

CAPÍTULO

# 6 Intemperismo, erosión

## *Esquema*

PRÓLOGO

INTRODUCCIÓN

INTEMPERISMO MECÁNICO

Acción de congelamiento  
Liberación de presión  
Expansión y contracción térmica  
Crecimiento de cristales de sal  
Actividad de organismos

INTEMPERISMO QUÍMICO

Solución  
Oxidación  
Hidrólisis

FACTORES QUE CONTROLAN EL RITMO  
DE INTEMPERISMO QUÍMICO

Tamaño de la partícula  
Clima  
PERSPECTIVA 6.1: Lluvia ácida  
Material original

Clima  
Material original  
Actividad orgánica  
Relieve y pendiente  
Tiempo

SUELO

PERFIL DEL SUELO

DEGRADACIÓN DEL SUELO

## Prólogo

**N**orteamérica tiene muchas áreas de excepcionales paisajes que fueron moldeados por diversos procesos geológicos, como el vulcanismo, la glaciación, la erosión de litorales y la deformación. Pero, ciertamente, algunos de los ejemplos más asombrosos de paisajes creados por los efectos combinados del intemperismo y la erosión se encuentran en el Parque Nacional del Cañón de Bryce, en Utah, y en el Parque Nacional de Badlands, en Dakota del Sur. En ambos casos, las rocas de brillantes colores han sido intrincadamente esculpidas para formar laberintos de zanjas interconectadas y una diversidad de accidentes de extrañas formas. Desde Alberta, Canadá, hasta Arizona se pueden ver localidades dispersas de características similares.

El intemperismo es un fenómeno que todo lo penetra y causa la alteración de los materiales de la Tierra por medio de procesos físicos y químicos. Sin embargo, sus efectos no se distribuyen de igual manera, porque las rocas no son uniformes en su resistencia a los cambios inducidos por el intemperismo. Según esto, las partes de una masa de roca pueden alterarse con mayor rapidez que áreas adyacentes de la misma roca. De manera semejante, la erosión que acarrea y transporta a los materiales intemperizados puede proceder desigualmente, produciendo así superficies irregulares.

Los Badlands (parámos escarpados) se forman en áreas secas con escasa vegetación y formaciones rocosas casi impenetrables, aunque fácilmente erosionables. La lluvia que cae sobre esas rocas desprotegidas corre rápidamente y diseña de intrincada



El intemperismo y la erosión de las rocas sedimentarias son responsables del escenario en el Parque Nacional del Cañón de Bryce, en Utah. (Foto cortesía de Frank Hanna.)

y

suelo



(a)



(b)

**FIGURA 6.1** Afloramientos de rocas en el Parque Nacional Badlands, Dakota del Sur. a) El intemperismo y la erosión de la Formación Brule (en el horizonte) producen numerosas zanjas estrechamente espaciadas y laderas angulosas y afiladas, mientras que en la Formación Chadron crean laderas suavemente redondeadas (primer plano). b) Las franjas de diferentes tonos son característica distintiva de algunas rocas del parque.

manera la superficie, creando numerosas zanjas pequeñas y estrechamente espaciadas, así como profundas cañadas, separadas por laderas escarpadas y afiladas crestas y picachos.

Las rocas del Parque Nacional del Cañón de Bryce se describen comúnmente como rocas sedimentarias limolitas calcáreas, lo cual significa que se componen de partículas de tamaño sedimentario ( $1/256$  a  $1/16$  de mm), en las que la calcita actúa como un cemento en los espacios entre granos. Algunas capas, sin embargo, se componen principalmente de calcita y son, por ende, variedades de roca caliza. Colectivamente, las rocas se designan con el nombre de Formación Wasatch, la cual se depositó en su mayor parte en un lago hace 40 a 50 millones de años, pero fue levantada subsecuentemente a lo largo de una gran fractura y forma ahora los Pink Cliffs (Peñascos rosados).

Las rocas del Cañón de Bryce están entre las que tienen colores más brillantes en el mundo. Los Piute o Paiute (pueblo nativo americano) decían de la zona que eran "rocas rojas erguidas como hombres en un cañón torcido". El Cañón de Bryce no es realmente un cañón, más bien es la margen oriental erosionada de un área alta bastante plana conocida como la Meseta Pansaugunt.

En cualquier caso, las rocas responden de manera diferente a los efectos del intemperismo y la erosión produciendo así el espectacular ejemplo

de páramo escarpado (véase la fotografía que abre el capítulo). Por ejemplo, las capas de roca caliza son más duras y resistentes que otros estratos sedimentarios, y tanto el intemperismo como la erosión tienden a concentrarse a lo largo de numerosas fracturas separadas por estrechos espacios. El resultado es el origen de escarpes, pilares, monumentos, arcos, peñascos rizados, zanjas y cañadas.

El intemperismo y erosión de la Formación Brule en el Parque Nacional Badlands ha proporcionado, asimismo, un ejemplo excelente de badlands o páramo escarpado, en tanto que la Formación Chadron subyacente responde de forma diferente a los mismos procesos y forma laderas suavemente redondeadas (figura 6.1). Todas estas rocas se depositaron originalmente como sedimentos en los cauces de los arroyos, en sus llanuras aluviales adyacentes y en pequeños lagos. Con todo, diferencias sutiles en las dos formaciones dan cuenta de sus respuestas distintas al intemperismo y la erosión. La Formación Brule tiene más arcilla y cemento químico que mantiene unidas las partículas, así que sobre su superficie se erosiona una complicada red de pequeños canales. En cambio, en la Formación Chadron, que tiene menos arcilla y cemento, el agua se filtra más fácilmente y la canalización es rara.

Los badlands o páramos escarpados de Dakota del Sur son una buena razón para visitar el

parque, pero éste tiene más que ofrecer, pues las rocas contienen muchos fósiles de mamíferos terrestres. El Servicio de Parques de Estados Unidos (U.S. Park Service) ha dejado algunos de estos mamíferos fósiles expuestos, pero protegidos, para que puedan ser vistos por los visitantes del parque. Entre los mamíferos hay roedores, carnívoros caniformes, felinos de dientes de sable, camellos, caballos y mamíferos ungulados extintos conocidos como titanoterios y oreodontes.

En ambos ejemplos, los efectos combinados del intemperismo y la erosión son los responsables de los espectaculares paisajes. No obstante, uno a veces topa con el comentario de que la erosión del viento ha desempeñado un papel especial en el Cañón de Bryce. El viento puede ser un efectivo agente geológico en algunas áreas, pero su papel en la modificación de la superficie de la Tierra comúnmente se exagera; en el caso del Cañón de Bryce y de los Parques Nacionales Badlands, su impacto ha sido mínimo.

## Introducción

LA destrucción física (desintegración) y la alteración química (descomposición) de las rocas y minerales en la superficie de la Tierra o cerca de ella se conoce como **intemperismo**; comprende procesos por los cuales las rocas y minerales son alterados física y químicamente, de modo que se acercan más al equilibrio con un nuevo conjunto de condiciones ambientales. Muchas rocas se forman dentro de la corteza, donde no hay oxígeno y agua, o hay poco de ambos, y donde las temperaturas y/o las presiones son altas. En la superficie o cerca de ella, las rocas están expuestas tanto a bajas temperaturas como a presiones y son atacadas por los gases atmosféricos, el agua, los ácidos y los organismos.

Los geólogos se interesan por el fenómeno del intemperismo porque es parte esencial del ciclo de las rocas (véase la figura 1.12). El **material original**, o la roca que se está intemperizando, se desmenuza en pedazos menores y algunos de sus constituyentes minerales se disuelven o alteran y son eliminados del sitio de la erosión. A la eliminación de los materiales intemperizados se le conoce como **erosión**. El agua corriente, el viento o los glaciares generalmente **transportan** los materiales intemperizados a otra parte, donde los depositan como sedimento, el cual puede convertirse en roca sedimentaria. Ya sean erosionados o no, los materiales de la roca intemperizada pueden modificarse aún más para formar el suelo. De tal suerte, el intemperismo provee las materias primas tanto para las rocas sedimentarias como para la tierra; también es importante en el origen de algunos recursos minerales, como los minerales de aluminio, y es responsable del enriquecimiento de otros depósitos de importancia económica.

El intemperismo es un fenómeno tan penetrante que mucha gente lo da por hecho o lo pasa por alto completamente. No obstante, jamás cesa, aunque su ritmo y efectos varían de un área a otra o incluso dentro de un mismo espacio. Las rocas no se intemperizan al mismo ritmo, aun dentro de una misma capa de roca, debido a ligeras diferencias en su composición y estructura. Por ejemplo, es más intenso el intemperismo en las fracturas que en las zonas adyacentes de roca no fracturada. Como resultado de estas variaciones tiene lugar un **intemperismo diferencial**, lo cual significa que las rocas se intemperizan a diferentes ritmos produciendo superficies desiguales y formas peculiares (figura 6.2) (véase el Prólogo).

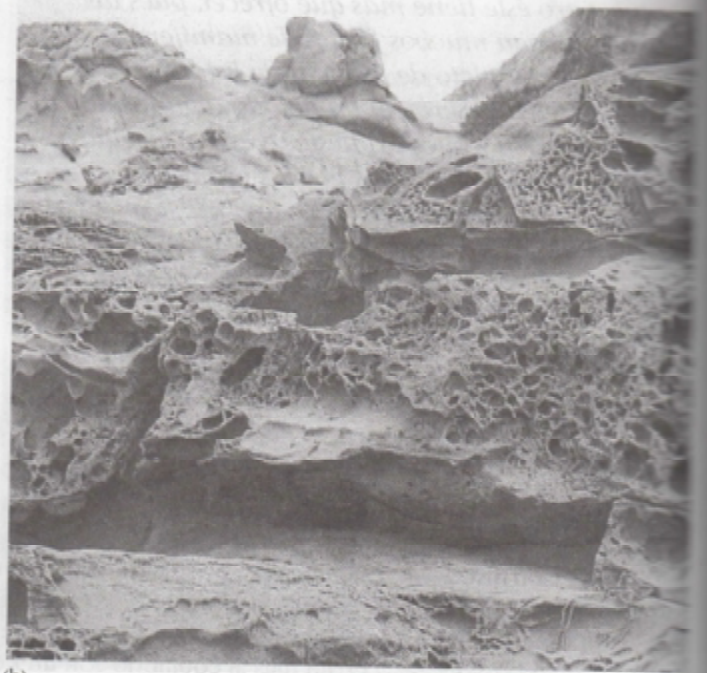
Se reconocen dos tipos de intemperismo, el mecánico y el químico. Ambos actúan simultáneamente en el sitio de intemperismo, durante la erosión y el transporte, e incluso en los ambientes donde se depositan los materiales intemperizados.

## Intemperismo mecánico

EL **intemperismo mecánico** tiene lugar cuando las fuerzas físicas rompen o desmenuzan los materiales de la roca en pedazos más pequeños, que retienen la composición química del material original. El granito, por ejemplo, puede intemperizarse mecánicamente y producir pedazos más pequeños de granito, o su desintegración puede liberar granos minerales individuales (figura 6.3). Los procesos físicos responsables del intemperismo mecánico comprenden la congelación, la liberación de presión, la expansión y contracción térmica, el crecimiento del cristal salino y la actividad de los organismos.



(a)



(b)

**FIGURA 6.2** El intemperismo diferencial ha producido estas extrañas formas y superficies. a) Camel Rock (Roca Camello), cerca de Santa Fe, Nuevo México. b) Esta intrincada, desigual alteración de la superficie en Peeble Beach, California, es un ejemplo de intemperismo de panal. (Foto cortesía de Sue Monroe.)

## ACCIÓN DE CONGELAMIENTO

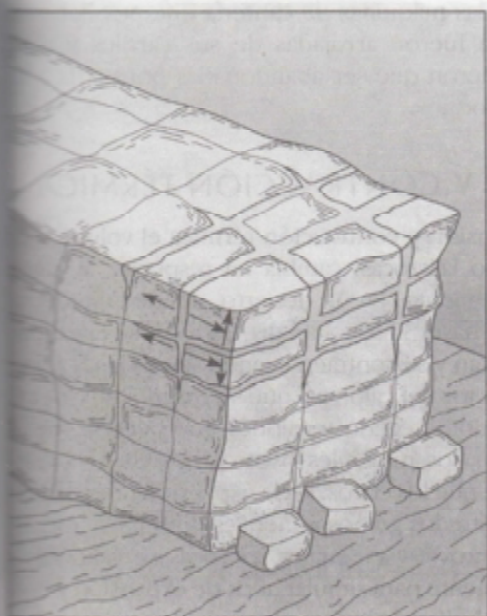
La acción de congelamiento implica el repetido congelamiento y fusión del agua en grietas y huecos de las rocas. Cuando el agua se cuele en una grieta y se congela, se expande alrededor de 9% y ejerce gran fuerza contra las paredes de la misma, ensanchándola y alargándola mediante el **acuñamiento por congelación**. Debido a las numerosas congelaciones y fusiones, los pedazos de roca acaban por desprenderse del material original (figura 6.4). El acuña-

miento por congelación es particularmente efectivo si la grieta es intrincada porque, cuando es una simple abertura en forma de cuña, gran parte de la fuerza de expansión se libera hacia la superficie. Los desechos que produce el acuñamiento por congelación en las montañas casi siempre se acumulan como grandes conos de **talud detrítico** que se quedan en las bases de las laderas (figura 6.5).

La acción de congelamiento es más eficaz en áreas donde las temperaturas fluctúan por encima y debajo del grado de congelación, como en las altas montañas del oeste de Estados Unidos y Canadá. En los trópicos y en áreas donde el agua está permanentemente congelada, la acción de congelamiento es de escasa o nula importancia.

**FIGURA 6.3** Granito intemperizado mecánicamente. El material arenoso consiste en pequeños pedazos de granito (fragmentos de roca) y minerales como el cuarzo y el feldespato liberados del material original.





**FIGURA 6.4** El acuañamiento por congelación ocurre cuando el agua se cuela por las grietas y se expande al congelarse. El repetido congelamiento y fusión alaja y desprende los pedruzcos angulares de las rocas.



**FIGURA 6.5** Talud detrítico en las montañas Bighorn, en Wyoming.

En el fenómeno conocido como **levantamiento por congelación**, una masa de sedimento o suelo sufre congelamiento, expansión y levantamiento real, seguido de la fusión, la contracción y el descenso de la masa. El levantamiento por congelación es particularmente evidente donde el agua se congela debajo de carreteras y aceras.

### LIBERACIÓN DE LA PRESIÓN

El proceso de intemperismo mecánico llamado **liberación de presión** se manifiesta de modo especial en las rocas que se formaron como cuerpos intrusivos profundamente enterrados, como los batolitos, pero tiene lugar también

en otros tipos de rocas. Cuando se forma un batolito, el magma se cristaliza bajo tremenda presión (el peso de la roca suprayacente) y es estable bajo estas condiciones de presión. Pero si el batolito se levanta y la roca suprayacente se erosiona, la presión se reduce. Sin embargo, la roca contiene energía liberada por la expansión y por la formación de **juntas laminares**, grandes fracturas que corren más o menos paralelas a la superficie de la roca (figura 6.6). Las losas de roca pegadas por juntas laminares pueden deslizarse, resbalar o desprenderse de la roca huésped —proceso llamado **exfoliación**— y acumularse como talud detrítico. Los grandes domos de roca redondeados que resultan de este proceso son **domos de exfoliación**;



**FIGURA 6.6** Juntas laminares en granito en la Sierra Nevada de California.

se pueden ver ejemplos de ellos en el Parque Nacional Yosemite, en California, y en la Montaña Stone (Piedra), en Georgia (figura 6.7).

El hecho de que la roca sólida pueda expandirse y producir fracturas es un fenómeno bien conocido. En las minas profundas se desprenden repentinamente masas de roca de los costados de la excavación, a menudo con violencia explosiva. Se han registrado ejemplos espectaculares de estos desprendimientos de roca en minas profundas, donde estos fenómenos y otros afines, como el menos violento *poping* (salto o proyección de un fragmento de roca con estampido), plantean peligro a los mineros. En Sudáfrica unos 20 mineros mueren cada año por los desprendimientos de rocas.

En algunas operaciones en cantera\*, la eliminación de los materiales de superficie a una profundidad de sólo 7 u 8 m ha llevado a la formación de juntas laminares en la roca subyacente (figura 6.8). En unas canteras en Vermont y Tennessee la excavación del mármol expuso rocas que fueron enterradas anteriormente bajo gran presión. Cuando fue extraída la roca suprayacente, el mármol se expandió y se formaron juntas laminares. Algunas losas de roca que estaban próximas a las juntas laminares reventaron tan vio-

\* Una cantera es una excavación de superficie, por lo común a cielo abierto, que suele hacerse para la extracción de rocas para la construcción.

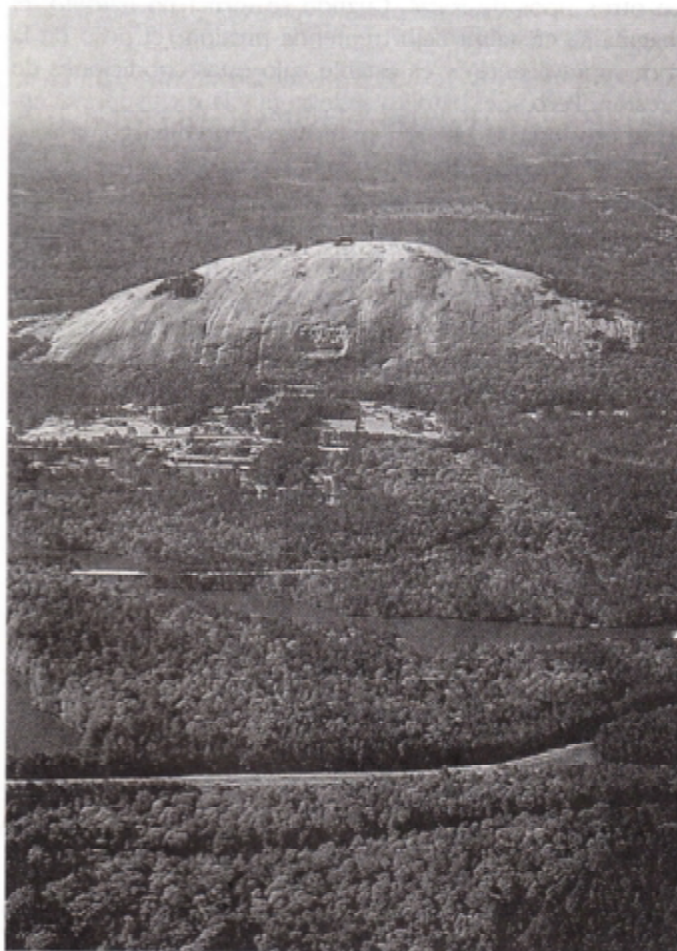


FIGURA 6.7 La Montaña Stone (Piedra), en Georgia, es un gran domo de exfoliación.

lentamente que las máquinas de cantería que pesaban más de una tonelada fueron arrojadas de sus carriles y algunas canteras tuvieron que ser abandonadas porque la fractura inutilizó la roca.

## EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN TÉRMICA

Durante la **expansión y contracción térmica** el volumen de los sólidos, como las rocas, cambia en respuesta al calentamiento y enfriamiento. En un desierto, donde la temperatura puede variar hasta 30 °C en un día, las rocas se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. La roca es un mal conductor del calor, así que su exterior se calienta más que su interior, creando tensiones que pueden causar fractura. Más aún, los minerales oscuros absorben el calor más rápidamente que los claros; así la expansión diferenciada ocurre incluso entre los granos minerales de algunas rocas.

Los experimentos en los cuales las rocas se calientan y enfrían repetidamente para simular años de expansión y contracción térmica, indican que ésta no es un agente importante de intemperismo mecánico. Sin embargo, la expansión y contracción térmica puede ser un proceso importante de intemperismo mecánico en la Luna, donde los cambios extremos de temperatura ocurren rápidamente.

La variación diaria de temperatura es la causa más común de la expansión y la contracción alternadas, pero estos cambios tienen lugar en periodos de horas. El fuego puede causar una expansión muy rápida. Durante un incendio forestal, las rocas pueden calentarse aceleradamente, en especial cerca de la superficie, porque son malas conductoras del calor. La capa de la superficie calentada se expande más velozmente que el interior y pueden despegarse delgadas hojas paralelas a la superficie de la roca.

## CRECIMIENTO DE CRISTALES DE SAL

En iguales circunstancias, los cristales de sal que se forman de una solución pueden causar la disgregación de las rocas. Los cristales crecientes ejercen la fuerza suficiente para ensanchar las grietas y cavidades o desalojar partículas en rocas porosas y granulares, como la roca arenisca. Aun en rocas cristalinas, como el granito, el crecimiento de cristales de sal puede aflojar los granos minerales individuales. En la medida en que el **crecimiento de cristales de sal** produce fuerzas expansivas en las aberturas de las rocas, es semejante al acuñaamiento por congelación. La mayor parte del crecimiento del cristal ocurre en las áreas áridas calientes, aunque probablemente también afecte a las rocas en algunas regiones costeras.

## ACTIVIDAD DE ORGANISMOS

Los animales, las plantas y las bacterias participan, todos ellos, en la alteración tanto mecánica como química de las rocas. Los animales horadadores, como los gusanos, reptiles, roedores y muchos otros, mezclan continuamente la tierra y las partículas sedimentarias, llevando material de la profundidad a la superficie, donde puede haber más intemperismo. Incluso los materiales ingeridos por los gu-



**FIGURA 6.8** Juntas laminares formadas por expansión en el granito de monte Airy, Carolina del Norte. (Foto cortesía de W. D. Lowry.)

anos o lombrices se reducen todavía más de tamaño; las perforaciones hechas por estos animales permiten que los gases y el agua tengan acceso más fácil a mayores profundidades. Las raíces de las plantas, en especial de los árboles y grandes arbustos, se insertan como cuñas en las grietas de las rocas ensanchándolas más (figura 6.9).

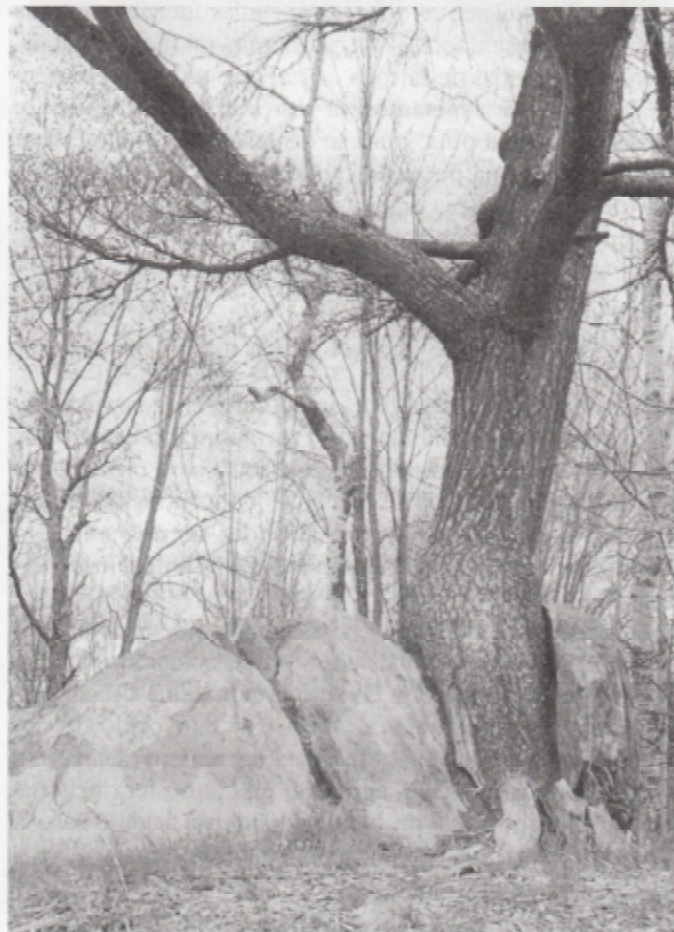
### Intemperismo químico

El intemperismo químico es el proceso mediante el cual los componentes de las rocas se descomponen por alteración química del material original. Varios minerales arcillosos, por ejemplo, se forman como producto de la alteración química de otros minerales. Algunos minerales se descomponen por completo durante el intemperismo químico, pero otros, que son más resistentes, se liberan simplemente del material original. El intemperismo químico es efectuado por la acción de los gases atmosféricos, en especial el oxígeno, el agua y los ácidos. Los organismos también tienen una importante función en el intemperismo químico. Las rocas con líquenes (organismos compuestos constituidos por hongos y algas) sufren mayor alteración química que las rocas libres de ellos. Las plantas eliminan iones del agua del suelo y reducen la estabilidad química de los minerales, ya que sus raíces sueltan ácidos orgánicos.

### SOLUCIÓN

Durante la **solución**, los iones de una sustancia se separan en un líquido y la sustancia sólida se disuelve. El agua es un notable solvente porque la forma de sus moléculas es asimétrica: constan de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno dispuestos de modo que el ángulo entre los dos hidrógenos es de unos 104 grados (figura 6.10). Debido a esta asimetría, el extremo del oxígeno de la molécula retiene una carga eléctrica ligeramente negativa, mientras que el extremo del hidrógeno retiene una carga ligeramente positiva. Cuando una sustancia soluble como la halita mineral (NaCl) entra en contacto con una molécula de agua, los iones de

sodio cargados positivamente son atraídos al extremo negativo de la molécula de agua y los iones de cloruro cargados negativamente son atraídos al extremo cargado positivamente de la molécula de agua (figura 6.10). De este modo, los iones son liberados de la estructura del cristal y el sólido se disuelve.



**FIGURA 6.9** Contribución de los organismos al intemperismo mecánico. Las raíces de los árboles agrandan las grietas de las rocas.