

Introducción a la Geología

La Geología

La Geología, el hombre y el medio ambiente
Algunas reseñas históricas acerca de la Geología

Tiempo geológico

La datación relativa y la escala de tiempo geológico
La magnitud del tiempo geológico

Naturaleza de la investigación científica

Hipótesis
Teoría
El método científico
La tectónica de placas y la investigación científica

Una visión de la Tierra

Hidrosfera
Atmósfera
Biosfera
Tierra sólida

La Tierra como un sistema

La ciencia del sistema Tierra
El sistema Tierra

Evolución temprana de la Tierra

El origen del planeta Tierra
Formación de la estructura en capas de la Tierra

Estructura interna de la Tierra

Capas definidas por su composición
Capas definidas por sus propiedades físicas
¿Cómo sabemos lo que sabemos?

La superficie de la Tierra

Principales características de los continentes
Principales características del fondo oceánico

Las rocas y el ciclo de las rocas

Tipos de rocas básicas
El ciclo de las rocas: uno de los subsistemas de la Tierra

La espectacular erupción de un volcán, el terror causado por un terremoto, el espléndido escenario de un valle de montaña y la destrucción causada por una avalancha son temas de estudio para el geólogo. El estudio de la Geología aborda muchas cuestiones fascinantes y prácticas sobre nuestro entorno. ¿Qué fuerzas producen las montañas?, ¿habrá pronto otro gran terremoto en California?, ¿cómo fue el período glacial?, ¿habrá otro?, ¿cómo se formaron estos yacimientos?, ¿deberíamos buscar agua aquí?, ¿es útil la explotación a cielo abierto en esta zona?, ¿se encontrará petróleo si se perfora un pozo en este lugar?

La Geología

El tema de este libro es la **geología**, del griego *geo*, «Tierra», y *logos*, «discurso». Es la ciencia que persigue la comprensión del planeta Tierra. La ciencia de la Geología se ha dividido tradicionalmente en dos amplias áreas: la física y la histórica. La **Geología física**, sobre la que trata este libro, **estudia los materiales que componen la Tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre**. El objetivo de la **Geología histórica** es comprender el origen de la Tierra y su evolución a lo largo del tiempo. Por tanto, procurar ordenar cronológicamente los múltiples cambios físicos y biológicos que han ocurrido en el pasado geológico. El estudio de la Geología física precede lógicamente al estudio de la historia de la Tierra, porque, antes de intentar revelar su pasado, debemos comprender primero cómo funciona la Tierra.

Entender la Tierra constituye un reto, porque nuestro planeta es un cuerpo dinámico con muchas partes que interactúan y una historia larga y compleja. En el transcurso de su larga existencia, la Tierra ha ido cambiando. De hecho, está cambiando mientras lee esta página y continuará haciéndolo en un futuro previsible. Algunas veces los cambios son rápidos y violentos, como cuando se producen deslizamientos o erupciones volcánicas. A menudo, los cambios tienen lugar de una manera tan lenta que no se aprecian durante toda una vida. Las escalas de tamaño y espacio también varían mucho entre los fenómenos que los geólogos estudian. Algunas veces éstos deben concentrarse en fenómenos submicroscópicos, mientras que en otras ocasiones deben tratar con características de escala continental o global.

La Geología se percibe como una ciencia que se realiza en el exterior, lo cual es correcto. Una gran parte de la Geología se basa en observaciones y experimentos llevados a cabo en el campo. Pero la Geología también se realiza en el laboratorio donde, por ejemplo, el estudio de varios materiales terrestres permite comprender muchos procesos básicos. Con frecuencia, la Geología re-

quiere una comprensión y una aplicación del conocimiento y los principios de la Física, la Química y la Biología. La Geología es una ciencia que pretende ampliar nuestro conocimiento del mundo natural y del lugar que ocupamos en él.

La Geología, el hombre y el medio ambiente

El objetivo principal de este libro es desarrollar una comprensión de los principios geológicos básicos, pero a lo largo del texto exploraremos numerosas relaciones importantes entre la humanidad y el entorno natural. Muchos de los problemas y cuestiones tratados por la Geología tienen un valor práctico para las personas.

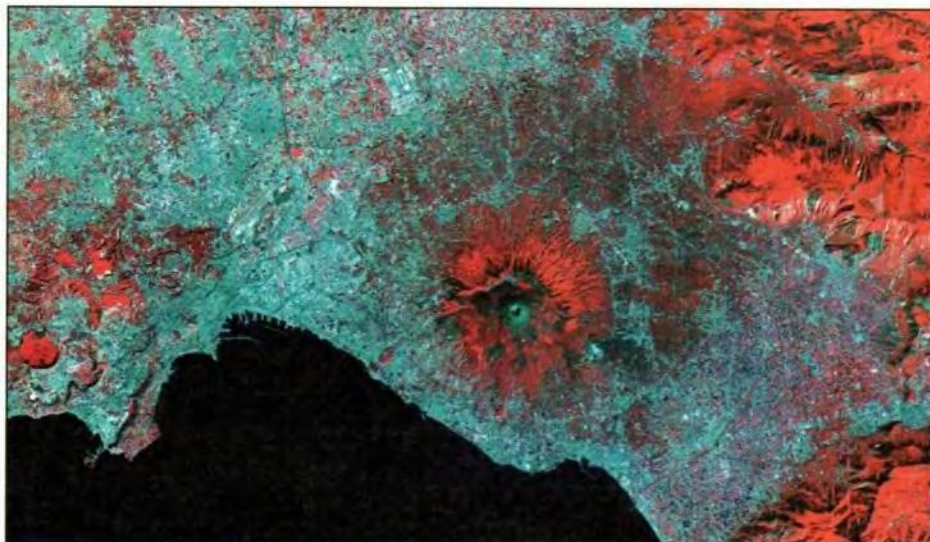
Los riesgos naturales son parte de la vida en la Tierra. Cada día afectan de forma adversa literalmente a millones de personas en todo el mundo y son responsables de daños asombrosos. Entre los procesos terrestres peligrosos estudiados por los geólogos, se cuentan los volcanes, las inundaciones, los terremotos y los deslizamientos. Por supuesto, los riesgos geológicos son simplemente procesos naturales. Sólo se vuelven peligrosos cuando las personas intentan vivir donde estos procesos suceden (Figura 1.1).

Los recursos representan otro importante foco de la Geología, que es de gran valor práctico para las personas. Estos recursos son el agua y el suelo, una gran variedad de minerales metálicos y no metálicos, y la energía. En conjunto, forman la verdadera base de la civilización moderna. La Geología aborda no sólo la formación y la existencia de estos recursos vitales, sino también el mantenimiento de sus existencias y el impacto ambiental de su extracción y su uso.

El rápido crecimiento de la población mundial y las aspiraciones de todos a un mejor modo de vida están complicando todas las cuestiones ambientales. Cada año la población terrestre aumenta en cien millones de personas, lo cual significa una demanda cada vez mayor de recursos y una presión creciente para que las personas habiten en ambientes con peligros geológicos significativos.

No sólo los procesos geológicos tienen un impacto sobre las personas, sino que nosotros, los seres humanos, podemos influir de forma notable en los procesos geológicos también. Por ejemplo, las crecidas de los ríos son algo natural, pero las actividades humanas, como aclaramiento de bosques, construcción de ciudades y construcción de embalses, pueden cambiar su magnitud y frecuencia. Por desgracia, los sistemas naturales no se ajustan siempre a los cambios artificiales de maneras que podamos prever. Así, una alteración en el medio ambiente que se preveía beneficiosa para la sociedad a menudo tiene el efecto opuesto.

► **Figura 1.1** Imagen del Monte Vesuvio, en Italia, en septiembre de 2000. Este gran volcán está rodeado por la ciudad de Nápoles y la Bahía de Nápoles. El año 70 a.C. el Vesuvio entró en erupción de una manera explosiva y enterró las poblaciones de Pompeya y Herculano en cenizas volcánicas. ¿Volverá a ocurrir? Los riesgos geológicos son procesos naturales. Sólo se convierten en riesgos cuando las personas intentan vivir donde estos procesos tienen lugar. (Imagen cortesía de la NASA.)



En determinados puntos de este libro, tendrán la oportunidad de examinar distintos aspectos de nuestra relación con el medio físico. Será raro encontrar un capítulo que no se refiera a algún aspecto de los riesgos naturales, las cuestiones ambientales o los recursos. Partes importantes de algunos capítulos proporcionan el conocimiento geológico básico y los principios necesarios para comprender los problemas ambientales. Además, algunos recuadros de especial interés del libro se concentran en la Geología, las personas y el medio ambiente exponiendo estudios de casos o destacando una cuestión de actualidad.

Algunas reseñas históricas acerca de la Geología

La naturaleza de nuestro planeta (sus materiales y procesos) ha sido objeto de estudio durante siglos. Los escritos sobre temas como los fósiles, las gemas, los terremotos y los volcanes se remontan a los griegos, hace más de 2.300 años.

Sin duda, el filósofo griego más influyente fue Aristóteles. Por desgracia, las explicaciones de Aristóteles sobre la naturaleza del mundo no se basaron en observaciones y experimentos sagaces. Antes bien, fueron opiniones arbitrarias. Aristóteles creía que las rocas habían sido creadas bajo la «influencia» de las estrellas y que los terremotos se producían cuando el aire entraba con fuerza en la tierra, se calentaba por los fuegos centrales y escapaba de manera explosiva. Cuando se enfrentaba a un pez fósil, explicaba que «muchos peces viven en la tierra inmóviles y se encuentran cuando se excava».

Aunque las explicaciones de Aristóteles pudieran ser adecuadas para su época, por desgracia se las siguió

aceptando durante muchos siglos, impidiendo así la elaboración de explicaciones más racionales. Frank D. Adams afirma en *The Birth and Development of the Geological Sciences* (Nueva York: Dover, 1938) (El nacimiento y desarrollo de las Ciencias Geológicas) que «a lo largo de toda la Edad Media Aristóteles fue considerado el principal filósofo, aquél cuya opinión sobre cualquier tema era la definitiva y más autorizada».

Catastrofismo. A mediados del siglo XVI, James Ussher, arzobispo anglicano de Armagh, primado de Irlanda, publicó un importante trabajo que tuvo influencias inmediatas y profundas. Afamado estudioso de la Biblia, Ussher construyó una cronología de la historia humana y de la Tierra en la que determinó que la Tierra tenía sólo unos pocos miles de años, ya que había sido creada en el 4004 a.C. El tratado de Ussher consiguió aceptación generalizada entre los líderes científicos y religiosos de Europa, y su cronología acabó figurando impresa en los márgenes de la misma Biblia.

Durante los siglos XVII y XVIII la doctrina del **catastrofismo** influyó con gran fuerza en el pensamiento sobre la dinámica de la tierra. Dicho brevemente, los catastrofistas creían que los paisajes de la Tierra habían sido formados inicialmente por grandes catástrofes. Por ejemplo, las montañas o los cañones, cuya formación hoy sabemos que requiere mucho tiempo, se explicaban como si fueran el resultado de desastres súbitos y a menudo a escala planetaria, producidos por causas desconocidas que ya no actúan. Esta filosofía era un intento por encajar la velocidad de los procesos terrestres con las ideas entonces reinantes sobre la antigüedad de la Tierra.

La relación entre el catastrofismo y la edad de la Tierra se puede resumir como sigue:

Que la Tierra había sufrido grandes y extraordinarios cambios durante su oscuro pasado era claramente evidente para cualquier ojo inquisitivo; pero concentrar esos cambios en unos pocos y breves milenios precisaba una filosofía hecha a medida, una filosofía cuya base era el cambio súbito y violento*.

Nacimiento de la Geología moderna. La Geología moderna se inició en los años finales del siglo XVIII cuando James Hutton, médico y terrateniente escocés, publicó su *Theory of the Earth (Teoría de la Tierra)*. En su trabajo, Hutton estableció un principio que constituye el pilar de la Geología actual: el **uniformismo**. Establece simplemente que las leyes físicas, químicas y biológicas que actúan hoy, lo han hecho también en el pasado geológico. Esto significa que las fuerzas y los procesos que en la actualidad observamos que dan forma a nuestro planeta actuaron también en el pasado. Por tanto, para comprender las rocas antiguas, debemos entender primero los procesos petrogenéticos y sus resultados en la actualidad. Esta idea suele expresarse diciendo que «el presente es la clave del pasado».

Antes de la *Theory of the Earth* de Hutton, nadie había demostrado de manera eficaz que los procesos geológicos se producían a lo largo de períodos extremadamente largos. Sin embargo, Hutton sostuvo con persuasión que fuerzas que parecen pequeñas producen, a lo largo de lapsos prolongados de tiempo, efectos exactamente igual de grandes que los derivados de acontecimientos catastróficos súbitos. A diferencia de sus predecesores, Hutton citó con sumo cuidado observaciones verificables para apoyar sus ideas.

Por ejemplo, cuando sostenía que las montañas eran esculpidas y, en última instancia, destruidas por la meteorización y la acción de las aguas superficiales, y que sus restos eran llevados a los océanos por procesos observables, Hutton dice: «Tenemos una cadena de hechos que demuestran claramente (...) que los materiales de las montañas destruidas han viajado a través de los ríos»; y además: «No hay un solo paso en toda esta sucesión de acontecimientos (...) que no se perciba en la actualidad». Pasó a continuación a resumir este pensamiento planteando una pregunta y proporcionando inmediatamente la respuesta. «¿Qué más podemos necesitar? Nada, salvo tiempo.»

En nuestros días, los principios básicos del uniformismo son tan viables como en época de Hutton. De hecho, nos damos cuenta con más fuerza que nunca de que el presente nos permite una percepción del pasado y que las leyes físicas, químicas y biológicas que gobiernan los pro-

cesos geológicos se mantienen invariables a lo largo del tiempo. Sin embargo, también entendemos que esta doctrina no debería tomarse demasiado al pie de la letra. Cuando se dice que en el pasado los procesos geológicos fueron los mismos que los que operan en la actualidad no se pretende sugerir que tuvieran siempre la misma importancia relativa o que actuaran precisamente a la misma velocidad. Además, algunos procesos geológicos importantes no pueden observarse en la actualidad, pero hay pruebas fehacientes de que suceden. Por ejemplo, sabemos que la Tierra ha sufrido impactos de grandes meteoritos aunque no haya testigos humanos. Acontecimientos como estos alteraron la corteza de la Tierra, modificaron su clima e influyeron enormemente en la vida sobre el planeta.

La aceptación del uniformismo significó la aceptación de una historia muy larga para la Tierra. Aunque la intensidad de los procesos terrestres varía, estos siguen tardando mucho en crear y destruir los principales accidentes geográficos del paisaje.

Por ejemplo, los geólogos han llegado a la conclusión de que en el pasado existieron montañas en zonas de las actuales Minnesota, Wisconsin y Michigan. En la actualidad, la región consiste en colinas bajas y llanuras. La erosión (proceso que desgasta la Tierra) destruyó de forma gradual esos picos. Los cálculos indican que el continente norteamericano está siendo rebajado a un ritmo de unos 3 centímetros cada 1.000 años. A este ritmo, el agua, el viento y el hielo tardarían 100 millones de años en rebajar unas montañas cuya altitud fuera de 3.000 metros.

Pero incluso este lapso de tiempo es relativamente pequeño en la escala temporal de la historia de la Tierra; el registro rocoso contiene pruebas de que la Tierra ha experimentado muchos ciclos de formación y erosión de montañas. En lo referente a la naturaleza en continuo cambio de la Tierra a través de grandes períodos de tiempo, Hutton hizo una afirmación que se convertiría en una cita clásica. En la conclusión de su famoso artículo publicado en 1788 en las *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, afirmó: «Por consiguiente, el resultado de nuestra presente investigación es que no encontramos vestigios de un principio; ni perspectivas de un fin». Una cita de William L. Stokes resume la importancia del concepto básico de Hutton:

En el sentido de que el uniformismo requiere la actuación de leyes o principios intemporales e invariables, podemos decir que nada de nuestro conocimiento, incompleto, pero extenso, discrepa de él[†].

En los capítulos siguientes examinaremos los materiales que componen nuestro planeta y los procesos que

* H. E. Brown, V. E. Monnett y J. W. Stovall, *Introduction to Geology* (Nueva York: Blaisdell, 1958).

[†] *Essentials of Earth History* (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1966), pág. 34.

lo modifican. Es importante recordar que, si bien muchos rasgos de los paisajes de nuestro entorno parecen no cambiar durante los decenios que nosotros los observamos, sin embargo, sí están cambiando, pero a escalas temporales del orden de centenares, millares o incluso muchos millones de años.

Tiempo geológico

Aunque Hutton y otros reconocieron que el tiempo geológico es extremadamente largo, no tuvieron métodos para determinar con precisión la edad de la Tierra. Sin embargo, en 1896 se descubrió la radiactividad. La utilización de la radiactividad para datación se intentó por primera vez en 1905 y se ha perfeccionado desde entonces. Los geólogos pueden ahora asignar fechas bastante exactas a acontecimientos de la historia de la Tierra*. Por ejemplo, sabemos que los dinosaurios se extinguieron hace alrededor de 65 millones de años. En la actualidad se sitúa la edad de la Tierra en unos 4.500 millones de años.

La datación relativa y la escala de tiempo geológico

Durante el siglo XIX, mucho antes del advenimiento de la datación radiométrica, se desarrolló una escala de tiempo geológico utilizando los principios de la datación relativa. Datación relativa significa que los acontecimientos se colocan en su secuencia u orden apropiados sin conocer su edad en años. Esto se hace aplicando principios como la **ley de superposición** (*super* = sobre, *positum* = situar), que establece que en las capas de rocas sedimentarias o de coladas de lava, la capa más joven se encuentra en la parte superior y la más antigua, en la inferior (en el supuesto de que nada haya volcado las capas, lo cual a veces sucede). El Gran Cañón de Arizona proporciona un buen ejemplo, en el que las rocas más antiguas se sitúan en el interior del desfiladero y las rocas más jóvenes se hallan en el borde. Así, la ley de superposición establece el orden de las capas de roca (pero no, por supuesto, sus edades numéricas). En nuestros días, esta proposición parece elemental, pero hace 300 años, significó un gran avance en el razonamiento científico al establecer una base racional para las determinaciones del tiempo relativo.

Los fósiles, restos o impresiones de vida prehistórica, fueron también esenciales para el desarrollo de la escala de tiempo geológico. Los fósiles son la base del principio de sucesión biótica, que establece que *los or-*

ganismos fósiles se sucedieron unos a otros en un orden definido y determinable, y, por tanto, cualquier período geológico puede reconocerse por su contenido en fósiles. Este principio se desarrolló con gran laboriosidad durante decenios recogiendo fósiles de incontables capas de rocas por todo el mundo. Una vez establecido, este principio permitió a los geólogos identificar rocas de la misma edad en lugares completamente separados y construir la escala de tiempo geológico mostrada en la Figura 1.2.

Obsérvese que las unidades en que se divide el tiempo geológico no comprenden necesariamente el mismo número de años. Por ejemplo, el período Cámbrico duró unos 50 millones de años, mientras que el Silúrico abarcó sólo 26 millones. Como destacaremos de nuevo en el Capítulo 9, esta situación existe porque la base para el establecimiento de la escala de tiempo no fue el ritmo regular de un reloj, sino el carácter variable de las formas de vida a lo largo del tiempo. Las fechas absolutas se añadieron mucho después del establecimiento de la escala temporal. Un vistazo a la Figura 1.2 revela también que el eón fanerozoico se divide en muchas más unidades que los eones anteriores aun cuando abarque sólo alrededor del 12 por ciento de la historia de la Tierra. El escaso registro fósil de esos primeros eones es la principal razón de la falta de detalle en esta porción de la escala. Sin fósiles abundantes, los geólogos pierden su principal herramienta para subdividir el tiempo geológico.

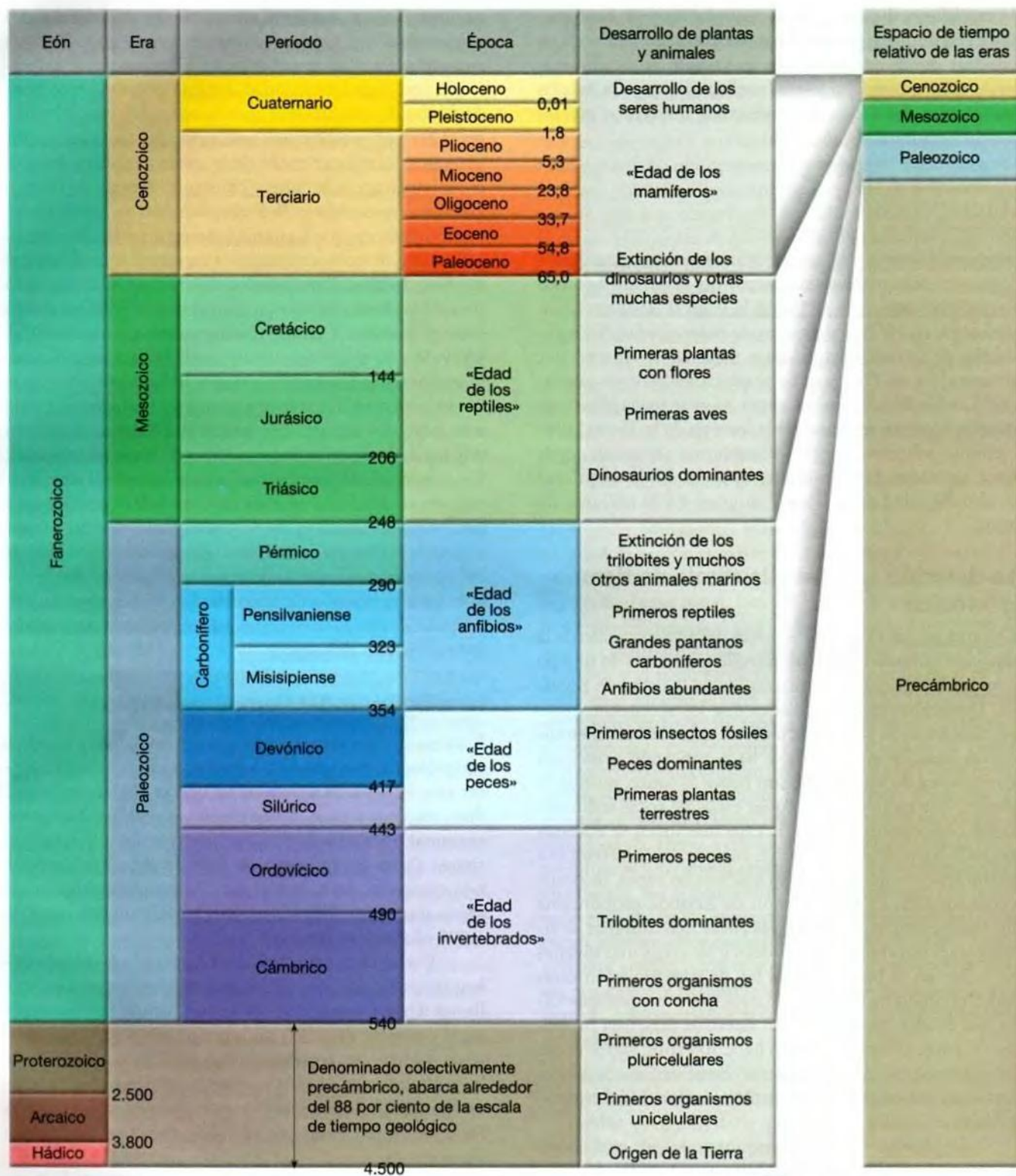
La magnitud del tiempo geológico

El concepto de tiempo geológico es nuevo para muchos no geólogos. Las personas estamos acostumbradas a tratar con incrementos de tiempo que se miden en horas, días, semanas y años. Nuestros libros de Historia suelen examinar acontecimientos que transcurren a lo largo de siglos; ahora bien incluso un siglo es difícil de apreciar por completo. Para la mayoría de nosotros, algo o alguien que tenga 90 años es *muy viejo*, y un artefacto de 1.000 años es *antiguo*.

Por el contrario, quienes estudian la Geología deben tratar a diario con enormes períodos temporales: millones o miles de millones de años. Cuando se contempla en el contexto de 4.500 millones de años de antigüedad de la Tierra, un acontecimiento geológico que ocurrió hace 10 millones de años puede ser calificado de «reciente» por un geólogo, y una muestra de roca que haya sido fechada en 10 millones de años puede denominarse «joven».

En el estudio de la Geología, es importante la apreciación de la magnitud del tiempo geológico, porque muchos procesos son tan graduales que se necesitan enormes lapsos de tiempo antes de que se produzcan resultados significativos.

* En el Capítulo 9 hay una discusión más completa sobre esta cuestión.



▲ **Figura 1.2** Escala de tiempo geológico. Las cifras indicadas en la escala vertical representan el tiempo en millones de años antes del presente. Estas fechas fueron añadidas mucho después de que se hubiera establecido la escala de tiempo utilizando técnicas de datación relativa. El Precámbrico representa más del 88 por ciento del tiempo geológico. (Datos procedentes de la Sociedad Geológica de América.)

¿Qué representan 4.500 millones de años? Si empezáramos a contar a un ritmo de un número por segundo y continuáramos 24 horas al día, siete días a la semana y nunca paráramos, ¡tardaríamos aproximadamente dos vidas (150 años) en alcanzar los 4.500 millones! Otra interesante base de comparación es la siguiente:

Comprimamos, por ejemplo, los 4.500 millones de años de tiempo geológico en un solo año. A esa escala, las rocas más antiguas que conocemos tienen fecha de mediados de marzo. Los seres vivos aparecieron en el mar por primera vez en mayo. Las plantas y los animales terrestres emergieron a finales de noviembre y las amplias ciénagas que formaron los depósitos de carbón florecieron aproximadamente durante cuatro días a principios de diciembre. Los dinosaurios dominaron la Tierra a mediados de diciembre, pero desaparecieron el día 26, más o menos a la vez que se levantaron por primera vez las Montañas Rocosas. Criaturas de aspecto humano aparecieron en algún momento de la tarde del 31 de diciembre y los casquetes polares más recientes empezaron a retroceder desde el área de los Grandes Lagos y el norte de Europa alrededor de 1 minuto y 15 segundos antes de la medianoche del 31. Roma gobernó el mundo occidental durante cinco segundos, desde las 11 h 59,45 hasta las 11 h 59,50. Colón descubrió América tres segundos antes de la medianoche, y la ciencia de la Geología nació con los escritos de James Hutton pasado un poco el último segundo del final de nuestro memorable año*.

Lo anterior no es más que una de las muchas analogías que se han concebido en un intento por comunicar la magnitud del tiempo geológico. Aunque útiles, todas ellas, por muy inteligentes que sean, sólo empiezan a ayudarnos a comprender la vasta extensión de la historia de la Tierra.

Naturaleza de la investigación científica

Toda la ciencia se basa en la suposición de que el mundo natural se comporta de una manera constante y predecible que puede comprenderse mediante el estudio atento y sistemático. El objetivo general de la ciencia es descubrir los modelos subyacentes en la naturaleza y luego utilizar ese conocimiento para hacer predicciones sobre lo que cabría o no cabría esperar que ocurriera dados cier-

tos hechos y circunstancias. Por ejemplo, sabiendo cómo se forman los depósitos de petróleo, los geólogos pueden predecir los sitios más favorables para la exploración y, quizá igual de importante, cómo evitar las regiones con escaso o nulo potencial.


① El desarrollo de nuevos conocimientos científicos implica algunos procesos lógicos básicos que son universalmente aceptados. Para determinar qué está ocurriendo en el mundo natural, los científicos recogen «datos» científicos a través de la observación y la medida. Como el error es inevitable, la exactitud de una medida o una observación particulares es siempre cuestionable. No obstante, esos datos son esenciales para la ciencia y sirven como trampolín para el desarrollo de las teorías científicas (véase Recuadro 1.1).

Hipótesis

② Una vez recogidos los datos y formulados los principios que describen un fenómeno natural, los investigadores intentan explicar cómo o por qué las cosas suceden de la manera observada. Lo hacen elaborando una explicación provisional (o no probada), que denominamos una hipótesis científica o modelo. (El término *modelo*, aunque a menudo se utiliza como sinónimo de hipótesis, es un término menos preciso, ya que también se emplea a veces para describir una teoría científica.) Es mejor que un investigador pueda formular más de una hipótesis para explicar un conjunto determinado de observaciones. Si un solo investigador no puede idear múltiples modelos, los otros miembros de la comunidad científica desarrollarán casi siempre explicaciones alternativas. Con frecuencia, a todo ello le sigue un debate encendido. Como consecuencia, quienes proponen modelos opuestos llevan a cabo una investigación extensa y los resultados se ponen a disposición del resto de la comunidad científica a través de las publicaciones científicas.

③ Antes de que una hipótesis sea aceptada como parte del conocimiento científico, debe someterse a pruebas y análisis objetivos. (Si una hipótesis no puede probarse, no es científicamente útil, por muy interesante que pueda parecer.) El proceso de verificación requiere que las predicciones se hagan según el modelo que se esté considerando y que las predicciones se prueben comparándolas con observaciones objetivas de la naturaleza. En otras palabras, las hipótesis deben poder aplicarse a observaciones distintas de las utilizadas para formularlas en primer lugar. A la larga, las hipótesis que suspenden esta prueba se descartan. La historia de la ciencia está repleta de hipótesis descartadas. Una de las mejor conocidas es la idea de que la Tierra era el centro del universo, una propuesta que se sustentaba en el aparente movimiento diario del Sol, la Luna y las estrellas alrededor de la Tierra. Como afirmó con tanta habilidad el matemático Jacob Bronowski: «La

* Don L. Eicher, *Geologic Time*, segunda edición (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1978), págs. 18-19. Reimpreso con permiso.


Recuadro 1.1 ▶ Entender la Tierra
El estudio de la Tierra desde el espacio

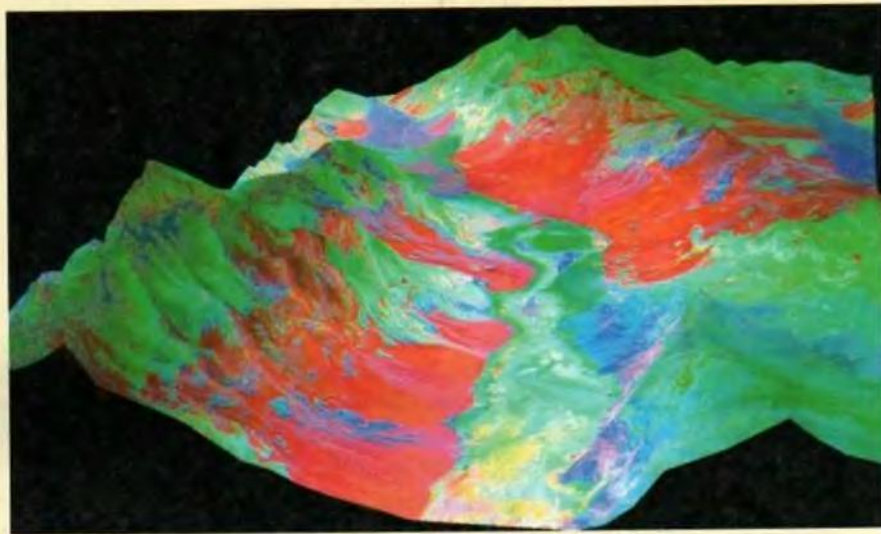
Los datos científicos se recogen de muchas maneras, como en los estudios de laboratorios y en las observaciones y mediciones de campo. Las imágenes de satélite como la que muestra la Figura 1.A son otra fuente de datos útil. Estas imágenes proporcionan perspectivas difíciles de obtener mediante otras fuentes más tradicionales. Además, los instrumentos de alta tecnología instalados a bordo de muchos satélites permiten a los científicos recoger información de regiones remotas cuyos datos serían escasos de otro modo.

En la imagen de la Figura 1.A se ha empleado el Radiómetro Espacial de Emisión y Reflexión Térmica Avanzado (ASTER). Puesto que los distintos materiales reflejan y emiten la energía de maneras diferentes, ASTER puede proporcionar información detallada sobre la composición de la superficie de la Tierra. La Figura 1.A es una imagen tridimensional enfocada hacia el norte del Valle de la Muerte, en California. Los datos han sido realizados por computador para exagerar las variaciones de color que destacan las diferencias en los tipos de materiales de la superficie.

Los depósitos de sal del fondo del Valle de la Muerte aparecen como sombras

amarillas, verdes, moradas y rosas, indicando la presencia de carbonatos, sulfatos y cloruros. Las Montañas Panamint al oeste (izquierda) y las Montañas Black al este están formadas por calizas, areniscas y lutitas sedimentarias, y rocas metamór-

ficas. En las zonas de color rojo brillante domina el cuarzo, que se encuentra en la arenisca; las zonas de color verde son calizas. En la parte central inferior de la imagen aparece Badwater, el punto más bajo de Norteamérica.



▲ **Figura 1.A** Esta imagen de satélite muestra información detallada sobre la composición de los materiales de la superficie en el Valle de la Muerte, California. Se realizó superponiendo los datos del infrarrojo térmico nocturno, adquiridos el 7 de abril de 2000, a los datos topográficos del Servicio Geológico de los Estados Unidos. (Imagen cortesía de la NASA.)

ciencia es muchas cosas, pero al final todos vuelven a esto: la ciencia es la aceptación de lo que funciona y el rechazo de lo que no lo hace».

Teoría

Cuando ha sobrevivido a una comprobación intensiva y cuando se han eliminado los modelos competidores, una hipótesis puede ser elevada al estatus de **teoría científica**. En el lenguaje cotidiano solemos decir «eso es sólo una teoría». Pero una teoría científica es una visión bien comprobada y ampliamente aceptada que, en opinión de la comunidad científica, es la que mejor explica ciertos hechos observables.

Las teorías muy documentadas se sostienen con un elevado grado de confianza. Las teorías de esta talla con un gran alcance tienen un estatus especial. Se denominan **paradigmas**, porque explican una gran cantidad de aspectos interrelacionados del mundo natural. Por ejem-

plo, la teoría de la tectónica de placas es un paradigma de las ciencias geológicas que proporciona un marco para la comprensión del origen de las montañas, los terremotos y la actividad volcánica. Además, la tectónica de placas explica la evolución de los continentes y las cuencas oceánicas a lo largo del tiempo (tema que consideraremos más adelante en este capítulo).

El método científico

El proceso que se acaba de describir, en el cual los investigadores recogen datos a través de observaciones y formulan hipótesis y teorías científicas, se denomina **método científico**. Al contrario de la creencia popular, el método científico no es una receta estándar que los científicos aplican de una manera rutinaria para desenmarañar los secretos de nuestro mundo natural. Antes bien, es una empresa que implica creatividad e intuición. Rutherford y Ahlgren lo expresaron de esta forma: «Inventar hipóte-

sis o teorías para imaginar cómo funciona el mundo y luego apañárselas para ponerlas a prueba con los hechos reales es tan creativo como escribir poesía, componer música o diseñar rascacielos»*.

• No hay un camino fijo que los científicos puedan seguir siempre y les conduzca infaliblemente al conocimiento científico. No obstante, en muchas investigaciones científicas intervienen las siguientes etapas: (1) recolección de datos científicos a través de la observación y la medida; (2) desarrollo de una o varias hipótesis de trabajo que expliquen esos datos; (3) desarrollo de observaciones y experimentos para probar la hipótesis; y (4) aceptación, modificación o rechazo de las hipótesis sobre la base de extensas pruebas (véase Recuadro 1.2).

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

*En clase, se comparó una hipótesis con una teoría.
¿En qué se diferencian cada una de ellas de una ley científica?*

Una ley científica es un principio básico que describe un comportamiento particular de la naturaleza que, en general, tiene un alcance reducido y se puede exponer brevemente, a menudo como una ecuación matemática simple. Dado que se ha demostrado una y otra vez que las leyes científicas coinciden con las observaciones y las medidas, se descartan en muy pocas ocasiones. Sin embargo, puede ser necesario modificar las leyes para ajustarlas a los nuevos descubrimientos. Por ejemplo, las leyes del movimiento de Newton son todavía útiles para las aplicaciones cotidianas (la NASA las utiliza para calcular las trayectorias de los satélites), pero no funcionan a velocidades próximas a la velocidad de la luz. Por ello, han sido sustituidas por la teoría de la relatividad de Einstein.

• Otros descubrimientos científicos pueden proceder de ideas simplemente teóricas, que se enfrentan resueltamente a un extenso examen. Algunos investigadores utilizan computadores de gran velocidad para simular lo que sucede en el mundo «real». Estos modelos son útiles para tratar los procesos naturales que suceden en escalas de tiempo muy largas o que se producen en lugares extremos o inaccesibles. También, otros avances científicos tienen lugar después de un suceso totalmente inesperado durante un experimento. Estos descubrimientos casuales son más que pura suerte; como dijo Louis Pasteur, «en el campo de la observación, la suerte favorece sólo a la mente preparada».

El conocimiento científico se adquiere a través de varias vías, de modo que quizá sea mejor describir la naturaleza de la investigación científica como métodos de la ciencia y no como el método científico. Además, debe recordarse siempre que incluso las teorías científicas más convincentes siguen siendo sólo explicaciones simplificadas del mundo natural.

La tectónica de placas y la investigación científica

En las páginas de este libro tendrá muchas oportunidades para desarrollar y reforzar su comprensión sobre el funcionamiento de la ciencia y, en particular, sobre el funcionamiento de la Geología. Aprenderá los métodos de recolección de datos y desarrollará un sentido de las técnicas de observación y los procesos de razonamiento que utilizan los geólogos. El Capítulo 2, «Tectónica de placas: el desarrollo una revolución científica», es un ejemplo excelente.

En las últimas décadas, se ha aprendido mucho sobre la dinámica de nuestro planeta. Este período ha constituido una revolución sin igual en nuestra comprensión de la Tierra. La revolución empezó a principios del siglo XX con la propuesta radical de la *deriva continental*, la idea de que los continentes se movían sobre la superficie del planeta. Esta hipótesis contradecía el punto de vista establecido, según el cual los continentes y las cuencas oceánicas eran características permanentes y estacionarias sobre la superficie terrestre. Por esta razón, la idea de los continentes a la deriva se recibió con gran escepticismo. Tuvieron que pasar más de 50 años antes de que se recogieran datos suficientes para transformar esta hipótesis controvertida en una teoría sólida que enlazara todos los procesos básicos que, se sabía, actuaban en la Tierra. La teoría que finalmente apareció, denominada **teoría de la tectónica de placas**, proporcionó a los geólogos el primer modelo exhaustivo del funcionamiento interno de la Tierra.

Al leer el Capítulo 2, no sólo adquirirá conocimientos sobre el funcionamiento de nuestro planeta, sino que, además, verá un ejemplo excelente de cómo las «verdades» geológicas se ponen al descubierto y se reelaboran.

Una visión de la Tierra



Introducción a la Geología
▼ Una visión de la Tierra

Una imagen de la Tierra proporcionó a los astronautas del *Apolo 8* y al resto de la humanidad una perspectiva única de nuestro planeta. Vista desde el espacio, la Tierra es espectacular por su belleza y llamativa por su soledad.

* F. James Rutherford y Andrew Ahlgren, *Science for All Americans* (Nueva York: Oxford University Press, 1990), pág. 7.



Recuadro 1.2 ▶ Entender la Tierra

¿Se mueven los glaciares? Una aplicación del método científico

El estudio de los glaciares proporciona una temprana aplicación del método científico. En las zonas altas de los Alpes suizos y franceses existen pequeños glaciares en las zonas superiores de algunos valles. A finales del siglo XVIII y principios del XIX, los agricultores y ganaderos de esos valles sugerían que los glaciares de los trechos más elevados de los valles habían sido antiguamente mucho mayores y ocupado las zonas bajas del valle. Basaban su explicación en el hecho de que en el suelo de los valles se encontraban cantos angulosos y otros derrubios rocosos dispersos que parecían idénticos a los materiales que podían ver en los glaciares y cerca de ellos en las cabeceras de los valles.

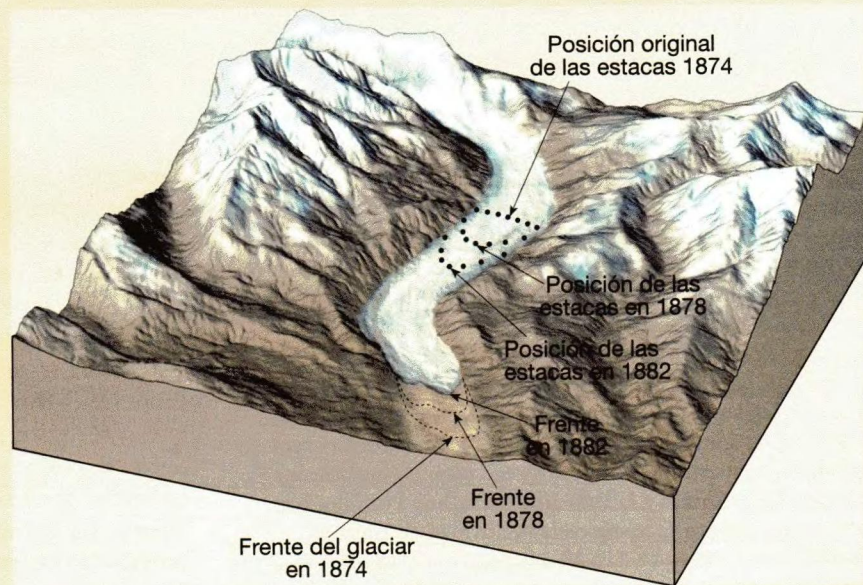
Aunque la explicación para estas observaciones parecía lógica, otros no aceptaban la idea de que masas de hielo de centenares de metros de grosor fueran capaces de moverse. El desacuerdo se resolvió al diseñarse y llevarse a cabo un experimento sencillo para comprobar la hipótesis de que el hielo del glaciar podía moverse.

Se colocaron marcadores en línea recta atravesando por completo un glaciar alpino, y la posición de la línea se señaló en las paredes del valle de manera que, si el hielo se movía, pudiera detectarse el cambio de posición. Después de un año o dos, los resultados eran claros: los marcadores colocados en el glaciar habían descendido por el valle, demostrando que el hielo glaciar se mueve. Además, el experimento demostró que, dentro de un glaciar, el hielo no se mueve a una velocidad uniforme, porque los marcadores del centro avanzaban más

deprisa que los que había a lo largo de los márgenes. Aunque la mayor parte de los glaciares se mueve demasiado despacio para una detección visual directa, el experimento demostró de manera satisfactoria que se produce movimiento. En los años siguientes se repitió muchas veces este experimento utilizando técnicas de vigilancia más modernas y precisas. Cada vez, se verificaron las relaciones básicas establecidas por los primeros intentos.

El experimento ilustrado en la Figura 1.B se llevó a cabo en el glaciar Rhone

suizo a finales del siglo XIX. No sólo permitió trazar el movimiento de los marcadores dentro del hielo, sino también cartografiar la posición del frente del glaciar. Obsérvese que, aun cuando el hielo situado dentro del glaciar estuviera avanzando, el frente de hielo estaba retrocediendo. Como suele ocurrir en ciencia, las observaciones y los experimentos diseñados para comprobar una hipótesis proporcionan nueva información que precisa análisis y explicación ulteriores.



▲ **Figura 1.B** Movimiento del hielo y cambios en el frente del glaciar Rhone, Suiza. En este estudio clásico de un glaciar de valle, el movimiento de las estacas demostró claramente que el hielo se mueve más despacio a lo largo de los lados del glaciar. Obsérvese también que, aun cuando el frente de hielo estaba retrocediendo, el hielo dentro del glaciar seguía avanzando.

Una imagen como ésta nos recuerda que la Tierra es, después de todo, un planeta pequeño, autónomo y, de algún modo, incluso frágil.

A medida que nos acercamos a nuestro planeta desde el espacio, se pone de manifiesto que la Tierra es mucho más que roca y suelo. De hecho, los rasgos más llamativos no son los continentes, sino las nubes turbulentas suspendidas encima de la superficie y el enorme océano global. Estas características subrayan la importancia del aire y el agua en nuestro planeta.

La visión cercana de la Tierra desde el espacio nos ayuda a apreciar por qué el medio físico se divide tradicionalmente en tres partes principales: la porción de agua de nuestro planeta, la hidrosfera; el envoltorio gaseoso de la Tierra, la atmósfera; y, por supuesto, la Tierra sólida.

Debe destacarse que nuestro medio ambiente está muy integrado. No está dominado únicamente por rocas, agua o aire. En cambio, se caracteriza por interacciones continuas entre ellas a medida que el aire entra en con-

tacto con las rocas, las rocas con el agua y el agua con el aire. Además, la biosfera, que constituye la totalidad de vida vegetal y animal sobre nuestro planeta, interacciona con cada uno de los tres reinos físicos y es una parte igualmente integrada del planeta. Así, se puede pensar que la Tierra está formada por cuatro esferas principales: la hidrosfera, la atmósfera, la Tierra sólida y la biosfera.

Las interacciones entre las cuatro esferas de la Tierra son incalculables. La línea de costa es un lugar obvio de encuentro entre las rocas, el agua y el aire. Las olas oceánicas, que se forman por el arrastre de aire que se mueve sobre el mar, se rompen contra la costa rocosa. La fuerza del agua puede ser poderosa y el trabajo de erosión que se lleva a cabo, importante.

Hidrosfera

A la Tierra se le llama a veces el planeta azul. El agua, más que cualquier otra cosa, hace que la Tierra sea única. La hidrosfera es una masa de agua dinámica que está en movimiento continuo, evaporándose de los océanos a la atmósfera, precipitándose sobre la Tierra y volviendo de nuevo al océano por medio de los ríos. El océano global es, por supuesto, el rasgo más destacado de la hidrosfera: cubre casi el 71 por ciento de la superficie terrestre hasta una profundidad media de unos 3.800 metros y representa alrededor del 97 por ciento del agua de la Tierra. Sin embargo, la hidrosfera incluye también el agua dulce que se encuentra en los torrentes, lagos y glaciares. Además, el agua es un componente importante de todos los seres vivos.

Aunque estas últimas fuentes constituyen tan sólo una diminuta fracción del total, son mucho más importantes de lo que indica su escaso porcentaje. Además de proporcionar el agua dulce, tan vital para la vida en la Tierra, los torrentes, glaciares y aguas subterráneas son responsables de esculpir y crear muchos de los variados paisajes de nuestro planeta.

Atmósfera

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa denominada atmósfera. En comparación con la Tierra sólida, la atmósfera es delgada y tenue. La mitad se encuentra por debajo de una altitud de 5,6 kilómetros y el 90 por ciento ocupa una franja de tan sólo 16 kilómetros desde la superficie de la tierra. En comparación, el radio de la Tierra sólida (distancia desde la superficie hasta el centro) es de unos 6.400 kilómetros. A pesar de sus modestas dimensiones, este delgado manto de aire es una parte integral del planeta. No sólo proporciona el aire que respiramos, sino que también nos protege del intenso calor solar y de las peligrosas radiaciones ultravioletas. Los intercambios de energía que se producen de manera continua entre la atmósfera y la superficie de la Tierra y entre la atmósfera y el espacio, producen los efectos que denominamos tiempo y clima.

Si, como la Luna, la Tierra no tuviera atmósfera, nuestro planeta no sólo carecería de vida, sino que, además, no actuarían muchos de los procesos e interacciones que hacen de la superficie un lugar tan dinámico. Sin la meteorización y la erosión, la faz de nuestro planeta se parecería mucho a la superficie lunar, que no ha cambiado apreciablemente en casi tres mil millones de años de historia.

Biosfera

La biosfera incluye toda la vida en la Tierra. Está concentrada cerca de la superficie en una zona que se extiende desde el suelo oceánico hasta varios kilómetros de la atmósfera. Las plantas y los animales dependen del medio ambiente físico para los procesos básicos de la vida. Sin embargo, los organismos hacen algo más que responder a su medio ambiente físico. A través de incontables interacciones, las formas de vida ayudan a mantener su medio y lo alteran. Sin la vida, la constitución y la naturaleza de la Tierra sólida, la hidrosfera y la atmósfera serían muy diferentes. (G. P. Stevens, 1964)

Tierra sólida

Debajo de la atmósfera y los océanos se encuentra la Tierra sólida. Gran parte de nuestro estudio de la Tierra sólida se concentra en los accidentes geográficos superficiales más accesibles. Por fortuna, muchos de estos accidentes representan las expresiones externas del comportamiento dinámico de los materiales que se encuentran debajo de la superficie. Examinando los rasgos superficiales más destacados y su extensión global, podemos obtener pistas para explicar los procesos dinámicos que han conformado nuestro planeta. Un primer vistazo a la estructura del interior de la Tierra y a las principales estructuras de la superficie de la Tierra sólida se presentará más adelante en este capítulo.

La Tierra como un sistema

Cualquiera que estudie la Tierra aprende pronto que nuestro planeta es un cuerpo dinámico con muchas partes o esferas separadas pero interactuantes. La hidrosfera, la atmósfera, la biosfera, la Tierra sólida y todos sus componentes pueden estudiarse por separado. Sin embargo, las partes no están aisladas. Cada una se relaciona de alguna manera con las otras para producir un todo complejo y continuamente interactuante que denominamos sistema Tierra.

La ciencia del sistema Tierra

Un ejemplo sencillo de las interacciones entre distintas partes del sistema Tierra tiene lugar cada invierno, cuando la humedad se evapora del océano Pacífico y cae después

en forma de lluvia en las colinas del sur de California, provocando deslizamientos destructivos. Los procesos que mueven el agua desde la hidrosfera hacia la atmósfera y luego hacia la Tierra sólida tienen un profundo impacto en las plantas y los animales (incluidos los seres humanos) que habitan las regiones afectadas.

Los científicos han reconocido que para comprender mejor nuestro planeta, debemos aprender cómo están interconectados sus componentes (tierra, agua, aire y formas de vida). Esta tentativa, denominada *ciencia del sistema Tierra*, tiene el objetivo de estudiar la Tierra como un *sistema* compuesto por numerosas partes interactuantes o *subsistemas*. Mediante un enfoque interdisciplinario, quienes practican la ciencia del sistema Tierra intentan alcanzar el nivel de comprensión necesario para entender y resolver muchos de nuestros problemas ambientales globales.

¿Qué es un sistema? Muchos de nosotros oímos y utilizamos el término *sistema* a menudo. Quizá atendamos al *sistema* de enfriamiento de nuestro coche, hagamos uso del *sistema* de transporte de la ciudad y participemos en el *sistema* político. Una noticia quizá nos informe de la aproximación de un *sistema* meteorológico. Además, sabemos que la Tierra es tan sólo una pequeña parte de un gran sistema conocido como *Sistema Solar*, que, a su vez, es un subsistema de un sistema todavía mayor llamado Vía Láctea.

Una definición poco precisa de **sistema** podría ser la de un grupo, de cualquier tamaño, de partes interactuantes que forman un todo complejo. La mayoría de los sistemas naturales pueden funcionar gracias a fuentes de energía que desplazan la materia o la energía de un lugar a otro. Una analogía simple es un sistema de enfriamiento de un coche, que contiene un líquido (habitualmente agua y anticongelante) que sale del motor hacia el radiador y vuelve. El papel de este sistema es transferir el calor generado por combustión en el motor al radiador, donde el aire en movimiento lo hace salir del vehículo. De ahí el término sistema de enfriamiento.

Los sistemas como el de enfriamiento de un coche son autónomos con respecto a la materia y se denominan **sistemas cerrados**. Aunque la energía se desplaza libremente dentro y fuera de un sistema cerrado, no entra ni sale materia (líquido en el caso de nuestro sistema de enfriamiento de un coche) del sistema. (En el supuesto de que no haya una fuga en el radiador.) Por el contrario, la mayoría de los sistemas naturales son **sistemas abiertos** y son mucho más complicados que el ejemplo anterior. En un sistema abierto, tanto la energía como la materia fluyen hacia dentro y hacia fuera del sistema. En un sistema meteorológico como un huracán, factores como la cantidad de vapor de agua disponible para la formación de nubes, la cantidad de calor liberado por el vapor de

agua que se condensa y la corriente de aire que entra y sale de la tormenta pueden fluctuar mucho. En ocasiones la tormenta puede fortalecerse; en otras ocasiones puede permanecer estable o debilitarse.

Mecanismos de realimentación. La mayoría de los sistemas naturales tiene mecanismos que tienden a intensificar el cambio, así como otros mecanismos que tienden a resistirlo y, de este modo, estabilizar el sistema. Por ejemplo, cuando tenemos demasiado calor, transpiramos para enfriarnos. Este fenómeno de enfriamiento sirve para estabilizar nuestra temperatura corporal y se denomina **mecanismo de realimentación negativa**. Los mecanismos de realimentación negativa sirven para mantener el sistema tal como es o, en otras palabras, para mantener el *status quo*. Por el contrario, los mecanismos que intensifican o impulsan el cambio se denominan **mecanismos de realimentación positiva**.

La mayoría de los sistemas terrestres, en especial el sistema climático, contienen una amplia variedad de mecanismos de realimentación negativa y positiva. Por ejemplo, pruebas científicas sustanciales indican que la Tierra ha entrado en un período de calentamiento global. Una consecuencia del calentamiento global es que algunos de los glaciares y los casquetes polares han empezado a fundirse. Las superficies cubiertas por nieve o hielo, muy reflectantes, están siendo sustituidas de una manera gradual por suelos marrones, árboles verdes u océanos azules, todos ellos más oscuros, de modo que absorben más luz solar. El resultado es una realimentación positiva que contribuye al calentamiento.

Por otro lado, un aumento de la temperatura global también provoca un incremento de la evaporación del agua de la superficie continental y oceánica de la Tierra. Un resultado de la existencia de más vapor de agua en el aire es el aumento del espesor de las nubes. Como la parte superior de las nubes es blanca y reflectante, una mayor cantidad de luz solar se refleja de nuevo hacia el espacio, con lo cual se reduce la cantidad de luz solar que llega a la superficie terrestre y las temperaturas globales disminuyen. Además, las temperaturas más cálidas tienden a fomentar el crecimiento de la vegetación. Las plantas, a su vez, toman el dióxido de carbono (CO_2) del aire. Como el dióxido de carbono es uno de los *gases invernadero* de la atmósfera, su eliminación tiene un impacto negativo en el calentamiento global*.

Además de los procesos naturales, debemos considerar el factor humano. La tala y el desbroce extensivos de las selvas y la quema de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) provocan un aumento del

* Los gases invernadero absorben la energía calorífica emitida por la Tierra y de este modo ayudan a mantener la atmósfera cálida.

CO₂ atmosférico. Esta actividad parece haber contribuido al aumento de la temperatura global que nuestro planeta está experimentando. Una de las tareas abrumadoras de los científicos del sistema Tierra es predecir cómo será el clima en el futuro teniendo en cuenta muchas variables: los cambios tecnológicos, las tendencias de la población y el impacto general de numerosos mecanismos de alimentación positiva y negativa.

El sistema Tierra

El sistema Tierra tiene una serie casi infinita de subsistemas en los que la materia se recicla una y otra vez. Un subsistema conocido es el *ciclo hidrológico* (Figura 1.3). Representa la circulación sin fin del agua terrestre entre la hidrosfera, la atmósfera, la biosfera y la Tierra sólida. El agua entra en la atmósfera por evaporación desde la superficie de la Tierra y por transpiración desde las plantas. El vapor de agua se condensa en la atmósfera y forma nubes, que a su vez producen precipitación que cae de nuevo sobre la superficie terrestre. Una parte de la lluvia que cae sobre la superficie penetra y es absorbida por las plantas o se convierte en agua subterránea, mientras otra parte fluye por la superficie hacia el océano.

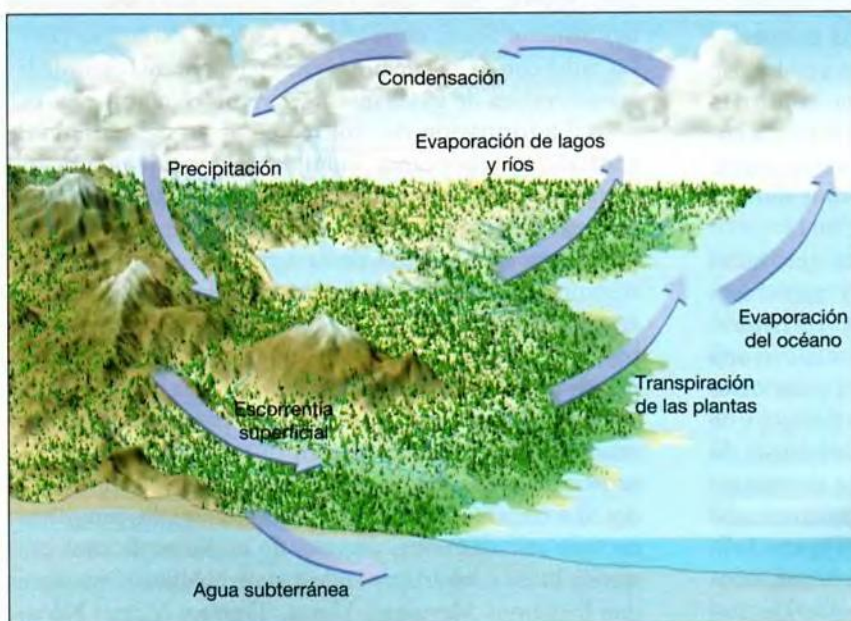
El sistema Tierra es impulsado por la energía procedente de dos fuentes. El Sol impulsa los procesos externos que tienen lugar en la atmósfera, la hidrosfera y la superficie de la tierra. El tiempo y el clima, la circulación oceánica y los procesos erosivos son accionados por la energía del Sol. El interior de la Tierra es la segunda fuente de energía. El calor que queda de cuando se formó nuestro planeta y el calor que está siendo continuamente generado por la desintegración radiactiva impulsan los

procesos internos que producen los volcanes, los terremotos y las montañas.

Las partes del sistema Tierra están relacionadas, de manera que un cambio en una de ellas puede producir cambios en otra o en todas las demás. Por ejemplo, cuando un volcán hace erupción, la lava del interior de nuestro planeta puede fluir en la superficie y bloquear un valle próximo. Esta nueva obstrucción influye en el sistema de drenaje de la región creando un lago o haciendo que las corrientes de agua cambien su curso. Las grandes cantidades de cenizas y gases volcánicos que pueden emitirse durante una erupción pueden ascender a las capas altas de la atmósfera e influir en la cantidad de energía solar que llega a la superficie. El resultado sería una disminución de las temperaturas del aire en todo el hemisferio.

Allí donde la superficie es cubierta por coladas de lava o por un grueso estrato de ceniza volcánica, los suelos existentes son enterrados. Esto hace que los procesos de formación del suelo empiecen de nuevo a transformar el nuevo material superficial en suelo. El suelo que finalmente se forma reflejará la interacción entre muchas partes del sistema Tierra. Por supuesto, habría también cambios significativos en la biosfera. Algunos organismos y su hábitat serían eliminados por la lava y las cenizas, mientras que se crearían nuevos ámbitos de vida, como los lagos. El posible cambio climático podría afectar también a algunas formas de vida.

• Los seres humanos son parte del sistema Tierra, un sistema en el cual los componentes vivos y no vivos están entrelazados e interconectados. Por consiguiente, nuestras acciones producen cambios en todas las otras partes. Cuando quemamos gasolina y carbón, construimos rom-



◀ **Figura 1.3** El ciclo hidrológico es tan sólo uno de los numerosos subsistemas de la Tierra. El agua de nuestro planeta está en un ciclo constante entre las cuatro esferas terrestres.

peolas a lo largo de la línea de costa, eliminamos nuestros residuos y preparamos los terrenos para cultivo, hacemos que otras partes del sistema respondan, a menudo de manera imprevista. A lo largo de todo este libro conoceremos muchos de los subsistemas de la Tierra: el sistema hidrológico, el sistema tectónico (formación de montañas) y el ciclo de las rocas, por citar unos pocos. Recordemos que estos componentes y *nosotros, los seres humanos*, formamos todos parte del todo interactuante complejo que denominamos sistema Tierra.

Evolución temprana de la Tierra

Los terremotos recientes causados por los desplazamientos de la corteza terrestre, junto con las lavas procedentes de la erupción de volcanes activos, representan sólo el último de una larga serie de acontecimientos por medio de los cuales nuestro planeta ha alcanzado su forma y su estructura actuales. Los procesos geológicos que se producen en el interior de la Tierra se pueden comprender mejor cuando se observan en el contexto de acontecimientos muy anteriores en la historia de la Tierra.

El origen del planeta Tierra

El siguiente escenario describe las opiniones más ampliamente aceptadas sobre el origen de nuestro Sistema Solar. Aunque este modelo se presenta como un hecho, recuerde que como todas las hipótesis científicas, ésta está sujeta a revisión y expuesta incluso al rechazo absoluto. Sin embargo, continúa siendo el conjunto de ideas más coherente para explicar lo que observamos en la actualidad.

Nuestro escenario empieza hace unos 12.000 a 15.000 millones de años con el *Big Bang*, una explosión incomprensiblemente grande que lanzó hacia el exterior toda la materia del universo a velocidades increíbles. En ese momento, los restos de la explosión, que consistían casi por completo en hidrógeno y helio, empezaron a enfriarse y condensarse en las primeras estrellas y galaxias. En una de estas galaxias, la Vía Láctea, fue donde nuestro Sistema Solar y el planeta Tierra tomaron forma.

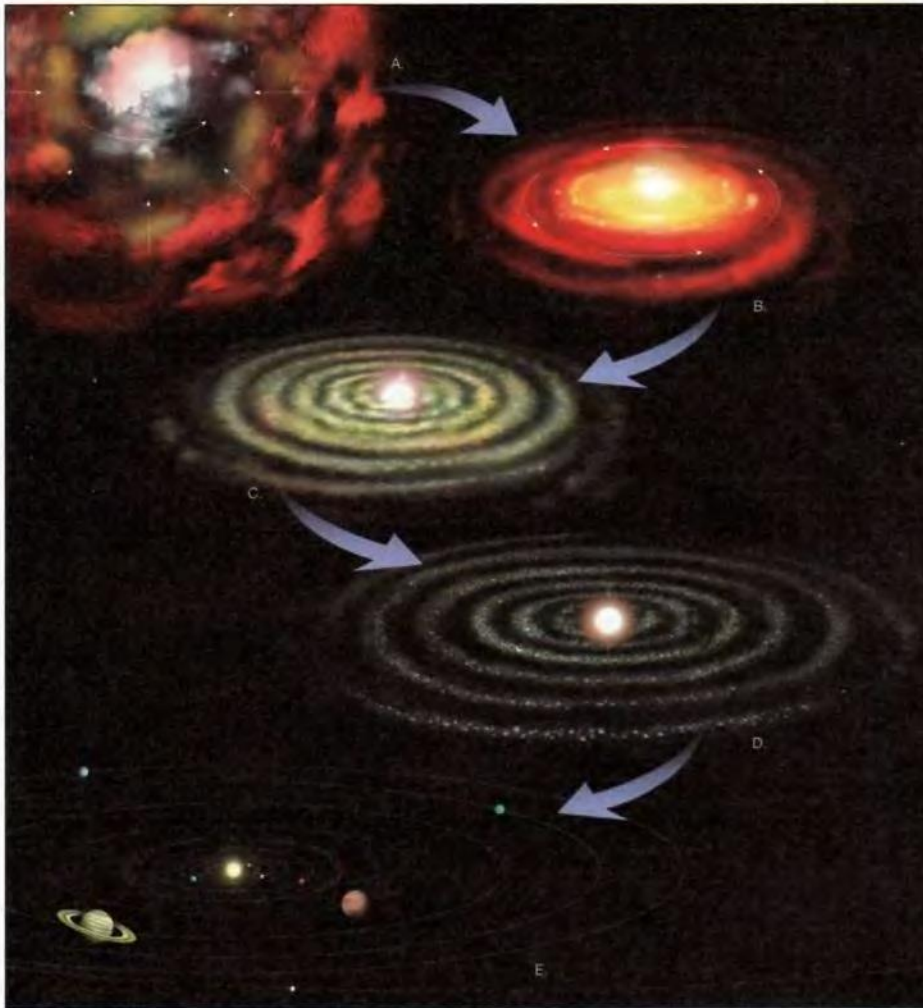
La Tierra es uno de los nueve planetas que, junto con aproximadamente una docena de lunas y numerosos cuerpos más pequeños, gira alrededor del Sol. La naturaleza ordenada de nuestro Sistema Solar lleva a la mayoría de los investigadores a deducir que la Tierra y los otros planetas se formaron esencialmente al mismo tiempo, y de la misma materia primordial, que el Sol. La **hipótesis de la nebulosa primitiva** sugiere que los cuerpos de nuestro Sistema Solar se formaron a partir de una enorme nube en rotación denominada **nebulosa solar** (Figura 1.4). Además de los átomos de hidrógeno y helio generados durante el *Big Bang*, granos de polvo microscópicos y la ma-

teria expulsada de estrellas muertas desde hacía tiempo formaban la nebulosa solar. (La fusión nuclear en las estrellas convierte el hidrógeno y el helio en los otros elementos que se hallan en el universo.)

Hace cerca de 5.000 millones de años, esta inmensa nube de gases y granos diminutos de elementos más pesados empezó a contraerse lentamente debido a las interacciones gravitacionales entre sus partículas. Una influencia externa, como una onda de choque procedente de una explosión catastrófica (*supernova*), pudo haber provocado el colapso. Al contraerse, esta nube que giraba lentamente en espiral rotaba cada vez más deprisa por el mismo motivo por el que lo hace un patinador sobre hielo cuando repliega los brazos sobre sí mismo. Al final, la atracción gravitacional se equilibró con la fuerza centrífuga causada por el movimiento rotacional de la nube (Figura 1.4). Pero esta vez, la nube, antes extensa, había adoptado la forma de un disco plano con una gran concentración de material en el centro denominada *protosol* (Sol en formación). (Los astrónomos están bastante seguros de que la nebulosa formó un disco porque se han detectado estructuras similares alrededor de otras estrellas.)

Durante el colapso, la energía gravitacional se convirtió en energía térmica (calor), lo cual hizo que la temperatura del interior de la nebulosa aumentara espectacularmente. A estas temperaturas elevadas, los granos de polvo se descompusieron en moléculas y partículas atómicas. Sin embargo, a distancias posteriores a la órbita de Marte, las temperaturas probablemente se mantuvieron bastante bajas. A $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, es posible que las pequeñas partículas de la parte exterior de la nebulosa estuvieran cubiertas por una capa gruesa de hielo constituido por agua, dióxido de carbono, amoníaco y metano congelados. (Algo de este material todavía reside en los confines del Sistema Solar, en la región llamada la *nube de Oort*.) La nube con forma de disco también contenía cantidades considerables de gases más ligeros: hidrógeno y helio.

● La formación del Sol marcó el fin del período de **contracción** y, por tanto, el fin del calentamiento gravitacional. Las temperaturas de la región en la que ahora se encuentran los planetas interiores empezaron a disminuir. Esta disminución de la temperatura hizo que las sustancias con puntos de fusión elevados se condensaran en pequeñas partículas que empezaron a unirse. Materiales como el hierro y el níquel y los elementos que componen los minerales que forman las rocas (silicio, calcio, sodio, etc.) formaron masas metálicas y rocosas que orbitaban alrededor del Sol (Figura 1.4). Colisiones repetidas provocaron la unión de estas masas en cuerpos más grandes, del tamaño de un asteroide, denominadas *protoplanetas*, que en unas pocas decenas de millones de años crecieron hasta convertirse en los cuatro planetas interiores que llamamos Mercurio, Venus, Tierra y Marte. No to-



▲ **Figura 1.4** Formación del Sistema Solar de acuerdo con la hipótesis de la nebulosa primitiva. **A.** El nacimiento de nuestro Sistema Solar empezó cuando una nube de polvo y gases (nebulosa) empezó a colapsarse gravitacionalmente. **B.** La nebulosa se contrajo en un disco en rotación que se calentaba gracias a la conversión de la energía gravitacional en energía térmica. **C.** El enfriamiento de la nebulosa provocó la condensación de material rocoso y metálico en pequeñas partículas sólidas. **D.** Colisiones repetidas hicieron que las partículas del tamaño del polvo se unieran de una manera gradual hasta formar cuerpos del tamaño de un asteroide. **E.** En un período de unos pocos millones de años estos cuerpos formaron los planetas.

das estas masas de materia se incorporaron en los protoplanetas. Las piezas rocosas y metálicas que permanecieron en órbita se denominan meteoritos cuando sobreviven a un impacto con la Tierra.

● A medida que los protoplanetas atraían cada vez más material, el impacto de gran velocidad de los restos de la nebulosa provocó el aumento de temperatura de estos cuerpos. A causa de sus temperaturas relativamente elevadas y sus campos gravitacionales débiles, los planetas interiores no podían acumular muchos de los componentes más ligeros de la nebulosa. Los más ligeros de estos componentes, el hidrógeno y el helio, fueron finalmente barridos de la parte interna del Sistema Solar por los vientos solares.

Al mismo tiempo que se formaban los planetas interiores también se estaban desarrollando los planetas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), más grandes, junto con sus extensos sistemas de satélites. A causa de las bajas temperaturas debido a la larga distancia del Sol, el material del que estos planetas se formaron contenía un alto porcentaje de hielos (agua, dióxido de carbono, amoníaco y metano) y detritus rocosos y metálicos. La acumulación de hielos explica en parte las grandes dimensiones y la baja densidad de los planetas exteriores. Los dos planetas con mayor masa, Júpiter y Saturno, tenían una gravedad superficial suficiente para atraer y sostener grandes cantidades de los elementos más ligeros, el hidrógeno y el helio.

Formación de la estructura en capas de la Tierra

A medida que se acumulaba el material para formar la Tierra (y poco después), el impacto a gran velocidad de los restos de la nebulosa y la desintegración de los elementos radiactivos provocó un aumento constante de la temperatura en nuestro planeta. Durante este período de calentamiento intenso, la Tierra alcanzó la temperatura suficiente para que el hierro y el níquel empezaran a fundirse. La fusión produjo gotas de metal pesado que penetraron hacia el centro del planeta. Este proceso sucedió rápidamente en la escala de tiempo geológico y formó el núcleo denso rico en hierro de la Tierra.

- El primer período de calentamiento provocó otro proceso de diferenciación química, por medio del cual la fusión formó masas flotantes de roca fundida que ascendieron hacia la superficie, donde se solidificaron y formaron la corteza primitiva. Estos materiales rocosos estaban enriquecidos en oxígeno y elementos «litofilos», en especial silicio y aluminio, con cantidades menores de calcio, sodio, potasio, hierro y magnesio. Además, algunos metales pesados como el oro, el plomo y el uranio, que tienen puntos de fusión bajos o eran muy solubles en las masas fundidas ascendentes, fueron retirados del interior de la Tierra y se concentraron en la corteza en desarrollo. Este primer período de segregación química estableció las tres divisiones básicas del interior de la Tierra: el núcleo rico en hierro; la corteza primitiva, muy delgada; y la capa más gruesa de la tierra, denominada *manto*, que se encuentra entre el núcleo y la corteza.

- Una consecuencia importante de este período de diferenciación química es que permitió que grandes cantidades de compuestos gaseosos se escaparan del interior de la Tierra, como ocurre en la actualidad durante las erupciones volcánicas. Gracias a este proceso fue evolucionando de manera gradual la atmósfera primitiva. Fue en este planeta, con esa atmósfera, donde apareció la vida como la conocemos.

- Después de los acontecimientos que establecieron la estructura básica de la Tierra, la corteza primitiva se perdió a causa de la erosión y otros procesos geológicos, de manera que no disponemos de ningún registro directo de su composición. Cuándo y cómo exactamente apareció la corteza continental (y con ella las primeras masas continentales terrestres) es una cuestión que todavía es objeto de investigación. Sin embargo, existe un acuerdo general en que la corteza continental se formó de una manera gradual durante los últimos 4.000 millones de años. (Las rocas más antiguas descubiertas hasta hoy son fragmentos aislados, encontrados en el noroeste del Ca-

nadá, que tienen unas fechas radiométricas de unos 4.000 millones de años.) Además, como se verá en el Capítulo 2, la Tierra es un planeta en evolución cuyos continentes (y cuencas oceánicas) han cambiado constantemente de forma e incluso de situación durante una gran parte de este período.

Estructura interna de la Tierra



Introducción a la Geología

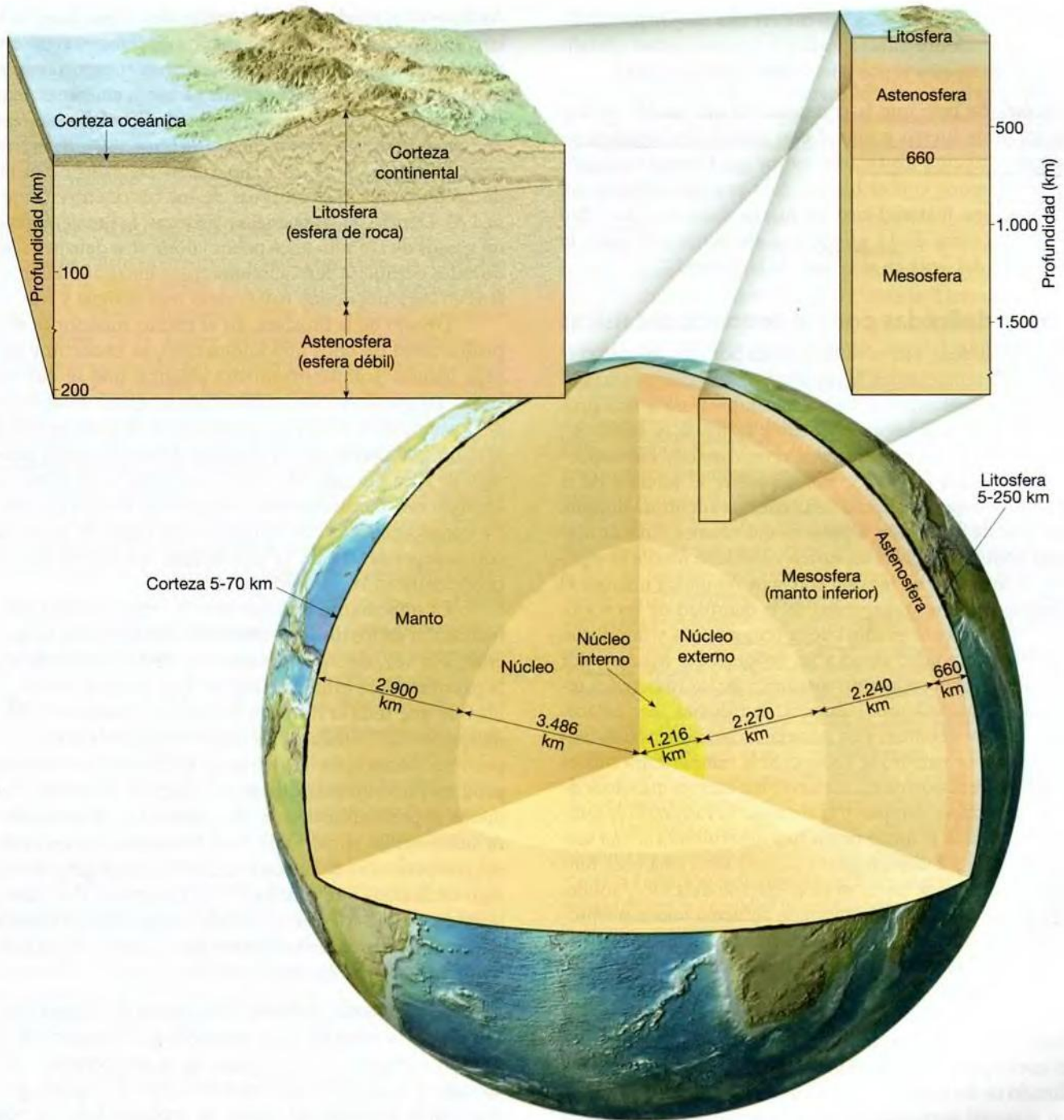
▼ La estructura en capas de la Tierra

En la sección anterior, ha aprendido que la segregación de material que empezó muy temprano en la historia de la Tierra tuvo como resultado la formación de tres capas definidas por su composición química: la corteza, el manto y el núcleo. Además de estas tres capas de diferente composición, la Tierra se puede dividir en capas en función de sus propiedades físicas. Las propiedades físicas utilizadas para definir estas zonas son su carácter sólido o líquido y cuán dúctil o resistentes son. El conocimiento de ambos tipos de estructuras en capas es esencial para la comprensión de los procesos geológicos básicos, como el volcanismo, los terremotos y la formación de montañas (Figura 1.5).

Capas definidas por su composición

Corteza. La corteza, capa rocosa externa, comparativamente fina de la Tierra, se divide generalmente en corteza oceánica y corteza continental. La corteza oceánica tiene alrededor de 7 kilómetros de grosor y está compuesta por rocas ígneas oscuras denominadas *basaltos*. Por el contrario, la corteza continental tiene un grosor medio de entre 35 y 40 kilómetros, pero puede superar los 70 kilómetros en algunas regiones montañosas. A diferencia de la corteza oceánica, que tiene una composición química relativamente homogénea, la corteza continental consta de muchos tipos de rocas. El nivel superior de la corteza continental tiene la composición media de una roca granítica denominada *granodiorita*, mientras que la composición de la parte inferior de la corteza continental es más parecida al basalto. Las rocas continentales tienen una densidad media de unos $2,7 \text{ g/cm}^3$ y se han descubierto algunas cuya edad supera los 4.000 millones de años. Las rocas de la corteza oceánica son más jóvenes (180 millones de años o menos) y más densas (aproximadamente $3,0 \text{ g/cm}^3$) que las rocas continentales*.

* El agua líquida tiene una densidad de 1 g/cm^3 ; por consiguiente, la densidad del basalto es el triple que la del agua.



▲ **Figura 1.5** Perspectivas de la estructura en capas de la Tierra. El lado izquierdo de la sección transversal muestra que el interior de la Tierra se divide en tres capas distintas según sus diferencias composicionales: la corteza, el manto y el núcleo. El lado derecho de la sección transversal ilustra las cinco principales capas del interior de la Tierra según sus propiedades físicas y, por tanto, según su resistencia mecánica: la litosfera, la astenosfera, la mesosfera, el núcleo externo y el núcleo interno. Los bloques diagrama situados encima de la sección transversal muestran una perspectiva aumentada de la porción superior del interior de la Tierra.

Manto. Más del 82 por ciento del volumen de la Tierra está contenido en el **manto**, una envoltura rocosa sólida que se extiende hasta una profundidad de 2.900 kilóme-

tros. El límite entre la corteza y el manto representa un cambio de composición química. El tipo de roca dominante en la parte superior del manto es la *peridotita*, que

tiene una densidad de $3,3 \text{ g/cm}^3$. A una mayor profundidad, la peridotita cambia y adopta una estructura cristalina más compacta y, por tanto, una mayor densidad.

Núcleo. Se cree que la composición del núcleo es una aleación de hierro y níquel con cantidades menores de oxígeno, silicio y azufre, elementos que forman fácilmente compuestos con el hierro. A la presión extrema del núcleo, este material rico en hierro tiene una densidad media de cerca de 11 g/cm^3 y se aproxima a 14 veces la densidad del agua en el centro de la Tierra.

Capas definidas por sus propiedades físicas

El interior de la Tierra se caracteriza por un aumento gradual de la temperatura, la presión y la densidad con la profundidad. Los cálculos sitúan la temperatura a una profundidad de 100 kilómetros entre 1.200 °C y 1.400 °C , mientras que la temperatura en el centro de la Tierra puede superar los 6.700 °C . Por supuesto, el interior de la Tierra ha retenido mucha de la energía adquirida durante sus años de formación, a pesar de que el calor fluye de manera continua hacia la superficie, donde se pierde al espacio. El aumento de presión con la profundidad provoca el correspondiente incremento de la densidad de las rocas.

El aumento gradual de la temperatura y la presión con la profundidad afecta a las propiedades físicas y, por tanto, al comportamiento mecánico de los materiales terrestres. Cuando una sustancia se calienta, sus enlaces químicos se debilitan y su resistencia mecánica (resistencia a la deformación) se reduce. Si la temperatura supera el punto de fusión de un material, los enlaces químicos de este material se rompen y tiene lugar la fusión. Si la temperatura fuera el único factor que determinara si una sustancia se va a fundir, nuestro planeta sería una bola fundida cubierta por un caparazón externo delgado y sólido. Sin embargo, la presión también aumenta con la profundidad y tiende a aumentar la resistencia de la roca. Además, como la fusión va acompañada de un aumento de volumen, se produce a temperaturas mayores en profundidad debido al efecto de la presión confinante. Este aumento de la presión con la profundidad produce también el correspondiente aumento de la densidad. Así, dependiendo de las condiciones físicas (temperatura y presión), un material particular puede comportarse como un sólido quebradizo, deformarse como la masilla o incluso fundirse y convertirse en líquido.

La Tierra puede dividirse en cinco capas principales en función de sus propiedades físicas y, por tanto, según su resistencia mecánica: *litosfera*, *astenosfera*, *mesosfera* (*manto inferior*), *núcleo externo* y *núcleo interno*.

Litosfera y astenosfera. Según sus propiedades físicas, la capa externa de la Tierra comprende la corteza y el manto superior y forma un nivel relativamente rígido y frío.

Aunque este nivel consta de materiales cuyas composiciones químicas son notablemente diferentes, tiende a actuar como una unidad que muestra un comportamiento rígido, principalmente porque es frío y, en consecuencia, resistente. Esta capa, denominada *litosfera* («esfera de roca»), tiene un grosor medio de unos 100 kilómetros pero puede alcanzar 250 kilómetros de grosor debajo de las porciones más antiguas de los continentes (Figura 1.5). Dentro de las cuencas oceánicas, la litosfera tiene un grosor de tan sólo unos pocos kilómetros debajo de las dorsales oceánicas pero aumenta hasta quizá 100 kilómetros en regiones donde hay corteza más antigua y fría.

Debajo de la litosfera, en el manto superior (a una profundidad de unos 660 kilómetros), se encuentra una capa blanda, comparativamente plástica, que se conoce como *astenosfera* («esfera débil»). La porción superior de la astenosfera tiene unas condiciones de temperatura y presión que permiten la existencia de una pequeña porción de roca fundida. Dentro de esta zona muy dúctil, la litosfera está mecánicamente separada de la capa inferior. La consecuencia es que la litosfera es capaz de moverse con independencia de la astenosfera, un hecho que se considerará en la sección siguiente.

Es importante destacar que la resistencia a la deformación de los diversos materiales de la Tierra es función, a la vez, de su composición y de la temperatura y la presión a que estén sometidos. No debería sacarse la idea de que toda la litosfera se comporta como un sólido quebradizo similar a las rocas encontradas en la superficie. Antes bien, las rocas de la litosfera se vuelven progresivamente más calientes y dúctiles conforme aumenta la profundidad. A la profundidad de la astenosfera superior, las rocas están lo suficientemente cerca de sus temperaturas de fusión (de hecho, puede producirse algo de fusión) que son fáciles de deformar. Por tanto, la astenosfera superior es blanda porque se aproxima a su punto de fusión, exactamente igual a como la cera caliente es más blanda que la cera fría.

Mesosfera o manto inferior. Por debajo de la zona dúctil de la parte superior de la astenosfera, el aumento de la presión contrarresta los efectos de la temperatura más elevada, y la resistencia de las rocas crece de manera gradual con la profundidad. Entre las profundidades de 660 kilómetros y 2.900 kilómetros se encuentra una capa más rígida denominada *mesosfera* («esfera media») o *manto inferior*. A pesar de su resistencia, las rocas de la mesosfera están todavía muy calientes y son capaces de fluir de una manera muy gradual.

Núcleos interno y externo. El núcleo, compuesto principalmente por una aleación de hierro y níquel, se divide en dos regiones que muestran resistencias mecánicas muy distintas. El *núcleo externo* es una *capa líquida* de

2.270 kilómetros de grosor. Las corrientes convectivas del hierro metálico en esta zona son las que generan el campo magnético de la Tierra. El núcleo interno es una esfera con un radio de 1.216 kilómetros. A pesar de su temperatura más elevada, el material del núcleo interno es más resistente que el del núcleo externo (debido a la enorme presión) y se comporta como un sólido.

¿Cómo sabemos lo que sabemos?

Llegados a este punto debe de preguntarse: «¿Cómo conocimos la composición y la estructura del interior de la Tierra?». Puede suponer que se han extraído muestras del interior de la Tierra directamente. Sin embargo, la mina más profunda del mundo (la mina Western Deep Levels, en Sudáfrica) tiene una profundidad de tan sólo 4 kilómetros, y la perforación más profunda del mundo (terminada en la península de Kola, en Rusia, en 1992) sólo penetra aproximadamente 12 kilómetros. En esencia, los seres humanos nunca han perforado un agujero en el manto (y nunca lo harán en el núcleo) con el fin de sacar muestras directas de estos materiales.

A pesar de estas limitaciones, se han desarrollado teorías que describen la naturaleza del interior de la Tierra y que coinciden con la mayoría de los datos procedentes de las observaciones. Así, nuestro modelo del interior de la Tierra representa las mejores deducciones que podemos hacer según los datos disponibles. Por ejemplo, la estructura en capas de la Tierra se ha establecido mediante observaciones indirectas. Cada vez que se produce un terremoto, unas ondas de energía (denominadas ondas sísmicas) penetran en el interior de la Tierra, de una manera parecida a como los rayos X penetran en el cuerpo humano. Las ondas sísmicas cambian de velocidad y se desvían y reflejan al atravesar zonas con propiedades distintas. Un amplio conjunto de estaciones de control en todo el mundo detecta y registra esta energía. Con la ayuda de computadores, se analizan estos datos, que luego se utilizan para determinar la estructura del interior de la Tierra. En el Capítulo 12, «El interior de la Tierra», encontrará más información de cómo se lleva esto a cabo.

¿Qué pruebas tenemos que respalden la supuesta composición del interior de nuestro planeta? Puede resultar sorprendente conocer que rocas que se originaron en el manto se han recogido en la superficie de la Tierra, entre ellas, muestras que contienen diamantes, que, según los estudios de laboratorio, pueden formarse sólo en ambientes con una presión elevada. Dado que estas rocas deben de haber cristalizado a profundidades superiores a los 200 kilómetros, se deduce que son muestras del manto que sufrieron muy pocas alteraciones durante su ascenso a la superficie. Además, hemos podido examinar láminas del manto superior y de la corteza oceánica que lo

recubre que han sido empujadas por encima del nivel del mar en lugares como Chipre, Terranova y Omán.

Establecer la composición del núcleo es otra cuestión completamente diferente. Debido a su gran profundidad y su densidad elevada, ninguna muestra del núcleo ha llegado a la superficie. Sin embargo, disponemos de pruebas significativas que sugieren que esta capa consta principalmente de hierro.

• Sorprendentemente los meteoritos proporcionan importantes pistas sobre la composición del núcleo y el manto. (Los meteoritos son objetos extraterrestres sólidos que chocan contra la superficie de la Tierra.) La mayoría de los meteoritos son fragmentos derivados de colisiones de cuerpos más grandes, principalmente del cinturón de asteroides situado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Son importantes porque representan muestras del material (*planetesimales*) del que se formaron los planetas interiores, incluida la Tierra. Los meteoritos están compuestos principalmente por una aleación de hierro y níquel (*metálicos*), minerales silicatados (*rocosos*) o una combinación de ambos materiales (*mixtos*). La composición media de los meteoritos rocosos es muy parecida a la que se supone que tiene el manto. Por otro lado, los meteoritos metálicos contienen un porcentaje mucho más elevado de este material metálico del que se encuentra en la corteza terrestre o en el manto. Si, de hecho, la Tierra se formó a partir del mismo material en la nebulosa solar que generó los meteoritos y los demás planetas interiores, debe contener un porcentaje mucho más elevado de hierro del que se encuentra en las rocas de la corteza. Por consiguiente, podemos concluir que el núcleo es enormemente rico en este material pesado.

Este punto de vista también está respaldado por los estudios de la composición del Sol, que indican que el hierro es la sustancia más abundante hallada en el Sistema Solar que posee la densidad calculada para el núcleo. Además, el campo magnético de la Tierra requiere que el núcleo esté hecho de un material conductor de la electricidad, como el hierro. Puesto que todas las pruebas disponibles apuntan a que una gran parte del núcleo está compuesta de hierro, tomamos esto como un hecho, al menos hasta que nuevas pruebas nos indiquen lo contrario.

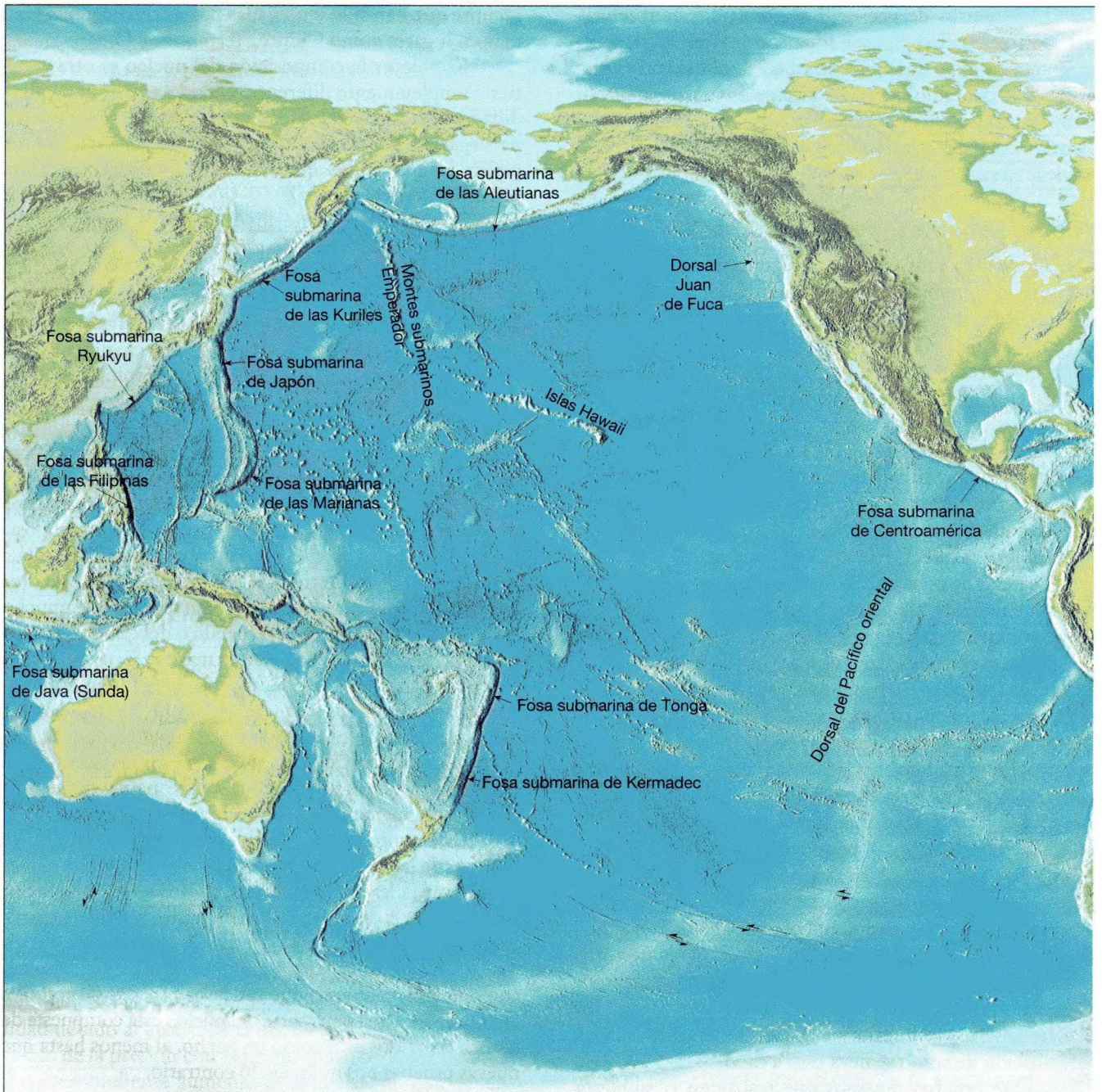
La superficie de la Tierra



Introducción a la Geología

▼ Características de los continentes y del fondo oceánico

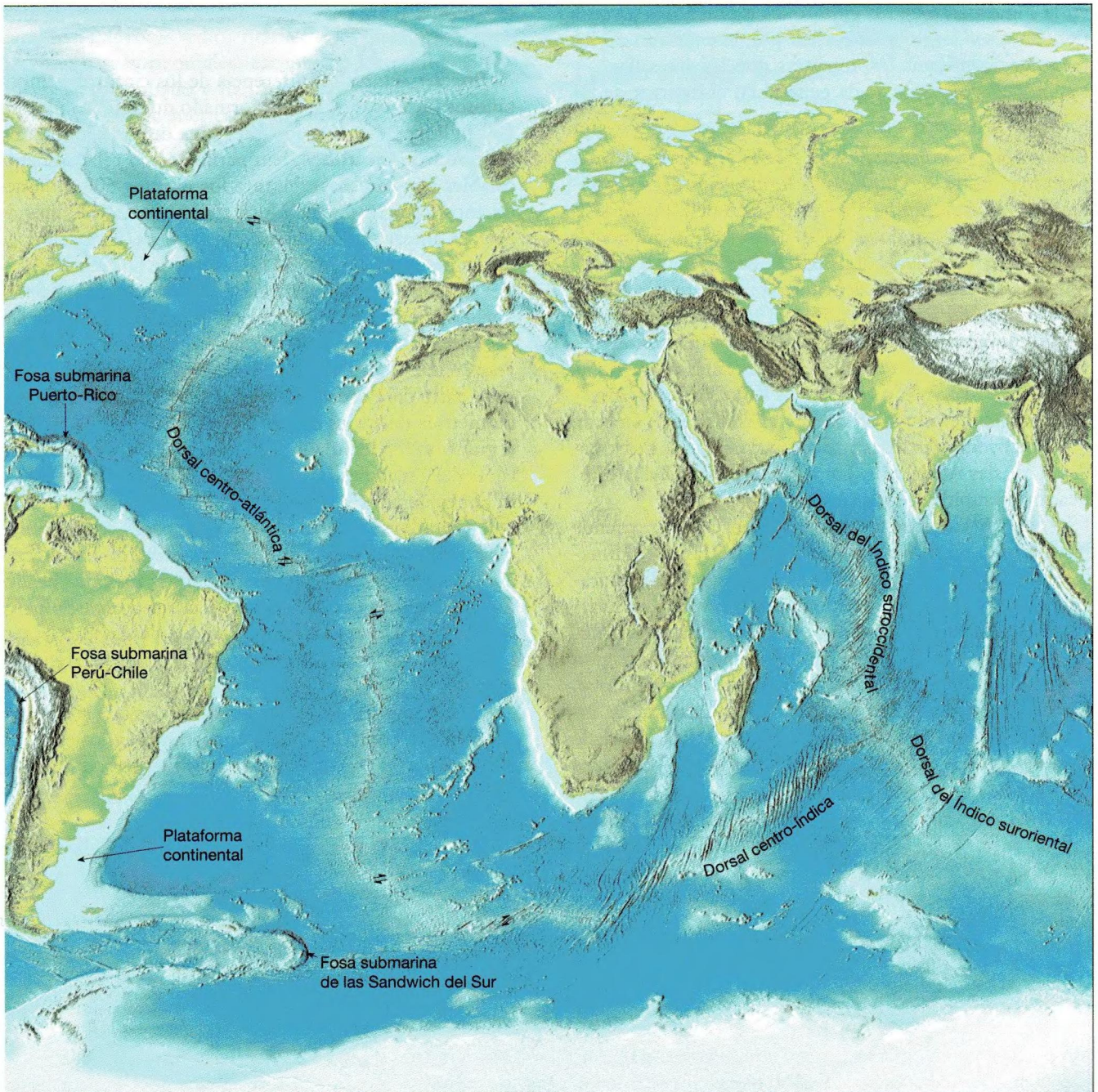
Las dos principales divisiones de la superficie de la Tierra son los continentes y las cuencas oceánicas (Figura 1.6). Una diferencia significativa entre estas dos áreas son sus alturas relativas. Los continentes son superficies nota-



▲ **Figura 1.6** En estas dos páginas se muestra la topografía de la superficie sólida de la Tierra.

blemente planas con el aspecto de llanuras que sobresalen por encima del nivel del mar. Con una elevación media de alrededor de 0,8 kilómetros, los bloques continentales se encuentran cerca del nivel del mar, con excepción de unas áreas algo limitadas de terreno montañoso. Por el contrario, la profundidad media del fondo oceánico es de unos 3,8 kilómetros por debajo del nivel del mar o unos 4,5 kilómetros inferior a la elevación media de los continentes.

La diferencia de elevación entre los continentes y las cuencas oceánicas es consecuencia principalmente de las diferencias entre sus densidades y sus grosores respectivos. Recordemos que el grosor medio de los continentes oscila entre los 35 y los 40 kilómetros y que éstos están compuestos de rocas graníticas con una densidad de alrededor de $2,7 \text{ g/cm}^3$. Las rocas basálticas que conforman la corteza oceánica tienen un grosor medio de tan sólo 7 kilóme-



tros y una densidad media de aproximadamente $3,0 \text{ g/cm}^3$. Por tanto, la corteza continental, más gruesa y menos densa, es más flotante que la corteza oceánica. Como consecuencia, la corteza continental flota sobre la parte superior de las rocas deformables del manto a un nivel más elevado que la corteza oceánica por el mismo motivo por el que un barco de carga grande y vacío (menos denso) navega a mayor altura que un barco pequeño y cargado (más denso).

Principales características de los continentes

Las principales características de los continentes pueden agruparse en dos categorías diferenciadas: áreas extensas, planas y estables que se han erosionado hasta casi el nivel del mar, y regiones elevadas de rocas deformadas que en la actualidad forman los cinturones montañosos. Véase

en la Figura 1.7 que los cinturones montañosos jóvenes tienden a ser largos y estrechos y se encuentran en los márgenes continentales, mientras que las áreas llanas y estables se sitúan por regla general en el interior de los continentes.

Cinturones montañosos. Los rasgos topográficos más prominentes de los continentes son los cinturones montañosos lineales. Aunque la distribución de las montañas parece ser aleatoria, no es así. Al considerar las montañas más jóvenes (de menos de 100 millones de años), encontramos que están situadas principalmente en dos zonas. El cinturón del Pacífico (la región que rodea el océano Pacífico) incluye las montañas del oeste del continente americano y continúa en el Pacífico occidental en forma de arcos de islas volcánicas (Figura 1.6). Los arcos insulares son regiones montañosas activas compuestas en gran parte de rocas volcánicas y rocas sedimentarias deformadas. Las islas Aleutianas, Japón, Filipinas y Nueva Guinea son ejemplos de arcos insulares.

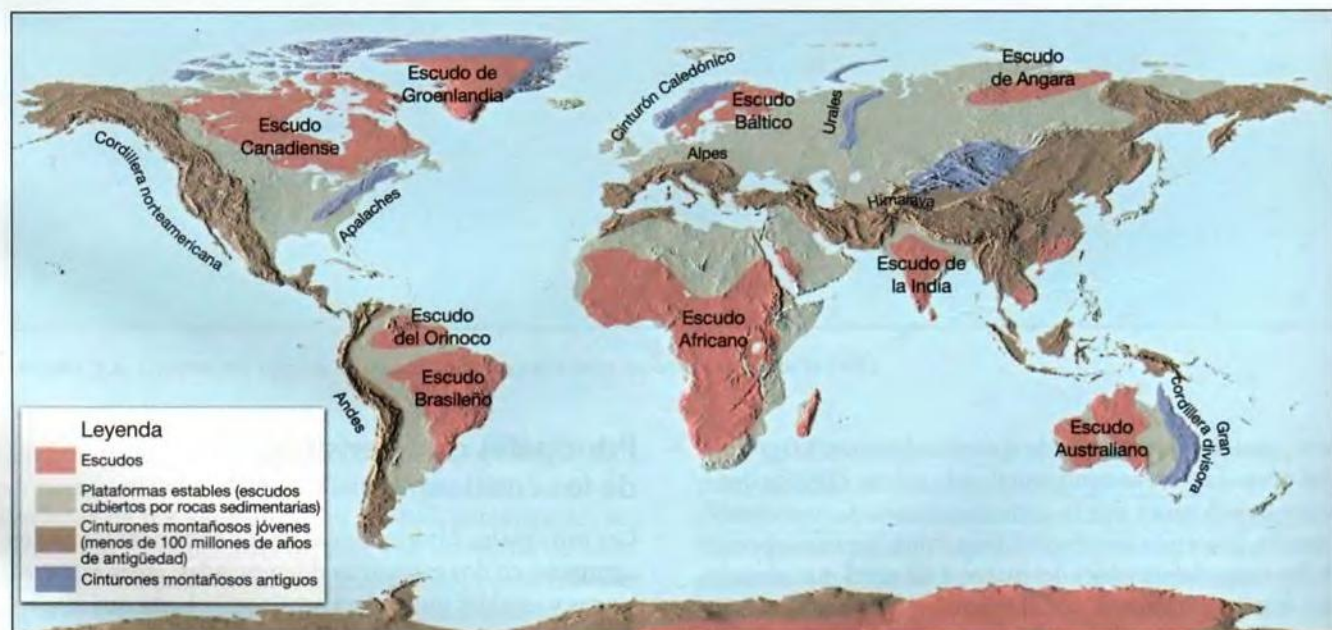
El otro cinturón montañoso importante se extiende hacia el este desde los Alpes a través de Irán y el Himalaya y luego baja al sur y entra en Indonesia. Una exploración atenta de los terrenos montañosos revela que la mayoría de ellos son lugares donde se han comprimido gruesas secuencias de rocas que han experimentado una gran deformación, como si estuvieran en un torno gigantesco. También se encuentran montañas más antiguas en los continentes. Son ejemplos de ello los Apalaches, al este de Estados Unidos, y los Urales, en Rusia. Sus picos, antes

elevados, son ahora bajos, producto de millones de años de erosión.

El interior estable. A diferencia de los cinturones montañosos jóvenes, que se han formado durante los últimos 100 millones de años, los interiores de los continentes, denominados **cratones**, han permanecido relativamente estables (sin cambios) durante los últimos 600 millones de años, o incluso más. Normalmente estos bloques de corteza intervinieron en un episodio de formación de montañas muy anterior en la historia de la Tierra.

Dentro de los interiores estables existen zonas conocidas como **escudos**, que son regiones extensas y llanas compuestas por rocas cristalinas deformadas. Obsérvese en la Figura 1.7 que el Escudo Canadiense aflora en gran parte del noreste de Norteamérica. La datación radiométrica de varios escudos ha revelado que se trata de regiones verdaderamente antiguas. Todas ellas contienen rocas del Precámbrico con una edad superior a los 1.000 millones de años y algunas muestras se aproximan a los 4.000 millones de años. Incluso estas rocas, las más antiguas que se conocen, exhiben muestras de las fuerzas enormes que las han plegado, fallado y metamorfizado. Así, concluimos que estas rocas una vez formaron parte de un sistema montañoso antiguo que desde entonces se ha erosionado hasta producir estas regiones extensas y llanas.

Existen otras zonas cratónicas en las que rocas muy deformadas, como las que se encuentran en los escudos, están cubiertas por una capa relativamente fina de rocas



▲ **Figura 1.7** Este mapa muestra la distribución general de los cinturones montañosos, las plataformas estables y los escudos de la Tierra.

sedimentarias. Estas áreas se denominan **plataformas estables**. Las rocas sedimentarias de las plataformas estables son casi horizontales, excepto en los puntos en los que se han combado y han formado grandes cuencas o domos. En Norteamérica, una gran porción de las plataformas estables se sitúa entre el Escudo Canadiense y las Montañas Rocosas.

Principales características del fondo oceánico

Si se seicara todo el agua de las cuencas oceánicas, se observaría una gran variedad de rasgos, incluidas cadenas lineales de volcanes, cañones profundos, llanuras y largas extensiones de altiplanicies monótonamente llanas. De hecho, el paisaje sería casi tan diverso como en los continentes (véase Figura 1.6).

Durante los últimos 50 años, los oceanógrafos han cartografiado lentamente gran parte del fondo oceánico utilizando modernos equipos de sónar. A partir de estos estudios han establecido las tres principales unidades topográficamente distinguibles: los *márgenes continentales*, las *cuencas oceánicas profundas* y las *dorsales oceánicas (centrooceánicas)*.

Márgenes continentales. El **margen continental** es la porción de fondo oceánico adyacente a las principales masas continentales. Puede incluir la *plataforma continental*, el *talud continental* y el *pie de talud*.

Aunque la tierra y el mar entran en contacto en la línea de costa, ésta no es el límite entre los continentes y las cuencas oceánicas. Antes bien, a lo largo de la mayoría de las costas una plataforma suavemente inclinada de material, denominada **plataforma continental**, se extiende en dirección al mar desde la costa. Dado que está sobre la corteza continental, se trata claramente de una extensión inundada de los continentes. Un vistazo a la Figura 1.6 demuestra que la anchura de la plataforma continental es variable. Por ejemplo, es ancha a lo largo de la costa oriental y la del Golfo en Estados Unidos, pero relativamente estrecha a lo largo del margen Pacífico del continente.

El límite entre los continentes y las cuencas oceánicas profundas se encuentra a lo largo del **talud continental**, que es una estructura relativamente empinada que se extiende desde la superficie exterior de la plataforma continental hasta el fondo oceánico profundo (Figura 1.6). Utilizando el talud como línea divisoria, encontramos que las cuencas oceánicas representan el 60 por ciento de la superficie terrestre y que el 40 por ciento restante corresponde a los continentes.

En regiones donde no existen fosas, el empinado talud continental pasa a tener una inclinación más gradual, conocida como **pie de talud**. El pie de talud está formado por un grueso cúmulo de sedimentos que se

movieron pendiente abajo desde la plataforma continental hacia los fondos oceánicos profundos.

Cuencas oceánicas profundas. Entre los márgenes continentales y las dorsales oceánicas se encuentran las **cuencas oceánicas profundas**. Una parte de esta región consiste en estructuras increíblemente llanas denominadas **llanuras abisales**. Sin embargo, el fondo oceánico también contiene depresiones extremadamente profundas, que llegan en ocasiones a los 11.000 metros de profundidad. Aunque estas **fosas submarinas** son relativamente estrechas y representan tan sólo una pequeña fracción del fondo oceánico, son estructuras muy importantes. Algunas fosas se encuentran adyacentes a montañas jóvenes que flanquean los continentes. Por ejemplo, en la Figura 1.6, la fosa Perú-Chile que recorre la costa occidental sudamericana es paralela a los Andes. Otras fosas son paralelas a cadenas de islas lineales denominadas *arcos de islas volcánicas*.

Los suelos oceánicos están salpicados de estructuras volcánicas sumergidas llamadas **montes submarinos**, que a veces forman cadenas estrechas y largas. La actividad volcánica también ha producido varias extensas *llanuras de lava*, como la llanura Ontong Java, situada al noreste de Nueva Guinea. Además, algunas llanuras sumergidas están compuestas de corteza de tipo continental. Algunos ejemplos son la llanura Campbell, al sureste de Nueva Zelanda, y la llanura Seychelles, al noreste de Madagascar.

Dorsales oceánicas. La estructura más prominente del fondo oceánico es la **dorsal oceánica** o **centrooceánica**. Como se muestra en la Figura 1.6, la dorsal Centroatlántica y la dorsal del Pacífico oriental son partes de este sistema. Esta estructura ancha y larga forma un cinturón continuo que serpentea a lo largo de más de 70.000 kilómetros alrededor del planeta de una manera similar a la costura de una pelota de béisbol. Lejos de estar constituido por rocas muy deformadas, como la mayoría de las montañas de los continentes, el sistema de dorsales oceánicas consta de capas superpuestas de rocas ígneas fracturadas y elevadas.

La comprensión de las estructuras topográficas que forman la superficie de la Tierra es esencial para entender los mecanismos que han dado forma a nuestro planeta. ¿Qué importancia tiene el enorme sistema de dorsales que se extiende a través de los océanos de todo el mundo? ¿Cuál es la conexión, si la hay, entre los cinturones montañosos jóvenes y activos y las fosas oceánicas? ¿Qué fuerzas deforman las rocas para producir cadenas de montañas majestuosas? Éstas son cuestiones que se tratarán en el próximo capítulo, cuando empecemos a investigar los procesos dinámicos que dieron forma a nuestro planeta en el pasado geológico y continuarán haciéndolo en el futuro.

Las rocas y el ciclo de las rocas

Las rocas son el material más común y abundante de la Tierra. Para un viajero curioso, la variedad parece casi infinita. Al examinar una roca con atención, encontramos que consta de cristales o granos más pequeños denominados minerales. Los *minerales* son compuestos químicos (o en algunas ocasiones elementos únicos), cada uno de ellos con su propia composición y sus propiedades físicas. Los granos o cristales pueden ser microscópicos o fácilmente visibles sin ayuda de un microscopio.

La naturaleza y el aspecto de una roca están fuertemente influidos por los minerales que la componen. Además, la *textura* de una roca, es decir, el tamaño, la forma o la disposición de los minerales que la constituyen, también tiene un efecto significativo en su aspecto. La composición mineral y la textura de una roca, a su vez, son el reflejo de los procesos geológicos que la crearon.

Las características de las rocas proporcionaron a los geólogos las pistas que necesitaban para determinar los procesos que las formaron, lo cual es cierto para todas las rocas. Estos análisis son esenciales para la comprensión de nuestro planeta. Esta comprensión tiene muchas aplicaciones prácticas, como en la búsqueda de recursos minerales y energéticos básicos y la solución de problemas ambientales.

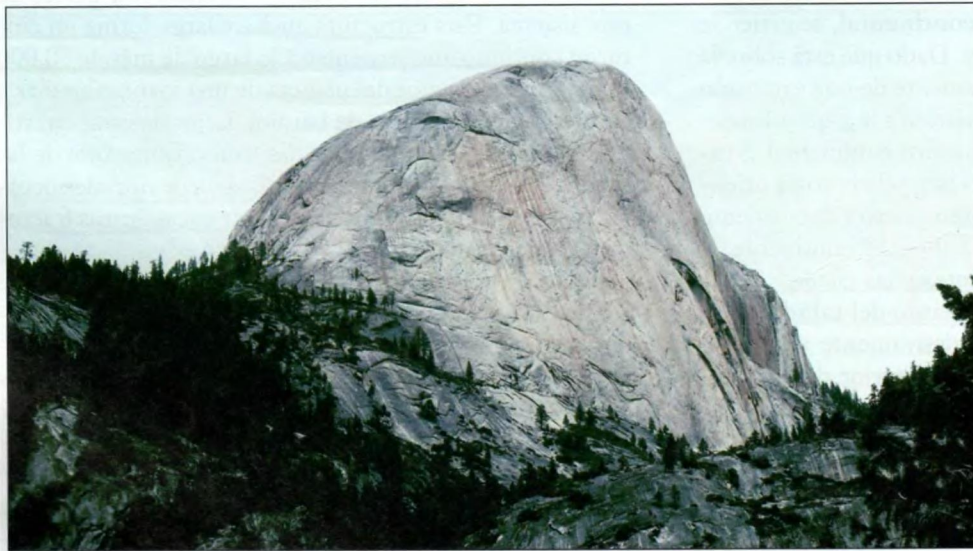
Tipos de rocas básicas

Los geólogos dividen las rocas en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. A continuación, da-

mos un breve vistazo a estos tres grupos básicos. Cada grupo está relacionado con los demás por los procesos que actúan sobre el planeta y dentro de él.

Rocas ígneas. Las **rocas ígneas** (*ignis* = fuego) se forman cuando la roca fundida, denominada *magma*, se enfría y se solidifica. El magma es roca fundida que se puede formar a varios niveles de profundidad en el interior de la corteza de la Tierra y el manto superior. A medida que se enfría el magma, se van formando y creciendo los cristales de varios minerales. Cuando el magma permanece en el interior profundo de la corteza, se enfría lentamente durante miles de años. Esta pérdida gradual de calor permite el desarrollo de cristales relativamente grandes antes de que toda la masa se solidifique por completo. Las rocas ígneas de grano grueso que se forman muy por debajo de la superficie se denominan *plutónicas*. Los núcleos de muchas montañas están constituidos por roca ígnea que se formó de esta manera. Sólo la elevación y la erosión posteriores dejan expuestas estas rocas en la superficie. Un ejemplo común e importante es el *granito* (Figura 1.8). Esta roca plutónica de grano grueso es rica en los minerales silicatados de color claro cuarzo y feldespato. El granito y las rocas relacionadas son constituyentes principales de la corteza continental.

A veces el magma se abre paso hacia la superficie de la Tierra, como durante una erupción volcánica. Dado que se enfría con rapidez en un ambiente de superficie, la roca fundida se solidifica muy deprisa y no hay tiempo suficiente para que crezcan grandes cristales. Antes bien, se produce la formación simultánea de muchos cristales



A.



B.

▲ **Figura 1.8** El granito es una roca ígnea plutónica especialmente abundante en la corteza continental de la Tierra. **A.** La erosión ha descubierto esta masa de granito en el Parque Nacional Yosemite de California. **B.** Muestra de granito que exhibe una textura de grano grueso. (Foto: E. J. Tarbuck.)

pequeños. Las rocas ígneas que se forman en la superficie terrestre se denominan *volcánicas* y suelen ser de grano fino. Un ejemplo abundante e importante es el *basalto*. Esta roca de color verde oscuro a negro es rica en minerales silicatados que contienen una cantidad significativa de hierro y magnesio. Debido a su mayor contenido en hierro, el basalto es más denso que el granito. El basalto y las rocas relacionadas constituyen la corteza oceánica así como muchos volcanes, tanto en el océano como en los continentes.

Rocas sedimentarias. Los *sedimentos*, la materia prima de las **rocas sedimentarias**, se acumulan en capas en la superficie de la Tierra. Son materiales que se forman a partir de rocas preexistentes por los procesos de *meteorización*. Algunos de estos procesos fragmentan físicamente la roca en piezas más pequeñas sin modificar su composición. Otros procesos de meteorización descomponen la roca, es decir, modifican químicamente los minerales en otros nuevos y en sustancias fácilmente solubles en agua.

El agua, el viento o el hielo glacial suelen transportar los productos de la meteorización a lugares de sedimentación donde éstos forman capas relativamente planas. Normalmente los sedimentos se convierten en roca o se *litifican* por uno de los dos procesos siguientes. La *compactación* tiene lugar a medida que el peso de los materiales suprayacentes comprime los sedimentos en masas más densas. La *cementación* se produce conforme el agua que contiene sustancias disueltas se filtra a través de los espacios intergranulares del sedimento. Con el tiempo, el material disuelto en agua precipita entre los granos y los cementa en una masa sólida.

Los sedimentos que se originan y son transportados como partículas sólidas se denominan *sedimentos detríticos* y las rocas que éstos forman son las llamadas *rocas sedimentarias detríticas*. Las dimensiones de las partículas son la principal base para clasificar los miembros de esta categoría. Dos ejemplos comunes son la *lutita* y la *arenisca*. La lutita es una roca de grano fino compuesta por partículas del tamaño del limo (menos de 1/256 mm) y de la arcilla (entre 1/256 y 1/16 mm). La sedimentación de estos pequeños granos está asociada a ambientes «tranquilos» como ciénagas, llanuras fluviales expuestas a inundaciones y porciones de las cuencas oceánicas profundas. *Arenisca* es el nombre dado a las rocas sedimentarias en las que predominan granos del tamaño de la arena (entre 1/16 y 2 mm). Las areniscas se asocian con gran variedad de ambientes, entre ellos las playas y las dunas.

Las *rocas sedimentarias químicas* se forman cuando el material disuelto en el agua precipita. A diferencia de las rocas sedimentarias detríticas, que se subdividen según el tamaño de las partículas, la principal base para distinguir las rocas sedimentarias químicas es su compo-

sición mineral. La caliza, la roca sedimentaria química más común, está compuesta principalmente por el mineral calcita (carbonato de calcio, CaCO_3). Existen muchas variedades de caliza (Figura 1.9). Los tipos más abundantes tienen un origen bioquímico, lo que significa que los organismos que viven en el agua extraen la materia mineral disuelta y crean partes duras, como los caparazones. Después, estas partes duras se acumulan como sedimento.

Los geólogos calculan que las rocas sedimentarias representan sólo alrededor del 5 por ciento (en volumen) de los 16 km externos de la Tierra. Sin embargo, su importancia es bastante mayor de lo que podría indicar este porcentaje. Si tomara muestras de las rocas expuestas en la superficie, encontraría que la gran mayoría son sedimentarias. Por consiguiente, podemos considerar las rocas sedimentarias como una capa algo discontinua y relativamente delgada de la porción más externa de la corteza, lo cual tiene sentido, ya que el sedimento se acumula en la superficie.

A partir de las rocas sedimentarias, los geólogos reconstruyen muchos detalles de la historia de la Tierra. Dado que los sedimentos son depositados en muchos puntos diferentes de la superficie, las capas rocosas que acaban formando contienen muchas pistas sobre los ambientes de la superficie en el pasado. También pueden exhibir características que permiten a los geólogos descifrar información sobre cómo y desde dónde se transportó el sedimento. Además, son las rocas sedimentarias las que contienen fósiles, que son pruebas vitales en el estudio del pasado geológico.



▲ **Figura 1.9** La caliza es una roca sedimentaria química en la que predomina el mineral calcita. Existen muchas variedades. La capa superior del Gran Cañón de Arizona, conocida como la Formación Kaibab, es caliza del Pérmico y su origen es marino. (Foto: E. J. Tarbuck.)

Rocas metamórficas. Las **rocas metamórficas** se producen a partir de rocas ígneas, sedimentarias o incluso otras rocas metamórficas. Así, cada roca metamórfica tiene una roca madre, la roca a partir de la que se ha formado. *Metamórfico* es un adjetivo adecuado porque su significado literal es «cambiar la forma». La mayoría de cambios tienen lugar a temperaturas y presiones elevadas que se dan en la profundidad de la corteza terrestre y el manto superior.

Los procesos que crean las rocas metamórficas a menudo progresan de una manera incremental, desde cambios ligeros (metamorfismo de grado bajo) hasta cambios sustanciales (metamorfismo de grado alto). Por ejemplo, durante el metamorfismo de grado bajo, la roca sedimentaria común lutita se convierte en una roca metamórfica más compacta denominada *pizarra*. En cambio, el metamorfismo de grado alto provoca una transformación tan completa que no se puede determinar la identidad de la roca madre. Además, cuando las rocas situadas a una profundidad (a la que las temperaturas son elevadas) están sujetas a una presión dirigida, se deforman de una manera gradual y generan pliegues complicados. En los ambientes metamórficos más extremos, las temperaturas se aproximan a las temperaturas de fusión de las rocas. No obstante, *durante el metamorfismo la roca debe permanecer esencialmente sólida*, ya que, si se funde por completo, entramos en el ámbito de la actividad ígnea.

La mayor parte del metamorfismo sucede en uno de estos tres ambientes:

1. Cuando un cuerpo magmático intruye en la roca, tiene lugar el *metamorfismo térmico* o *de contacto*. En este caso, el cambio está controlado por un

aumento de la temperatura dentro de la roca huésped que rodea una intrusión ígnea.

2. El *metamorfismo hidrotermal* implica alteraciones químicas que se producen cuando el agua caliente rica en iones circula a través de las fracturas de la roca. Este tipo de metamorfismo suele asociarse con la actividad ígnea que proporciona el calor necesario para provocar reacciones químicas y hacer que estos fluidos circulen a través de la roca.
3. Durante la formación de las montañas, grandes cantidades de rocas enterradas a una gran profundidad están sujetas a las presiones dirigidas y a las temperaturas elevadas asociadas con la deformación a gran escala denominada *metamorfismo regional*.

El grado de metamorfismo se refleja en la textura de la roca y la composición mineral. Durante el metamorfismo regional, los cristales de algunos minerales recrystalizarán con una orientación perpendicular a la dirección de la fuerza compresiva. La alineación mineral resultante a menudo da a la roca una textura en láminas o en bandas llamada *foliación*. El *esquistos* y el *gneis* son dos ejemplos de rocas foliadas (Figura 1.10A).

No todas las rocas metamórficas presentan una textura foliada. Se dice que estas rocas son *no foliadas*. Las rocas metamórficas compuestas sólo por un mineral que forma cristales equidimensionales no son, por regla general, visiblemente foliadas. Por ejemplo, la calcita, si es pura, está compuesta por un solo mineral, la calcita. Cuando una calcita de grano fino experimenta metamorfismo, los pequeños cristales de calcita se combinan y forman cristales entrelazados más grandes. La



A.



B.

▲ **Figura 1.10** Rocas metamórficas comunes. A. El gneis a menudo presenta bandas y con frecuencia tiene una composición mineral similar a la del granito. B. El mármol es una roca de grano grueso, cristalina, no foliada, cuya roca madre es la calcita. (Fotos: E. J. Tarbuck.)

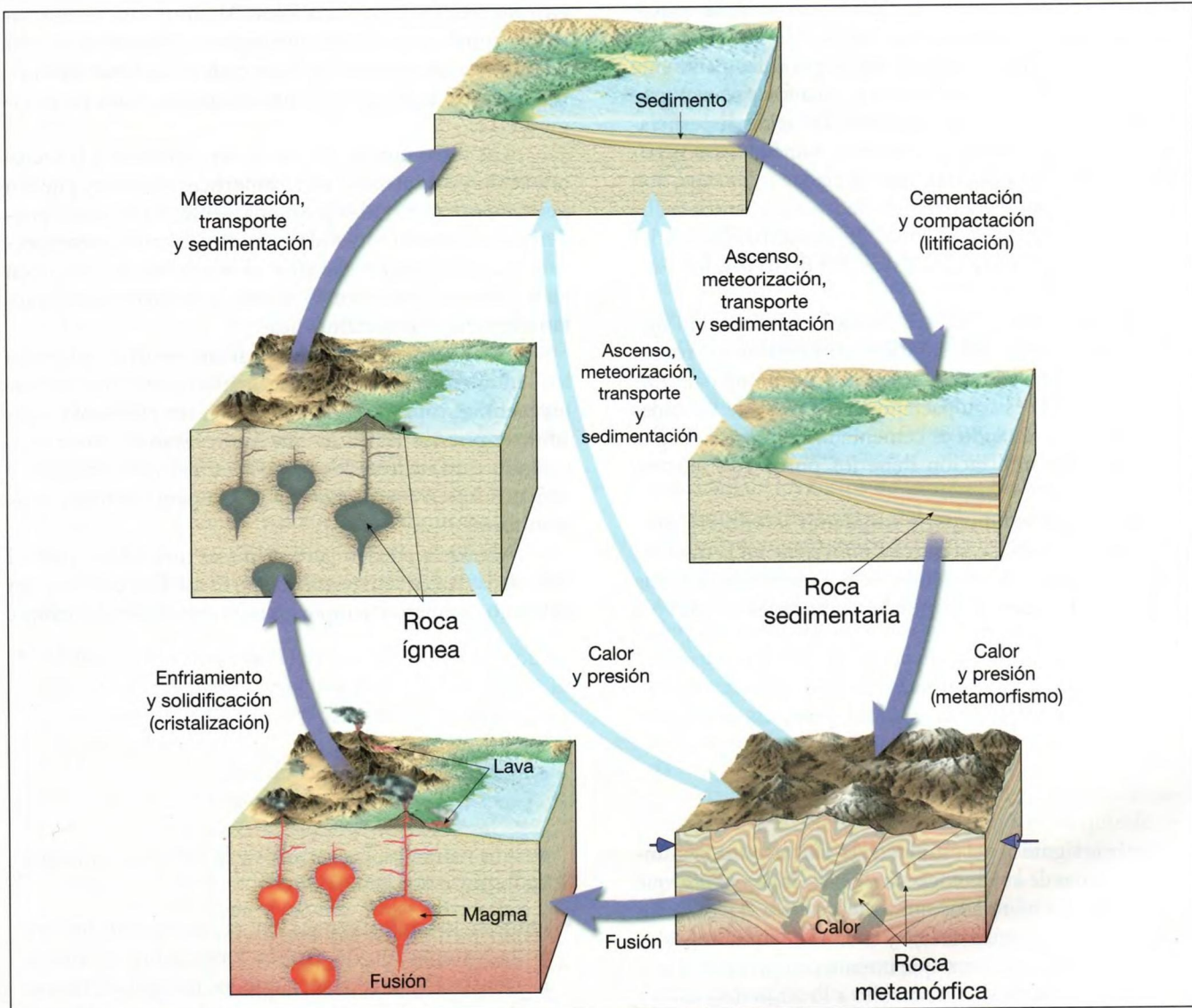
roca resultante es similar a una roca ígnea de grano grueso. Este equivalente metamórfico no foliado de la caliza se denomina *mármol* (Figura 1.10B).

En todos los continentes afloran áreas extensas de rocas metamórficas. Estas rocas son un componente importante de muchos cinturones montañosos, donde constituyen una gran porción del núcleo cristalino de las montañas. Incluso debajo de los interiores continentales estables, que en general están cubiertos por rocas sedimentarias, hay basamentos de rocas metamórficas. En todos estos ambientes, las rocas metamórficas suelen estar muy deformadas y contienen grandes intrusiones de masas ígneas. De hecho, partes importantes de la cor-

teza continental de la Tierra están compuestas por rocas metamórficas y rocas ígneas asociadas.

El ciclo de las rocas: uno de los subsistemas de la Tierra

La Tierra es un sistema. Esto significa que nuestro planeta está formado por muchas partes interactuantes que forman un todo complejo. En ningún otro lugar se ilustra mejor esta idea que al examinar el ciclo de las rocas (Figura 1.11). El **ciclo de las rocas** nos permite examinar muchas de las interrelaciones entre las diferentes partes del sistema Tierra. Nos ayuda a entender el origen de las



▲ **Figura 1.11** Consideradas a lo largo de espacios temporales muy prolongados, las rocas están en constante formación, cambio y reformación. El ciclo de las rocas nos ayuda a entender el origen de los tres grupos básicos de rocas. Las flechas representan los procesos que enlazan cada grupo con los demás.

rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, y a ver que cada tipo está vinculado a los otros por los procesos que actúan sobre y dentro del planeta. Aprender bien el ciclo de las rocas permite examinar sus interrelaciones con mayor detalle a lo largo de este libro.

Ciclo básico. Empecemos en la parte inferior de la Figura 1.11. El magma es la roca fundida que se forma a una gran profundidad por debajo de la superficie de la Tierra. Con el tiempo, el magma se enfría y se solidifica. Este proceso, denominado *crystalización*, puede ocurrir debajo de la superficie terrestre o, después de una erupción volcánica, en la superficie. En cualquiera de las dos situaciones, las rocas resultantes se denominan *rocas ígneas*.

Si las rocas ígneas afloran en la superficie experimentan *meteorización*, en la cual la acción de la atmósfera desintegra y descompone lentamente las rocas. Los materiales resultantes pueden ser desplazados pendiente abajo por la gravedad antes de ser captados y transportados por algún agente erosivo como las aguas superficiales, los glaciares, el viento o las olas. Por fin, estas partículas y sustancias disueltas, denominadas *sedimentos*, son depositadas. Aunque la mayoría de los sedimentos acaba llegando al océano, otras zonas de acumulación son las llanuras de inundación de los ríos, los desiertos, los pantanos y las dunas.

A continuación, los sedimentos experimentan *litificación*, un término que significa «conversión en roca». El sedimento suele litificarse dando lugar a una *roca sedimentaria* cuando es compactado por el peso de las capas suprayacentes o cuando es cementado conforme el agua subterránea de infiltración llena los poros con materia mineral.

Si la roca sedimentaria resultante se entierra profundamente dentro de la tierra e interviene en la dinámica de formación de montañas, o si es intruida por una masa de magma, estará sometida a grandes presiones o a

un calor intenso, o a ambas cosas. La roca sedimentaria reaccionará ante el ambiente cambiante y se convertirá en un tercer tipo de roca, una *roca metamórfica*. Cuando la roca metamórfica es sometida a cambios de presión adicionales o a temperaturas aún mayores, se fundirá, creando un magma que acabará cristalizando en rocas ígneas.

Los procesos impulsados por el calor desde el interior de la Tierra son responsables de la creación de las rocas ígneas y metamórficas. La meteorización y la erosión, procesos externos alimentados por una combinación de energía procedente del Sol y la gravedad, producen el sedimento a partir del cual se forman las rocas sedimentarias.

Caminos alternativos. Las vías mostradas en el ciclo básico no son las únicas posibles. Al contrario, es exactamente igual de probable que puedan seguirse otras vías distintas de las descritas en la sección precedente. Esas alternativas se indican mediante las líneas azules en la Figura 1.11.

Las rocas ígneas, en vez de ser expuestas a la meteorización y a la erosión en la superficie terrestre, pueden permanecer enterradas profundamente. Esas masas pueden acabar siendo sometidas a fuertes fuerzas de compresión y a temperaturas elevadas asociadas con la formación de montañas. Cuando esto ocurre, se transforman directamente en rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas y sedimentarias, así como los sedimentos, no siempre permanecen enterrados. Antes bien, las capas superiores pueden ser eliminadas, dejando expuestas las rocas que antes estaban enterradas. Cuando esto ocurre, los materiales son meteorizados y convertidos en nueva materia prima para las rocas sedimentarias.

Las rocas pueden parecer masas invariables, pero el ciclo de las rocas demuestra que no es así. Los cambios, sin embargo, requieren tiempo; grandes cantidades de tiempo.

Resumen

- **Geología** significa «el estudio de la Tierra». Las dos amplias ramas de la Geología son: (1) la *Geología física*, que examina los materiales que componen la Tierra y los procesos que actúan debajo y encima de su superficie; y (2) la *Geología histórica*, que intenta comprender el origen de la Tierra y su desarrollo a lo largo del tiempo.
- La relación entre las personas y el medio ambiente es un objetivo importante de la Geología y abarca los

riesgos naturales, los recursos y la influencia humana en los procesos geológicos.

- Durante los siglos XVII y XVIII, el *catastrofismo* influyó en la formulación de explicaciones sobre la Tierra. El *catastrofismo* establece que los paisajes terrestres se han desarrollado fundamentalmente debido a grandes catástrofes. Por el contrario, el *uniformismo*, uno de los principios fundamentales de la Geología

moderna, avanzado por *James Hutton* a finales del siglo XVIII, establece que las leyes físicas, químicas y biológicas que actúan en la actualidad han actuado también en el pasado geológico. Esta idea suele resumirse como «el presente es la clave para el pasado». Hutton sostenía que los procesos que parecen ser lentos, podrían, a lo largo de lapsos prolongados de tiempo, producir efectos que fueran exactamente tan grandes como los resultantes de acontecimientos catastróficos súbitos.

- Utilizando los principios de la *datación relativa*, la ordenación de los acontecimientos en su secuencia u orden apropiados sin conocer su edad absoluta en años, los científicos desarrollaron una escala de tiempo geológico durante el siglo XIX. Pueden establecerse fechas relativas aplicando principios como los de la *ley de superposición* y el *principio de sucesión biótica*.
- Toda ciencia se basa en la suposición de que el mundo natural se comporta de una manera constante y predecible. El proceso mediante el cual los científicos recogen datos y formulan *hipótesis* y *teorías* científicas se denomina *método científico*. Para determinar lo que ocurre en el mundo natural, los científicos suelen: (1) realizar observaciones; (2) desarrollar una hipótesis científica; (3) construir experimentos para comprobar la hipótesis, y (4) aceptar, modificar o rechazar la hipótesis después de haberla sometido a prueba. Otros descubrimientos representan ideas puramente teóricas que han soportado un examen exhaustivo. Algunos avances científicos se han realizado cuando se produjo un acontecimiento totalmente inesperado durante un experimento.
- El medio físico de la Tierra se divide tradicionalmente en tres partes principales: la Tierra sólida; la porción de agua de nuestro planeta, la *hidrosfera*; y la envuelta gaseosa de la Tierra, la *atmósfera*. Además, la *biosfera*, la totalidad de vida sobre la Tierra, interacciona con cada uno de los tres reinos físicos y es igualmente una parte integrante de la Tierra.
- Aunque cada una de las cuatro esferas de la Tierra puede estudiarse por separado, todas ellas están relacionadas en un todo complejo y continuamente interactuante que denominamos *sistema Tierra*. La *ciencia del sistema Tierra* utiliza una aproximación interdisciplinaria para integrar el conocimiento de varios ámbitos académicos en el estudio de nuestro planeta y sus problemas ambientales globales.
- Un *sistema* es un grupo de partes interactuantes que forman un todo complejo. Los *sistemas cerrados* son aquellos en los que la energía entra y sale libremente, mientras que la materia no entra ni sale del sistema. En un sistema abierto, tanto la energía como la materia entran y salen del sistema.
- La mayoría de sistemas naturales tiene mecanismos que tienden a intensificar el cambio, llamados *mecanismos de realimentación positiva*, y otros mecanismos, denominados *mecanismos de realimentación negativa*, que tienden a resistir el cambio y, así, a estabilizar el sistema.
- Las dos fuentes de energía que alimentan el sistema Tierra son: (1) el Sol, que impulsa los procesos externos que tienen lugar en la atmósfera, la hidrosfera y la superficie de la Tierra; y (2) el calor del interior de la Tierra, que alimenta los procesos internos que producen los volcanes, los terremotos y las montañas.
- La *hipótesis de la nebulosa primitiva* describe la formación del Sistema Solar. Los planetas y el Sol empezaron a formarse hace unos 5.000 millones de años a partir de una gran nube de polvo y gases. Conforme la nube se contraía, empezó a rotar y a adoptar una forma de disco. El material que era lanzado gravitacionalmente hacia el centro se convirtió en el *protosol*. Dentro del disco en rotación, pequeños centros, denominados *protoplanetas*, absorbían cada vez más cantidad de los restos de la nube. Debido a las elevadas temperaturas cerca del Sol, los planetas interiores fueron incapaces de acumular muchos de los elementos que se evaporan a bajas temperaturas. Debido a las temperaturas muy frías existentes en la lejanía del Sol, los planetas exteriores, grandes, consisten en enormes cantidades de materiales más ligeros. Esas sustancias gaseosas explican los tamaños comparativamente grandes y las bajas densidades de los planetas externos.
- La estructura interna de la Tierra se establece en capas basadas en diferencias de composición química y en los cambios de las propiedades físicas. En cuanto a composición, la Tierra se divide en una *corteza* externa delgada, un *manto* rocoso sólido y un *núcleo* denso. Según sus propiedades físicas, las capas de la Tierra son: (1) la *litosfera*, la capa externa rígida y fría cuyo grosor medio es de unos 100 kilómetros; (2) la *astenosfera*, una capa relativamente dúctil situada en el manto debajo de la litosfera; (3) la *mesosfera*, más rígida, donde las rocas están muy calientes y son ca-

paces de fluir de una manera muy gradual; (4) el *núcleo externo* líquido, donde se genera el campo magnético de la Tierra; y (5) el *núcleo interno* sólido.

- Las dos divisiones principales de la superficie terrestre son los continentes y las cuencas oceánicas. Una diferencia significativa son sus alturas relativas. Las diferencias de elevación entre los continentes y las cuencas oceánicas son consecuencia principalmente de diferencias entre sus densidades y grosores respectivos.
- Las estructuras más grandes de los continentes pueden dividirse en dos categorías: los *cinturones monta-*

ñosos y el *interior estable*. El fondo oceánico se divide en tres grandes unidades topográficas: los *márgenes continentales*, las *cuencas oceánicas profundas* y las *dorsales oceánicas*.

- El *ciclo de las rocas* es uno de los muchos ciclos o bucles del sistema Tierra en los que la materia se recicla. El ciclo de las rocas es una manera de observar muchas de las interrelaciones de la Geología. Ilustra el origen de los tres tipos de rocas básicas y el papel de varios procesos geológicos en la transformación de un tipo de roca en otro.

Preguntas de repaso

1. La Geología se divide tradicionalmente en dos amplias áreas. Nombre y describa esas dos subdivisiones.
2. Describa brevemente la influencia de Aristóteles en las ciencias geológicas.
3. ¿Cómo percibían la edad de la Tierra quienes proponían el catastrofismo?
4. Describa la doctrina del uniformismo. ¿Cómo consideraban los defensores de esta idea la edad de la Tierra?
5. ¿Cuál es la edad aproximada de la Tierra?
6. La escala de tiempo geológico se estableció sin la ayuda de la datación radiométrica. ¿Qué principios se utilizaron para desarrollar esta escala temporal?
7. ¿En qué se diferencia una hipótesis científica de una teoría científica?
8. Enumere y describa brevemente las cuatro «esferas» que constituyen nuestro medio ambiente.
9. ¿En qué se diferencia un sistema abierto de un sistema cerrado?
10. Compare los mecanismos de realimentación positiva y los mecanismos de realimentación negativa.
11. ¿Cuáles son las dos fuentes de energía del sistema Tierra?
12. Enumere y describa brevemente los acontecimientos que llevaron a la formación del Sistema Solar.
13. Enumere y describa brevemente las capas composicionales en las que se divide la Tierra.
14. Compare la astenosfera y la litosfera.
15. Describa la distribución general de las montañas más jóvenes de la Tierra.
16. Distinga entre escudos y plataformas estables.
17. Enumere las tres principales unidades topográficas del fondo oceánico.
18. Diga el nombre de cada una de las rocas que se describen a continuación:
 - Roca volcánica de grano grueso.
 - Roca detrítica rica en partículas de tamaño limo.
 - Roca negra de grano fino que compone la corteza oceánica.
 - Roca no foliada cuya roca madre es la caliza.
19. Para cada una de las siguientes características, indique si está asociada con las rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas:
 - Puede ser plutónica o volcánica.
 - Litificada por compactación y cementación.
 - La arenisca es un ejemplo.
 - Algunos miembros de este grupo tienen foliación.
 - Este grupo se divide en las categorías detrítica y química.
 - El gneis forma parte de este grupo.
20. Utilizando el ciclo de las rocas, explique la afirmación: «una roca es la materia prima para otra».

Términos fundamentales

astenosfera	Geología	mecanismo de	plataforma continental
atmósfera	Geología física	realimentación negativa	plataforma estable
biosfera	Geología histórica	mecanismo de	roca ígnea
catastrofismo	hidrosfera	realimentación positiva	roca metamórfica
ciclo de las rocas	hipótesis	mesosfera	roca sedimentaria
corteza	hipótesis de la nebulosa	modelo	sistema
cratón	primitiva	monte submarino	sistema abierto
cuenca oceánica profunda	litosfera	nebulosa solar	sistema cerrado
datación relativa	llanura abisal	núcleo	principio de superposición
dorsal oceánica (centro- oceánica)	manto	núcleo externo	talud continental
escudo	manto inferior	núcleo interno	teoría
fosa submarina	margen continental	paradigma	uniformismo
		pie de talud	

Recursos de la web



La página Web *Earth* utiliza los recursos y la flexibilidad de Internet para ayudarle en su estudio de los temas de este capítulo. Escrito y desarrollado por profesores de Geología, este sitio le ayudará a comprender mejor esta ciencia. Visite <http://www.librosite.net/tarbuck> y haga clic sobre la cubierta de *Ciencias de la Tierra, octava edición*. Encontrará:

- Cuestionarios de repaso en línea.
- Reflexión crítica y ejercicios escritos basados en la web.
- Enlaces a recursos web específicos para el capítulo.
- Búsquedas de términos clave en toda la red.

<http://www.librosite.net/tarbuck>