

## La Tierra como un sistema

Contacto 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.

### 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 (174), 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 comenzado 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 ( $\text{CO}_2$ ) 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\*.

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

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 CO<sub>2</sub> 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 rompeolas 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.

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.

(El diagrama muestra los procesos de Condensación, Evaporación de lagos y ríos, Precipitación, Escorrentía superficial, Agua subterránea, Evaporación del océano, y Transpiración de las plantas.)

#### 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 materia 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  $-200^{\circ}\text{C}$ , 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 todas 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.

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.

#### 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 “litófilos”, 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 Canadá, 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

#### ▼ 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  $1\text{~g/cm}^3$ ; por consiguiente, la densidad del basalto es el triple que la del agua.

### 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 kilómetros. 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  $11\text{~g/cm}^3$  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  $1.200^\circ\text{C}$  y  $1.400^\circ\text{C}$ , mientras que la temperatura en el centro de la Tierra puede superar los  $6.700^\circ\text{C}$ . 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 quizás 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.

#### 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.