



**FIGURA 8.11** El gneis se caracteriza por bandas de segregación de minerales claros y oscuros. Este gneis plegado está expuesto cerca de Wawa, Ontario, Canadá.

gneises se componen principalmente de minerales granulares, como el cuarzo y/o el feldespato con porcentajes menores de minerales laminados o alargados como las micas o los anfíboles. El cuarzo y el feldespato son los principales minerales de color claro, mientras que la biotita y la hornblenda son los minerales típicos de color oscuro. De manera característica, el gneis se rompe en forma irregular, de modo muy semejante a las rocas no foliadas toscas y cristalinas.

La mayoría de los gneises resultan probablemente de la recristalización de rocas sedimentarias ricas en arcilla durante el metamorfismo regional (tabla 8.2). El gneis se puede formar también de rocas ígneas, como el granito, o rocas metamórficas más antiguas.

Otra roca metamórfica foliada bastante común es la *anfíbolita*. Esta roca oscura se compone principalmente de hornblenda y plagioclasa. La alineación de los cristales de la hornblenda produce una textura ligeramente foliada. Muchas anfíbolitas resultan del metamorfismo de grado medio a alto de rocas ígneas ricas en silicato ferromagnésico, como el basalto.

En algunas áreas de metamorfismo regional, se aprecian exposiciones de "rocas mixtas", que tienen características

tanto ígneas como metamórficas de alto grado. En estas rocas, llamadas *migmatitas*, las bandas o lentes de granito suelen entremezclarse con rocas metamórficas ricas en ferromagnesio de alto grado, lo cual le da una apariencia ondulada a la roca (figura 8.12).

Se cree que la mayoría de las migmatitas son producto de metamorfismo de grado extremadamente alto y se han propuesto diversos modelos acerca de su origen. Parte del problema de determinar el origen de las migmatitas estriba en explicar cómo se formaron los componentes graníticos. De acuerdo con un modelo, el magma granítico se formó en el lugar por la fusión parcial de la roca durante un metamorfismo intenso. Tal origen sería posible siempre y cuando las rocas huéspedes contuvieran cuarzo, feldespatos y que hubiera agua presente. Otra posibilidad es que los componentes graníticos se formaran por la redistribución de los minerales por recristalización en el estado sólido, o sea, por metamorfismo puro.

## ROCAS METAMÓRFICAS NO FOLIADAS

En algunas rocas metamórficas, los granos minerales no muestran una orientación preferencial distinguible. En lugar de esto, tales rocas consisten en un mosaico de minerales de tanto equidimensionales y se caracterizan por tener **textura no foliada** (figura 8.13). La mayoría de las rocas metamórficas no foliadas resultan del metamorfismo de contacto o regional de rocas en las cuales no hay presencia de minerales laminados o alargados. Con frecuencia, la única indicación de que una roca granular se ha metamorfoseado es el gran tamaño de grano resultante de la recristalización. En general, las rocas metamórficas no foliadas son de dos tipos: las compuestas principalmente de sólo un mineral, por ejemplo, el mármol o la cuarcita; y aquellas en que los diferentes granos minerales son demasiado pequeños para ser vistos sin ampliación, como la roca verde y la hornfels.

El *mármol* es una roca metamórfica bien conocida, compuesta principalmente de calcita o de dolomita; su tamaño de grano va de fino a toscamente granular (figura 8.14). El mármol resulta del metamorfismo de contacto o regional de calizas o de dolomías (tabla 8.2). El mármol puro es blanco níveo o azulado, pero hay variedades de

**FIGURA 8.12** Las migmatitas consisten en roca metamórfica de alto grado entremezclada con franjas o lentes de granito. Esta migmatita del Precámbrico (?) está expuesta en Thirty Thousand Islands, de Georgian Bay, lago Hurón, Ontario, Canadá. (Foto de Ed Bartram, cortesía de R. V. Dietrich.)





**FIGURA 8.13** Las texturas no foliadas se caracterizan por un mosaico de minerales un tanto equidimensionales, como se ve en esta fotomicrografía del mármol.

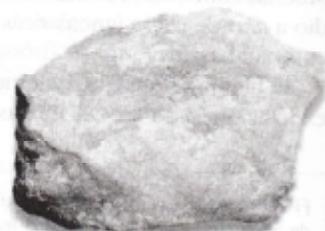
todos colores por la presencia de impurezas minerales en la roca sedimentaria original. La suavidad del mármol, su textura uniforme y sus diversos colores lo han convertido en la roca favorita de los constructores y escultores a lo largo de la historia (véase el Prólogo).

La *cuarcita* es una roca dura y compacta formada de arenisca de cuarzo en condiciones metamórficas de grado medio a alto durante el metamorfismo de contacto o regional (figura 8.15). Como la recristalización es tan completa, la cuarcita metamórfica es de resistencia uniforme y, por ende, al ser golpeada suele romperse a través de los granos de cuarzo componentes, en lugar de alrededor de ellos. La cuarcita pura es blanca, pero el hierro y otras

**FIGURA 8.14** El mármol resulta del metamorfismo de la roca sedimentaria caliza y de la dolomía. (Foto cortesía de Sue Monroe.)



Metamorfismo



**FIGURA 8.15** La cuarcita es producto del metamorfismo de la arenisca de cuarzo. (Foto cortesía de Sue Monroe.)



Metamorfismo



impurezas le imparten comúnmente un tinte rojizo o de otro color. Suele usársela como material de base para lechos de carreteras y vías férreas.

El nombre de *roca verde* se aplica a cualquier roca ígnea máfica alterada, de color verde oscuro, que se forme en condiciones metamórficas de grado bajo a alto. El color verde resulta de la presencia de la clorita, la epidota y la hornblenda.

La *hornfels*, una roca metamórfica no foliada de grano fino, resultante del metamorfismo por contacto, se compone de diversos granos minerales equidimensionales. La composición de la hornfels depende directamente de la composición de la roca original y se conocen muchas variedades composicionales. Sin embargo, la mayoría de las hornfels derivan aparentemente del metamorfismo por contacto de rocas sedimentarias ricas en arcilla o de dolomías impuras.

La *antracita* es carbón mineral negro, lustroso y duro que contiene un alto porcentaje de carbono fijo y un bajo porcentaje de materia volátil. Suele formarse mediante el metamorfismo de carbones minerales de grado bajo por calor y presión; y por ello muchos geólogos la consideran una roca metamórfica.

## Zonas metamórficas

El primer estudio sistemático de las zonas metamórficas fue llevado a cabo a fines del siglo XIX por George Barrow y otros geólogos británicos, quienes trabajaban en los esquistos dalradianos del suroeste de las Highlands escocesas. En este sitio, las rocas sedimentarias ricas en arcilla fueron sometidas a un metamorfismo regional y las rocas metamórficas resultantes pueden dividirse en diferentes zonas, basadas en la presencia de asociaciones distintivas de minerales de silicato. Estas asociaciones minerales, cada una

de las cuales se reconoce por la presencia de uno o más minerales índice, señala diferentes grados de metamorfismo. Los minerales índice que Barrow y sus colaboradores eligieron como representativos de la creciente intensidad metamórfica fueron la clorita, la biotita, el granate, la estaurolita, la cianita y la silimanita (tabla 8.1). Obsérvese que éstos son los minerales metamórficos producidos a partir de las rocas sedimentarias ricas en arcilla. Otras combinaciones de minerales índice son producidas por rocas de composiciones originales diferentes (tabla 8.1).

La aparición sucesiva de minerales índice metamórficos indica intensidad, gradualmente creciente o decreciente de metamorfismo. Yendo de las zonas de grado más bajo a más alto, la primera aparición de un mineral índice particular señala la ubicación de las condiciones de temperatura y presión mínimas necesarias para la formación de ese mineral. Cuando las ubicaciones de las primeras apariciones de ese mineral índice se ubican sobre un mapa, el resultado es una línea de intensidad metamórfica igual, o *isógrada*. La región entre isógradas se conoce como *zona metamórfica*. Tomando en cuenta la aparición de minerales índice metamórficos, los geólogos pueden elaborar un mapa que muestre las zonas metamórficas de un área entera (figura 8.16).

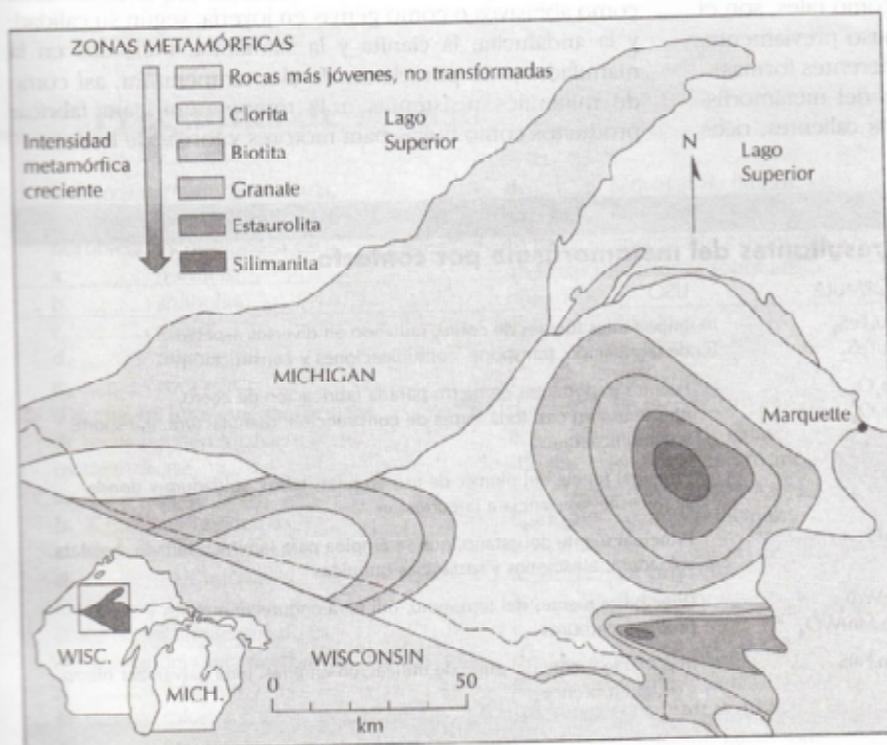
Numerosos estudios de diferentes rocas metamórficas han demostrado que mientras la textura y composición de cualquier roca puede ser alterada por el metamorfismo, la composición química total puede cambiar poco. Así que las diferentes combinaciones que se encuentran en rocas crecientemente metamórficas de alto grado, derivadas de la misma roca original, resultan de cambios en la temperatura y la presión (tabla 8.1).

## Metamorfismo y la tectónica de placas

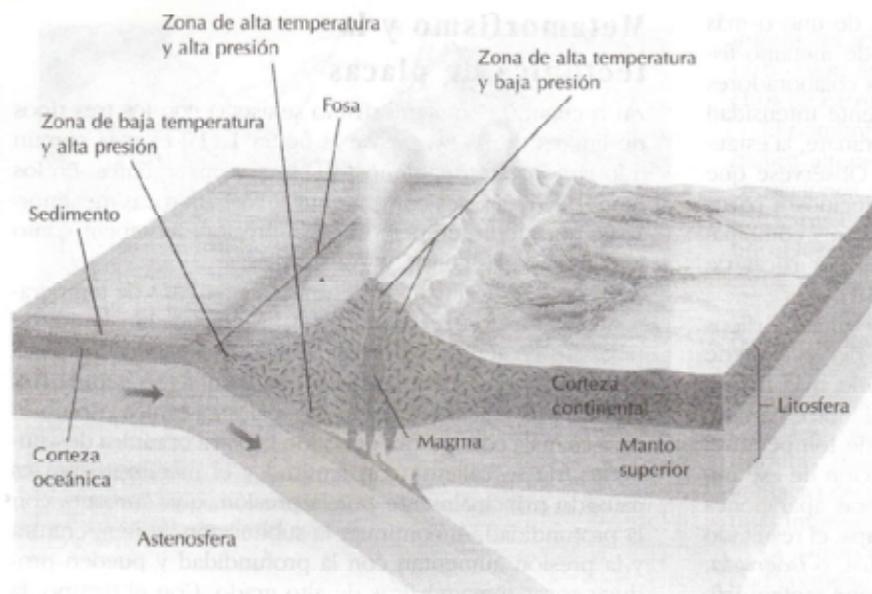
AUN cuando el metamorfismo se asocia con los tres tipos de límites de placas (véase la figura 1.11), es más común a lo largo de las márgenes de placas convergentes. En los límites de una placa convergente se forman rocas metamórficas, porque la temperatura y la presión aumentan como resultado de las colisiones de las placas.

La figura 8.17 ilustra los diversos regímenes de temperatura-presión que se producen a lo largo de un límite de placa convergente oceánico-continental. Cuando una placa oceánica choca con una placa continental, se genera tremenda presión al subducirse la placa oceánica. Como la roca es mala conductora del calor, la placa oceánica descendente fría se calienta con lentitud y el metamorfismo es causado principalmente por la presión, que aumenta con la profundidad. Al continuar la subducción, la temperatura y la presión aumentan con la profundidad y pueden producir rocas metamórficas de alto grado. Con el tiempo, la placa descendente empieza a fundirse y genera un magma que asciende. Este magma ascendente puede alterar la roca circundante por metamorfismo de contacto produciendo migmatitas en las partes profundas de la corteza y hornfels en las zonas de poca profundidad. Tal ambiente se caracteriza por altas temperaturas y presiones baja a media.

Si bien el metamorfismo es más común a lo largo de las márgenes de placas convergentes, muchos límites de placas divergentes se caracterizan por metamorfismo de contacto. El magma ascendente en dorsales mesoocéánicas calienta las rocas adyacentes, produciendo minerales y texturas metamórficas por contacto. Además, en el metamorfismo por



**FIGURA 8.16** Zonas metamórficas en la península Superior de Michigan. Las zonas de esta región se basan en la presencia de combinaciones definidas de mineral de silicato que resultan del metamorfismo de las rocas sedimentarias durante un intervalo de formación de montañas y de intrusión granítica menor en el Eón Proterozoico, hace unos 1500 millones de años.



**FIGURA 8.17** A lo largo de un límite de placa convergente oceánico-continental se producen diversas condiciones de temperatura-presión.

contacto los fluidos que emanan del magma ascendente —y de la reacción del magma y el agua de mar— producen usualmente soluciones hidrotermales que pueden precipitar minerales con valor económico.

## Metamorfismo y recursos naturales

MUCHAS rocas y minerales metamórficos son recursos naturales valiosos. Si bien estos recursos comprenden diversos tipos de depósitos de mineral, las dos rocas metamórficas más familiares y de mayor uso, como tales, son el mármol y la pizarra que, como ya se expuso previamente, se han usado a lo largo de los siglos en diferentes formas.

Muchos depósitos de mineral resultan del metamorfismo de contacto durante el cual los fluidos calientes, ricos

en iones, emigran de las intrusiones ígneas al interior de la roca encajonante, con lo que crean ricos depósitos de mineral. Los minerales de menas de sulfuro más comunes asociados con el metamorfismo por contacto son la bornita, la calcopirita, la galena, la pirita y la esfalerita; dos minerales de óxidos comunes son la hematita y la magnetita. El estaño y el tungsteno son también minerales importantes asociados con el metamorfismo por contacto (tabla 8.3).

Otros minerales metamórficos importantes, desde el punto de vista económico, comprenden el talco, usado para el polvo de esta sustancia; el grafito para los lápices y lubricantes secos; los granates y el corindón, que se usan como abrasivos o como gemas en joyería, según su calidad; y la andalucita, la cianita y la silimanita, utilizados en la manufactura de porcelanas de alta temperatura, así como de minerales resistentes a la temperatura para fabricar productos como bujías para motores y forros de hornos.

**TABLA 8.3**

### Principales depósitos de mineral resultantes del metamorfismo por contacto

DEPÓSITO MINERAL	MINERAL PRINCIPAL	FÓRMULA	USO
Cobre	Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	Importantes fuentes de cobre, utilizado en diversos aspectos de fabricación, transporte, comunicaciones y construcción
	Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	
Hierro	Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Fuentes importantes de hierro para la fabricación de acero, que se usa en casi toda forma de construcción, manufactura, transporte y comunicaciones
	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	
Plomo	Galena	$\text{PbS}$	Principal fuente del plomo, de uso en pilas, tubos, soldadura y donde se necesite resistencia a la corrosión
Estaño	Casiterita	$\text{SnO}_2$	Principal fuente del estaño, que se emplea para lámina estañada, hojalata, soldadura, aleaciones y sustancias químicas
Tungsteno	Scheelita Wolframita	$\text{CaWO}_4$ $(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$	Principales fuentes del tungsteno, útil para endurecer metales y producir carburos
Zinc	Esfalerita	$(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$	Importante fuente del zinc, de utilización en pilas, para galvanizar hierro y producir bronce

## Resumen del capítulo

1. Las rocas metamórficas resultan de la transformación de otras rocas, por lo general, debajo de la superficie de la Tierra, a consecuencia de la acción de un agente o una combinación de tres agentes: calor, presión y actividad de fluidos.
2. El calor para el metamorfismo proviene de los magmas intrusivos o del sepultamiento profundo. La presión es litostática o diferencial. Los fluidos atrapados en rocas sedimentarias o que emanan de magmas intrusivos pueden intensificar los cambios químicos y la formación de nuevos minerales.
3. Los tres tipos principales de metamorfismo son el de contacto, el dinámico y el regional.
4. Las rocas metamórficas se clasifican primordialmente de acuerdo con su textura. En una textura foliada, los minerales laminados tienen una orientación preferida. Una textura no foliada no muestra orientación distinguible alguna de los granos minerales.
5. Las rocas metamórficas foliadas pueden disponerse por orden de tamaño de grano y/o perfección de su foliación. La pizarra es de grano muy fino, seguida de la filita y el esquisto; el gneis despliega bandas segregadas de minerales. La anfibolita es otra roca metamórfica foliada bastante común.
6. El mármol, la cuarcita, la roca verde y la hornfels son rocas metamórficas no foliadas comunes.
7. Las rocas metamórficas pueden estar dispuestas en zonas metamórficas, basadas en las condiciones del metamorfismo.
8. El metamorfismo puede ocurrir a lo largo de los tres tipos de límites de placa, pero lo más común es que se presente en márgenes de placas convergentes.
9. Las rocas metamórficas formadas cerca de la superficie de la Tierra, a lo largo del límite de placa oceánico-continental, resultan de condiciones de baja temperatura y alta presión. Cuando una placa oceánica subducida descendente se somete a temperaturas y presiones cada vez más altas, da por resultado un metamorfismo del grado más alto.
10. Muchas rocas y minerales metamórficos, como el mármol, la pizarra, el grafito, el talco y el asbesto son valiosos recursos naturales.

## Términos importantes

actividad de fluidos

aureola

calor

metamorfismo dinámico

metamorfismo por contacto

metamorfismo regional

mineral índice

presión diferencial

presión litostática

roca metamórfica

textura foliada

textura no foliada

zona metamórfica

## Preguntas de repaso

1. Una roca metamórfica foliada, compuesta principalmente de hornblenda y plagioclasa es:
  - a. hornfels;
  - b. anfibolita;
  - c. gneis;
  - d. migmatita;
  - e. roca verde.
2. ¿De cuál de los siguientes grupos de rocas pueden formarse rocas metamórficas?
  - a. plutónicas;
  - b. sedimentarias;
  - c. metamórficas;
  - d. volcánicas;
  - e. todas éstas.
3. ¿Cuál de los siguientes no es un agente del metamorfismo?
  - a. foliación;
  - b. calor;
  - c. presión;
  - d. actividad de fluidos;
  - e. ninguno.
4. La presión igualmente extendida en todas direcciones sobre un objeto es:
  - a. diferencial;
  - b. direccional;
  - c. litostática;
  - d. de tijeras;
  - e. ninguna de éstas.
5. ¿En qué tipo de metamorfismo son el calor magmático y los fluidos los agentes principales del cambio?
  - a. de contacto;
  - b. dinámico;
  - c. regional;
  - d. local;
  - e. termodinámico.
6. Las zonas concéntricas que rodean una intrusión ígnea son:
  - a. capas metamórficas;
  - b. anillos termodinámicos;
  - c. aureolas;
  - d. regiones hidrotérmicas;
  - e. ninguna de éstas.
7. ¿Qué tipo de metamorfismo produce la mayoría de las rocas metamórficas?
  - a. de contacto;
  - b. dinámico;
  - c. regional;
  - d. litostático;
  - e. litosférico.
8. ¿Cuál de las siguientes rocas metamórficas muestra una textura foliada?
  - a. mármol;
  - b. cuarcita;
  - c. roca verde;
  - d. esquisto;
  - e. hornfels.

9. Las rocas metamórficas resultantes del metamorfismo dinámico son:
- brechas de falla;
  - cuarcitas;
  - rocas verdes;
  - milonitas;
  - hornfels.
10. Las zonas metamórficas:
- se caracterizan por combinaciones minerales definidas;
  - están separadas una de otra por isógradas;
  - reflejan un grado metamórfico;
  - todo esto;
  - nada de esto.
11. ¿A lo largo de qué tipo de límite de placa es más común el metamorfismo?
- convergente;
  - divergente;
  - de transformación;
  - de brote del manto;
  - estático.
12. Las rocas metamórficas forman una proporción significativa de:
- los escudos;
  - los núcleos de las cadenas montañosas;
  - la corteza oceánica;
  - las respuestas (a) y (b);
  - las respuestas (b) y (c).
13. ¿Cuál es la secuencia metamórfica correcta del incremento del tamaño de grano?
- filita → pizarra → gneis → esquisto;
  - pizarra → filita → esquisto → gneis;
  - gneis → filita → esquisto → pizarra;
  - esquisto → gneis → filita → pizarra;
  - pizarra → esquisto → gneis → filita.
14. ¿Dónde ocurre el metamorfismo por contacto y qué tipo de cambios produce?
15. ¿Qué son las aureolas? ¿Cómo pueden utilizarse para determinar los efectos del metamorfismo?
16. ¿Qué es el metamorfismo regional y en qué condiciones ocurre?
17. Describa los dos tipos de textura metamórfica y explique cómo pueden ser producidos.
18. Nombre las tres rocas no foliadas comunes y describa sus características.

## Puntos a ponderar

- ¿Qué características específicas de las rocas metamórficas foliadas las hacen inadecuadas como roca de cimentación para una presa? ¿Hay algunas rocas metamórficas que harían buenos cimientos? ¿Por qué?
- Si usted estuviera a cargo de un ministerio de protección ambiental, ¿cómo formularía una política que compensara los riesgos y los beneficios de eliminar el asbesto de los edificios públicos? ¿Qué papel desempeñarían los geólogos en esta política?

## Actividades en la World Wide Web (www)

Para buscar estas direcciones de sitios web, junto con las actualizaciones y los ejercicios, conéctese con <http://www.wadsworth.com/go>

### ► ROCAS METAMÓRFICAS

Este sitio contiene imágenes e información sobre 12 rocas metamórficas usuales. Es parte del sitio web Soil Science 223 Rocks and Minerals Reference (Ciencia de la Tierra 223: referencia de rocas y minerales). Haga clic en cualquiera de los *rock names* (nombres de rocas) y compare la información e imágenes con la información de este capítulo.

### ► UNIVERSIDAD DE TULSA: DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS: ROCAS Y PROCESOS METAMÓRFICOS

Este sitio contiene mucha información sobre rocas y procesos metamórficos en general. Lea lo concerniente a rocas y procesos metamórficos en este sitio.

### ► LA GEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA PT. REYES

Este sitio contiene información sobre la geología de la península Point Reyes, California, incluido lo relativo a las rocas metamórficas del área. Haga clic en el sitio *Pre-Cretaceous metamorphic rocks (pKm)* [Rocas metamórficas precretácicas (pKm)]. ¿Cuáles son los diferentes tipos de rocas metamórficas que se encuentran en esta área?

### ► SITIO WEB DEL CENTRO GETTY

Este sitio contiene información sobre el recién abierto J. Paul Getty Center. Al momento de escribir esto (diciembre de 1997), no había nada definitivo sobre el kouros griego descrito en el Prólogo, pero podría valer la pena ver si hay novedades al respecto.