

O PLANETA TERRA NO TEMPO GEOLÓGICO: TECTÔNICA DE PLACAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Umberto G. Cordani

Instituto de Geociências da USP

1 – ORIGENS

A Terra formou-se há 4570 milhões de anos, ao mesmo tempo que o Sol e os demais planetas do Sistema Solar, através da condensação do gás e da poeira cósmica que constituíam a nebulosa solar, num processo denominado de *acrecção planetária*. No início, ela consistia de uma mistura caótica de materiais, que foi mantida coesa pela atração gravitacional. Os primórdios do Sistema Solar podem ser caracterizados graças aos estudos dos meteoritos, que muito nos dizem a respeito da idade e do processo de crescimento planetário. Informações adicionais a respeito da evolução primitiva da Terra vêm da planetologia comparada, que utiliza dados obtidos nas missões espaciais que visitaram a Lua, Vênus e Marte.

A evolução do planeta resultou da transformação dessa mesma mistura caótica em um corpo estruturado em camadas concêntricas diferentes entre si. O material mais denso afundou e concentrou-se no interior do planeta, ao passo que o material menos denso constituiu a parte mais superficial. Nesse contexto formaram-se dois sistemas fundamentais: um *núcleo* interno formado por Ferro e Níquel e um *manto* envolvente rochoso. A *crosta terrestre*, a camada mais externa do planeta, onde estamos situados, originou-se mais tarde, por modificações do material do manto.

Não sobraram minerais e rochas, na Terra, da época do processo de acreção planetária. Pequenos fragmentos dos minerais mais antigos que se conhecem, com mais de 4000 milhões de anos, os zircões de Jack Hills, na Austrália, sugerem que muito cedo, na Terra, existiram rochas graníticas, normalmente portadoras de zircão, indicando a ocorrência de crosta continental. Sugerem também a existência de água líquida, indicando que desde então oceanos já cobriam a superfície do planeta.

2 – DINÂMICA INTERNA E TECTÔNICA DE PLACAS

O homem pode conhecer bem o que acontece a milhares de quilômetros acima de sua cabeça, mas não consegue saber direito o que acontece abaixo de seus pés. As perfurações mais profundas efetuadas na Terra atingem no máximo uma dezena de quilômetros de profundidade, de modo que têm que ser utilizadas outras armas para a investigação da composição e condições

físico-químicas dos materiais existentes no interior do planeta. Tudo o que sabemos é estabelecido com base em evidências indiretas, tais como estudos de meteoritos, planetologia comparada, estudos de petrologia experimental, bem como evidências geofísicas oriundas de pesquisas sobre magnetismo terrestre, comportamento de ondas sísmicas e fluxo térmico do planeta.

O planeta Terra começou quente, e vem resfriando no tempo geológico. No seu início, predominavam processos ligados com ascensão vertical de magmas, como é o caso dos “*hotspots*” que ainda são observados na atualidade. Com o tempo apareceu e tornou-se dominante o regime de *tectônica de placas*, com seus movimentos tangenciais à superfície da Terra. O conhecimento da tectônica de placas foi uma verdadeira revolução científica para a Geologia nos anos 60, com uma mudança notável de paradigma. A partir dessa época prevaleceram na comunidade geológica as teorias mobilistas, que caracterizaram adequadamente o funcionamento do planeta, através do movimento de grandes placas litosféricas em sua superfície.

A dinâmica interna do planeta, que comanda a tectônica de placas, tem suas origens na mobilidade do material do manto, apesar deste ser quase que totalmente sólido. A temperatura no seu interior aumenta em direção ao centro da Terra, atingindo no limite manto/núcleo cerca de 4000 °C e cerca de 5500 °C nas proximidades do centro da Terra. O calor interno, produzido principalmente através da desintegração dos elementos radioativos de meia-vida longa existentes no manto, tais como Urânio, Tório, Potássio, e outros, é transportado para a superfície, para em seguida ser dissipado para fora do planeta. Conseqüentemente, com a diminuição progressiva e inexorável dos elementos radioativos, o planeta vai lentamente resfriando. O transporte do calor interno pode ser por condução ou por convecção, e este último modo consiste da movimentação de massa das zonas mais quentes para as mais frias.

A litosfera se divide em cerca de uma dúzia de placas tectônicas grandes e muitas placas menores, que se movimentam tangencialmente à superfície do planeta, com velocidades distintas que podem variar de menos de um centímetro por ano a uma dezena de centímetros por ano. Esse movimento depende das *correntes de convecção mantélicas* subjacentes, que se originam nas zonas mais quentes do manto, onde o material inicia uma ascensão para níveis superiores. Ao mesmo tempo, para compensar essa ascensão, rochas mais frias e por isso mesmo mais densas descem e preenchem o espaço deixado pelo material que subiu, completando o movimento circular das células de convecção. As placas tectônicas, constituídas de porções da litosfera rígida, se movimentam sobre o material mais plástico da *astenosfera*, e os limites entre elas constituem o local ideal para a ocorrência das atividades que caracterizam a dinâmica interna da Terra.

Os limites entre as placas podem ser *convergentes*, *divergentes*, ou *conservativos*. Nos limites convergentes ocorre o choque entre duas placas que se aproximam, e uma delas mergulhará por debaixo da outra, voltando para o manto, e criando o que se denomina “*zona de subducção*”. É o caso da Cordilheira Andina. No caso de limites divergentes, ao longo de sistemas de fraturamento, associados com vulcanismo intenso, são formados grandes

oceanos, como é o caso do Atlântico. Por sua vez, nos limites de placas conservativos as placas contíguas deslizam horizontalmente, uma em relação à outra, com movimentações opostas. O exemplo mais conhecido e mais característico é o sistema de falhas de San Andrés na costa ocidental da América do Norte, onde grandes terremotos ocorrem a cada dez anos. Quem vive em Los Angeles e San Francisco aguarda com apreensão o próximo “big one”.

Pelo exposto, decorre que se situa no manto o motor dos processos da dinâmica interna do planeta, que produzem as maiores modificações na fisiografia, estrutura e natureza do material da crosta terrestre. Em primeiro lugar, esse motor interno é responsável pela existência do relevo, ou seja, das terras emersas no planeta, em que se salientam as cordilheiras elevadas que existem em todos os continentes. Como esse relevo é continuamente atacado e desbastado pelos agentes erosivos, se não houvesse um mecanismo adequado para a contínua reposição da topografia, não haveria continentes, e o fundo do único oceano global estaria situado por volta de 2,5 km de profundidade.

Em segundo lugar, a dinâmica interna da Terra condiciona os movimentos das placas, em cujas interações ocorrem as principais manifestações de sua energia interna. Nos limites entre placas tectônicas contíguas, como maiores evidências dos seus movimentos de aproximação ou afastamento relativo, concentram-se praticamente todos os terremotos de grande intensidade e a grande maioria das atividades vulcânicas do planeta. Esses fenômenos naturais potencialmente causadores de desastres não podem ser impedidos. Eles nada mais são do que manifestações de rotina inerentes aos processos naturais do Sistema Terra, que em muitos casos podem ser violentas, implacáveis, levando à destruição de parte da biosfera, incluindo-se aí o Homem e suas coisas. Por outro lado, mesmo que terremotos e vulcanismo não possam ser impedidos, seus possíveis desastres podem ser mitigados, desde que sejam tomadas a tempo algumas medidas adequadas de prevenção. Cresceu muito nos anos recentes a capacidade de defesa das sociedades devidamente instruídas e educadas nas técnicas de prevenção e segurança. Não são mais aceitáveis as atitudes fatalísticas do passado em relação a desastres naturais, e os avanços do conhecimento devem ser ativados, em toda parte, para reduzir as possíveis perdas humanas e materiais. Para isso é importante, especialmente nos países mais vulneráveis a desastres, colocar maior ênfase nas atividades de planejamento, prevenção, preparação, comunicação e educação específica para cada tipo de desastre, ao invés de limitar-se às atividades posteriores de reparação dos danos e restauração das estruturas sociais.

3 – CLIMAS DO PASSADO E AQUECIMENTO GLOBAL

Na superfície do planeta, a energia necessária para a dinâmica da atmosfera vem da radiação solar. Os registros impressos nas rochas sedimentares que existiram no passado da Terra, e que caracterizam os ambientes de sedimentação em termos dos processos de superfície e das interações entre litosfera, oceanos e atmosfera do planeta, em cada época,

indicam que a sua dinâmica externa não foi muito diferente da de hoje. Por exemplo, desde 4000 milhões de anos, parece que água líquida sempre existiu na superfície da Terra, preservando as diferentes formas da vida. Por outro lado, flutuações climáticas extremas são registradas, como glaciações afetando grande parte da superfície do planeta. Sabe-se que, há 100 milhões de anos, a temperatura média da superfície era cerca de dez graus mais quente do que hoje, e palmeiras cresciam em latitudes polares. Gradualmente a temperatura foi decaindo para valores frios, culminando nas glaciações do Quaternário, que se iniciaram há cerca de 3 milhões de anos, e vem apresentando até o presente oscilações entre períodos glaciais frios e inter-glaciais mais quentes. No momento nos encontramos num período inter-glacial, em que o nível dos mares é próximo de seu máximo. Numa escala de tempo mais próxima, a temperatura média do planeta está diminuindo gradualmente, de maneira muito lenta, a partir do fim do último período glacial, há cerca de 18 mil anos, e seu registro recente apresenta flutuações climáticas menores que se sucedem de forma mais ou menos cíclica. Na história humana, oscilações climáticas são bem conhecidas, como o período quente da era medieval (anos 900-1100) e a época denominada "*Pequena idade do gelo*" (anos 1400-1700).

Os programas científicos internacionais instituídos na década de 80, o IGBP e o IPCC, indicam que estão em contínuo aumento certos gases na atmosfera, pela queima de combustíveis fósseis. Este fato estaria provocando aumento no efeito estufa natural - aquele que condiciona uma temperatura média amena e favorável à vida na superfície da Terra - levando à instalação do que se convencionou chamar de "*aquecimento global*", fenômeno que pode ser muito lento e gradual, com efeitos aparecendo na escala de tempo de décadas ou séculos, mas que podem revelar-se catastróficos e sem condições de serem impedidos ou controlados. Entre outros problemas graves, uma consequência facilmente previsível seria que boa parte das geleiras existentes nas calotas polares da Terra derreteria, causando um aumento de muitos decímetros no nível médio dos oceanos, e obviamente condições desastrosas para muitas das regiões litorâneas do planeta.

Entre os geocientistas, que verificam no registro geológico do passado a grande variabilidade natural do clima, há certo ceticismo em relação à importância do fator antropogênico nas mudanças climáticas observadas. Acresce que há fatores geológicos que podem ter influência climática, como por exemplo grandes erupções vulcânicas, e também fatores relacionados com possíveis variações na intensidade da radiação solar, de difícil caracterização. Por outro lado, a observação de um aquecimento da superfície do planeta, indicado pelo aumento gradativo da temperatura de cerca de 0,5 graus nas últimas quatro décadas é factual, e além disso parece ser muito importante o impacto humano sobre as forçantes climáticas. O assunto é muito atual, ensejando estudos, observações, investigações, modelagens, simulações, etc., com intensidade e continuidade, em toda parte do globo.

Em última análise, variabilidade natural do clima existe, e seus efeitos podem exceder os efeitos produzidos pelo homem, ou seja, o clima pode continuar a flutuar naturalmente, com ou sem modificações antropogênicas importantes. Prevenção e preparação para o aquecimento global são aconselháveis, entretanto seria muita pretensão que a humanidade possa

controlar e dirigir as mudanças climáticas futuras. A sociedade precisa adaptar-se às mudanças que apareçam, sejam elas para dias mais quentes ou para dias mais frios, como sempre ocorreu na história da humanidade.