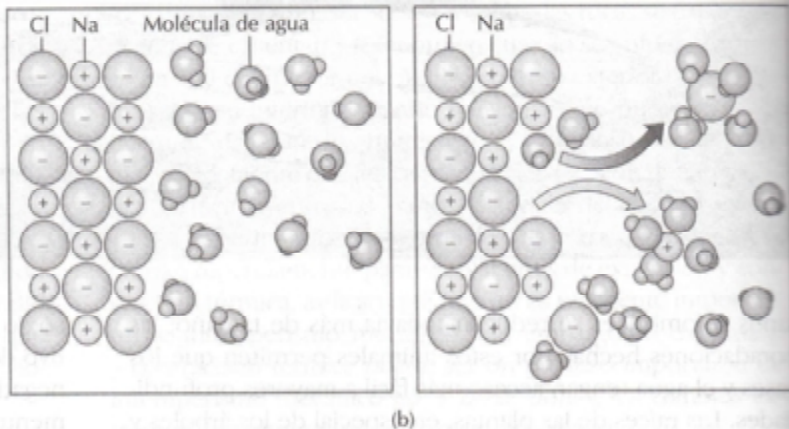
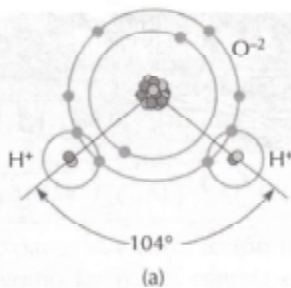
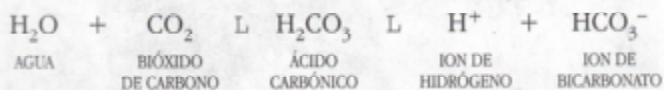


FIGURA 6.10 a) Estructura de una molécula de agua. La disposición asimétrica de los átomos de hidrógeno hace que la molécula tenga una carga eléctrica ligeramente positiva en su extremo de hidrógeno y ligeramente negativa en su extremo de oxígeno. b) Disolución del cloruro de sodio (NaCl) en el agua.



La mayoría de los minerales no son muy solubles en agua pura, porque las fuerzas de atracción de las moléculas de agua no son suficientes para vencer a las fuerzas entre las partículas de los minerales. La calcita mineral (CaCO_3), constituyente principal de la roca caliza, que es roca sedimentaria, y de la roca metamórfica mármol, es prácticamente insoluble en agua pura, pero se disuelve rápidamente si se halla presente una pequeña cantidad de ácido. Una forma fácil de elaborar agua ácida consiste en la disociación de iones de ácido carbónico como sigue:

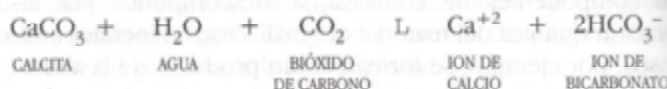


De acuerdo con esta ecuación química, el agua y el bióxido de carbono se combinan para formar *ácido carbónico*, una pequeña cantidad del cual se disocia para producir iones de hidrógeno y bicarbonato. La concentración de los iones de hidrógeno determina la acidez de una solución; cuantos más iones de hidrógeno estén presentes, más fuerte será el ácido.

El bióxido de carbono de varias fuentes puede combinarse con el agua y reaccionar para formar soluciones ácidas. La atmósfera se compone en su mayor medida de nitrógeno y oxígeno, pero alrededor del 0.03% es bióxido de carbono, lo que hace que la lluvia sea ligeramente ácida. Las actividades humanas han agregado a la atmósfera materiales que contribuyen al problema de la lluvia ácida (véase la Perspectiva 6.1). La materia orgánica en descomposición y la respiración de los organismos produce bióxido de carbono en los suelos, de modo que el agua subterránea en las áreas húmedas es ligeramente ácida. Como las regiones áridas tienen vegetación escasa y muy espaciada entre sí, el agua subterránea tiene una fuente limitada de bióxido de

carbono y tiende a ser alcalina; esto es, tiene una baja concentración de iones de hidrógeno.

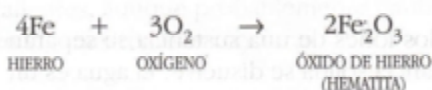
Sea cual sea la fuente de bióxido de carbono, una vez que se presenta una solución ácida, la calcita se disuelve rápidamente de acuerdo con la reacción siguiente:



En muchos lugares, la disolución de la calcita en la roca caliza y el mármol ha tenido impresionantes efectos, que van desde pequeñas cavidades hasta la Cueva del Mamut (Mammoth Cave), en Kentucky, y las Cavernas Carlsbad, en Nuevo México.

OXIDACIÓN

La **oxidación** se refiere a las reacciones con el oxígeno para formar óxidos o, si interviene el agua, hidróxidos. Por ejemplo, el hierro se corroe cuando se combina con el oxígeno para formar la hematita de óxido de hierro:



Desde luego, el oxígeno atmosférico está disponible en abundancia para las reacciones de oxidación, pero ésta es en general un proceso lento, a menos que haya agua presente. La mayor parte de la oxidación la lleva a cabo el oxígeno disuelto en el agua.

La oxidación es muy importante en la alteración de los silicatos ferromagnesianos, como el olivino, los piroxenos, los anfíboles y la biotita. El hierro de estos minerales se

combinan con el oxígeno para formar la hematita rojiza de óxido de hierro (Fe_2O_3) o la limonita de hidróxido amarillento o café [$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$]. Los colores amarillo, café o rojo de muchos suelos y rocas sedimentarias se deben a la presencia de pequeñas cantidades de hematita o limonita.

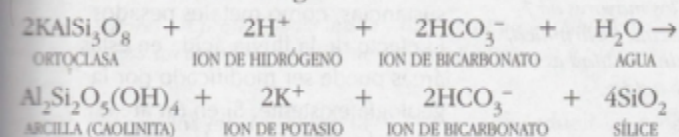
Una reacción de oxidación de interés particular en algunas áreas es la de los minerales que contienen hierro y azufre, como la pirita (FeS_2). Ésta generalmente se asocia con el carbón mineral y es así que en los jales, colas o tailings* de las minas, la pirita se oxida para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y óxido de hierro. De esta manera se producen los suelos y aguas ácidas en las áreas de extracción de carbón mineral, y plantean un grave riesgo ambiental (figura 6.11).

HIDRÓLISIS

La hidrólisis es la reacción química entre los iones de hidrógeno (H^+) y los iones de hidroxilo (OH^-) del agua y los iones de un mineral. En la hidrólisis, los iones de hidrógeno reemplazan realmente a los iones positivos de los minerales. Esta sustitución cambia la composición de los minerales, liberando sustancias solubles y hierro que pueden entonces oxidarse.

Como una ilustración de la hidrólisis, considérese la alteración química de los feldespatos. Todos los feldespatos son silicatos de estructura, pero cuando son alterados producen compuestos en solución y minerales arcillosos, como la caolinita, que son silicatos de hoja.

El intemperismo químico del feldespato de potasio por hidrólisis ocurre como sigue:



En esta reacción, los iones de hidrógeno atacan a los iones de la estructura ortoclasa y algunos iones liberados se incorporan a un mineral arcilloso en desarrollo, mientras que otros sencillamente se van a la solución. Del lado derecho de la ecuación está la sílice excedente, la cual no encajaría en la estructura de cristal del mineral arcilloso.

Factores que controlan el ritmo del intemperismo químico

LOS procesos de intemperismo químico operan sobre las superficies de las partículas; esto es, las rocas o los minerales intemperizados químicamente son alterados de fuera hacia adentro. Varios factores, entre ellos el tamaño de la partícula, el clima y el material original controlan el ritmo del intemperismo químico.

TAMAÑO DE LA PARTÍCULA

Como el intemperismo químico afecta a las superficies de las partículas, cuanto mayor es la superficie más efectivo es el intemperismo. Así, las pequeñas partículas tienen, en



FIGURA 6.11 La oxidación de la pirita en los jales o colas de las minas genera agua ácida, como en este pequeño arroyo. Más de 11 000 km de arroyos en Estados Unidos, principalmente en la región de los Apalaches, están contaminados por minas de carbón abandonadas que dejan escapar ácido sulfúrico.

comparación con su volumen, superficies mayores que las grandes. Observe en la figura 6.12 cómo un bloque que mide 1 m por lado tiene una superficie de 6 m^2 , pero cuando el bloque se divide en partes que miden 0.5 m por lado, la superficie total aumenta a 12 m^2 . Y si estas partículas se reducen todas a piezas de 0.25 m por lado, la superficie total crece a 24 m^2 . Observe que, mientras el área de superficie de este ejemplo crece, el volumen total sigue siendo de 1 m^3 .

Podemos hacer dos importantes declaraciones en relación con el bloque de la figura 6.12. En primer lugar, al dividirse en un número de bloques más pequeños su superficie total aumenta; en segundo, cuanto menor es cada bloque, mayor extensión de superficie tiene en comparación con su volumen. Podemos concluir que el intemperismo mecánico, el cual reduce el tamaño de las partículas, contribuye al intemperismo químico exponiendo mayor extensión de superficie.

CLIMA

Los procesos químicos se llevan a cabo más rápidamente a altas temperaturas y en presencia de líquidos. De acuerdo con ello, el intemperismo químico es más efectivo en los trópicos que en las regiones áridas y árticas, porque tanto las temperaturas como la precipitación pluvial son altas,

* Los *jales*, *colas* o *tailings* son los desechos de rocas de las minas; se les considera demasiado pobres para seguir procesándolos y son abandonados como montones en la superficie.

PERSPECTIVA 6.1

Lluvia ácida

Una de las consecuencias de la industrialización es la contaminación atmosférica. Varias de las naciones más industrializadas, como Estados Unidos, Canadá y Rusia han reducido realmente sus emisiones a la atmósfera, pero muchas naciones en desarrollo siguen aumentando las suyas. Entre algunas de las consecuencias de la contaminación atmosférica se cuentan el smog, la posible rotura de la capa de ozono, el calentamiento global y la lluvia ácida.

La acidez es una indicación de la concentración del ion de hidrógeno y se mide con la escala pH (figura 1). Un pH de 7 es neutral, mientras que valores menores de 7 indican condiciones de acidez y valores mayores de 7 indican condiciones alcalinas o básicas. La precipitación pluvial normal tiene un pH de alrededor de 5.6, lo cual la hace ligeramente ácida. La lluvia ácida se define como una precipitación pluvial con un valor pH de menos de 5.0.

Además de la lluvia ácida, uno puede experimentar la nieve ácida en regiones más frías y una niebla ácida, con valores pH que han llegado a caer a 1.7 en algunas áreas industrializadas.

Recuerde que el agua y el bióxido de carbono en la atmósfera reaccionan para formar ácido carbónico, que se disocia y produce iones de hidrógeno y de bicarbonato. El efecto de esta reacción es que toda la precipitación pluvial es levemente ácida. De tal suerte, la lluvia ácida es resultado directo de la naturaleza autolimpiadora de la atmósfera, o sea, que muchas partículas suspendidas o gases atmosféricos son solubles en el agua y se eliminan de la atmósfera durante las precipitaciones.

Varios procesos naturales, comprendidos el vulcanismo y la actividad de las bacterias de la tierra, introducen gases en la atmósfera causantes de la lluvia ácida. Las actividades humanas, sin embargo, producen tensión atmosférica adicional. Por ejemplo, la quema de combustibles fósiles (nitrógeno, gas natural y carbón

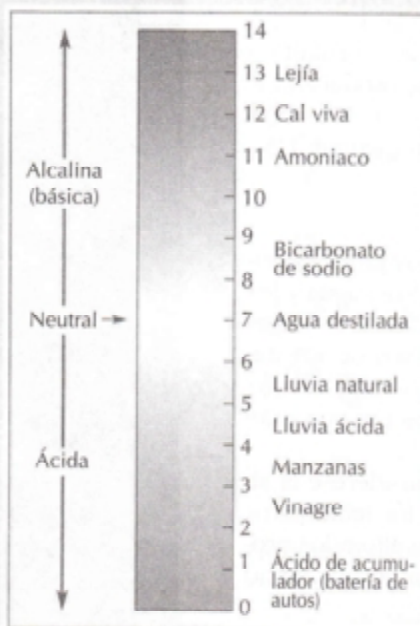


Figura 1 Escala de pH. Los valores menores de 7 son ácidos, mientras que los mayores de 7 son alcalinos. Esta es una escala logarítmica, así que la disminución de una unidad es un incremento de diez veces de acidez.

mineral) ha añadido bióxido de carbono a la atmósfera. El óxido de nitrógeno (NO) de los motores de combustión interna y el bióxido de nitrógeno (NO₂), el cual se forma en la atmósfera a partir del NO, reaccionan para generar el ácido nítrico (HNO₃). Aunque los gases de bióxido de carbono y de nitrógeno contribuyen a la lluvia ácida, el culpable mayor es el bióxido de azufre (SO₂), emitido principalmente por la quema de carbón mineral que contiene azufre. Una vez en la atmósfera, el bióxido de azufre reacciona con el oxígeno para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄), que es el componente principal de la lluvia ácida.

El fenómeno de la lluvia ácida fue descubierto en Inglaterra por Robert Angus Smith en 1872, alrededor de un siglo después del comienzo de la Revolución Industrial. Sin embargo, fue desde 1961 cuando la lluvia ácida vino a convertirse en preocupación ambiental pública. Entonces se entendió cabalmente que la lluvia ácida es corrosiva e irritante, mata la vegetación

de superficie. A partir de ese año, los efectos de la lluvia se han reconocido en Europa, especialmente en Europa Oriental donde se quema mucho carbón mineral; en el este de Estados Unidos y el sureste de Canadá (figura 2). En el curso de los últimos diez años, los países desarrollados han hecho esfuerzos por reducir el efecto de la lluvia ácida; en Estados Unidos, la Clean Air Act (Ley de Aire Limpio) de 1990 delineó medidas específicas para reducir las emisiones de contaminantes que causan la lluvia ácida.

Las áreas más afectadas por la lluvia se hallan invariablemente a barlovento de las plantas de energía que queman carbón o de otras industrias emisoras de gases azufrosos. Las plantas químicas y fundidoras (en las cuales se refinan minerales metálicos) descargan grandes cantidades de gases azufrosos y otras sustancias, como metales pesados. El efecto de la lluvia ácida en estas áreas puede ser modificado por la geología existente. Si en un área hay subsuelos alcalinos o de piedra caliza, por ejemplo, la lluvia ácida tiende a ser neutralizada por la roca caliza o por la tierra. Por otra parte, las áreas con subsuelo de granito, son ácidas para empezar y causan poco o nulo efecto en las lluvias.

Las consecuencias de la lluvia ácida varían. Los lagos pequeños se vuelven más ácidos al perder la capacidad de neutralizar la precipitación pluvial ácida. A medida que aumenta la acidez en los lagos desaparecen varios tipos de organismos y, en algunos casos, parecen todas las formas de vida. La lluvia ácida es causa también del aumento del intemperismo de la roca caliza y el mármol (recuerde que ambos son solubles en ácidos débiles) y, en menor grado, de la roca arenisca. Tales efectos son particularmente visibles en los edificios, monumentos y lápidas; un ejemplo notable es el Parque Militar Nacional de Gettysburg, en Pennsylvania, situado en un área que recibe lluvias

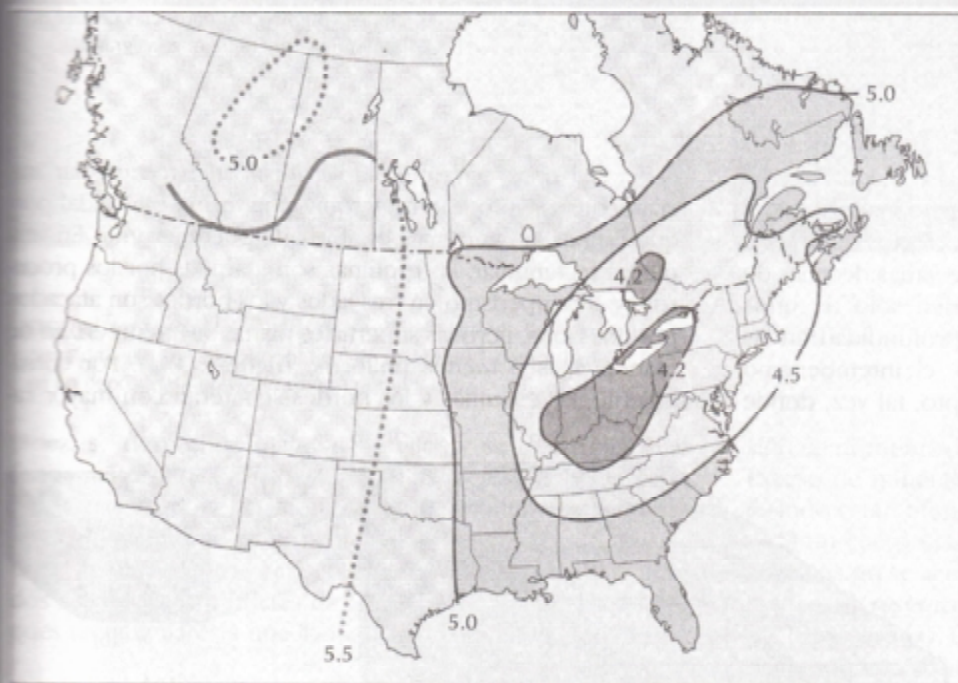


Figura 2 Valores pH promedio de lluvia y nieve en Estados Unidos y Canadá. El área abarcada por una línea tiene un valor pH igual o menor que el asignado a la línea.

Aun cuando los efectos sobre la vegetación en las áreas inmediatas a las industrias que emiten gas azufroso son patentes, hay gente que ha dudado de que la lluvia ácida repercuta tanto sobre bosques y plantíos distantes de esas fuentes. No obstante, muchos bosques en el este de Estados Unidos muestran señales de deterioro que no pueden atribuirse a otras causas. En la Selva Negra alemana, las agujas de los pinos y abetos se ponen amarillas y se caen.

En la actualidad, se emiten anualmente cerca de 20 millones de toneladas de dióxido de azufre a la atmósfera en Estados Unidos, procedentes sobre todo de las plantas generadoras de energía que queman carbón. Las plantas de energía construidas antes de 1975 no tienen controles de emisión y es preciso ejercer acción sobre ellas para que se reduzcan las emisiones a un nivel aceptable. La forma más efectiva

de reducir las emisiones de estas plantas antiguas es la desulfuración del gas de conductos (FGD, flue-gas desulfurization), proceso que elimina hasta el 90% del dióxido de azufre de los gases de escape. No obstante, la FGD tiene desventajas. Una de ellas es sencillamente que algunas plantas son demasiado viejas para ser actualizadas de manera rentable; la fundidora de cobre Phelps Dodge, de 85 años de edad, en Douglas, Arizona, cerró en 1987 por esta razón. Entre otros problemas de la FGD están la eliminación de los desechos azufrosos, la falta de control de las emisiones de nitrógeno y la eficiencia disminuida de las plantas de energía, que deben quemar un mayor porcentaje de carbón mineral.

Otras formas de controlar las emisiones incluyen la conservación de la electricidad; cuanto menos electricidad se use más baja será la emisión de contaminantes. El gas

natural prácticamente no contiene azufre, pero la conversión a esta fuente alterna de energía requeriría la instalación de costosos nuevos hornos en las plantas existentes.

La lluvia ácida es un problema global que ignora las fronteras nacionales. Los vientos pueden acarrear los contaminantes de la fuente de un país a otro, donde se dejan sentir los efectos. Las naciones desarrolladas tienen los recursos para reducir las emisiones, pero muchas naciones subdesarrolladas no pueden costear tal cosa. Más aún, muchos países sólo disponen de carbón mineral con alto contenido de azufre y no pueden permitirse el costo de la instalación de dispositivos de FGD. Con todo, la lluvia ácida sólo puede controlarse mediante la cooperación de todas las naciones que contribuyen al problema.

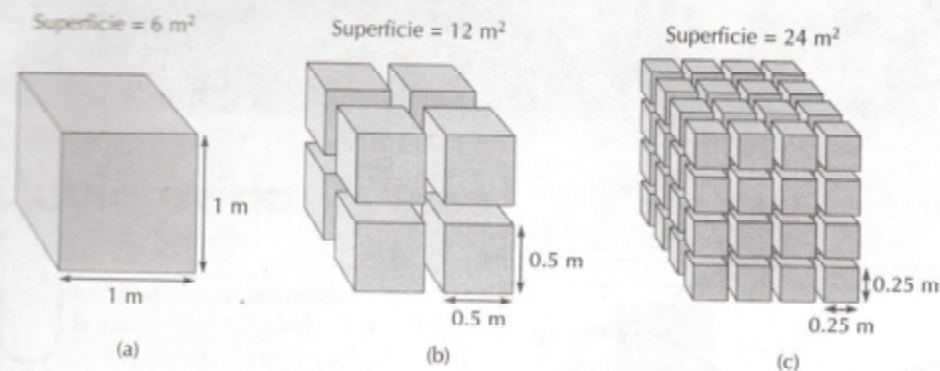


FIGURA 6.12 El tamaño de la partícula y el intemperismo químico. Conforme la roca se reduce a partículas cada vez menores, su superficie crece, pero su volumen se mantiene igual. En a) la superficie es de 6 m², en b) de 12 m² y en c) de 24 m², pero el volumen sigue siendo el mismo: 1 m³. En proporción con su volumen, las partículas pequeñas tienen más superficie que las grandes.

mientras las tasas de evaporación son bajas. Añádase a esto que la vegetación y la vida animal son mucho más abundantes en los trópicos. En consecuencia, los efectos del intemperismo se extienden a profundidades de varias decenas de metros, pero por lo común se extienden sólo de unos centímetros a unos cuantos metros de profundidad en las regiones áridas y árticas. Sin embargo, el intemperismo químico prosigue en todas partes, excepto, tal vez, donde los materiales de la Tierra están permanentemente congelados.

MATERIAL ORIGINAL

Algunas rocas son químicamente más estables que otras y no se alteran con igual rapidez por los procesos químicos. La roca metamórfica cuarzita, compuesta de cuarzo, es una sustancia en extremo estable y se altera muy lentamente en comparación con la mayoría de otros tipos de rocas. En cambio, una roca como el basalto, que contiene grandes cantidades de plagioclasa rica en calcio y piroxenos, se descompone con rapidez porque estos minerales son químicamente inestables. De hecho, la estabilidad de los minerales comunes es precisamente lo contrario de su orden de cristalización en la serie de reacciones de Bowen (tabla 6.1). Los minerales formados al final en esta serie son químicamente estables, mientras que los conformados primero son alterados fácilmente por los procesos químicos.

Una manifestación del intemperismo químico es el intemperismo esferoidal (figura 6.13). En el intemperismo

esferoidal una roca, aunque sea de forma rectangular inicialmente, se intemperiza y toma una forma esferoidal porque ésta es la figura más estable que puede asumir. En una piedra rectangular, las esquinas son atacadas por los procesos de intemperismo en tres lados y los bordes son atacados por dos lados, pero las superficies planas se intemperizan de manera más o menos uniforme (figura 6.13a). Por consiguiente, las esquinas y los bordes se alteran con mayor ra-

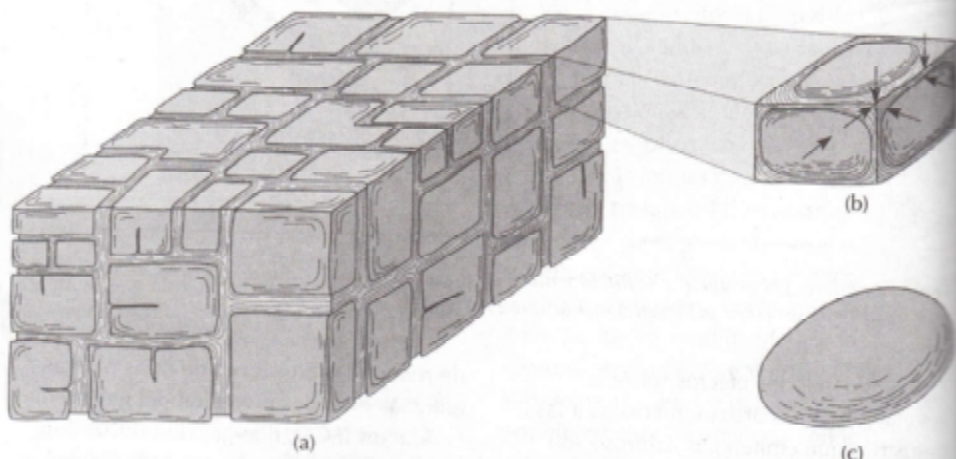


FIGURA 6.13 Intemperismo esferoidal. a) Los bloques rectangulares delineados por juntas son atacados por procesos de intemperismo químico, b) pero las esquinas y los bordes se intemperizan con mayor rapidez. c) Cuando un bloque se ha intemperizado al grado de hacerse esférico, su superficie entera se intemperiza uniformemente y ya no hay más cambios de forma. d) Intemperismo esferoidal de granito en la Costa Nacional de Punta Reyes (Point Reyes), en California.

TABLA 6.1

Estabilidad de los minerales de silicato

SILICATOS FERROMAGNESIANOS	SILICATOS NO FERROMAGNESIANOS
Olivino	Plagioclasa cálcica
Piroxeno	Plagioclasa sódica
Anfíbol	Feldespato potásico
Biotita	Muscovita
	Cuarzo



(b)

FIGURA 6.14 a) Suelo residual desarrollado sobre un lecho rocoso cerca de Denver, Colorado. b) Suelo transportado, desarrollado en un depósito de polvo arrastrado por el viento.

pedez, se desprende material de ellos y se desarrolla una forma más esférica. Una vez que se ha creado la forma esférica, todas las superficies se intemperizan al mismo ritmo.

El intemperismo esferoidal se observa a menudo en los cuerpos de roca granítica cortados por fracturas. Los fluidos siguen las superficies de la fractura y reducen los bloques rectangulares a una forma esférica (figura 6.13d).

Suelo

EN la mayoría de los lugares la superficie del terreno está cubierta por una capa de **regolito**, que consiste en roca no consolidada y fragmentos minerales. El regolito puede estar integrado por cenizas volcánicas, sedimentos depositados por el viento, los arroyos o los glaciares, o material de roca intemperizado que se creó en ese lugar como residuo. Parte del regolito constituido por material intemperizado, agua, aire y materia orgánica capaz de alimentar a las plantas se reconoce como **suelo**.

Una buena tierra fértil para la jardinería o el cultivo consiste aproximadamente en un 45% de material de roca intemperizado, que comprende arena, limo y arcilla, pero otro constituyente esencial es el **humus**. Muchos suelos son de color oscuro por el humus derivado de descomposición bacteriana de la materia orgánica. Éste contiene más carbono y menos nitrógeno que el material original y es resistente a mayor descomposición bacteriana. Aunque un suelo fértil puede contener sólo una pequeña cantidad de humus, éste es una fuente esencial de nutrientes para las plantas y mejora la retención de la humedad.

Algunos materiales intemperizados en los suelos son simplemente granos de mineral del tamaño de la arena y el limo, en especial granos de cuarzo, pero también pueden hallarse presentes otros materiales intemperizados. Estas partículas sólidas son importantes porque mantienen separadas las partículas de tierra, y ello permite que el oxígeno y el agua circulen más libremente. Los minerales arcillosos son, asimismo, constituyentes importantes de los suelos y ayudan con la retención del agua, así como con la provi-

sión de nutrientes a las plantas. Sin embargo, los suelos con exceso de minerales arcillosos drenan mal; son pegajosos cuando están húmedos y duros cuando están secos.

Si un cuerpo de roca se intemperiza y el residuo del intemperismo se acumula sobre ella, el suelo formado de esta manera es **residual**, lo cual significa que se formó en el lugar (figura 6.14a). En cambio, el suelo **transportado** se desarrolla sobre material intemperizado que ha sido erosionado y acarreado del lugar de intemperismo y depositado en otra parte, como en un llano aluvial de un arroyo o río. Muchas tierras fértiles del valle del río Mississippi y del noroeste del Pacífico se desarrollaron en depósitos del polvo arrastrado por el viento llamado **loess** (figura 6.14b).

Perfil del suelo

LOS procesos de formación del suelo comienzan en la superficie y trabajan hacia abajo, de este modo la capa superior de la tierra sufre más alteraciones por el material original que los estratos bajos. Visto en corte transversal-vertical, un suelo consiste en capas distintas u **horizontes de suelo**, que difieren uno de otro en textura, estructura, com-

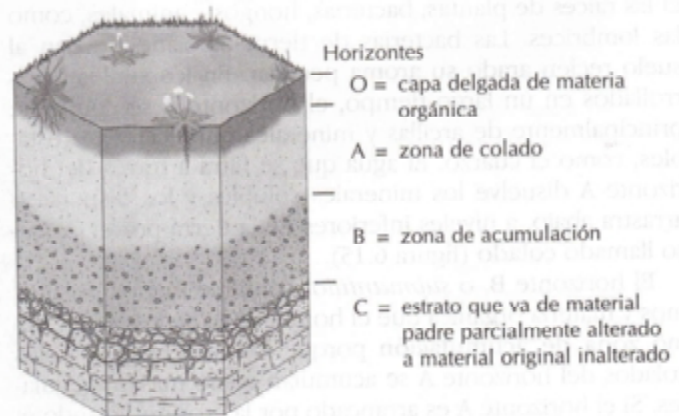


FIGURA 6.15 Horizontes del suelo en un suelo completamente desarrollado o maduro.