

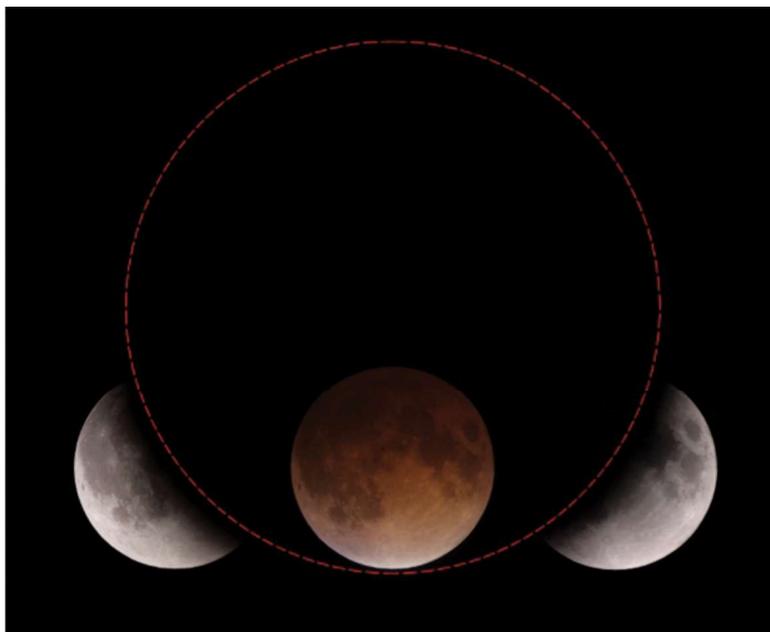
## CAPÍTULO 4

---

# *A Terra*

*Enos Picazzio e Eder Cassola Molina*

- 4.1 INTRODUÇÃO
- 4.2 A FORMA DA TERRA
- 4.3 O PORTE DA TERRA
- 4.4 A MASSA DA TERRA
- 4.5 O INTERIOR DA TERRA
- 4.6 A SUPERFÍCIE DA TERRA
- 4.7 TECTÔNICA DE PLACAS
  - 4.7.1 PLACAS E SISMICIDADE
- 4.8 MAGNETISMO TERRESTRE
  - 4.8.1 MAGNETOSFERA
- 4.9 ÁGUA: CICLO E AÇÃO GEOLÓGICA
- 4.10 CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA
- 4.11 CIRCULAÇÃO E ZONAS CLIMÁTICAS



1- Sombra da Terra durante o eclipse lunar total de 09/11/2003 (Thierry Legault, <http://legault.perso.sfr.fr/eclipse031109.html>, data 21/02/2011).

#### 4.1 INTRODUÇÃO

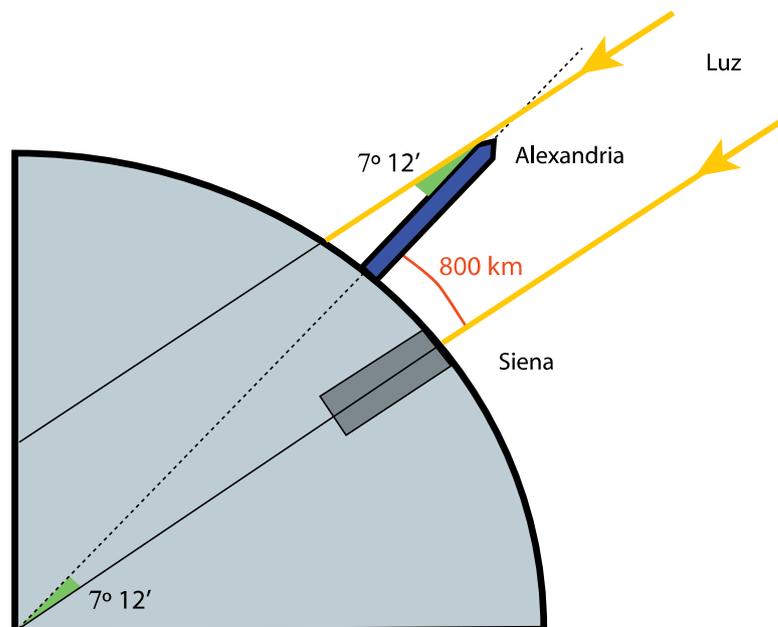
Como os outros planetas do Sistema Solar, a Terra tem seu nome derivado de uma divindade, neste caso Gaia, a mais antiga das deusas, segundo o poeta romano Ovídio (Publius Ovidius Naso, 43 a.C. - 17 d.C.). Na mitologia grega Gaia era a deusa primordial, nascida depois de Caos, o deus primordial. Era mãe de todos os deuses, livre de nascimento ou destruição, de tempo e espaço, de forma ou condição. Ela emergiu do vazio eterno.

A Terra é o terceiro planeta a partir do Sol, e o maior entre os mundos de composição rochosa. É o único planeta conhecido que abriga formas vivas e certamente o único do Sistema Solar a ter forma complexa de vida. Mas isso não é puro acaso. A Terra tem tamanho, composição química, temperatura e condições estáveis adequados à vida. Nem sempre as características terrestres foram favoráveis à vida, sobretudo para os humanos. E, no futuro distante, a Terra não terá condições de manter sua biosfera.

#### 4.2 A FORMA DA TERRA

Da superfície da Terra é difícil distinguir sua forma. Aclives, declives, depressões e montanhas complicam essa percepção. A parte que parece mais plana é a delineada pela água, caso de grandes lagos e oceanos. Ao observarem navios se afastando ou aproximando da praia, os gregos concluíram que a forma da Terra era curva. E isso porque a primeira parte do navio a aparecer ou a última a desaparecer no horizonte era a extremidade do mastro. O fato de as estrelas mergulharem sob o horizonte em horários distintos, quando se deslocam em latitude, também sugeriu, para os antigos, uma forma curva para a Terra.

Aristóteles (384-322 a.C.) apresentou argumentos muito convincentes para a esfericidade da Terra. Observou que, durante os eclipses lunares, o contorno da sombra da Terra projetada na Lua é circular (figura 1). Além disso, notou diferença nos horários de observação de um mesmo eclipse para observadores situados em locais diferentes. Ele se deu conta, ainda, de que o aspecto do céu também muda, conforme a latitude do observador. Todas essas evidências culminavam no formato esférico. Ele chegou a conceber a Terra com forma esférica. Faltava determinar seu tamanho (raio).



2- Supondo a Terra esférica, o ângulo de incidência da luz solar em relação à vertical local varia com a latitude.

Com o desenvolvimento da teoria de gravitação de Newton ficou claro que a distribuição das forças gravitacionais de um corpo de grande massa dá a ele a forma esférica, já que num corpo esférico, todos os pontos na superfície estão à mesma distância do centro, expressando a atuação da gravidade.

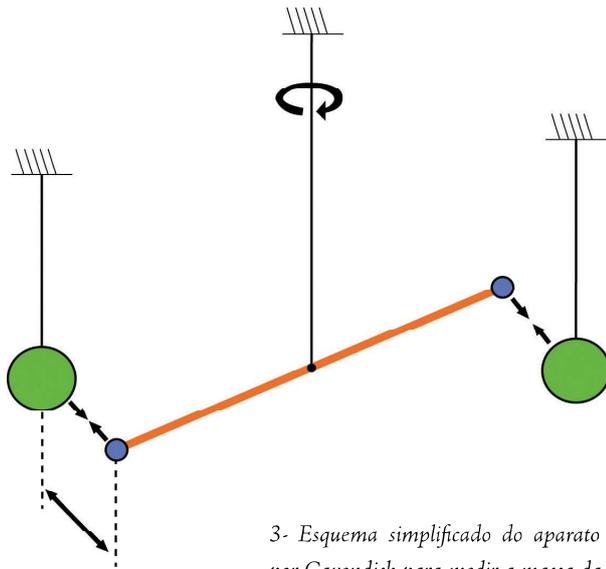
Planetas fluidos, como Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, têm formas menos próximas de uma esfera. A rotação de um planeta quase sempre achata seus polos. Mas planetas rochosos podem ter formas quase perfeitamente esféricas, por conta da resistência do material rochoso. A rotação, evidentemente, achata os polos desses mundos, mas em proporção menor à dos planetas gasosos.

### 4.3 O PORTE DA TERRA

Levando em consideração as diferenças no aspecto do céu em diferentes latitudes, Aristóteles estimou a circunferência da Terra em cerca de 72 mil quilômetros. Mas, a primeira estimativa mais precisa foi feita por Eratóstenes de Alexandria (276 - 196 a.C.), que nasceu em Cirene, norte da África, mas viveu e morreu em Alexandria. Ele dirigiu a famosa Biblioteca de Alexandria, destruída por um incêndio de razões controversas. Seu experimento até hoje surpreende pela concepção simples e resultado promissor. Eratóstenes argumentava que se a Terra fosse esférica, a incidência dos raios solares em um mesmo instante ocorreria em inclinações que dependiam da latitude. Ou seja, sob a luz solar duas hastes verticais de mesmo tamanho produziriam sombras de tamanhos diferentes se estivessem em latitudes diferentes.

Eratóstenes teve acesso a um relato publicado em um dos livros da Biblioteca de Alexandria. O registro indicava que, ao meio-dia do solstício de verão, podia-se ver o reflexo do Sol em um poço na cidade de Siena (atual Assuã), 800 km ao sul de Alexandria. Isso significava que nessa data o Sol incidia exatamente na vertical. Assim, nesse mesmo instante, ele mediu a sombra de um obelisco em Alexandria. Com a altura do obelisco e o tamanho da sombra calculou o ângulo de incidência da luz em aproximadamente  $7,2^\circ$ , ou cerca de  $1/50$  dos  $360^\circ$  de uma circunferência. Portanto, o comprimento do meridiano terrestre deveria ser 50 vezes maior que a distância entre Alexandria e Siena, ou seja, aproximadamente 40.000 km (figura 2).

Atualmente, as distâncias do centro da Terra a um ponto situado no polo e um situado no



3- Esquema simplificado do aparato utilizado por Cavendish para medir a massa da Terra.

equador são, respectivamente, de 39.940,6 km e 40.075,1 km. Isso implica, respectivamente, em uma distância entre os polos e entre dois pontos opostos no equador de 12.713,5 km e 12.756,3 km (valor médio = 12.735 km).

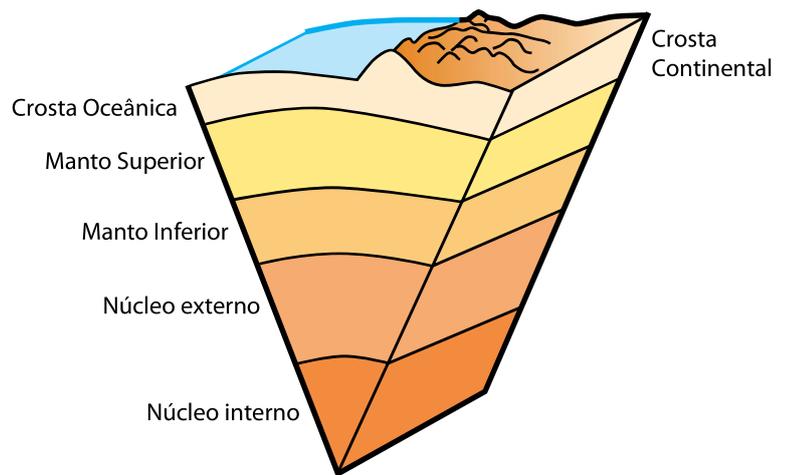
#### 4.4 A MASSA DA TERRA

Em princípio, é possível estimar a massa da Terra multiplicando seu volume (calculado por um diâmetro médio) pela densidade do material de que é formada. Trata-se de um cálculo simples, onde o desafio é encontrar o valor correto da densidade a ser considerada. A superfície terrestre está composta por material de diferentes densidades. Os elementos mais leves são os gases atmosféricos e os mais pesados os materiais metálicos. Pode-se considerar as rochas como material predominante, mas ainda assim há variação significativa de densidade entre os vários tipos de rochas. Adotando um valor médio de densidade em torno de 2,7 g/cm<sup>3</sup> ou 2700 kg/m<sup>3</sup>, um cubo de 1 cm de lado feito desse material teria massa de 2,7 g. O volume de uma esfera de diâmetro 12.735 km seria

$$V = [4/3 \times \pi \times (12.735.000/2)]^3 \quad (1)$$

Multiplicando o volume encontrado pela densidade adotada, já convertendo os valores em kg e m, obteremos aproximadamente  $M = 3,0 \times 10^{24}$  kg, praticamente metade do valor observado para a Terra.

A massa da Terra só pôde ser estimada com precisão maior após a descoberta da lei da gravitação universal exposta em 1687 pelo físico inglês Isaac Newton (1642-1727). Em 1798, o físico-químico inglês, Henry Cavendish (1731-1810), descobridor do hidrogênio, utilizou a lei da gravitação universal para calcular densidade da Terra, em um experimento que chamou de “pesagem do mundo”. Ele mediu a força de atração que uma esfera grande provocava em outra menor. Depois, mediu a força que a Terra exerce sobre a mesma esfera pequena. Como as forças eram proporcionais às massas e a massa da esfera maior era conhecida, ele determinou a massa da Terra (figura 3). Assim, deduziu sua densidade, estimando-a em 5,48 g/cm<sup>3</sup> (ou 5,48 vezes maior que a densidade da água), um valor maior que a densidade das rochas da superfície terrestre, mais leves que as do manto e do núcleo do



4- Interior da Terra (fora de escala e com cores fantasia)

planeta. Esses resultados indicaram imediatamente a diferença de densidade para a superfície e o coração da Terra, apontando que a composição rochosa varia com a profundidade.

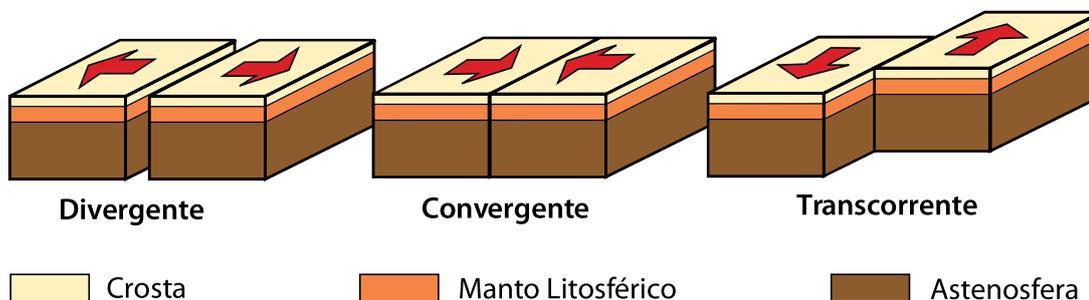
#### 4.5 O INTERIOR DA TERRA

A estrutura interna da Terra pode ser determinada por métodos geofísicos, que investigam as diferentes propriedades físico-químicas das rochas de forma indireta, ou seja, utilizando métodos físicos que dependam destas propriedades. Os sismos são exemplos disso. Analisando a velocidade da propagação de ondas sísmicas em diferentes camadas terrestres é possível conhecer a composição e as propriedades físicas e mecânicas dos componentes dessas diferentes estruturas. Assim, é possível dividir a Terra em três componentes básicos: crosta, manto e núcleo (figura 4).

A crosta é a camada superficial, rígida, ao menos em comparação às demais. Sob os continentes a crosta exibe espessura média de 35 km e densidade que varia entre 2,6 e 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Sob os oceanos a espessura é menor: reduz-se a 6 km em média e a densidade varia de 3,0 a 3,3 g/cm<sup>3</sup>. Na base da crosta, a velocidade das ondas sísmicas aumenta bruscamente, indicando mudança de propriedades físico-químicas. De fato, esta é a forma de definir a crosta: é a camada superficial da Terra definida pela região onde a velocidade das ondas sísmicas primárias (onda P) varia suavemente, normalmente indo progressivamente de 6,7 km/s a 7,2 km/s. Na base da crosta a velocidade muda abruptamente de 7,2 km/s a 8,2 km/s.

Logo abaixo da crosta começa o manto. Ele é sólido e constituído de minerais silicáticos (compostos de silício e oxigênio), ricos em ferro e magnésio, mas comporta-se como um fluido muito viscoso, difícil de fluir, para grandes esforços e intervalos de tempos muito longos (da ordem de milhares a milhões de anos), por causa das condições de esforços, pressão e temperatura reinantes nesta região.

A densidade do manto varia entre 3,5 g/cm<sup>3</sup> e 5,5 g/cm<sup>3</sup>. A variação de velocidade das ondas sísmicas indica que o manto pode ser dividido basicamente em duas camadas: o manto superior (que vai da base da crosta até 400 km de profundidade) e o manto inferior (que vai de 400 km a 2.900 km de profundidade). Entre essas camadas há uma zona de transição (manto transicional), entre 400 e 650 km, de propriedades intermediárias.



5- Movimentos relativos entre placas (fora de escala).

O núcleo começa em 2.900 km de profundidade e vai até o centro da Terra (6.370 km, em média). A análise das ondas sísmicas revela que o núcleo é constituído por material de alta densidade e também está dividido em duas camadas denominadas núcleo externo e núcleo interno. A porção externa é fluida e vai até 5.100 km de profundidade, concentrando cerca de 30% da massa da Terra, sendo homogênea e composta essencialmente de ferro e níquel, com pequenas quantidades de silício, oxigênio e enxofre.

O núcleo interno está no interior dessa região externa, é sólido e formado basicamente por ferro e níquel. Embora a temperatura no núcleo interno seja maior do que no núcleo externo, a altíssima pressão o mantém em estado sólido. A interação entre as porções externa e interna do núcleo produz o campo magnético terrestre, fundamental para a biosfera, ao atuar como blindagem para partículas eletricamente carregadas que chegam continuamente do Sol.

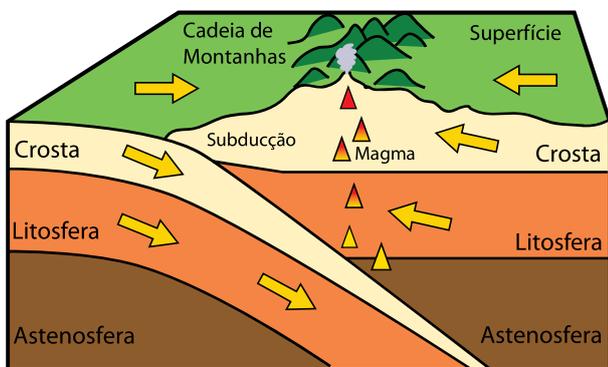
Outra maneira possível de dividir a Terra em camadas é levar em consideração as características de rigidez e fluxo de material. Nessa divisão, a litosfera (literalmente, "esfera de pedra") é a camada rígida mais externa, que vai da superfície ao ponto onde a temperatura atinge os 1.250 °C. A litosfera inclui a crosta e a parte superior do manto e tem mobilidade. As rochas dessa camada apresentam comportamento rúptil, isto é, acumulam esforços até o seu limite de ruptura, quando, então, liberam a energia acumulada quase sempre sob a forma de terremotos.

Abaixo da litosfera começa a astenosfera (literalmente, "esfera frágil"), que atinge aproximadamente 700 km de profundidade. Ela se comporta como um fluido viscoso para grandes esforços atuantes em longos períodos (escala de milhões de anos), como é o caso do deslocamento da litosfera acima dela. Para eventos de curta duração, porém, a astenosfera comporta-se como um sólido elástico.

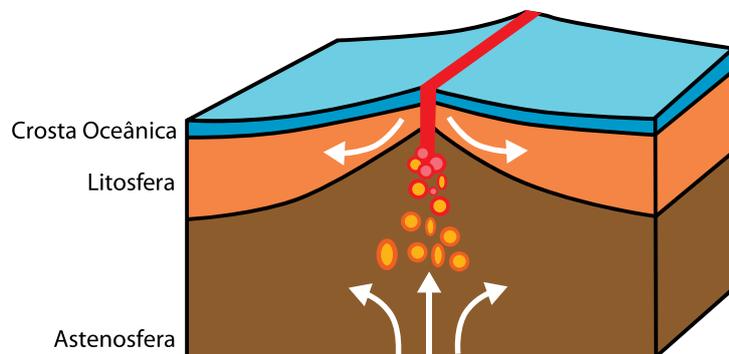
A seguir, vem a mesosfera (literalmente, "esfera do meio") que se estende de 700 km até 2.900 km de profundidade. A mesosfera está submetida a pressões maiores do que as camadas anteriores, o que afeta a viscosidade do material que a compõe e, por consequência, inibe os movimentos de convecção, naturais nesta região por haver uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior desta camada e mobilidade (mesmo que lenta) do material.

#### 4.6 A SUPERFÍCIE DA TERRA

Embora formada por rochas, a superfície terrestre não é uma camada monolítica e estática. Ela na



6- Movimento convergente (fora de escala).



7- Divergência de placas (fora de escala).

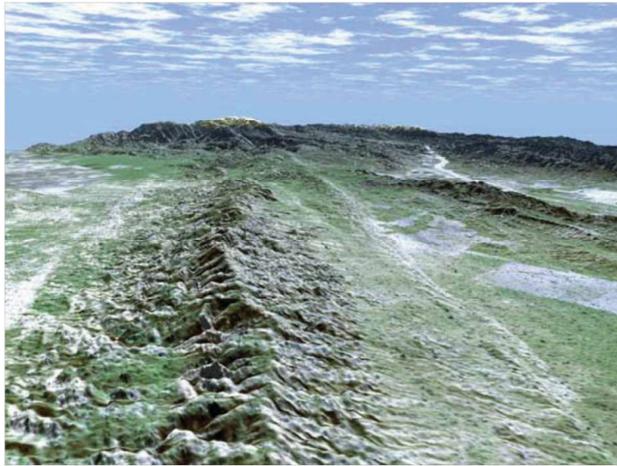
realidade é composta de grandes blocos que se deslocam muito lentamente, flutuando sobre a camada fluida abaixo delas. Estes blocos são chamados de placas litosféricas. Por conta desse movimento, na região fronteira entre as placas, esforços poderosos provocam terremotos e eventualmente vulcanismo. Os movimentos relativos entre as placas permitem definir três tipos de margem de placa: margens de convergência, divergência e transcorrência (figura 5).

A convergência se manifesta quando há colisão direta entre as placas. Nesse caso, as placas sobrepõem-se, e uma delas afunda, num movimento chamado subdução (figura 6). A placa que mergulha é lentamente destruída ao atingir a profundidade em que pressão e temperatura provocam sua fusão (normalmente a mais de 700 km de profundidade). Os Andes, na porção ocidental da América do Sul, são um exemplo claro desse processo. A placa de Nazca, no Oceano Pacífico, mergulha sob a placa Sul Americana, elevando sua borda e dando origem aos Andes, montanhas que continuam em lento crescimento desde o início desta colisão até os dias de hoje. Esse choque também produz terremotos e vulcanismo, como esquematizado na figura 5.

A convergência pode se dar entre placas oceânica-oceânica (Ilhas Marianas, Oceano Pacífico), oceânica-continental (Andes, América do Sul) e continental-continental (Cordilheira do Himalaia, Índia, China, Butão, Nepal, Paquistão).

Na divergência de placas, o processo é oposto, ou seja, os movimentos são divergentes, de separação. Aqui as placas litosféricas se afastam e a ruptura que esse movimento provoca dá vazão ao material proveniente da astenosfera que se solidifica ao longo das bordas das placas e se incorpora a elas. Nessa região ocorrem sismos de menor magnitude, normalmente por resultado do rompimento de porções da placa durante o deslocamento. Este fenômeno é o responsável pela existência da dorsal meso atlântica, uma longa cadeia de montanhas submarinas que desce pelo Oceano Atlântico indo da Islândia, ao norte, até regiões antárticas, no sul (figura 7).

Já no caso da transcorrência o movimento das placas é lateral, sem criação ou destruição de placa. Esse é o caso da famosa falha de San Andreas, na Califórnia, EUA (figura 8). Nessas regiões também ocorrem numerosos terremotos, produzidos pela liberação de energia acumulada ao longo da falha durante muito tempo.



8- Falha de San Andrés (crédito: NASA/JPL-Caltech).

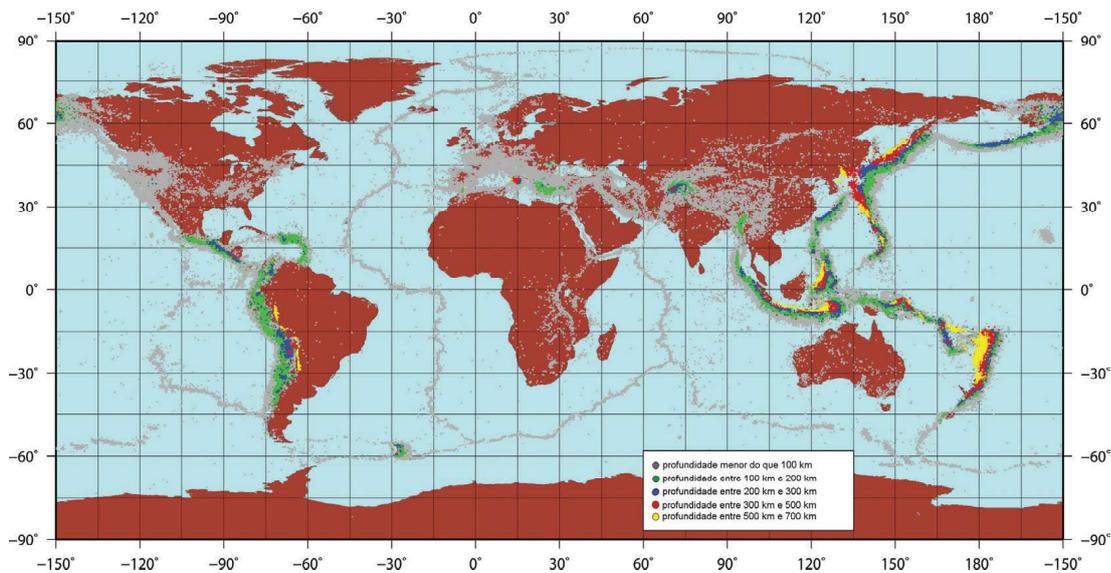
#### 4.7 TECTÔNICA DE PLACAS

Um olhar atento às linhas de costa da América do Sul e da África Ocidental, voltadas para o Oceano Atlântico, evidencia uma intrigante similaridade, como se fossem peças de encaixar de um quebra-cabeças. O cartógrafo alemão Abraham Ortelius (1527-1598) foi quem primeiro notou esse fato, em 1596, e sugeriu que os dois continentes deveriam estar unidos no passado, tendo sido separados por forças provenientes de inundações e terremotos.

Quase três séculos depois, o meteorologista alemão Alfred Wegener (1880-1930) apresentou uma teoria para explicar o que sempre havia parecido uma intrigante coincidência. Além da similaridade das linhas de costa, ele considerou a distribuição de fósseis e as evidências sobre as dramáticas mudanças de clima ocorridas no passado geológico da Terra, e elaborou a teoria da deriva continental. Essa teoria propunha que há 200 milhões de anos todas as massas continentais formavam um bloco único, a Pangea (do latim pan, “todo”, e gea, “terra”). Posteriormente, a Pangea teria se fragmentado, dando origem aos continentes e oceanos atuais.

De fato, esse processo de fragmentação e deslocamento iniciou-se há cerca de 230 milhões de anos, quando os dinossauros iniciavam seu longo reinado, e continua ativo. Inicialmente, a Pangea dividiu-se em dois grandes supercontinentes: Laurásia (contração dos termos Laurentia, nome dado à América do Norte e Groelândia, e Ásia) e Gondwana (denominação ao conjunto dos continentes sul-americano, africano, australiano, antártico, acompanhado de Nova Zelândia, Madagascar e Índia). Mas, pelo teor revolucionário de sua teoria, inicialmente Wegener foi interpretado com suspeição e chegou a ser considerado “charlatão” no meio científico de sua época. Somente décadas após a sua morte, que se deu em 1930, quando ele ia instalar uma estação meteorológica na Groelândia, suas proposições foram aceitas e reconhecidas como um importante avanço no conhecimento da dinâmica da Terra.

No final dos anos 1950, estudos das rochas do fundo oceânico da região nordeste do Pacífico mostraram que o assoalho marinho era muito jovem e que se movimenta, ou seja, continentes e fundo oceânico estão envolvidos em uma espécie de dança global. Assim, a deriva dos continentes deu lugar a uma teoria mais sofisticada, a Tectônica de Placas, ou Tectônica Global. Segundo essa concepção, as placas litosféricas, que englobam continentes e assoalho oceânico, afastam-se nas margens de divergência, como é o caso das dorsais oceânicas, e colidem nas zonas de convergência, como



9- Distribuição dos terremotos no mundo evidenciando as bordas das placas.

ocorre nos Andes e Himalaia. As bordas das placas podem ser facilmente delineadas observando-se a distribuição de terremotos, que normalmente ocorrem nestas regiões.

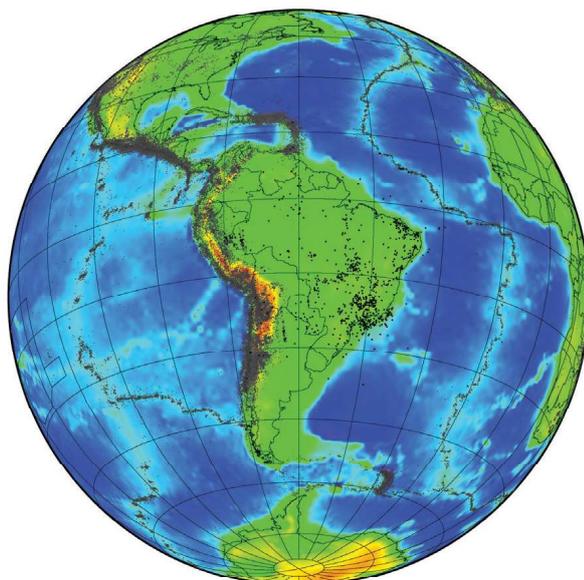
#### 4.7.1 PLACAS E SISMICIDADE

Dependendo do movimento relativo entre as placas, que normalmente é da ordem de centímetros por ano, as tensões se acumulam em diferentes pontos, principalmente nas vizinhanças das bordas, até atingir o limite de resistência das rochas locais e provocar rupturas. O movimento repentino produzido pela ruptura rochosa nesses pontos de atrito libera energia sob a forma de vibrações (ondas elásticas) que se propagam em todas as direções. O ponto onde ocorreu a ruptura é chamado foco ou hipocentro. A projeção desse ponto na superfície ao longo da vertical é denominada epicentro. A localização exata de um terremoto é calculada a partir dos registros de sismógrafos espalhados pela superfície terrestre. Esse processo registra várias componentes da intensidade da vibração e a hora precisa em que se manifestaram.

A intensidade de um terremoto é determinada a partir dos seus efeitos. A escala de intensidades mais utilizada é a de Mercalli Modificada, com 12 graus (expressos em algarismos romanos, de I a XII). Já a magnitude está associada à energia total liberada pelo sismo e pode ser determinada com base nos registros das estações sismográficas que detectaram o sismo. A escala de magnitude mais famosa é a proposta por Charles F. Richter e se baseia na comparação entre a amplitude das vibrações observadas em um sismo e as amplitudes de um sismo escolhido como padrão.

Por ser uma comparação entre amplitudes de movimento, essa escala não apresenta limites inferiores ou superiores. Sismos pequenos podem mesmo apresentar valores negativos de magnitude, caso a amplitude de suas vibrações sejam inferiores às amplitudes das vibrações do sismo padrão. Cada incremento de um ponto na escala Richter corresponde a um aumento de dez vezes na amplitude da vibração, e de mais de trinta vezes na energia liberada. Assim, um terremoto de magnitude sete libera muito mais energia do que um terremoto de magnitude seis, por exemplo. Terremotos com grande poder de destruição quase sempre têm magnitude superior a sete.

Normalmente os sismos ocorrem ao longo dos limites das placas litosféricas, o que faz com que territórios de países que residem totalmente no interior das placas, como é o caso do Brasil, que está lo-



10- Distribuição dos sismos no Brasil.

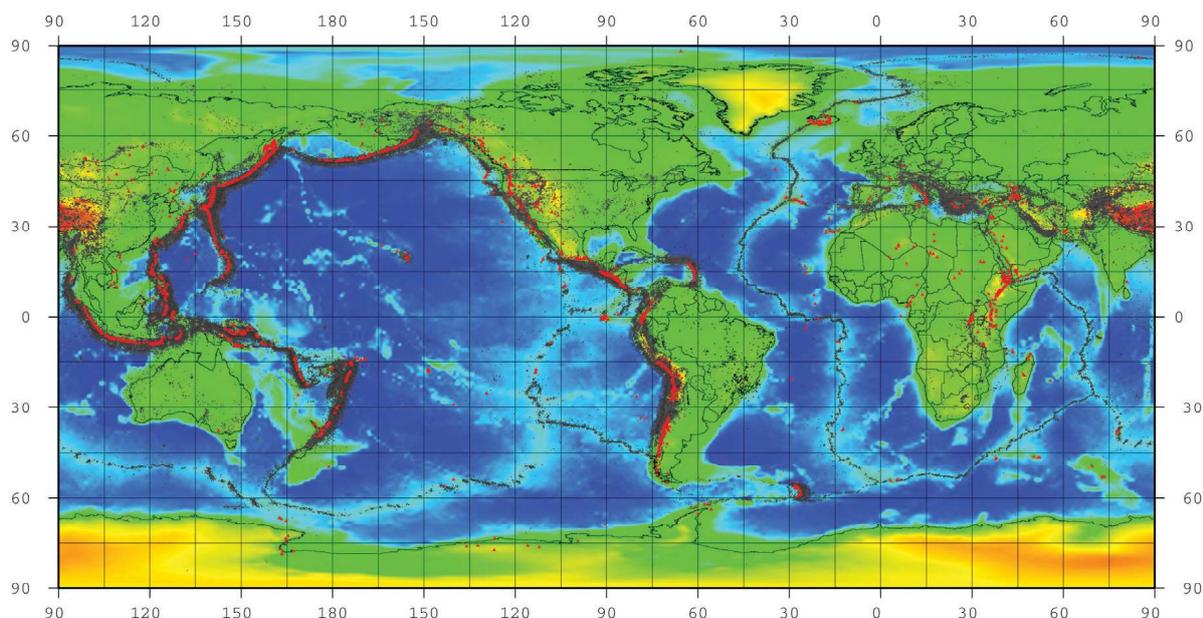
calizado no centro da placa sul-americana, tenham baixa atividade sísmica. Aqui, as regiões com maior atividade sísmica são os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Mato Grosso, e a região da costa sudeste. Esta atividade sísmica geralmente é causada por situações geológicas locais (figura 10).

No interior das placas também ocorrem tremores, chamados sismos intraplaca, como reflexos de tensões compressivas e extensivas nas suas bordas. Esse tipo de sismo ocorre em pequenas profundidades, até aproximadamente 35 km, com magnitudes relativamente pequenas se comparadas com a sismicidade existente nas bordas das placas.

Nas bordas de divergência o material situado abaixo da placa litosférica ascende à superfície na forma de magma, normalmente pelo alívio de pressão gerado pela ruptura das placas nesta região. Já nas bordas de convergência, se ao menos uma das placas envolvidas for oceânica, normalmente temos vulcanismo causado pela liberação da água presente nas rochas quando estas chegam a uma determinada profundidade, que faz com que o material se funda e suba à superfície.

Magma pode ser entendido como sendo rocha fundida, de consistência pastosa/líquida, com temperatura entre 700 e 1200 °C, dependendo principalmente de sua composição. Basicamente, o magma apresenta três componentes: um líquido (representado pela rocha fundida), um sólido (formado por minerais já cristalizados ou fragmentados de rocha, transportados em meio à fração líquida) e um gasoso (constituído por material volátil, dissolvido na parte líquida, como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> e outros). Quando atinge a superfície, o magma libera a parte volátil para a água ou atmosfera, extravasa na forma de lava e se resfria, cristalizando-se para formar rochas vulcânicas.

Durante a erupção, gases contidos no magma são liberados, algumas vezes de forma explosiva, gerando eventos violentos que ejetam matéria tão fina quanto as cinzas vulcânicas ou maiores, como grandes fragmentos de rocha. As erupções mais violentas são explosivas e liberam gases e cinzas vulcânicas capazes de formar nuvens com dezenas de quilômetros de altura. Um exemplo famoso desse tipo de vulcanismo é o do Monte Vesúvio, no ano 79 desta era, descrito por Plínio, o Novo, que matou seu pai Plínio, o Velho (23-79), autor de *Naturalis Historia*, compêndio das ciências antigas distribuído em 37 volumes e dedicado a Tito Flávio, futuro imperador de Roma. Essa explosão do Vesúvio também soterrou as cidades de Pompeia e Herculano, matando a maior parte de suas populações. Na atualidade, erupções do monte Santa Helena, nos EUA, e Pinatubo e Mayon, nas Filipinas, têm apresentado esta característica.



11- Distribuição de terremotos e vulcões.

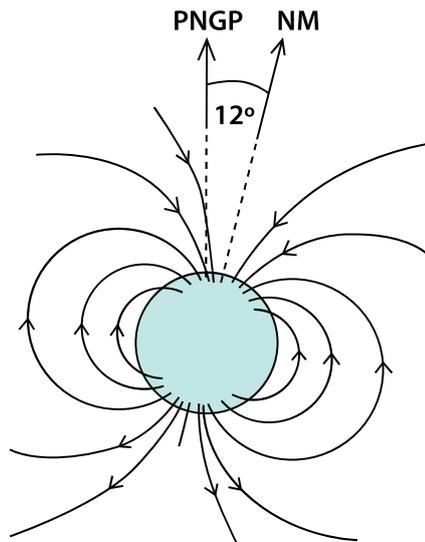
Nessas erupções, tidas como um dos tipos mais poderosos e destruidores, foram liberados fragmentos de rocha, lava viscosa e densas colunas de fumaça e gás. Erupções desse tipo produzem com frequência fluxos piroclásticos (nuvens de cinza vulcânica e gás aquecido entre 100 e 800 °C, que podem deslocar-se à velocidade de até 160 km/h pelas encostas de vulcões durante erupções explosivas). Os fluxos piroclásticos normalmente se deslocam rente ao solo, acompanhando as irregularidades do relevo, e podem formar camadas com vários metros de espessura, como ocorreu no caso das cidades de Herculano e Pompeia, que foram soterradas por mais de seis metros de material piroclástico na erupção de 79 d.C., e só foram descobertas no século XVIII.

Popularmente os vulcões são classificados quanto à sua atividade como ativos, dormentes e extintos, dependendo de sua atividade em tempos históricos. Esta nomenclatura, porém, é inadequada para os cientistas, que normalmente consideram ativos os vulcões que apresentam pelo menos um registro de erupção nos últimos dez mil anos. Cerca de 500 vulcões são tidos como ativos em todo o planeta, mas grande parte está submersa, com a maioria distribuída ao longo de uma estreita faixa que circunda o litoral do Oceano Pacífico, conhecida como Cinturão de Fogo (figura 11).

#### 4.8 MAGNETISMO TERRESTRE

Magnetismo é o fenômeno físico responsável pela atração e repulsão entre certos metais. O primeiro filósofo grego, Tales de Mileto (640-550 a.C.) parece ter sido o primeiro a referir-se a um material originário da região de Magnésia, cidade da Ásia Menor, atual Turquia, com capacidade de atrair objetos ferrosos mesmo sem contacto físico direto.

A região em torno do corpo que exerce ações magnéticas é denominada campo magnético. O campo magnético pode ser gerado essencialmente de duas formas: pela movimentação de cargas elétricas ao redor de um material metálico (como é o caso dos eletroímãs), ou por magnetização permanente adquirida por um material (como é o caso dos ímãs naturais). O campo magnético terrestre é gerado pela movimentação relativa entre as partes líquida e sólida do seu núcleo metálico. Esse campo é atenuado pelo manto, composto essencialmente de material eletricamente isolante, mas estende-se para além da superfície terrestre.



12- O eixo do campo magnético terrestre não coincide com o eixo de rotação (veja explicação no texto).

O campo magnético terrestre tem o seu Polo Sul Magnético (PSM) próximo do Polo Norte Geográfico (PNG), e o Polo Norte Magnético (PNM) próximo ao Polo Sul Geográfico (PSG). Por efeito de convenção, os polos PNM e o PNG ficam no hemisfério norte, e os polos PSG e o PSM no hemisfério sul. As posições dos polos magnéticos podem oscilar alguns quilômetros por ano, independentemente um do outro. Em 2005, as coordenadas geográficas dos polos magnéticos são: PNM: Lat = 82° N, Long = 113° O; PSM: Lat = 64° S, Long = 68° L. A agulha magnética da bússola aponta sempre para o eixo norte-sul magnético, que não coincide necessariamente com o norte-sul geográfico. O desvio entre as direções dos polos magnético e geográfico é denominado declinação magnética e varia sobre a superfície terrestre.

Pesquisas em paleomagnetismo (estudo dos campos magnéticos terrestres de épocas passadas) revelam reversão irregular de direção, intensidade e sentido do campo magnético terrestre, com período médio de dez mil a cem mil anos.

#### 4.8.1 MAGNETOSFERA

O campo magnético terrestre envolve o planeta na forma de uma estrutura esfericamente assimétrica, denominada magnetosfera. Na direção do Sol ela é pressionada pelo fluxo de partículas eletricamente carregadas (vento solar) e não ultrapassa cerca de dez raios terrestres, mas na direção oposta pode atingir centenas de raios terrestres. Por isso, por vezes ela é referida como cauda magnética.

O campo magnético atua sobre partículas eletricamente carregadas, como prótons, elétrons e íons, podendo aprisioná-las. A magnetosfera terrestre está carregada dessas partículas, que ficam espiralando no campo magnético num movimento de vai e vem entre os polos magnéticos norte e sul. Um dos primeiros resultados da exploração espacial foi a descoberta, no final da década de 1950, da existência de dois cinturões circundando a Terra. Eles foram denominados Cinturões de radiação de Van Allen, em homenagem ao físico americano James Alfred Van Allen (1914-2006), que descobriu o cinturão interno. Essa estrutura ocupa uma região compacta acima do equador, na altura aproximada de 6.300 km, formada de prótons com energia elevada, capaz de danificar instrumentos e ameaçar a vida de astronautas que permanecerem nessa área por um período prolongado.

O Cinturão de radiação externo contém elétrons e íons de diferentes espécies, com energia menor que as do cinturão interno. Ao contrário do que ocorre na estrutura interna, a densidade de partículas flutua muito no cinturão externo. Ela é máxima durante as tempestades solares, que injetam grandes quantidades de íons e elétrons nesse cinturão.

Região do espaço dominada pelo geomagnetismo, a magnetosfera forma um escudo protetor para o vento solar emitido e produz dispersão à sua volta. Esse desvio protege a biosfera contra efeitos danosos da chuva de partículas solares levando à formação das auroras polares. Normalmente, as auroras são confinadas a regiões próximas aos polos magnéticos. Em períodos de calma solar, essa região tem tamanho médio de 3.000 km, mas essa área pode aumentar para até 5.000 km, com ventos solares mais intensos.

Assim, a "usina de força" das auroras é o vento solar interagindo com a magnetosfera. Quando isso acontece, as partículas eletrizadas da magnetosfera são aceleradas em direção aos polos magnéticos e se chocam com átomos de oxigênio e nitrogênio, num processo semelhante à ionização (eletrização) dos gases do tubo de uma lâmpada fluorescente. Esses choques produzem luz de cores diferentes que caracterizam a aurora, em tonalidades fortes e cintilantes que se estendem por até dois mil quilômetros. A luz emitida pelo nitrogênio tem tom avermelhado, enquanto a do oxigênio é esverdeada, ou próxima do vermelho.

Como os polos magnéticos e geográficos da Terra não estão alinhados, as regiões aurorais também não se alinham com o polo geográfico. Os melhores pontos para a observação de auroras estão no Canadá, para auroras boreais. A Tasmânia e Nova Zelândia são sítios promissores para as auroras austrais.

#### **4.9 ÁGUA: CICLO E AÇÃO GEOLÓGICA**

A temperatura superficial da Terra é compatível com a existência de oceanos e com vapor de água na atmosfera, que integra o efeito estufa natural regulador da temperatura ambiente superficial. Água não é privilégio da Terra. Essa substância se mostra com relativa abundância no Sistema Solar, mas a Terra é o único mundo que exhibe água superficial em estado líquido. Dos 510 milhões de km<sup>2</sup> da

superfície terrestre, 310 milhões são cobertos por oceanos. Outros 189 milhões são de área continental, dos quais 2,5 milhões correspondem a rios e lagos e até 15 milhões são cobertos por geleiras. Em termos percentuais, cerca de 94% da água da Terra estão retidas nos oceanos, 2% nas geleiras e capas de gelo, 4% nas regiões subterrâneas, e traços (menos que 0,01%) em lagos, rios, pântanos, umidade do solo, biosfera e atmosfera.

A atmosfera e hidrosfera atuais são secundárias e não surgiram diretamente do processo de formação da Terra. O manto exibe minerais hidratados (ricos em água), carbonatados (ricos em carbono) e material volátil de natureza diversa. A maior parte dos componentes fluidos foi produzida pela emissão de gases do manto, por vulcanismo e outros mecanismos indiretos, durante todo o tempo geológico. Também é possível que parte significativa da atmosfera e hidrosfera tenha origem extraterrestre. Corpos celestes ricos em água, como cometas e alguns tipos de asteroides, se chocaram com a Terra no passado remoto, especialmente durante o período de bombardeio pesado que se estendeu há até 3,9 bilhões de anos.

Ainda não se sabe exatamente de onde vieram os corpos que contribuíram com o reabastecimento da Terra com água, mas há evidências suficientes para apontar as possibilidades mais prováveis. Asteroides da região mais externa do cinturão principal, que estão mais próximos de Júpiter, são relativamente ricos em água. Além disso, a região além de Netuno é repleta de corpos com oferta ainda maior de água, incluindo os cometas, astros que mais se aproximam da Terra e com maior chance de chocar-se com o planeta.

A água é um recurso renovável, graças ao ciclo hidrológico, em atividade desde a formação da hidrosfera e atmosfera. Este processo envolve o intercâmbio entre os diversos reservatórios de água: oceanos, geleiras, rios, lagos, vapor d'água da atmosfera, águas subterrâneas e água retida nos organismos vivos. Durante o ciclo hidrológico a água passa pelos estados líquido, gasoso e sólido. Evapora nos mares, rios e lagos, transpira na biosfera, forma nuvens atmosféricas, que se precipitam como chuvas, neve e granizos. Ao atingir o solo, parte dessa precipitação infiltra-se, abastecendo aquíferos, os reservatórios subterrâneos mais profundos, enquanto parte escoar para rios, lagos, mares e oceanos.

Apesar de a dinâmica do ciclo hidrológico ser essencialmente abastecida pela energia solar, ela é complexa, pois envolve desde fatores meteorológicos – vento, chuva, insolação – a ações antrópicas,

ou seja, produzidas pelo homem, que, além de modificar a paisagem, provoca efeitos que afetam o clima. Assim, a água pode evaporar-se de um lugar árido e precipitar em oceanos, ou ainda, enquanto inunda cidades, exibe déficits em represas ou em áreas carentes de irrigação. Segundo o Programa Hidrológico Internacional da Unesco o ciclo hidrológico envolve um volume de água de 577.200 km<sup>3</sup>/ano, dos quais, aproximadamente 11 mil km<sup>3</sup> corresponde ao volume de água potável para consumo humano, animal e atividades agrícolas e industriais.

Um fator importante no gerenciamento da água é a temperatura. Valores muito baixos levam à solidificação. E superfícies recobertas por gelo e neve refletem mais intensamente a luz solar, contribuindo para o resfriamento ambiental. Já valores elevados produzem evaporação e tornam a mais úmida. O efeito estufa atmosférico – agora ampliado pela liberação antrópica de gases que estimulam esse processo – acelera ainda mais a evaporação e aquecimento global. Isso pode elevar o vapor de água para altitudes atmosféricas mais elevadas, onde a incidência de luz ultravioleta é maior. Isto é um enorme perigo, pois a luz ultravioleta provoca a fotodissociação da água, separando hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio é um gás leve e pode perder-se no espaço. A longo prazo, este poderia ser um mecanismo eficiente de perda irreversível de água atmosférica. Mas esse processo é compensado por um reabastecimento feito por porções de cometas formadas por água.

A presença da água é importante não só para a vida como a conhecemos, mas também para manter a Terra com temperatura amena. A atmosfera atual compõe-se de nitrogênio, oxigênio, um pouco de argônio, água, dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases.

A atmosfera primitiva deve ter sido muito mais rica em dióxido de carbono e metano, dois agentes eficientes na geração do efeito estufa. Com a presença da hidrosfera, o CO<sub>2</sub> atmosférico acaba agregado aos oceanos nas interações entre mar e ar, e posteriormente, precipitando, na forma de carbonato de cálcio. Os sedimentos calcários das plataformas marinhas carbonáticas são o reservatório final do ciclo biogeoquímico do carbono, na Terra. Água e dióxido de carbono são importantes para a manutenção da biosfera, desde que em equilíbrio.

A água subterrânea participa de um conjunto de processos geológicos que modificam os materiais terrestres, transformando minerais, rochas e paisagens. A zona de ocorrência de água subterrânea é uma região onde se inicia a maioria das formas de relevo, pois esses estoques são o principal meio das reações do intemperismo químico. O movimento conjunto da água subterrânea e super-

ficial é o agente mais ativo na escultura da superfície terrestre. Os principais processos dessa ação são intemperismo químico (pedogênese), escoamento de solo alagado (solifluxão), erosão interna (solapamento) e dissolução (carstificação). O intemperismo químico provoca desintegração e decomposição das rochas por ação química, processo que forma determinado tipo de solo.

A solifluxão produz escoamento de material em encostas por decorrência de alagamento. O material não consolidado (inseguro) em encosta tem estabilidade parcialmente assegurada pelo atrito. A força gravitacional atua sempre no sentido de deslocá-lo para áreas mais baixas. E, quando a resistência fornecida pelo atrito é superada, o solo de encostas desliza. Quando saturado por excesso de água, a cobertura aumenta seu peso e a camada do solo em contato com a superfície consolidada da encosta torna-se muito fluída, diminuindo drasticamente o atrito.

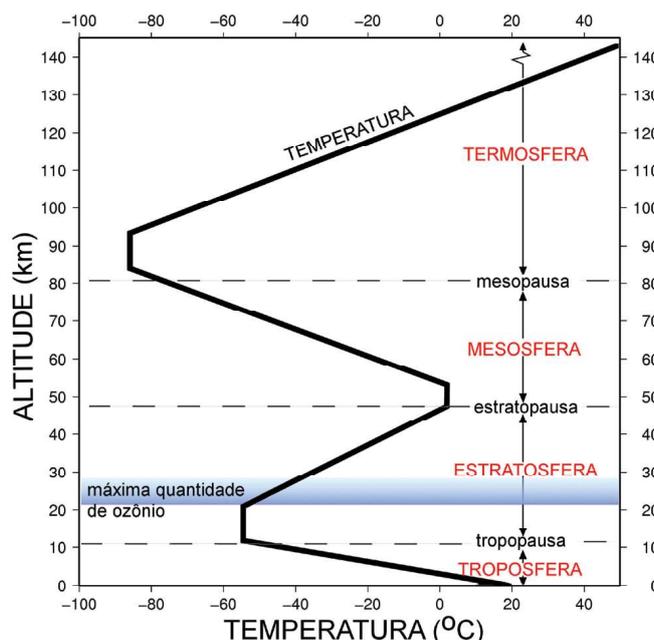
A erosão interna, ou solapamento, é o agente responsável pelas voçorocas, erosão que ameaça cidades, mas também são um problema em zonas rurais agrícolas. Essas erosões, altamente destrutivas, ampliam-se rapidamente e abrem fendas e cortes em vertentes, em alguns casos com profundidade de vários metros. O fundo dessas fendas, quase sempre, está coberto por material desagregado, onde aflora água do lençol freático.

A carstificação produz efeitos característicos de processos de dissolução de rochas como o calcário, com drenagem subterrânea, cavernas e dolinas (depressões circulares formadas pelo abatimento de solo e rochas do teto de caverna com drenagem subterrânea.). Um exemplo típico de região moldada assim é Krasz, na atual Croácia e Eslovênia. Essas áreas são caracterizadas pela presença de rios subterrâneos com cavernas e superfície acidentada, dominada por depressões com paredões rochosos e torres de pedra. Krasz foi traduzida para alemão como Krast, e para o português como Carste, nome para o processo responsável pela origem dessas formações.

#### **4.10 CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA**

Como a hidrosfera, a atmosfera da Terra evoluiu desde sua formação. Após o resfriamento da superfície primitiva do planeta, ocorreu acúmulo de material gasoso, incluindo água, proveniente do interior terrestre, por processos vulcânicos, e do espaço, pelo impacto de cometas.

## 13 - Estrutura da atmosfera



A atmosfera é parcialmente responsável pelas grandes transformações que ocorrem na superfície planetária, incluindo modulação de temperatura por um dos efeitos da biosfera. O ciclo biogeoquímico do carbono, resultado da interação entre atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera, permitiu que o  $\text{CO}_2$ , principal componente da atmosfera primitiva e eficiente agente de efeito estufa, fosse incorporado por carbonatos marinhos, evitando assim que a Terra fosse um planeta quente como Vênus.

A atmosfera terrestre é composta essencialmente por gases, principalmente nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), além de argônio (1%). O restante reúne gases diversos. Ela contém ainda partículas sólidas e aerossóis (partículas líquidas).

O volume de oxigênio livre torna a atmosfera terrestre atual bem distinta daquela que predominou no estágio primitivo e dos planetas do Sistema Solar. Acredita-se que o conteúdo de oxigênio aumentou gradualmente com o processo de fotossíntese inicialmente realizado por microrganismos, há pelo menos 2,7 bilhões de anos. Assim, a atmosfera foi se tornando oxidante e potencialmente tóxica para os organismos da época, o que favoreceu o desenvolvimento do metabolismo aeróbico, a reprodução sexuada, organismos multicelulares e, com isso, a complexidade das formas vivas.

A atmosfera da Terra começa na superfície do planeta, com pressão de 1.000 mbar ao nível do mar. Essa primeira camada é a troposfera, porção que concentra cerca de 75% da massa atmosférica e estende-se até aproximadamente 12 km. É mais espessa entre os trópicos e delgada nas regiões polares. Nela ocorrem praticamente todos os fenômenos da dinâmica externa do planeta – nuvens, ventos, chuvas e raios, entre outros processos (figura 13).

Os valores de temperatura e pressão variam localmente. E diminuem com a altura. Por conta disso, os componentes atmosféricos adquirem uma dinâmica que se traduz por movimentos verticais e horizontais. As temperaturas nessa camada podem variar de 40 °C a -60 °C. Aqui se encontra nitrogênio molecular, oxigênio e quantidades reduzidas de água, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano, entre outros gases minoritários.

Acima da troposfera, e até cerca de 50 km de altura, a temperatura volta a aumentar com a altura, de -70 °C a -5 °C. Essa camada, a estratosfera, abriga a camada de ozônio, uma espécie de filtro natural do planeta contra a radiação ultravioleta do Sol. A absorção dessa radiação solar pelo ozônio faz com que uma molécula desse gás se fotodissocie em  $\text{O}_2$  (oxigênio molecular) e  $\text{O}$  (oxigênio atômico). Com o tempo, o oxigênio atômico volta a se unir ao oxigênio molecular, recompondo o ozônio. Nes-

se processo, de fotodissociação/recombinação, a maior parcela de luz ultravioleta incidente, perigosa para a biosfera, é absorvida. Alguns produtos químicos utilizados industrialmente destroem o ozônio dessa camada atmosférica. É o caso do grupo clorofluocarbonos, agora vetados, mas em décadas anteriores utilizados em aerossóis domésticos e sistemas de refrigeração.

É na estratosfera que se inicia a difusão da luz solar que produz a cor azul do céu. Aviões supersônicos e balões de medição climática podem atingir essa camada. Os aviões deslocam-se pela estratosfera porque ela é mais estável que a troposfera.

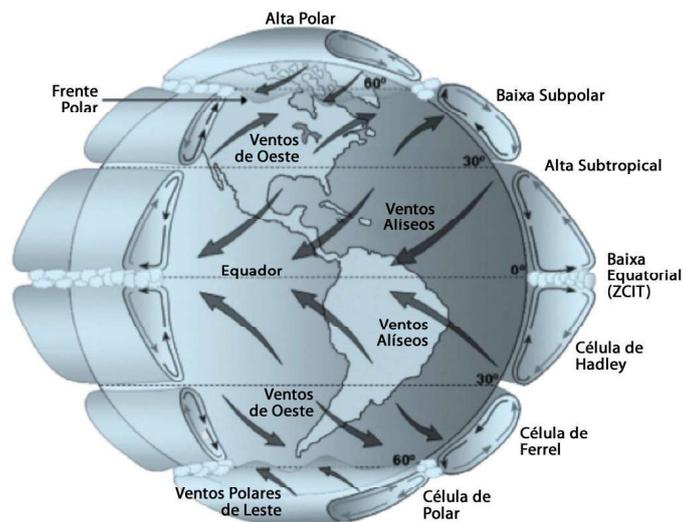
Já a mesosfera, camada acima da estratosfera, estende-se até cerca de 85 km. A temperatura na mesosfera volta a cair com a altura, variando entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-100^{\circ}\text{C}$ . Essa é uma camada extremamente fria, pela ausência de gases ou nuvens capazes de absorver energia solar. Na mesosfera ocorrem os fenômenos de aeroluminescência das emissões da hidroxila (OH) e de meteoros decorrente da combustão dos meteoroides (partículas/blocos rochosos cósmicos que se chocam com a Terra).

A camada acima da mesosfera, entre aproximadamente 85-500 km, é a termosfera. Nessa região a temperatura aumenta com a altitude até onde a densidade das moléculas é baixa e os movimentos tão aleatórios, que raramente se chocam. As temperaturas na termosfera podem atingir os  $1.000^{\circ}\text{C}$ . É a camada onde se formam as auroras polares, como resultado do vento solar e onde orbita o ônibus espacial.

As elevadas temperaturas dessa camada decorrem da intensa luz solar que incide sobre ela, produzindo ionização e, por isso mesmo, elevar a disponibilidade de elétrons livres, produzindo a ionosfera, responsável pela reflexão das ondas de rádios utilizadas em comunicação de solo. As auroras boreais (polo norte) e austrais (polo sul) ocorrem nessa região da atmosfera.

A última camada da atmosfera terrestre, envolvendo a ionosfera, é a exosfera (do grego, esfera de fora, ou para fora). Ela começa a aproximadamente 500 km de altura, com pressão de  $10^{-8}$  mbar (100 bilhões de vezes menor que a pressão ao nível do mar). As espécies químicas que chegam a esta altura perdem-se no espaço. Esse processo ocorre quando a energia cinética (energia de movimento) da espécie gasosa (geralmente átomos de hidrogênio) supera a retenção gravitacional da Terra. Em termos de velocidade, pode-se dizer que a velocidade da partícula supera a velocidade de escape (velocidade necessária para vencer a gravidade) naquela altura. Na exosfera circulam os satélites artificiais. Não existe uma altura específica que delimite atmosfera e espaço,

14- Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais, as direções dos ventos próximos à superfície, e as latitudes típicas de baixas e altas pressões (F.R. Martins; R.A. Guarnieri e E.B. Pereira, Rev. Bras. Ensino Fís. vol.30 no.1 São Paulo 2008).



mas pode-se dizer que, além de 1.000 km, a atmosfera é extremamente rarefeita e basicamente composta de hidrogênio.

#### 4.11 CIRCULAÇÃO E ZONAS CLIMÁTICAS

A potência de radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre corresponde a  $343 \text{ W/m}^2$  ou cerca de meia caloria por metro quadrado por minuto. De toda essa energia, cerca de  $100 \text{ W/m}^2$  é refletida de volta ao espaço e o restante absorvido pela Terra. Isso provoca uma estufa (aquecimento) de  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ , aproximadamente.

A intensidade média da radiação que atinge a superfície da Terra é função da latitude, sendo máxima no equador e mínima nos polos, e decorre do fato de o planeta ter forma aproximadamente esférica. Assim, quanto maior a latitude, menor o ângulo de incidência relativamente ao horizonte local. Como o eixo de rotação da Terra está inclinado em cerca de  $23,5^\circ$  em relação à vertical do plano que contém a órbita terrestre, a incidência de luz muda durante o ano.

O processo de transferência de calor entre baixas e altas latitudes ocorre através dos sistemas de circulação atmosférica e oceânica. Os movimentos verticais são devidos basicamente à diferença de temperatura e os horizontais ocorrem, sobretudo por influência da rotação da Terra. Esse efeito foi descrito pela primeira vez em 1835, pelo matemático e engenheiro francês Gustave-Gaspard Coriolis (1792-1843). O efeito que leva seu nome (Coriolis) resulta de uma força inercial (de resistência) que se aplica a corpos em movimento sobre superfícies em rotação, caso da atmosfera em relação ao solo. Essa força inercial atua à esquerda da direção do movimento para rotação em sentido horário e à direita para rotação em sentido anti-horário. Na realidade, o objeto não se desvia da linha reta, mas aparenta esse comportamento em função do movimento da superfície sob ele. A magnitude da força de Coriolis na Terra é proporcional ao seno da latitude local. É igual a zero no equador e máxima nos polos.

A rotação da Terra também influencia padrões climáticos. O vento, por exemplo, resulta do deslocamento do ar de uma área de alta pressão para uma de baixa pressão, desviando a direção do vento em sentido anti-horário sob baixa pressão no hemisfério norte, e em sentido horário no hemisfério

sul. A figura 14 mostra o padrão de circulação atmosférica na Terra e as zonas climáticas, definidas pelo ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra. A zona entre os trópicos de Câncer ( $23,5^\circ$ ) e de Capricórnio ( $-23,5^\circ$ ) é denominada tropical. As regiões entre os trópicos e os círculos polares são as temperadas. As zonas polares situam-se no interior dos círculos polares.

Uma das primeiras contribuições ao modelo de circulação geral foi feita em 1735 pelo advogado e meteorologista amador inglês George Hadley (1685-1768). Considerando que a energia solar impulsiona os ventos, Hadley propôs que o contraste de temperatura entre os polos e o equador cria uma circulação térmica semelhante à da brisa marítima. Assim, o aquecimento desigual da Terra faria o ar se mover para equilibrar as desigualdades. Na zona tropical, a circulação se dirige para o equador na superfície e para os polos em nível superior, formando uma célula de Hadley em cada hemisfério. O vento que se dirige para o equador é desviado para oeste pela força de Coriolis, formando os ventos alísios. No hemisfério norte, os alísios vêm de nordeste, e no hemisfério sul, de sudeste. Eles se encontram próximos ao equador, e formam uma zona de baixa pressão equatorial.

No modelo de três células, a circulação na zona temperada é oposta à da célula de Hadley. A corrente na superfície desvia para os polos e, devido à força de Coriolis, os ventos têm forte componente de oeste, formando os ventos de oeste em latitudes médias, mais variáveis que os ventos alísios.