

O princípio do uniformitarismo não implica que os únicos fenômenos geológicos significativos são aqueles que observamos ocorrer hoje. Alguns processos não têm sido diretamente observados nos últimos dois séculos e meio desde que Hutton formulou seu famoso princípio, embora não haja dúvida de que eles são importantes para o atual sistema Terra. No registro histórico, os humanos nunca presenciaram o impacto de um grande bólido, mas sabemos que tais eventos aconteceram muitas vezes no passado geológico e que certamente acontecerão de novo. O mesmo pode ser dito de vastos derrames vulcânicos, que cobriram com lavas áreas maiores que o Texas¹ e envenenaram a atmosfera global com gases. A longa evolução da Terra é pontuada por muitos eventos extremos, ainda que infrequentes, envolvendo mudanças rápidas no sistema Terra.

Desde a época de Hutton, os geólogos têm observado o trabalho da natureza e utilizado o princípio do uniformitarismo para interpretar feições encontradas em formações geológicas antigas. Apesar do sucesso dessa abordagem, o princípio de Hutton é muito limitado para mostrar como a ciência geológica é praticada atualmente. A moderna Geologia deve ocupar-se com todo o intervalo da história da Terra. Como veremos, os violentos processos que moldaram a primitiva história da Terra foram substancialmente diferentes daqueles que atuam hoje.



A origem do nosso sistema planetário

A busca da origem do Universo e de nossa própria e pequena parte contida nele remonta às mais antigas mitologias registradas. Atualmente, a explicação científica mais aceita é a teoria da Grande Explosão (*Big Bang*), a qual considera que nosso Universo começou entre 13 a 14 bilhões de anos atrás a partir de uma “explosão” cósmica. Antes desse instante, toda a matéria e energia estavam concentradas num único ponto de densidade inconcebível. Embora saibamos pouco do que ocorreu na primeira fração de segundo após o início do tempo, os astrônomos obtiveram um entendimento geral dos bilhões de anos que se seguiram. Desde aquele instante, num processo que ainda continua, o Universo expandiu-se e diluiu-se para formar galáxias e estrelas. Os geólogos ainda analisam os últimos 4,5 bilhões de anos dessa vasta expansão, um tempo durante o qual o nosso sistema solar – a estrela que nós chamamos de Sol e os planetas que nela orbitam – formou-se e evoluiu. Mais especificamente, os geólogos examinam a formação do sistema solar para entender a formação da Terra.

A hipótese da nebulosa

Em 1755, o filósofo alemão Immanuel Kant sugeriu que a origem do sistema solar poderia ser traçada pela rotação de uma nuvem de gás e poeira fina. Descobertas feitas há poucas décadas levaram os astrônomos de volta a essa antiga idéia, agora chamada de **hipótese da nebulosa**. Equipados com telescópios modernos, eles descobriram que o espaço exterior além do sistema solar não está vazio como anteriormente era pensado. Os



Figura 1.3 Evolução do sistema solar

astrônomos registraram muitas nuvens do mesmo tipo da que Kant supôs, tendo denominado as mesmas de *nebulosas*. Eles também identificaram os materiais que formam essas nuvens. Os gases são predominantemente hidrogênio e hélio, os dois elementos que constituem tudo, exceto uma pequena fração do nosso Sol. As partículas do tamanho do pó são quimicamente similares aos materiais encontrados na Terra.

Como pôde o nosso sistema solar ter ficado com a forma que tem, a partir de tal nuvem? Essa nuvem difusa em rotação lenta contraiu-se devido à força da gravidade, a qual resulta da atração entre corpos por causa de suas massas (Figura 1.3). A contração, por sua vez, acelerou a rotação das partículas (exatamente como os patinadores sobre o gelo, que giram mais rápido quando contraem os braços) e essa rotação mais rápida achatou a nuvem na forma de um disco.

A formação do Sol Sob a atração da gravidade, a matéria começou a deslocar-se para o centro, acumulando-se como uma protoestrela, a precursora do nosso Sol atual. Comprimido sob seu próprio peso, o material do proto-Sol tornou-se mais denso e quente. A temperatura interna do proto-Sol elevou-se para milhões de graus, iniciando-se então uma fusão nuclear. A fusão nuclear do Sol, que continua até hoje, é a mesma reação nuclear que ocorre em uma bomba de hidrogênio. Em ambos os casos, átomos de hidrogênio sob intensa pressão e em alta temperatura combinam-se (fundem-se) para formar hélio. Nesse processo, parte da massa é convertida em energia. Essa conversão é representada pela famosa equação de Albert Einstein, $E = mc^2$, na qual E é a quantidade de energia emitida pela conversão de massa (m) e c é a velocidade da luz. Como c é um número muito grande (cerca de 300.000 km/s) e c^2 é imensa, uma pequena quantidade de massa pode gerar uma grande quantidade de energia. O Sol emite parte dessa energia como luz; uma bomba-H, como uma grande explosão.

A formação dos planetas Embora a maior parte da matéria da nebulosa original tenha sido concentrada no proto-Sol, restou um disco de gás e poeira, chamado de *nebulosa solar*, envolvendo-o. A nebulosa solar tornou-se quente quando se achatou na forma de um disco e ficou mais quente na região interna, onde mais matéria se acumulou, do que nas regiões

externas menos densas. Uma vez formado, o disco começou a esfriar e muitos gases condensaram-se. Ou seja, eles mudaram para suas formas líquidas ou sólidas, assim como o vapor d'água condensa em gotas na parte externa de um copo gelado e a água solidifica em gelo quando esfria até o ponto de congelamento. A atração gravitacional causou a agregação de poeira e material condensado por meio de colisões "pegajosas" em pequenos blocos ou *planetesimais* de 1 km. Por sua vez, esses planetesimais colidiram e se agregaram, formando corpos maiores, com o tamanho da Lua. Num estágio final de impactos cataclísmicos, uma pequena quantidade desses corpos maiores – cuja atração gravitacional é também maior – arrastou os outros para formar os nossos nove planetas em suas órbitas atuais.

Quando os planetas se formaram, aqueles cujas órbitas estavam mais próximas do Sol desenvolveram-se de maneira marcadamente diferente daqueles com órbitas mais afastadas. A composição dos planetas interiores é muito diferente daquela dos planetas exteriores.

- **Os planetas interiores** Os quatro planetas interiores, em ordem de proximidade do Sol, são: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte (Figura 1.4). Eles também são conhecidos como planetas terrestres ("parecidos com a Terra"). Em contraste com os planetas exteriores, os quatro planetas interiores são pequenos e constituídos de rochas e metais. Eles cresceram próximos ao Sol, onde as condições foram tão quentes que a maioria dos materiais voláteis – aqueles que se tornaram gases e evaporaram em temperaturas relativamente baixas – não pôde ser retida. O fluxo de radiação e matéria proveniente do Sol impeliu a maior parte do hidrogênio, do hélio, da água e de outros gases e líquidos leves que havia nesses planetas. Metais densos, como o ferro e outras substâncias pesadas constituintes das rochas que formaram os planetas interiores, foram deixados para trás. A partir da idade dos meteoritos, que ocasionalmente golpeiam a Terra e são tidos como remanescentes do período pré-planetário, deduzimos que os planetas interiores começaram a crescer há cerca de 4,56 bilhões de anos. Cálculos teóricos indicam que eles teriam crescido até o tamanho de planeta num intervalo de tempo impressionantemente curto, de menos de 100 milhões de anos.

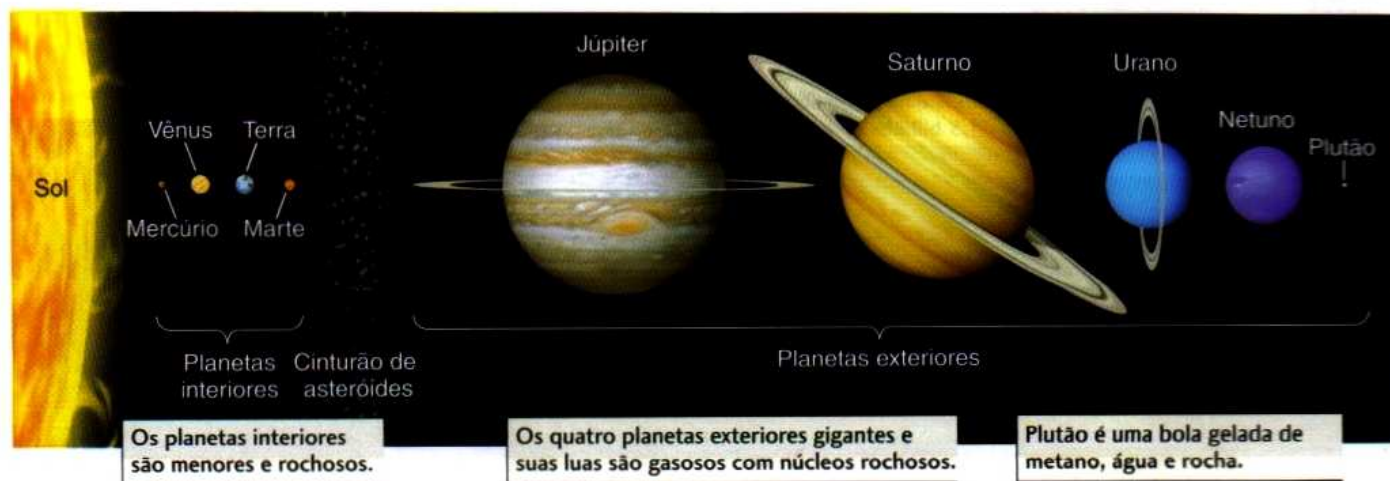


Figura 1.4 O sistema solar. A figura mostra o tamanho relativo dos planetas e o cinturão de asteróides que separa os planetas interiores dos planetas exteriores.

• *Os planetas exteriores gigantes* A maioria dos materiais voláteis varridos da região dos planetas interiores foi impelida para a parte mais externa e fria da nebulosa. Isso possibilitou ao sistema solar formar os planetas exteriores gigantes, constituídos de gelo e gases – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno –, e seus satélites. Os planetas gigantes, suficientemente grandes e com forte atração gravitacional, varreram os constituintes mais leves da nebulosa. Assim, embora tenham núcleos rochosos, eles (como o Sol) são compostos predominantemente por hidrogênio e hélio, além de outros constituintes leves da nebulosa original.

Esse modelo-padrão da formação do sistema solar deveria ser considerado somente pelo que é: uma explicação tentativa que muitos cientistas pensam estar mais bem ajustada aos fatos conhecidos. Talvez o modelo aproxime-se daquilo que realmente tenha acontecido. Entretanto, mais importante ainda é o fato de que esse modelo nos oferece uma maneira de pensar sobre a origem do sistema solar que pode ser testada pela observação de nossos planetas e pelo estudo de outras estrelas. Sondas espaciais americanas e russas obtendo provas planetárias têm transmitido dados sobre a natureza e composição das atmosferas e superfícies de Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e da Lua. Uma impressionante descoberta foi a de que em nosso sistema solar, que consiste em nove planetas e pelo menos 60 satélites, não há sequer dois corpos que sejam iguais!

Outros sistemas solares

Durante anos, cientistas e filósofos têm especulado que talvez haja planetas ao redor de outras estrelas que não apenas o nosso Sol. Na década de 1990, usando grandes telescópios, os astrônomos descobriram planetas orbitando próximos a estrelas semelhantes ao Sol. Em 1999, a primeira família de *exoplanetas* – os sistemas solares de outras estrelas – foi identificada. Esses planetas têm luz muito fraca para serem vistos diretamente pelos telescópios. Porém, sua existência pode ser inferida a partir de uma leve atração gravitacional da estrela em que orbitam, causando nela movimentos de vaivém que podem ser medidos. Atualmente, mais de 90 exoplanetas já foram identificados. A maioria deles é do tamanho de Júpiter ou ainda maior, e orbitam próximos das estrelas-mães – muitos a uma distância abrasante. Planetas do tamanho da Terra são muito pequenos para serem detectados por essa técnica, mas os astrônomos podem ser capazes de en-

contrá-los utilizando outros métodos. Por exemplo, num prazo de cerca de 10 anos, sondas espaciais fora da atmosfera da Terra poderiam ser capazes de procurar por um esmorecimento da luz de uma estrela-mãe, exatamente no momento em que um planeta em sua órbita passasse em sua frente, interceptando a linha de visada para a Terra.

Somos fascinados pelos sistemas planetários de outras estrelas pelo que eles podem vir a nos ensinar sobre nossa própria origem. Nosso redobrado interesse, todavia, reside na profunda implicação científica e filosófica contida na questão: “Existe mais alguém fora daqui?”. Dentro de 20 anos, uma sonda espacial denominada *Descobridora da Vida (Life Finder)* poderia estar equipada com instrumentos para analisar as atmosferas de exoplanetas em nossa galáxia na busca de indícios da presença de algum tipo de vida. Tendo em vista o que conhecemos sobre os processos biológicos, a vida em um exoplaneta seria, provavelmente, baseada em carbono e precisaria de água líquida. As temperaturas brandas que desfrutamos na Terra – não tão afastadas do intervalo entre os pontos de congelamento e ebulição da água – parecem ser essenciais. Uma atmosfera é necessária para filtrar a radiação prejudicial da estrela-mãe e o planeta deve ser grande o suficiente para que seu campo gravitacional impeça a atmosfera de escapar para o espaço. Para que exista um planeta habitável e com vida avançada *como nós a conhecemos*, são necessárias condições ainda mais limitantes. Por exemplo, se o planeta fosse muito grande, organismos delicados, tais como os humanos, seriam frágeis demais para resistir à sua vigorosa força gravitacional. Esses requisitos são muito restritivos para que a vida exista em algum outro lugar? Muitos cientistas pensam que não, considerando a existência de bilhões de estrelas semelhantes ao Sol na nossa galáxia.



A Terra primitiva: formação de um planeta em camadas

Como, a partir de uma massa rochosa, a Terra evoluiu até um planeta vivo, com continentes, oceanos e uma atmosfera? A resposta reside na **diferenciação**: a transformação de blocos aleatórios de matéria primordial num corpo cujo interior é dividido em camadas concêntricas, que diferem umas das outras

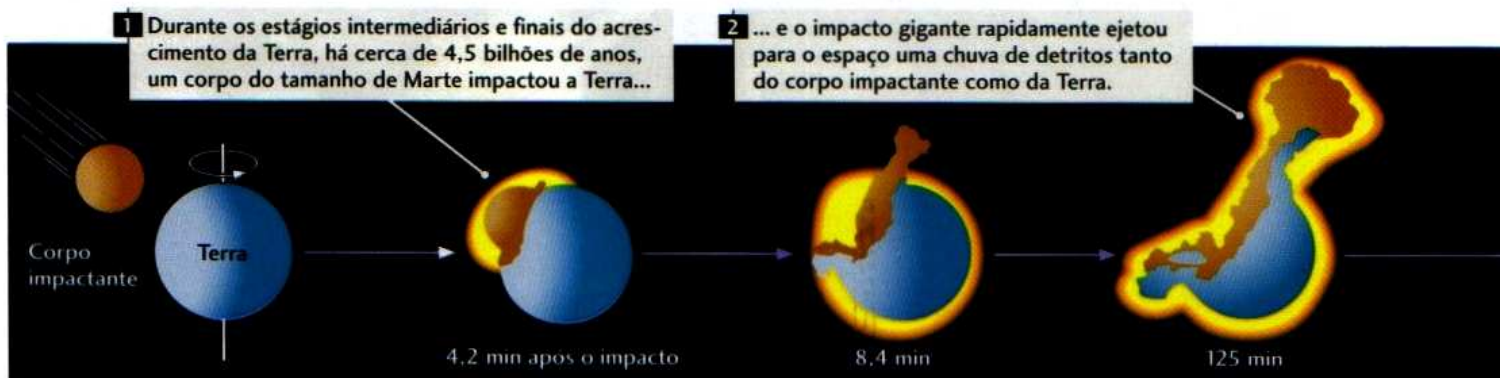


Figura 1.5 Ilustração de uma simulação computadorizada da origem da Lua por meio do impacto de um corpo do tamanho de Marte. (*Solid Earth Sciences and Society, National Research Council, 1993.*)

tanto física como quimicamente. A diferenciação ocorreu nos primeiros momentos da história da Terra, quando o planeta adquiriu calor suficiente para se fundir.

Aquecimento e fusão da Terra primordial

Para entender a atual estrutura em camadas da Terra, devemos retornar ao tempo em que ela foi exposta aos violentos impactos dos planetesimais e de corpos maiores. O movimento de objetos carrega energia cinemática ou de movimento. (Pense no modo como a energia do movimento comprime um carro numa colisão.) Um planetesimal colidindo com a Terra numa velocidade típica de 15 a 20 km/s liberará uma energia equivalente a 100 vezes o seu peso em TNT.² Quando planetesimais e corpos grandes colidiram com a Terra primitiva, a maior parte da energia cinética foi convertida em calor, uma outra forma de energia. A energia de impacto de um corpo, com aproximadamente o dobro do tamanho de Marte, colidindo com a Terra seria equivalente a explodir vários trilhões de bombas nucleares de 1 megaton (= energia de 1 milhão de toneladas de TNT ou 1.015 cal; uma só dessas terríveis bombas destruiria uma grande cidade). Isso seria suficiente para ejetar no espaço uma grande quantidade de detritos e gerar calor suficiente para fundir a maior parte do que restou da Terra.

Muitos cientistas agora pensam que tal cataclismo de fato ocorreu durante os estágios tardios de crescimento da Terra. O grande impacto criou uma chuva de detritos tanto da Terra como do corpo impactante, que se propalou para o espaço. A Lua agregou-se a partir desses detritos (Figura 1.5). A Terra teria se reconstituído como um corpo em grande parte fundido. Esse monumental impacto acelerou a velocidade de rotação da Terra e mudou seu eixo rotacional, golpeando-o da posição vertical em relação ao plano orbital da Terra para sua atual inclinação de 23°.³ Tudo isso há cerca de 4,5 bilhões de anos, entre o início do período de crescimento da Terra (4,56 bilhões de anos) e a idade das rochas mais antigas da Lua (4,47 bilhões de anos) trazidas pelos astronautas da *Apollo*.

Além do impacto colossal, uma outra força de calor teria causado a fusão nos primórdios da história da Terra. Vários elementos (urânio, por exemplo) são *radioativos*, o que significa que se desintegram espontaneamente com a emissão de partículas subatômicas. Como essas partículas são absorvidas pela matéria do entorno, sua energia de movimento é transformada

em calor. O calor radioativo teria contribuído para aquecer e fundir materiais da então jovem Terra. Elementos radioativos, embora apenas presentes em pequenas quantidades, tiveram um efeito considerável na evolução da Terra e continuam a manter o calor interior.

Começa a diferenciação

Embora a Terra provavelmente tenha iniciado como uma mistura não-segregada de planetesimais e outros remanescentes da nebulosa, ela não manteve essa forma durante muito tempo. Uma fusão de grande proporção ocorreu como resultado de um gigantesco impacto. Alguns trabalhos sobre esse tema especulam que cerca de 30 a 65% da Terra fundiram-se, formando uma camada externa de centenas de quilômetros de espessura, a qual chamaram de “oceano de lava” (rocha derretida). Da mesma forma, o interior aqueceu-se até um estado “leve” (menos denso), no qual seus componentes podiam mover-se de um lado para outro. O material pesado mergulhou para o interior para tornar-se o núcleo e o material mais leve flutuou para a superfície e formou a crosta. A emersão do material mais leve carregou consigo calor interno para a superfície, de onde ele poderia irradiar-se para o espaço. Dessa forma, a Terra resfriou-se e grande parte dela solidificou-se e foi transformada em um planeta diferenciado ou zonado em três camadas principais: um núcleo central e uma crosta externa separados por um manto (Figura 1.6). Um resumo dos períodos de tempo que descrevem a origem da Terra e sua evolução num planeta diferenciado é mostrado na Figura 1.12.

Núcleo da Terra O ferro, que é mais denso que a maioria dos outros elementos, correspondia a cerca de um terço do material do planeta primitivo. O ferro e outros elementos pesados, como o níquel, mergulharam para formar o **núcleo central**. Os cientistas consideram que o núcleo, o qual começa numa profundidade de cerca de 2.900 km, é líquido na parte externa, mas sólido numa região chamada de *núcleo central*, que se estende desde uma profundidade de cerca de 5.200 km até o centro da Terra, a cerca de 6.400 km. O núcleo interno é sólido porque a pressão no centro é muito alta para o ferro fundir-se (a temperatura em que qualquer material se funde eleva-se com o aumento da pressão).

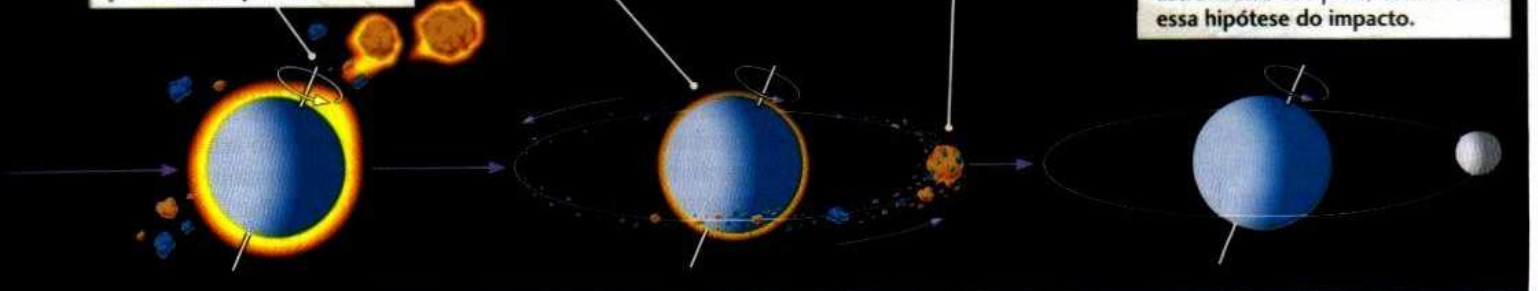
Crosta da Terra Outros materiais líquidos e menos densos separaram-se das substâncias geradoras flutuando em direção à

3 O impacto acelerou a rotação da Terra e inclinou o seu plano orbital para 23°.

4 A Terra reconstituiu-se como um grande corpo fundido...

5 ... e a Lua agregou-se a partir dos detritos.

6 Rochas da Lua com 4,47 bilhões de anos, trazidas pelos astronautas da *Apollo*, confirmaram essa hipótese do impacto.



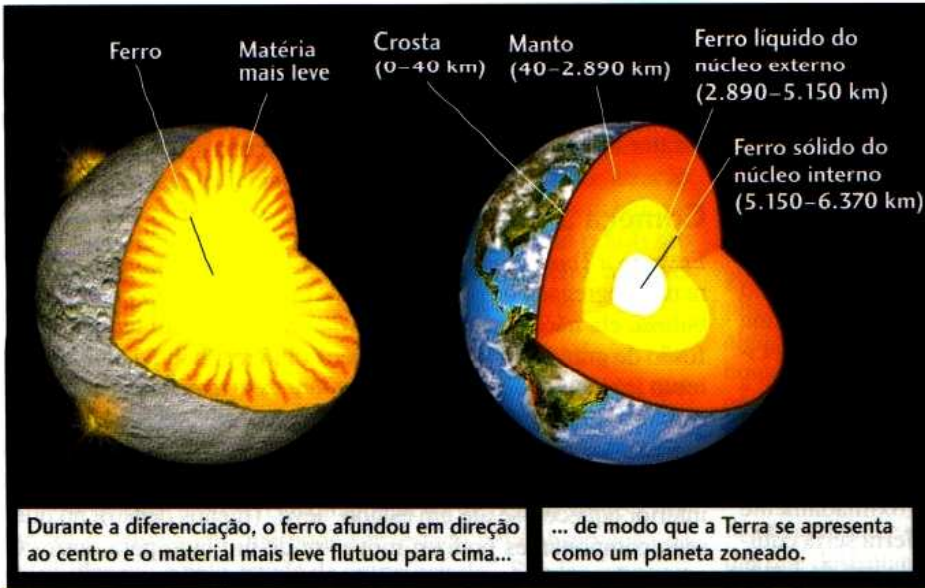


Figura 1.6 A diferenciação da Terra primitiva resultou num planeta zoneado com um denso núcleo de ferro, uma crosta de rochas leves e um manto residual entre ambos.

superfície do oceano de magma. Aí resfriaram-se para formar a **crosta** sólida da Terra, uma fina camada externa com cerca de 40 km de espessura. A crosta contém materiais relativamente leves com temperaturas de fusão baixas. A maioria desses materiais, que facilmente se fundem, é composta de elementos de silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio combinados com oxigênio. Todos eles, com exceção do ferro, estão entre os elementos sólidos mais leves. (O Capítulo 3 discutirá os elementos químicos e os compostos que eles formam.)

Recentemente, no oeste da Austrália, um fragmento do mineral zircão foi datado com a idade de 4,3 a 4,4 bilhões de anos, constituindo-se no mais antigo material terrestre já descoberto. Análises químicas indicam que ele foi formado próximo à superfície, na presença de água, sob condições relativamente frias. Se essa descoberta for confirmada por dados e experimentos adicionais, podemos concluir que a Terra pode ter resfriado o suficiente para formar uma crosta somente 100 milhões de anos depois de ter se reconstituído do gigantesco impacto.

Manto da Terra Entre o núcleo e a crosta encontra-se o **manto**, uma região que forma a maior parte da Terra sólida. O manto é o material deixado na zona intermediária depois que grande quantidade da matéria pesada afundou e a matéria mais leve emergiu. O manto abrange profundidades que vão desde 40 até 2.900 km. Ele consiste em rochas com densidade intermediária, em sua maioria compostos de oxigênio com magnésio, ferro e silício.

Existem mais de cem elementos, mas as análises químicas das rochas indicam que apenas oito constituem 99% da massa da Terra (**Figura 1.7**). De fato, cerca de 90% da Terra consistem em apenas quatro elementos: ferro, oxigênio, silício e magnésio. Quando comparamos a abundância relativa dos elementos constituintes da crosta com sua abundância em relação a toda a Terra, podemos constatar que o ferro soma 35% da massa desta. Devido à diferenciação, entretanto, há pouco ferro na crosta, onde os elementos leves predominam. Como se pode ver na Figura 1.7, as rochas crustais sobre as quais estamos constituídas por quase 50% de oxigênio.

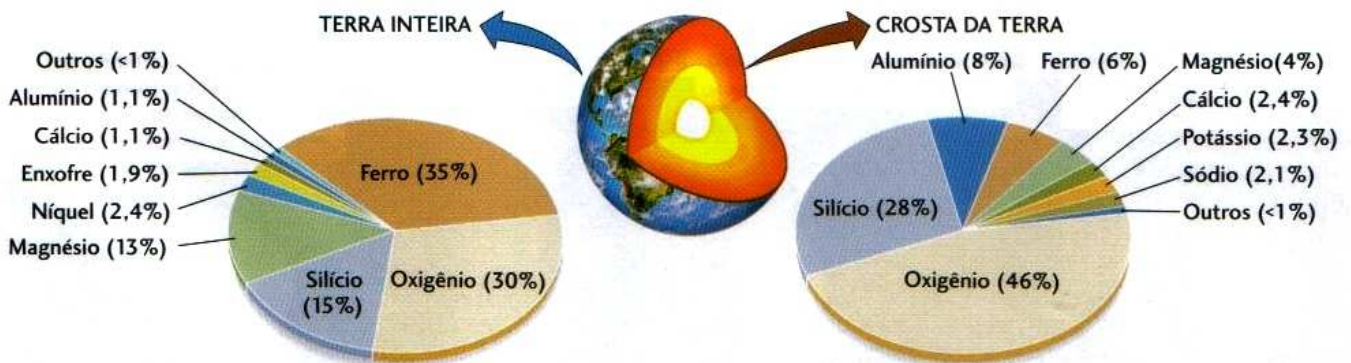


Figura 1.7 A abundância relativa dos elementos da Terra inteira comparada com a dos elementos da crosta é dada em percentuais de peso. A diferenciação criou uma crosta leve, empobrecida de ferro e rica em oxigênio, silício, alumínio, cálcio, potássio e sódio.

Apenas quatro elementos constituem cerca de 90% da Terra: ferro, oxigênio, silício e magnésio. Observe que o oxigênio, o silício e o alumínio, sozinhos, formam mais de 80% da crosta.

A formação dos continentes, dos oceanos e da atmosfera da Terra

A fusão primitiva promoveu a formação da crosta da Terra e, fortuitamente, dos continentes. Ela fez com que os materiais mais leves se concentrassem nas camadas externas e permitiu que pelo menos os gases mais leves escapassem do interior. Esses gases formaram grande parte da atmosfera e dos oceanos. Até hoje, remanescentes retidos da nebulosa solar original continuam a ser emitidos como gases primitivos em erupções vulcânicas.

Continents A feição mais visível da crosta da Terra são os continentes. O crescimento dos continentes começou logo após a diferenciação e continuou ao longo do tempo geológico. Tem-se, quando muito, apenas uma noção geral do que levou à sua formação. Imaginamos que o magma partiu do interior derretido da Terra e ascendeu à superfície, onde esfriou e se solidificou para formar a crosta rochosa. Essa crosta primitiva fundiu-se e solidificou-se repetidamente, fazendo com que os materiais mais leves se separassem dos mais pesados e ascendessem ao topo, para formar os núcleos primitivos dos continentes. A água da chuva e outros constituintes da atmosfera erodiram as rochas, levando-as a decomporem-se e desintegrarem-se. Água, vento e gelo desprenderam, então, os detritos rochosos e moveram-nos para lugares de deposição mais baixos. Aí se acumularam em camadas espessas, formando praias, deltas e os assoalhos dos mares adjacentes. A repetição desse processo durante muitos ciclos estruturou os continentes.

Oceanos e a atmosfera Alguns geólogos pensam que a maior parte do ar e da água da Terra atual vieram de fora do sistema solar por meio de materiais ricos em voláteis que impactaram o planeta depois que ele foi formado. Por exemplo, os cometas que vemos são compostos predominantemente de gelo mais dióxido de carbono e outros gases congelados. Incontáveis cometas podem ter bombardeado a Terra nos primórdios de sua história, fornecendo água e gases que, subsequentemente, deram origem aos oceanos e à atmosfera primitivos.

Muitos outros geólogos acreditam que os oceanos e a atmosfera podem ter sua origem rastreada no “nascimento úmido” da própria Terra. De acordo com essa hipótese, os planetesimais que se agregaram para formar nosso planeta tinham gelo, água e outros voláteis. Originalmente, a água estava aprisionada (quimicamente ligada como oxigênio e hidrogênio) em certos minerais trazidos pela agregação dos planetesimais. De forma similar, nitrogênio e carbono também estavam quimicamente ligados nos minerais. Quando a Terra se aqueceu e seus materiais fundiram-se parcialmente, o vapor d’água e outros gases foram liberados e levados para a superfície pelos magmas, sendo lançados na atmosfera pela atividade vulcânica.

Os gases emitidos pelos vulcões há cerca de 4 bilhões de anos consistiam, provavelmente, nas mesmas substâncias que são expelidas dos vulcões atuais (embora não necessariamente na mesma quantidade relativa): fundamentalmente hidrogênio, dióxido de carbono, nitrogênio, vapor d’água e alguns outros gases (Figura 1.8). Quase todo o hidrogênio escapou para o espaço exterior, enquanto os gases pesados envolveram o planeta. Essa atmosfera primitiva era destituída de oxigênio, elemento que constitui 21% da atmosfera atual. O oxigênio não fazia parte da atmosfera até que organismos fotossintéticos evoluíssem, como será descrito posteriormente neste capítulo.

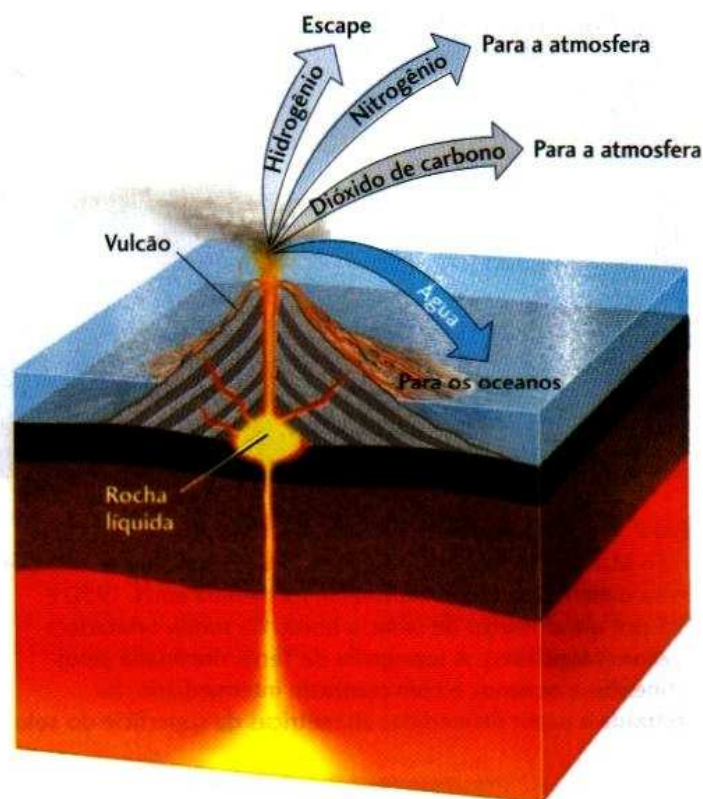


Figura 1.8 A atividade vulcânica primitiva contribuiu com o lançamento, para a atmosfera e os oceanos, de grandes quantidades de vapor d’água, dióxido de carbono e outros gases e, para os continentes, de materiais sólidos. A fotossíntese dos microrganismos removeu o dióxido de carbono e adicionou oxigênio à atmosfera primordial. O hidrogênio, devido à sua leveza, escapou para o espaço exterior.

A diversidade de planetas

Há cerca de 4 bilhões de anos, a Terra tornou-se um planeta inteiramente diferenciado. O núcleo encontrava-se muito quente e em grande parte fundido, mas o manto estava razoavelmente bem solidificado e uma crosta primitiva e seus continentes tinham se desenvolvido. Os oceanos e a atmosfera haviam se formado, provavelmente, a partir de substâncias lançadas do interior da Terra, e os processos geológicos que hoje observamos estavam iniciando seu funcionamento.

Mas o que ocorreu com os outros planetas? Tiveram a mesma história inicial? Informações transmitidas pelas sondas espaciais indicam que todos os planetas terrestres sofreram diferenciação, porém, seus caminhos evolutivos variaram.

Mercúrio tem uma tênue atmosfera, predominantemente formada por hélio. A pressão atmosférica na sua superfície é menor que um trilionésimo da pressão na Terra. Não há ação de ventos ou água para erodir e suavizar sua antiga superfície, que se assemelha com a da Lua: predominantemente crateriforme e coberta por uma camada de detritos, os quais são os fragmentos remanescentes de bilhões de anos de impactos de meteoritos. Devido ao fato de não existir propriamente uma atmosfera e estar muito próximo do Sol, a superfície do planeta se aquece com temperaturas de 467°C durante o dia e esfria para -173°C à noite. Essa é a maior variação de temperatura conhecida no

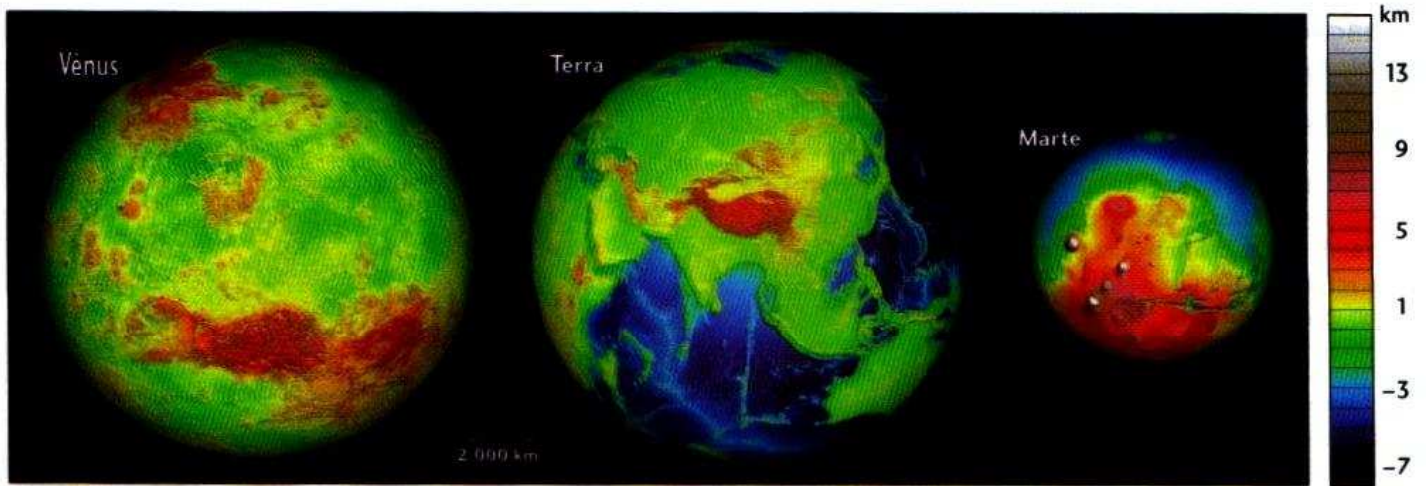


Figura 1.9 Uma comparação das superfícies sólidas de Vênus, Terra e Marte, todas na mesma escala. A topografia de Vênus, que mostra o menor contraste altitudinal, foi medida entre 1990 e 1993 por um altímetro de radar, a bordo da sonda orbitadora *Magellan* (*Magalhães*). A topografia da Terra, dominada pelos continentes e oceanos e com contraste intermediário, foi sintetizada a partir de medidas altimétricas da superfície do solo,

batimétricas dos oceanos, obtidas por navios, e medidas do campo gravimétrico, obtidas da superfície do assoalho oceânico por satélites orbitais da Terra. A topografia de Marte, que mostra o maior contraste, foi medida entre 1998 e 1999 por meio de um altímetro a laser a bordo da sonda orbitadora *Mars Global Surveyor* (*Topografia Global de Marte*). [Cortesia de Greg Neumann/MIT/GSFC/NASA]

sistema solar (além daquela encontrada no Sol, em cuja superfície há uma variação muito mais drástica). Os cientistas estão intrigados com a origem do enorme núcleo de ferro de Mercúrio. Ele constitui 70% de sua massa, um recorde dentre os planetas do sistema solar.

Vênus evoluiu para um planeta em que as condições superficiais ultrapassam a maioria das descrições do inferno. Ele está envolto numa atmosfera pesada, venenosa e incrivelmente quente (475°C), composta sobretudo por dióxido de carbono e nuvens de gotículas de ácido sulfúrico corrosivo. Um humano que permanecesse em sua superfície seria esmagado pela pressão, cozido pelo calor e corroído pelo ácido sulfúrico. Imagens de radar, que vêm através da espessa cobertura de nuvens, mostram que pelo menos 85% da superfície de Vênus são cobertos por derrames de lavas. O restante é predominantemente montanhoso – evidência de que o planeta tem sido geologicamente ativo (**Figura 1.9**). Vênus é gêmeo da Terra em massa e tamanho. Como pôde evoluir num planeta tão diferente do nosso é uma questão que intriga os geólogos planetários.

Marte tem sofrido muitos dos mesmos processos que têm modelado a Terra (**Figura 1.9**), porém conta com uma fina atmosfera composta quase inteiramente de dióxido de carbono. A água líquida não está presente na sua superfície atual – o planeta é tão frio e sua atmosfera tão delgada que a água ou congela ou evapora. As redes de vales e canais secos de rios, entretanto, indicam que a água líquida foi abundante na superfície de Marte há mais de 3,5 bilhões de anos. Algumas das rochas observadas pelo robô móvel *Sojourner*, da Missão *Explorador de Marte* (*Mars Pathfinder*) de 1997, mostraram evidências de terem sido desgastadas pelo fluxo de água. As sondas orbitadoras de Marte têm recentemente encontrado evidências de que grande quantidade de gelo pode estar armazenada abaixo da superfície e segregada nas capas de gelo polares. A vida pode ter existido num planeta Marte úmido de bilhões de anos atrás e pode existir hoje como micróbios sob a superfície. A NASA está proje-

tando uma sonda que poderia responder, dentro de poucos anos, a questão de se há vida em Marte!

A maior parte da superfície do planeta tem mais de 3 bilhões de anos. Na Terra, em contraste, grande parte da superfície de mais de 500 milhões de anos foi obliterada pela atividade geológica. Os capítulos seguintes vão descrever como esses processos ativos têm modelado a face do nosso planeta ao longo de sua história.

Além da Terra, a *Lua* é o outro corpo mais bem conhecido do sistema solar devido à sua proximidade e aos programas de exploração tripulada e não-tripulada. Como explicitado anteriormente, a teoria mais aceita sobre a origem da Lua propõe que ela coalesceu como um grande corpo fundido depois que um gigantesco impacto ejetou sua matéria da Terra. Em geral, os materiais da Lua são mais leves que os da Terra, porque a matéria mais pesada do gigante corpo colidente e a de seu alvo primitivo permaneceram encravadas na Terra. A Lua não tem atmosfera e, como Vênus, é predominantemente muito seca, tendo perdido sua água devido ao calor gerado pelo enorme impacto. Há algumas evidências novas, a partir de observações de sondas espaciais, de que pode existir gelo em pequenas quantidades em crateras profundas e sombrias nos pólos norte e sul da Lua.

A superfície que vemos hoje é aquela de um corpo muito velho e geologicamente inativo. Dois terrenos dominam a superfície lunar. O mais antigo é o das terras altas, de coloração clara. Essas regiões rugosas e intensamente crateriformes cobrem cerca de 80% da superfície. As terras altas são resultantes dos detritos ejetados pelos impactos dos primórdios da história lunar, quando a Lua foi bombardeada por grandes asteróides. Os restantes 20% da superfície são constituídos por planícies escuras mais novas, chamadas de *maria* (que significa “mares” em latim, pois é assim que se parecem quando vistas da Terra). Os “mares” foram formados mais tarde, quando as grandes bacias de impactos foram subsequentemente preenchidas por lavas.

Os planetas exteriores ou gigantes gasosos – *Júpiter, Saturno, Urano e Netuno* – permanecerão como um quebra-cabeça por muito tempo. Essas imensas bolas de gases são quimicamente tão distintas e tão grandes que devem ter seguido uma trajetória evolutiva inteiramente diferente daquela dos pequenos planetas telúricos. Entendemos menos ainda sobre o planeta mais distante, o minúsculo *Plutão*, uma estranha mistura congelada de gás, gelo e rocha, sendo o único planeta ainda não visitado por nossas sondas espaciais.

O bombardeamento vindo do espaço

As superfícies salpicadas por crateras da Lua, Marte, Mercúrio e outros corpos são evidências de um importante intervalo da história primordial do sistema solar: o *período de Bombardeamento Pesado* (ver Figura 1.3). Durante esse período, que deve ter durado desde a formação dos planetas até 600 milhões de anos depois, os planetas varreram e colidiram com a matéria residual deixada para trás na época em que foram agregados. A atividade geológica na Terra obliterou os efeitos desse bombardeamento.

O espaço está cheio de asteróides, meteoróides, cometas e outros detritos abandonados desde o início do nosso sistema solar. Pequenos blocos de detritos aqueceram-se e vaporizaram-se na atmosfera da Terra antes de alcançar a sua superfície, enquanto blocos maiores atravessaram-na por completo. Atualmente, cerca de 40 mil toneladas de material extraterrestre caem na Terra a cada ano, sobretudo como poeira e pequenos objetos não observados. Embora a atual taxa de impacto seja, em várias ordens de magnitude, menor que aquela do período de Bombardeamento Pesado, um grande bloco, de 1 a 2 km de diâmetro, ainda pode colidir com a Terra em intervalos aproximados de poucos milhões de anos. Embora tais colisões tenham se tornado raras, telescópios estão sendo programados para localizar os maiores corpos no espaço e, assim, possibilitar que sejamos antecipadamente advertidos da potencialidade de alguns deles virem a se chocar com a Terra. Recentemente, os astrônomos da NASA previram, “com uma probabilidade nada negligenciável” (uma chance em 300), que um asteróide de 1 km de diâmetro colidirá com a Terra em março de 2880. Um evento como esse constituiria uma ameaça à civilização.

Quadro 1.1 Impactos de bólidos e seus efeitos na vida na Terra

Tamanho (R = raio)	Exemplo ⁴	Última ocorrência (em anos)	Efeitos planetários	Efeitos na vida
Supercolossal R > 2.000 km	Evento de formação da Lua	$4,45 \times 10^9$	Fusão do planeta	Forte emissão de voláteis; extinção da vida na Terra
Colossal R > 700 km	Plutão	Mais do que $4,3 \times 10^9$	Fusão da crosta	Extinção da vida na Terra
Imenso R > 200 km	4 Vesta ⁵ (um grande asteróide)	Cerca de $4,0 \times 10^9$	Vaporização dos oceanos	A vida pode sobreviver sob a superfície
Extragrande R > 70 km	Chiron (maior cometa em movimento)	$3,8 \times 10^9$	Vaporização do topo dos oceanos até 100 m	Cozimento sob pressão do vapor na zona fótica; ^a pode cessar a fotossíntese
Grande R > 30 km	Cometa Hale-Bopp	Cerca de 2×10^9	Aquecimento da atmosfera e da superfície até cerca de 727°C	Cauterização dos continentes
Médio R > 10 km	Bólido do K/T ⁶ ; 433 Eros (o maior asteróide próximo da Terra)	65×10^6	Incêndios, poeira, escuridão; mudanças químicas no oceano e na atmosfera; grande oscilação de temperaturas	Extinção de metade das espécies; o evento K/T levou à extinção dos dinossauros
Pequeno R > 1 km	Tamanho aproximado de 500 asteróides próximos da Terra	Cerca de 300 mil	Suspensão de poeira em toda a atmosfera durante meses	Interrupção da fotossíntese; indivíduos morrem, mas poucas espécies são extintas; ameaça à civilização
Muito pequeno R > 100 m	Evento de Tunguska (Sibéria)	1908 (ano)	Derrubou árvores num rastro de dezenas de quilômetros; causou pequenos efeitos hemisféricos; suspensão de poeira na atmosfera	Manchetes nos jornais; pôr-do-sol romântico; crescimento da taxa de natalidade

^a Região da Terra que recebe a luz do Sol, ou seja, a atmosfera e o topo dos oceanos até 100 m de profundidade.

Fonte: Modificada de J. D. Lissauer, *Nature* 402: C11-C14.

Um impacto importante ocorreu há 65 milhões de anos. O bólido, com pouco mais de 10 km, causou a extinção de metade das espécies da Terra, incluindo todos os dinossauros. Talvez, esse evento tenha possibilitado que os mamíferos se tornassem a espécie dominante, preparando o caminho para o homem. O Quadro 1.1 descreve os efeitos de impactos de vários tamanhos em nosso planeta e na vida. O poeta Robert Frost talvez tenha pensado na vulnerabilidade da vida na Terra quando escreveu

Alguns dizem que o mundo terminará em labareda quente,
Outros dizem que em frio enregelado.
Do que eu provei do desejo ardente
Eu concordo com os que torcem pelo fogo inclemente.
Mas se eu tiver de perecer dobrado,
Eu acho que conheço bem o querer mal
Para dizer que a destruição do gelo desapiedado
É também colossal
E suficiente pro mundo ser acabado.⁷



A Terra como um sistema de componentes interativos

Embora a Terra tenha se esfriado desde seu início ardente, ela continua um planeta inquieto, mudando continuamente por meio de atividades geológicas, tais como terremotos, vulcões e glaciações. Essas atividades são governadas por dois mecanismos térmicos: um interno e o outro externo. Mecanismos de tal tipo –

como, por exemplo, o motor a gasolina de um automóvel – transformam calor em movimento mecânico ou trabalho. O mecanismo interno da Terra é governado pela energia térmica aprisionada durante a origem cataclísmica do planeta e gerada pela radioatividade em seus níveis mais profundos. O calor interior controla os movimentos no manto e no núcleo, suprimindo energia para fundir rochas, mover continentes e soerguer montanhas. O mecanismo externo da Terra é controlado pela energia solar – calor da superfície terrestre proveniente do Sol. O calor do Sol energiza a atmosfera e os oceanos e é responsável pelo nosso clima e tempo. Chuva, vento e gelo erodem montanhas e modelam a paisagem e, por sua vez, a forma da superfície muda o clima.

Todas as partes do nosso planeta e todas suas interações, tomadas juntas, constituem o **sistema Terra**. Embora os cientistas da Terra pensem já há algum tempo em termos de sistemas naturais, foi apenas nas últimas décadas do século XX que eles dispuseram de equipamentos adequados para investigar como o sistema Terra realmente funciona. Dentre os principais avanços, estão as redes de instrumentos e satélites orbitantes de coleta de informações do sistema Terra numa escala global e o uso de computadores eletrônicos com potência suficiente para calcular a massa e a energia transferidas dentro do sistema. Os principais componentes do sistema Terra estão descritos no Quadro 1.2 e representados na **Figura panorâmica 1.10**. Já discorreremos sobre alguns deles e definiremos os outros a seguir.

Dedicaremos nossa atenção às diversas facetas do sistema Terra nos capítulos posteriores. Vamos agora começar a pensar sobre algumas de suas feições básicas. A Terra é um *sistema aberto*, no sentido de que troca massa e energia com o restante do cosmos. A energia radiante do Sol energiza o intemperismo e a erosão da superfície terrestre, bem como o crescimento das plantas, as quais servem de alimento a muitos outros seres vivos. Nosso clima é controlado pelo balanço entre a energia solar que

Quadro 1.2 Os principais componentes do sistema Terra

A energia solar energiza estes componentes	
Atmosfera	Invólucro gasoso que se estende desde a superfície terrestre até uma altitude de cerca de 100 km
Hidrosfera	A esfera da água compreende todos os oceanos, lagos, rios e a água subterrânea
Biosfera	Toda matéria orgânica relacionada à vida próxima à superfície terrestre
O calor interno da Terra energiza estes componentes	
Litosfera	Espessa camada rochosa externa da Terra sólida que compreende a crosta e a parte superior do manto até uma profundidade média de cerca de 100 km; forma as placas tectônicas
Astenosfera	Fina camada dúctil do manto sob a litosfera que se deforma para acomodar os movimentos horizontais e verticais das placas tectônicas
Manto inferior	Manto sob a astenosfera, estendendo-se desde cerca de 400 km até o limite núcleo-manto ⁸ (cerca de 2.900 km de profundidade)
Núcleo externo	Camada líquida composta predominantemente por ferro liquefeito, estendendo-se desde cerca de 2.900 km até 5.150 km de profundidade
Núcleo interno	Esfera mais interna constituída predominantemente de ferro sólido, estendendo-se desde cerca de 5.150 km até o centro da Terra (cerca de 6.400 km de profundidade)