces para simular centenares de años de meteorización, pero las rocas mostraron poco cambio aparente.

No obstante, los cantos rodados de las áreas desérticas sí muestran signos de fragmentación que puede haber sido causada por cambios de temperatura (Figura 6.3). Una solución propuesta para este dilema sugiere que las rocas deben ser debilitadas por la meteorización química primero, antes de que puedan romperse como consecuencia de la actividad térmica. Además, este proceso puede ser reforzado por el rápido enfriamiento producido por una tempestad de lluvia en el desierto. Se necesitan más datos antes de llegar a una conclusión definitiva con respecto al efecto de la variación de temperaturas sobre la desintegración de las rocas.

Actividad biológica

Las actividades de los organismos, entre ellos las plantas, los animales excavadores y los seres humanos, también llevan a cabo meteorización. Las raíces vegetales crecen entre las fracturas en busca de nutrientes y agua, y, conforme crecen, resquebrajan la roca. Los animales excavadores descomponen aún más la roca desplazando material fresco hacia la superficie, donde los procesos físicos y químicos pueden actuar con más efectividad. Los organismos de la descomposición también producen ácidos que contribuyen a la meteorización química. Allí donde se ha volado la roca en busca de minerales o para la construcción de carreteras, el efecto de los humanos es particularmente notable.



▲ **Figura 6.3** Estas piedras fueron antes cantos rodados; sin embargo, la larga exposición al clima desértico cálido las desintegró. (Foto de C. B. Hunt, U. S. Geological Survey.)

Meteorización química

Meteorización y suelo
▼ Meteorización química

Por *meteorización química* se entienden los complejos procesos que descomponen los componentes de las rocas y las estructuras internas de los minerales. Dichos procesos convierten los constituyentes en minerales nuevos o los liberan al ambiente circundante. Durante esta transformación, la roca original se descompone en sustancias que son estables en el ambiente superficial. Por consiguiente, los productos de la meteorización química se mantendrán esencialmente inalterados en tanto en cuanto permanezcan en un ambiente similar a aquel en el cual se formaron.

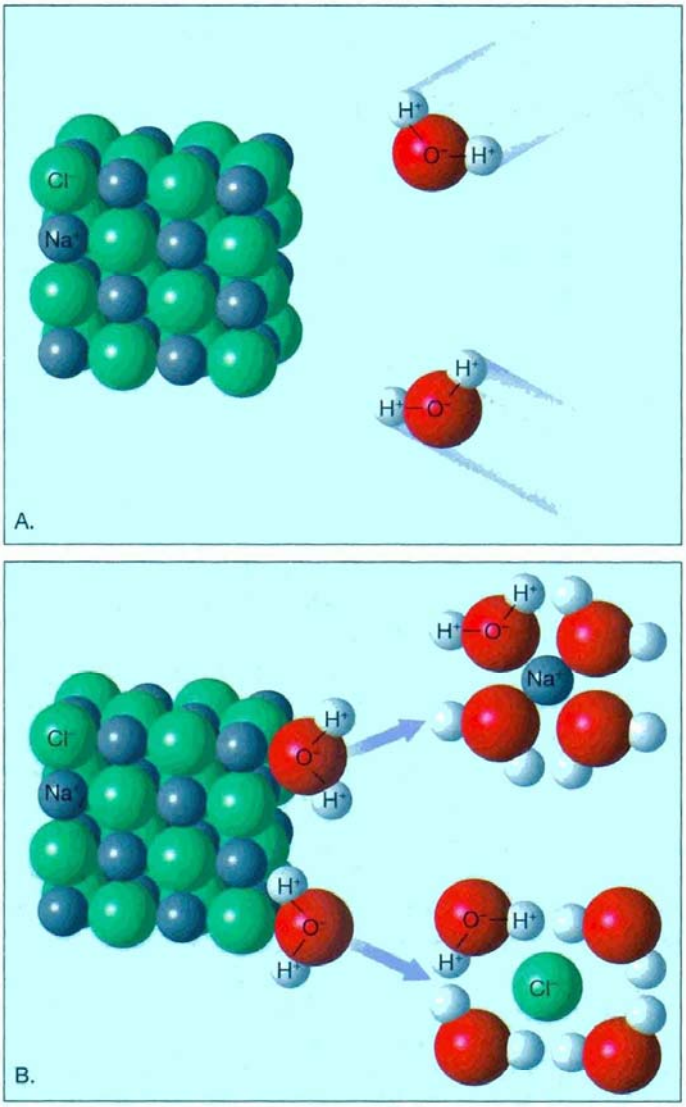
El agua es con mucho el agente de meteorización disolvente más importante. El agua pura sola es un buen disolvente y cantidades pequeñas de materiales disueltos dan como resultado un aumento de la actividad química para las soluciones de meteorización. Los principales procesos de meteorización química son la disolución, la oxidación y la hidrólisis. El agua desempeña un papel principal en cada uno de ellos.

Disolución

Quizás el tipo de descomposición más fácil que se pueda imaginar es el proceso de **disolución.** Exactamente igual a como se disuelve el azúcar en el agua lo hacen ciertos minerales. Uno de los minerales más hidrosolubles es la halita (sal común) que, como quizá recuerde, está compuesta de iones sodio y cloro. La halita se disuelve fácilmente en agua porque, aunque este compuesto mantiene una neutralidad eléctrica general, sus iones individuales conservan sus cargas respectivas.

Además, las moléculas de agua circundantes son polares, es decir, el oxígeno de la molécula tiene una pequeña carga negativa residual; el hidrógeno tiene una pequeña carga positiva. Cuando las moléculas de agua entran en contacto con la halita, sus extremos negativos se aproximan a los iones sodio y sus extremos positivos se agrupan alrededor de los iones cloro. Esto altera las fuerzas de atracción existentes en el cristal de halita y libera los iones a la solución acuosa (Figura 6.4).

Aunque la mayoría de los minerales son, para todos los efectos prácticos, insolubles en agua pura, la presencia de una cantidad incluso pequeña de ácido aumenta de una manera notable la fuerza corrosiva del agua. (Una so-



▲ **Figura 6.4** Ilustración de halita disolviéndose en agua. **A.** Los iones de sodio y de cloro son atacados por las moléculas polares de agua. **B.** Una vez eliminados, esos iones son rodeados y mantenidos por una serie de moléculas de agua, como se muestra en la figura.

lución ácida contiene el ion hidrógeno reactivo, H^+.) En la naturaleza, los ácidos se producen por una serie de procesos. Por ejemplo, el ácido carbónico se crea cuando el dióxido de carbono de la atmósfera se disuelve en las gotas de lluvia. Conforme el agua de lluvia acidificada va calando en el suelo, el dióxido de carbono de este último puede aumentar la acidez de la solución de meteorización. También se liberan varios ácidos orgánicos en el suelo cuando los organismos se descomponen, y la meteorización de la pirita y de otros sulfuros produce ácido sulfúrico.

Con independencia de la fuente de donde proceda el ácido, esta sustancia enormemente reactiva descompone con facilidad la mayoría de las rocas y origina ciertos productos que son hidrosolubles. Por ejemplo, el mineral calcita, $CaCO_3$, que es el componente de rocas ornamentales comunes, el mármol y la caliza, resulta fácilmente atacado incluso por una solución débilmente ácida:

$$\underset{\text{calcita}}{CaCO_3} + \underset{\text{ácido carbónico}}{(H^+ + HCO_3^-)} \longrightarrow$$

$$\underset{\text{ion calcio}}{Ca^{2+}} + \underset{\text{ion bicarbonato}}{2HCO_3^-}$$

Durante este proceso, el carbonato cálcico insoluble se transforma en productos solubles. En la naturaleza, durante períodos de miles de años, grandes cantidades de caliza se disuelven y son transportadas por el agua subterránea. Esta actividad se pone claramente de manifiesto por el gran número de cavernas situadas debajo de la superficie. Los monumentos y los edificios construidos con caliza y mármol están también sujetos a la acción corrosiva de los ácidos, en particular en las áreas industriales donde el aire está contaminado y lleno de humo (*véase* Recuadro 6.2).

Los iones solubles procedentes de reacciones de este tipo se conservan en el agua subterránea de la que nos abastecemos. Son estos iones disueltos los responsables de la denominada agua dura encontrada en muchas localidades. Sencillamente, el agua dura es indeseable porque los iones activos reaccionan con el jabón para producir un material insoluble que hace del jabón algo casi inútil para eliminar la suciedad. Para resolver este problema puede utilizarse un ablandador del agua con objeto de eliminar esos iones, generalmente sustituyéndolos por otros que no reaccionan químicamente con el jabón.

Oxidación

Todos hemos visto objetos de hierro y de acero que se oxidaron cuando quedaron expuestos al agua. Lo mismo puede ocurrir con los minerales ricos en hierro. El proceso de oxidación se produce cuando el oxígeno se combina con el hierro para formar el óxido férrico, como sigue:

$$\underset{\text{hierro}}{4Fe} + \underset{\text{oxígeno}}{3O_2} \rightarrow \underset{\text{óxido férrico (hematites)}}{2Fe_2O_3}$$

Este tipo de reacción química, denominado **oxidación***, se produce cuando se pierden electrones de un elemento durante la reacción. En este caso, decimos que el hierro se oxidó porque perdió electrones en favor del oxígeno. Aunque la oxidación del hierro progresa muy len-

* El lector debe observar que el término oxidación se refiere a cualquier reacción química en la cual un compuesto o radical pierde electrones. El elemento oxígeno no está necesariamente presente.

Recuadro 6.2 ▸ La Tierra como sistema

Precipitaciones ácidas: un impacto humano sobre el sistema Tierra

Los seres humanos forman parte del complejo todo interactivo que denominamos sistema Tierra. Como tales, nuestras acciones inducen cambios en todas las demás partes del sistema. Por ejemplo, al realizar nuestras rutinas normales, los seres humanos modificamos la composición de la atmósfera. Estas modificaciones atmosféricas, a su vez, causan cambios imprevistos y no queridos en la hidrosfera, la biosfera y la Tierra sólida. Las precipitaciones ácidas son un ejemplo pequeño, pero significativo.

Los monumentos y las estructuras de piedra descompuestos son imágenes comunes en muchas ciudades. Aunque contamos con que la roca se descomponga de manera gradual, muchos de esos monumentos han sucumbido antes de lo previsto. Una causa importante de esta aceleración de la meteorización química es la lluvia ácida.

La lluvia es algo ácida en estado natural. Cuando el dióxido de carbono de la atmósfera se disuelve en el agua, el producto es el ácido carbónico. Sin embargo, por *precipitaciones ácidas* entendemos una precipitación mucho más ácida que la lluvia y la nieve natural no contaminadas.

Como consecuencia de la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles, como el carbón y los productos derivados del petróleo, se liberan a la atmósfera casi 40 millones de toneladas de azufre y óxidos de nitrógeno al año en Estados Unidos. Las principales fuentes de esas emisiones son las centrales de producción de energía, los procesos industriales, como el refinado del petróleo y las fundiciones, y los vehículos de todo tipo. A través de una serie de reacciones químicas complejas, algunos de esos contaminantes se convierten en ácidos que luego caen a la superficie de la Tierra en forma de lluvia o nieve. Otra parte se deposita en forma seca y luego se convierte en ácido después de entrar en contacto con las precipitaciones, el rocío o la niebla.

En el norte de Europa y en el este de Norteamérica se ha experimentado lluvia ácida generalizada durante algún tiempo. Los estudios han demostrado también que se produce lluvia ácida en muchas otras regiones, entre ellas el oeste norteamericano, Japón, China, Rusia y Suramérica. Además de las fuentes de contaminación local, una porción de la acidez encontrada en el noreste de Estados Unidos y el este de Canadá se origina a centenares de kilómetros en las regiones industrializadas del sur y el suroeste. Esta situación se produce porque muchos contaminantes permanecen en la atmósfera hasta cinco días, durante los cuales pueden ser transportados a grandes distancias.

Se piensa que los efectos ambientales dañinos de la lluvia ácida son considerables en algunas áreas e inminentes en otras. El efecto mejor conocido es el aumento de la acidez en centenares de lagos de Escandinavia y del este norteamericano. Sumado a la lluvia ácida, ha habido un aumento sustancial del aluminio disuelto, que es lixiviado del suelo por el agua ácida y que, a su vez, es tóxico para los peces. Como consecuencia han desaparecido prácticamente todos los peces de algunos lagos y en otros está a punto de ocurrir lo mismo. Los ecosistemas se caracterizan por muchas interacciones a muchos niveles de organización, lo que significa que es difícil y caro evaluar los efectos de las precipitaciones ácidas en esos sistemas complejos, y que esta evaluación dista mucho de ser completa.

Además de los muchos lagos que ya no pueden albergar la vida de los peces, la investigación indica que las precipitaciones ácidas pueden reducir también los rendimientos de las cosechas agrícolas y deteriorar la productividad de los bosques. La lluvia ácida no sólo perjudica a las hojas, sino que también daña a las raíces y lixivia los nutrientes del suelo. Por último, las precipitaciones ácidas promueven la corrosión de los metales y contribuyen a la destrucción de las estructuras de piedra.

tamente en un ambiente seco, la adición de agua aumenta enormemente la velocidad de la reacción.

La oxidación es importante en la descomposición de minerales ferromagnesianos como el olivino, el piroxeno y la hornblenda. El oxígeno se combina fácilmente con el hierro en esos minerales para formar el óxido férrico de color marrón rojizo denominado *hematites* (Fe_2O_3), o, en otros casos, una herrumbre de color amarillento denominada *limonita* [FeO(OH)]. Estos productos son responsables del color herrumbroso que aparece en las superficies de las rocas ígneas oscuras, como el basalto, cuando empiezan a experimentar meteorización. Sin embargo, la oxidación sólo puede ocurrir después de que el hierro es liberado de la estructura del silicato por otro proceso denominado hidrólisis.

Otra reacción de oxidación importante se produce cuando se descomponen los sulfuros, como la pirita. Los sulfuros son constituyentes importantes en muchas menas metálicas, y la pirita se encuentra también asociada a menudo con los depósitos de carbón. En un ambiente húmedo, la meteorización química de la pirita (FeS_2) produce ácido sulfúrico (H_2SO_4) y oxi-hidróxido de hierro [FeO(OH)]. En muchas localidades mineras, este proceso de meteorización produce un grave riesgo ambiental, en particular en las áreas húmedas donde el agua de la lluvia se infiltra en las pilas marginales (material de desecho que queda después de extraer el carbón u otros minerales). Este denominado *drenaje ácido de mina* acaba por abrirse camino hacia los ríos, matando los organismos acuáticos y degradando el hábitat acuático (Figura 6.5).

▲ **Figura 6.5** Esta agua que va penetrando desde una mina abandonada en Colorado es un ejemplo de *drenaje ácido de mina*. El drenaje ácido de mina es agua con una gran concentración de ácido sulfúrico (H_2SO_4) producida por la oxidación de los sulfuros como la pirita. Cuando esta agua rica en ácido migra desde su origen puede contaminar las aguas superficiales y las subterráneas y provocar daños ecológicos importantes. (Foto de Tim Haske/Profiles West/Index Stock Photography, Inc.)

Hidrólisis

El grupo mineral más común, el de los silicatos, se descompone sobre todo mediante el proceso de **hidrólisis** (*hydro* = agua; *lysis* = aflojamiento), que consiste básicamente en la reacción de cualquier sustancia con el agua. Idealmente, la hidrólisis de un mineral podría tener lugar en agua pura conforme algunas de las moléculas de agua se disocian para formar los iones muy reactivos hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Son los iones de hidrógeno los que atacan y sustituyen a otros iones positivos encontrados en el retículo cristalino. Con la introducción de los iones hidrógeno en la estructura cristalina, se destruye la disposición ordenada original de los átomos y se descompone el mineral.

En la naturaleza, el agua contiene normalmente otras sustancias que contribuyen con iones hidrógeno adicionales, acelerando de esta manera en gran medida la hidrólisis. La más común de esas sustancias es el dióxido de carbono, CO_2, que se disuelve en agua para formar ácido carbónico, H_2CO_3. La lluvia disuelve algo del dióxido de carbono en la atmósfera y otras cantidades, liberadas por la materia orgánica en descomposición, se adquieren a medida que el agua se infiltra a través del suelo.

En el agua, el ácido carbónico se ioniza para formar iones hidrógeno (H^+) e iones bicarbonato (HCO_3^-). Para ilustrar cómo experimenta hidrólisis una roca en presencia de ácido carbónico, examinemos la meteorización química del granito, una roca continental común. Recordemos que el granito se compone fundamentalmente de cuarzo y feldespato potásico. La meteorización del feldespato potásico componente del granito es la siguiente:

$$\underset{\substack{\text{feldespato}\\\text{potásico}}}{2KAlSi_3O_8} + \underset{\text{ácido carbónico}}{2(H^+ + HCO_3^-)} + \underset{\text{agua}}{H_2O} \rightarrow$$

$$\underset{\substack{\text{caolinita}\\\text{(arcilla residual)}}}{Al_2Si_2O_5(OH)_4} + \underbrace{\underset{\substack{\text{ion}\\\text{potasio}}}{2K^+} + \underset{\substack{\text{ion}\\\text{bicarbonato}}}{2HCO_3^-}}_{\text{en solución}} + \underset{\text{sílice}}{4SiO_2}$$

En esta reacción, los iones hidrógeno (H^+) atacan y sustituyen a los iones potasio (K^+) en la estructura del feldespato, alterando así la red cristalina. Una vez retirado, el potasio está disponible como nutriente para las plantas o se convierte en la sal soluble bicarbonato potásico ($KHCO_3$), que puede incorporarse en otros minerales o ser transportado al océano.

El producto más abundante de la descomposición química del feldespato potásico es un mineral de la arcilla, la caolinita. Los minerales de la arcilla son los productos finales de la meteorización y son muy estables a las condiciones que predominan en la superficie. Por consiguiente, los minerales de la arcilla constituyen un porcentaje elevado del material inorgánico de los suelos. Además, la roca sedimentaria más abundante, la lutita, contiene una elevada proporción de minerales de la arcilla.

Además de la formación de minerales de la arcilla durante la meteorización del feldespato potásico, las aguas subterráneas extraen algo de sílice de la estructura del feldespato y lo transportan. Esta sílice disuelta acabará precipitando, produciendo nódulos de sílex, o llenará los espacios porosos que quedan entre los granos de sedimento, o será transportada al océano, donde los animales microscópicos lo extraerán del agua para formar sus conchas de sílice duras.

En resumen, la meteorización del feldespato potásico genera un mineral de la arcilla residual, una sal soluble (bicarbonato potásico) y algo de sílice, que se disuelve.

El cuarzo, el otro componente principal del granito, es muy resistente a la meteorización química; se mantiene sustancialmente inalterado cuando es atacado por soluciones ácidas débiles. Como consecuencia, cuando el granito experimenta meteorización, los cristales de feldespato se convierten lentamente en arcilla, liberando los granos de cuarzo, antes entrelazados, que todavía conservan su aspecto fresco, vítreo. Aunque algo del cuarzo permanece en el suelo, gran parte es finalmente transportado al mar o a otros lugares de depósito, donde se convierte en el constituyente principal de algunos accidentes geográficos como las playas arenosas y las dunas de arena. Con el tiempo, estos granos de cuarzo pueden petrificarse para formar la roca sedimentaria arenisca.

En la Tabla 6.1 se enumeran los productos de meteorización de algunos de los silicatos más comunes. Re-

Tabla 6.1 Productos de meteorización

Mineral	Productos residuales	Material en solución
Cuarzo	Granos de cuarzo	Sílice
Feldespato	Minerales de la arcilla	Sílice K^+, Na^+, Ca^{2+}
Anfíbol (Hornblenda)	Minerales de la arcilla Limonita Hematites	Sílice Ca^{2+}, Mg^{2+}
Olivino	Limonita Hematites	Sílice Mg^{2+}

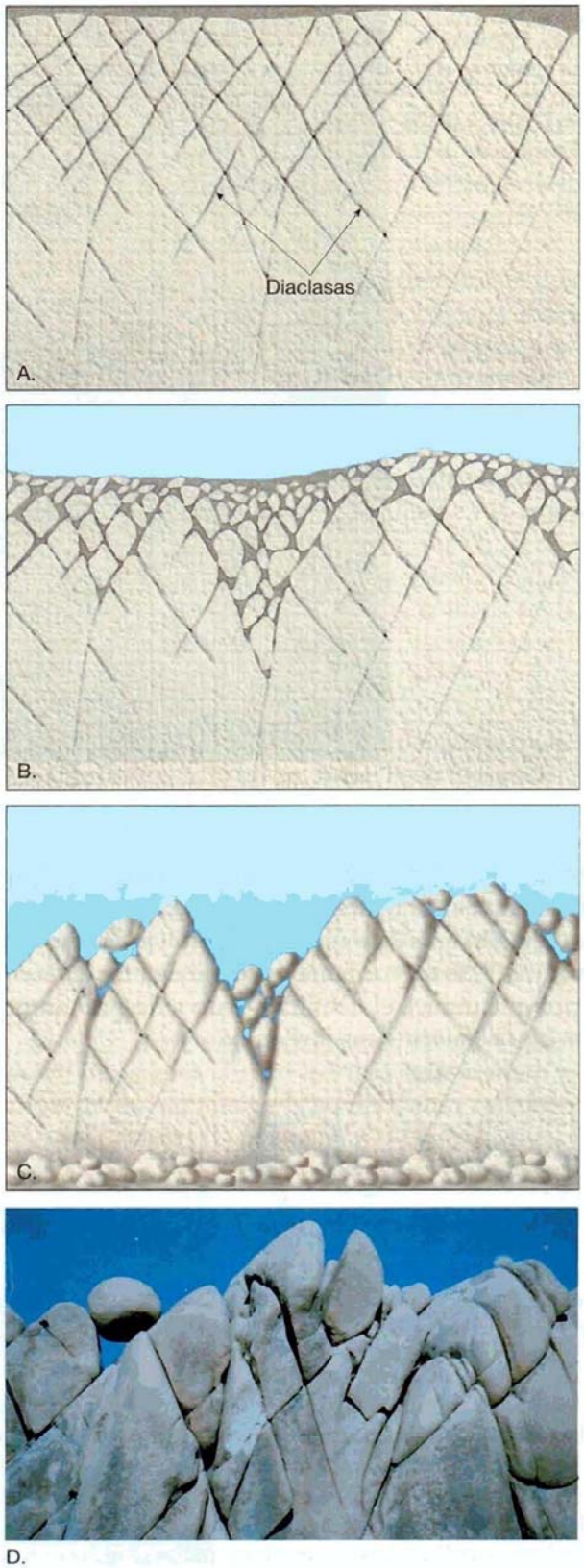
cordemos que los silicatos constituyen la mayor parte de la corteza terrestre y que esos minerales están compuestos esencialmente por sólo ocho elementos. Cuando son meteorizados químicamente, los silicatos suministran iones sodio, calcio, potasio y magnesio que forman productos solubles, que pueden ser extraídos del agua subterránea. El hierro se combina con el oxígeno, originando óxidos de hierro relativamente insolubles, fundamentalmente hematites y limonita, que proporcionan al suelo un color marrón rojizo o amarillento. Bajo la mayoría de las condiciones los tres elementos restantes, aluminio, sílice y oxígeno, se unen con el agua para producir minerales de la arcilla residuales. Sin embargo, incluso los minerales de arcilla más insolubles van siendo eliminados muy lentamente por el agua subsuperficial.

Alteraciones causadas por la meteorización química

Como se indicó antes, el resultado más significativo de la meteorización química es la descomposición de los minerales inestables y la generación o retención de aquellos minerales que son estables en la superficie terrestre. Esto explica el predominio de ciertos minerales en el material de la superficie que denominamos suelo.

Además de alterar la estructura interna de los minerales, la meteorización química produce también cambios físicos. Por ejemplo, cuando el agua corriente ataca a los fragmentos rocosos angulosos a través de las grietas, los fragmentos tienden a adoptar una forma esférica. El redondeado gradual de las esquinas y los bordes de los bloques angulares se ilustra en la Figura 6.6. Las esquinas son atacadas con más facilidad debido a su mayor área de superficie con respecto a su volumen, en comparación con los bordes y las caras. Este proceso, denominado **meteorización esferoidal,** proporciona a la roca meteorizada una forma más redondeada o esférica (Figura 6.6).

A veces, durante la formación de los bloques esferoidales, se separan envueltas sucesivas del cuerpo principal de la roca (Figura 6.7). Por fin las capas externas se desprenden, permitiendo que la actividad de la meteorización



▲ **Figura 6.6** Meteorización esferoidal de una roca intensamente diaclasada. El agua que se mueve a través de las grietas empieza a agrandarlas. Dado que las rocas son afectadas más en las esquinas y en los bordes, adoptan una forma esférica. La foto muestra la meteorización esferoidal en el monumento nacional Joshua Tree, California. (Foto de E. J. Tarbuck.)

▶ Figura 6.7
Sucesivas cáscaras se sueltan conforme el proceso de metorización continúa adentrándose en la roca. (Foto de Martin Schmidt, Jr.)

química penetre más en profundidad en el cuerpo rocoso principal. Esta descamación esférica se produce porque, a medida que los minerales de la roca se meteorizan a arcilla, su tamaño aumenta mediante la adición de agua a su estructura. Este mayor tamaño ejerce una fuerza hacia el exterior que induce el debilitamiento y desprendimiento de las capas concéntricas de la roca.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿La arcilla creada por la meteorización química es la misma arcilla que se utiliza para hacer cerámica?

Sí. La caolinita forma la arcilla que se describe en la sección sobre la hidrólisis, se llama *caolín* y se utiliza para la porcelana de alta calidad. Sin embargo, cantidades mucho mayores de esta arcilla se utilizan como revestimiento en la fabricación del papel de alta calidad, como el que se utiliza en este libro.

De hecho la meteorización crea muchos minerales de la arcilla diferentes y con distintos usos. Los minerales de la arcilla se utilizan en la fabricación de ladrillos, azulejos, canales del alcantarillado y cemento. Las arcillas se utilizan como lubricantes en las perforaciones de sondeos y son un ingrediente común de la pintura. Productos tan variados como el conversor catalítico de un coche y los filtros utilizados en la elaboración de la cerveza y el vino dependen de los minerales de la arcilla.

Por consiguiente, la meteorización química produce fuerzas lo bastante grandes como para causar meteorización mecánica. Este tipo de meteorización esferoidal, en el cual las capas se desgajan, no debe confundirse con el fenómeno de lajeamiento comentado antes. En el lajeamiento, la fractura se produce como consecuencia de la descompresión, y las capas de roca que se separan del cuerpo principal están en gran medida inalteradas en el momento de la separación.

Velocidades de meteorización

Meteorización y suelo
▼ Velocidades de meteorización

Varios factores influyen en el tipo y la velocidad de meteorización de la roca. Ya hemos visto cómo la meteorización mecánica afecta a la velocidad de la meteorización. Al fracturar la roca en fragmentos más pequeños, aumenta la cantidad de área superficial expuesta a la meteorización química. Otros factores importantes que se van a examinar son el papel de las características de la roca y del clima.

Características de la roca

Las características de la roca abarcan todos los rasgos químicos de las rocas, entre ellos la composición mineral y la

solubilidad. Además, pueden ser importantes todas las características físicas, como las diaclasas, porque influyen en la capacidad del agua para penetrar en la roca.

Las variaciones en las velocidades de meteorización debido a los constituyentes minerales se pueden demostrar comparando antiguas lápidas hechas de rocas distintas. Las lápidas de granito, que está compuesto por silicatos, son relativamente resistentes a la meteorización química. Comprobemos esto examinando las inscripciones en piedras mostradas en la Figura 6.8. Por el contrario, el mármol muestra signos de importantes alteraciones químicas a lo largo de un período relativamente corto. El mármol está compuesto de calcita (carbonato cálcico) que se disuelve fácilmente incluso en una solución débilmente ácida.

El grupo mineral más abundante, el de los silicatos, se meteoriza en el orden mostrado en la Figura 6.9. Esta disposición de los minerales es idéntica a las series de reacción de Bowen. El orden en el cual se meteorizan los silicatos es esencialmente el mismo al de su cristalización. La explicación para ello está relacionada con la estructura cristalina de los silicatos. La fuerza del enlace silicio-oxígeno es grande. Dado que el cuarzo está compuesto completamente por estos enlaces fuertes, es muy resistente a la meteorización. Por el contrario, el olivino tiene bastantes menos enlaces silicio-oxígeno siendo mucho menos resistente a la meteorización química.

Clima

Los factores climáticos, en particular la temperatura y la humedad, son cruciales para la meteorización de la roca. Un ejemplo importante de meteorización mecánica es que la frecuencia de los ciclos de congelación-deshielo afecta en gran medida a los procesos de cuña de hielo. La temperatura y la humedad ejercen también una fuerte influencia sobre las velocidades de meteorización química y sobre la clase y cantidad de vegetación presente. Las regiones con vegetación abundante tienen en general un manto grueso de suelo rico en materia orgánica descompuesta de la cual se derivan fluidos químicamente activos, como el ácido carbónico y los ácidos húmicos.

El ambiente óptimo para la meteorización química es una combinación de temperaturas cálidas y humedad abundante. En las regiones polares, la meteorización química es ineficaz porque las bajas temperaturas mantienen la humedad disponible encerrada en forma de hielo, mientras que en las regiones áridas hay insuficiente humedad para favorecer una meteorización química rápida.

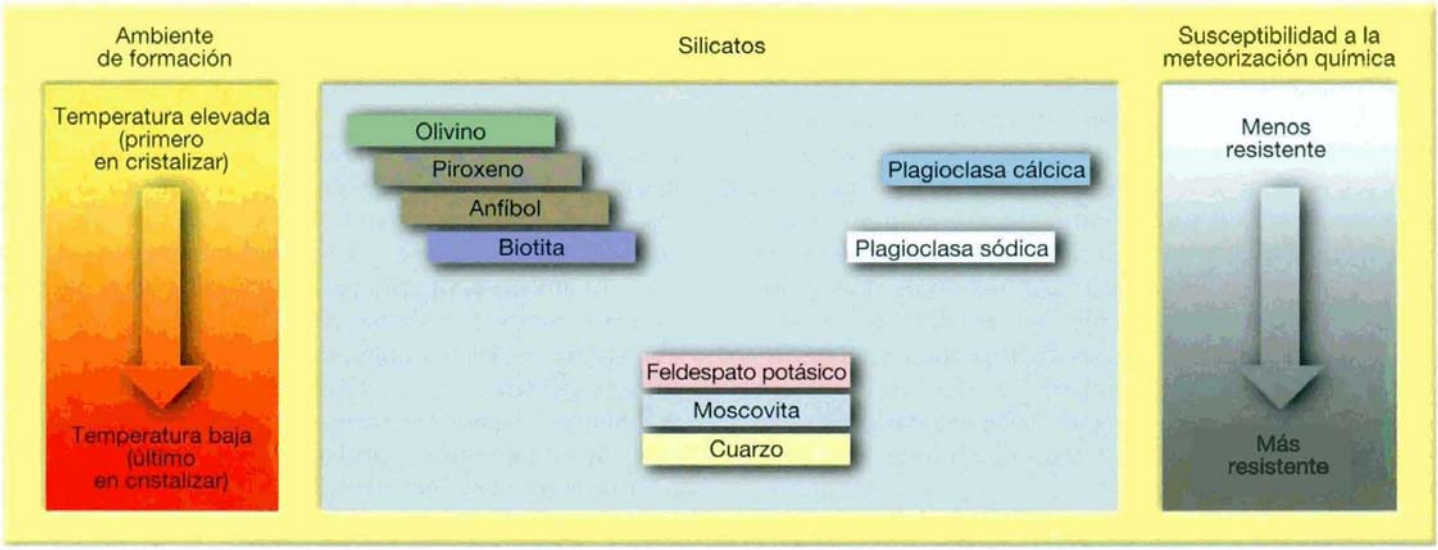
La actividad humana puede influir en la composición de la atmósfera, la cual, a su vez, puede afectar a la velocidad de la meteorización química. En el Recuadro 6.2 se examina un ejemplo bien conocido, la lluvia ácida.

Meteorización diferencial

Las masas rocosas no se meteorizan de una manera uniforme. Observe la foto de un dique de la Figura 5.17. La masa ígnea duradera permanece encima del terreno circundante como una pared de piedra. A este fenómeno se le denomina **meteorización diferencial.** Los resultados varían en escala de la superficie rugosa e irregular de la lápida de mármol de la Figura 6.8 a las exposiciones enérgicamente esculpidas del valle de los Monumentos.

Muchos factores influyen en la velocidad de meteorización de la roca. Entre los más importantes se encuentran las variaciones de la composición de la roca. La

◀ **Figura 6.8** El examen de las lápidas revela la velocidad de meteorización química en diversos tipos de roca. La lápida de granito (izquierda) se colocó cuatro años después que la de mármol (derecha). La fecha de inscripción de 1872 del monumento de mármol es casi ilegible. (Fotos de E. J. Tarbuck.)



▲ **Figura 6.9** Meteorización de los silicatos comunes. El orden en el cual los silicatos se meteorizan químicamente es básicamente el mismo que el orden de su cristalización.

roca más resistente sobresale en forma de montes o puntas o como acantilados más empinados en una ladera irregular. El número y el espaciado de las diaclasas también puede ser un factor significativo (*véase* Figura 6.6). La meteorización diferencial y la erosión ulterior son responsables de la creación de muchas formaciones rocosas y morfologías inusuales, a veces espectaculares.

Suelo

El suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre. Junto con el aire y el agua, es uno de nuestros recursos más indispensables. También como el aire y al agua, muchos de nosotros consideramos que el suelo es algo que tenemos garantizado. La siguiente cita nos ayuda a situar en la perspectiva adecuada esta capa vital.

> En los últimos años, la ciencia se ha concentrado cada vez más en la Tierra como planeta, que, en la medida que nosotros sabemos, es único: donde una fina cubierta de aire, una película aún más fina de agua y la capa aún más fina de suelo se combinan para dar apoyo a una red de vida de una maravillosa diversidad en cambio continuo*.

El suelo se ha denominado con gran precisión «el puente entre la vida y el mundo inanimado». Toda la vida (la biosfera completa) debe su existencia a una docena más o menos de elementos que en última instancia deben proceder de la corteza terrestre. Una vez que la meteorización y otros procesos crean el suelo, las plantas llevan a cabo el papel intermediario de asimilar los elementos necesarios y hacerlos asequibles a los animales, entre ellos los seres humanos.

Una interfase en el sistema Tierra

Cuando se considera la Tierra como un sistema, se suele hacer referencia al suelo como una *interfase:* un límite común donde interactúan partes diferentes de un sistema. Ésta es una designación apropiada porque el suelo se forma allí donde se unen la tierra sólida, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. El suelo es un material que se desarrolla en respuesta a interacciones ambientales complejas entre diferentes partes del sistema Tierra. Con el tiempo, el suelo evoluciona de manera gradual hasta un estado de equilibrio con el entorno. El suelo es dinámico y sensible a prácticamente todos los aspectos de su entorno. Por tanto, cuando se producen cambios ambientales, como el clima, la cubierta vegetal o la actividad animal (incluida la humana) el suelo responde. Cualquiera de esos cambios produce una alteración gradual de las características del suelo hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Aunque finamente distribuido sobre la superficie terrestre, el suelo funciona como una interfase fundamental, proporcionando un ejemplo excelente de integración entre muchas partes del sistema Tierra.

¿Qué es el suelo?

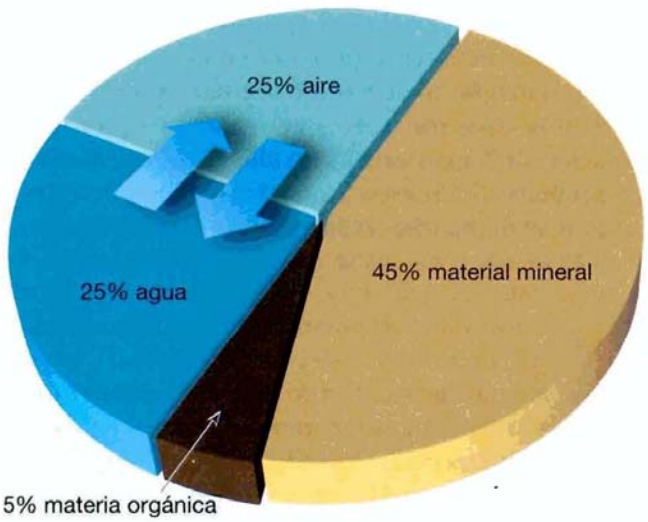
Con pocas excepciones, la superficie de la Tierra está cubierta por el **regolito** (*rhegos* = manta; *lithos* = piedra), la capa de roca y fragmentos minerales producidos por me-

* Jack Eddy, «A fragile Seam of Dark Blue Light», en *Proceedings of the Global Change Research Forum.* U. S. Geological Survey Circular 1086, 1993, pág. 15.

teorización. Algunos llamarían suelo a este material, pero el suelo es más que la acumulación de restos meteorizados. El **suelo** es una combinación de materia mineral y orgánica, agua y aire: la porción del regolito que sustenta el crecimiento de las plantas. Aunque las proporciones de los principales componentes que hay en el suelo varían, siempre están presentes los mismos cuatro componentes (Figura 6.10). Alrededor de la mitad del volumen total de un suelo superficial de buena calidad está compuesto por una mezcla de roca desintegrada y descompuesta (materia mineral) y de **humus,** los restos descompuestos de la vida animal y vegetal (materia orgánica). La otra mitad consiste en espacios porosos entre las partículas sólidas donde circula el aire y el agua.

Aunque la porción mineral del suelo suele ser mucho mayor que la porción orgánica, el humus es un componente esencial. Además de ser una fuente importante de nutrientes vegetales, el humus potencia la capacidad del suelo para retener agua. Dado que las plantas precisan aire y agua para vivir y crecer, la porción del suelo consistente en espacios porosos que permiten la circulación de esos fluidos es tan vital como los constituyentes del suelo sólido.

El agua del suelo está muy lejos de ser agua «pura»; en cambio es una solución compleja que contiene muchos nutrientes solubles. El agua del suelo no sólo proporciona la humedad necesaria para las reacciones químicas que sustentan la vida; también suministra a las plantas nutrientes en la forma que ellas pueden utilizar. Los espacios porosos no rellenos de agua contienen aire. Este aire es la fuente de oxígeno y dióxido de carbono necesarios para que vivan en el suelo la mayoría de las plantas y los microorganismos.



▲ **Figura 6.10** Composición (por volumen) de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal. Aunque los porcentajes varían, cada suelo está compuesto de materia mineral y orgánica, agua y aire.

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

He visto fotografías de huellas que los astronautas dejaron en la superficie lunar. ¿Eso significa que la Luna tiene suelo?

No exactamente. La Luna no tiene atmósfera, ni agua y carece de actividad biológica. Por tanto, la meteorización química, la gelifracción y otros procesos de meteorización que conocemos en la Tierra no se producen en la Luna. Sin embargo, todos los terrenos lunares están cubiertos por una capa de derrubios grises parecida al suelo, llamada *regolito lunar,* que deriva de un bombardeo de meteoritos ocurrido hace unos pocos miles de millones de años. La velocidad del cambio de la superficie es tan lenta que las huellas que dejaron los astronautas del *Apollo* permanecerán con un aspecto intacto durante millones de años.

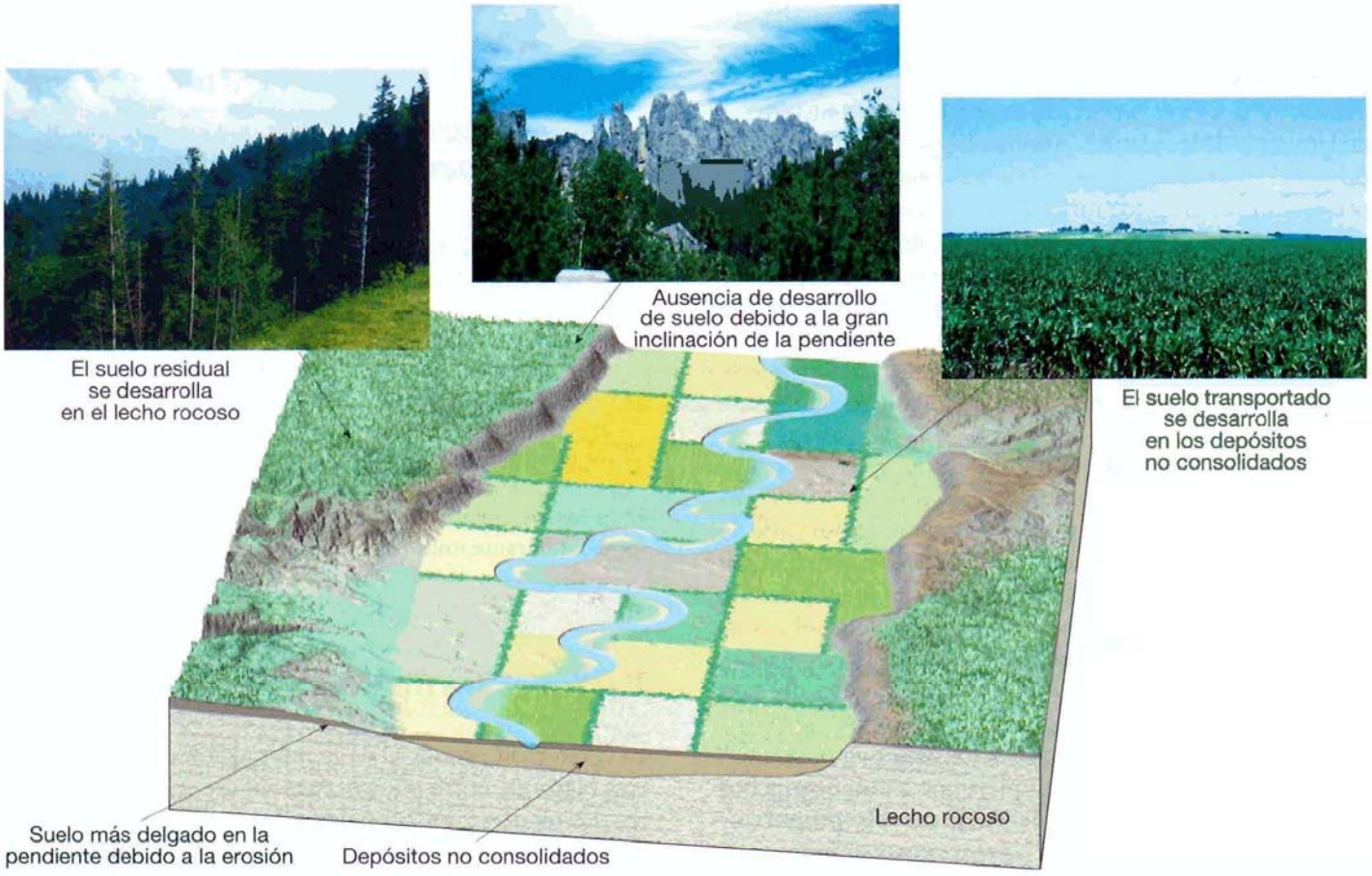
Factores formadores del suelo

El suelo es el producto de la interacción compleja de varios factores, entre ellos la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales, y la topografía. Aunque todos estos factores son interdependientes, examinaremos sus papeles por separado.

Roca madre

La fuente de la materia mineral meteorizada a partir de la cual se desarrolla el suelo se denomina **roca madre** y es el factor fundamental que influye en la formación del nuevo suelo. Conforme progresa la formación del suelo, experimenta de manera gradual cambios físicos y químicos. La roca madre puede ser o bien la roca subyacente o bien una capa de depósitos no consolidados. Cuando la roca madre es el substrato rocoso, los suelos se denominan *suelos residuales.* Por el contrario, los que se desarrollan sobre sedimento no consolidado se denominan *suelos transportados* (Figura 6.11). Debe observarse que los suelos transportados se forman *en el lugar* en el cual la gravedad, el agua, el viento o el hielo depositan los materiales progenitores que han sido transportados desde cualquier otro lugar.

La naturaleza de la roca madre influye en el suelo de dos maneras. En primer lugar, el tipo de roca madre afectará a la velocidad de meteorización y, por tanto, a la de formación del suelo. También, dado que los depósitos no consolidados están en parte ya meteorizados, el desarrollo del suelo sobre dicho material progresará probablemente más deprisa que cuando la roca madre es el lecho



▲ **Figura 6.11** La roca madre de los suelos residuales es el lecho rocoso subyacente, mientras que los suelos transportados se forman en los depósitos no consolidados. Observe que, conforme las pendientes aumentan de inclinación, el suelo adelgaza.

de roca. En segundo lugar, la composición química de la roca madre afectará a la fertilidad del suelo. Esto influye en el carácter de la vegetación natural que el suelo puede sustentar.

Antes se creía que la roca madre era el factor fundamental que producía las diferencias entre los suelos. En la actualidad, los especialistas en suelos se han dado cuenta de que otros factores, en especial el clima, son más importantes. De hecho, se ha descubierto que suelen producirse suelos similares a partir de rocas madres diferentes y que suelos diferentes se han desarrollado a partir del mismo tipo de roca madre. Estos descubrimientos refuerzan la importancia de los otros factores formadores del suelo.

Tiempo

El tiempo es un componente importante de todos los procesos geológicos, y la formación del suelo no es una excepción. La naturaleza del suelo se ve muy influida por la duración de los procesos que han estado actuando. Si se ha producido meteorización durante un tiempo comparativamente corto, el carácter de la roca madre determina en gran medida las características del suelo. Conforme continúa la meteorización, la influencia de la roca madre sobre el suelo se ve eclipsada por los otros factores formadores del suelo, en especial el clima. No puede enumerarse la magnitud de tiempo necesaria para que evolucionen los diversos suelos, porque los procesos de formación del suelo actúan a velocidades variables bajo circunstancias diferentes. Sin embargo, a modo de regla, cuanto más tiempo ha estado formándose un suelo, mayor es su grosor y menos se parece a la roca madre.

Clima

El clima se considera el factor más influyente en la formación del suelo. La temperatura y las precipitaciones son los elementos que ejercen el efecto más fuerte sobre la formación del suelo. Las variaciones de temperatura y de precipitaciones determinan si predominará la meteorización química o la mecánica y también influyen en gran medida en la velocidad y profundidad de la meteorización. Por ejemplo, un clima cálido y húmedo puede producir

una potente capa de suelo meteorizado químicamente en el mismo tiempo que un clima frío y seco produce un fino manto de derrubios físicamente meteorizados. Además, la cantidad de precipitaciones influye sobre el grado con el que los diversos materiales son retirados del suelo por las aguas de infiltración (proceso denominado *lixiviación*), afectando con ello a su fertilidad. Por último, las condiciones climáticas constituyen un control importante sobre el tipo de vida animal y vegetal presente.

Plantas y animales

Las plantas y los animales desempeñan un papel vital en la formación del suelo. Los tipos y la abundancia de organismos presentes tienen una fuerte influencia sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo. De hecho, en el caso de los suelos bien desarrollados de muchas regiones, la importancia de la vegetación para el tipo de suelo suele verse implícita en la descripción utilizada por los científicos. Frases del tipo de *suelo de pradera, suelo de bosque* y *suelo de tundra* son comunes.

Las plantas y los animales proporcionan materia orgánica al suelo. Ciertos suelos cenagosos están compuestos casi por completo de materia orgánica. Mientras que los suelos de desierto pueden contener cantidades de tan sólo un uno por ciento. Aunque la cantidad de la materia orgánica varía sustancialmente de unos suelos a otros, es raro el suelo que carece completamente de ella.

La fuente principal de materia orgánica del suelo es la vegetal, aunque también contribuyen los animales y un número infinito de microorganismos. Cuando se descompone la materia orgánica, se suministran nutrientes importantes a las plantas, así como a los animales y microorganismos que viven en el suelo. Por consiguiente, la fertilidad del suelo está relacionada en parte con la cantidad de materia orgánica presente. Además, la descomposición de los restos animales y vegetales induce la formación de varios ácidos orgánicos. Estos ácidos complejos aceleran el proceso de meteorización. La materia orgánica tiene también una gran capacidad de retención de agua y, por tanto, ayuda a mantener el agua en un suelo.

Los microorganismos, entre ellos los hongos, las bacterias y los protozoos unicelulares, desempeñan un papel activo en la descomposición de los restos vegetales y animales. El producto final es el humus, un material que ya no se parece a las plantas ni a los animales a partir de los cuales se formó. Además, ciertos microorganismos contribuyen a la fertilidad del suelo porque tienen capacidad para convertir el nitrógeno atmosférico en nitrógeno del suelo.

Las lombrices de tierra y otros animales excavadores actúan para mezclar las porciones mineral y orgánica del suelo. Las lombrices, por ejemplo, se alimentan de materia orgánica y mezclan completamente los suelos en los cuales viven, a menudo moviendo y enriqueciendo muchas toneladas por hectárea al año. Las madrigueras y agujeros contribuyen también al paso de agua y aire a través del suelo.

Topografía

La disposición de un terreno puede variar en gran medida en distancias cortas. Esas variaciones de la topografía, a su vez, pueden inducir el desarrollo de una variedad localizada de tipos de suelo. Muchas de las diferencias existen porque la pendiente tiene un efecto significativo sobre la magnitud de la erosión y el contenido acuoso del suelo.

En pendientes empinadas, los suelos suelen desarrollarse poco. En dichas situaciones, la cantidad de agua que empapa el suelo es poca; como consecuencia, el contenido de humedad del suelo puede no ser suficiente para el crecimiento vigoroso de las plantas. Además, debido a la erosión acelerada en las pendientes empinadas, los suelos son delgados o, en algunos casos, inexistentes (Figura 6.11).

En contraste, los suelos mal drenados y anegados encontrados en las tierras bajas tienen un carácter muy diferente. Esos suelos suelen ser gruesos y oscuros. El color oscuro se debe a la gran cantidad de materia orgánica que acumula, ya que las condiciones saturadas retrasan la descomposición vegetal. El terreno óptimo para el desarrollo de un suelo es una superficie plana o ligeramente ondulada en tierras altas. Aquí, encontramos buen drenaje, erosión mínima e infiltración suficiente del agua en el suelo.

La *orientación de la pendiente* o la dirección a la que mira la pendiente, es otro factor que debemos observar. En las latitudes medias del hemisferio septentrional, una pendiente que mire hacia el sur recibirá una cantidad de luz solar mayor que una pendiente que mire hacia el norte. De hecho, esta última quizá no reciba luz solar directa nunca. La diferencia en la cantidad de radiación solar recibida producirá diferencias de temperatura y humedad del suelo, que, a su vez, pueden influir en la naturaleza de la vegetación y el carácter del suelo.

Aunque en esta sección se abordan por separado cada uno de los factores formadores del suelo, debemos recordar que todos ellos actúan a la vez para formar el suelo. Ningún factor individual es responsable del carácter de un suelo; antes bien, es la influencia combinada de la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales y la pendiente lo que determina este carácter.

El perfil del suelo

Dado que los procesos de formación del suelo actúan desde la superficie hacia abajo, las variaciones de composición, textura, estructura y color evolucionan de manera

gradual a las diversas profundidades. Estas diferencias verticales, que normalmente van siendo más pronunciadas conforme pasa el tiempo, dividen el suelo en zonas o capas conocidas como **horizontes.** Si cavara una trinchera en el suelo, vería que sus paredes tienen capas. Una sección vertical de este tipo a través de todos los horizontes del suelo constituye el **perfil del suelo** (Figura 6.12).

En la Figura 6.13 se representa una visión idealizada de un perfil de suelo bien desarrollado en el cual se identifican cinco horizontes. Desde la superficie hacia abajo, se designan como *O*, *A*, *E*, *B* y *C*. Estos cinco horizontes son comunes en los suelos de las regiones templadas. Las características y la extensión del desarrollo de los horizontes varían de unos ambientes a otros. Por tanto, localidades diferentes exhiben perfiles de suelo que pueden contrastar en gran medida unos con otros.

El horizonte de suelo *O* consiste en gran medida en material orgánico. Contrasta con las capas que están debajo de él, que son fundamentalmente materia mineral. La porción superior del horizonte *O* consiste fun-

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

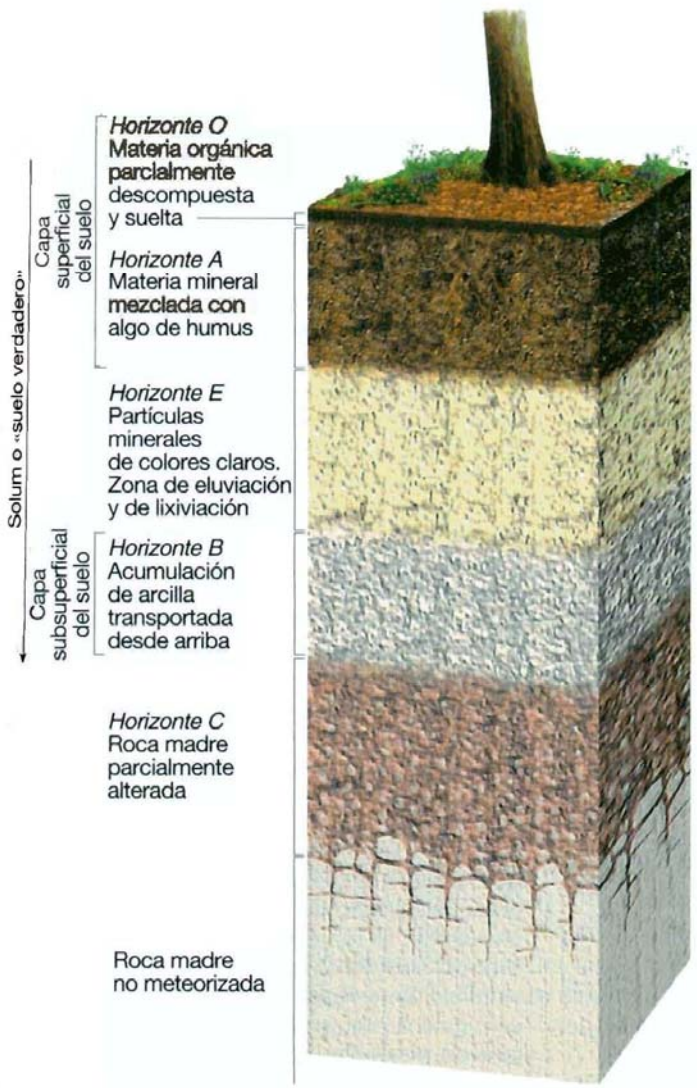
El otro día estaba haciendo un agujero en mi jardín y me encontré una capa dura profunda realmente difícil de penetrar. ¿Cómo se forma una capa dura?

Las capas duras se crean por el proceso de la eluviación. Conforme el agua percola a través del suelo, las pequeñas partículas de tamaño arcilla procedentes de las capas superiores del suelo son desplazadas por la eluviación y se concentran en el subsuelo (horizonte *B*). Con el tiempo la acumulación de estas partículas de tamaño arcilla crea una capa casi impenetrable, que es lo que encontró. Algunas veces, las capas duras son tan impermeables que sirven como barreras eficaces contra el movimiento del agua, impidiendo más infiltración de agua. Las capas duras también se llaman *capas de adobe*, porque su elevado contenido de arcilla las hace apropiadas para utilizarlas como ladrillos de construcción.

A.

B.

▲ **Figura 6.12** Un perfil del suelo es un corte transversal vertical desde la superficie a través de todos los horizontes hasta la roca madre. **A.** Este perfil muestra un suelo bien desarrollado de la región suroriental de Dakota del Sur. (Foto de E. J. Tarbuck.) **B.** En este suelo de Puerto Rico no se distinguen los límites entre los horizontes, lo que le da un aspecto relativamente uniforme. (Foto cortesía de Soil Science Society o America.)



▲ **Figura 6.13** Perfil idealizado de un suelo en latitudes medias de clima húmedo. La *capa superficial del suelo* y el *subsuelo* forman el solum o «suelo verdadero».

damentalmente en mantillo vegetal, como hojas sueltas y otros restos orgánicos que son todavía reconocibles. Por el contrario, la porción inferior del horizonte *O* está compuesta por materia orgánica parcialmente descompuesta (humus) en la cual ya no pueden identificarse las estructuras vegetales. Además de plantas, el horizonte *O* está repleto de vida microscópica, bacterias, hongos, algas e insectos. Todos estos organismos contribuyen con oxígeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos al desarrollo del suelo.

Por debajo del horizonte *O*, rico en restos orgánicos, se encuentra el horizonte *A*. Esta zona está compuesta en gran medida por materia mineral; sin embargo la actividad biológica es alta y generalmente hay humus: hasta el 30 por ciento en algunos casos. Juntos, los horizontes *O* y *A* constituyen lo que se denomina normalmente *capa superficial del suelo*. Por debajo del horizonte *A*, el horizonte *E*, es una capa de color claro que contiene poca materia orgánica. Conforme el agua percola hacia abajo a través de esta zona, transporta las partículas más finas. Este lavado de los componentes finos del suelo se denomina **eluviación** (*elu* = salir; *via* = camino). El agua que percola hacia abajo disuelve también componentes inorgánicos solubles del suelo y los transporta a zonas más profundas. Este empobrecimiento de materiales solubles de la zona alta del suelo se denomina **lixiviación.**

Inmediatamente debajo del horizonte *E* se encuentra el horizonte *B*, o *capa subsuperficial del suelo*. Gran parte del material extraído del horizonte *E* mediante eluviación se deposita en el horizonte *B*, al que se suele hacer referencia como la *zona de acumulación*. La acumulación de las partículas arcillosas finas potencia la retención de agua en el subsuelo. Los horizontes *O*, *A*, *E* y *B* juntos constituyen el **solum,** o «suelo verdadero». Es en este suelo verdadero donde son activos los procesos formadores del suelo y donde están en gran medida confinadas las raíces vivas y otros tipos de vida animal y vegetal.

Debajo de este suelo verdadero y por encima de la roca madre inalterada se encuentra el horizonte *C*, una capa caracterizada por roca madre parcialmente alterada. Mientras que los horizontes *O*, *A*, *E* y *B* tienen poco parecido con la roca madre, ésta es fácilmente identificable en el horizonte *C*. Aunque este material está experimentando cambios que lo transformarán por fin en suelo, todavía no ha cruzado el umbral que separa el regolito del suelo.

Las características y la magnitud del desarrollo pueden variar en gran medida de unos suelos a otros de ambientes diferentes. Los límites entre los horizontes del suelo pueden ser bruscos o los horizontes pueden pasar gradualmente de uno a otro. Por consiguiente, un perfil de suelo bien desarrollado indica que las condiciones ambientales han sido relativamente estables a lo largo de un período prolongado y que el suelo es *maduro*. Por el contrario, algunos suelos carecen por completo de horizontes.

Dichos suelos se denominan *inmaduros* porque la formación del suelo ha estado operando sólo durante un período corto. Los suelos inmaduros son también característicos de pendientes empinadas donde la erosión desgasta continuamente el suelo, impidiendo su desarrollo completo.

Clasificación de los suelos

Existen muchas variaciones de un lugar a otro y de un período a otro entre los factores que controlan la formación del suelo. Estas diferencias conducen a una variedad des-

concertante de tipos de suelos. Para abordar esta variedad, es esencial elaborar algún método de clasificación del gran conjunto de datos que hay que estudiar. Estableciendo grupos formados por elementos con algunas características importantes en común, se introducen el orden y la simplicidad. Poner orden a grandes cantidades de información no sólo ayuda a la comprensión sino que además facilita el análisis y la explicación.

En Estados Unidos, los científicos del suelo han elaborado un sistema para clasificar los suelos conocido como la **Taxonomía del suelo.** Hace énfasis en las propiedades físicas y químicas del perfil del suelo y se organiza según las características observables del suelo. Existen seis categorías jerárquicas de clasificación, desde *orden*, la categoría más amplia, hasta *serie*, la categoría más específica. El sistema reconoce 12 órdenes de suelo y más de 19.000 series de suelo.

Los nombres de las unidades de clasificación son combinaciones de sílabas, la mayoría de las cuales derivan del latín y el griego. Los nombres son descriptivos. Por ejemplo, los suelos del orden Aridosol (del latín *aridus*, seco, y *solum*, suelo) son los suelos característicamente secos de las regiones áridas. Los suelos del orden Inceptisol (del latín *inceptum*, comienzo, y *solum*, suelo) son suelos con sólo el comienzo o principio del desarrollo del perfil.

En la Tabla 6.2 se describen brevemente los 12 órdenes básicos de suelo. En la Figura 6.14 se muestra el complejo patrón de distribución mundial de los 12 órdenes de la Taxonomía del suelo (*véase* Recuadro 6.3). Como muchos sistemas de clasificación, la Taxonomía del suelo no es apropiada para cualquier propósito. En especial, es útil para los objetivos agrícolas y relacionados con la explotación de la tierra, pero no es un sistema útil para los

Tabla 6.2 Órdenes mundiales del suelo

Alfisoles	Suelos moderadamente meteorizados que se forman debajo de los bosques boreales o los bosques de almendros tropicales caducifolios, ricos en hierro y aluminio. Las partículas de arcilla se acumulan en una capa subsuperficial en respuesta a la lixiviación de los ambientes húmedos. Suelos fértiles, productivos, porque no son ni demasiado húmedos ni demasiado secos.
Andisoles	Suelos jóvenes en los que la roca madre es la ceniza volcánica, depositada por la actividad volcánica reciente.
Aridosoles	Suelos que se desarrollan en lugares secos; con el agua insuficiente para extraer minerales solubles, pueden tener una acumulación de carbonato cálcico, yeso o sales en el subsuelo; bajo contenido orgánico.
Entisoles	Suelos jóvenes con un desarrollo limitado que exhiben propiedades de la roca madre. La productividad oscila entre niveles muy altos para algunos suelos formados en depósitos fluviales recientes a niveles muy bajos para los que se forman en la arena voladora o en laderas rocosas.
Gelisoles	Suelos jóvenes con poco desarrollo del perfil que se encuentran en regiones con pergelisol. Las bajas temperaturas y las condiciones de congelación durante gran parte del año retrasan los procesos de formación del suelo.
Histosoles	Suelos orgánicos con pocas implicaciones climáticas o ninguna. Se pueden encontrar en cualquier clima en el que los derrubios orgánicos se puedan acumular y formar un suelo de turbera. Material orgánico oscuro y parcialmente descompuesto que suele llamarse turba.
Inceptisoles	Suelos jóvenes poco desarrollados en los que el comienzo o principio del desarrollo del perfil es evidente. Más habituales en los climas húmedos, existen desde el Ártico hasta los trópicos. La vegetación nativa suele ser bosque.
Mollisoles	Suelos oscuros y suaves que se han desarrollado bajo una vegetación herbosa y en general se encuentran en áreas de pradera. Horizonte superficial rico en humus que es rico en calcio y magnesio. La fertilidad del suelo es excelente. También se encuentran en bosques de madera dura con una actividad significativa de las lombrices. El intervalo climático oscila entre boreal o alpino y tropical. Las estaciones secas son normales (*véase* Figura 6.12A).
Oxisoles	Suelos que se hallan en terrenos antiguos a menos que las rocas madres estuvieran muy meteorizadas antes de ser depositadas. En general se encuentran en las regiones tropicales y subtropicales. Ricos en óxido de hierro y de aluminio, los oxisoles están muy lixiviados; por consiguiente, son suelos pobres para la actividad agrícola (*véase* Figura 6.12B).
Espodosoles	Suelos que sólo se encuentran en las regiones húmedas sobre material arenoso. Son comunes en los bosques de coníferas septentrionales y en los bosques húmedos fríos. Bajo el horizonte oscuro superior de material orgánico meteorizado se extiende un horizonte de color claro de material lixiviado, lo cual constituye la propiedad distintiva de este suelo.
Ultisoles	Suelos que representan los productos de largos períodos de meteorización. El agua que percola a través del suelo se concentra en partículas de arcilla en los horizontes inferiores (horizontes argílicos). Limitados a los climas húmedos de las regiones templadas y los trópicos, donde la época de cultivo es larga. El agua abundante y un período largo sin congelación contribuyen a la lixiviación extensiva y, por tanto, a una peor calidad del suelo.
Vertisoles	Suelos que contienen grandes cantidades de arcilla, que se encogen al secarse y se hinchan con la adición de agua. Se encuentran en los climas de subhúmedos a áridos, siempre que se disponga de suministros adecuados de agua para saturar el suelo después de períodos de sequía. La expansión y la contracción del suelo ejercen presión sobre las estructuras humanas.

Recuadro 6.3 ▸ El hombre y el medio ambiente

Despejar el bosque tropical: impacto en sus suelos

Los suelos rojos gruesos son habituales en los trópicos y los subtrópicos húmedos. Son el producto final de una meteorización química extrema. Puesto que las exuberantes selvas tropicales se asocian con estos suelos, podemos suponer que son fértiles y tienen un gran potencial para la agricultura. Sin embargo, es justo lo contrario: se cuentan entre los suelos más pobres para el cultivo. ¿Cómo es posible?

Dado que los suelos de la selva tropical se desarrollan en unas condiciones de temperaturas elevadas y fuertes lluvias, están muy lixiviados. No sólo la lixiviación extrae los materiales solubles como el carbonato cálcico, sino que además las grandes cantidades de agua que filtran también extraen gran parte de la sílice, con el resultado que se concentran en el suelo los óxidos insolubles de hierro y aluminio. Los óxidos de hierro aportan al suelo su color rojo característico. Como la actividad bacteriana es muy alta en los trópicos, los suelos del bosque tropical prácticamente no contienen humus. Además, la lixiviación destruye la fertilidad porque la mayoría de los nutrientes de las plantas son arrastrados por el gran volumen de agua que filtra hacia abajo. Por consiguiente, aunque la vegetación es densa y exuberante, el suelo por sí mismo contiene pocos nutrientes disponibles.

La mayor parte de los nutrientes que sustentan el bosque tropical están encerrados en los propios árboles. Conforme la vegetación muere y se descompone, las raíces de los árboles del bosque absorben los nutrientes con rapidez antes de que sean lixiviados del suelo. Los nutrientes se reciclan continuamente a medida que los árboles mueren y se descomponen.

Por tanto, cuando se desbrozan bosques para obtener tierra para el cultivo o para conseguir madera, también se elimina la mayor parte de los nutrientes. Lo que queda es un suelo que contiene poco para alimentar los cultivos plantados.

El desbroce de las selvas no sólo elimina los nutrientes de las plantas sino que además acelera la erosión. Cuando hay vegetación, sus raíces se agarran al suelo, y sus hojas y sus ramas proporcionan una cubierta que protege el suelo desviando la fuerza total de las fuertes lluvias tan frecuentes.

La eliminación de la vegetación también expone el suelo a la fuerte radiación solar directa. Cuando el sol los calienta, estos suelos tropicales pueden endurecerse hasta tener una consistencia parecida a la de un ladrillo y se convierten en suelos prácticamente impenetrables para el agua y las raíces de los cultivos. En sólo unos pocos años, los suelos de una zona recién desbrozada pueden no ser cultivables.

El término *laterita*, que suele aplicarse a estos suelos, deriva de la palabra latina *latere*, que significa «ladrillo», y se aplicó primero al uso de este material para la fabricación de ladrillos en la India y en Camboya. Los trabajadores simplemente excavaban el suelo, le daban forma y lo dejaban endurecer al sol. Todavía quedan en pie estructuras antiguas, pero todavía bien conservadas, realizadas en laterita, en los trópicos húmedos. Estas estructuras han soportado siglos de meteorización porque la meteorización química ya extrajo del suelo todos los materiales solubles originales. Las lateritas son, por tanto, prácticamente insolubles y muy estables.

En resumen, hemos visto que algunos suelos de los bosques tropicales son productos muy lixiviados de meteorización química extrema en los trópicos cálidos y húmedos. Aunque pueden asociarse con exuberantes bosques tropicales, estos suelos son improductivos cuando se elimina la vegetación. Además, cuando se desbrozan las plantas, estos suelos están sujetos a una erosión acelerada y el Sol puede calentarlos hasta que adquieren una dureza parecida a la de un ladrillo.

ingenieros que preparan evaluaciones de posibles lugares de construcción.

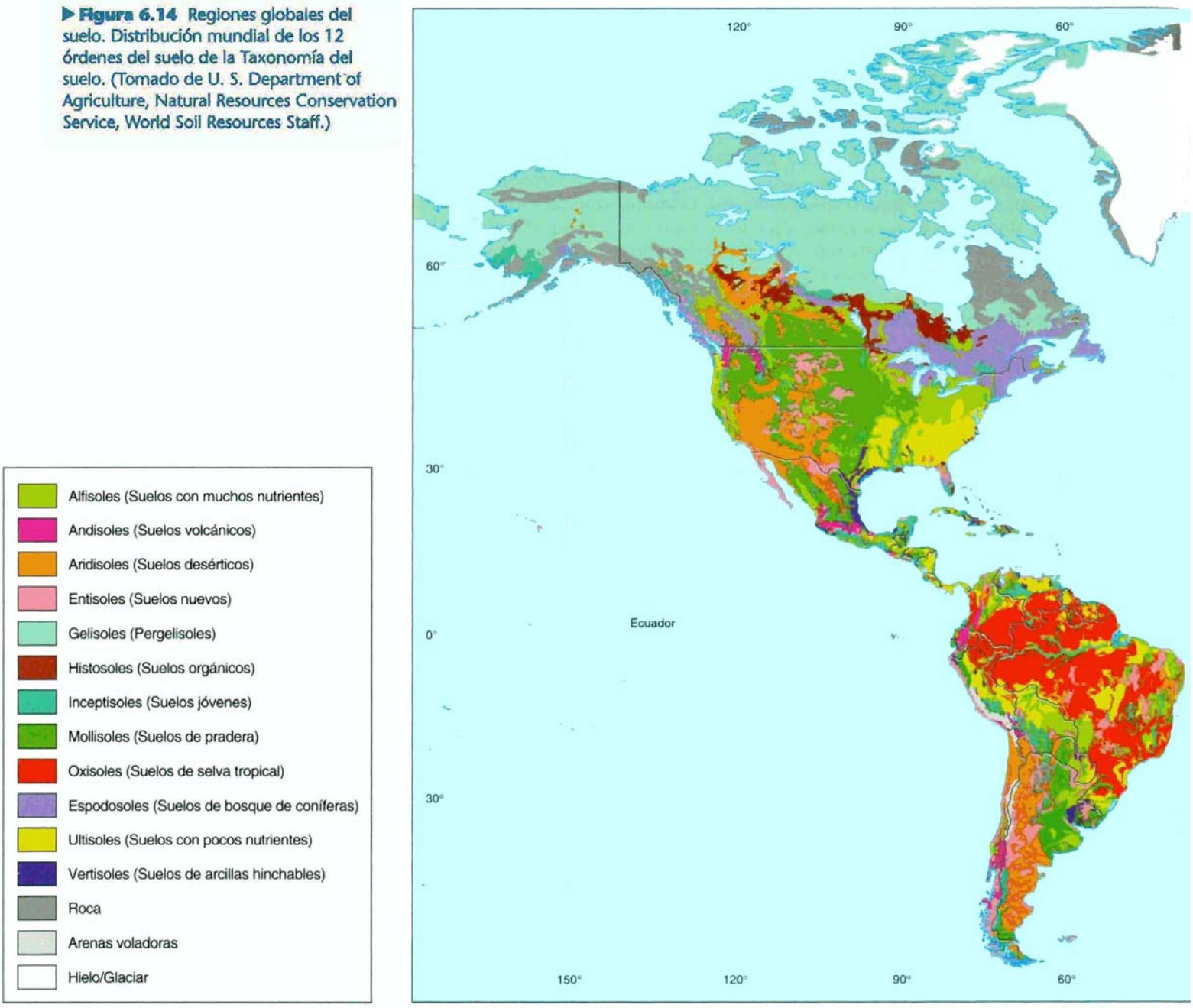
Erosión del suelo

Los suelos no son sino una fina fracción de todos los materiales de la Tierra; sin embargo son un recurso vital. Dado que los suelos son necesarios para el crecimiento de las plantas con raíces, son el verdadero fundamento del sistema de apoyo de la vida humana. Al igual que el ingenio humano puede aumentar la productividad agrícola de los suelos por medio de la fertilización y la irrigación, también se pueden dañar los suelos como consecuencia de actividades negligentes. Pese a su papel básico en cuanto al abastecimiento de alimento, fibra y otros materiales básicos, los suelos se cuentan entre los recursos más maltratados.

Quizás estos descuidos e indiferencia se deban a que una cantidad sustancial de suelo parece mantenerse incluso allí donde la erosión es intensa. No obstante, aunque la pérdida de la capa vegetal superior fértil quizá no sea obvia a los ojos no preparados, es un problema cada vez mayor, conforme las actividades humanas se extienden y alteran cada vez más la superficie de la Tierra

Cómo se erosiona el suelo

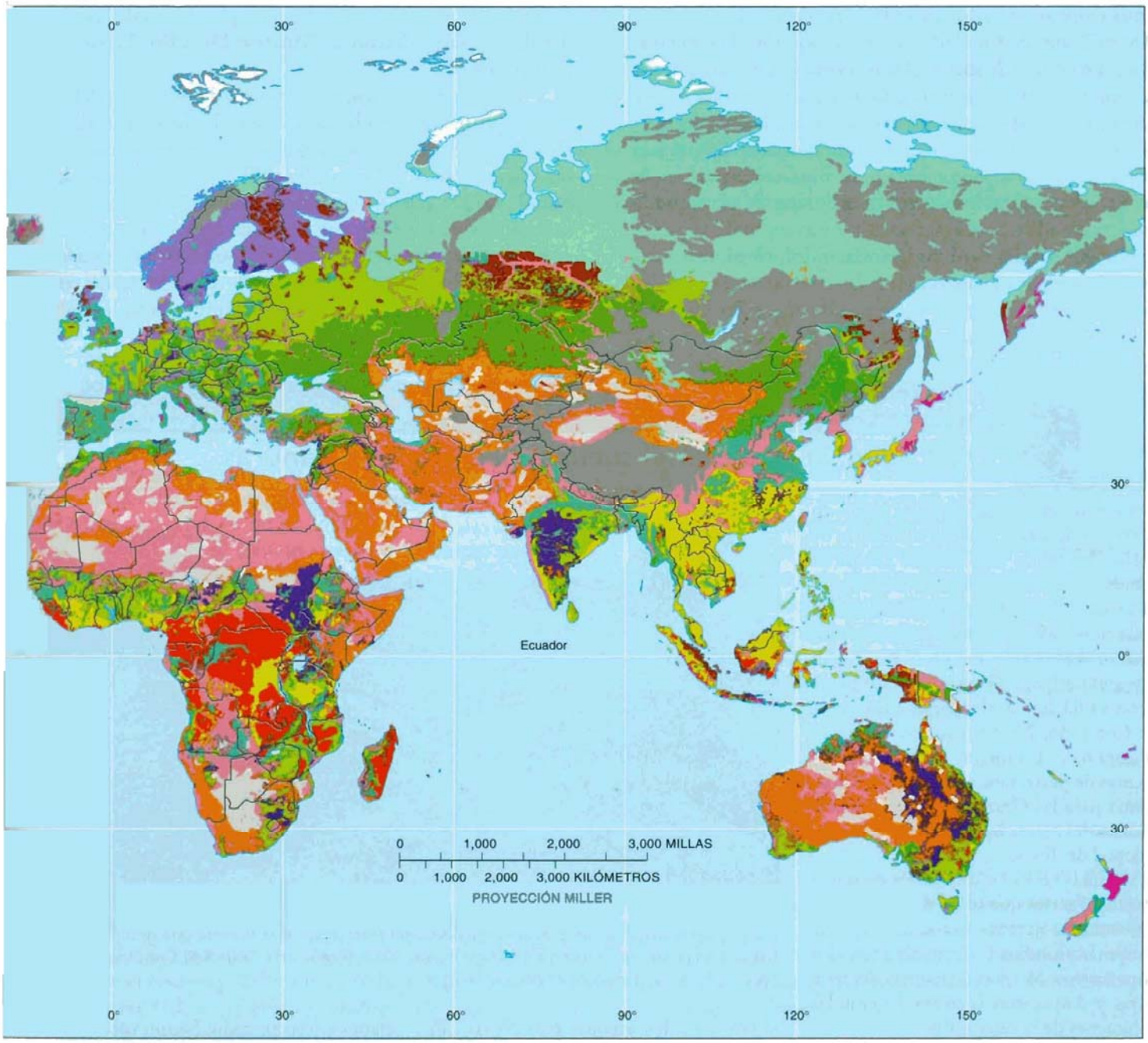
La erosión del suelo es un proceso natural; forma parte del reciclaje constante de los materiales de la Tierra que denominamos el *ciclo de las rocas*. Una vez formado el suelo, las fuerzas erosivas, en especial el agua y el viento, mueven los componentes del suelo de un lugar a otro. Cada vez que llueve, las gotas de lluvia golpean la tierra con fuerza sorprendente. Cada gota actúa como una pequeña



▶ Figura 6.14 Regiones globales del suelo. Distribución mundial de los 12 órdenes del suelo de la Taxonomía del suelo. (Tomado de U. S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, World Soil Resources Staff.)

bomba, haciendo estallar partículas del suelo móviles fuera de sus posiciones de la masa de suelo. A continuación, el agua que fluye a través de la superficie arrastra las partículas de suelo desalojadas. Dado que el suelo es movido por finas láminas de agua, este proceso se denomina *erosión laminar*.

Después de fluir en forma de una fina lámina no confinada durante una distancia relativamente corta, normalmente se desarrollan hilos de agua y empiezan a formarse finos canales denominados *acanaladuras*. Conforme las acanaladuras aumentan de tamaño se crean incisiones más profundas en el suelo, conocidas como *abarrancamientos*. Cuando el cultivo agrícola normal no puede eliminar los canales, sabemos que las acanaladuras crecen lo bastante como para convertirse en abarrancamientos. Aunque la mayoría de las partículas de suelo desalojadas se mueve sólo sobre una corta distancia cada vez que llueve, cantidades sustanciales acaban abandonando los campos y abriéndose camino pendiente abajo hacia un río. Una vez en el canal del río, esas partículas de suelo, que ahora pueden denominarse *sedimento*, son transportadas corriente abajo y finalmente se depositan.



Velocidad de erosión

Sabemos que la erosión es el destino último de prácticamente todos los suelos. En el pasado, la erosión ocurría a velocidades mucho más lentas que las actuales porque mucha de la superficie terrestre estaba cubierta y protegida por árboles, arbustos, hierbas y otras plantas. Sin embargo, las actividades humanas, como la agricultura, la explotación forestal y la construcción, que eliminan o alteran la vegetación natural, han acelerado en gran medida la velocidad de erosión del suelo. Sin el efecto estabilizador de las plantas, el suelo se ve más fácilmente barrido por el viento o transportado pendiente abajo por el lavado superficial.

La velocidad normal de erosión del suelo varía en gran medida de un lugar a otro y depende de las características del suelo, así como de factores como el clima, la pendiente y el tipo de vegetación. A lo largo de un área amplia, la erosión causada por las aguas de escorrentía puede calcularse determinando las cargas de sedimento de las corrientes que drenan la región. Cuando se llevaron a cabo estudios de este tipo a escala mundial, indicaron que, antes de la aparición de los seres humanos, el transporte de sedi-

mento realizado por los ríos al océano ascendía a más de 9.000 millones de toneladas métricas por año. Por el contrario, la cantidad de material transportado en la actualidad es de unos 24.000 millones de toneladas métricas por año, es decir, más de dos veces y media la velocidad anterior.

Es más difícil medir la pérdida de suelo debida a la erosión del viento. Sin embargo, la eliminación del suelo por el viento generalmente es menos significativa que la erosión causada por el agua que fluye, excepto durante los períodos de sequía prolongada. Cuando prevalecen condiciones secas, los vientos fuertes pueden extraer grandes cantidades de suelo de los campos no protegidos. Esto es lo que ocurrió en los años 30 en las porciones de las grandes llanuras que dieron en llamarse Dust Bowl (*véase* Recuadro 6.4).

En muchas regiones la velocidad de erosión del suelo es significativamente mayor que la de su formación. Esto significa que en esos lugares un recurso renovable se ha convertido en uno no renovable. En la actualidad, se calcula que la capa vegetal del suelo se está erosionando más rápidamente de lo que se forma en más de una tercera parte de las zonas de cultivo del mundo. El resultado es una menor productividad, una peor calidad de las cosechas, un menor ingreso agrícola y un futuro siniestro.

Recuadro 6.4 ▶ Las personas y el ambiente

Dust Bowl: la erosión del suelo en las Grandes Llanuras

Durante un intervalo de años de sequía en la década de 1930, grandes tormentas de polvo invadieron las Grandes Llanuras. A causa del tamaño y la gravedad de estas tormentas, la región pasó a llamarse el Dust Bowl, y el período, los Sucios Años Treinta. El corazón del Dust Bowl eran casi 100 millones de acres en el límite de Texas y Oklahoma y las partes adyacentes de Colorado, Nuevo México y Kansas (Figura 6.A). En menor medida, las tormentas de polvo también fueron un problema para las Grandes Llanuras, desde Dakota del Norte hasta la parte centrooccidental de Texas.

Algunas veces las tormentas de polvo eran tan fuertes que se les dio el nombre de «ventiscas negras» y «rodillos negros» porque la visibilidad se reducía a tan sólo unos metros. Muchas tormentas duraron horas y despojaron la tierra de grandes volúmenes de la capa arable.

En la primavera de 1934, una tormenta eólica que duró un día y medio creó una nube de polvo de 2.000 kilómetros de longitud. Conforme el sedimento se movía en dirección este, en Nueva York se produjeron «lluvias de barro» y en Vermont, «nevadas negras». Otra tormenta transportó polvo a más de tres kilómetros en la atmósfera y a 3.000 kilómetros de su origen en Colorado y dio lugar al «crepúsculo de mediodía» en Nueva Inglaterra y en Nueva York.

¿Qué provocó el Dust Bowl? Claramente el hecho de que algunas porciones de las Grandes Llanuras experimentaran algunos de los vientos más fuertes de Norteamérica es importante. Sin embargo, fue la expansión de la agricultura lo que preparó el escenario para el período desastroso de erosión del suelo. La mecanización permitió la rápida transformación de las praderas cubiertas de hierba de esta región semiárida en tierras de cultivo. Entre 1870 y 1930, el cultivo se expandió casi diez veces, desde unos 10 millones de acres a más de 100 millones de acres.

Mientras la precipitación fue adecuada, el suelo se mantuvo en su lugar. Sin embargo, cuando sobrevino una sequía prolongada en la década de 1930, los campos desprotegidos fueron vulnerables al viento. El resultado fue una gran pérdida de suelo, el malogro de las cosechas y un período de privaciones económicas.

Al principio de 1939, un regreso a las condiciones más lluviosas condujo a la recuperación. Se establecieron nuevas prácticas agrícolas que redujeron la pérdida del suelo por el viento. A pesar de que las tormentas de polvo son menos numerosas y no son tan fuertes como las que tuvieron lugar en los Sucios Años Treinta, la erosión del suelo por los vientos fuertes todavía sucede con periodicidad siempre que se da la combinación de sequía y suelos desprotegidos.

▲ **Figura 6.A** Una alquería abandonada muestra los efectos desastrosos de la erosión eólica y la sedimentación durante el período del Dust Bowl. Esta foto de una granja que había sido próspera se tomó en Oklahoma en 1937. (Foto cortesía de Soil Conservation Service, U. S. Department of Agriculture.)

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Se está reduciendo la cantidad de suelo de cultivo de Estados Unidos y de todo el mundo?

En realidad sí. Se ha calculado que entre 3 y 5 millones de acres de las principales tierras de cultivo de Estados Unidos se pierden cada año a través de la mala utilización (incluida la erosión del suelo) y la conversión a usos no agrícolas. Según las Naciones Unidas, desde 1950 más de un tercio de la tierra cultivable del mundo se ha perdido a causa de la erosión del suelo.

Sedimentación y contaminación química

Otro problema relacionado con la erosión excesiva del suelo es el relativo al depósito de sedimentos. Cada año se sedimentan cientos de millones de toneladas de suelo erosionado en lagos, pantanos y ríos. El efecto perjudicial de este proceso puede ser significativo. Por ejemplo, a medida que se deposita cada vez más sedimento en un pantano, su capacidad disminuye, limitando su utilidad para el control de las inundaciones, el abastecimiento de agua y la generación de energía hidroeléctrica. Además, la sedimentación en ríos y otras vías fluviales puede restringir la navegación e inducir costosas operaciones de dragado.

En algunos casos, las partículas del suelo están contaminadas con los pesticidas utilizados en la agricultura. Cuando estos productos químicos llegan a un lago o un pantano, la calidad del suministro de agua se ve amenazada y los organismos acuáticos pueden verse en peligro. Además de los pesticidas, los nutrientes normalmente encontrados en los suelos, junto con los añadidos por los fertilizantes agrícolas, se abren camino hacia los ríos y los lagos, donde estimulan el crecimiento de plantas. Durante un cierto tiempo, el exceso de nutrientes acelera el proceso por medio del cual el crecimiento vegetal induce el agotamiento de oxígeno y una muerte precoz del lago.

La disponibilidad de buenos suelos es crucial si se pretende alimentar a la población mundial en rápido crecimiento. En todos los continentes se está produciendo una pérdida innecesaria de suelo, porque no se están utilizando medidas de conservación adecuadas. Aunque es un hecho reconocido que la erosión del suelo nunca puede ser eliminada del todo, los programas de conservación del suelo pueden reducir de manera sustancial la pérdida de este recurso básico. Las estructuras para cortar el viento (hileras de árboles), la construcción de bancales y el trabajar las tierras a lo largo de los contornos de las colinas son algunas de las medidas eficaces, igual que las prácticas de cultivo especial y de rotación de las cosechas.

Resumen

- Entre los procesos externos se cuentan: (1) *la meteorización*, es decir, la desintegración y descomposición de las rocas de la superficie terrestre, o cerca de ella; (2) *procesos gravitacionales*, transferencia de materia rocosa pendiente abajo bajo la influencia de la gravedad, y (3) *erosión*, eliminación del material por un agente dinámico, normalmente agua, viento o hielo. Se denominan *procesos externos* porque tienen lugar en la superficie terrestre o cerca de ella y se alimentan de la energía solar. Por el contrario, los *procesos internos*, como el vulcanismo y la formación de montañas, derivan su energía del interior de la Tierra.

  La *meteorización mecánica* es la rotura física de una roca en fragmentos más pequeños. Las rocas pueden romperse en fragmentos más pequeños mediante *cuñas de hielo* (donde el agua se abre camino en las grietas o agujeros de las rocas y, después de su congelación, se expande y aumenta de tamaño las aberturas); *descompresión* (expansión y rotura debidas a una gran reducción de la presión cuando la roca suprayacente es erosionada); *expansión térmica* (debilitamiento de la roca como consecuencia de la expansión y contracción conforme se calienta y se enfría) y *actividad biológica* (por los humanos, por los animales excavadores, las raíces de las plantas, etc.).

  La *meteorización química* altera el quimismo de una roca, transformándola en sustancias diferentes. El agua es con mucho el agente de meteorización química más importante. Se produce *disolución* cuando los minerales solubles en agua, como la halita, se disuelven. El oxígeno disuelto en agua *oxidará* los minerales ricos en hierro. Cuando el dióxido de carbono (CO_2) se disuelve en agua forma *ácido carbónico*, que acelera la descomposición de los silicatos mediante *hidrólisis*. La meteorización química de los silicatos produce a menudo: (1) productos solubles que contienen iones sodio, calcio, potasio y magnesio, y sílice en solución; (2) óxidos de hierro insolubles, y (3) minerales de arcilla.

- La velocidad a la cual la roca se meteoriza depende de factores como: (1) el *tamaño de partícula*, los fragmentos pequeños generalmente se meteorizan más rápidamente que los grandes; (2) la *composición mineral*, la calcita se disuelve fácilmente en soluciones ligeramente ácidas, y los silicatos que se forman por primera vez a partir del magma son menos resistentes a la meteorización química, y (3) los *factores climáticos*, en particular la temperatura y la humedad. Con frecuencia, las rocas expuestas en la superficie terrestre no se meteorizan a la misma velocidad. Esta *meteorización diferencial* de las rocas se ve influida por factores como la composición mineral, el grado de fracturación y la exposición a los elementos atmosféricos.
- El *suelo* es una combinación de materia mineral y orgánica, agua y aire: la porción del *regolito* (la capa de roca y fragmentos minerales producidos por la meteorización) que sustenta el crecimiento de las plantas. Aproximadamente la mitad del volumen total de un suelo de buena calidad está compuesto por una mezcla de roca desintegrada y descompuesta (materia mineral) y *humus* (los restos descompuestos de animales y vegetales); la mitad restante consiste en espacios porosos, donde circulan el aire y el agua. Los factores más importantes que controlan la formación del suelo son la *roca madre*, el *tiempo*, el *clima*, las *plantas* y los *animales*, y la *pendiente*.
- Los procesos de formación del suelo operan desde la superficie hacia abajo y producen en el suelo zonas o capas que se denominan *horizontes*. Desde la superficie hacia abajo, los horizontes del suelo se denominan respectivamente *O* (fundamentalmente materia orgánica), *A* (fundamentalmente materia mineral), *E* (donde la *eluviación* y la *lixiviación* extraen los componentes finos y los constituyentes solubles del suelo), *B* (o *capa subsuperficial del suelo*, al que se hace referencia a menudo como la *zona de acumulación*), y *C* (la roca madre parcialmente alterada). Juntos, los horizontes *O* y *A* constituyen lo que se denomina la *capa superficial del suelo*.
- En Estados Unidos, los suelos se clasifican mediante un sistema conocido como la *Taxonomía del suelo*. Se basa en las propiedades físicas y químicas del perfil del suelo e incluye seis categorías jerárquicas. El sistema es especialmente útil para los objetivos agrícolas y relacionados con la explotación de la tierra.
- La erosión del suelo es un proceso natural; forma parte del reciclado constante de los materiales de la Tierra que denominamos ciclo de las rocas. Una vez en el canal de un río, las partículas de suelo son transportadas corriente abajo y finalmente acaban por depositarse. La *velocidad de erosión del suelo* varía de un lugar a otro y depende de las características del suelo, así como de factores como el clima, la pendiente y el tipo de vegetación.

Preguntas de repaso

1. Describa el papel de los procesos externos en el ciclo de las rocas.
2. Si se meteorizaran dos rocas idénticas, una mediante procesos mecánicos y la otra químicos, ¿en qué se diferenciarían los productos de la meteorización de las dos rocas?
3. ¿En qué tipo de ambientes son más eficaces las cuñas de hielo?
4. Describa la formación de un domo de exfoliación. Dé un ejemplo de una estructura de este tipo.
5. ¿Cómo se añade la meteorización mecánica a la eficacia de la meteorización química?
6. Un granito y un basalto están expuestos superficialmente a una región cálida y húmeda:
   a) ¿Qué tipo de meteorización predominará?
   b) ¿Cuál de estas rocas se meteorizará más deprisa? ¿Por qué?
7. El calor acelera una reacción química. ¿Por qué entonces la meteorización química transcurre despacio en un desierto cálido?
8. ¿Cómo se forma el ácido carbónico (H_2CO_3) en la naturaleza? ¿Qué se obtiene cuando este ácido reacciona con el feldespato potásico?
9. Enumere algunos posibles efectos ambientales de la lluvia ácida (*véase* Recuadro 6.1).
10. ¿Cuál es la diferencia entre el suelo y el regolito?
11. ¿Qué factores podrían hacer que se desarrollaran diferentes suelos a partir de la misma roca madre, o que se formaran suelos similares a partir de rocas madres diferentes?
12. ¿Cuál de los factores formadores del suelo es más importante? Explíquelo.
13. ¿Cómo puede afectar la topografía al desarrollo del suelo? ¿Qué se entiende por la expresión *orientación de la pendiente*?

14. Enumere las características asociadas con cada uno de los horizontes en un perfil de suelo bien desarrollado. ¿Qué horizontes constituyen el solum? ¿Bajo qué circunstancias carecen de horizontes los suelos?
15. Los suelos tropicales que se describen en el Recuadro 6.3 sostienen las exuberantes selvas tropicales aunque se les considera poco fértiles. Explíquelo.
16. Enumere tres efectos nocivos de la erosión del suelo que no sean la pérdida de la capa superficial del suelo vegetal de las zonas cultivables.
17. Describa brevemente las condiciones que indujeron la formación del Dust Bowl en los años 30 (*véase* Recuadro 6.3).

Términos fundamentales

canchal
cuña de hielo (gelifracción)
disolución
domo de exfoliación
eluviación
erosión
hidrólisis
horizonte
humus
lajeamiento
lixiviación
meteorización
meteorización diferencial
meteorización esferoidal
meteorización mecánica
meteorización química
oxidación
perfil del suelo
proceso externo
proceso gravitacional
proceso interno
regolito
roca madre
solum
suelo
Taxonomía del suelo

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