

Introdução à Astronomia e à Astrofísica

Sobre o Tectonismo

Prof. Dr. Dietmar William Foryta

*Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Centro Politecnico, Caixa Postal 19044, 81531-990, Curitiba, Paraná, Brasil**

A partir da idéia de como se formam os planetas, pela aglomeração sucessiva de matéria, os fenômenos conhecidos como tectonismo e vulcanismo serão consequências naturais. Discutir-se-á como estes fenômenos “surgem” e o que decorre destes para mostrar que estes realmente existem durante a observação da Natureza a nossa volta. Aqui não pretende-se seguir a história da descoberta destes fenômenos, mas analisar as consequências de outro estudo, a idéia da formação de planetas, e como poderiam ser testadas. Parte destes testes são exequíveis em ambiente escolar.

Keywords: Superfície Planetária: Evolução Geológica;
Superfície Planetária: Tectonismo;
Superfície Planetária: Vulcanismo;

1	Os Primórdios do Planeta	1
2	A Solidificação da Superfície	2
3	A Evolução da Superfície	2
4	A Formação do, possível, Oceano	5
5	O Tectonismo: Fissuras	7
6	Tectonismo: Subducção	9
7	A História dos Continentes	11
8	O Futuro do Sistema de Continentes	14

A existência das crateras da Lua implica na existência de colisões na superfície planetária. Todavia, como a superfície lunar apresenta diversas regiões com craterizações distintas, há-se a necessidade de se explorar com mais cuidado a idéia das colisões craterizadoras.

Como a craterização implica na colisão entre dois objetos, um deles o alvo e outro deles o

impactante, e sendo o impactante menor, muitas vezes, bem menor do que o impactado, a matéria do impactante é acrescida ao impactado. Caso o número de impactos seja grande, a massa do impactado, com o tempo, crescerá.

Daí surge a idéia de que os corpos planetários possam ter uma origem colisional. O corpos planetários seriam descendentes de sucessivas colisões que ocorreriam até que tenham atingido sua massa observada atualmente.

Claro que este cenário deve ser algo mais complicado, mas a grosso modo parece razoável a primeira vista. Analizemos este cenário.

1. Os Primórdios do Planeta

Se o número de quedas de corpos por unidade de tempo, então a transformação da energia potencial gravitacional em energia de movimento e a subsequente transformação, durante a colisão, em energia térmica, então a superfície planetária em formação deverá ter uma temperatura razoavelmente alta.

*Electronic address: foryta@fisica.ufpr.br;
URL: <http://fisica.ufpr.br/foryta>

Esta liberação terá diversas consequências. Sobre o corpo cadente, que bem provavelmente deverá ser constituído por diversos materiais, que serão classificados como materiais voláteis e não voláteis, sofrerá também o aquecimento. Os materiais voláteis volatilizar-se-ão e os materiais não-voláteis poderão ser liquefeitos.

Os materiais tipicamente conhecidos como voláteis são a água, o dióxido e o monóxido de carbono, amônia, metano, só para citar os mais comuns. Estes materiais que foram volatilizados expandiram-se e caso cheguem em regiões frias o suficiente poderão novamente se liquefazer ou se solidificar. Mas na superfície quente do planeta em formação não há regiões frias. Assim o material volátil permanecerá em seu estado gasoso. Como existe a gravidade do corpo planetário e se esta for grande o suficiente, os gases formarão um envólucro que será chamado de atmosfera primordial.

O material, classificado como não-volátil, os refratários, poderão se evaporar durante a colisão, nela própria, mas o ambiente atmosférico não é aquecido o suficiente para manter este material na forma de vapor ou de gás. Assim, este material rapidamente cairá sobre a superfície do corpo planetário.

Já o material constituinte da superfície planetária é tipicamente de origem refratária e com a liberação de energia poderá se liquefazer e também, localmente, evaporar. O material evaporado cairá novamente e fará parte da superfície planetária. Na época em que ocorrem um grande número de colisões em pouco tempo, a superfície planetária terá uma grande taxa de liberação de energia e portanto terá sua superfície liquefeita.

Assim o corpo planetário em formação seria um corpo cuja superfície seria extremamente quente, liquefeita, envolta por uma atmosfera, dita primordial, que será, bem provavelmente, extremamente densa.

2. A Solidificação da Superfície

Com o passar do tempo, a taxa de colisões com a superfície planetária irá diminuir. Isto decorre pelo fato do reservatório de corpos impactantes começar a exaurir paulativamente. Assim a taxa de liberação de energia decresce e a temperatura superficial do planeta, agora já formado em termos de sua massa, também decresce. Decrescendo a temperatura superficial, o material liquefeito começará a chegar a temperaturas de solidificação.

Entretanto a variação da temperatura não é muito rápida e a superfície solidificando-se será portanto fina e sujeita às forças que porventura estejam presentes. Diversas fontes de forças podem atuar na superfície solidificante ainda fina.

Forças de marés, caso a Lua já esteja presente, os impactos, agora “esporádicos”, e do movimento do material, ainda liquefeito na subsuperfície, são suficientes para fazer rachar a superfície e o material liquefeito da subsuperfície extravasar-se-á sobre a superfície solidificando-se.

Assim, com o tempo a superfície sólida ficará mais espessa. Mas este processo de espessamento é extremamente lento pois o material “sólido” entre a subsuperfície e a superfície poderá liquefazer-se parcialmente.

3. A Evolução da Superfície

As forças que antes faziam rachar a superfície solidificante, com o contínuo espessamento deixarão de rachar a superfície, mas continuarão a atuar sobre esta superfície cuja espessura cresce.

Os impactos, agora cada vez mais esparsos, produzem crateras que poderão ser, eventualmente, observadas no futuro.

As forças de marés, caso a Lua esteja presente, continuarão agindo mas resultando somente

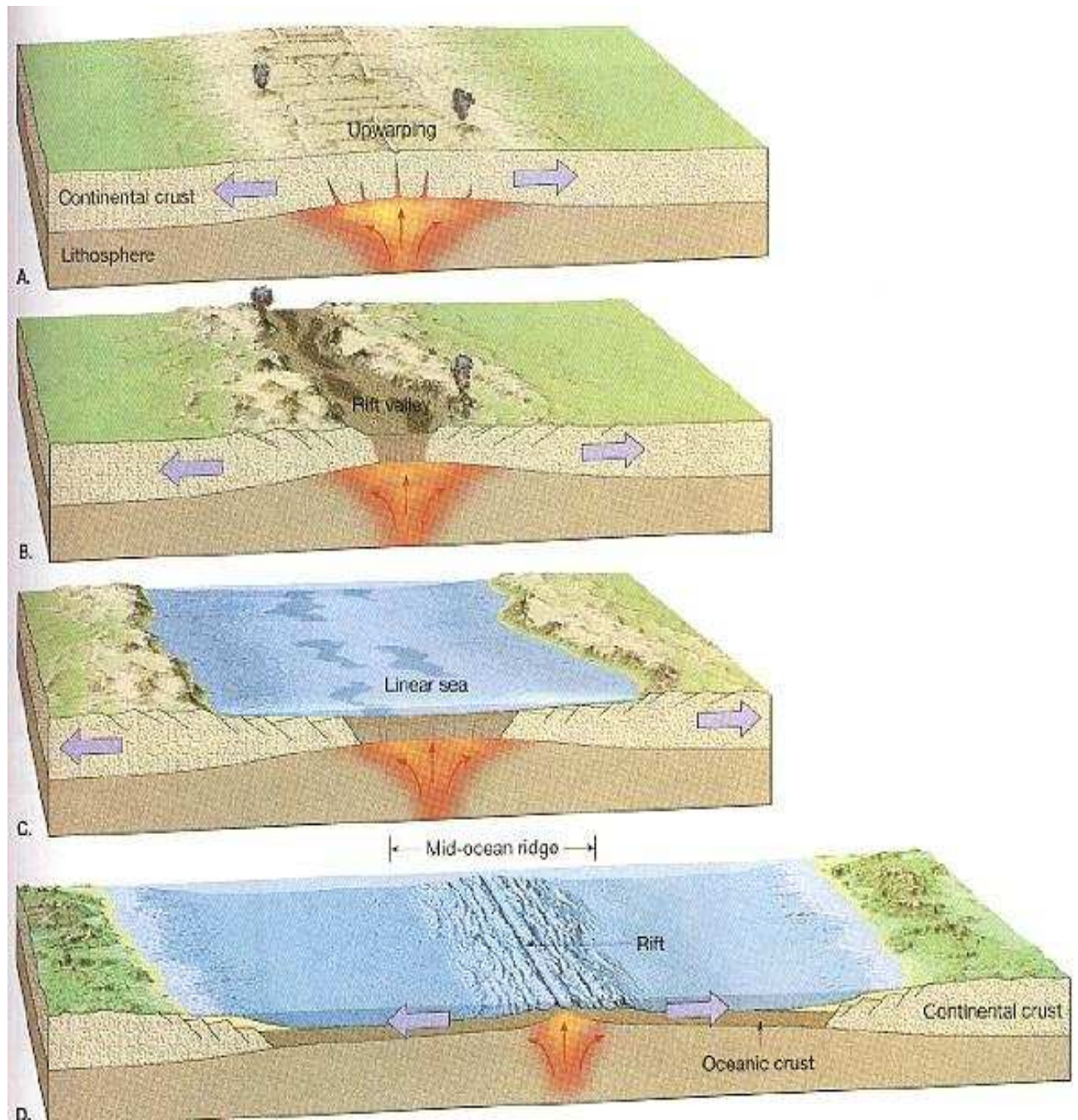


Figura 1 Como o material subsuperficial força a crosta sólida que forma a superfície, o material superficial pode romper-se e fissionar-se. A medida em que a forçagem continua ocorre a separação entre as regiões anteriormente próximas. Esta separação poderá ser preenchida pelo oceano próximo e com o tempo poderá tornar-se ela própria um oceano. É o caso do Oceano Atlântico.

numa fonte de calor, tornando o processo de resfriamento muito mais demorado.

E os movimento do material interno liquefeito continuarão atuando sobre a superfície formando elevações e tensões. mas não dei-

xará ocasionalmente de ocorrer rachaduras por onde poderá extravazar material liquefeito.

Os fenômenos que passaremos a detalhar são justamente decorrentes do material ainda li-

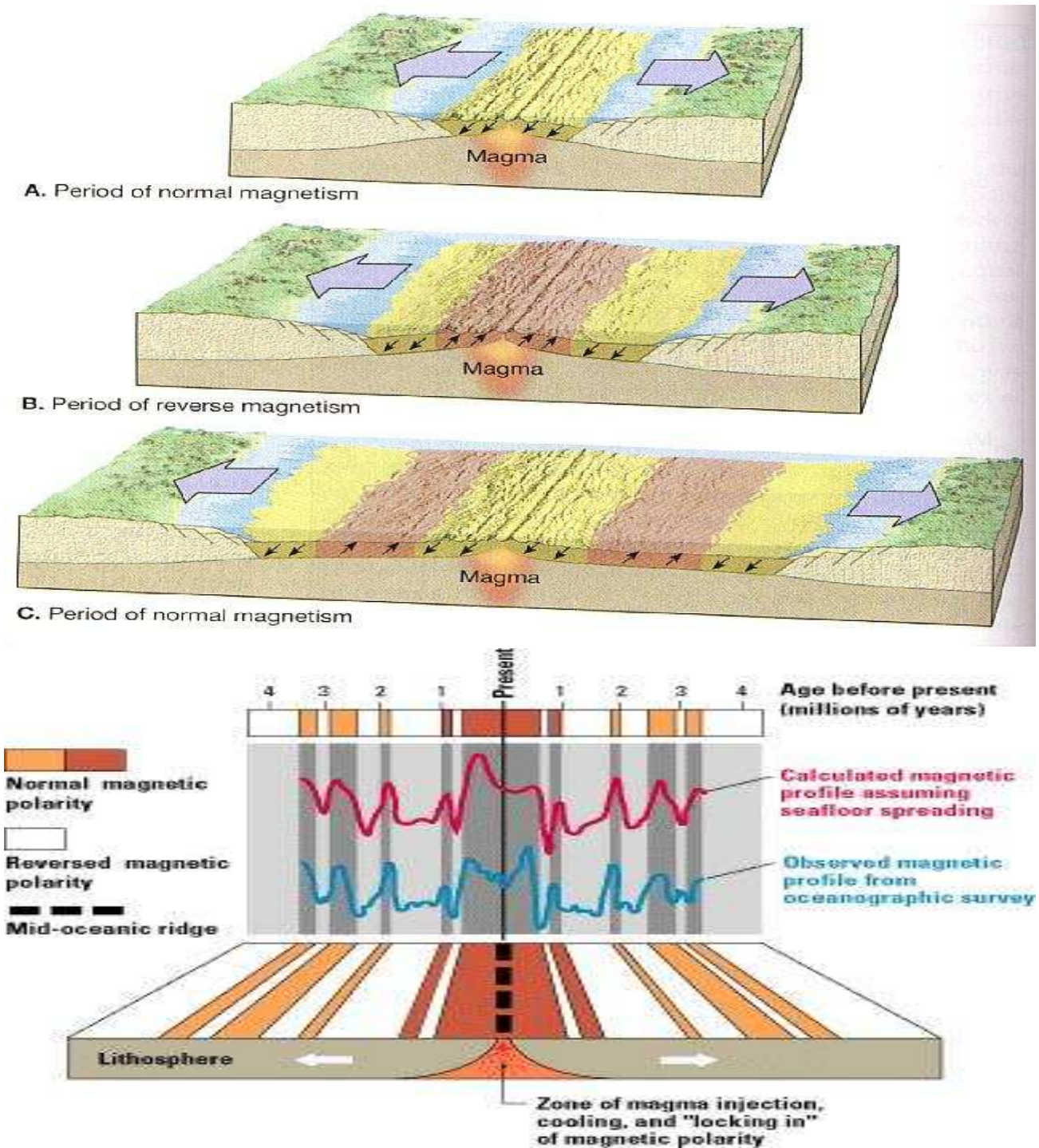


Figura 2 A forçagem do material subsuperficial atuando verticalmente produz uma fissura que é frequentemente preenchida de material que se solidifica. Esta posteriormente fissiona-se novamente e novamente. Com o processo contínuo a fissura alarga-se separando regiões anteriormente próximas distanciando-as. Como o material que se solidifica está sob a influência do campo magnético terrestre ele guardará o estado do campo magnético. Amostragens próximas e cada vez mais distantes da região da fissura colocam em evidência a existência de inversões magnéticas na história da Terra.

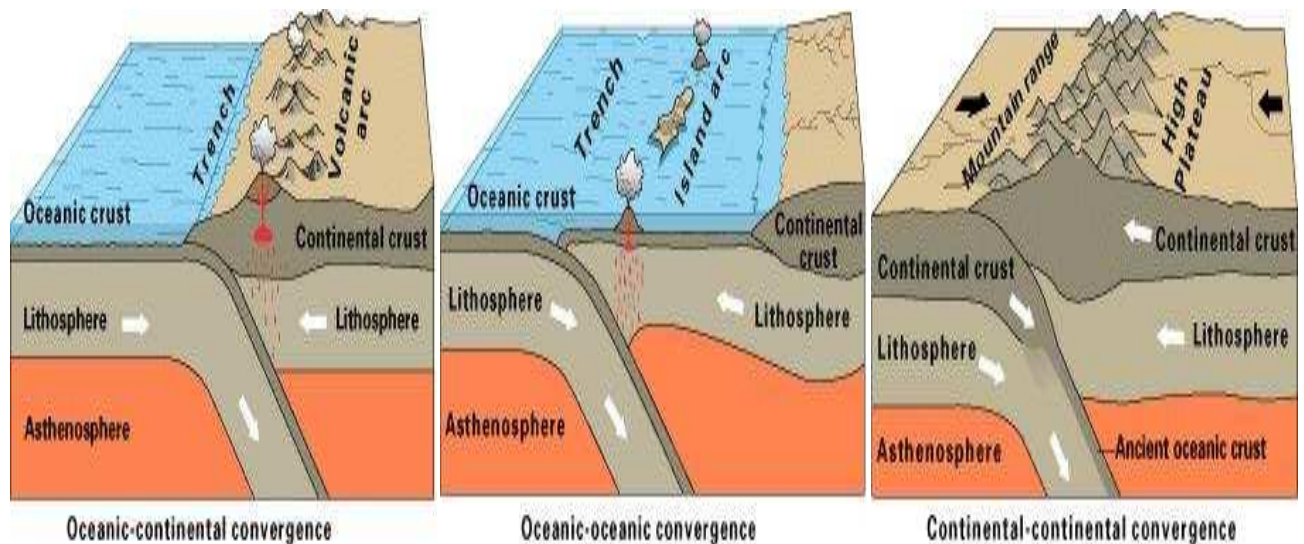


Figura 3 Quando duas placas tectônicas colidem, uma das placas mergulha sobre a outra. A placa que fica passando sobre a outra pode ou não enrugar-se. Caso ocorra o enrugamento ocorre a formação de um sistema montanhoso. Mas independente do enrugamento ou não, o mergulho de uma placa sob a outra gera energia térmica e portanto a formação de sistemas vulcânicos. Assim caso a placa não se enrugue, pelo menos na sua borda, e na presença de uma área oceânica, formar-se-ão uma frente de ilhas vulcânicas.

quefeito presente na subsuperfície e como estes fazem evoluir a superfície.

4. A Formação do, possível, Oceano

A superfície solidificada tem uma temperatura que com o passar do tempo começará ser cada vez menor. Como ainda ocorrem quedas de corpos e portanto a liberação de voláteis, junto com os voláteis ainda presentes da atmosfera primordial, em ambiente de menor temperatura poderão se condensar e cair sobre a superfície, formando as primeiras chuvas.

Como a atmosfera tem pouco massa então sua temperatura deverá ser menor do que a superfície ela própria. Isto permite a condensação de voláteis mas não garante que estes voláteis condensados permaneçam condensados. Caso a superfície tenha uma temperatura superficial compatível com o estado liquefeito do volátil, este permanecerá líquido e assim formar-se-ão os primeiros regatos e lagos.

Caso a quantidade de voláteis, compatíveis com a temperatura superficial, seja grande o suficiente, estes lagos poderão crescer e formar mares e mesmo oceanos.

Isto ocorrendo implicará não somente na interação química entre os voláteis da atmosfera com a superfície mas também através de uma interação em fase líquida. O volátil mais importante que começa a atuar é a água. A água dilui certos materiais e a evolução química começa a se processar.

Esta evolução química produz uma transformação química mais extensa sobre a superfície pois a superfície planetária continuará em constante transformação. Como o material subsuperficial continua a forçar a superfície, esta irá continuar a se moldar perante estas forças. Estas forças produzem tensões e pressões. Parte da superfície poderá ser erguida e os lagos e oceanos localmente presentes serão deslocados expondo áreas que foram transformadas quimicamente. Estas áreas expostas passam a interagir com a atmosfera

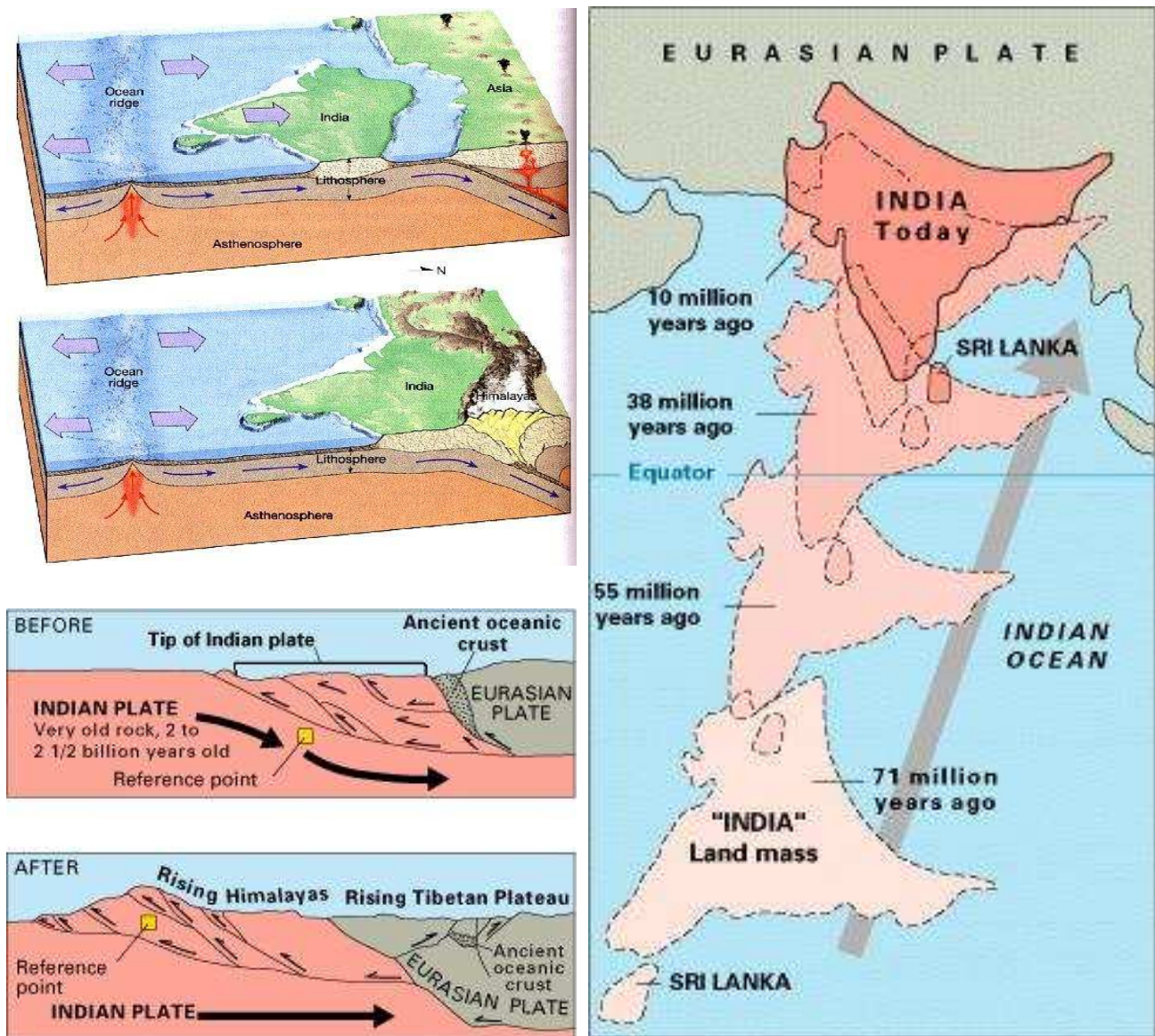


Figura 4 O movimento da placa tectônica que contém a Índia na direção da placa tectônica da Europa e Ásia significou a colisão entre estas e que provocou a elevação da região entre as placas formando-se assim a Cordilheira do Himalaia. Portanto as montanhas do Himalaia continuarão elevando-se com o passar do tempo.

também quimicamente produzindo um fluxo de transformações químicas.

Parte destas transformações químicas resultará em uma absorção de material gasoso reduzindo em princípio a massa atmosférica. Claro que ainda ocorrerá a emissão de voláteis pelos impactos e pelos voláteis talvez ainda presentes no material superficial e subsuperficial, mas a atmosfera estará evoluindo quimi-

camente. Esta atmosfera que está evoluindo não é mais a mesma atmosfera que existia no final da formação do planeta, a atmosfera primordial. Assim a atmosfera será dita secundária.

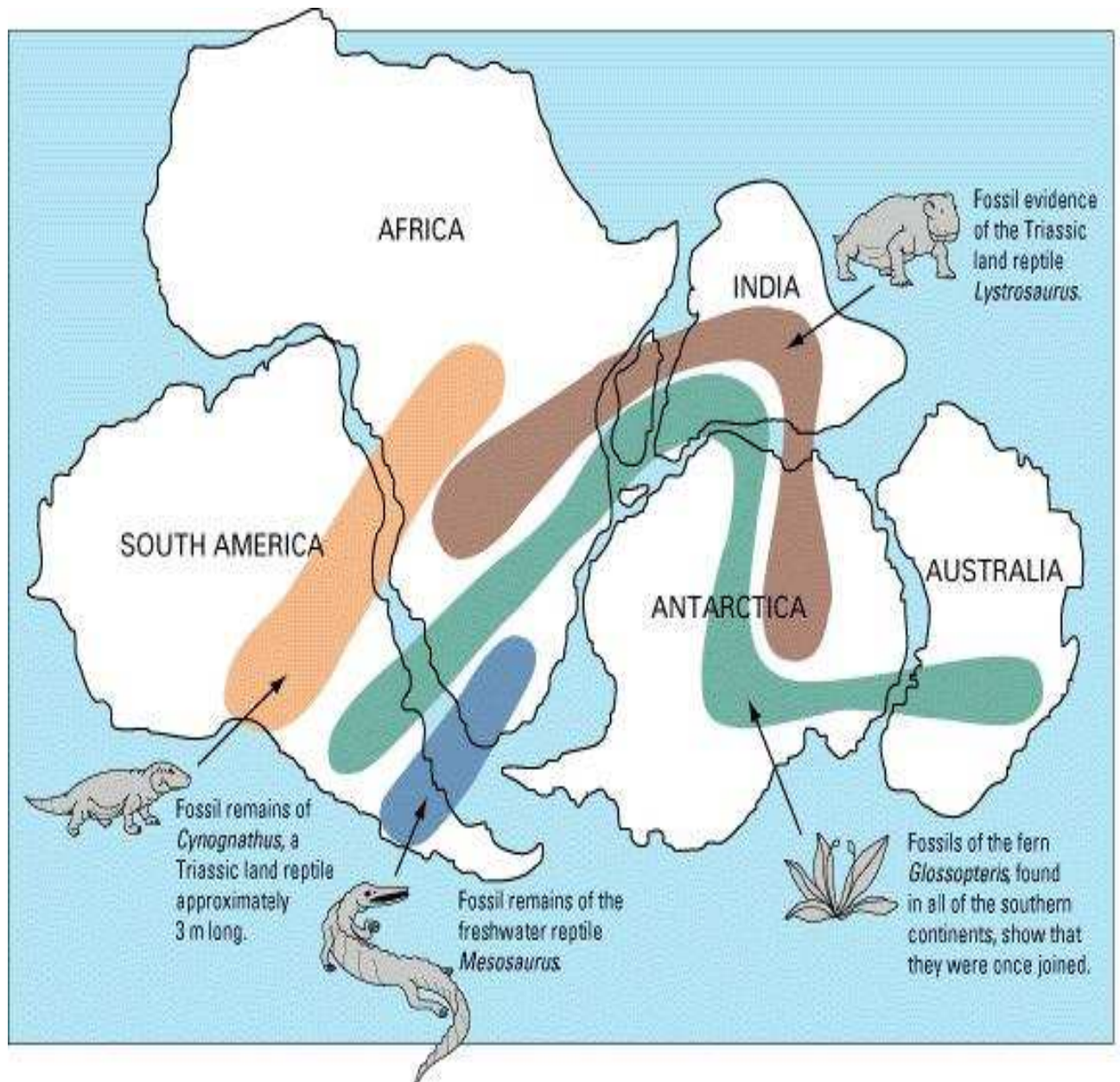


Figura 5 A idéia do movimento tectônico das massas terrestre pode ser verificada considerando que caso haja o movimento massas que eventualmente estiveram próximas afastam-se gradativamente. Assim, caso este fenômeno tenha realmente ocorrido regiões próximas, com características semelhantes serão encontradas, tempos depois, em locais distantes. Mas podendo identificar estas amostras, e.g., fósseis, pode-se correlacionar as regiões que foram afastadas.

5. O Tectonismo: Fissuras

A forçagem da superfície poderá resultar ocasionalmente em rachaduras da superfície, e por estas rachaduras da superfície, o extravazamento de material subsuperficial, que não é

exatamente liquefeito nem sólido, chamemos esta região subsuperficial de manto. Quando o material do manto atinge a superfície este solidifica-se fazendo com que a rachadura seja tampada e em relação ao estado anterior à rachadura, mais material estará presente. Assim

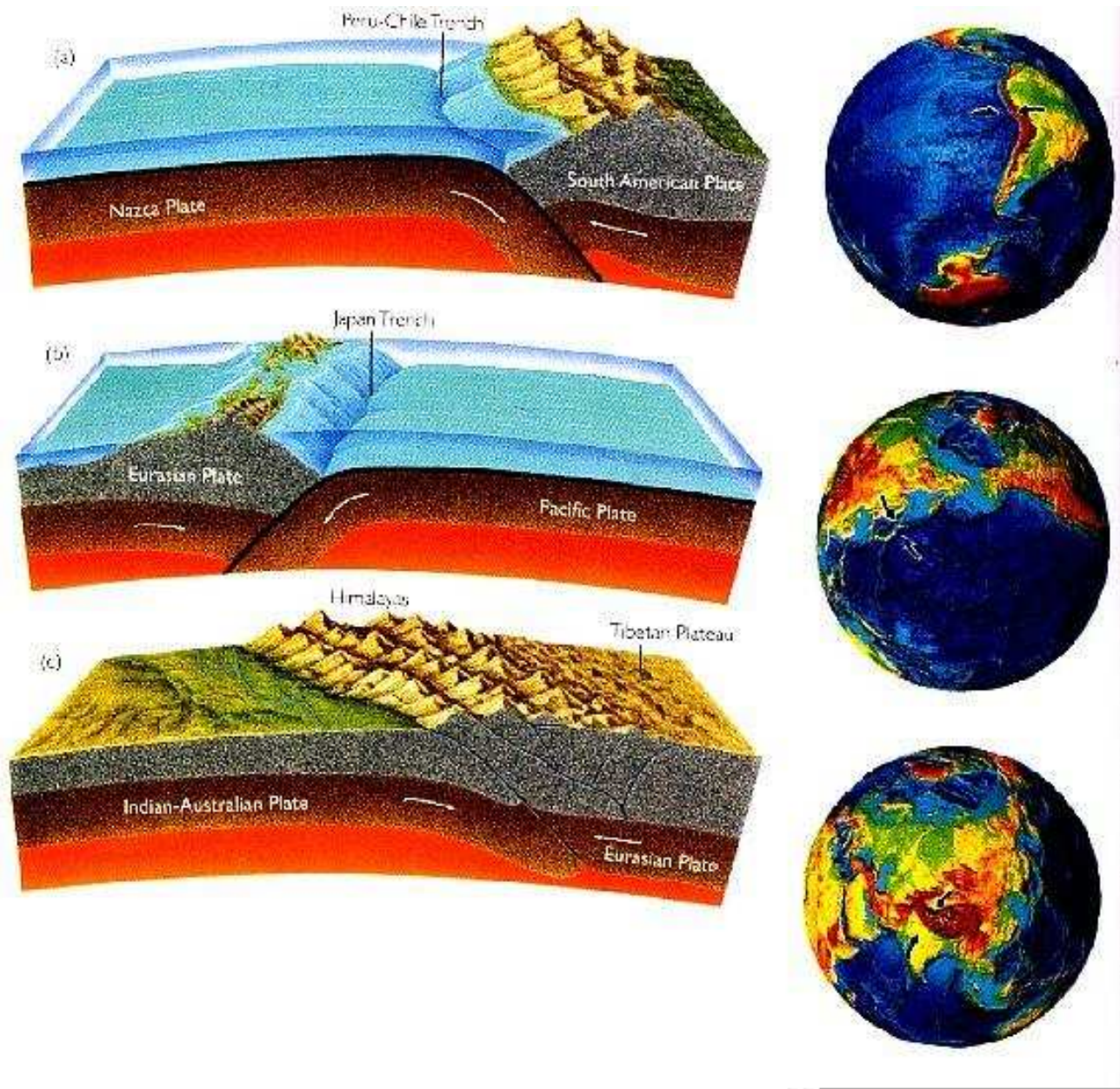


Figura 6 *Exemplos atuais das colisões tectônicas. Observe no diagrama esquemático a formação de fendas submarinas extremamente profundas. Estas fendas existem, são conhecidas e estão associadas aos fenômenos de subducção.*

a rachadura tenderá a forçar “para as laterais” o material sólido da superfície.

Um sistema de rachaduras no material sólido delineará regiões sólidas, estas regiões sólidas chamam-se placas, devida sua espessura em relação ao sua extensão global. Como estas placas tenderão a se mover, chamemos este fenômeno natural de tectonismo.

Com a forçagem do movimento das placas tectônicas, placas serão empurradas sobre placas, surgindo tensões nas regiões de contato entre as placas adjacentes.

Imaginemos duas placas sendo forçadas uma de encontro com a outra. É como empurrar lentamente duas folhas de papel uma contra a outra. As bordas poderão ambas se elevar. Uma

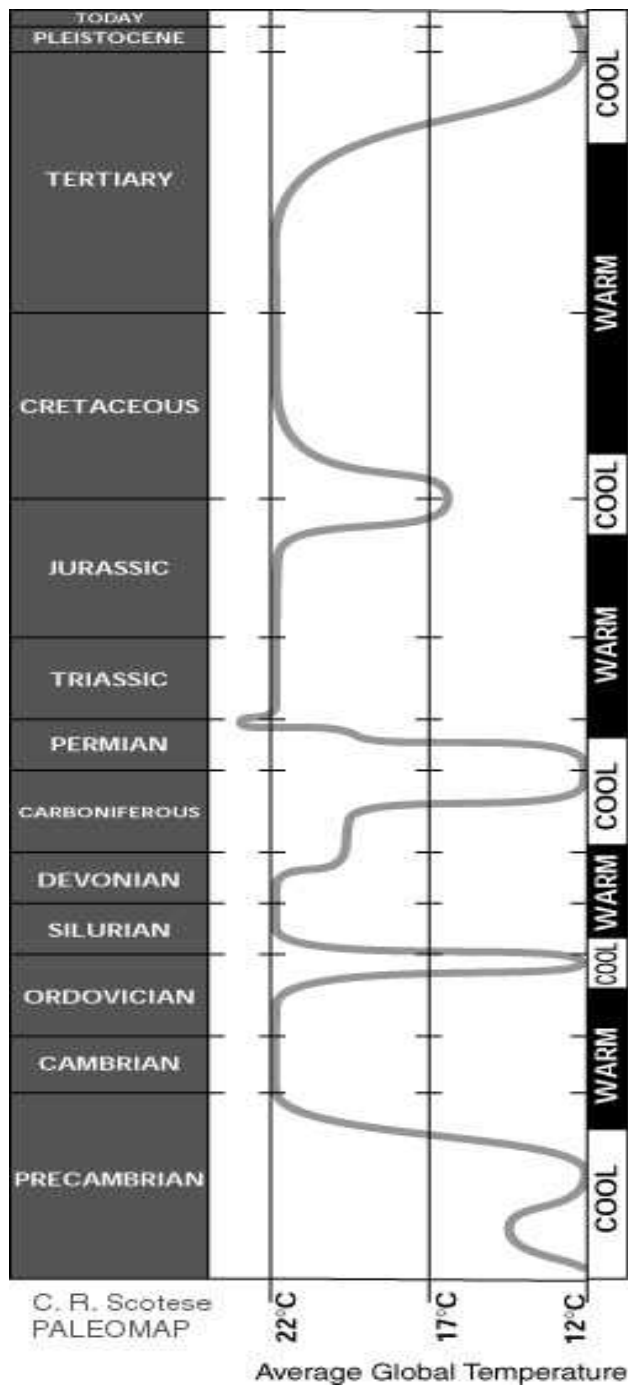


Figura 7 A temperatura global do planeta varia. Estamos num período relativamente frio da história geológica.

das bordas poderá passar por baixo da outra. Uma das bordas dobra-se sobre a outra. Enfim uma variedade de possibilidades poderão ocorrer.

por Dietmar William Foryta

6. Tectonismo: Subducção

Caso uma das placas passe por baixo da outra, chamemos isto de subducção, esta irá mergulhar sobre a região do manto que está a uma temperatura grande. Assim, o material que está sólido terá sua temperatura elevada podendo chegar ao ponto de liquefação. O material da placa tectónica será portanto reprocessado em material do manto. Como o material da placa passou por uma evolução química, seja ela aquosa seja ela gasosa, o material volátil será transportado diretamente à região do manto planetário, enriquecendo pelo menos na região próxima a subducção de voláteis.

Este processo de mergulho de uma material ainda sólido sob um material também sólido é análogo a fazer raspar duas lixas uma pela outra. Este movimento será então cheio de trepidações quando os encontros das irregulares ocorrerem e forem vencidos. Estas trepidações com dimensões de centenas de quilómetros implicarão em liberação de uma grande quantidade de energia que se transformará em movimento, os terremotos.

Assim pode-se concluir que nas regiões de subducção deverão existir terremotos, e os pontos de rompimento, os epicentros dos terremotos deverão estar delineando a interface entre as duas placas tectónicas.

A placa que passa por cima da placa subductada poderá seja escorregar simplesmente sobre a outra placa ou dobrar sobre a outra. Quando a colisão implicar no dobramento ou no enrugamento da placa que passa por cima da subductada, o material eleva-se verticalmente, formando assim regiões altas, que conhecemos como cordilheiras.

Assim podemos também concluir que as regiões de cordilheiras podem estar associadas a regiões de subducção. É claro que nem todos os complexos montanhosos estarão a priori associados a regiões de subducção, mas regiões de subducção bem provavelmente estarão associadas a formação de montanhas.

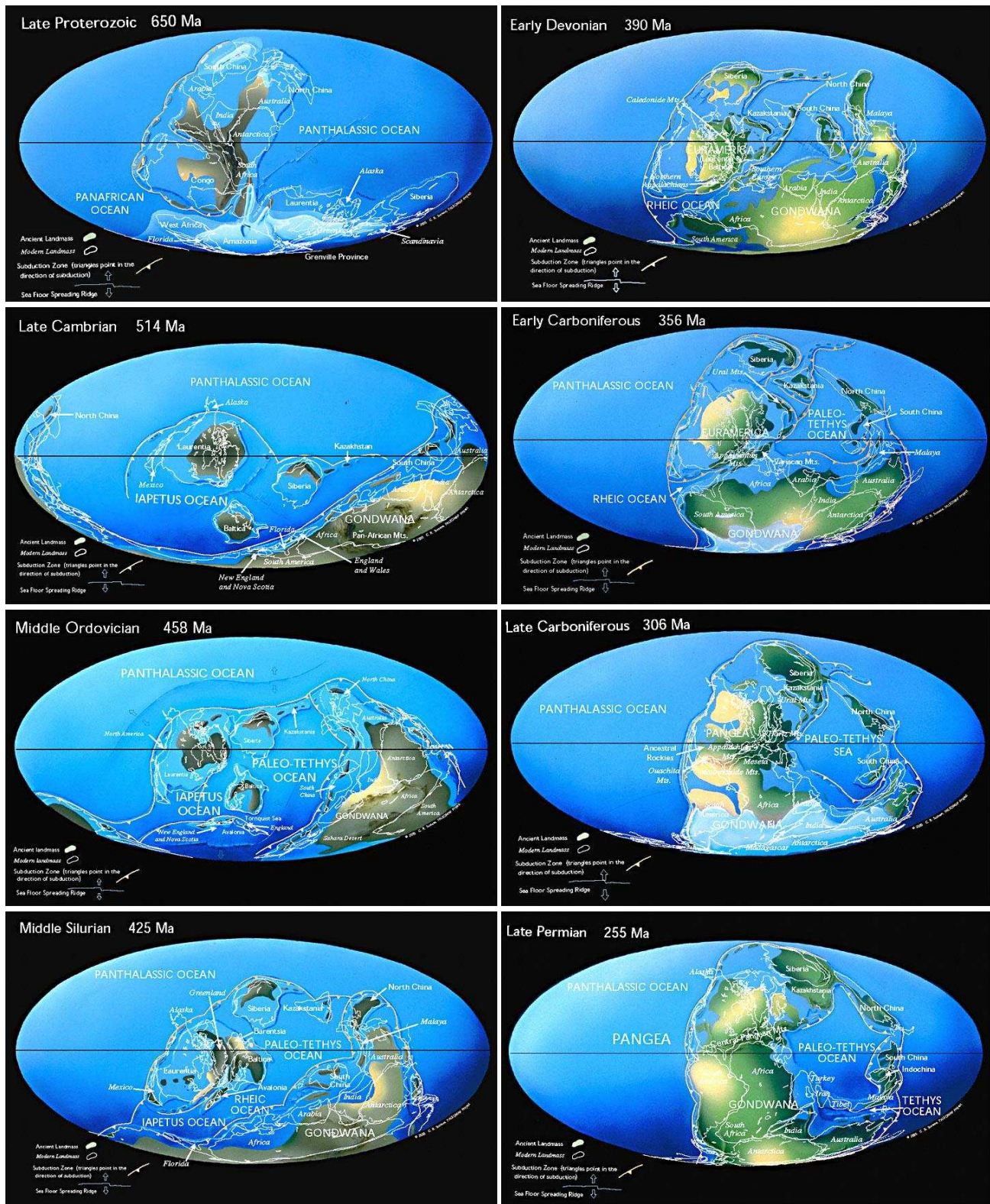


Figura 8 A compreensão do processo tectônico, subducção e fissuras, e de como testar sua validade, mapeamento de fósseis, permite imaginar como o “desenho” dos continentes evoluiu. Nestes diagramas tem-se a evolução desde 650 milhões de anos aos 255 milhões de anos antes do presente. Diagramas do Projeto PALEOMAP.

7. A História dos Continentes

Os sistemas tectônicos, fissuras e subducções, sugerem que os sistemas de continentes que se modificam formam ocasionalmente supercontinentes. Devida a falta de mais informações fósseis fica extremamente difícil determinar os mapas continentais mais antigos do que o período Pré-Cambriano, a uns 650 milhões de anos. Mas o que se estima é que deve ter existido um supercontinente, que se chama Rhodinia, em aproximadamente 1100 milhões de anos, que se partiu em dois continentes em 750 milhões de anos criando o Oceano Panthalassico.

Evidências indicam que houve neste período uma era do gelo extremamente intensa, que tomou completamente o planeta, onde todas as áreas terrestres parecem ter sido tomadas pelo gelo. Estas evidências deram margem a diversas idéias das mais complicadas possíveis, mas com o advento do conceito de supercontinentes uma explicação razoável parece surgir naturalmente. O supercontinente Rhodinia estaria em parte de sua extensão muito próxima a um dos pólos planetário. Assim a espessura de gelo poderia ser análoga a da atual Antártida sem a necessidade de se imaginar todos os oceanos terrestres congelados. Este período gelado terminaria com a quebra do supercontinente e a migração dos continentes para regiões mais amenas. A única exceção, ainda não explicada, é que existem evidências de gelo na Austrália que estaria próxima ao equador terrestre na ocasião.

No final de 600 a 550 milhões de anos, no final do período Pré-Cambriano, os continentes que havia colidido formando um supercontinente, que chamou-se Pannotia, começou a partir-se. Uma nova era começa e o Oceano Iapetus começa a crescer entre dois supercontinentes Laurentia (América do Norte, Norte da Europa e a Sibéria) e Gondwana, criado pela orogênese Pan-Africana, que se estendia do Equador ao Pólo Sul. Durante o período

Ordoviciano depósitos glaciais (arrastos de pedras por gelo) encontravam-se na região polar (África e América do Sul) e depósitos quentes (sal e limestone) na região equatorial (Austrália, Índia, China e Antártida).

Em meados do período Paleozóico, a aproximadamente 400 milhões de anos, o Oceano Iapetus que fechava-se trouxe a Laurentia e a região Baltica em colisão elevando diversas terras acima do nível oceânico. Neste mesmo período, um imenso sistema de subducções circundava completamente os continentes muito a semelhança do anel de fogo do Pacífico atual. E o Oceano Panthalassico cobria grande parte da face da Terra sobretudo o hemisfério norte. No período Devoniano é que as plantas começa a tomar as terras, e foram tão abundantes e formaram os primeiros depósitos de carvão nos pantanos tropicais, e que os peixes tornaram-se os maiores predadores.

No fim da Era Paleozóica, os oceanos que haviam sido abertos pela quebra de Pannotia foram totalmente consumidos formando agora o supercontinente Pangea, centrado no equador e estendendo-se de pólo a pólo. No final do Carbonífero e no início do Permiano, as regiões sul de Pangea estavam cobertas por um grande glaciar. E a região central de Pangea, montanhosa e chuvosa, concentrou a formação de depósitos carboníferos. Quando esta região foi empurrada para o norte e com a elevação de uma série de cadeias montanhosas a região equatorial formou um sistema de monções e cujas chuvas não mais atingiam o centro continental tornando-o desértico. Apesar do nome Pangeia significar uma massa continental somente, provavelmente ela não continha em uma única massa continental todas as terras emersas da época pela existência do Oceano Paleo-Tetis.

A segunda fase da quebra de Pangea inicia-se no Cretáceo, a 140 milhões de anos, onde Gondwana continua fragmentar-se pela formação do Oceano Atlântico e a Índia distanciando-se da Antártida cruzando o Oce-

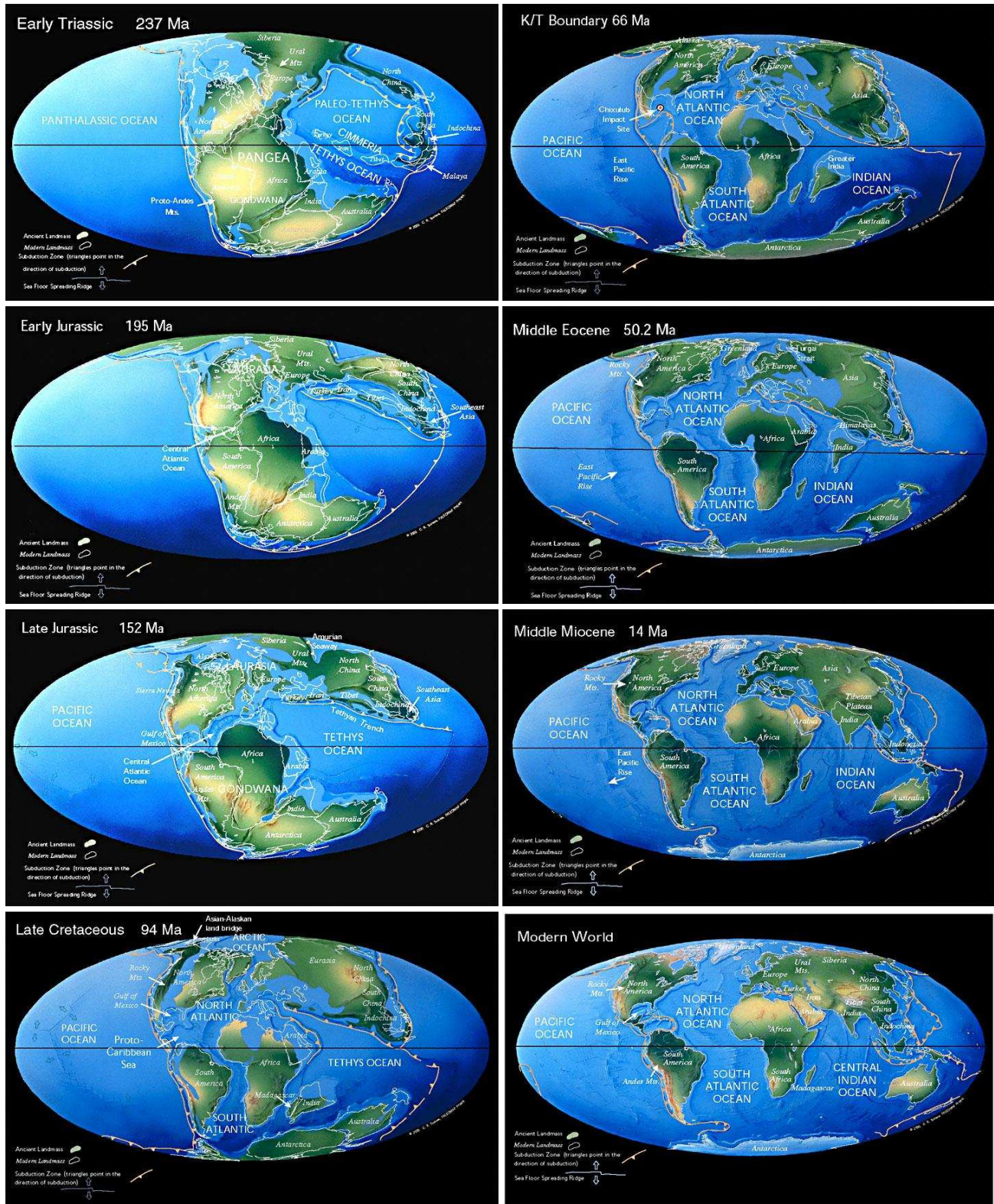


Figura 9 Continuação dos diagramas da figura 8 desde 237 milhões de anos ao presente. Diagramas do Projeto PALEOMAP.

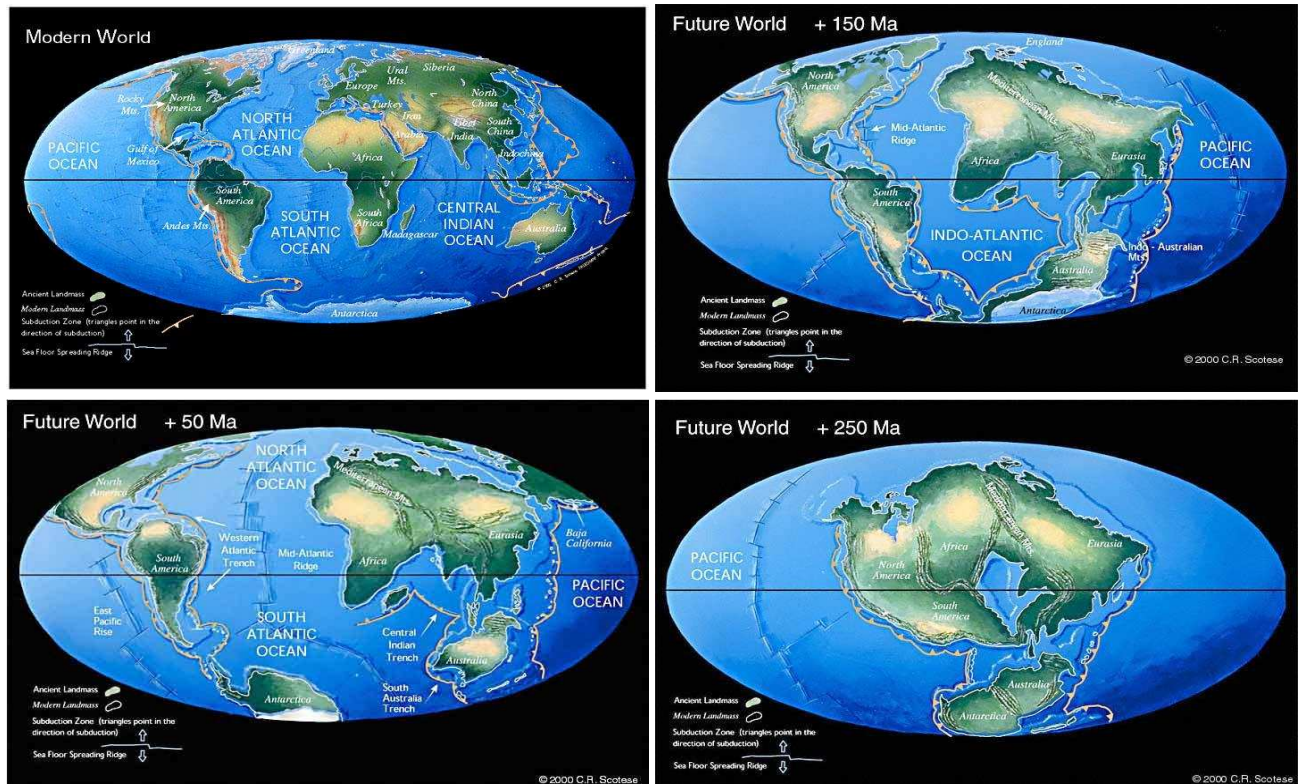


Figura 10 Como as “ferramentas de evolução geológica” puderam ser testadas, pode-se tentar estimar como será o futuro do sistema de continentes. Claro que a verificação deste resultado só poderá ser cabalmente testado aguardando-se o referido tempo. Diagramas do Projeto PALEOMAP.

ano Thetis, que se transformará no Oceano Índico. Globalmente o clima do período Cretáceo, tal como o Jurássico e o Triássico, eram muito mais quentes do que hoje, e encontravam-se dinossauros e palmáceas acima do círculo polar artico, bem como na Antártida. Isto é consequência da existência de séries de correntes marítimas, em oceanos 100 a 200 metros mais profundo, que transportavam calor para as regiões mais próximas do pólo.

A terceira e final fase de quebra de Pangea teve lugar no início do Cenozóico. A Índia está prestes a colidir com a Ásia e a Austrália desloca-se rapidamente para o norte. Duas fissuras surgem o “Mar Vermelho” e o atual sistema montanhoso africano. Como a Índia é um bloco litosférico muito sólido, depositado sobre um oceano também sólido, e a Ásia, em contrapartida, um conjunto de fragmen-

tos, estes deslocam-se para o norte fazendo soerguer diversas terras, desaparecendo diversos dos oceanos que existiam neste período, hoje vestigiais. Diversos sistema colisionais ocorrem: os Perineus, os Alpes, as Balcans, as montanhas de Zagros, o Himalaia e a colisão mais “nova” a Austrália e a Indonésia.

A fase de colisões continentais comprime horizontalmente os continentes, mas como estes mantém o mesmo volume, decrescem um pouco em área. Isto torna os oceanos mais rastos em escala global. O resultado geral disto também é que com a elevação de regiões que antes estavam submersas permite o florescimento da fauna, rotas de migração entre continentes, o clima tende a ser mais sazonal e o mais importante, o clima global resfria-se. Isto ocorre pois as superfícies terrestres tendem a refletir mais facilmente a luz solar do que as regiões oceânicas e também permitem

o crescimento de placas de gelo continentais. Formando mais gelo, reflete mais, resfriando ainda mais, e uma nova era de gelo começa a formar-se. Somente poucas vezes a Terra teve temperaturas tão baixas quanto as de hoje.

Uma lição a ser aprendida é que quando o planeta esfria (ou esquentar) um processo “positivo” intensifica o padrão pois quanto mais esfria (ou esquentar) mais gelo forma-se sobre as terras emersas (ou mais gelo é transferido para os oceanos) diminuindo a área oceânica (ou aumentando a área oceânica) que diminui a absorção de luz solar (ou aumentando a captação de luz solar). É natural que a temperatura da superfície terrestre cresça.

8. O Futuro do Sistema de Continentes

É claro que não podemos realmente conhecer o futuro mas podemos ter uma idéia razoável de como ela deverá ser, sabendo que podemos nos equivocar. Em 50 milhões de anos no futuro, se o movimento das placas tectônicas continuar na mesma taxa atual a África colidirá com a Europa eliminando, bem provavelmente, o Mar Mediterrâneo e o Mar Vermelho. Isto bem provavelmente fará a existência de um grande complexo montanhoso tipo Himaláio desde a Espanha até o sudeste asiático, através da região do Oriente Médio. O continente Norte Americano continuará a rotacionar no sentido anti-horário. O continente Euro-Asiático rotacionará no sentido horário trazendo as ilhas britânicas na direção do Pólo Norte e a região sudeste da Ásia mais próxima de regiões subtropicais. O que parece sugere

o movimento das placas tectônicas é que a grande fissura atravessando a África não se transformará em um oceano. A maior modificação que surgirá será a formação de um grande complexo de subducção a leste do continente Norte-Americano até o Sul-Americano. que fará desaparecer em um futuro mais distante o Oceano Atlântico.

Em 150 milhões de anos no futuro, a “nova” região de subducção que surgirá no leste dos continentes americanos fará diminuir a extensão do Oceano Atlântico que separa o continente Norte-Americano da África que foi deslocada para o norte e rotacionado. Durante este processo de subducção a grande fissura que divide o Oceano Atlântico hoje terá desaparecido em 100 milhões de anos a partir de agora. A Antártida deslocando-se para o norte colidirá com a Austrália.

A história de uma bacia oceânica é determinada pelo balanço entre duas forças opostas, a fissura que o alarga e a subducção que o elimina. No início a fissura domina formando um largo fundo oceânico. Em algum tempo depois zonas de subducção formam-se nas margens deste oceano e que começará a consumir o leito oceânico. Durante todo este tempo nenhum oceano crescerá mais do que o moderno Pacífico. Em 250 milhões de anos a partir de agora o oceano está em franco declínio pois não há mais formação de leito oceânico. Assim no futuro o que são os oceanos Atlântico e o Índico serão somente um mar interno remanescente. Esta futura convergência de continentes poderá se chamar “Nova Pangéia”.