

FIGURA 8.5 Una aureola metamórfica rodea de modo característico muchas intrusiones ígneas. La aureola metamórfica asociada con este batolito idealizado de granito contiene tres zonas de empalmes minerales, que reflejan los descensos de temperatura por el distanciamiento de la intrusión. Una hornfels de andalucita-cordierita forma la zona interna adyacente al batolito. A ésta le sigue una zona intermedia de recristalización extensa en la que se crea algo de biotita, y en la parte más alejada de la intrusión está la zona externa, caracterizada por pizarras sucias.

la rodean directamente. El tamaño de la intrusión es también importante. En el caso de pequeñas intrusiones, como los diques y los mantos, por lo general sólo las rocas que están en contacto inmediato con la intrusión son afectadas. Puesto que las grandes intrusiones, como los batolitos, tardan mucho en enfriarse, la temperatura acrecentada en la roca circundante puede durar lo suficiente para que sea afectada un área mayor.

Los fluidos tienen también una importante función en el metamorfismo de contacto. Muchos magmas están húmedos y contienen fluidos calientes, químicamente activos, capaces de penetrar al interior de la roca circundante. Estos fluidos pueden reaccionar con la roca y ayudar en la formación de nuevos minerales. Además, la roca original puede contener fluidos intersticiales que, cuando son calentados por el magma, aumentan también las velocidades de reacción.

Las temperaturas pueden alcanzar casi los 900 °C en las partes adyacentes a una intrusión, pero disminuyen gradualmente con la distancia. Los efectos de tal calor y las reacciones químicas resultantes suelen tener lugar en zonas concéntricas conocidas como **aureolas** (figura 8.5). El límite entre una intrusión y su aureola puede ser nítido o transicional (figura 8.6).

Las aureolas metamórficas varían en ancho, según el tamaño, temperatura y composición de la intrusión, así como de acuerdo con la composición de la roca original circundante. De manera típica, los grandes cuerpos intrusivos tienen varias zonas metamórficas, cada una caracterizada por asociaciones de minerales distintivos que indican la disminución de la temperatura con el distanciamiento de la intrusión (figura 8.5). La zona más cercana a la intrusión, y por ende la sujeta a las temperaturas más altas, puede contener minerales metamórficos de alta temperatura (esto es, minerales en equilibrio con el ambiente de alta temperatura) como la silimanita. Las zonas externas pueden caracterizarse por minerales metamórficos de más baja temperatura, como la clorita, el talco y la epidota.

La formación de nuevos minerales mediante el metamorfismo de contacto depende no sólo de la proximidad a la intrusión, sino también de la composición de la roca

original. Las lutitas, limolitas, calizas impuras y dolomías impuras son particularmente susceptibles a la formación de nuevos minerales mediante metamorfismo por contacto, mientras que las areniscas puras y las calizas puras no lo son.

Se reconocen en general dos tipos de rocas metamórficas por contacto: las que resultan del cocimiento de la roca original y las alteradas por las soluciones calientes. Muchas de las rocas que produce el metamorfismo por contacto tienen la textura de la porcelana; esto es, son duras y de grano fino. Esto se aplica de manera particular a las rocas con alto contenido de arcilla, como la lutita. Esta textura se produce porque los minerales arcillosos en la roca se cuecen de manera similar a una taza de porcelana en un horno de cerámica.

Durante las etapas finales de enfriamiento, cuando un magma intrusivo empieza a cristalizarse, con frecuencia se liberan grandes cantidades de soluciones acuosas calien-



FIGURA 8.6 Un límite nítido y claramente definido se presenta entre la roca ígnea intrusiva de color claro de la izquierda y la roca original metamorfoseada de color oscuro de la derecha. La intrusión es parte del batolito de las Sierras Peninsulares, al este de San Diego, California. (Foto cortesía de David J. Matty.)

tes. Estas soluciones pueden reaccionar con la roca original y producir nuevos minerales metamórficos. A este proceso, que habitualmente tiene lugar cerca de la superficie terrestre, se le llama *alteración hidrotérmica* y puede generar valiosos depósitos minerales. Los geólogos creen que muchos de los depósitos minerales del mundo se deben a la migración de iones metálicos en las soluciones hidrotermales. Los ejemplos incluyen las minas de cobre, oro y hierro, así como de estaño y zinc en diversos lugares, entre ellos Australia, Canadá, China, Chipre, Finlandia, Rusia y el oeste de Estados Unidos.

METAMORFISMO DINÁMICO

El **metamorfismo dinámico** se asocia en mayor medida con las zonas de falla (fracturas a lo largo de las cuales ha habido movimiento), en las cuales las rocas están sometidas a grandes presiones diferenciales. Las rocas metamórficas producto del metamorfismo dinámico puro se denominan milonitas y por lo común se limitan a estrechas zonas adyacentes a las fallas. Las *milonitas* son rocas duras, densas, de grano fino, muchas de las cuales se caracterizan por delgadas laminaciones (figura 8.7). Entre los lugares tectónicos en que se presentan las milonitas están Moine Thrust Zone, en el noroeste de Escocia, y partes de la falla de San Andrés, en California.

METAMORFISMO REGIONAL

La mayoría de las rocas metamórficas son resultado del **metamorfismo regional**, el cual ocurre en una gran área y suele ser causado por temperaturas, presiones y deformación extrema dentro de las porciones más profundas de la corteza. El metamorfismo regional es más obvio a lo largo de las márgenes de la placa convergente, donde las rocas se deforman intensamente y se recrystalizan durante la con-



FIGURA 8.7 Milonita de Adirondack Highlands, Nueva York. (Foto cortesía de Eric Johnson.)

vergencia y la subducción. Dentro de estas rocas metamórficas suele haber una gradación de la intensidad metamórfica, que va de las áreas que fueron sometidas a las presiones más intensas y/o a las temperaturas más altas, a las áreas de temperaturas y presiones más bajas. Tal gradación en el metamorfismo puede reconocerse por los minerales metamórficos que se hallan presentes.

El metamorfismo regional no se limita sólo a las márgenes convergentes. Ocurre también en áreas donde las placas divergen, aunque por lo común a profundidades mucho menores debido al alto gradiente geotérmico relacionado con estas áreas.

Por los estudios de campo y los experimentos de laboratorio se sabe que ciertos minerales se forman sólo dentro de rangos específicos de temperatura y presión; se les conoce como **minerales índice** porque su presencia permite a los geólogos reconocer las zonas metamórficas de

TABLA 8.1

Zonas metamórficas y sus asociaciones minerales para diferentes tipos de roca original

GRADO METAMÓRFICO	ZONA METAMÓRFICA PARA ROCAS RICAS EN ARCILLA	ASOCIACIONES DE MINERALES PRODUCIDAS EN DIFERENTES ROCAS ORIGINALES		
		Limolitas	Calizas	Rocas ígneas máficas
Incremento				
↓ Bajo Medio Alto ↓ metamorfismo	Clorita	Clorita,* cuarzo, moscovita, plagioclasa	Clorita,* calcita o dolomita, plagioclasa	Clorita,* plagioclasa
	Biotita	Biotita,* cuarzo, plagioclasa		
	Granate	Granate,* mica, cuarzo, plagioclasa	Granate,* epidota, hornblenda, calcita	Granate,* clorita, epidota, plagioclasa
	Estauroлита	Estauroлита,* mica, granate, cuarzo, plagioclasa		
	Cianita	Cianita,* mica, granate, cuarzo, plagioclasa	Granate, hornblenda,* plagioclasa	
	Silimanita	Silimanita,* granate, mica, cuarzo, plagioclasa	Granate, augita,* plagioclasa	Hornblenda,* plagioclasa

*Minerales índice

grados alto, intermedio y bajo (tabla 8.1). Una progresión característica de minerales formados primordialmente en rocas que originalmente fueron ricas en arcilla comprende la formación secuencial de los minerales siguientes:

CLORITA → BIOITTA → ANFÉDOL → ESTAUROLITA → SILIMANITA

Composiciones distintas de rocas crean minerales índices diferentes. Cuando las dolomías arenosas se metamorfean producen un conjunto enteramente diferente de minerales índice. Por esto, a medida que avanza el metamorfismo, un conjunto específico de minerales índice se forma en tipos de roca específicos.

Clasificación de las rocas metamórficas

PARA fines de clasificación, las rocas metamórficas se dividen comúnmente en dos grupos: los que muestran textura foliada y los que no. (tabla 8.2).

ROCAS METAMÓRFICAS FOLIADAS

Las rocas sometidas a calor y presión diferencial durante el metamorfismo se caracterizan por tener minerales dispuestos en una forma paralela que les da una **textura foliada** (figura 8.8). El tamaño y forma de los granos minerales determina si la foliación es fina o tosca. Si la foliación es tal que los granos individuales no pueden reconocerse sin ampliación, se dice que la roca es pizarra (figura 8.9). Una foliación tosca resulta cuando los minerales granulares, como el cuarzo y el feldespato, son segregados en zonas aproximadamente paralelas y listadas, que difieren en composición y color, como en un gneis. Las rocas metamórficas foliadas pueden disponerse en orden de tamaño de grano crecientemente tosco y de perfección de foliación.

La *pizarra* es una roca metamórfica de grano muy fino, que comúnmente muestra *plano de corte o clivaje pizarroso* (figura 8.9b). La pizarra es el resultado del metamorfismo regional de grado bajo de la lutita o, más raramente, de la ceniza volcánica. Como puede partirse fácilmente a lo largo de planos de corte en trozos planos, la pizarra es una roca

TABLA 8.2
Clasificación de rocas metamórficas comunes

TEXTURA	ROCA METAMÓRFICA	MINERALES TÍPICOS	GRADO METAMÓRFICO	CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS	ROCA ORIGINAL
Foliada	Pizarra	Arcillas, micas, clorita	Bajo	De grano fino, se corta fácilmente en pedazos planos	Limolita, piedras arcillosas, ceniza volcánica
	Fillita	Cuarzo de grano fino, micas, clorita	Bajo a medio	De grano fino, lustre vítreo	Limolita
	Esquisto	Micas, clorita, cuarzo, talco, hornblenda, granate, estauroлита, grafito	Bajo a alto	Foliación distinguible, minerales visibles	Limolita, carbonatos, rocas ígneas máficas
	Gneis	Cuarzo, feldespatos, hornblenda, micas	Alto	Bandas segregadas claras y oscuras visibles	Limolita, areniscas, rocas ígneas félsicas
	Anfibolita	Hornblenda, plagioclasa	Medio a alto	Oscura, débilmente foliada	Rocas ígneas máficas
No foliada	Migmatita	Cuarzo, feldespatos, hornblenda, micas	Alto	Franjas o lentes de granito entremezclado con gneis	Rocas ígneas félsicas mezcladas con rocas sedimentarias
	Mármol	Calcita, dolomita	Bajo a alto	Granos entrelazados de calcita o dolomita; reacciona con HCl	Caliza o dolomía
	Cuarcita	Cuarzo	Medio a alto	Granos entrelazados de cuarzo, dura, densa	Arenisca de cuarzo
	Roca verde	Clorita, epidota, hornblenda	Bajo a alto	De grano fino, verde	Rocas ígneas máficas
	Hornfels	Micas, granates, andalucita, cordierita, cuarzo	Bajo a medio	De grano fino, granos equidimensionales, dura, densa	Limolita
	Antracita	Carbón	Alto	Negra, lustrosa, de fractura subconcoidea	Carbón mineral

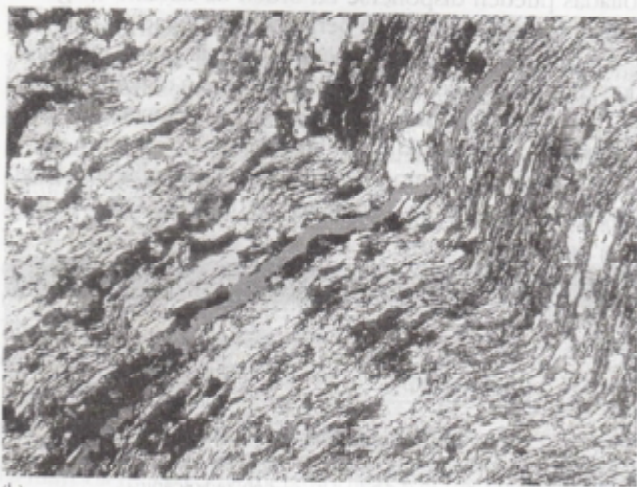


Disposición aleatoria de minerales alargados antes de que se aplique presión a dos lados



Minerales alargados dispuestos en forma paralela como resultado de la presión aplicada a dos lados

(a)



(b)

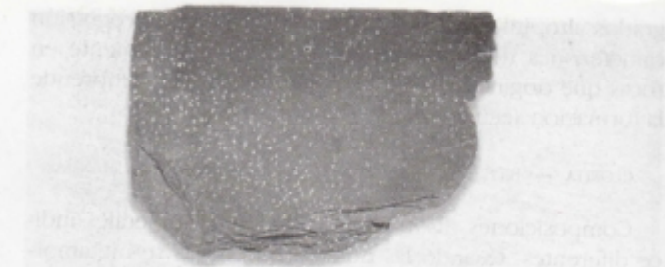
FIGURA 8.8 a) Cuando las rocas se someten a presión diferencial, los granos minerales se disponen característicamente en forma paralela, produciendo una textura foliada. b) Fotomicrografía de una roca metamórfica con textura foliada que muestra la disposición paralela de los granos minerales.

excelente para losas de techado y de piso, para cubiertas de mesas de billar y pool, así como para pizarrones. Los colores diferentes de la mayoría de las pizarras se deben a cantidades mínimas de grafito (negro), óxido de hierro (rojo y púrpura) y/o clorita (verde).

La *filita* es similar en composición a la pizarra, pero es de grano más tosco. Los minerales, sin embargo, son aún demasiado pequeños para identificarlos sin ampliación. La filita puede distinguirse de la pizarra por su lustre vítreo. Representa un tamaño de grano intermedio entre la pizarra y el esquisto.

El *esquisto* se produce generalmente por metamorfismo regional. El tipo de esquisto que se forma depende de la intensidad del metamorfismo y del carácter de la roca original (figura 8.10). El metamorfismo de muchos tipos de roca pueden generar esquisto, pero la mayor parte de éste parece haberse formado de rocas sedimentarias ricas en arcilla (tabla 8.2).

Todos los esquistos contienen más de 50% de minerales laminados y alargados, todos ellos lo bastante grandes para ser claramente visibles. Su composición mineral imparte a la roca una *esquistosidad* o *foliación esquistosa*, que suele producir un tipo ondulado de corte al hendirse. La esquistosidad es común en ambientes metamórficos de grado bajo a alto y cada tipo de esquisto se conoce por su mineral o minerales más notorios, como el esquisto de mica, el esquisto de clorita o el esquisto de talco.



(b)



(b)

FIGURA 8.9 a) Muestra de mano de pizarra. b) Esta laja de Pizarra de Arvonía, de la cantera Albemarle Slate Quarry, Virginia, muestra estratos (de la parte superior derecha a la inferior izquierda) en ángulo con el plano de corte pizarroso. (Foto (a) cortesía de Sue Monroe; foto (b) cortesía de R. V. Dietrich.)

El *gneis* es una roca metamórfica bandeada con segregación de minerales claros y oscuros (figura 8.11). Los

FIGURA 8.10 Esquisto de granate-mica. (Foto cortesía de Sue Monroe.)

