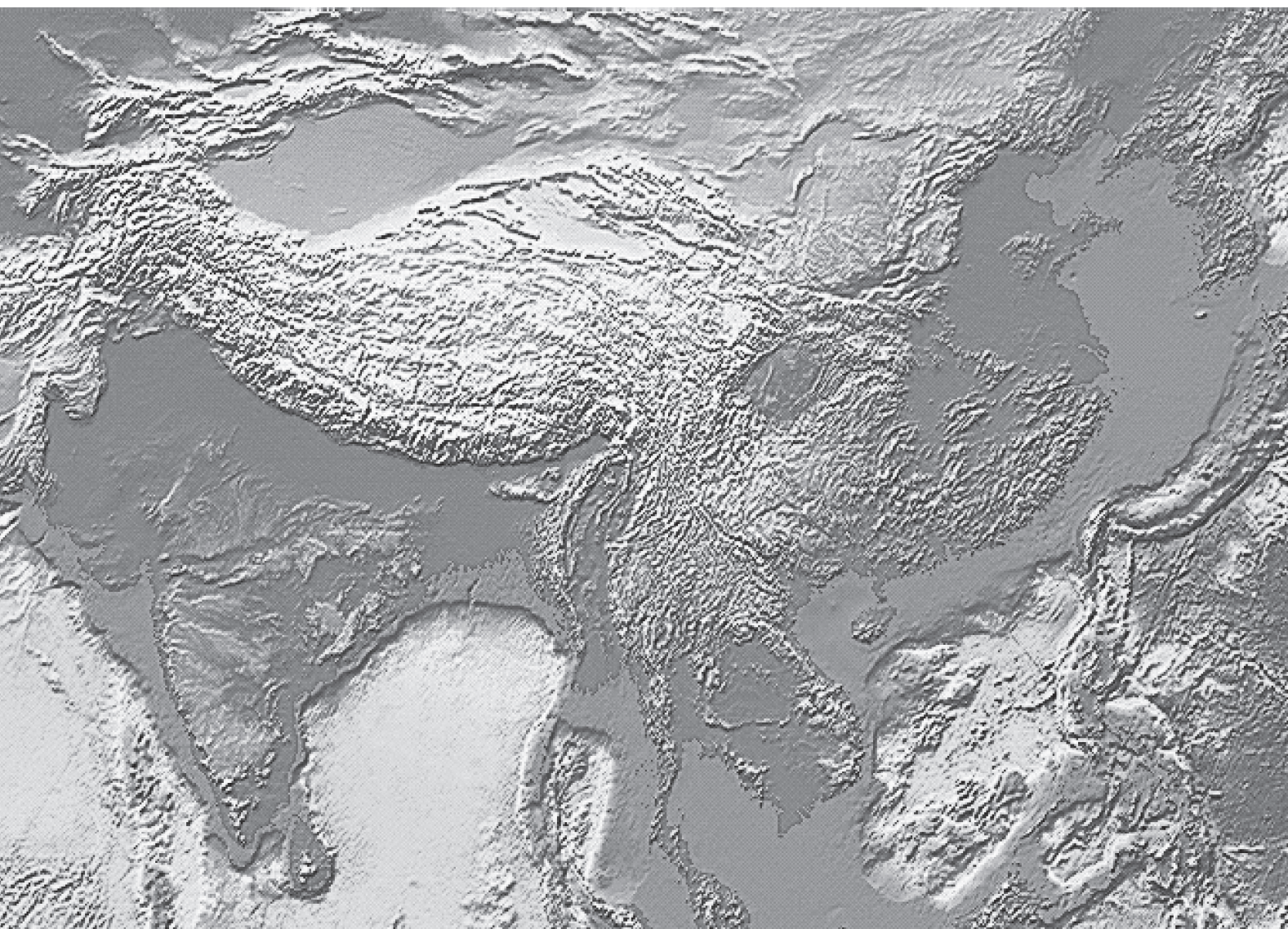


Perspectiva histórica

1



1.1 DERIVA CONTINENTAL

Embora a teoria da nova tectônica global, ou tectônica de placas, tenha sido amplamente discutida a partir de 1967, a história de uma visão mobilista da Terra retrocede consideravelmente (Rupke, 1970; Hallam, 1973a; Vine, 1977; Frankel, 1988). Desde o mapeamento inicial e o traçado do litoral dos continentes ao redor do Oceano Atlântico, já havia um fascínio com a semelhança entre os contornos das costas das Américas e da Europa e da África. Possivelmente, o primeiro a notar a similaridade e sugerir uma antiga separação foi Abraham Ortelius, em 1596 (Romm, 1994). Em 1620, Francis Bacon, em seu *Novum Organum*, comentou sobre a semelhança entre as formas das costas oeste da África e da América do Sul: isto é, a costa *atlântica* da África e a costa *Pacífica* da América do Sul. Ele também observou as configurações similares entre o Novo e o Velho Mundo, “ambos largos e estendidos em direção ao norte, estreitos e pontudos em direção ao sul”. Talvez por causa dessas observações, pois não parecem haver outras, Bacon é muitas vezes erroneamente apresentado como tendo sido o primeiro a notar a semelhança ou “encaixe” das costas atlânticas da América do Sul e da África e até mesmo por ter sugerido que elas estavam unidas e se separaram. Em 1668, François Placet, um predecessor francês, relacionou a separação das Américas com o Dilúvio de Noé. Influenciado pela Bíblia, ele postulou que, antes do dilúvio, a Terra era única e indivisível e que as Américas foram formadas pelo junção de ilhas flutuantes ou separadas da Europa e da África, pela destruição de uma massa de terra preexistente, “Atlantis”. É preciso lembrar que, durante os séculos XVII e XVIII, a Geologia, como a maioria das ciências, foi desenvolvida por clérigos e teólogos que achavam que a ocorrência de fósseis marinhos e sedimentos aquáticos em terras altas eram explicáveis pelo dilúvio bíblico e outras catástrofes.

Quem também notou o encaixe dos contornos das costas atlânticas da América do Sul e da África e sugeriu que esses continentes poderiam ter estado lado a lado foi Theodor Christoph Lilienthal, professor de Teologia em Königsberg, na Alemanha. Em um trabalho datado de 1756, ele também relacionou a separação deles ao catastrofismo bíblico, baseando-se no trecho “no tempo de Peleg, a terra foi dividida”. Em documentos datados de 1801 e 1845, o explorador alemão Alexander von Humboldt notou semelhanças geométricas e geológicas entre as margens opostas do Atlântico, mas também especulou que o Atlântico foi formado por um evento catastrófico, “um fluxo de águas revoltas... dirigido primeiro para o nordeste, depois para o noroeste e de volta para o nordeste.... O que chamamos de Oceano Atlântico não é nada mais do que um vale escavado pelo mar”. Em 1858, um americano, Antonio Snider, fez as mesmas observações, mas postulou o termo “drift” (deriva), relacionando-o a “catastrofismos múltiplos” – o Dilúvio

sendo a última grande catástrofe. Assim, Snider sugeriu drift *stricto sensu*, chegando até a sugerir uma reconstrução pré-deriva (Fig. 1.1).

No século XIX, tivemos a substituição gradual do conceito de catastrofismo pelo de “uniformitarismo” ou “atualismo”, como proposto pelos geólogos britânicos James Hutton e Charles Lyell. Hutton escreveu: “Não há poder a ser empregado que não seja o natural para o mundo, não podemos admitir nenhuma exceção da qual não saibamos o princípio, e não há eventos extraordinários a serem alegados para explicar uma aparência comum”. Geralmente refere-se a isso na paráfrase de Archibald Geikie sobre as palavras de Hutton, “o presente é a chave para o passado”, isto é, os processos lentos que acontecem sobre, na e abaixo da superfície da Terra têm atuado ao longo do tempo geológico, dando forma à superfície atual. Apesar dessa mudança na base do pensamento geológico, os proponentes da deriva continental ainda recorreram a eventos catastróficos para explicar a separação dos continentes. George Darwin, em 1879, e Oswald Fisher, em 1882, associaram a deriva a partir da Lua do Pacífico. Essa ideia persistiu até o século XX e, provavelmente, explica em parte a relutância dos cientistas em considerar seriamente o conceito de deriva continental durante a primeira metade do século XX (Rupke, 1970).

Um conceito uniformitarista de deriva foi sugerido pela primeira vez por F. B. Taylor, um físico americano, em 1910, e Alfred Wegener, um meteorologista alemão, em 1912. Pela primeira vez, considerou-se que ocorre deriva hoje e que vem ocorrendo, pelo menos, ao longo dos últimos 100-200 Ma da história da Terra. Assim, a deriva foi invocada para explicar as semelhanças geométricas e geológicas do traçado das bordas dos continentes ao redor dos oceanos Atlântico e Índico, bem como a formação dos jovens sis-



Figura 1.1 A reconstrução dos continentes por Snider (Snider, 1858).

temas montanhosos em suas terminações extremas. Taylor usa principalmente a deriva para explicar a distribuição dos cinturões de montanhas dobradas e “a origem da superfície da Terra” (Taylor, 1910) (Fig. 1.2 e Figura 1.1 do encarte colorido).

O pioneiro da teoria da deriva continental é geralmente reconhecido como sendo Alfred Wegener, que, além de meteorologista, foi astrônomo, geofísico e balonista amador (Hallam, 1975), tendo dedicado grande parte de sua vida ao desenvolvimento dessa teoria. Wegener detalhou muitos dos dados geológicos mais antigos, pré-deriva, e insistiu que a continuidade das estruturas mais antigas, formações, faunas e floras fósseis em todas as linhas de costa dos atuais continentes seria mais facilmente compreendida com uma reconstituição pré-deriva. Ainda hoje, esses elementos são as principais características do registro geológico dos continentes, as quais favorecem a hipótese da deriva continental. Entre as informações trazidas por Wegener para esta tese, temos o registro da presença de uma glaciação generalizada no PermoCarbonífero, a qual afetou a maioria dos continentes do hemisfério sul, enquanto o norte da Europa e a Groenlândia registravam condições tropicais. Wegener postulou que, neste momento, os continentes estavam unidos em uma única massa de terra, com os atuais continentes do sul centrados no polo e os continentes do norte ocupando a linha do equador (Fig. 1.3). Wegener denominou esta assembleia continental de Pangeia (literalmente, “toda a Terra”), embora atualmente prefiramos pensar como

A. du Toit, que postulou que a Terra foi formada por dois supercontinentes (du Toit, 1937) (Fig. 11.27). Aquele mais ao norte é denominado Laurásia (a partir de uma combinação de Laurentia, uma região do Canadá, e Ásia), constituído da América do Norte, Groenlândia, Europa e Ásia. O supercontinente do sul é chamado de Gondwana (literalmente, “terra dos Gonds”, uma antiga tribo do norte da Índia) e é constituído da América do Sul, Antártica, África, Madagascar, Índia e Austrália. O que separava os dois supercontinentes para o leste era um predecessor do mar “Mediterrâneo” chamado de Oceano paleo-Tethys (como a deusa grega do mar), enquanto em torno da Pangeia havia o Oceano proto-Pacífico ou Panthalassa (literalmente, “todos os mares”).

Wegener apresentou a sua nova tese no livro *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (A Origem dos Continentes e Oceanos), que teve quatro edições no período 1915-1929. Muitas das discussões acadêmicas posteriores foram baseadas na tradução da edição inglesa de 1922, que apareceu em 1924, sendo que a apreciação do trabalho anterior foi adiada devido à Primeira Guerra Mundial. Na época, muitos cientistas da Terra tiveram dificuldades para compreender suas ideias, pois a aceitação de seu trabalho exigia uma rejeição da ortodoxia científica existente, que era baseada em um modelo da Terra estática. Wegener baseou sua teoria em dados retirados de várias disciplinas diferentes e, em muitas delas, ele não era um especialista. A maioria dos cientistas da Terra encontrou falhas em detalhes e assim tendeu a rejeitar *in toto* seu trabalho.

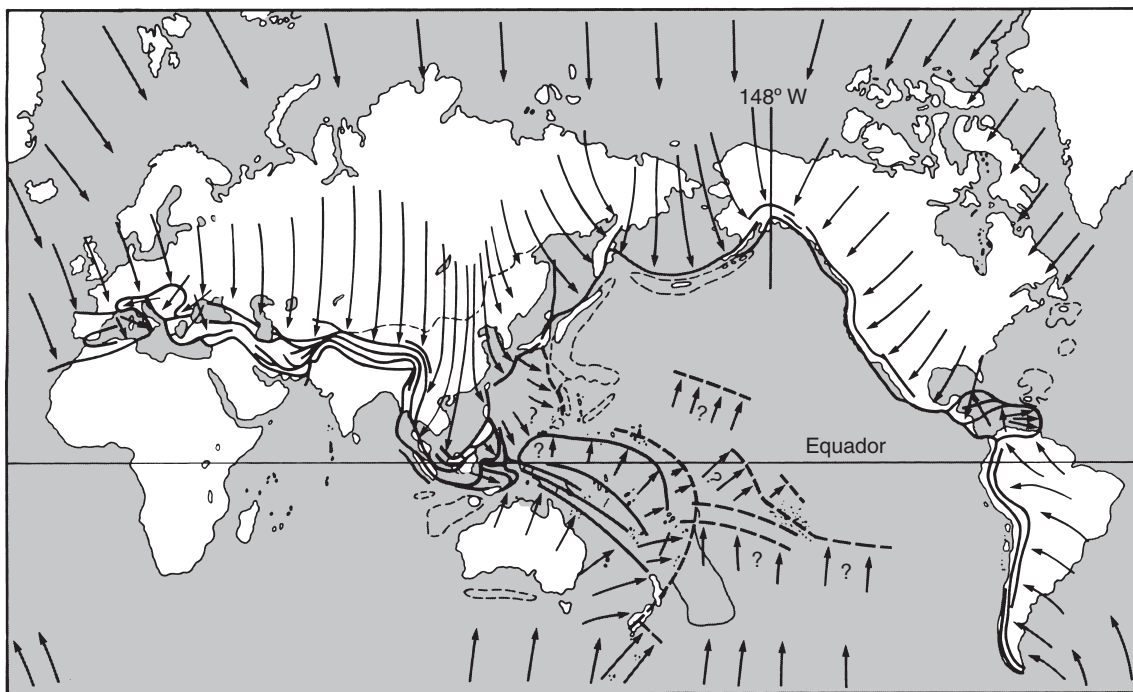


Figura 1.2 Mecanismo de Taylor para a formação de cadeias de montanhas cenozoicas por deriva continental (segundo Taylor, 1910).

Talvez Wegener tenha feito um desserviço a si próprio no ecletismo de sua abordagem. Vários de seus argumentos estavam errados: por exemplo, sua estimativa da taxa de deriva entre a Europa e a Groenlândia, utilizando técnicas geodésicas, estava errada quanto à magnitude. O mais importante, do ponto de vista de seus críticos, foi a falta de um mecanismo razoável para movimentos continentais. Wegener havia sugerido que a deriva continental ocorreu em resposta à força centrípeta experimentada pelos con-

tinentes devido à rotação da Terra. Cálculos simples mostraram que as forças exercidas por este mecanismo eram muito pequenas. Embora nas edições posteriores de seu livro esta abordagem tenha sido abandonada, as objeções da maioria da comunidade científica tinham se estabelecido. Du Toit, no entanto, reconheceu os bons argumentos geológicos para a união dos continentes do sul, e A. Holmes, no período 1927-1929, desenvolveu uma nova teoria sobre o mecanismo de movimento continental (Holmes, 1928).

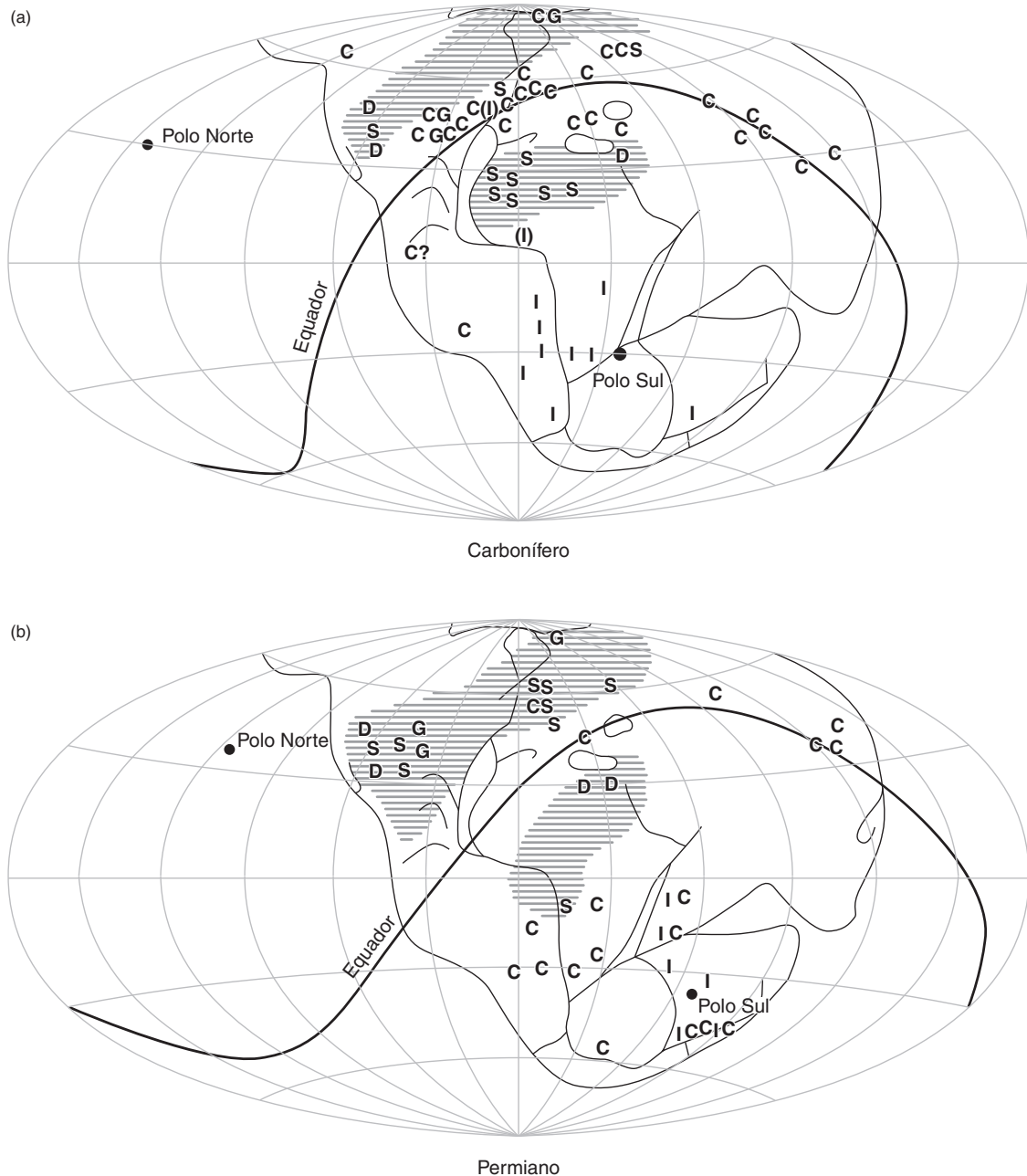


Figura 1.3 A reconstrução dos continentes (Pangeia) por Wegener, com indicadores paleoclimáticos, e paleopolos e equador para (a) Carbonífero e (b) Permiano. I, gelo; C, carvão; S, sal; G, gesso; D, arenito do deserto; áreas hachuradas, zonas áridas (adaptado de Wegener, 1929, reproduzido a partir de Hallam, 1973a, p. 19, com a permissão da Oxford University Press).

Ele propôs que os continentes eram movidos pelas correntes de convecção alimentadas pelo calor do decaimento radioativo (Fig. 1.4). Apesar de suas ideias diferirem consideravelmente dos conceitos atuais de convecção e criação do fundo do oceano, Holmes determinou a base a partir da qual desenvolveram-se as ideias modernas.

No período entre as Guerras Mundiais, duas escolas de pensamento se desenvolveram – os adeptos e os não adeptos da deriva, estes em maior número. Uma ridicularizava as ideias da outra. Os “não deriva” enfatizaram a falta de um mecanismo plausível, como já observamos, sendo que tanto a convecção como a expansão da Terra foram consideradas improváveis. Os “não deriva” tinham dificuldade em esclarecer a presente separação das províncias faunísticas, que poderiam ser muito mais facilmente explicadas se os continentes estivessem juntos anteriormente. Suas tentativas de explicar essas ligações aparentes ou migrações de fauna também foram ridicularizadas. Eles tiveram que usar vários meios improváveis, como ilhas trampolins, ligações ístmicas ou transportados. É interessante notar que, nessa época, muitos geólogos do hemisfério sul, como du Toit, Lester King e S.W. Carey, foram defensores da deriva, talvez porque o registro geológico dos continentes do sul e da Índia favorecessem a ideia de que havia um único supercontinente (Gondwana) antes de 200 Ma atrás.

Pouco foi escrito sobre a deriva continental no período entre as críticas iniciais ao livro de Wegener e próximo a 1960. Na década de 1950, foi desenvolvido o método paleomagnético, empregando metodologia sugerida pela P.M.S. Blackett (Seção 3.6). Em seguida, S.K. Runcorn e seus colaboradores demonstraram que movimentos relativos tinham ocorrido entre a América do Norte e a Europa. O trabalho foi estendido por K.M. Creer, na América do Sul, e por E. Irving, na Austrália. Resultados paleomagnéticos tornaram-se mais aceitos quando a técnica de desmagnetização, na qual a magnetização primária pôde ser isolada, foi desenvolvida. A integração entre a datação faunística, métodos radiométricos recém-desenvolvidos e dados paleomagnéticos para o Mesozoico até os tempos atuais mostrou diferenças significativas, além do âmbito do erro, nos movimentos entre vários continentes.

Uma deferência importante no desenvolvimento de ideias relacionadas com a deriva continental foi a de que, antes da Segunda Guerra Mundial, os geólogos haviam estudado somente as áreas terrestres. Seus resultados revelaram que a crosta continental preserva todo um espectro da história da Terra, que retrocede a cerca de 4.000 Ma ao presente e, provavelmente, em algumas centenas de milhões de anos da idade da Terra e do próprio sistema solar. Suas pesquisas também revelaram a importância de

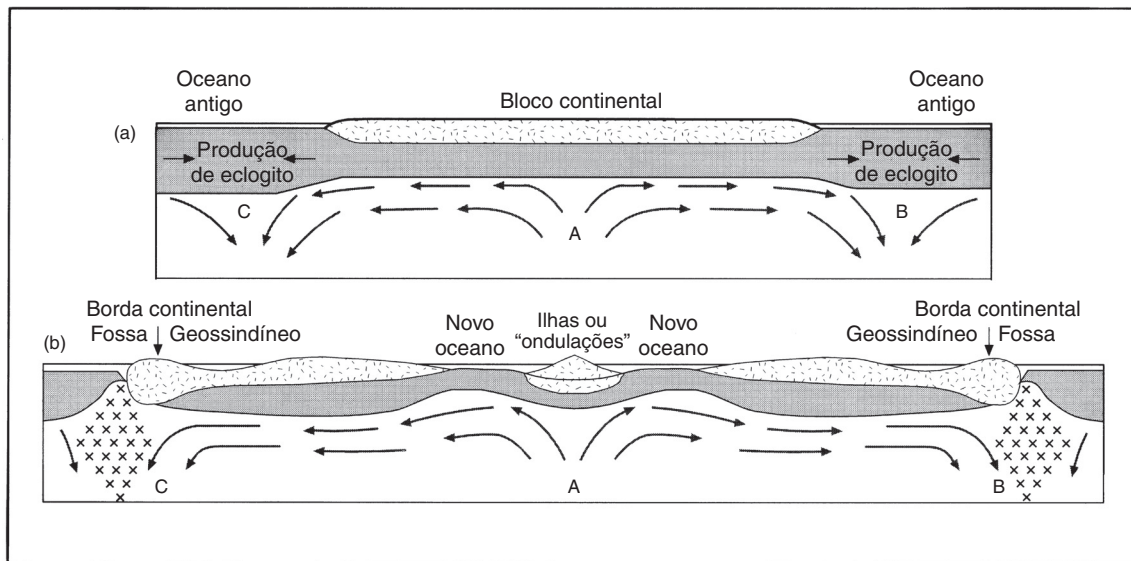


Figura 1.4 O conceito de convecção como sugerido por Holmes (1928), quando se acreditava que a crosta oceânica era uma continuação espessa da “camada basáltica” continental. (a) Correntes ascendentes em A espalham-se lateralmente, colocando um continente sob extensão e dividindo-o, fazendo com que a obstrução do antigo assoalho do oceano possa ser superada. Isso é efetivado pela formação de eclogito em B e C, onde correntes subcontinentais encontram subcorrentes oceânicas e se curvam para baixo. A alta densidade do eclogito faz com que ele afunde e abra espaço para os continentes avançarem. (b) O afundamento do eclogito em B e C contribui para a principal circulação convectiva. O eclogito se funde no fundo para formar magma basáltico, que sobe em correntes ascendentes em A, cicatrizando as lacunas no continente fragmentado e formando um novo assoalho oceânico. Ondulações locais, como uma ilha de gelo, podem ser formadas a partir de velhos SIAL deixados para trás. Pequenos sistemas de corrente, iniciados pela flutuabilidade do magma basáltico, ascendem sob os continentes e alimentam derrames de basaltos ou, abaixo do “velho” assoalho do oceano (Pacífico), alimentando os derrames responsáveis pelas ilhas vulcânicas e montes submarinos (adaptado de Holmes, 1928).

movimentos verticais da crosta continental nos estudos de processos repetitivos de soerguimento, erosão, subsidência e sedimentação. Mas, como disse J. Tuzo Wilson, um geofísico canadense, isso é como olhar para o convés de um navio para ver se ele está se movendo.

1.2 A EXPANSÃO DOS ASSOALHOS OCEÂNICOS E O NASCIMENTO DA TECTÔNICA DE PLACAS

Se existe a possibilidade de que as áreas continentais tenham estado juntas, se partido e se distanciando, então deve haver algum registro disso dentro de bacias oceânicas. No entanto, somente após a Segunda Guerra Mundial e, mais especificamente, desde 1960, foram obtidos dados suficientes a partir dos 60% da superfície da Terra coberta por águas profundas para a compreensão da origem e história das bacias oceânicas. Percebe-se que, em contraste com os continentes, as áreas oceânicas são muito jovens geologicamente (provavelmente não superiores a 200 Ma de idade) e que movimentos horizontais ou laterais têm sido importantes durante a história de sua formação.

Em 1961, após um levantamento intensivo do fundo do mar durante o pós-guerra, R.S. Dietz propôs o mecanismo de “expansão dos assoalhos oceânicos” para explicar o afastamento continental. Embora Dietz tenha cunhado o termo “expansão dos assoalhos oceânicos”, o conceito foi concebido um ou dois anos antes por H.H. Hess. Ele sugeriu que os continentes se movem em resposta ao crescimento das bacias oceânicas entre eles e que a crosta oceânica é criada a partir do manto da Terra na crista do sistema de dorsal meso-oceânica, em um intumescimento ou elevação vulcânica submarina ou em um soerguimento que ocupa uma posição mediana em muitos dos oceanos do mundo (Fig. 1.5). A crosta oceânica é muito mais fina do que a crosta continental, com uma espessura média de cerca de 7 km, enquanto a espessura média continental tem cerca de 40 km, além de ser quimicamente diferente e estruturalmente muito menos complexa.

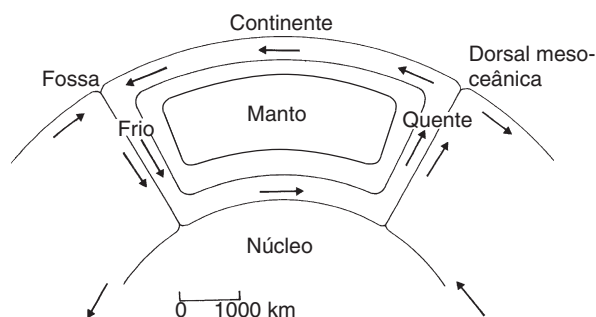


Figura 1.5 O conceito de expansão dos assoalhos oceânicos (segundo Hess, 1962).

Acreditava-se que o movimento lateral da crosta oceânica era conduzido por correntes de convecção no manto superior semelhantes a uma correia transportadora. A fim de manter a área da superfície da Terra constante, propôs-se ainda que a crosta oceânica era empurrada de volta para dentro do manto e reabsorvida em fossas oceânicas. Estas são vastas depressões batimétricas, situadas às margens de certos oceanos e associadas com intensa atividade vulcânica e sísmica. Por essa perspectiva, os continentes são elementos totalmente passivos – jangadas de material menos denso que são separadas e unidas pelos assoalhos oceânicos efêmeros. Os continentes são uma espuma de material geralmente muito mais velho que foi derivado ou separado do interior da Terra ou em uma fase muito precoce da sua história ou, pelo menos em parte, de forma constante ao longo do tempo geológico. Em vez de blocos da crosta, agora pensamos em termos de “placas” de manto superior e crosta relativamente rígidos, em torno de 50-100 km de espessura, as quais chamamos de litosfera (um termo originalmente cunhado por R. A. Daly há muitos anos e que significa “camada de rocha”). Placas litosféricas podem ter ambas as crostas continental e oceânica embutidas entre si.

A teoria sobre a expansão do assoalho do oceano foi confirmada entre 1963 e 1966, seguindo a sugestão de F. J. Vine e D. H. Matthews, segundo a qual os lineamentos magnéticos do fundo do mar podem ser explicados pela expansão dos assoalhos oceânicos e pela reversão do campo magnético da Terra (Seção 4.1). Este modelo de correia transportadora da crosta oceânica é visto como um gravador que registra a história das inversões do campo magnético da Terra.

Outro conceito que levou ao desenvolvimento da teoria da tectônica de placas veio com o reconhecimento, por J. T. Wilson, em 1965, de uma nova classe de falhas, denominadas falhas transformantes, que conectam cinturões lineares de atividade tectônica (Seção 4.2). A Terra era então vista como um mosaico de seis grandes placas e de outras placas menores em movimento relativo. A teoria foi posta sobre uma base geométrica rigorosa pelo trabalho de D. P. McKenzie, R. L. Parker e W. J. Morgan entre 1967 e 1968 (Capítulo 5) e confirmada por sismologia de terremoto pelo trabalho de B. Isacks, J. Oliver e L. R. Sykes.

A teoria tem sido consideravelmente ampliada por estudos intensivos dos processos geológicos e geofísicos que afetam as margens das placas. Provavelmente, o aspecto sobre o qual existe atualmente mais discórdia é a natureza do mecanismo que provoca os movimentos das placas (Capítulo 12).

Embora a teoria básica da tectônica de placas esteja bem estabelecida, seu entendimento não é completo. A investigação sobre a evolução das placas tectônicas ainda ocupará os cientistas da Terra por muitas décadas.

1.3 A TEORIA GEOSSINCLINAL

Antes da aceitação da tectônica de placas, o modelo estático da Terra envolvia a formação de faixas tectonicamente ativas, as quais se formaram essencialmente por movimentos verticais sobre os geossinclíneos. Uma revisão sobre o desenvolvimento da hipótese geossinclinal e sua explicação em termos de placas tectônicas são fornecidas por Mitchell & Reading (1986).

A teoria geossinclinal prevê faixas alongadas, geograficamente fixas, de subsidência profunda e sedimentos espessos como os precursores de cadeias de montanhas nas quais os estratos foram expostos por dobramento e elevação dos sedimentos geossinclinais (Dickinson, 1971). Uma infinidade de termos específicos foi criada para descrever as associações litológicas de preenchimentos sedimentares e as localizações relativas dos geossinclíneos.

A maior falha da teoria geossinclinal foi que as características tectônicas foram classificadas sem que houvesse compreensão da sua origem. A nomenclatura geossinclinal, conseqüentemente, representou um entrave para o reconhecimento de um mecanismo causador comum. A relação da sedimentação com o mecanismo mobilístico das placas tectônicas (Mitchell & Reading, 1969) permitiu o reconhecimento de dois ambientes específicos nos quais os geossinclíneos se formaram, ou seja, as margens continentais falhadas ou abandonadas e as margens continentais ativas ou principais de falhas profundas, do oceano em sentido ao continente. Estas últimas são agora conhecidas como zonas de subducção (Capítulo 9). Embora alguns autores mantenham a terminologia geossinclinal para descrever associações sedimentares (por exemplo, termos como eu-geossinclíneo e miogeossinclíneo para sedimentos com e sem membros vulcânicos, respectivamente), este uso não é recomendado, e o termo geossinclíneo não deve ser reconhecido mais como relevante para os processos de placas tectônicas.

1.4 O IMPACTO DA TECTÔNICA DE PLACAS

A tectônica de placas tem grande significado, uma vez que representa a primeira teoria que fornece uma explicação unificada das principais características da superfície da Terra. Como tal, tem permitido uma inédita ligação de muitos aspectos diferentes da geologia que tinham sido considerados, previamente, como independentes e não relacionados. Um entendimento mais aprofundado da geologia tem surgido a partir da interpretação de muitos ramos da geologia no quadro básico fornecido pela tectônica de placas. Assim, por exemplo, explicações podem ser fornecidas para as distribuições de flora e fauna do passado, as relações espaciais de suítes vulcânicas em margens de placas, a distribuição

no espaço e no tempo das condições de diferentes fácies metamórficas, o esquema de deformação em cadeias de montanhas, ou orógenos, e a associação de diferentes tipos de depósitos econômicos.

O reconhecimento da natureza dinâmica da Terra aparentemente sólida levou à constatação de que os processos da tectônica de placas podem ter tido um impacto importante em outros aspectos do sistema da Terra no passado. Mudanças na atividade vulcânica em geral, e em especial nas cadeias mesoceânicas, teriam mudado a química da atmosfera e da água do mar. Mudanças na taxa de acreção em cadeias mesoceânicas poderiam explicar as principais mudanças do nível do mar no passado e as configurações variáveis dos continentes, e o soerguimento de cadeias de montanhas deve ter afetado as circulações oceânica e atmosférica. A natureza e as implicações dessas mudanças, especialmente para o clima da Terra, são exploradas no Capítulo 13.

Algumas dessas implicações foram documentadas por Wegener, em especial em relação à distribuição da fauna e da flora no passado e a paleoclimas regionais. Hoje, percebe-se que processos de placas tectônicas impactam a física e a química da atmosfera e dos oceanos, bem como a vida na Terra em muitas outras maneiras, ligando, portanto, os processos atmosféricos, oceânicos e da Terra sólida em um único sistema dinâmico global.

O fato de o conceito de placas tectônicas ser tão bem sucedido em unir tantos aspectos da ciência da Terra não é suficiente para considerá-lo perfeitamente compreendido. Na verdade, é o teste crítico das implicações da teoria das placas tectônicas que levou a modificações e extrapolações, por exemplo, na consideração da relevância dos processos da tectônica de placas em áreas continentais (Seção 2.10.5) e do passado geológico mais remoto (Capítulo 11). Espera-se que a teoria das placas tectônicas seja empregada com cautela e crítica.

LEITURA ADICIONAL

- Hallam, A. (1973) *A Revolution in the Earth Sciences: from continental drift to plate tectonics*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- LeGrand, H.E. (1988) *Drifting Continents and Shifting Theories*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Marvin, U.B. (1973) *Continental Drift: the evolution of a concept*. Smithsonian Institution, Washington, DC.
- Oreskes, N. (1999) *The Rejection of Continental Drift: theory and method in American Earth Science*. Oxford University Press, New York.
- Oreskes, N. (ed.) (2001) *Plate Tectonics: an insider's history of the modern theory of the Earth*. Westview Press, Boulder.
- Stewart, J.A. (1990) *Drifting Continents and Colliding Paradigms: perspectives on the geoscience revolution*. Indiana University Press, Bloomington, IN.