

CAPÍTULO 22

Geología planetaria

Los planetas: una visión de conjunto

- El interior de los planetas
- Las atmósferas de los planetas

La Luna

- La superficie lunar
- Historia lunar

Los planetas: características generales

- Mercurio, el planeta más interno

- Venus, el planeta velado

- Marte, el planeta rojo

- Júpiter, el señor del cielo

- Saturno, el planeta elegante

- Urano y Neptuno, los gemelos

- Plutón, el planeta X

Cuerpos menores del Sistema Solar

- Asteroides: microplanetas

- Cometas

- Meteoritos

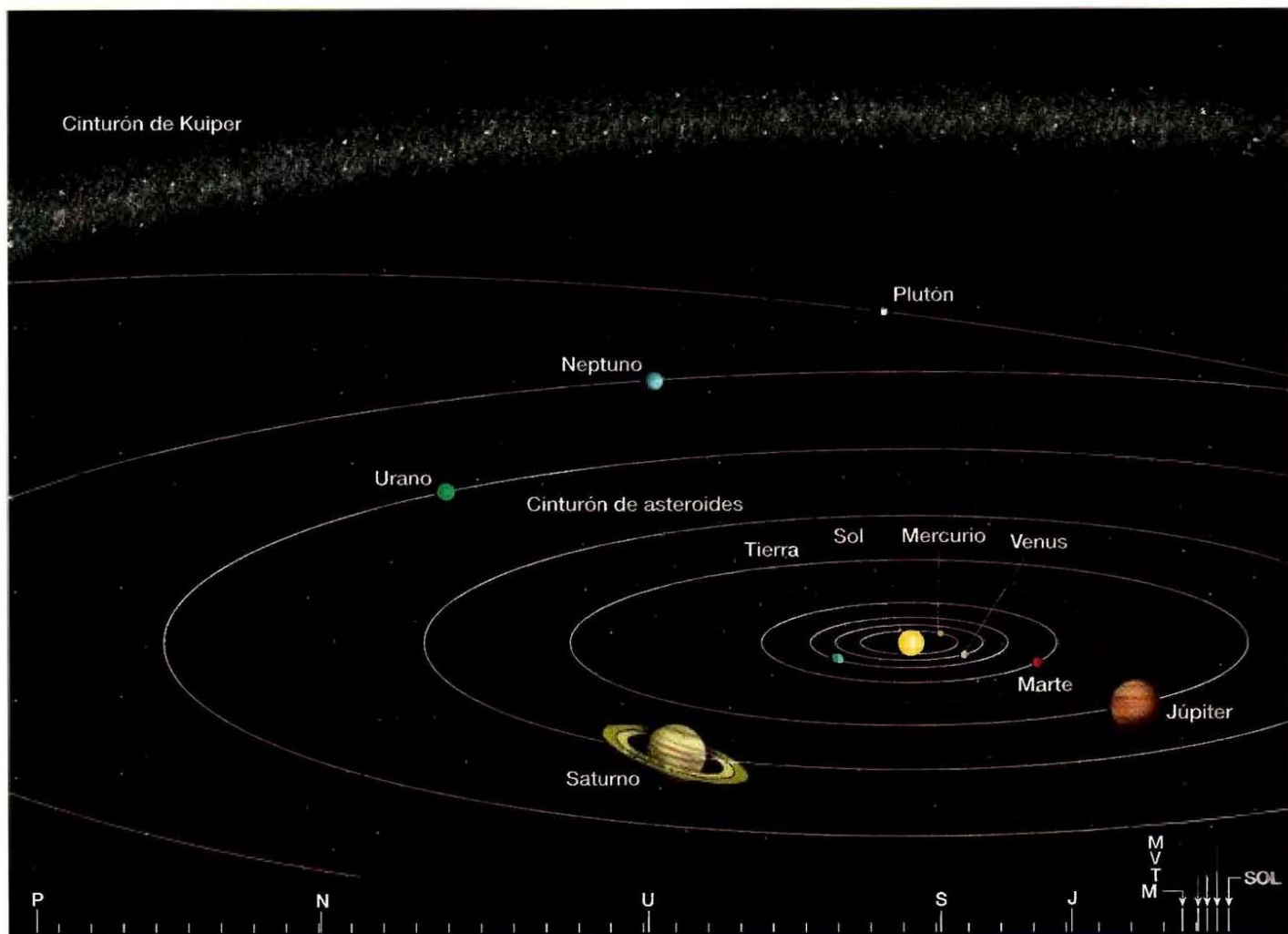
Cuando el ser humano comprendió por primera vez que los planetas eran más parecidos a la Tierra que a las estrellas, creció una gran agitación. ¿Podría haber vida inteligente en estos planetas o en cualquier otro lugar del universo? La exploración espacial ha reavivado este interés. Hasta la fecha no se han encontrado pruebas de vida extraterrestre en nuestro Sistema Solar. Sin embargo, estudiamos los otros planetas para poder conocer cómo se formó nuestro planeta y su historia inicial. Las recientes exploraciones espaciales se han organizado teniendo este objetivo en la mente. Hasta la fecha, las sondas espaciales han explorado Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

El Sol es el centro de un enorme sistema de rotación que consta de nueve planetas, sus satélites y numerosos asteroides, cometas y meteoritos, pequeños pero interesantes. Se calcula que un 99,85 por ciento de la masa de nuestro Sistema Solar está representado por el Sol. El conjunto de los planetas constituye más del 0,15 por ciento restan-

te. Los planetas, en orden desde el Sol, son: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (Figura 22.1).

Bajo el control de la fuerza gravitatoria del Sol, cada planeta mantiene una órbita elíptica y todos ellos viajan en la misma dirección. El planeta más próximo al Sol, Mercurio, tiene el movimiento orbital más rápido, 48 kilómetros por segundo, y el período de revolución alrededor del Sol más corto, 88 días terrestres. Por el contrario, el planeta más distante, Plutón, tiene una velocidad orbital de 5 kilómetros por segundo y necesita 248 años terrestres para completar una revolución.

Imaginemos una órbita dibujada en una hoja de papel. El papel representa el *plano orbital* del planeta. Los planos orbitales de siete planetas se encuentran inclinados en un intervalo de 3 grados con respecto al plano del ecuador solar. Los otros dos, el más próximo al Sol y el más distante, Mercurio y Plutón, están inclinados 7 y 17 grados, respectivamente.



▲ **Figura 22.1** Órbitas de los planetas. Las posiciones de los planetas se muestran a escala en la parte inferior del diagrama.

Los planetas: una visión de conjunto

Un examen cuidadoso de la Tabla 22.1 demuestra que los planetas se pueden agrupar en dos conjuntos: los **planetas terrestres** (parecidos a la Tierra) (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) y los **planetas jovianos** (parecidos a Júpiter) (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Plutón no se incluye en ninguna de las dos categorías (véase Recuadro 22.2).

Las diferencias más obvias entre los planetas terrestres y los jovianos radican en su tamaño (Figura 22.2). Los planetas terrestres más grandes (la Tierra y Venus) tienen un diámetro que es solamente una cuarta parte del diámetro del planeta joviano más pequeño (Neptuno). Además, sus masas son tan sólo 1/17 la de Neptuno. Por consiguiente, a los planetas jovianos se les denomina *gigantes*. Debido a sus localizaciones relativas, a los cuatro planetas jovianos se les suele denominar *planetas exteriores*, mientras que a los planetas terrestres se les denomina *planetas interiores*. Como veremos, parece existir una correlación entre las posiciones de esos planetas y sus tamaños.

Otras dimensiones en las cuales los dos grupos difieren son la densidad, la composición química y la velocidad de rotación. Las densidades de los planetas terrestres tienen un valor medio de unas cinco veces la densidad del agua, mientras que los planetas jovianos tienen densi-

dades medias de sólo 1,5 veces la del agua. Uno de los planetas externos, Saturno, tiene una densidad de sólo 0,7 veces la del agua, lo que significa que Saturno flotaría en un depósito de agua lo bastante grande. Las variaciones de composición química de los planetas son responsables en gran medida de las diferencias de densidad.

El interior de los planetas

Las sustancias que constituyen los planetas se dividen en tres grupos composicionales: *gases*, *rocas* y *hielos*, en función de sus puntos de fusión.

1. Los gases, el hidrógeno y el helio, son los que tienen puntos de fusión próximos al cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ o 0 Kelvin).
2. Las rocas son principalmente silicatos y hierro metálico, cuyos puntos de fusión superan los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Dentro del grupo de hielos se incluyen el amoníaco (NH_3), el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O). Tienen puntos de fusión intermedios (por ejemplo, el H_2O tiene un punto de fusión de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

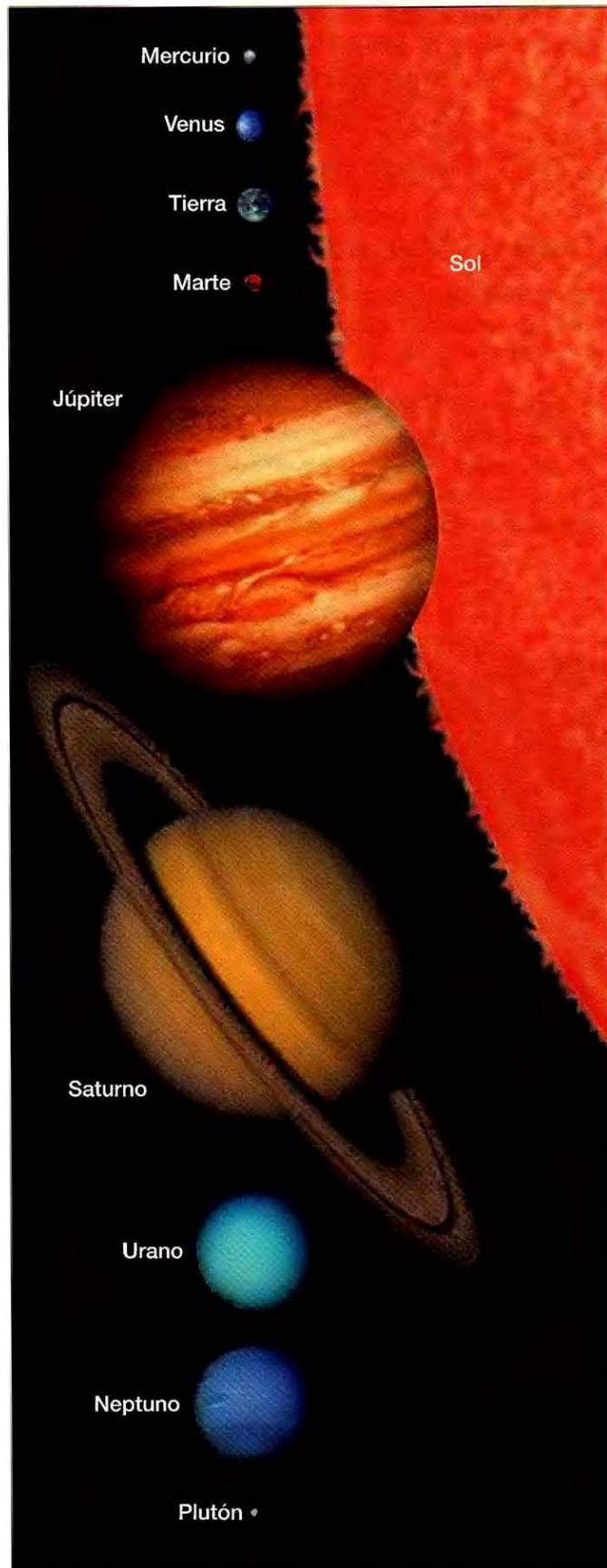
Los planetas terrestres son densos, y están formados en su mayor parte por sustancias rocosas y metálicas, con

Tabla 22.1 Datos planetarios

Planeta	Símbolo	Distancia media desde el Sol		Períodos de revolución	Inclinación orbital	Velocidad orbital km/s
		UA*	Millones de kilómetros			
Mercurio	☿	0,39	58	88 días	$7^{\circ}00'$	47,5
Venus	♀	0,72	108	225 días	$3^{\circ}24'$	35,0
Tierra	♁	1,00	150	365,25 días	$0^{\circ}00''$	29,8
Marte	♂	1,52	228	687 días	$1^{\circ}51'$	24,1
Júpiter	♃	5,20	778	12 años	$1^{\circ}18'$	13,1
Saturno	♄	9,54	1427	29,5 años	$2^{\circ}29'$	9,6
Urano	♅	19,18	2870	84 años	$0^{\circ}46'$	6,8
Neptuno	♆	30,06	4497	165 años	$1^{\circ}46'$	5,3
Plutón	♇	39,44	5900	248 años	$17^{\circ}12'$	4,7

Planeta	Período de rotación	Diámetro kilómetros	Masa relativa (Tierra = 1)	Densidad media (g/cm^3)	Aplanamiento polar (%)	Excentricidad	Número de satélites conocidos
Mercurio	59 ^d	4878	0,06	5,4	0,0	0,206	0
Venus	244 ^d	12.104	0,82	5,2	0,0	0,007	0
Tierra	23 ^h 56 ^m 04 ^s	12.756	1,00	5,5	0,3	0,017	1
Marte	24 ^h 37 ^m 23 ^s	6794	0,11	3,9	0,5	0,093	2
Júpiter	9 ^h 50 ^m	143.884	317,87	1,3	6,7	0,048	28
Saturno	10 ^h 14 ^m	120.536	95,14	0,7	10,4	0,056	30
Urano	17 ^h 14 ^m	51.118	14,56	1,2	2,3	0,047	21
Neptuno	16 ^h 03 ^m	50.530	17,21	1,7	1,8	0,009	8
Plutón	6,4 ^d	2300	0,002	1,8	0,0	0,250	1

* UA = Unidad astronómica, distancia media entre la Tierra y el Sol.



▲ **Figura 22.2** Los planetas dibujados con la misma escala.

cantidades menores de gases y hielos. Los planetas jovianos, por otro lado, contienen grandes cantidades de gases (hidrógeno y helio) y hielos (fundamentalmente agua, amoníaco y metano). Esto explica sus bajas densidades. Los planetas exteriores también contienen cantidades sustanciales de materiales rocosos y metálicos, que se concentran en sus núcleos.

Las atmósferas de los planetas

Los planetas jovianos tienen atmósferas muy gruesas que consisten en cantidades variables de hidrógeno, helio, metano y amoníaco. Por el contrario, los planetas terrestres tienen atmósferas a lo sumo ligeras. El motivo es que la capacidad de un planeta para conservar una atmósfera depende de su masa y de su temperatura.

En términos simples, una molécula de gas puede evaporarse de un planeta si alcanza una velocidad conocida como la **velocidad de escape**. Para la Tierra, esta velocidad es de 11 kilómetros por segundo (unos 40.000 kilómetros por hora). Cualquier material, incluido un cohete, debe alcanzar esta velocidad antes de poder escapar de la gravedad terrestre y entrar en el espacio.

Los planetas jovianos, debido a sus mayores gravedades superficiales, tienen velocidades de escape más altas de 21 a 60 kilómetros por segundo, mucho más elevadas

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Por qué los planetas jovianos son mucho más grandes que los planetas terrestres?

De acuerdo con la hipótesis de la nebulosa, los planetas se formaron a partir de un disco de polvo y gases en rotación que rodeaba el Sol. El crecimiento de los planetas empezó cuando fragmentos sólidos de materia empezaron a colisionar y a agruparse. En el sistema solar interior, las temperaturas eran tan elevadas que sólo los metales y los silicatos pudieron formar granos sólidos. Hacía demasiado calor como para que se formara hielo a partir del agua, el dióxido de carbono y el metano. Por tanto, los planetas interiores (terrestres) se formaron principalmente a partir de sustancias con un elevado punto de fusión que se encontraban en la nebulosa solar. Por el contrario, en las zonas externas frías del Sistema Solar, hacía el frío suficiente como para que se formara hielo de agua y otras sustancias. Por consiguiente, los planetas exteriores se formaron no sólo a partir de acumulaciones de fragmentos sólidos de metales y silicatos, sino también a partir de grandes cantidades de hielo. Al final, los planetas exteriores crecieron lo suficiente como para capturar gravitacionalmente incluso los gases más ligeros (hidrógeno y helio) y convertirse en planetas «gigantes».

que los planetas terrestres. Por consiguiente, es más difícil que los gases se evaporen de ellos. Además, debido a que el movimiento molecular de un gas depende de la temperatura, a las bajas temperaturas de los planetas jovianos, es improbable que incluso los gases más ligeros adquirieran la velocidad necesaria para escapar.

Por otra parte, un cuerpo comparativamente caliente y con poca gravedad superficial, como nuestra Luna, es incapaz de conservar incluso los gases pesados, como el dióxido de carbono y el radón, y, por tanto, carece de atmósfera. Los planetas terrestres ligeramente mayores como la Tierra, Venus y Marte retienen algunos gases pesados, como el dióxido de carbono, pero incluso así sus atmósferas constituyen sólo una porción infinitesimalmente pequeña de sus masas totales.

En el resto de este capítulo consideraremos brevemente cada planeta, además de los miembros menores del Sistema Solar. Primero, sin embargo, visitaremos la compañera de la Tierra en el espacio: nuestra Luna.

La Luna

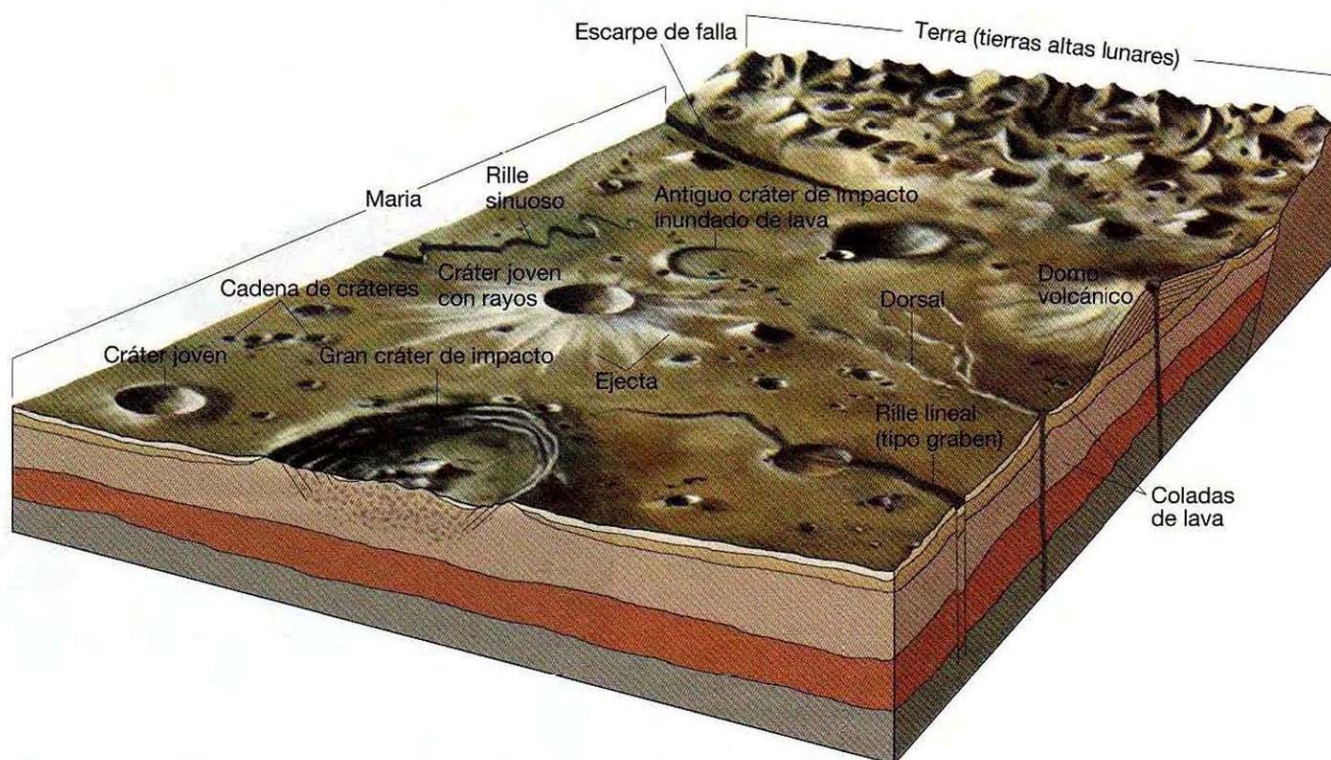
La Tierra tiene ahora centenares de satélites, pero sólo uno natural, la Luna, nos acompaña en nuestro viaje anual alrededor del Sol. Aunque otros planetas tienen lunas, nuestro sistema planeta-satélite es único en el Sistema Solar, porque la luna es inusualmente grande en compa-

ración con su planeta parental. El diámetro de la Luna es de 3.475 kilómetros, alrededor de una cuarta parte de los 12.756 kilómetros de la Tierra.

Teniendo en cuenta la masa lunar, su densidad es 3,3 veces la del agua. Esta densidad es comparable a la de las rocas *del manto* que hay sobre la Tierra, pero es considerablemente menor que la densidad media de la tierra, que es 5,5 veces la del agua. Los geólogos han sugerido que esta diferencia podría explicarse si el núcleo de hierro de la Luna fuera pequeño. La atracción de la gravedad en la superficie lunar es una sexta parte la experimentada en la superficie de la Tierra (una persona que pese en la superficie de la Tierra 67,5 kilogramos, en la Luna pesará aproximadamente 10 kilogramos). Esta diferencia permite a un astronauta llevar un sistema de soporte vital pesado con relativa facilidad. Si no llevara esta carga, saltaría seis veces más alto que en la Tierra.

La superficie lunar

Cuando Galileo orientó por primera vez su telescopio hacia la Luna, vio dos tipos diferentes de terrenos: llanuras oscuras y tierras altas brillantes y craterizadas. Dado que las regiones oscuras se parecían a los mares de la Tierra, fueron denominados **maria** (en singular, **mare**). Este nombre no es afortunado, porque la superficie de la Luna está totalmente desprovista de agua. En la Figura 22.3 se muestran los rasgos típicos de la superficie lunar.



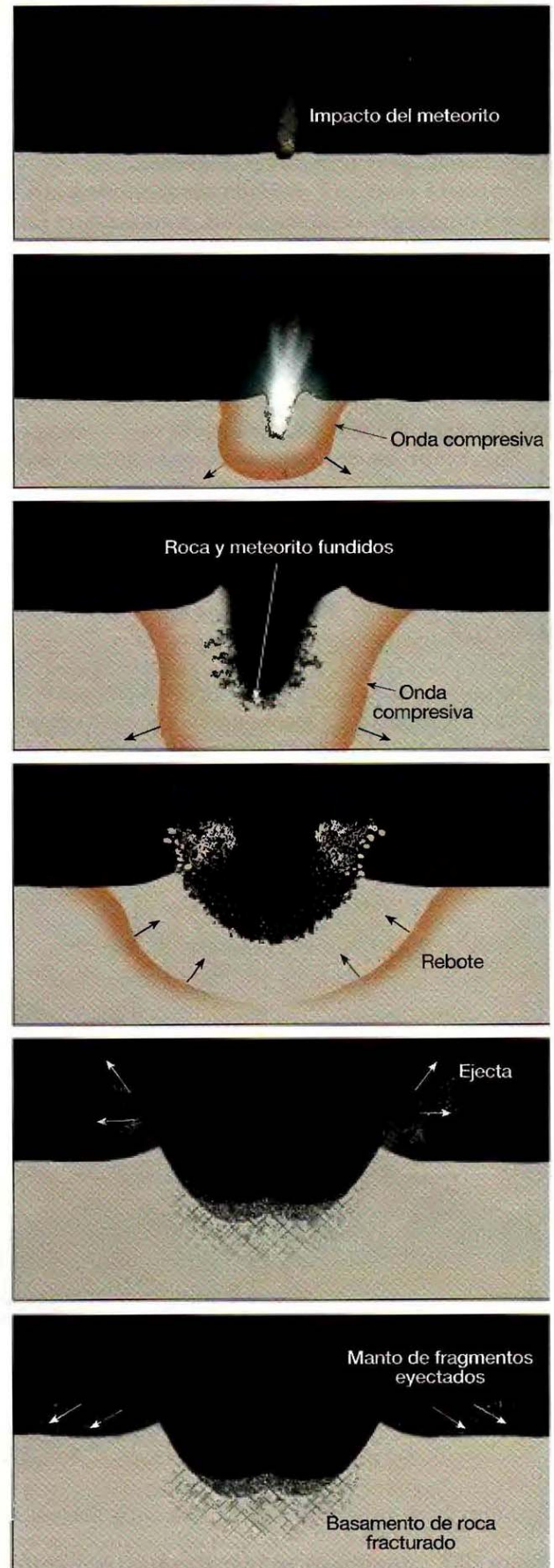
▲ **Figura 22.3** Diagrama que ilustra las principales características topográficas de la superficie lunar.

En la actualidad sabemos que la Luna no tiene atmósfera ni agua. Por consiguiente, la meteorización y la erosión que modifican continuamente la superficie de la Tierra están prácticamente ausentes de la Luna. Además, no hay fuerzas tectónicas activas sobre la Luna, de manera que ya no se producen terremotos ni erupciones volcánicas. Sin embargo, dado que la Luna no está protegida por una atmósfera, se produce un tipo diferente de erosión: partículas diminutas procedentes del espacio (micrometeoritos) bombardean continuamente su superficie y alisan gradualmente el paisaje. Las rocas de la Luna se redondearán ligeramente en su parte superior si quedan expuestas durante largo tiempo en la superficie lunar. No obstante, es improbable que la Luna haya cambiado apreciablemente en los últimos 3.000 millones de años, excepto por la creación de unos pocos cráteres por grandes meteoritos.

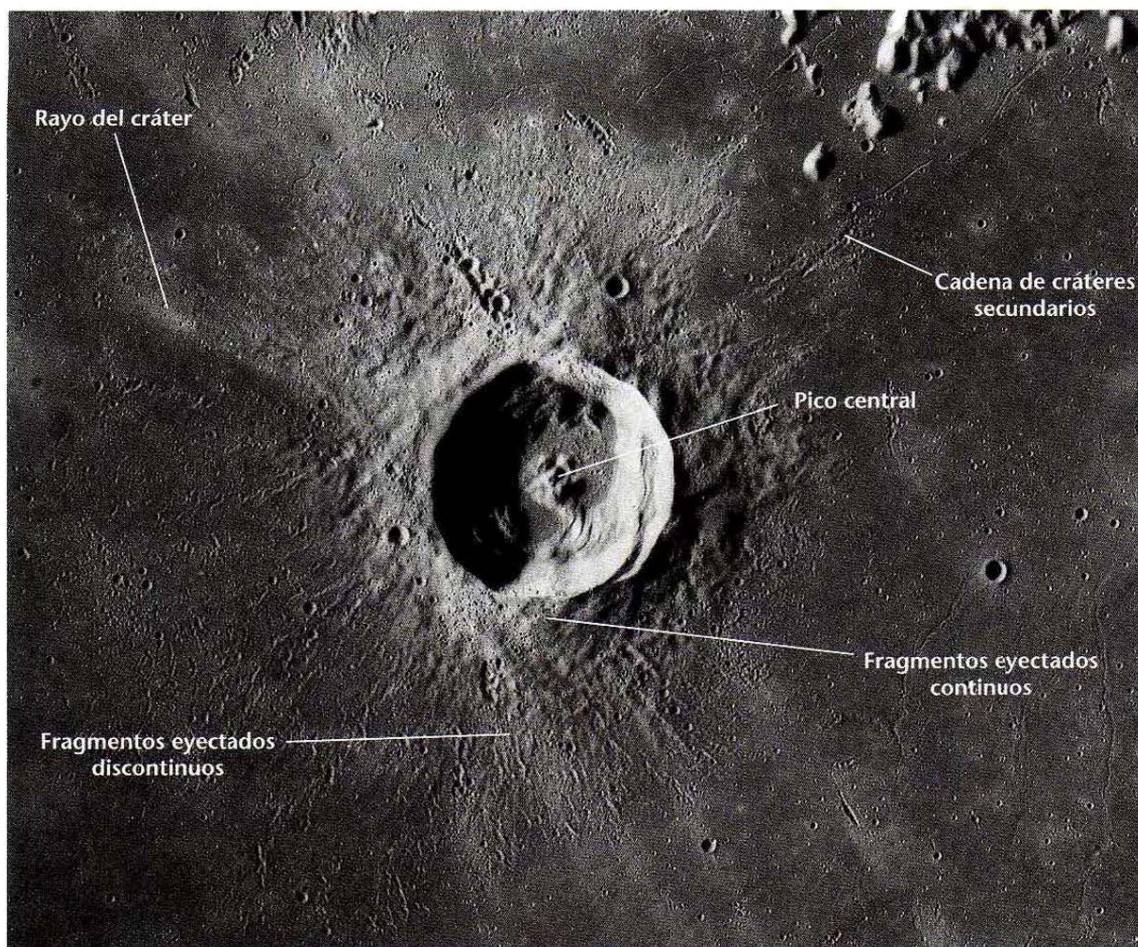
Cráteres Los rasgos más obvios de la superficie lunar son los cráteres. ¡Son tan abundantes que la regla es la existencia de cráteres dentro de cráteres! Los mayores tienen unos 250 kilómetros de diámetro, aproximadamente la anchura de Indiana. La mayoría de los cráteres se produjo por el impacto de partículas en movimiento rápido (meteoritos), un fenómeno que era considerablemente más común al principio de la historia del Sistema Solar que en la actualidad.

Por el contrario, la Tierra tiene tan sólo unos 12 cráteres de impacto fácilmente reconocibles. Esta diferencia puede atribuirse a la atmósfera terrestre. La fricción por el aire quema y destruye las partículas pequeñas antes de que alcancen la superficie. Además, las evidencias de la mayoría de los cráteres que se formaron en el comienzo de la historia de la Tierra han sido eliminadas por la erosión o por procesos tectónicos.

En la Figura 22.4 se ilustra la formación de un cráter de impacto. Tras el impacto, el meteorito que llega a gran velocidad comprime el material sobre el que golpea; a continuación, casi instantáneamente, la roca comprimida rebota, expulsando material del cráter. Este proceso es análogo a la salpicadura que se produce cuando se lanza una roca al agua, y a menudo provoca la formación de un pico central, como se observa en el cráter de la Figura 22.5. La mayor parte del material expulsado (*ejecta*) aterriza cerca del cráter, formando un anillo a su alrededor. El calor generado por los impactos es



► **Figura 22.4** Formación de un cráter de impacto. La energía del meteorito que llega con un movimiento muy rápido se transforma en calor y ondas compresivas. El rebote de la roca comprimida hace que los derrubios sean lanzados desde el cráter, y el calor funde algo del material, produciendo perlas de vidrio. El material arrojado desde el cráter de impacto genera pequeños cráteres secundarios. (Tomado de E. M. Shoemaker.)



▲ **Figura 22.5** El cráter lunar Euler de 20 kilómetros de anchura, situado en el suroeste del Mare Imbrium. Se ven con toda claridad los rayos brillantes, el pico central, los cráteres secundarios y el gran cúmulo de fragmentos eyectados cerca del anillo del cráter. (Cortesía de la NASA.)

suficientemente alto para fundir algo de la roca impactada. Los astronautas han traído muestras de perlas de vidrio producidas de esta manera, así como de rocas formadas cuando fragmentos angulosos y polvo fueron soldados por el impacto.

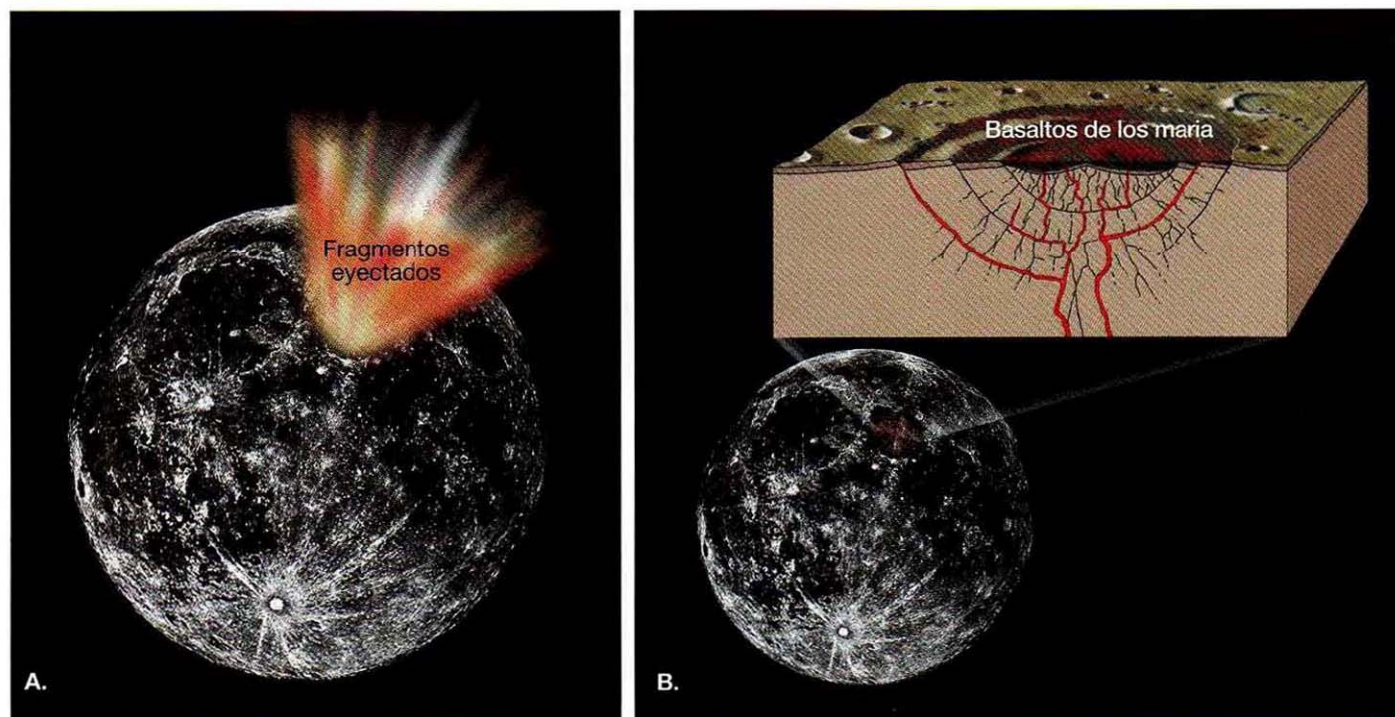
Un meteorito de tan sólo 3 metros de diámetro puede abrir un cráter de 150 metros de ancho. Unos pocos de los grandes cráteres, como los cráteres Kepler y Copérnico, se formaron a partir del impacto de cuerpos de 1 kilómetro de diámetro o superiores. Estos dos grandes cráteres, se piensa, son relativamente jóvenes debido a los *rayos* brillantes (marcas de salpicadura), que irradian hacia fuera de ellos centenares de kilómetros.

Tierras altas Son áreas topográficamente elevadas con gran densidad de impactos que constituyen la mayor parte de la superficie lunar. De hecho, toda la cara oculta de la Luna se caracteriza por esa topografía. (Sólo los astronautas han visto la cara oculta, porque la Luna gira sobre su eje una vez con cada revolución alrededor de la Tierra, y mantiene siempre la misma cara mirando a la Tierra.) En

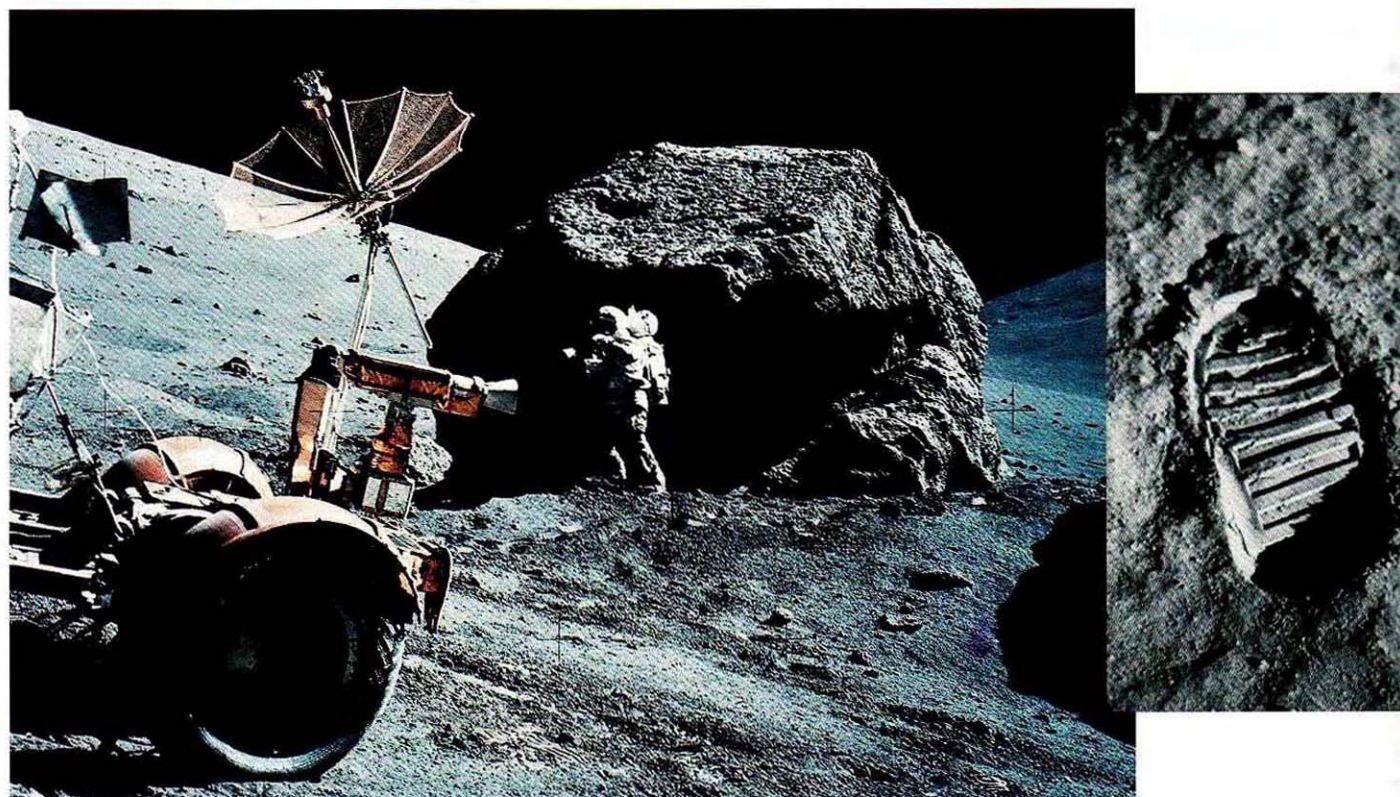
las tierras altas hay cordilleras. Los picos lunares más altos alcanzan elevaciones que se aproximan a los 8 kilómetros, sólo uno menos que el monte Everest.

Maria Los mares de lavas basálticas se originaron cuando los asteroides bombardearon la superficie lunar, permitiendo que el magma basáltico extruyera hacia el exterior (Figura 22.6). Aparentemente los cráteres se inundaron con una capa tras otra de lava basáltica muy fluida, de manera parecida a lo ocurrido en la *llanura de Columbia* en el noroeste de Estados Unidos. Las coladas de lava tienen a menudo 30 metros de grosor, y el espesor total del material que rellena los maria debe aproximarse a varios centenares de metros.

Regolito Todos los terrenos lunares están cubiertos con una capa de derrubios grises no consolidados procedentes de unos cuantos miles de millones de años de bombardeo meteorítico (Figura 22.7). Esta capa, parecida al suelo, a la que se denomina con propiedad **regolito lunar** (*regos* = capa; *lithos* = piedra), está compuesta por rocas



▲ **Figura 22.6** Formación de los maria. A. El impacto de una masa del tamaño de un asteroide produjo un enorme cráter de centenares de kilómetros de diámetro y alteró la corteza lunar situada a gran distancia de ese cráter. B. Relleno del área del impacto con basaltos fluidos, quizá procedentes de la fusión parcial que se produjo en zonas profundas del manto lunar.



▲ **Figura 22.7** El astronauta Harrison Schmitt recogiendo muestras de la superficie lunar. Obsérvense las huellas (detalle) en el «suelo» lunar. (Cortesía de la NASA.)

ígneas, brechas, perlas de vidrio y fino *polvo lunar*. En los maria que fueron explorados por los astronautas del *Apollo*, el grosor del regolito lunar parece ser sólo un poco mayor de 3 metros.

Historia lunar

Aunque la Luna es nuestro vecino planetario más próximo y los astronautas han obtenido muestras de su superficie, se desconoce todavía mucho sobre su origen. El modelo más ampliamente aceptado del origen de la Luna es que durante el período de formación del Sistema Solar, un cuerpo del tamaño de Marte impactó en la Tierra. El impacto habría licuado la superficie terrestre y expulsado grandes cantidades de rocas de la corteza y el manto desde una Tierra muy joven. Una parte de estos derrubios expulsados habría entrado en órbita alrededor de la Tierra, donde coalescieron y formaron la Luna.

La hipótesis del impacto gigante es coherente con una serie de hechos conocidos sobre la Luna. El material expulsado estaría constituido en su mayor parte por rocas del manto y la corteza pobres en hierro, lo que explicaría la ausencia de un núcleo medible de hierro en la Luna. Además, el material expulsado habría permanecido en órbita el tiempo suficiente como para haber perdido los volátiles (agua) de los que la Luna carece. A pesar de las evidencias que confirman esta teoría, algunas preguntas permanecen sin respuesta.

Sin embargo, los geólogos planetarios han logrado entender los detalles básicos de la historia más reciente de la Luna. Uno de sus métodos consiste en observar las variaciones de densidad de los cráteres (número de cráteres por unidad de superficie). Cuanto mayor es la densidad de cráteres, más antiguo debe ser el rasgo topográfico. A partir de esas evidencias, los científicos concluyeron que la Luna evolucionó en tres fases: la corteza original (tierras altas), las cuencas de los maria y los cráteres con rayos.

Durante su historia primitiva, la Luna recibió impactos continuos a medida que barría hacia sí las partículas del Sistema Solar. Este continuo bombardeo, y quizá la desintegración radiactiva, generaron suficiente calor para fundir la superficie externa de la Luna y, con bastante probabilidad, también el interior. Los restos de esa corteza original ocupan las tierras altas densamente craterizadas, cuya edad se ha calculado en unos 4.500 millones de años, aproximadamente la misma edad que la Tierra.

El segundo acontecimiento importante en la evolución de la Luna fue la formación de las cuencas de los maria (véase Figura 22.6). La datación radiométrica de los basaltos de los maria les atribuye una edad comprendida entre 3.200 y 3.800 millones de años, aproximadamente

1.000 millones de años más jóvenes que la corteza inicial. En algunos lugares, las coladas de lava se superponen a las tierras altas, otro testimonio de la menor edad de los depósitos de los maria.

Los últimos rasgos destacados que se formaron fueron los cráteres con rayos, como el cráter Copérnico. El material expulsado de estas jóvenes depresiones se ve claramente revistiendo la superficie de los maria y muchos cráteres más antiguos, que carecen de rayos. Incluso un cráter relativamente joven, como el Copérnico, debe tener una antigüedad de millones de años. Si se hubiera formado sobre la tierra, las fuerzas erosivas lo habrían destruido hace ya mucho tiempo.

Si se dispusiera de fotos de la Luna tomadas hace varios centenares de millones de años, revelarían que la Luna ha cambiado poco desde entonces. Con todos los datos parece que la Luna es un cuerpo tectónicamente muerto que va errante a través del espacio y del tiempo.

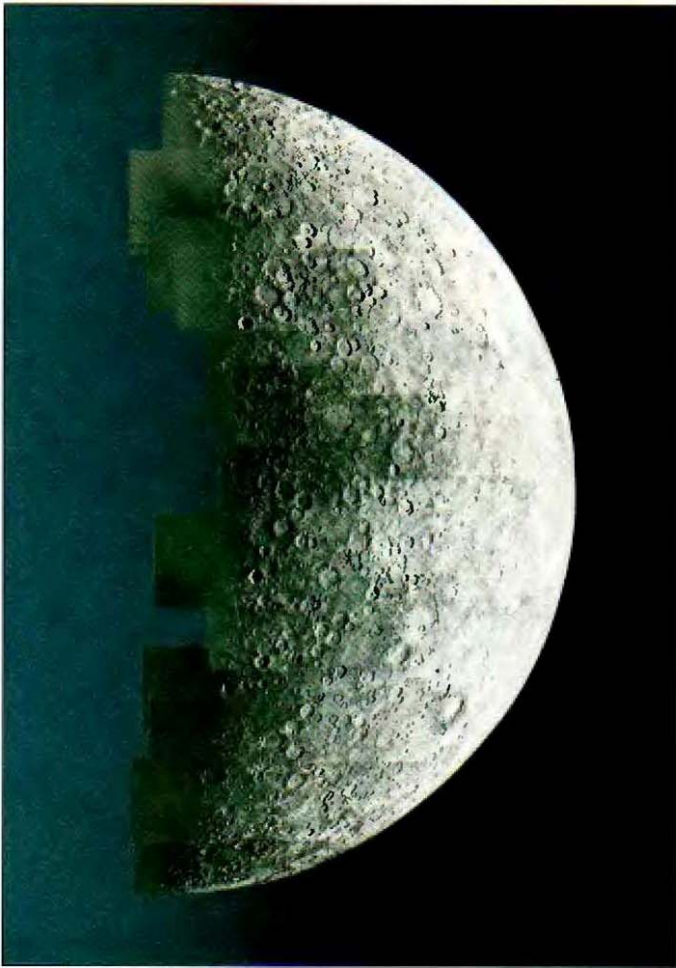
Los planetas: características generales

Mercurio, el planeta más interno

Mercurio, el segundo planeta más pequeño, y el más interno, apenas es algo mayor que la Luna y es más pequeño que otros tres satélites del Sistema Solar. Como la Luna, absorbe la mayor parte de la luz solar que incide sobre él, reflejando sólo el 6 por ciento al espacio (Figura 22.8). Esto es característico de los cuerpos terrestres que no tienen atmósfera. (La Tierra refleja alrededor del 30 por ciento de la luz que incide sobre ella, la mayor parte desde las nubes.)

Mercurio tiene tierras altas con cráteres, muy parecidas a las de la Luna, y enormes terrenos lisos que recuerdan a los maria. Sin embargo, a diferencia de la Luna, Mercurio es un planeta muy denso, lo que significa que contiene un núcleo de hierro muy grande para su tamaño. Además, tiene largos escarpes que atraviesan las planicies y los cráteres por igual. Estos acantilados pueden haberse producido por acortamiento de la corteza a medida que el planeta se enfrió y se encogió.

Mercurio se mueve rápidamente en su órbita, pero rota lentamente. Un ciclo día-noche completo en la Tierra tarda 24 horas, pero en Mercurio necesita 179 días terrestres. Por tanto, una noche en Mercurio dura alrededor de 3 meses y va seguida de 3 meses de luz diurna. Las temperaturas nocturnas descienden hasta $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las del mediodía superan los $427\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo suficientemente calientes como para fundir el plomo y el estaño. Las probabilidades de vida en Mercurio con estas características son nulas.



▲ **Figura 22.8** Fotomosaico de Mercurio. Esta visión de Mercurio es notablemente similar a la «cara oculta» de la Luna. (Cortesía de la NASA.)

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Tienen planetas algunas estrellas cercanas?

Sí. Aunque se sospechaba desde hacía tiempo, hasta hace poco no se verificó la existencia de planetas extrasolares. Los astrónomos han descubierto estos cuerpos midiendo las oscilaciones de las estrellas cercanas. El primer supuesto planeta fuera del Sistema Solar se descubrió en 1995, orbitando la estrella 51 Pegasi, a 42 años luz de la Tierra. Desde entonces, se han identificado más de dos docenas de cuerpos del tamaño de Júpiter, la mayoría de ellos sorprendentemente cerca de las estrellas que orbitan.

Venus, el planeta velado

Venus, secundado en brillo sólo por la Luna en el cielo nocturno, es famoso por la diosa del amor y la belleza. Orbita el Sol en un círculo casi perfecto una vez cada 255 días

terrestres. Es similar a la Tierra en tamaño, densidad, masa y localización en el Sistema Solar. Por tanto, se le ha denominado el «gemelo de la Tierra». Debido a sus semejanzas, se esperaba que un estudio detallado de Venus proporcionara a los geólogos una mejor comprensión de la historia evolutiva de la Tierra.

Venus está envuelto en gruesas nubes impenetrables a la luz visible. No obstante, la cartografía por radar realizada desde la nave espacial *Magellan* e instrumentos terrestres ha revelado una topografía variada con rasgos que se encuentran a medio camino entre los en la Tierra y los de Marte (Figura 22.9). Dicho de manera sencilla, se envían a la superficie de Venus pulsos de radar en la longitud de onda de microondas y se miden las alturas de las llanuras y las montañas cronometrando la vuelta del eco del radar. Estos datos han confirmado que el vulcanismo basáltico y las deformaciones tectónicas son los procesos dominantes que actúan sobre Venus. Además, debido a la baja densidad en cráteres de impacto, el vulcanismo y la deformación tectónica deben haber sido muy activos durante el pasado geológico reciente.

Alrededor del 80 por ciento de la superficie de Venus son llanuras hundidas cubiertas por un manto de coladas volcánicas. Algunos canales de lava se extienden centenares de kilómetros; uno serpentea el planeta a lo largo



▲ **Figura 22.9** Esta vista global de la superficie de Venus se ha generado por computador a partir de la cartografía realizada durante dos años por el radar del proyecto *Magellan*. Las estructuras brillantes y retorcidas que cruzan el planeta son montañas y cañones muy fracturados de las tierras altas orientales de la región de Afrodita. (Cortesía de la NASA/JPL.)

de 6.800 kilómetros. Se han identificado miles de estructuras volcánicas, la mayoría de ellas pequeños volcanes en escudo, aunque se han cartografiado más de 1.500 volcanes mayores de 20 kilómetros. Uno es el Sapas Mons, de 400 kilómetros de diámetro y 1,5 kilómetros de altura. Muchas coladas de este volcán fueron emitidas desde sus flancos, más que desde su cima, de la misma manera que los volcanes en escudo hawaianos.

Sólo el 8 por ciento de la superficie venusiana son tierras altas que pueden recordar las áreas continentales de la Tierra. La actividad tectónica sobre Venus parece estar impulsada por el ascenso y el descenso de material hacia el interior del planeta. Aunque todavía opera en Venus la convección del manto, los procesos de la tectónica de placas, que reciclan la litosfera rígida, no parecen haber contribuido a la topografía venusiana actual.

Antes de la llegada de los vehículos espaciales, Venus se consideró un lugar potencialmente hospitalario para los organismos vivos. Sin embargo, las pruebas procedentes de las sondas espaciales indican lo contrario. La superficie de Venus alcanza temperaturas de 475 °C y su atmósfera contiene un 97 por ciento de dióxido de carbono. Sólo se han detectado cantidades ínfimas de vapor de agua y de nitrógeno. La atmósfera venusiana contiene una cubierta de nubes opacas de unos 25 kilómetros de grosor, y tiene una presión atmosférica 90 veces la existente sobre la superficie de la Tierra. Este ambiente hostil hace improbable que la vida tal y como la conocemos exista en Venus.

Marte, el planeta rojo

Marte ha despertado mayor interés que cualquier otro planeta entre científicos y no científicos (véase Recuadro 22.1). Cuando imaginamos vida inteligente en otros mundos, los marcianitos verdes aparecen en nuestra imagina-

ción. El interés por Marte se debe fundamentalmente a la accesibilidad del planeta a la observación. Todos los demás planetas que están al alcance del telescopio tienen ocultas sus superficies por nubes, excepto Mercurio, cuya proximidad al Sol hace difícil su observación. A través del telescopio, Marte aparece como un balón rojo interrumpido por algunas regiones negras cuya intensidad cambia durante el año marciano. Las características telescópicas más notables de Marte son sus casquetes polares de color blanco brillante, que se parecen a los de la Tierra.

Atmósfera marciana La atmósfera marciana tiene una densidad que es sólo un 1 por ciento la terrestre y está compuesta fundamentalmente por dióxido de carbono con diminutas cantidades de vapor de agua. Los datos procedentes de las sondas marcianas confirman que los casquetes polares de Marte están compuestos de agua helada, cubiertos por una fina capa de dióxido de carbono congelado. A medida que el invierno se aproxima a cada hemisferio, vemos el crecimiento del casquete polar de ese hemisferio en dirección al ecuador conforme las temperaturas descienden hasta -125 °C y se deposita más dióxido de carbono.

Aunque la atmósfera de Marte es muy tenue, se producen grandes tormentas de polvo, que pueden ser responsables de los cambios de color observados desde los telescopios terrestres. Los vientos de fuerza huracanada, de hasta 270 kilómetros por hora, pueden persistir durante semanas. Las imágenes tomadas por el *Viking 1* y el *Viking 2* revelaron un paisaje marciano notablemente similar a un desierto rocoso de la Tierra (Figura 22.10), con abundantes dunas de arena y cráteres de impacto parcialmente rellenos de polvo.

Espectacular superficie marciana El *Mariner 9*, el primer satélite artificial que giró en órbita alrededor de otro planeta, llegó a Marte en 1971 entre una tormenta de polvo.



▲ **Figura 22.10** Esta imagen del paisaje marciano tomada por el *Viking 1*, en su punto de aterrizaje, muestra un campo de dunas con características notablemente similares a las visibles en los desiertos de la Tierra. Las crestas de las dunas parecen indicar que recientes tormentas de viento movieron la arena de las dunas desde abajo a la derecha hasta arriba a la izquierda. El gran bloque de la izquierda se encuentra a unos 10 metros de la nave espacial y mide 3 metros. (Cortesía de la NASA.)



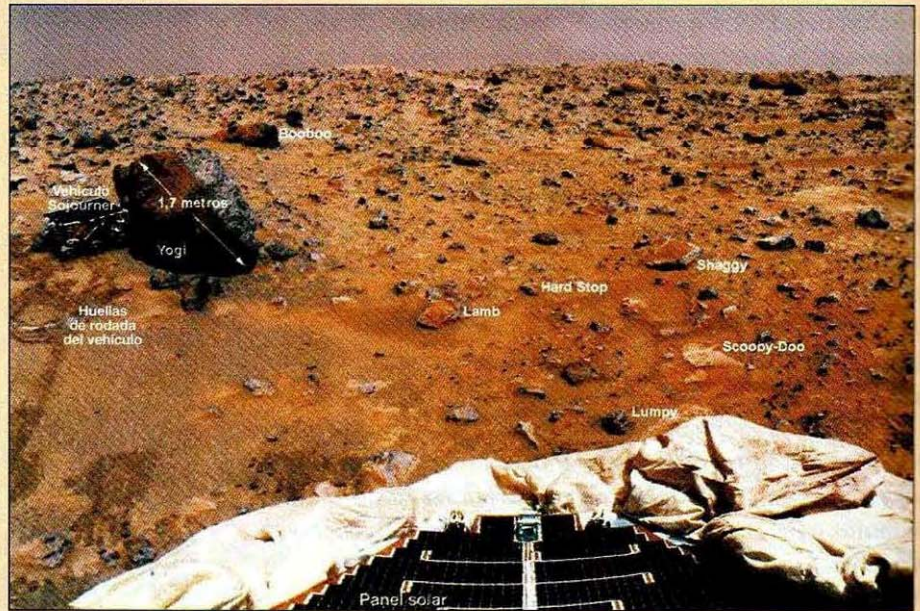
Recuadro 22.1 ▶ Entender la Tierra

Pathfinder: el primer geólogo en Marte

El 4 de julio de 1997, la sonda espacial *Mars Pathfinder* aterrizó en la superficie cubierta de rocas de Marte y desplegó el vehículo con ruedas, *Sojourner*. Durante los tres meses siguientes, la plataforma envió a la Tierra tres gigabits de datos, entre los cuales había 16.000 imágenes y 20 análisis químicos. El punto de aterrizaje era un vasto paisaje ondulado esculpido por antiguas inundaciones. Se escogió este lugar con depósitos de inundaciones con la esperanza de que hubiera una serie de tipos de roca que el vehículo *Sojourner* pudiera examinar.

El *Sojourner* transportó un espectrómetro de rayos X, partículas alfa y fotones (APXS) empleado para determinar la composición de las rocas y el «suelo» marciano (regolito) en el lugar de aterrizaje (Figura 22.A). Además, el vehículo era capaz de tomar imágenes de cerca de las rocas. A partir de estas imágenes, los investigadores concluyeron que las rocas eran ígneas. Sin embargo, primero se creyó que un objeto duro, blanco y plano llamado Scooby Doo era una roca sedimentaria, pero los datos del APXS sugieren que su composición química es como la del suelo de la zona. Por tanto, Scooby Doo es probablemente un suelo bien cementado.

Durante su primera semana en Marte, el APXS del *Sojourner* obtuvo datos de una parcela de suelo eólico y una roca de tamaño medio, conocida afectuosamente como Barnacle Bill. Una evaluación preliminar de los datos que tenía el



▲ **Figura 22.A** El vehículo del *Pathfinder*, el *Sojourner* (izquierda), obteniendo datos sobre la composición química de una roca marciana conocida como Yogi. (Foto cortesía de la NASA.)

APXS sobre el Barnacle Bill demuestra que contiene más del 60 por ciento de sílice. Si se confirman estos datos, eso podría indicar que Marte contiene la roca volcánica andesita. Los investigadores esperaban que la mayoría de las rocas volcánicas de Marte fuera basaltos, que tiene un contenido menor de sílice (menos del 50 por ciento). En la Tierra, las andesitas se asocian con regiones tectónicamente activas en las que la corteza oceánica subduce hacia el manto. Son ejemplos los volcanes de los Andes en

Suramérica y de la cordillera Cascade, en Norteamérica.

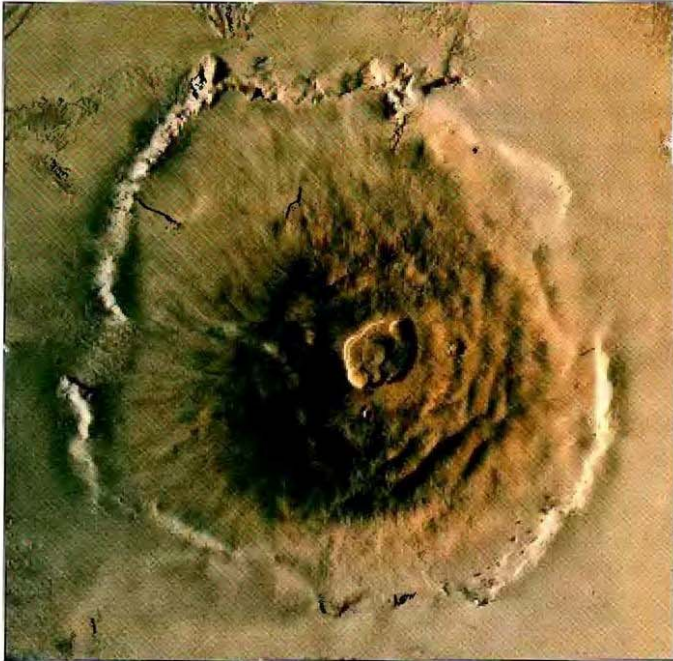
El *Sojourner* analizó ocho rocas y siete suelos. Hasta ahora, los resultados son sólo preliminares. Dado que estas rocas están cubiertas por un polvo rojizo con un alto contenido de azufre, surgió alguna polémica sobre la composición exacta de estas rocas marcianas. Algunos investigadores creen que todas tienen la misma composición. Las diferencias en las mediciones, afirman, son consecuencia del grosor variable del polvo.

Cuando el polvo aclaró, las imágenes del hemisferio septentrional marciano revelaron numerosos grandes volcanes. El mayor, el monte Olimpo, es del tamaño de Ohio y tiene 23 kilómetros de altura, más de 2,5 veces la altura del monte Everest. Este y otros volcanes gigantes recuerdan a los volcanes de escudo hawaianos que hay sobre la Tierra (Figura 22.11).

La mayor parte de las características superficiales marcianas son antiguas, si se miden en comparación con la Tierra. El hemisferio meridional marciano, muy craterizado, es probablemente similar en edad a las tierras al-

tas lunares (de 3.500 a 4.500 millones de años de antigüedad). Incluso las características volcánicas de aspecto relativamente reciente del hemisferio norte pueden tener más de 1.000 millones de años. Este hecho y la ausencia de registros sísmicos por los sismógrafos del *Viking* indican un planeta tectónicamente muerto.

Otro hallazgo sorprendente realizado por el *Mariner 9* fue la existencia de diversos cañones que dejan pequeño incluso al Gran Cañón del río Colorado de la Tierra. Uno de los mayores, el Valles Marineris, se piensa que se ha formado por hundimiento de la corteza a lo largo

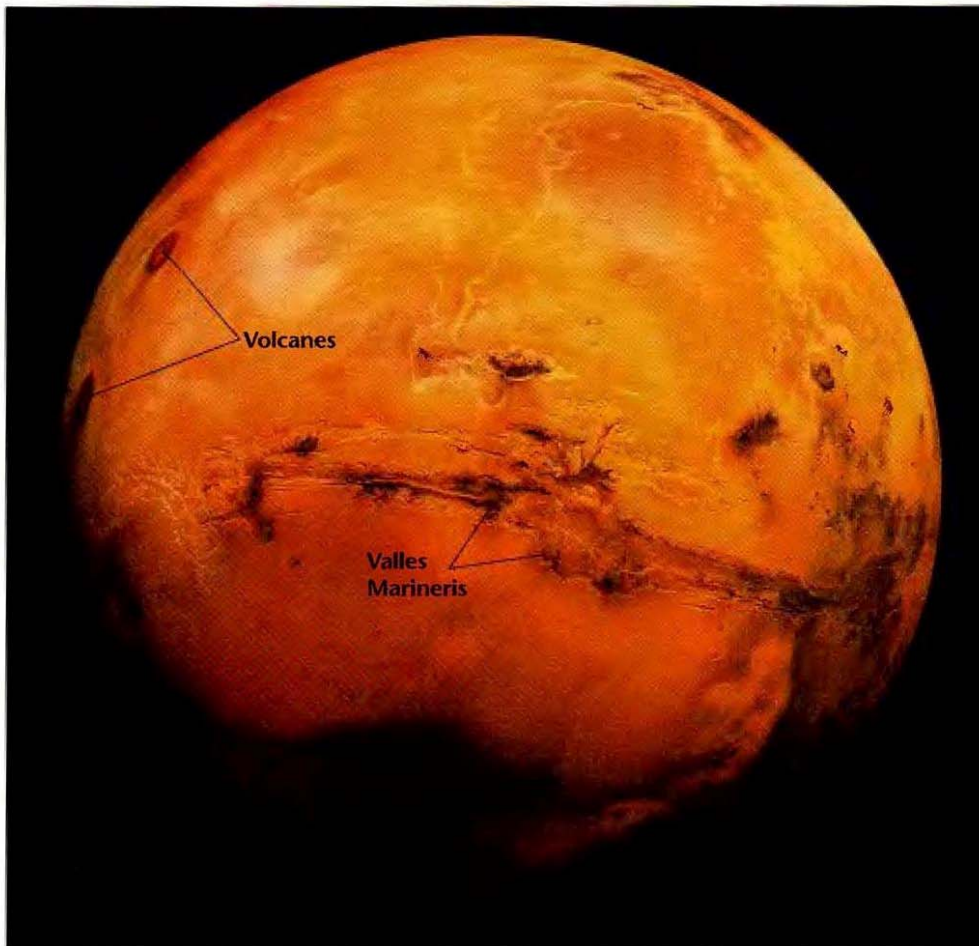


▲ **Figura 22.11** Imagen del monte Olimpo, un volcán en escudo inactivo de Marte que abarca un área cuyo tamaño es aproximadamente el del estado de Ohio. (Cortesía del U. S. Geological Survey.)

de inmensas fallas. A este respecto, sería comparable con los valles de rift africanos (Figura 22.12).

¿*Agua en Marte?* No todos los valles marcianos tienen un origen tectónico. Algunas zonas exhiben modelos de drenaje similares a los creados por las corrientes en la Tierra. Además, las imágenes del satélite orbital *Viking* han revelado islas antiguas inconfundibles en lo que ahora es un lecho de corriente seco. Cuando se descubrieron por primera vez estos canales de corrientes, algunos observadores especularon con la posibilidad de que en alguna ocasión hubiera existido sobre Marte una gruesa atmósfera cargada de agua capaz de generar chaparrones torrenciales. Si fuera así, ¿qué ocurrió con esta agua? La atmósfera marciana actual contiene sólo vestigios de ella.

Muchos geólogos planetarios no aceptan la premisa de que Marte haya tenido en alguna ocasión un ciclo de agua activo similar al de la Tierra. Antes bien, creen que muchos de los grandes valles de corrientes se crearon por el hundimiento del material superficial causado por la fusión lenta del hielo superficial. Si esto hubiera sido así, esos grandes valles serían más parecidos a las estructuras terrestres formadas por procesos gravitacionales.



◀ **Figura 22.12** Esta imagen muestra el sistema completo de cañones del Valles Marineris, de más de 5.000 kilómetros de longitud y hasta 8 kilómetros de profundidad. Los puntos de color rojo oscuro del borde izquierdo de la imagen son enormes volcanes, que miden cada uno alrededor de 25 kilómetros. (Cortesía del U. S. Geological Survey.)

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Por qué los volcanes de la Tierra son mucho más pequeños que los de Marte?

Los mayores volcanes en escudo se forman donde las plumas de roca caliente ascienden desde la profundidad del interior de un planeta. La Tierra es tectónicamente activa, con placas en movimiento que mantienen la corteza en constante movimiento. Por ejemplo, las islas Hawaii están compuestas por una cadena de volcanes en escudo que se formaron cuando la placa Pacífica se desplazó por encima de una pluma del manto relativamente estacionaria. En Marte, los volcanes como el monte Olimpo han crecido hasta alcanzar un gran tamaño porque allí la corteza permanece estacionaria. Las erupciones sucesivas ocurren en el mismo lugar y se añaden a la masa de un único volcán en lugar de producir varias estructuras más pequeñas, como sucede en la Tierra.

Las imágenes del *Mars Global Surveyor* indican que las aguas subterráneas han migrado recientemente hacia la superficie. Las filtraciones en forma de manantial han creado canales donde emergen de los muros de los valles y los cráteres. Algo del agua que brotó podía estar congelada al principio debido a las temperaturas marcianas medias que oscilan entre -70 °C y -100 °C . Sin embargo, acabó emergiendo en forma de una mezcla de sedimentos, hielo y líquido que formó los canales. Puesto que el agua es un ingrediente esencial para la vida, los astrobiólogos están intrigados y entusiasmados por la posibilidad de comprender este fenómeno en el futuro.

Satélites marcianos Los diminutos Phobos y Deimos, los dos satélites marcianos, no se descubrieron hasta 1977, porque tienen sólo 24 y 15 kilómetros de diámetro, respectivamente. Phobos está más próximo a su planeta que cualquier otro satélite natural del Sistema Solar (sólo a 5.500 kilómetros) y necesita tan sólo 7 horas y 39 minutos para completar una revolución. El *Mariner 9* reveló que los dos satélites tienen formas irregulares y numerosos cráteres de impacto.

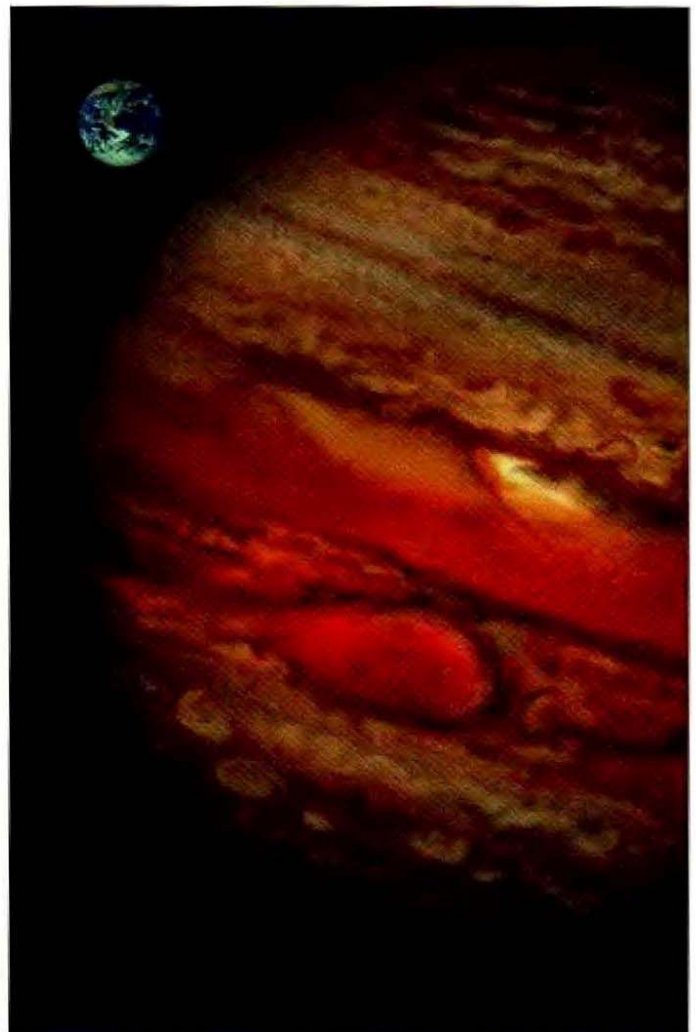
Es probable que esas lunas sean asteroides capturados por Marte. Una coincidencia de lo más interesante entre astronomía y literatura es la estrecha semejanza entre Phobos y Deimos y dos satélites marcianos de ficción descritos por Jonathan Swift en los *Viajes de Gulliver*, que se escribió aproximadamente 150 años antes de que se descubrieran esos satélites.

Júpiter, el señor del cielo

Júpiter, un verdadero gigante entre los planetas, tiene una masa 2,5 veces mayor que la masa combinada de to-

dos los demás planetas, satélites y asteroides. De hecho, si hubiera sido unas 10 veces mayor, Júpiter habría evolucionado hasta convertirse en una pequeña estrella. Pese a su gran tamaño, su masa es tan sólo 1/800 la del Sol. Júpiter gira también más deprisa que cualquier otro planeta, completando una rotación en algo menos de 10 horas terrestres. El efecto de este rápido giro es el ensanchamiento de la región ecuatorial y el aplanamiento de la región polar (véase la columna «Aplanamiento polar» de la Tabla 22.1).

Cuando se mira a través de un telescopio o unos binoculares, Júpiter parece estar cubierto por franjas alternas de nubes de múltiples colores alineadas en paralelo con su plano ecuatorial (Figura 22.13). La característica más notable es la *Gran Mancha Roja* del hemisferio sur (Figura 22.13). Este punto ha sido una característica destacada desde que se descubrió hace más de tres siglos. Cuando el *Voyager 2* pasó por Júpiter en 1979, era del tamaño



▲ **Figura 22.13** Visión artística de Júpiter con la Gran Mancha Roja visible en su hemisferio sur. Imagen de la Tierra para escala.

de dos círculos como la Tierra colocados uno al lado del otro. En ocasiones se ha hecho incluso mayor.

Las imágenes del *Pioneer 11*, cuando pasó a 42.000 kilómetros de la capa superior de nubes de Júpiter en 1974, indicaron que la Gran Mancha Roja es una tormenta que gira en el sentido contrario al de las agujas del reloj (ciclónica). Está atrapada entre dos corrientes atmosféricas del tipo de las corrientes en chorro que fluyen en direcciones opuestas. Esta enorme tormenta huracanada gira una vez cada 12 días terrestres. Aunque se han observado diversas tormentas más pequeñas en otras regiones de la atmósfera de Júpiter, ninguna de ellas ha sobrevivido durante más de unos pocos días.

Estructura de Júpiter La atmósfera de hidrógeno-helio de Júpiter tiene también metano, amoníaco, agua y compuestos de azufre como constituyentes menores. Los sistemas de vientos generan las bandas de color claro y oscuro que rodean a este planeta gigante (Figura 22.14). A diferencia de los vientos terrestres, que son impulsados por la energía solar, el propio Júpiter desprende casi el doble de calor que el que recibe del Sol. Por tanto, es el calor *interior* de Júpiter el que produce enormes corrientes de convección en la atmósfera.

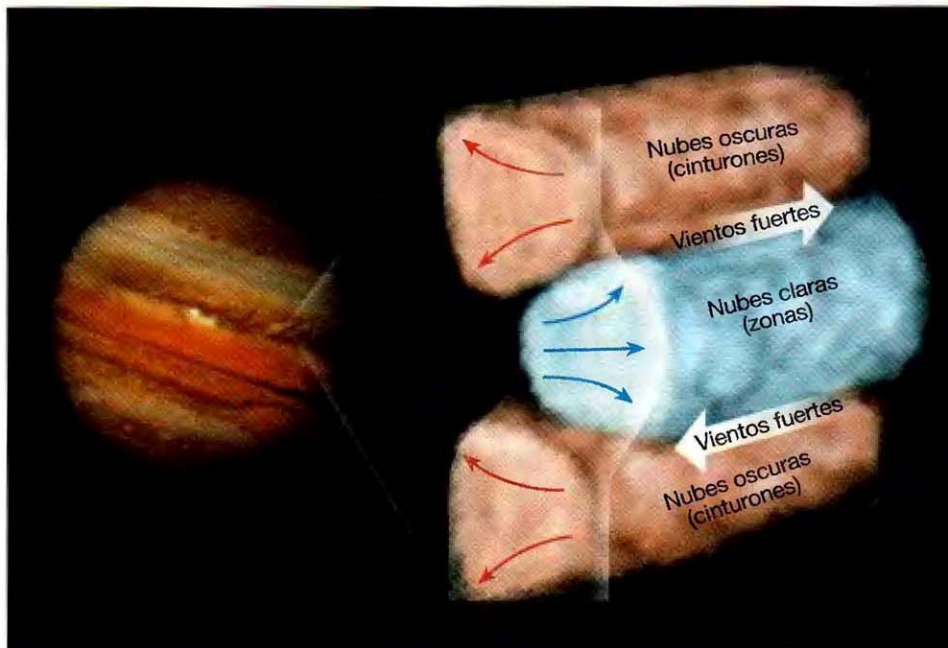
La presión atmosférica en la parte superior de las nubes es igual a la presión terrestre al nivel del mar. Dada la inmensa gravedad de Júpiter, la presión aumenta rápidamente hacia su superficie. A 1.000 kilómetros por debajo de las nubes, la presión es lo suficientemente grande como para comprimir el hidrógeno en un líquido. Por consiguiente, se piensa que la superficie de Júpiter es un océano gigante de hidrógeno líquido. A menos de la mi-

dad de camino hacia el interior de Júpiter, presiones extremas hacen que el hidrógeno líquido se convierta en hidrógeno *metálico líquido*. Se cree también que Júpiter contiene tanto material rocoso y metálico como se encuentra en los planetas terrestres, probablemente en un núcleo central.

Lunas de Júpiter El sistema de satélites de Júpiter, que consta de 28 lunas descubiertas hasta ahora, se parece a un sistema solar en miniatura. Los cuatro satélites mayores, descubiertos por Galileo, viajan en órbitas casi circulares alrededor de Júpiter con períodos que oscilan entre 2 y 17 días terrestres. Los dos satélites galileanos mayores, Calisto y Ganímedes, sobrepasan el tamaño de Mercurio, mientras que los dos más pequeños, Europa e Io, tienen aproximadamente el tamaño de la Luna terrestre. Esas lunas galileanas pueden observarse con binoculares o con un telescopio pequeño y son interesantes por sí solas.

Por el contrario, los cuatro satélites más externos de Júpiter son muy pequeños (20 kilómetros de diámetro), giran en órbitas con direcciones opuestas (*movimiento retrógrado*) a las de las lunas más grandes y tienen órbitas muy inclinadas con respecto al ecuador joviano. Esos satélites parecen ser asteroides que pasaron lo suficientemente cerca como para ser capturados gravitacionalmente por Júpiter.

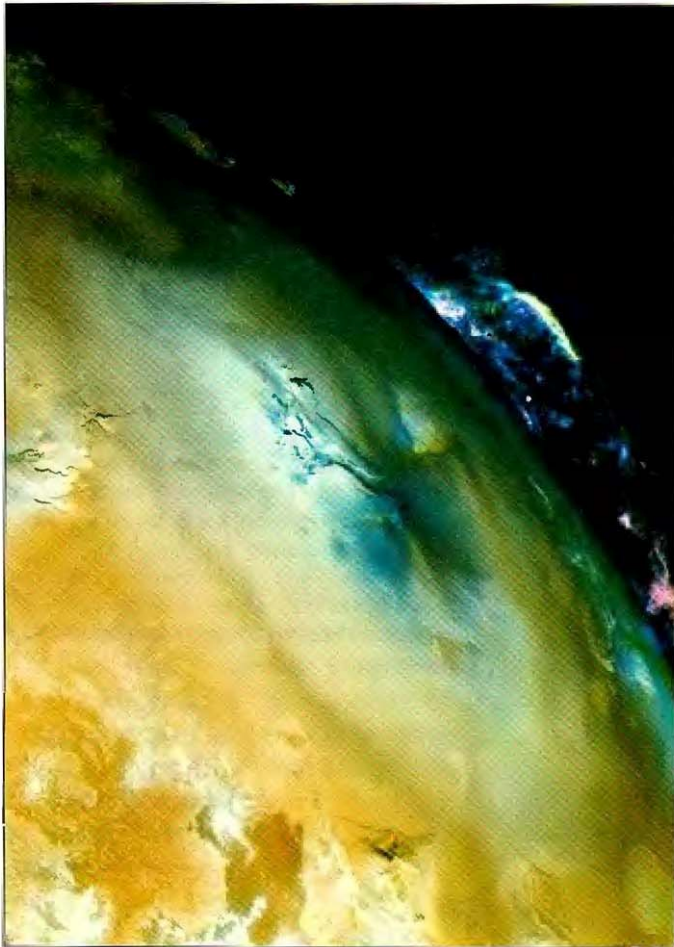
Las imágenes de los *Voyagers 1* y *2* revelaron en 1979, para la sorpresa de casi todos, que cada uno de los cuatro satélites galileanos es un mundo geológico único. La más interna de las lunas galileanas, Io, es uno de los tres cuerpos volcánicamente activos descubiertos en nuestro Sistema Solar, junto con la Tierra y la luna de Neptuno,



◀ **Figura 22.14** Estructura de la atmósfera de Júpiter. Las áreas de nubes claras (zonas) son regiones donde los gases están ascendiendo y enfriándose. El hundimiento domina el flujo en las capas de nubes más oscuras (cinturones). Esta circulación convectiva, junto con la rotación rápida del planeta, genera los vientos de gran velocidad observados entre los cinturones y las zonas.

Tritón. Hasta la fecha, se han descubierto numerosos centros volcánicos sulfurosos activos. Se han visto elevarse de la superficie de Io plumas en forma de paraguas hasta alturas próximas a los 200 kilómetros (Figura 22.15). Se cree que la fuente de calor que impulsa la actividad volcánica de Io es la energía mareal generada por una incansable «interacción» entre Júpiter y los otros satélites galileanos. Dado que Io está unido gravitacionalmente a Júpiter, siempre mira del mismo lado al planeta gigante, como la Luna terrestre. La fuerza gravitacional de Júpiter y de los otros satélites cercanos tira y empuja del abombamiento mareal de Io a medida que su órbita, ligeramente excéntrica, lo acerca y lo aleja alternativamente de Júpiter. Esta flexión gravitacional de Io se transforma en calor (similar a cuando se dobla hacia delante y hacia atrás un clip) y provoca las espectaculares erupciones volcánicas sulfurosas de Io.

Uno de los descubrimientos más inesperados realizado por el *Voyager 1* es el fino sistema de anillos de Júpiter. Analizando cómo estos anillos dispersan la luz, los in-



▲ **Figura 22.15** Una erupción volcánica en Io. Esta pluma de gases volcánicos y fragmentos se eleva a 100 kilómetros por encima de la superficie de Io. (Cortesía de la NASA.)

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

Además de la Tierra, ¿hay algún otro cuerpo del Sistema Solar que tenga agua líquida?

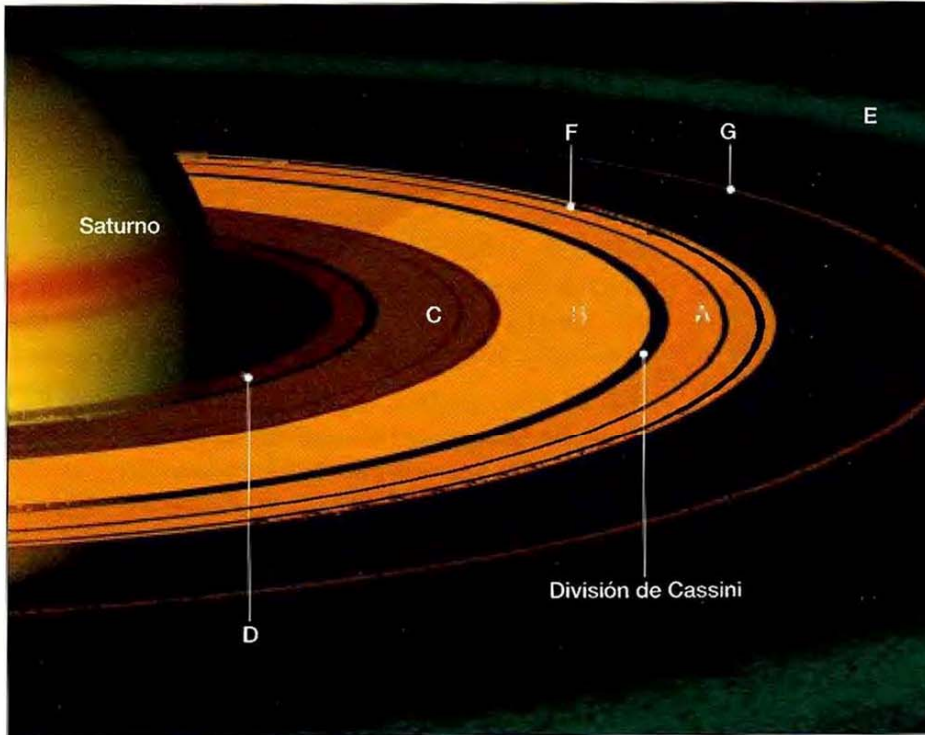
Se considera que los planetas más cercanos al Sol que la Tierra son demasiado cálidos como para contener agua líquida, y los que se encuentran más lejos del Sol son, en general, demasiado fríos como para tener agua en estado líquido (aunque algunas estructuras en Marte sugieren que pudo haber agua líquida abundante en algún momento de su historia). No obstante, las mejores perspectivas de encontrar agua líquida en nuestro Sistema Solar se encuentran debajo de las superficies de hielo de algunas lunas de Júpiter. Por ejemplo, se sospecha que Europa tiene un océano de agua líquida escondido debajo de su cubierta exterior de hielo. Las imágenes detalladas enviadas a la Tierra desde la nave espacial *Galileo* han revelado que la superficie de hielo de Europa es bastante joven y exhibe grietas aparentemente llenas de líquido oscuro desde debajo. Esto sugiere que bajo este caparazón de hielo, Europa debe de tener un interior móvil y cálido, y quizá un océano. Dado que la existencia de agua en estado líquido es necesaria para la vida tal como la conocemos, ha habido mucho interés en enviar un satélite a Europa (y más tarde una plataforma capaz de lanzar un submarino robótico) para determinar si tiene también vida marítima.

investigadores concluyeron que los anillos están compuestos por pequeñas partículas oscuras, de un tamaño similar a las partículas de humo. Además, la naturaleza débil de los anillos indica que estos fragmentos microscópicos están muy dispersos. Se cree que las partículas son fragmentos eyectados por impactos de meteorito de las superficies de Metis y Adrastea, dos pequeñas lunas de Júpiter.

Saturno, el planeta elegante

Saturno, que necesita 29,46 años terrestres para completar una revolución, está a una distancia del Sol casi el doble que Júpiter; sin embargo, su atmósfera, composición y estructura interna parecen ser notablemente similares a las de Júpiter. La característica más destacada de Saturno es su sistema de anillos (Figura 22.16), descubiertos por Galileo en 1610. Debido a la baja resolución de su telescopio primitivo, los anillos parecían dos cuerpos pequeños adyacentes al planeta. Su naturaleza anular la descubrió 50 años más tarde el astrónomo holandés Christian Huygens.

Aproximación a Saturno En 1980 y 1981, las misiones de los vehículos espaciales impulsados por energía nuclear



◀ **Figura 22.16** Una visión del extraordinario sistema de anillos de Saturno.

Voyager 1 y *2* se acercaron a 100.000 kilómetros de Saturno. Se obtuvo más información en unos pocos días de la que se había adquirido desde que Galileo miró por primera vez con el telescopio este elegante planeta.

1. La atmósfera de Saturno es muy dinámica, con vientos que alcanzan los 1.500 kilómetros a la hora.
2. En la atmósfera de Saturno se producen grandes «tormentas» ciclónicas similares a la Gran Mancha Roja de Júpiter, aunque más pequeñas.
3. Se descubrieron otras once lunas.
4. Se observó que los anillos de Saturno son más complejos de lo esperado.

Más recientemente las observaciones de los telescopios terrestres y el *telescopio espacial Hubble* han ampliado nuestros conocimientos sobre el sistema anular de Saturno. En 1995 y 1996, cuando las posiciones de la Tierra y de Saturno permitieron ver los anillos de perfil, reduciendo así el resplandor de los anillos principales, se hicieron visibles los anillos más débiles y los satélites de Saturno.

Sistemas anulares planetarios Hasta el descubrimiento reciente de que Júpiter, Urano y Neptuno tienen también sistemas de anillos, se pensaba que este fenómeno era exclusivo de Saturno. Aunque los cuatro sistemas anulares conocidos difieren en los detalles, comparten muchos atributos. Todos están formados por múltiples anillos con-

céntricos separados por espacios vacíos de varias anchuras. Además, cada anillo está compuesto por partículas individuales («satélites pequeños» de hielo y roca) que giran en torno al planeta y a la vez impactan con regularidad unos contra otros.

La mayoría de anillos se sitúa en una de dos categorías en función de la densidad de las partículas. Los principales anillos de Saturno (denominados A y B en la Figura 22.16) y los anillos brillantes de Urano están muy compactados y contienen «pequeñas lunas» cuyo tamaño oscila entre unos pocos centímetros (tamaño de un guijarro) y varios metros (tamaño de una casa). Se cree que estas partículas chocan con frecuencia cuando orbitan su planeta. A pesar del hecho de que los anillos densos de Saturno se extienden a lo largo de varios centenares de kilómetros, son muy delgados, y quizá miden menos de 100 metros desde la parte superior hasta la inferior.

En el otro extremo, los anillos más débiles, como el sistema anular de Júpiter y los anillos externos de Saturno (designados como E en la Figura 22.16), están compuestos por partículas muy finas (tamaño del humo) muy dispersas. Además de tener densidades muy bajas de partículas, estos anillos tienden a ser más gruesos que los anillos brillantes de Saturno.

En estudios recientes se ha demostrado que las lunas que coexisten con los anillos representan un papel importante en la determinación de su estructura. En especial,

la influencia gravitacional de estas lunas tiende a guiar las partículas de los anillos alterando sus órbitas. Los anillos estrechos parecen obra de los satélites situados a ambos lados que limitan el anillo haciendo retroceder las partículas que intentan escapar.

Aún más importante, se cree que las partículas de los anillos son derrubios expulsados de estas lunas. De acuerdo con esta opinión, el material se recicla de manera continua entre los anillos y las lunas anulares. Las lunas barren partículas de manera gradual; éstas últimas son expulsadas posteriormente por colisiones con grandes fragmentos de material anular, o quizá por colisiones energéticas con otras lunas. Así, parece que los anillos planetarios no son las estructuras atemporales que habíamos creído; antes bien, se reinventan de manera continua.

El origen de los sistemas de anillos planetarios es todavía objeto de debate. ¿Se formaron los anillos a partir de una nube aplanada de polvo y gases que rodeaba el planeta? En este escenario, los anillos se formaron simultá-

neamente y del mismo material que los planetas y las lunas. ¿O bien los anillos se formaron después, cuando una luna o un asteroide grande se rompió gravitacionalmente tras pasar demasiado cerca de un planeta? Aún otra hipótesis sugiere que un cuerpo extraño desintegró una de las lunas del planeta. Los fragmentos procedentes de este impacto tenderían a empujarse unos a otros y formarían un anillo plano y delgado. Los investigadores esperan que se haga más luz sobre el origen de los anillos planetarios a principios de julio de 2004, cuando la nave espacial *Cassini* empiece una exploración de Saturno que durará cuatro años.

Lunas de Saturno El sistema de satélites de Saturno consta de 30 cuerpos (Figura 22.17). (Si contamos las «pequeñas lunas» comprendidas en los anillos de Saturno, este planeta tiene millones de satélites.) El mayor, Titán, es más grande que Mercurio y es el segundo satélite mayor del Sistema Solar (después de Ganímedes, de Júpiter). Titán y Tritón, de Neptuno, son los únicos satélites del



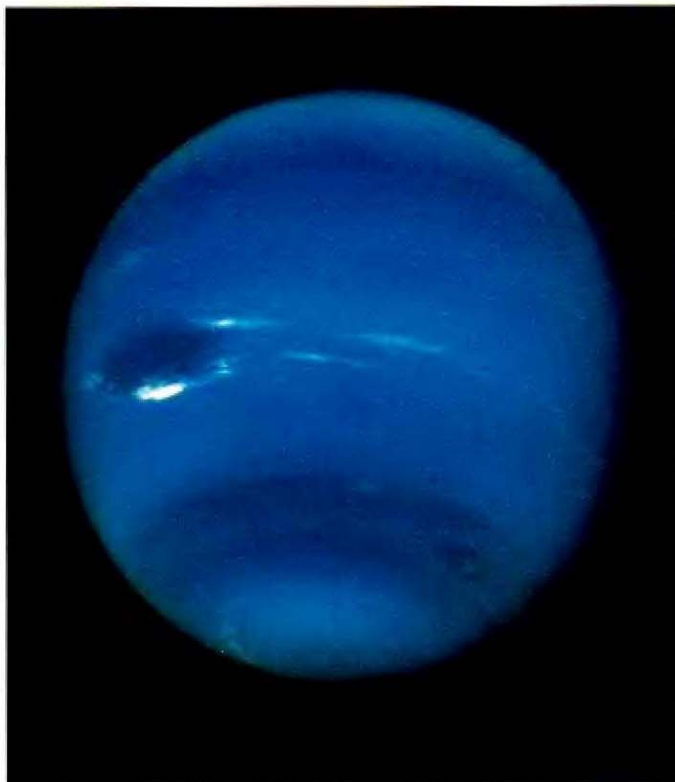
▲ **Figura 22.17** Foto mosaico del sistema de satélites de Saturno. La luna Dione aparece por delante; Tetis y Mimas están en la parte inferior derecha; Enceladus y Rhea están a la izquierda; y Titán, arriba a la derecha. (Foto cortesía de la NASA.)

Sistema Solar de los que se sabe que tienen una atmósfera sustancial. Debido a su densa cobertura gaseosa, la presión atmosférica en la superficie de Titán es de alrededor de 1,5 veces la existente en la superficie terrestre. Otro satélite, Febe, exhibe movimiento retrógrado. Es muy probable que esta luna, como otras lunas con órbitas retrógradas, sea un asteroide capturado o un fragmento grande de planeta que sobró de un gran episodio de formación planetaria.

Urano y Neptuno, los gemelos

La Tierra y Venus tienen rasgos similares, pero Urano y Neptuno son casi idénticos. Con una diferencia de diámetro de tan sólo un 1 por ciento, ambos muestran un color azulado, atribuible al metano de sus atmósferas (Figuras 22.18 y 22.19). Su estructura y composición son similares. Neptuno, sin embargo, es más frío, porque, de nuevo, está una vez y media más distante del calor del Sol que Urano.

Urano Una característica exclusiva de Urano es que rota «sobre su lado». Su eje de rotación, en vez de ser perpendicular al plano de su órbita, como el de otros planetas, se encuentra casi paralelo a su plano orbital. Su movimiento rotacional, por consiguiente, se parece más a rodar que a girar sobre un eje, movimiento que caracteri-

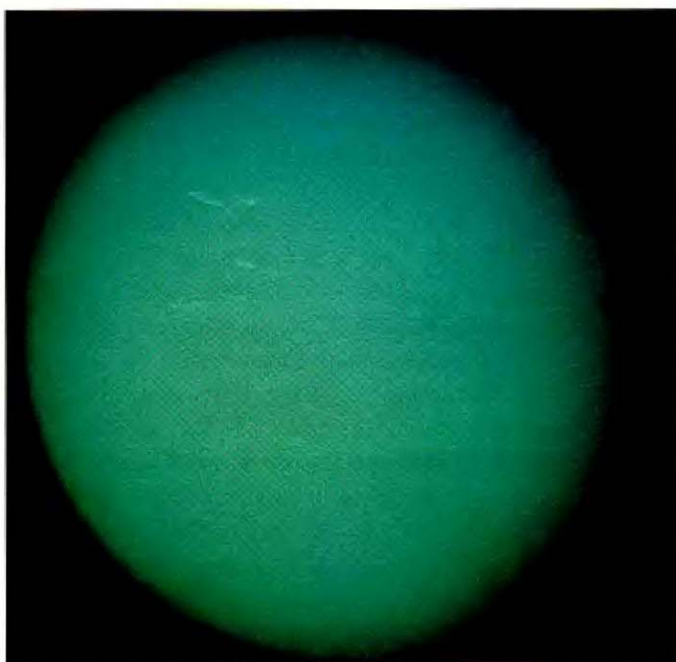


▲ **Figura 22.19** Esta imagen de Neptuno muestra el Gran Punto Oscuro (centro izquierda). También son visibles nubes brillantes de tipo cirro que se mueven a gran velocidad alrededor del planeta. Un segundo punto oval se encuentra a 54 grados de latitud sur en el extremo este del planeta. (Cortesía del Jet Propulsion Laboratory.)

za a los otros planetas. Dado que el eje de Urano está inclinado casi 90 grados, el Sol está situado casi encima de uno de sus polos en cada una de las revoluciones, y luego, media revolución más tarde, está situado por encima del otro polo.

Un descubrimiento sorprendente realizado en 1977 reveló que Urano tiene un sistema de anillos. Este hallazgo se produjo conforme Urano pasaba por delante de una estrella distante y bloqueó su visión, un proceso denominado *ocultación* (*occult* = escondido). Los observadores vieron la estrella «parpadear» brevemente cinco veces (lo que significa cinco anillos) antes de la ocultación principal y luego otras cinco veces más. Estudios posteriores indicaron que Urano tiene al menos nueve cinturones distintos de partículas que orbitan alrededor de su región ecuatorial.

Vistas espectaculares desde el *Voyager 2* de las cinco lunas mayores de Urano muestran paisajes muy variados. Algunas tienen largos y profundos cañones y acantilados lineales, mientras que otras poseen grandes áreas lisas sobre superficies, por lo demás, acribilladas de cráteres. El Jet Propulsion Laboratory describió Miranda, la más interna de las cinco lunas más grandes, como el cuerpo del



▲ **Figura 22.18** Esta imagen de Urano fue enviada a la Tierra por el *Voyager 2* cuando pasó por este planeta el 24 de enero de 1986. Tomada desde una distancia de casi 1 millón de kilómetros, pocos detalles de su atmósfera son visibles, excepto unas pocas vetas (nubes) en el hemisferio septentrional. (Cortesía de la NASA.)

A VECES LOS ALUMNOS PREGUNTAN

¿Por qué Urano rota sobre su lado?

La explicación más probable para la inusual rotación lateral de Urano es que éste empezó a rotar de la misma manera que los otros planetas, pero luego su rotación fue alterada por un impacto gigante, que probablemente era muy común al principio de la formación de los planetas. Sin embargo, un impacto gigante sería muy difícil de verificar, porque no habría dejado ningún cráter en Urano, cuya superficie no es sólida. Como muchos acontecimientos que sucedieron al principio de la formación de nuestro Sistema Solar, el motivo de la rotación lateral de Urano nunca se sabrá con certeza.

Sistema Solar con la mayor variedad de formas superficiales.

Neptuno Aun cuando se enfoque hacia Neptuno el telescopio más potente, aparece como un disco azulado borroso. Hasta que fue visitado por el *Voyager 2* en 1989, los astrónomos sabían muy poco sobre este planeta. Sin embargo, el viaje de casi 3.000 millones de millas, que duró 12 años, proporcionó a los investigadores tanta información nueva sobre Neptuno y sus satélites, que se necesitarán años para analizarla por completo.

Neptuno tiene una atmósfera dinámica, muy parecida a la de Júpiter y Saturno (Figura 22.19). Vientos que superan los 1.000 kilómetros por hora rodean al planeta convirtiéndolo en uno de los lugares más ventosos del Sistema Solar. Tiene también una mancha del tamaño de la Tierra denominada el *Gran Punto Oscuro*, que es una reminiscencia de la Gran Mancha Roja de Júpiter, y se supone que es una gran tormenta de rotación.

Quizá más sorprendentes sean unas nubes blancas de tipo cirro que ocupan un estrato situado a unos 50 kilómetros por encima del principal banco de nubes, probablemente de metano helado. En las imágenes del *Voyager* se descubrieron 6 nuevos satélites, con lo que se completaba una familia neptuniana de 8. Todas las lunas recién descubiertas giran en órbitas alrededor del planeta con una dirección opuesta a la de los dos satélites mayores. Las imágenes del *Voyager* revelaron también un sistema de anillos alrededor de Neptuno.

Tritón, la mayor luna de Neptuno, es un objeto de sumo interés. Su diámetro es casi el de la Luna terrestre. Tritón es la única gran luna del Sistema Solar que exhibe movimiento retrógrado. Esto indica que Tritón se formó independientemente de Neptuno y fue capturado gravitacionalmente.

Tritón tiene también la menor temperatura superficial nunca medida en cualquier cuerpo del Sistema So-

lar: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su atmósfera está compuesta fundamentalmente de nitrógeno con un poco de metano. A pesar de las temperaturas superficiales bajas, Tritón exhibe actividad similar a la volcánica. En 1989, el *Voyager 2* detectó plumas activas que se extendían a una altitud de 8 kilómetros y se desplazaban a favor del viento a lo largo de 100 kilómetros. Las capas superficiales de hielo de metano, más oscuro, presuntamente absorben la energía solar con mayor facilidad. Ese calentamiento superficial vaporiza una parte del hielo de nitrógeno subyacente. A medida que aumentan las temperaturas subsuperficiales, se producen erupciones explosivas.

Plutón, el planeta X

Plutón se encuentra en el borde del Sistema Solar, casi 40 veces más alejado del Sol que la Tierra. Es 10.000 veces demasiado borroso para ser visible a simple vista. Debido a su gran distancia del Sol y su lenta velocidad orbital, Plutón tarda 248 años terrestres en completar su órbita alrededor del Sol. Desde que se descubrió en 1930, ha completado alrededor de una cuarta parte de una revolución. La órbita de Plutón es notablemente alargada (muy excéntrica), lo que hace que a veces viaje en el interior de la órbita de Neptuno, donde residió entre 1979 y febrero de 1999. No hay posibilidad de que Plutón y Neptuno colisionen, porque sus órbitas están inclinadas una con respecto a la otra y en realidad no se cruzan (véase Figura 22.1).

En 1978, se descubrió la luna Charon en órbita alrededor de Plutón. Dada su proximidad al planeta, las mejores imágenes de Charon obtenidas desde la Tierra la muestran sólo como un abombamiento de Plutón. En 1990, el *telescopio espacial Hubble* obtuvo una imagen que resolvió claramente la separación entre estos dos mundos helados. Charon gira en órbita alrededor de Plutón una vez cada 6,4 días terrestres a una distancia 20 veces más cerca de Plutón que la Luna de la Tierra.

El descubrimiento de Charon alteró en gran medida los cálculos anteriores del tamaño de Plutón. Los datos actuales indican que Plutón tiene un diámetro de unos 2.300 kilómetros, alrededor de una quinta parte el tamaño de la Tierra, lo que le convierte en el planeta más pequeño del Sistema Solar (véase Recuadro 22.2). Charon tiene un diámetro de unos 1.300 kilómetros, excepcionalmente grande en proporción con su planeta.

La temperatura media de Plutón se calcula en $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo suficientemente fría como para solidificar la mayoría de los gases que puedan estar presentes. Por tanto, Plutón puede describirse mejor como una bola sucia helada de gases congelados con cantidades menores de sustancias rocosas.

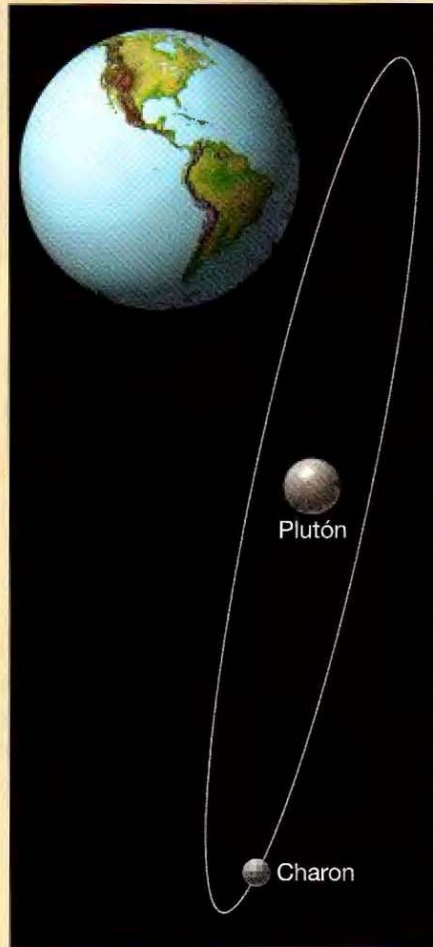


Recuadro 22.2 ▶ Entender la Tierra

¿Es Plutón realmente un planeta?

Desde que se descubrió Plutón en 1930, ha constituido un misterio al borde del Sistema Solar. Primero se creyó que era aproximadamente igual que la Tierra, pero cuando se obtuvieron mejores imágenes, se calculó que el diámetro de Plutón era un poco menos de la mitad del de la Tierra. Luego, en 1978, los astrónomos descubrieron que Plutón tiene una luna (Charon), cuyo brillo combinado con su planeta hacía que Plutón pareciera mucho mayor de lo que es en realidad (Figura 22.B). Las imágenes recientes obtenidas por el *telescopio espacial Hubble* establecieron el diámetro de Plutón en sólo 2.300 kilómetros, que constituye alrededor de una quinta parte del de la Tierra y menos de la mitad del de Mercurio, considerado durante mucho tiempo el enano del Sistema Solar. De hecho, siete lunas, incluida la de la Tierra, son más grandes que Plutón.

Se prestó incluso más atención al estatus de Plutón como planeta, cuando en 1992 los astrónomos descubrieron otro cuerpo de hielo en órbita más allá de Neptuno. Pronto se descubrieron centenares de estos objetos que formaban una banda similar al cinturón de asteroides situado entre Marte y Júpiter. No obstante, estos cuerpos en órbita están compuestos de polvo y hielo, como los cometas, y no de sustancias metálicas y rocosas, como los



▲ **Figura 22.B** Plutón y su luna Charon. Se muestra la Tierra para escala.

asteroides. Algunos astrónomos creen que pueden existir objetos planetarios incluso mayores que Plutón en este cinturón de mundos de hielo situados en las zonas más exteriores del Sistema Solar. De hecho, ya se ha descubierto un cuerpo más grande que la luna de Plutón Charon.

Un número cada vez mayor de astrónomos afirma que el pequeño tamaño de Plutón y su localización en el interior de una multitud de objetos de hielo similares significa que debería reclasificarse como un planeta menor, como los asteroides y los cometas. Otros insisten en que, con independencia del cambio de identidad de Plutón, degradar a Plutón al estatus de planeta menor deshonraría la historia astronómica y confundiría a la gente.

De momento, parece que la Unión Astronómica Internacional, un grupo que tiene el poder de votar si Plutón es un planeta o no, está satisfecho con el status quo. Sin embargo, el estatus planetario de Plutón nunca será el mismo. Ahora está claro que Plutón es único entre los planetas y es muy diferente de los cuatro planetas interiores rocosos y distinto de los cuatro gigantes gaseosos. Quizá una mejor descripción de Plutón sea la de uno de los miembros más grandes de un cinturón de millones de pequeños mundos de hielo (cometas) que orbitan en las zonas exteriores de nuestro Sistema Solar.

Cuerpos menores del Sistema Solar

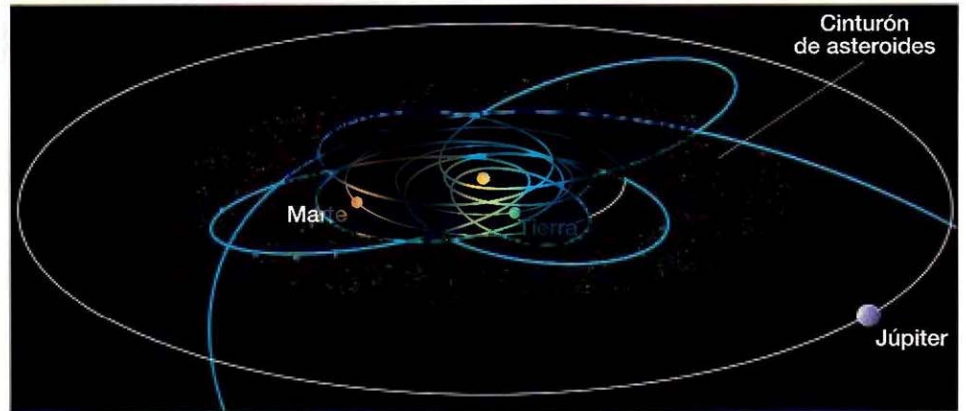
Asteroides: microplanetas

Los **asteroides** son cuerpos pequeños que han sido comparados con «montañas volantes». El mayor, Ceres, tiene unos 1.000 kilómetros de diámetro, pero la mayoría de los 50.000 que se han observado tienen aproximadamente 1 kilómetro de diámetro. Los asteroides más pequeños se supone que no son mayores que granos de arena. La mayoría se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter, y tiene períodos de 3 a 6 años (Figura 22.20). Algunos tienen órbitas muy excéntricas y pasan muy cerca del Sol, y unos pocos, más grandes, se aproximan regularmente a la Tierra y a su luna. Muchos de los cráteres de impacto más

recientes que hay sobre la Luna y la Tierra fueron causados probablemente por colisiones con asteroides. Inevitablemente se producirán futuras colisiones entre la Tierra y los asteroides (véase Recuadro 22.3).

Debido a que muchos asteroides tienen formas irregulares, los geólogos planetarios especularon primero con la posibilidad de que fueran fragmentos de un planeta roto que una vez orbitó entre Marte y Júpiter (Figura 22.21). Sin embargo, se calcula que la masa total de los asteroides es sólo de una milésima parte de la de la Tierra, que a su vez no es un planeta grande. ¿Qué le ocurrió al resto del planeta original? Otros han planteado la hipótesis de que pudieron existir varios grandes cuerpos muy próximos y que sus colisiones produjeran numerosos cuerpos más pequeños. Se ha utilizado la existencia de varias «familias»

► **Figura 22.20** Las órbitas de los principales asteroides se encuentran entre Marte y Júpiter. También se muestran las órbitas conocidas de unos pocos asteroides próximos a la Tierra. Quizá un millar o más de asteroides tienen órbitas próximas a la Tierra. Por fortuna, se piensa que sólo unas pocas docenas de ellos tienen un diámetro superior al kilómetro.



▲ **Figura 22.21** Imagen del asteroide 951 (Gaspra) obtenida por la nave espacial *Galileo*. Como otros asteroides, es probable que Gaspra sea un fragmento de un cuerpo mayor producido por colisión. (Cortesía de la NASA.)

de asteroides como dato para apoyar esta explicación. Sin embargo, no se han encontrado pruebas concluyentes para cualquiera de las dos hipótesis.

En febrero de 2001, una nave espacial estadounidense se convirtió en el primer visitante de un asteroide. Aunque no había sido diseñada para aterrizar, la nave *NEAR Shoemaker* aterrizó satisfactoriamente y generó información que ha dejado a los geólogos planetarios intrigados y perplejos. Las imágenes obtenidas mientras la nave espacial se movía a una velocidad de 6 kilómetros por hora hacia la superficie de Eros revelaron una superficie rocosa y árida compuesta de partículas cuyo tamaño osci-

laba entre el polvo fino y bloques de hasta 8 metros de diámetro. Inesperadamente, los investigadores descubrieron que los derrubios finos se concentran en las zonas inferiores que forman depósitos planos parecidos a estanques. Alrededor de las áreas bajas, el paisaje está marcado por una abundancia de bloques grandes.

Una de las diversas hipótesis consideradas como una explicación para la topografía llena de bloques es el temblor sísmico, que desplazaría los bloques hacia arriba. De manera análoga a lo que ocurre cuando se agita una lata de frutos secos variados, los materiales más grandes suben a la parte superior, mientras que los materiales más pequeños se depositan en el fondo.

Cometas

Los **cometas** se cuentan entre los cuerpos más interesantes e impredecibles del Sistema Solar. Se han comparado con bolas de nieve sucias, porque están compuestos de gases congelados (agua, amoníaco, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono) que mantienen juntos pequeños fragmentos de materiales rocosos y metálicos. Muchos cometas viajan por órbitas muy excéntricas que los llevan más allá de Plutón. Estos cometas tardan centenares de miles de años en completar una sola órbita alrededor del Sol. Sin embargo, unos pocos *cometas de período corto* (con períodos orbitales de menos de 200 años), como el cometa Halley, tienen encuentros regulares con el interior del Sistema Solar.

Cuando se observa por primera vez, un cometa aparece como un cuerpo muy pequeño; pero a medida que se aproxima al Sol, la energía solar empieza a vaporizar los gases congelados, produciendo una cabeza resplandeciente, denominada **cabellera** (Figura 22.22). El tamaño de las cabelleras varía mucho de un cometa a otro. Los extremadamente raros superan el tamaño del Sol, pero la mayoría se aproxima al tamaño de Júpiter. Dentro de la cabellera, a veces, puede detectarse un pequeño núcleo



Recuadro 22.3 ▶ La Tierra como sistema

¿Está la Tierra en una dirección de colisión?

El Sistema Solar está repleto de meteoritos, asteroides, cometas activos y cometas extintos. Estos fragmentos viajan a grandes velocidades y pueden golpear la Tierra con la fuerza explosiva de una potente bomba nuclear.

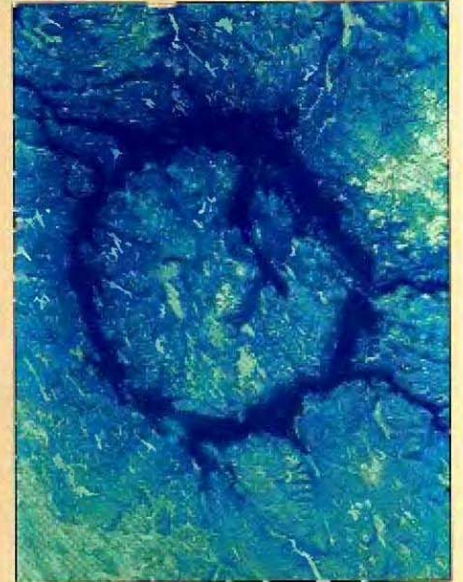
En las últimas décadas, cada vez ha resultado más claro que los cometas y los asteroides han chocado contra la Tierra con mucha más frecuencia de lo que previamente se sabía. La prueba son estructuras de impacto gigantes. Se han identificado más de cien (Figura 22.C). Muchos de ellos se atribuyeron erróneamente, al principio, al resultado de algún proceso volcánico. Aunque algunas estructuras de impacto son tan antiguas que ya no parecen cráteres de impacto, sigue habiendo evidencias de su origen (Figura 22.D). Una notable excepción es un cráter de aspecto muy reciente que se encuentra cerca de Winslow, Arizona, y se conoce como Meteor Crater.

Cada vez hay más pruebas de que hace 65 millones de años un gran asteroide de aproximadamente 10 kilómetros de diámetro chocó contra la Tierra. Este impacto puede haber causado la extinción de los dinosaurios, así como casi el 50 por

ciento de todas las especies vegetales y animales (véase Recuadro 9.5).

Más recientemente, una explosión espectacular se ha atribuido a la colisión de nuestro planeta con un cometa o asteroide. En 1908, en una región remota de Siberia, explotó una «bola de fuego» que parecía más brillante que el Sol, con una fuerza violenta. Las ondas del choque rompieron ventanas y provocaron reverberaciones que se escucharon a una distancia de hasta 1.000 kilómetros. El «acontecimiento Tunguska», como se le denomina, descorchó, arrancó ramas, y derribó árboles a 30 kilómetros de distancia del epicentro. Pero las expediciones a la zona no encontraron pruebas de un cráter de impacto, ni fragmentos metálicos de ningún tipo. Evidentemente la explosión, cuya potencia fue por lo menos similar a una bomba nuclear de 10 megatones, se produjo a muy pocos kilómetros por encima de la superficie. Lo más probable es que fuera la muerte de un cometa o quizá de un asteroide rocoso. No está claro por qué explotó antes del impacto.

Los peligros de vivir con estos objetos pequeños, pero mortales, en el espacio



▲ **Figura 22.D** Manicouagan, Quebec, es una estructura de impacto erosionada de 200 millones de años de antigüedad. El lago perfila el resto del cráter, que tiene un diámetro de 70 kilómetros. Las fracturas relacionadas con este acontecimiento se extienden hacia fuera otros 30 kilómetros. (Cortesía del U. S. Geological Survey.)



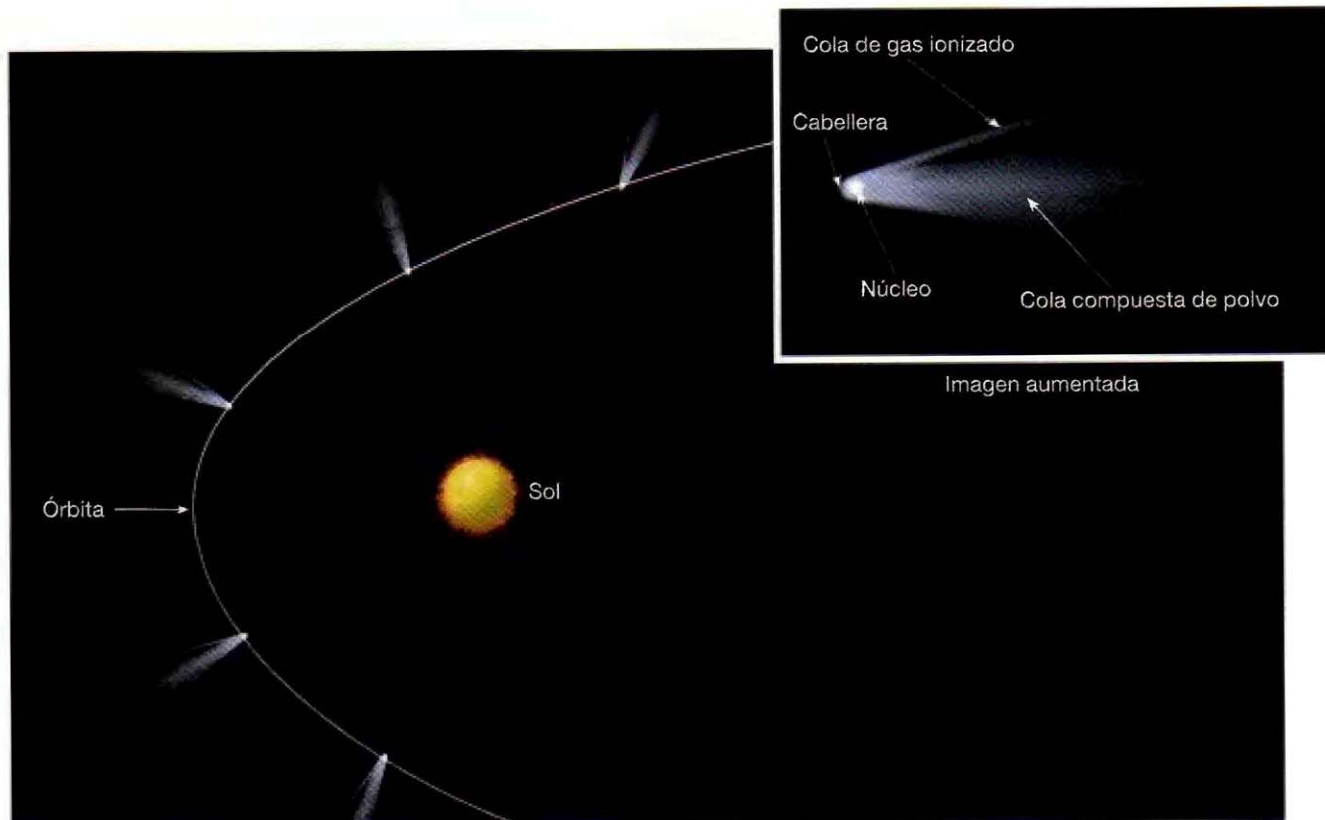
▲ **Figura 22.C** Mapa mundial de las principales estructuras de impacto. Cada año se identifican más. (Datos de Griffith Observatory.)

llegaron de nuevo a la opinión pública en 1989, cuando un asteroide de casi un kilómetro estuvo a tiro de la Tierra. Estuvo a dos veces la distancia de la Luna. Viajando a 70.000 kilómetros por hora, pudo haber producido un cráter de 10 kilómetros de diámetro y quizá 2 kilómetros de profundidad. Como indicó un observador, «tarde o temprano volverá». Atravesó nuestra órbita justo 6 horas por delante de la Tierra. Las estadísticas demuestran que colisiones de esta tremenda magnitud deben tener lugar cada pocos centenares de millones de años y podrían tener consecuencias dramáticas para la vida en la Tierra.

resplandeciente con un diámetro de tan sólo unos pocos kilómetros. Conforme el cometa se aproxima al Sol, algunos, pero no todos, desarrollan una cola que se prolonga a lo largo de millones de kilómetros. A pesar del ta-

maño enorme de sus colas y cabelleras, los cometas son miembros relativamente pequeños del Sistema Solar.

El hecho de que la cola de un cometa apunte en la dirección opuesta al Sol de una manera ligeramente curvada



▲ **Figura 22.22** Orientación de la cola del cometa a medida que gira en su órbita alrededor del Sol.

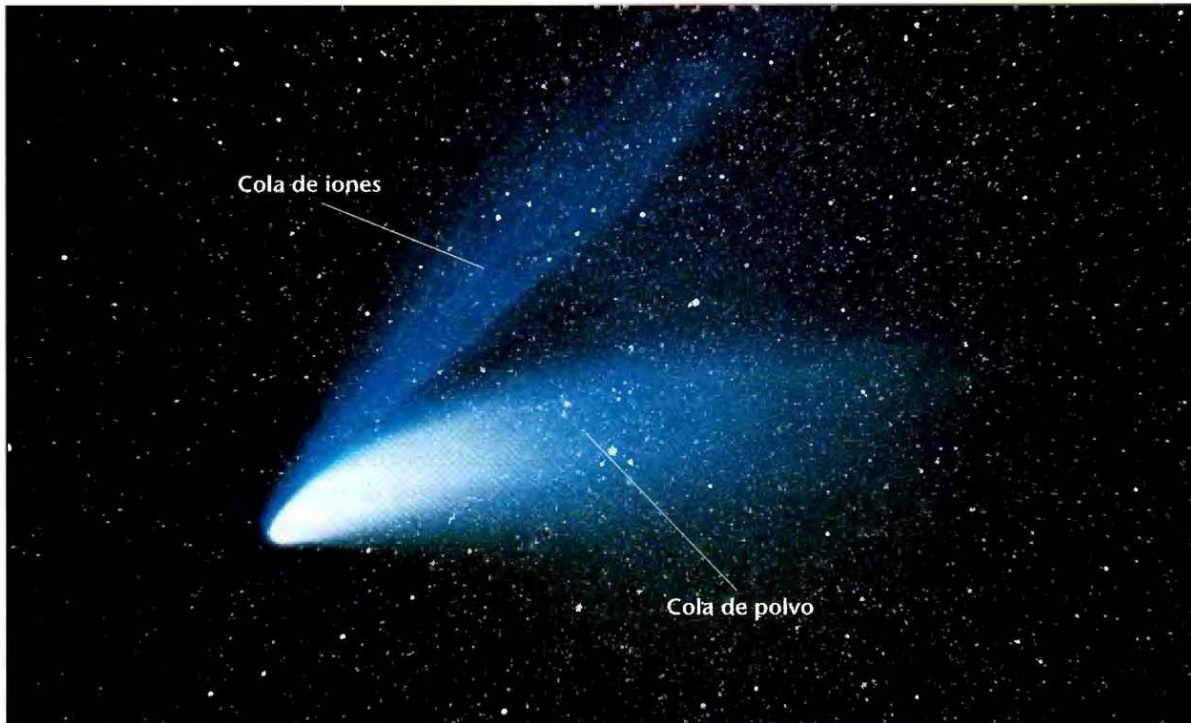
(Figura 22.22) llevó a los primeros astrónomos a proponer que el Sol tiene una fuerza repulsiva que hace retroceder las partículas de la cabellera, formando así la cola. En la actualidad, se sabe que dos fuerzas solares contribuyen a esta formación. La primera, la *presión de radiación*, aleja las partículas de polvo de la cabellera. La segunda, conocida como *viento solar*, es responsable del desplazamiento de los gases ionizados, en especial del dióxido de carbono. A veces, se produce una sola cola compuesta de polvo y gases ionizados, pero a menudo se observan dos colas (Figura 22.23).

A medida que el cometa se aleja del Sol, los gases que forman la cabellera vuelven a condensarse, la cola desaparece y el cometa se vuelve a convertir en un depósito de frío. El material que se expulsó de la cabellera para formar la cola se pierde para siempre. Por consiguiente, se cree que la mayoría de los cometas no puede sobrevivir a más de unos pocos centenares de órbitas alrededor del Sol. Una vez expulsados todos los gases, el material restante (un enjambre de partículas metálicas y rocosas no conectadas) continúa la órbita sin cabellera ni cola.

Los cometas se originan aparentemente en dos regiones del sistema solar externo. Se cree que los cometas de período más corto orbitan más allá de Neptuno, en una región denominada el **cinturón de Kuiper**, en honor al astrónomo Gerald Kuiper, que había predicho su existen-

cia. (Durante la última década, se ha descubierto más de un centenar de estos cuerpos de hielo.) Como los asteroides del sistema solar interno, la mayoría de cometas del cinturón de Kuiper se mueven en órbitas casi circulares que se sitúan casi en el mismo plano que los planetas. Una colisión casual entre dos cometas del cinturón de Kuiper, o la influencia gravitacional de uno de los planetas jovianos, puede alterar ocasionalmente la órbita de un cometa lo bastante como para enviarlo al sistema solar interno y a nuestro campo de visión.

A diferencia de los cometas del cinturón de Kuiper, los cometas de largo período tienen órbitas *no* confinadas al plano del Sistema Solar. Parece que estos cometas se distribuyen en todas direcciones desde el Sol, formando un escudo esférico alrededor del Sistema Solar, denominado **nube de Oort**, en homenaje al astrónomo holandés Jan Oort. Se cree que millones de cometas orbitan el Sol a distancias mayores que 10.000 veces la distancia entre la Tierra y el Sol. Se cree que el efecto gravitacional pasajero de una estrella distante puede ocasionalmente enviar un cometa de la nube de Oort hacia una órbita muy excéntrica que lo transporta hacia el Sol. Sin embargo, sólo una pequeña porción de los cometas de la nube de Oort tienen órbitas que los lleven al sistema solar interior.



▲ **Figura 22.23** Cometa Hale-Bopp. Las dos colas que se ven en la fotografía tienen una longitud entre 10 y 15 millones de millas. (Fotografía de la Peoria Astronomical Society de Eric Clifton y Graig Neaveill.)

El cometa de período corto más famoso es el cometa Halley. Su período orbital tiene una media de 76 años y cada una de sus 29 apariciones desde el año 240 a.C. fue registrada por los astrónomos chinos. Este registro es un testimonio de su dedicación como observadores astronómicos y de la resistencia de su cultura. Cuando se vio en 1910, el cometa Halley había desarrollado una cola de casi 1,6 millones de kilómetros de largo y era visible durante las horas diurnas.

En 1986, la aparición nada espectacular del cometa Halley fue una decepción para muchos habitantes del hemisferio norte. Sin embargo, fue durante su visita más reciente al Sistema Solar interno cuando se consiguió una gran cantidad de información nueva sobre el más famoso de los cometas. Los nuevos datos fueron recogidos por las sondas espaciales enviadas para encontrarse con el cometa. La sonda europea *Giotto* se aproximó a 600 kilómetros del núcleo del cometa y obtuvo las primeras imágenes de esta esquiva estructura.

Sabemos ahora que el núcleo tiene forma de patata y un tamaño de 16 kilómetros por 8 kilómetros. Su superficie es irregular y está llena de hoyos en forma de cráteres. Los gases y el polvo que se evaporan del núcleo para formar la cabellera y la cola parecen salir de su superficie como corrientes o chorros brillantes. Sólo alrededor del 10 por ciento de la superficie total del cometa emitía esos chorros en el momento del encuentro. El res-

to del área superficial del cometa parecía estar cubierta por una capa oscura que puede consistir en material orgánico.

En 1997, el cometa Hale-Bopp hizo un recorrido espectacular alrededor de nuestro planeta. El núcleo del Hale-Bopp era inhabitualmente grande, de unos 40 kilómetros de diámetro. Como se muestra en la Figura 22.23, se extendían desde este cometa dos colas de casi 24 millones de kilómetros. La cola gaseosa azulada está compuesta por iones con carga positiva y apuntaba casi directamente en sentido contrario al Sol. La cola amarillenta está compuesta por polvo y otros restos rocosos. Dado que el material rocoso es más masivo que los gases ionizados, se ve menos afectado por el viento solar y sigue una trayectoria diferente con respecto al cometa.

Meteoritos

Casi todos hemos visto un **meteoro**, normalmente denominado «estrella fugaz». Este rayo de luz dura entre un parpadeo y unos pocos segundos y se produce cuando una pequeña partícula sólida, un **meteorito**, entra en la atmósfera terrestre desde el espacio interplanetario. La fricción entre el meteorito y el aire calienta ambos y produce la luz que vemos. La mayoría de meteoritos se origina a partir de una de las tres fuentes siguientes: (1) derrubios interplanetarios que no fueron atraídos gravitacionalmente

por los planetas durante la formación del Sistema Solar, (2) material que es desplazado de manera continua desde el cinturón de asteroides y (3) restos sólidos de cometas que se habían movido cerca de la órbita terrestre. Se cree que unos pocos meteoritos son fragmentos de la Luna, o posiblemente de Marte, que fueron expulsados cuando un asteroide impactó contra estos cuerpos.

Aunque algún raro meteorito es tan grande como un asteroide, la mayoría tiene el tamaño de un grano de arena y pesa menos de 1/100 gramos. Por consiguiente, se evapora antes de alcanzar la superficie de la Tierra. Algunos, denominados *micrometeoritos*, son tan pequeños que su velocidad de caída se hace demasiado pequeña como para quemarlos, de manera que caen en forma de polvo espacial. Cada día, el número de meteoritos que entran en la atmósfera terrestre debe alcanzar el millar. Después de la puesta del Sol en una noche clara, media docena o más brillan lo suficiente como para ser vistos cada hora, a simple vista, desde cualquier parte de la Tierra.

Ocasionalmente la visión de los meteoros aumenta notablemente a 60 o más por hora. Estas exhibiciones denominadas **lluvias de meteoros**, se producen cuando la Tierra encuentra un enjambre de meteoritos que viajan en la misma dirección y a casi la velocidad que la Tierra. La estrecha asociación de esos enjambres con las órbitas de algunos cometas sugiere que representan material perdido por esos cometas (Tabla 22.2). Algunos enjambres no asociados con órbitas de cometas conocidos son probablemente los restos del núcleo de un cometa que desapareció hace ya tiempo. Se cree que la gran lluvia de meteoros de Perseida que se produce cada año en torno al 12 de agosto son los restos del cometa 1862 III, que tiene un período de 110 años.

Los meteoritos que se cree que son los restos de cometas son pequeños y alcanzan el suelo sólo ocasionalmente. Se piensa que la mayoría de los meteoritos que son lo suficientemente grandes para sobrevivir al calor de la entrada se origina entre los asteroides, donde las colisio-

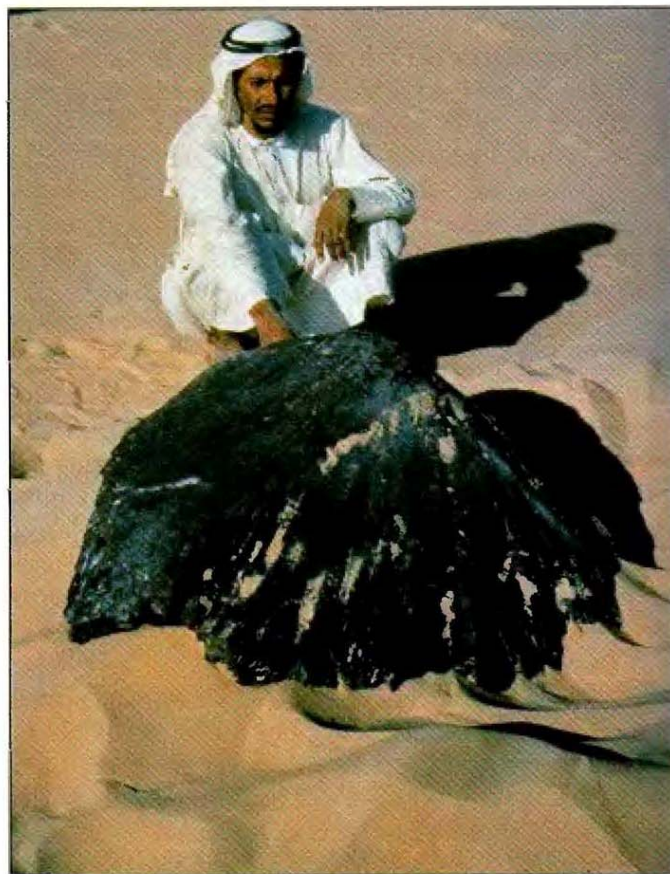
nes aleatorias modifican sus órbitas y los envían hacia la Tierra. La fuerza gravitacional de la Tierra hace el resto.

Unos pocos meteoritos grandes han producido cráteres en la superficie de la Tierra que se parecen mucho a los de la superficie lunar. El más famoso es el Crater Meteor de Arizona. Esta enorme cavidad tiene un diámetro de aproximadamente 1,2 kilómetros, 160 metros de profundidad y un anillo que sobresale hacia arriba hasta 50 metros por encima del paisaje circundante. En el área inmediata se han encontrado más de 30 toneladas de fragmentos de hierro, pero los intentos para localizar un cuerpo principal no han tenido éxito. Teniendo en cuenta la erosión, el impacto se produjo probablemente en los últimos 20.000 años.

Antes de disponer de las rocas de la Luna traídas a la Tierra por los exploradores lunares, los meteoritos eran los únicos materiales extraterrestres que podían examinarse directamente (Figura 22.24). Los meteoritos se clasificaron por su composición: (1) **férreos**, fundamentalmente de hierro, con un 2 a un 20 por ciento de níquel; (2) **pétreos**, silicatos con inclusiones de otros minerales, y (3) **siderolitos**, mezclas de los anteriores. Aunque los meteoritos pétreos son probablemente los meteoritos más

Tabla 22.2 Principales lluvias de meteoritos

Lluvia	Fechas aproximadas	Cometa asociado
Quadrantida	4-6 de enero	—
Lyrída	20-23 de abril	Cometa 1861 I
Eta Acuarida	3-5 de mayo	Cometa Halley
Delta Acuarida	30 de julio	—
Perseida	12 de agosto	Cometa 1862 III
Draconida	7-10 de octubre	Cometa Giacobini-Zinner
Orionida	20 de octubre	Cometa Halley
Taurida	3-13 de noviembre	Cometa Encke
Andromedida	14 de noviembre	Cometa Biela
Leonida	18 de noviembre	Cometa 1866 I
Germinida	4-16 de diciembre	—



▲ **Figura 22.24** Meteorito de hierro que surge de las arenas del desierto. (Cortesía de *Aramco World Magazine*.)

comunes, normalmente se encontraban fundamentalmente meteoritos férricos. Esto es comprensible, porque los meteoritos férricos resisten mejor el impacto, experimentan meteorización con más lentitud y son mucho más fáciles de distinguir de las rocas terrestres por una persona no especializada. Los meteoritos férricos son probablemente fragmentos de núcleos de grandes asteroides o de planetas pequeños diferenciados.

Se observó que una clase poco abundante de meteorito, denominada *condrita carbonácea*, contenía aminoácidos sencillos y otros compuestos orgánicos, que son los bloques de construcción básica de la vida. Este descubrimiento confirma hallazgos similares de la astronomía ob-

servacional, que indican que existen numerosos compuestos orgánicos en el frío reino del espacio exterior.

Si los meteoritos representan la composición de planetas parecidos a la Tierra, como sugieren los geólogos planetarios, la Tierra debe contener un porcentaje mucho mayor de hierro del que sugieren las rocas superficiales. Ésta es una de las razones que esgrimen los geólogos para sugerir que el núcleo de la Tierra puede ser fundamentalmente de hierro y níquel. Además, la datación de los meteoritos indica que la edad de nuestro Sistema Solar sobrepasa por supuesto los 4.500 millones de años. Esta «edad antigua» ha sido confirmada por datos procedentes de muestras lunares.

Resumen

- Los planetas pueden reunirse en dos grupos: los *planetas terrestres* (parecidos a la Tierra) (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) y los *planetas jovianos* (parecidos a Júpiter) (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Plutón no está incluido en ninguno de los grupos. *Cuando se comparan con los planetas jovianos, los planetas terrestres son más pequeños, más densos, contienen proporcionalmente más materia rocosa, tienen velocidades más lentas de rotación y menores velocidades de escape.*
- La superficie lunar exhibe varios tipos de estructuras. La mayoría de los *cráteres* se produjo por el impacto de restos de movimiento rápido (*meteoritos*). Las *tierras altas* brillantes y densamente cubiertas por cráteres constituyen gran parte de la superficie lunar. Las tierras bajas, bastante lisas y oscuras, se denominan *maria* (singular, *mare*). Las cuencas lunares (*maria*) son enormes cráteres de impacto que han sido inundados por capas de lavas basálticas muy fluidas. Todos los terrenos lunares están recubiertos con una capa parecida a un suelo de derrubios grises no consolidados, denominados *regolito lunar*, que se han generado como consecuencia de un bombardeo meteorítico de miles de millones de años. Se desconocen muchos aspectos del origen de la Luna. Una hipótesis sugiere que un asteroide gigante colisionó con la Tierra y produjo la Luna. Los científicos concluyen que la *superficie lunar evolucionó en tres fases*: (1) *la corteza original (tierras altas)*; (2) *cuencas lunares*, y (3) *recientes cráteres con rayos.*
- *Mercurio* es un planeta pequeño, denso, carente de atmósfera y que exhibe los extremos de temperatura mayores de cualquier planeta. *Venus*, el planeta más brillante del cielo, tiene una atmósfera densa y pesada compuesta en un 97 por ciento por dióxido de carbono, una superficie de llanuras relativamente hundidas y volcanes inactivos, una presión atmosférica superficial 9 veces la de la Tierra y una temperatura superficial de 475 °C. *Marte*, el Planeta Rojo, tiene una atmósfera de dióxido de carbono cuya densidad es de sólo un 1 por ciento la terrestre, tormentas de polvo intensas, numerosos volcanes inactivos, muchos grandes cañones y varios valles de origen dudoso que exhiben patrones de drenaje similares a los valles fluviales que hay sobre la Tierra. *Júpiter*, el planeta más grande, gira rápidamente, tiene un aspecto bandado causado por enormes corrientes de convección provocadas por el calor interno del planeta, una *Gran Mancha Roja* cuyo tamaño es variable, un sistema de anillos y al menos 16 lunas (una de las lunas, *Io*, es un cuerpo volcánicamente activo). *Saturno* es mejor conocido por su sistema de anillos. Tiene también una atmósfera dinámica con vientos de hasta 1.500 kilómetros por hora y tormentas similares a la Gran Mancha Roja de Júpiter. *Urano* y *Neptuno* suelen denominarse los gemelos debido a su composición y su estructura similares. Una característica exclusiva de Urano es que rota sobre su lado. Neptuno tiene nubes blancas como cirros por encima de su plataforma nubosa principal y un *Gran Punto Negro* del tamaño de la Tierra; se supone que es una gran tormenta en rotación similar a la Gran Mancha Roja de Júpiter. *Plutón* es un pequeño mundo congelado con una luna (*Charon*). La órbita notablemente alargada de Plutón hace que a veces viaje dentro de la órbita de Neptuno, pero sin posibilidades de colisionar con él.
- Los cuerpos menores del Sistema Solar son los *asteroides*, los *cometas* y los *meteoritos*. La mayoría de

asteroides se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter. No se han encontrado pruebas concluyentes que expliquen su origen. Los cometas están compuestos por gases congelados (agua, amoníaco, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono) con pequeños fragmentos de material rocoso y metálico. Muchos viajan en órbitas muy alargadas que los llevan más allá de Plutón y se conoce muy poco sobre su origen. Los meteoritos, pequeñas partículas sólidas que viajan a través del espacio interpla-

netario, se convierten en *meteoros* cuando entran en la atmósfera terrestre y se vaporizan emitiendo un rayo de luz. Las *lluvias de meteoros* se producen cuando la Tierra encuentra un enjambre de meteoritos, probablemente material perdido por un cometa. Los *tres tipos de meteoritos* (clasificados según su composición) son: (1) *férreos*, (2) *pétreos* y (3) *siderolitos*. Un tipo escaso de meteorito, denominado *condrita carbonácea*, contiene aminoácidos y otros compuestos orgánicos.

Preguntas de repaso

1. ¿Qué criterios se siguen para clasificar los planetas en el grupo terrestre o en el joviano?
2. ¿Cuáles son los tres tipos de materiales que constituyen los planetas? ¿En qué difieren? ¿Cómo explica su distribución teniendo en cuenta las diferencias de densidad entre los grupos planetarios terrestres y jovianos?
3. Explique por qué los diferentes planetas tienen atmósferas diferentes.
4. ¿Cómo se utiliza la densidad de craterización para la datación relativa de las estructuras de la superficie lunar?
5. Comente brevemente la historia de la Luna.
6. ¿En qué se parecen los maria al altiplano Columbia?
7. ¿Por qué Marte ha sido el planeta más estudiado con telescopios?
8. ¿Qué características superficiales tiene Marte que son también habituales en la Tierra?
9. ¿Qué pruebas respaldan un ciclo hídrico en Marte? ¿Qué pruebas rechazan la posibilidad de un clima marciano húmedo?
10. ¿Por qué los astrobiólogos están intrigados ante las pruebas de que las aguas subterráneas han emergido a la superficie de Marte?
11. En alguna ocasión se sugirió que las dos «lunas» de Marte eran artificiales. ¿Qué características tienen para inducir dicha especulación?
12. ¿Cuál es la naturaleza de la Gran Mancha Roja de Júpiter?
13. ¿Por qué son tan famosos los satélites galileanos de Júpiter?
14. ¿Cuál es la característica distintiva del satélite Io de Júpiter?
15. ¿Por qué se piensa que los cuatro satélites *exteriores* de Júpiter han sido capturados?
16. ¿En qué se parecen Júpiter y Saturno?
17. ¿Qué dos papeles representan las lunas de los anillos en la naturaleza de los sistemas de anulares planetarios?
18. ¿En qué se parecen el satélite de Saturno Titán y el de Neptuno Tritón?
19. ¿Qué tres cuerpos del Sistema Solar exhiben actividad volcánica?
20. ¿Dónde se encuentra la mayor parte de asteroides?
21. ¿Qué cree usted que ocurriría si la Tierra atravesara la cola de un cometa?
22. ¿Dónde se cree que reside la mayor parte de los cometas? ¿Qué acaba ocurriendo con los cometas que orbitan cerca del Sol?
23. Compare meteoros y meteoritos.
24. ¿Cuáles son las tres principales fuentes de meteoritos?
25. ¿Por qué los cráteres de meteoritos son más comunes en la Luna que en la Tierra, aun cuando la Luna sea un blanco mucho menor?
26. Se ha calculado que el cometa Halley tiene una masa de 100.000 millones de toneladas. Además, se calcula que este cometa pierde 100 millones de toneladas de material durante los pocos meses que su órbita se acerca al Sol. Con un período orbital de 76 años, ¿qué vida máxima le queda al cometa Halley?

Términos fundamentales

meteorito rocoso
asteroide
cabellera
cinturón de Kuiper
cometa

lluvia de meteoros
maria
meteorito
meteoro
nube de Oort

planeta exterior
planeta interior
planeta joviano
planeta terrestre

regolito lunar
meteorito ferroso
siderolito
velocidad de escape

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>