

Vista de cerca



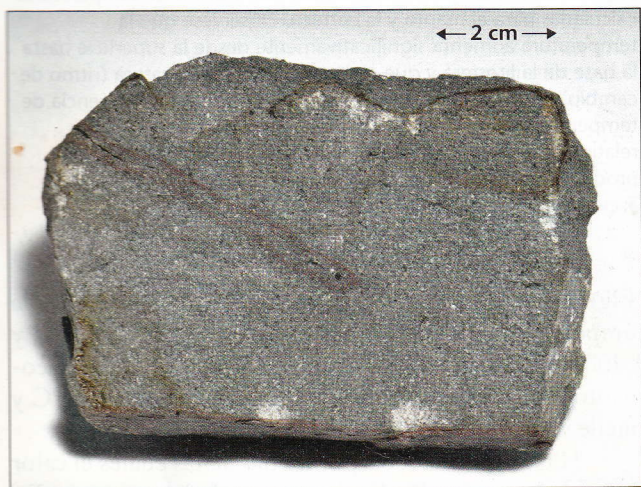
Figura 3.15 La diorita es una roca ígnea fanerítica de composición intermedia. (Foto de E. J. Tarbuck).

pueden contener fragmentos de pumita del tamaño de una nuez y otros fragmentos de roca.

Las tobas soldadas cubren enormes regiones del occidente de Estados Unidos que fueron volcánicamente activas en el pasado. Algunos de esos depósitos de toba tienen grosores de centenares de metros y se extienden a lo largo de decenas de kilómetros desde su origen. La mayoría se formó hace millones de años conforme las cenizas volcánicas arrojadas de grandes estructuras volcánicas (calderas) en forma de avalanchas, se expandieron lateralmente a velocidades de aproximadamente 100 kilómetros por hora. Los primeros investigadores de esos depósitos los clasificaron, de manera incorrecta, como coladas de riolitas. En la actualidad, sabemos que esta lava rica en sílice es demasiado viscosa (pegajosa) para fluir más allá de unos pocos kilómetros desde la chimenea volcánica.

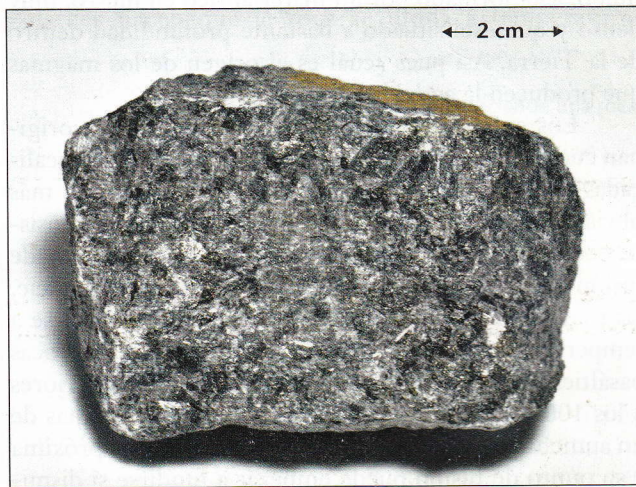
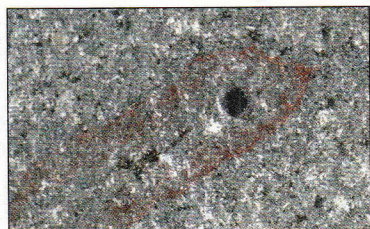
Las rocas piroclásticas compuestas fundamentalmente por partículas de tamaño mayor que la ceniza se denominan *brechas volcánicas*. En las brechas volcánicas, las partículas pueden consistir en fragmentos con perfil aerodinámico que solidificaron en el aire, bloques que se rompen de las paredes de la chimenea, cristales y fragmentos vítreos.

A diferencia de algunos nombres de rocas ígneas, como el granito y el basalto, los términos *toba* y *brecha*



A. Basalto

Vista de cerca



B. Gabro

Vista de cerca



Figura 3.16 Estas rocas máficas de color oscuro están compuestas fundamentalmente de piroxeno y de plagioclasa rica en calcio. A. El basalto es una roca afanítica y una roca extrusiva muy común. B. El gabro, el equivalente fanerítico del basalto, es menos abundante. (Fotos de E. J. Tarbuck).

volcánica no indican composición mineral. Por tanto, suelen utilizarse a menudo con un calificador, por ejemplo, toba riolítica.

Tectónica de placas y rocas ígneas

El origen de los magmas ha sido un tema controvertido en geología casi desde el mismo comienzo de esta ciencia. ¿Cómo se forman los magmas de distintas composiciones? ¿Por qué los volcanes de las cuencas oceánicas profundas expulsan fundamentalmente lavas basálticas, mientras que los situados en los márgenes continentales adyacentes a las fosas oceánicas expulsan fundamentalmente lavas andesíticas? ¿Por qué las rocas basálticas son comunes en la superficie de la Tierra, mientras que la mayor parte del magma granítico está situado en zonas profundas? La teoría de la tectónica de placas nos proporciona algunas respuestas.

Origen de los magmas

En función de las pruebas científicas disponibles, *la corteza y el manto terrestres están compuestos fundamentalmente de rocas sólidas, no fundidas*. Aunque el núcleo externo es fluido, está formado por un material rico en hierro, muy denso y que está situado a bastante profundidad dentro de la Tierra. Así pues ¿cuál es el origen de los magmas que producen la actividad ígnea?

Los geólogos proponen que los magmas se originan cuando se funden rocas esencialmente sólidas, localizadas en la corteza y el manto superior. La forma más obvia para generar magma a partir de roca sólida consiste en elevar la temperatura por encima del punto de fusión de la roca. En un ambiente próximo a la superficie, las rocas graníticas ricas en sílice empiezan a fundirse a temperaturas de unos 750 °C, mientras que las rocas basálticas deben ser calentadas a temperaturas superiores a los 1000 °C antes de comenzar a fundirse. Además de un aumento de la temperatura, una roca que está próxima a su punto de fusión puede empezar a fundirse si disminuye la presión de confinamiento, o si se introducen líquidos (volátiles). Consideraremos el papel que desempeñan en la generación de magmas el calor, la presión y las sustancias volátiles.

Papel del calor. ¿Qué fuente de calor es suficiente para fundir las rocas? Los trabajadores de las minas subterráneas saben que la temperatura aumenta con la profundidad. Aunque la velocidad con que aumenta la temperatura varía de un lugar a otro, en la corteza superior oscila entre 20 y 30 °C por kilómetro. El cambio de la temperatura con la profundidad se conoce como **gradiente geotérmico**

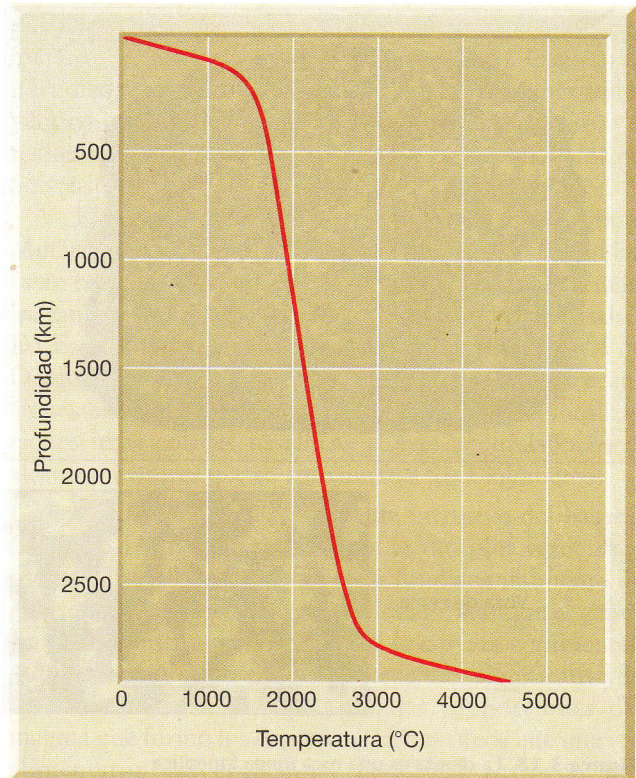


Figura 3.17 Este gráfico muestra la distribución de temperaturas calculadas para el manto y la corteza. Obsérvese que la temperatura aumenta significativamente desde la superficie hasta la base de la litosfera y que el gradiente de temperatura (ritmo de cambio) es mucho menor en el manto. Dado que la diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior del manto es relativamente pequeña, los geólogos deducen que debe producirse en él un flujo convectivo lento (el material caliente asciende y el manto frío desciende).

(Figura 3.17). A partir de este último se sabe que la temperatura a 100 kilómetros oscila entre 1.200 °C y 1.400 °C, mientras que la temperatura en el límite núcleo-manto se calcula que es de aproximadamente 4.500 °C y puede superar los 6.700 °C en el centro de la Tierra*.

Hay varias maneras por medio de las cuales el calor desempeña su papel en la formación de los magmas. En primer lugar, en las zonas de subducción, se piensa que la fricción genera calor conforme las rocas se deslizan unas sobre otras. En segundo lugar, las rocas pueden calentarse durante la subducción a medida que descienden hacia una zona de mayor temperatura. En tercer lugar, el material caliente profundo puede ascender y fundir las rocas localizadas cerca de la superficie. Aunque todos estos procesos generan algo de magma, las cantidades suelen

*Tratamos las fuentes de calor para el gradiente geotérmico en el Capítulo 17.

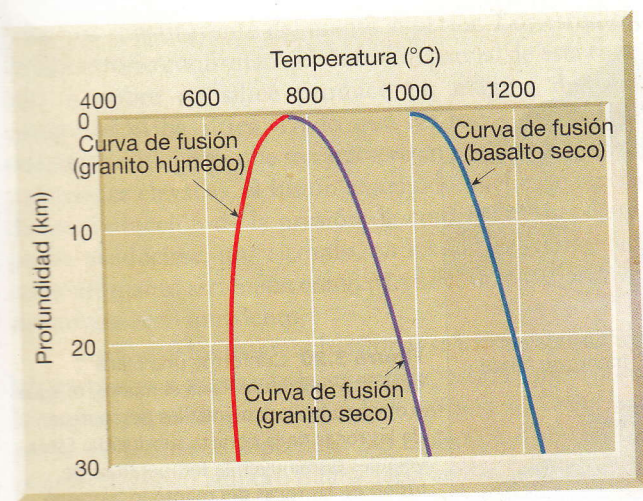


Figura 3.18 Curvas idealizadas de temperatura de fusión. Estas curvas muestran las temperaturas mínimas necesarias para fundir una roca dentro de la corteza terrestre. Obsérvese que el granito y el basalto anhidros funden a temperaturas cada vez más elevadas conforme aumenta la profundidad. Por el contrario, la temperatura de fusión del granito húmedo disminuye en realidad a medida que aumenta la presión de confinamiento.

ser pequeñas y la distribución está muy localizada. Como examinaremos a continuación, la mayor parte del magma se genera sin la adición de calor.

Papel de la presión. Si la temperatura fuera el único factor que determinara si una roca se funde o no, nuestro planeta sería una bola fundida cubierta por una fina capa exterior sólida. Esto, por supuesto, no es así. La razón es que la presión también aumenta con la profundidad.

La fusión que se acompaña de un aumento de volumen, se produce a temperaturas más altas en profundidad debido a la presión de confinamiento (Figura 3.18). O sea, un aumento de la presión de confinamiento produce un incremento de la temperatura de fusión de las rocas. A la inversa, la reducción de la presión de confinamiento reduce la temperatura de fusión de una roca. Cuando la presión de confinamiento disminuye, se dispara la fusión. Esto puede ocurrir cuando la roca asciende como consecuencia de una corriente convectiva ascendente, desplazándose así a zonas de menor presión. (Recordemos que, aun cuando el manto es un sólido, fluye a velocidades muy lentas a lo largo de escalas temporales de millones de años.) Este proceso es responsable de la generación de magmas a lo largo de las dorsales oceánicas donde las placas se están separando (Figura 3.19).

Papel de los volátiles. Otro factor importante que afecta a la temperatura de fusión de las rocas es su contenido en agua. El agua y otras sustancias volátiles actúan al igual que la sal para fundir el hielo. Es decir, las sustancias volátiles hacen que la roca se funda a temperaturas

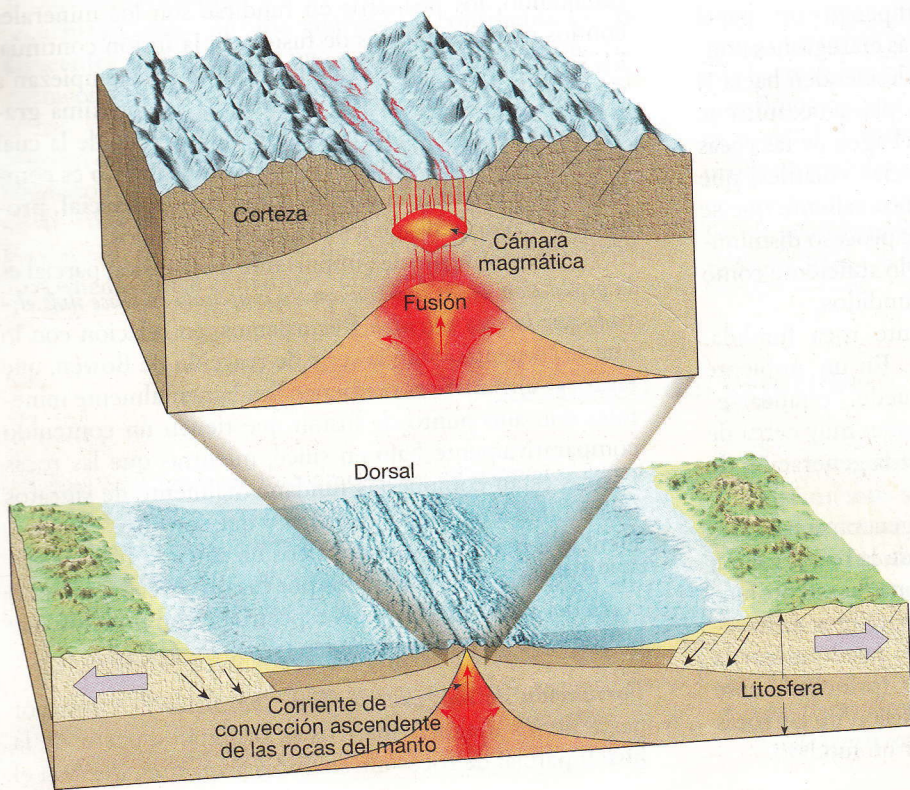


Figura 3.19 Conforme asciende una roca caliente del manto, se desplaza continuamente hacia zonas de menor presión. Esta disminución de la presión de confinamiento puede desencadenar la fusión, incluso sin calor adicional.

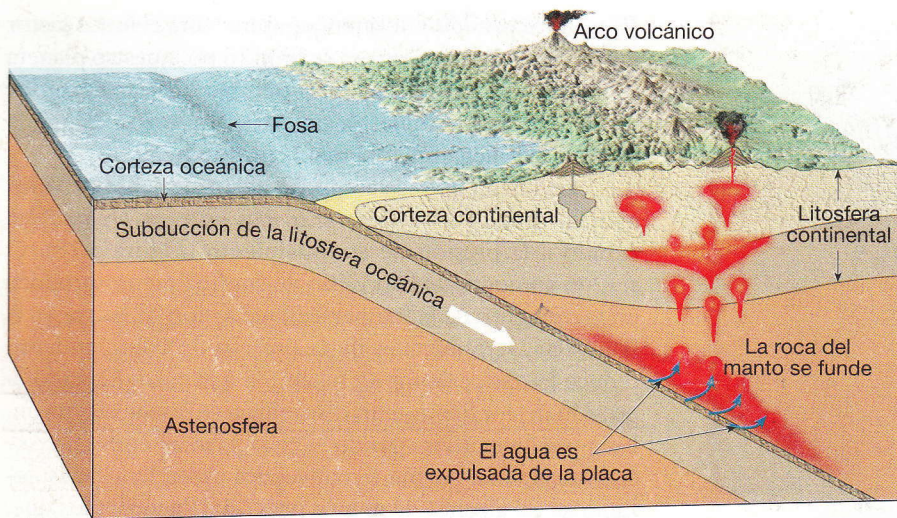


Figura 3.20 Conforme una placa oceánica descende hacia el manto, el agua y otros compuestos volátiles desaparecen de las rocas de la corteza subducida. Estos volátiles disminuyen la temperatura de fusión de las rocas del manto lo bastante como para generar fusión.

inferiores. Además, el efecto de los volátiles se incrementa con el aumento de la presión. Por consiguiente, una roca "húmeda" en profundidad tiene una temperatura de fusión mucho menor que una roca "seca" de la misma composición y bajo la misma presión de confinamiento (Figura 3.18). Por consiguiente, además de la composición de una roca, su temperatura, la profundidad (presión de confinamiento) y su contenido acuoso determinan si estará en estado sólido o líquido.

Las sustancias volátiles desempeñan un papel importante en la generación de magmas en regiones donde láminas frías de litosfera oceánica descienden hacia el manto (Figura 3.20). Conforme una placa oceánica se hunde, el calor y la presión expulsan el agua de las rocas de la corteza subducida. Estas sustancias volátiles, que son muy móviles, migran hacia el manto caliente que se encuentra por encima. Se cree que este proceso disminuye la temperatura de fusión del manto lo suficiente como para generar pequeñas cantidades de fundidos.

Una vez que se forma suficiente roca fundida, ascenderá flotando hacia la superficie. En un ambiente continental, el cuerpo magmático puede "estancarse" debajo de las rocas de la corteza, que están muy cerca de su temperatura de fusión. Esto provoca la generación de magmas secundarios ricos en sílice.

En resumen, los magmas pueden generarse bajo tres tipos de condiciones: (1) por aumento de la temperatura; por ejemplo, un cuerpo magmático de una fuente profunda intruye y funde las rocas de la corteza; (2) una *disminución de la presión* (sin la adición de calor) puede causar la fusión, y (3) la *introducción de volátiles* (principalmente agua) puede reducir la temperatura de fusión de las rocas del manto lo bastante como para generar un fundido.

Fusión parcial y composiciones magmáticas

Existe una diferencia importante entre la fusión de una sustancia sencilla, como el hielo, y la fusión de las rocas ígneas, que son mezclas de varios minerales. El hielo se funde a una temperatura específica, mientras que las rocas ígneas se funden a lo largo de un intervalo de temperaturas del orden de 200 °C. Conforme una roca se va calentando, los primeros en fundirse son los minerales con los menores puntos de fusión. Si la fusión continúa, los minerales con puntos de fusión más altos empiezan a fundirse y la composición del magma se aproxima gradualmente a la composición global de la roca de la cual deriva. La mayor parte de las veces, la fusión no es completa. Este proceso, conocido como **fusión parcial**, produce la mayor parte de los magmas, sino todos.

Una consecuencia importante de la fusión parcial es la *producción de un fundido con un contenido en sílice más elevado que la roca original*. Recordemos, en relación con lo que se comentó sobre la serie de reacción de Bowen, que las rocas ultramáficas contienen fundamentalmente minerales con alto punto de fusión que tienen un contenido comparativamente bajo en sílice, mientras que las rocas félsicas están compuestas fundamentalmente de silicatos que funden a temperaturas bajas y que son ricos en sílice. Debido a que los minerales ricos en sílice se funden primero, los magmas generados por fusión parcial están más cerca del extremo félsico del espectro de composición que las rocas de las cuales proceden (véase Figura 3.7).

① **Formación de magmas máficos (basálticos).** La mayor parte de los magmas máficos se originan a partir de la fusión parcial de rocas ultramáficas *peridotitas*, que son el

principal constituyente del manto superior. Los estudios de laboratorio confirman que la fusión parcial de esta roca seca y pobre en sílice produce un magma de una composición basáltica. Dado que las rocas del manto existen en ambientes que se caracterizan por temperaturas y presiones elevadas, la fusión a menudo es consecuencia de una reducción de la presión de confinamiento. Esto puede producirse, por ejemplo, en los lugares donde las rocas del manto ascienden como parte del flujo convectivo de movimiento muy lento.

Dado que los magmas basálticos se forman a muchos kilómetros por debajo de la superficie, cabría esperar que la mayor parte de este material se enfriara y cristalizara antes de alcanzar la superficie. Sin embargo, conforme el magma basáltico anhídrido migra hacia arriba, la presión de confinamiento disminuye proporcionalmente y reduce la temperatura de fusión. La mayor parte de los magmas basálticos ascienden lo bastante rápido como para que, conforme entran en ambientes más fríos, la pérdida de calor sea compensada por una disminución de la temperatura de fusión. Por consiguiente, en la superficie de la Tierra son comunes los grandes flujos de magmas basálticos.

② **Formación de magmas intermedios (andesíticos).** Si la fusión parcial de las rocas del manto genera magmas máficos, ¿cuál es el origen de los magmas que generan rocas andesíticas y graníticas? Recordemos que los magmas intermedios y félsicos no son expulsados por los volcanes de las cuencas oceánicas profundas; antes bien, se encuentran sólo en los márgenes continentales, o adyacentes a ellos. Ésta es una prueba evidente de que las interacciones entre los magmas basálticos derivados del manto y los componentes más félsicos de la corteza generan esos magmas. Por ejemplo, conforme un magma basáltico migra hacia arriba, puede fundir y asimilar algo de la roca félsica del basamento. El resultado es la formación de un magma de composición andesítica (intermedio entre el máfico y el félsico).

El magma andesítico puede evolucionar también del magma basáltico por el proceso de diferenciación magmática. Recordemos, en relación con lo que se comentó sobre la serie de reacción de Bowen, que, conforme se solidifica un magma basáltico, son los minerales ferromagnesianos pobres en sílice los que cristalizan primero. Si estos componentes ricos en hierro se separan del líquido por sedimentación cristalina, el fundido restante, que está enriquecido en sílice, tendrá una composición andesítica.

③ **Formación de los magmas félsicos (graníticos).** Los magmas félsicos son demasiado ricos en sílice para ser producidos directamente a partir de la diferenciación magmática de los magmas máficos. Lo más probable es que sean el producto final de la cristalización de un magma andesítico, o el producto de la fusión parcial de las rocas continentales ricas en sílice.

El calor para fundir las rocas de la corteza a menudo procede de los magmas máficos calientes derivados del manto que se formaron por encima de una zona de subducción y que se acumulan debajo de la corteza situada por encima de ésta. Allí, se piensa que se produce la fusión parcial de las rocas félsicas hidratadas que generan los magmas graníticos.

Conforme asciende un fundido félsico hidratado, la presión de confinamiento disminuye, lo que a su vez reduce el efecto del agua en su papel de reductor de la temperatura de fusión. Además, los fundidos graníticos tienen un alto contenido en sílice y son por tanto más viscosos que otros magmas. Por consiguiente, al contrario que los magmas basálticos que producen a menudo enormes flujos de lava, los magmas graníticos suelen perder su movilidad antes de alcanzar la superficie y tienden a producir grandes estructuras intrusivas. En las ocasiones en que los magmas ricos en sílice alcanzan la superficie, las erupciones piroclásticas explosivas, como las del monte Santa Elena, son lo habitual.

Resumen del capítulo

- Las rocas ígneas se forman cuando un magma se enfría y se solidifica. Las rocas ígneas extrusivas o volcánicas, se forman cuando una lava se enfría sobre la superficie. El magma que se solidifica en zonas profundas produce rocas ígneas intrusivas o plutónicas.
- Conforme el magma se enfría los iones que lo componen se disponen según modelos ordenados durante un proceso denominado cristalización. El enfriamiento lento se traduce en la formación de

cristales bastante grandes. A la inversa, cuando el enfriamiento se produce rápidamente, el resultado es una masa sólida que consiste en diminutos cristales intercrecidos. Cuando el material fundido se enfría instantáneamente, se forma una masa de átomos desordenados a los que se conoce como vidrio.

- Las rocas ígneas se clasifican casi siempre por su textura y su composición mineral.

- Por textura de una roca ígnea se entiende el aspecto general de la roca basado en el tamaño y disposición de los cristales. El factor más importante que condiciona la textura es la velocidad de enfriamiento del magma. Las texturas comunes de las rocas ígneas son *afanítica*, con granos demasiado pequeños para ser distinguidos a simple vista; *fanerítica*, con cristales intercrecidos de aproximadamente igual tamaño y lo suficientemente grandes para ser identificados a simple vista; *porfídica*, que tiene cristales grandes (*fenocristales*) englobados en una matriz de cristales más pequeños, y *vítrea*.
- La composición mineral de una roca ígnea viene determinada en último extremo por la composición química del magma a partir del cual cristalizó. N. L. Bowen descubrió que, conforme se enfría un magma en el laboratorio, los minerales con puntos de fusión más altos cristalizan antes que los minerales con puntos de fusión más bajos. La *serie de reacción de Bowen* ilustra la secuencia de formación mineral en un magma basáltico. En la *serie de reacción discontinua*, cada mineral tiene una estructura cristalina diferente que se forma conforme los componentes sólidos (minerales) reaccionan con el fundido restante (porción líquida de un magma, excluyendo cualquier material sólido) y producen el siguiente mineral de la secuencia. La parte derecha de la serie de reacción de Bowen, denominada *serie de reacción continua* muestra que los cristales de plagioclasas ricas en calcio reaccionan con los iones sodio contenidos en el fundido para enriquecerse cada vez más en sodio. Durante la última etapa de la cristalización, después de que la mayor parte del magma se haya solidificado, se generan los minerales moscovita, feldespatos potásico y cuarzo.
- Durante la cristalización del magma, si los minerales formados primero son más densos que el líquido residual, se depositarán en el fondo de la cámara magmática durante un proceso denominado *sedimentación cristalina*. Debido al hecho de que la sedimentación cristalina elimina los minerales formados en primer lugar, el fundido restante formará una roca con una composición química muy diferente de la del magma inicial. El proceso de formación de más de un tipo de magma a partir de un magma común se denomina *diferenciación magmática*.
- Una vez formado el cuerpo magmático, su composición puede cambiar mediante la incorporación de material extraño, un proceso denominado *asimilación* o por *mezcla magmática*.
- La composición mineral de una roca ígnea es consecuencia de la composición química del magma inicial y del ambiente de cristalización. Por consiguiente, la clasificación de las rocas ígneas se corresponde estrechamente a la serie de reacción de Bowen. Las *rocas félsicas* (por ejemplo, el granito y la riolita) se forman a partir de los últimos minerales que cristalizan, el feldespato potásico y el cuarzo, y son de colores claros. Las rocas de composición *intermedia* (por ejemplo, la andesita y la diorita) están formadas por los minerales plagioclasa y anfíbol. Las *rocas máficas* (por ejemplo, el basalto y el gabro) se forman con los primeros minerales que cristalizan (olivino, piroxeno y plagioclasas cálcicas); tienen elevado contenido en hierro, magnesio y calcio, y bajo en silicio, y son de color gris oscuro a negro.
- Los magmas se originan a partir de rocas esencialmente sólidas de la corteza y el manto. Además de la composición de las rocas, su temperatura, profundidad (presión de confinamiento) y su contenido en volátiles determinan si estará en forma sólida o líquida. Por tanto, el magma puede generarse mediante la elevación de la temperatura de una roca, como ocurre cuando una corriente caliente ascendente del manto "se estanca" debajo de las rocas de la corteza. Una *disminución de la presión* también puede fundir las rocas. Además, la *introducción de volátiles* (agua) puede disminuir el punto de fusión de una roca lo bastante para generar un magma. Dado que la fusión no es generalmente completa, un proceso denominado *fusión parcial* produce un fundido originado a partir de los minerales que funden a menor temperatura, que tienen un contenido más elevado en sílice que la roca original. Por tanto, los magmas generados por fusión parcial están más próximos al extremo félsico del espectro de composición que las rocas de las cuales proceden.

Preguntas de repaso

1. ¿Qué es un magma?
2. ¿Cómo se diferencia una lava de un magma?
3. ¿Cómo influye la velocidad de enfriamiento en el proceso de cristalización?