

TECTÔNICA DE PLACAS

Dinâmica do Sistema Terra I

LiGEA 2020

PARA RELEMBRAR...

O interior da Terra

- Descontinuidades sismológicas (início do século XX):
 - **descontinuidade de Mohorovičić** (Moho), que separa a crosta do manto.
 - **descontinuidade de Gutenberg** (D''), que separa o manto do núcleo.
 - **descontinuidade de Lehmann**, que separa o núcleo interno e externo.

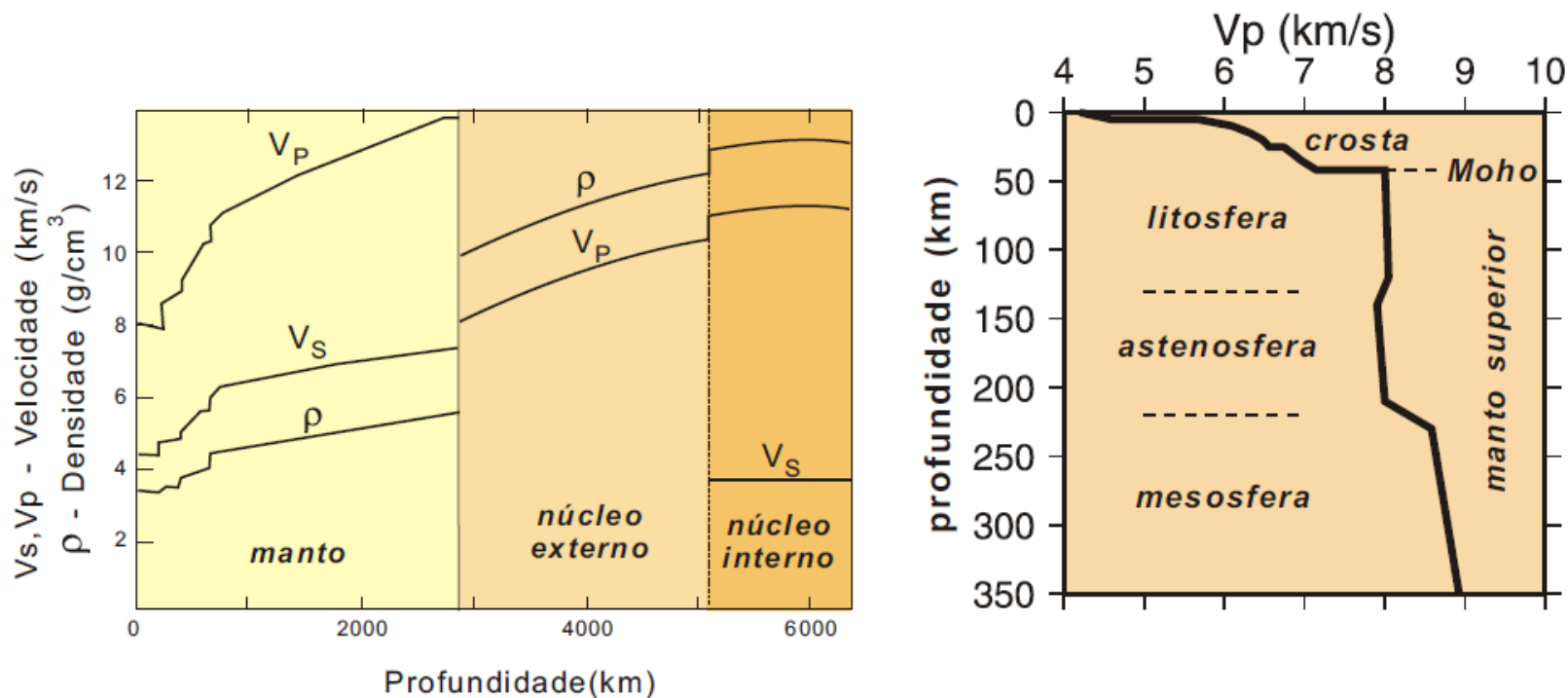
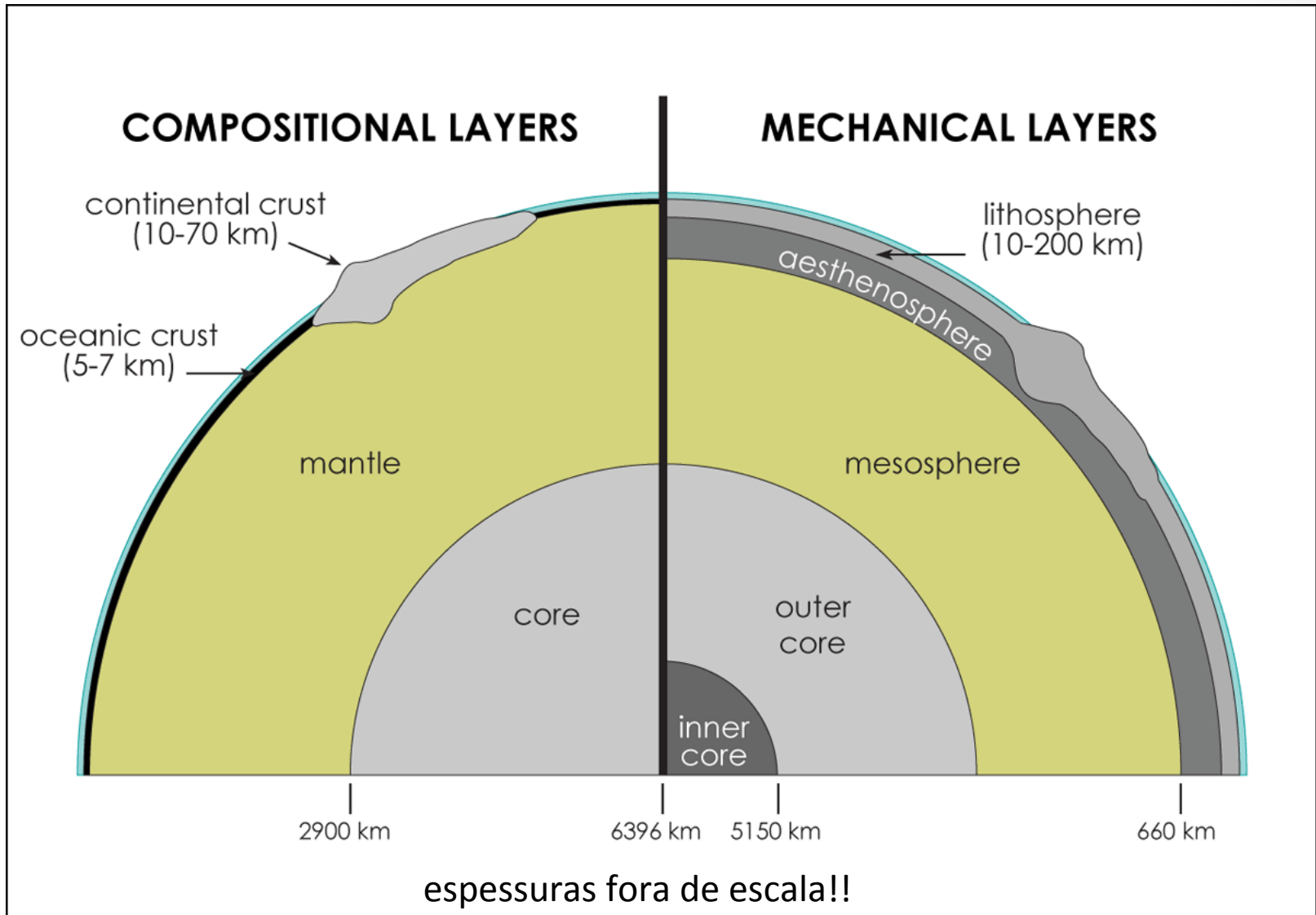


Fig. 3.13 a) Perfil de velocidades sísmicas (V_p e V_s) e densidade (ρ) no interior da Terra. b) Perfil de velocidade da onda P na crosta e manto superior, numa região continental.

Fonte: Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

Camadas da Terra

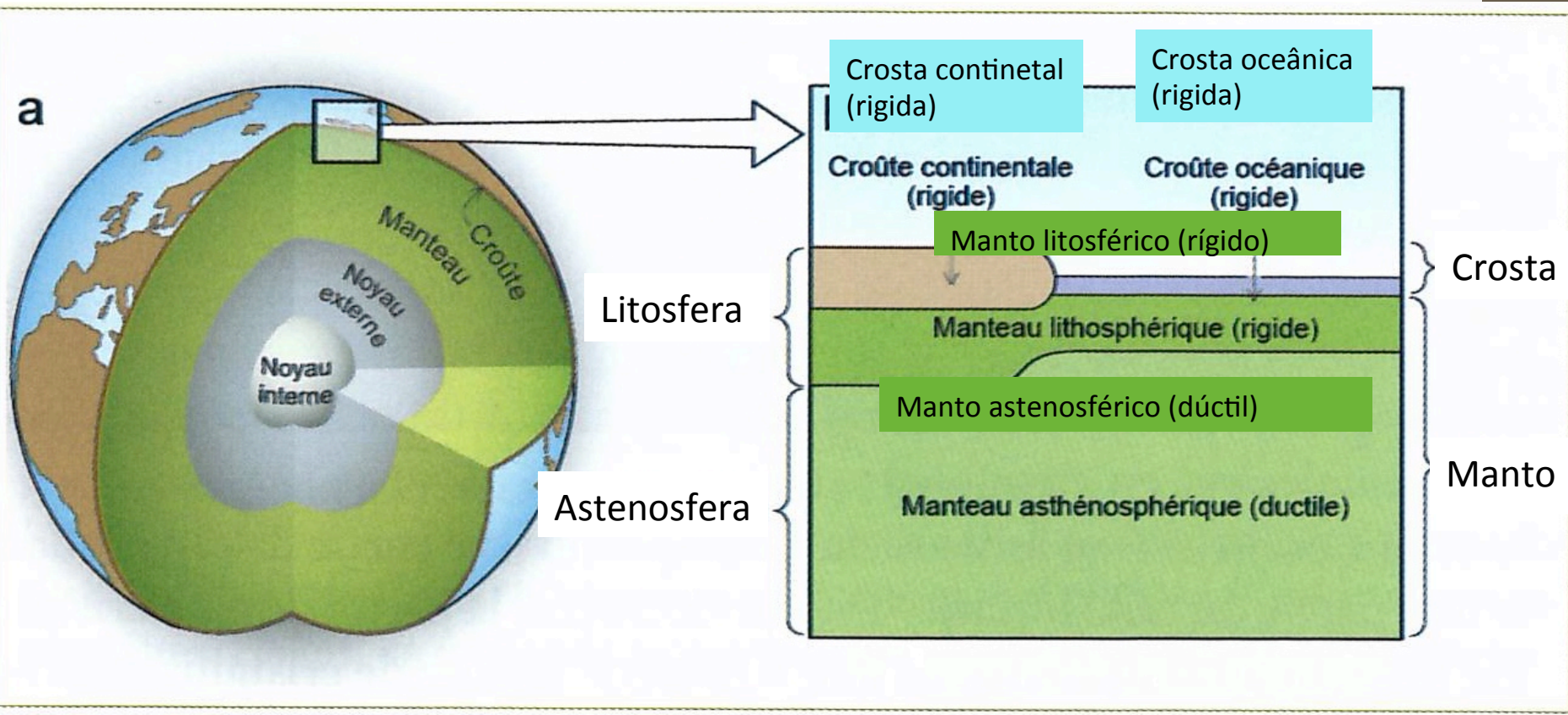


LITOSFERA

Camada mais externa.

Mais fria e rígida.

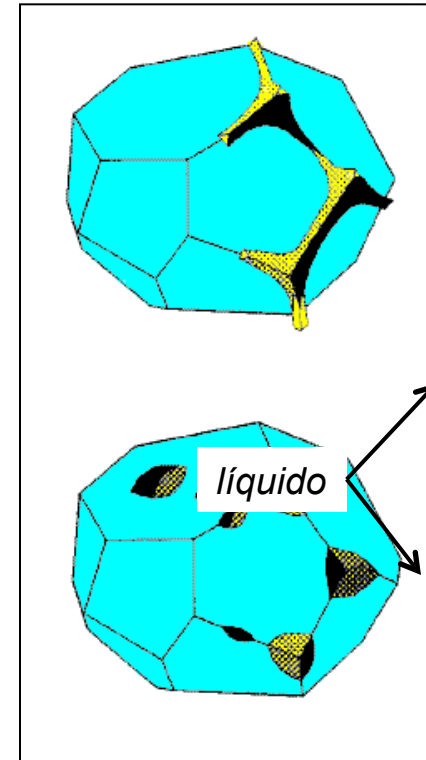
com média de 100 km de espessura, mas pode chegar a 250 km, inclui a crosta e parte do manto superior.



ASTENÓSFERA

Astenosfera

- De ≈ 100 a ≈ 200 km
- Camada mais plástica (sólida), que inclui o restante do manto superior. (de *asthenos* = sem resistência)
- A porção superior possui temperatura e pressão que permite pequenas quantidades de fusão ($\sim 1\%$ de líquido). →
- Devido à sua plasticidade, é mecanicamente separada da litosfera.



cristais

Tectônica de placas

Como a ideia surgiu?

- Introdução
- Histórico
 - pré-Wegener: Fixistas
 - Wegener e a hipótese da Deriva Continental
 - pós-Wegener e a Teoria da Tectônica Global
- Placas tectônicas
 - características
 - distribuição dos terremotos, vulcões e feições fisiográficas
- Limites de placas
 - divergentes
 - convergentes
 - transformantes
- Movimentação das placas e paleocontinentes



PARTE 1

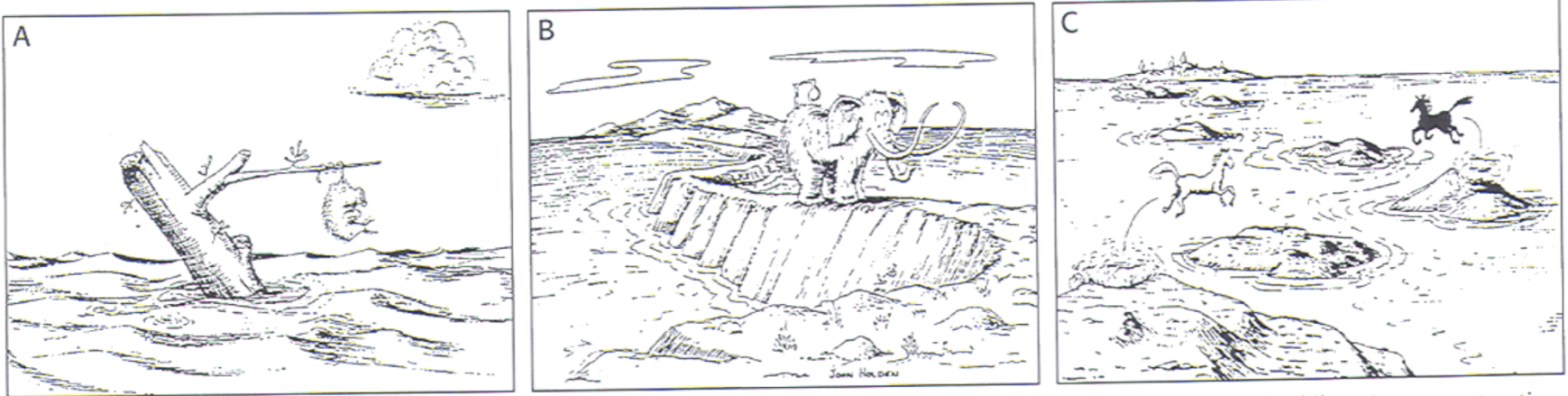


Fig. 38 Comment expliquait-on, jusque dans les années 1960, la présence de flores et de faunes identiques sur des continents séparés par de vastes océans? [A] Transport par des radeaux trans-océaniques. [B] Ponts inter-

continentaux de plusieurs milliers de kilomètres; attention de ne pas dérapier et gare aux croisements! [C] Chapelets d'îles proches. Dessins de J. C. Holden reproduits par P. J. Wyllie (1976).

A teoria da tectonica de placas foi construída ao longo de séculos. As primeiras ideias remete a deriva continental.

DERIVA DOS CONTINENTES

Histórico

“Quando uma teoria é estabelecida e finalmente universalmente aceita, percebe-se que já tinha sido formulada no passado e muitas vezes com base em argumentos sólidos”

F. Schiler

Alguns britânicos atribuem a paternidade da ideia da deriva continental a Francis Bacon (1561-1626), que publicou o *“novum organum”* em 1620, onde mencionava a correspondência do formato das linhas de costa entre a África e a América do Sul, mas nunca defendeu a questão de uma deriva dos continentes.

- Mapa-Múndi: grandes navegações do século XVI
- Observação do contorno da linha de costa (América do Sul e África)
- Hipótese de que os continentes estiveram unidos no passado.

Histórico



Abraham Ortelius
(1527-1598) cartógrafo
holandês - criador do
primeiro "Atlas moderno"



Sir Francis Bacon
(1561-1626)
Filósofo inglês

"The vestiges of the rupture reveal themselves, if someone brings forward a map of the world and considers carefully the coasts of the three [continents - Europe, Africa and America]."

A. Ortelius (1596) - *Thesaurus Geographicus*

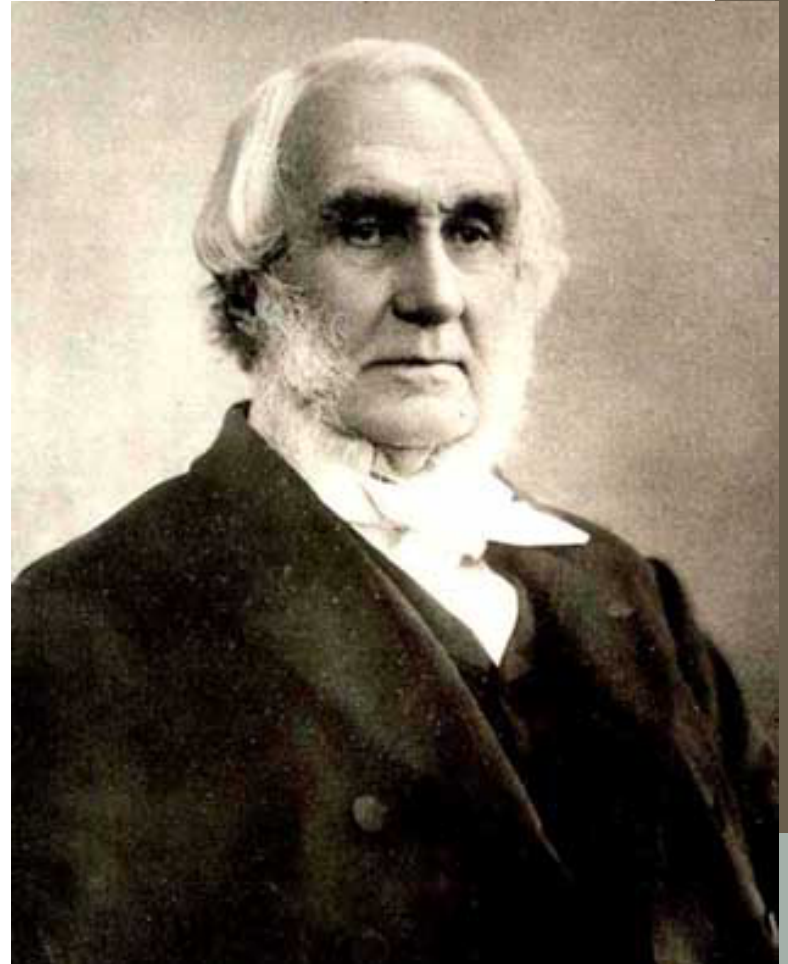
Histórico

- James D. Dana (1813-1895)
 - Teoria da contração da Terra (teoria mais aceita da época)
 - O planeta teria se formado no estado líquido
 - Cadeias de montanhas se formariam à medida que o planeta se resfria e encolhe



Histórico

- Osmond Fisher (1817-1914)
 - A crosta estava assentada em cima de uma camada líquida (manto)*
 - O Oceano Pacífico era uma “cicatriz” de quando a lua foi separada da Terra
 - Os continentes do lado oposto ao Oceano Pacífico se moviam para cobrir essa “cicatriz”
 - Seu trabalho com a deriva dos continentes foi ridicularizado



* noção do manto líquido na época. Apenas com o início da geofísica que ficou comprovado que o manto é sólido.

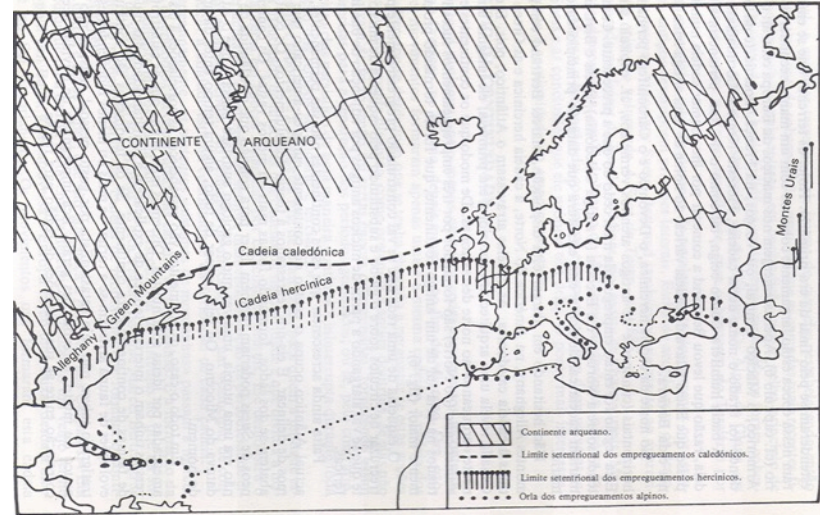
Histórico

- Eduard Suess (1831 -1914)
 - observa analogias de fauna e flora fósseis entre regiões hoje separadas por oceanos
 - Deduz que os continentes deviam ser muito mais extensos e que devem ter afundado para formar as bacias oceânicas.
 - Defende que “pontes continentais” teriam conectado a América do Sul, África, Índia, Austrália e Antártica. Propôs o nome de Gondwanaland (supercontinente Gondwana) para esse antigo continente fragmentado.



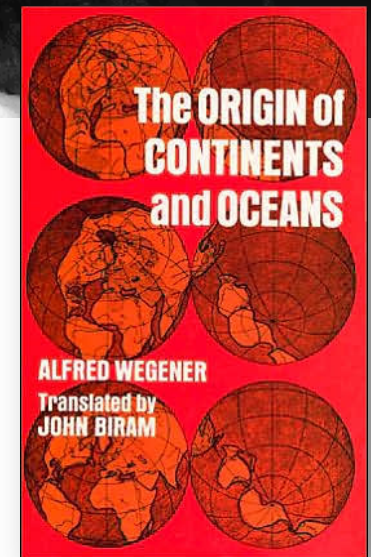
Histórico

- Marcel Bertrand
 - em 1887, afirma também que a América do Norte e a Europa formavam um só continente que teria se rompido para formar o oceano Atlântico.
 - Prova: prolongamento das cadeias de montanhas (caledoniana, herciniana e alpina).



Deriva continental - Histórico

- Alfred Lothar Wegener (1880-1930)
 - Doutorado em Astronomia
 - Trabalhava com Meteorologia
- Propôs a ideia da Deriva Continental no livro “**A Origem dos Continentes e Oceanos**” em 1915.
- Foi incapaz de propor um mecanismo que explicasse sua hipótese.



1915



Suess
1883



Wegener
1912

1930

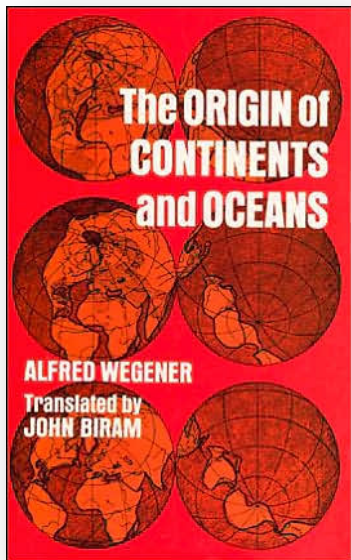
1960

1990

Estes diferentes estudos definem um contexto ideal para a hipótese da **Deriva dos continentes** de Alfred **Wegener**.

É o primeiro a elaborar sua hipótese com base em argumentos de fontes diversas e a torná-la uma teoria científica coerente.

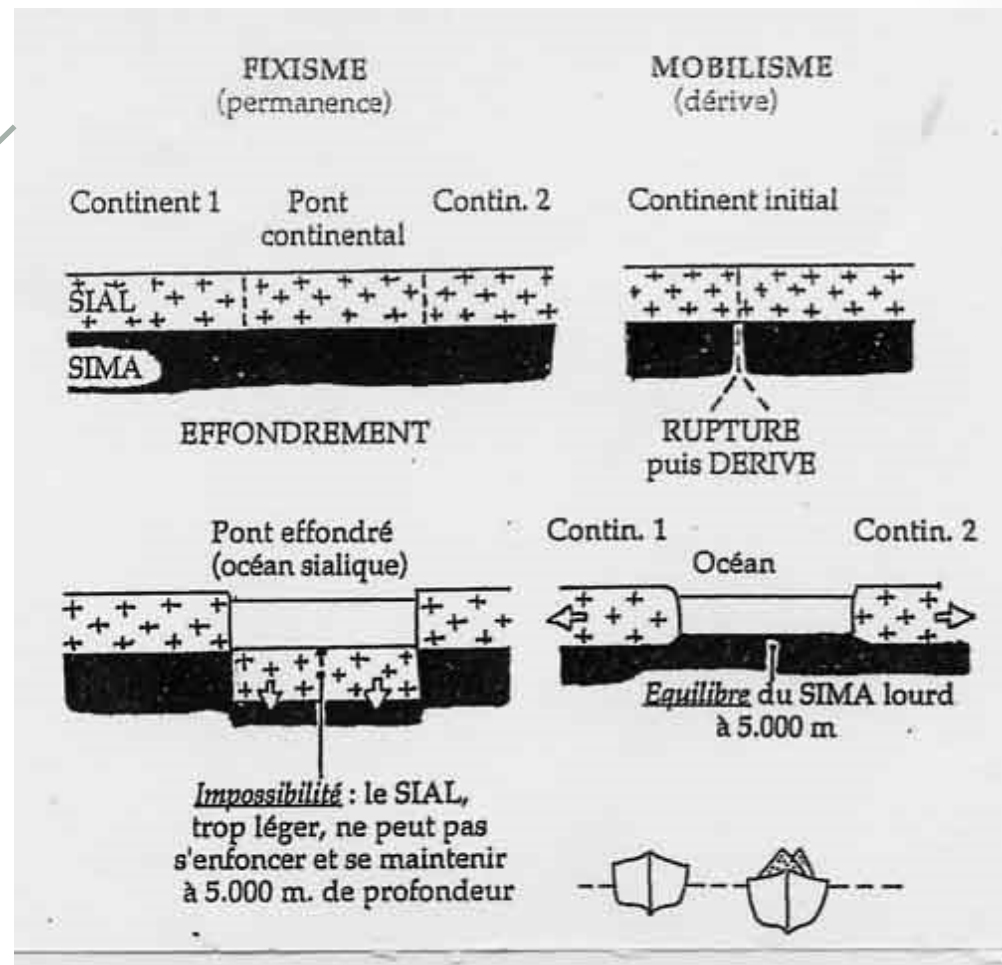
No prefácio de sua obra, Wegener insiste sobre a necessidade de desenvolver uma visão global do planeta, incluindo o conjunto das ciências da Terra.



1915

Ele afirma que os continentes, constituídos de *sial** se apoiam sobre um substrato mais denso (*sima**) que aflora diretamente nos oceanos.

A hipótese do mobilismo (deriva) se opõe a teoria fixista da época.



*Sial de Si, Al (crosta) e Sima de Si, Mg (manto), termos hoje em desuso

Os continentes eram reunidos em um só: a **Pangea** e se deslocaram até chegar em sua posição atual fissurando o sima que os circundam.



200 Ma

A teoria da deriva continental é sustentada por evidências geológicas, paleontológicas e climatológicas coletadas por Wegener.

Os argumentos...

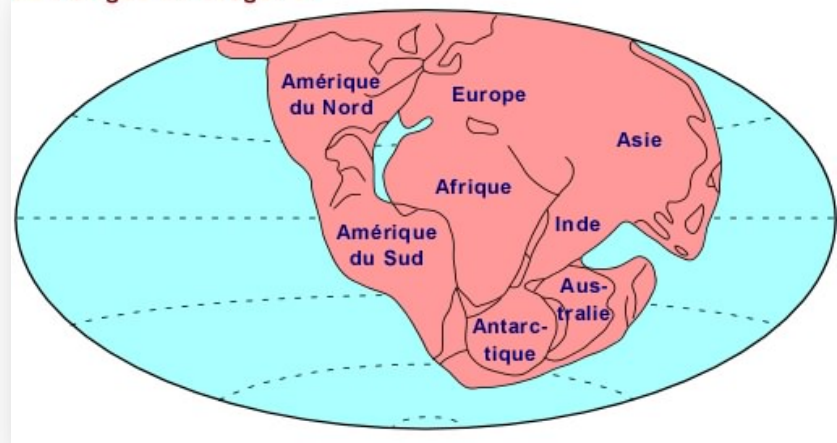
Evidências geográficas

- paralelismo das linhas de costa do oceano Atlântico, entre as Américas (de um lado) e a Europa e a África (do outro).
 - os dois conjuntos seriam no passado partes de um mesmo bloco, maior
 - todas as massas continentais estiveram reunidas em um supercontinente único, a Pangea.

Position actuelle des continents

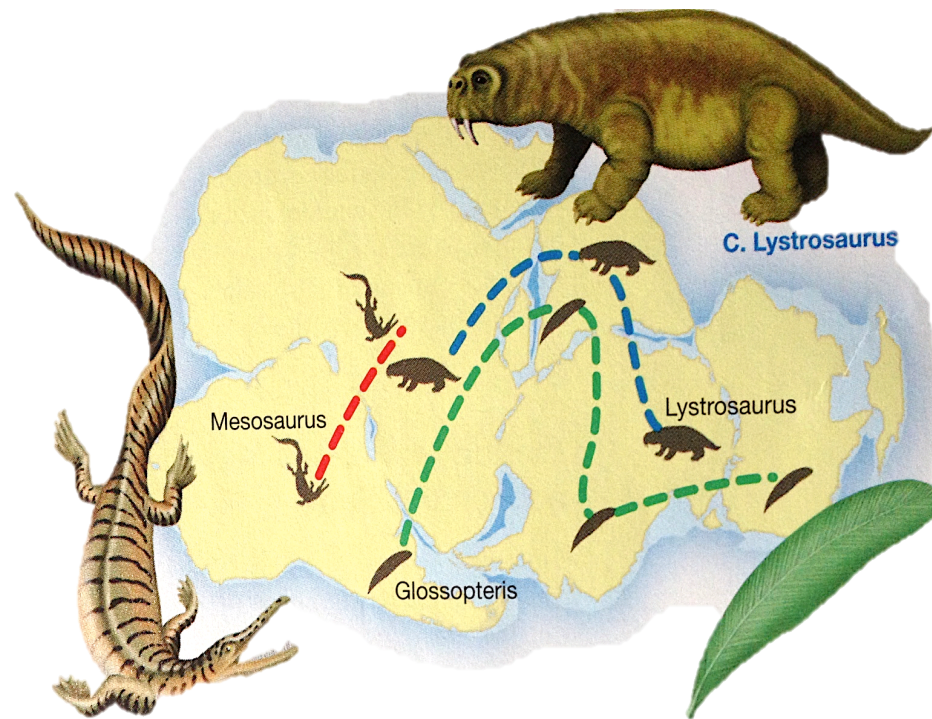


La Pangée de Wegener

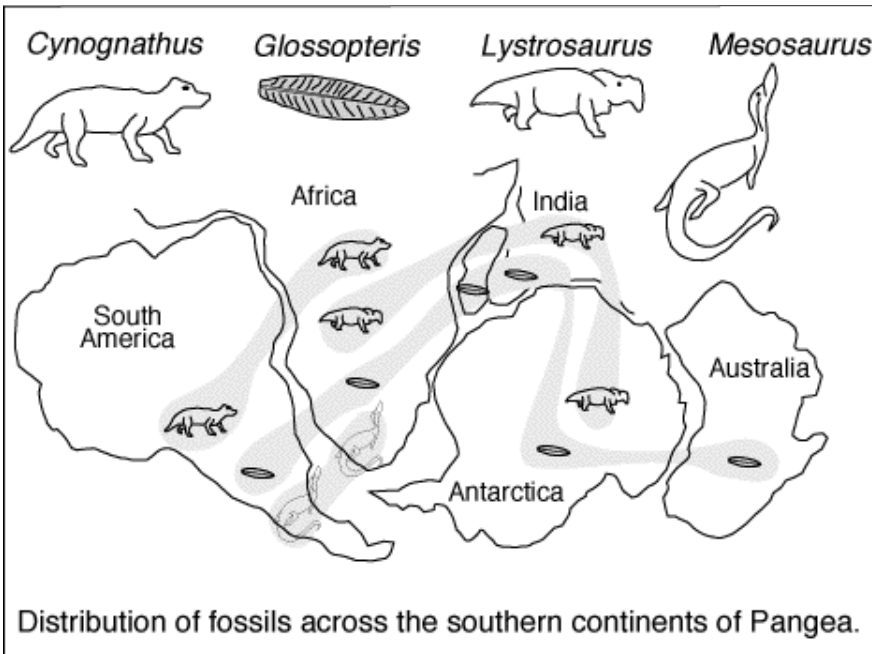
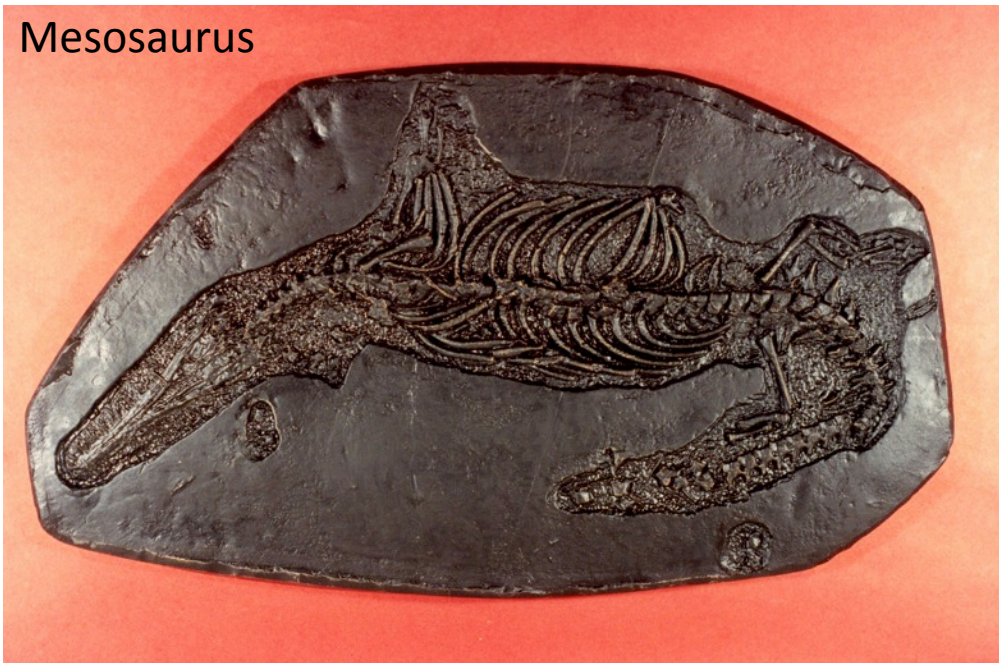


Registros paleontológicos...

- fósseis idênticos de plantas e animais terrestres com 240 a 260 milhões de anos de idade. Sua distribuição reforça a existência da Pangea. Com certeza, esses organismos terrestres não eram capazes de atravessar o vasto oceano para viver dos dois lados.



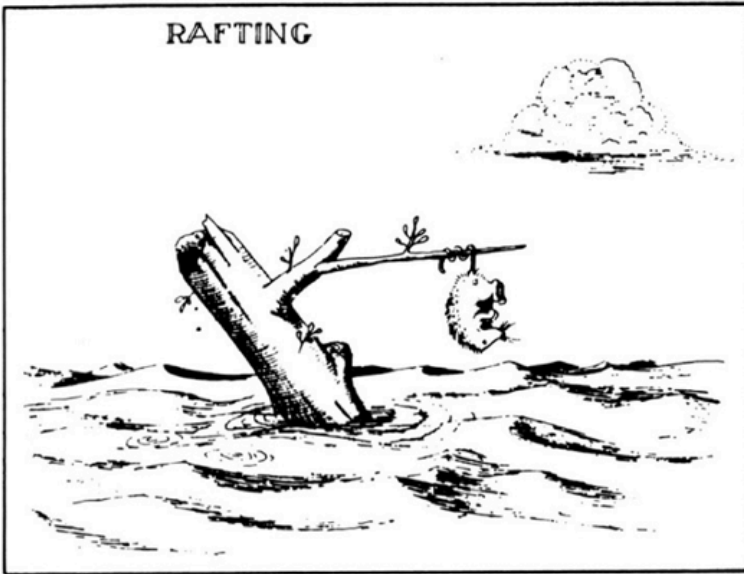
Mesosaurus



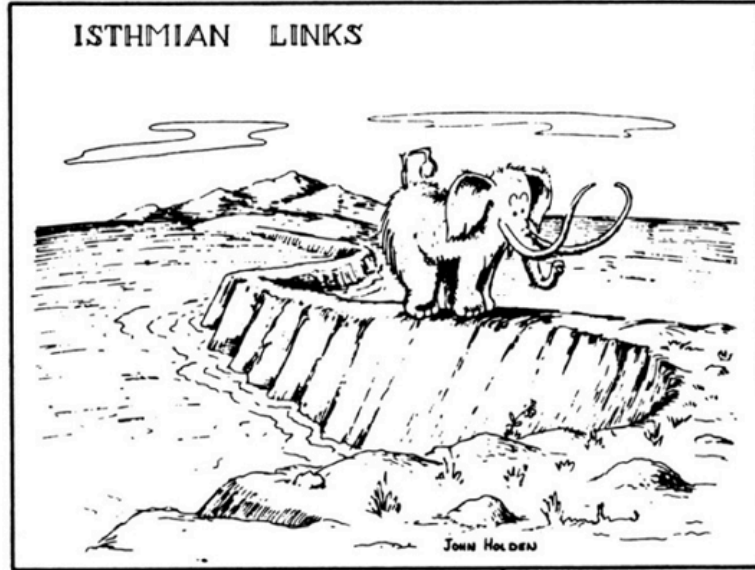
Glossopteris – tipo de gimnosperma primitiva

Como a presença de fósseis de organismos em continentes hoje separados era explicada na época....

RAFTING



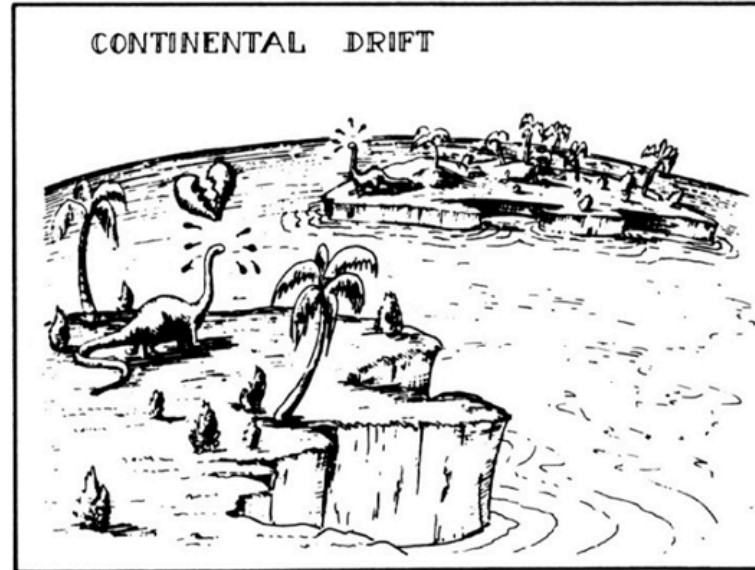
ISTHMIAN LINKS



ISLAND STEPPING STONES



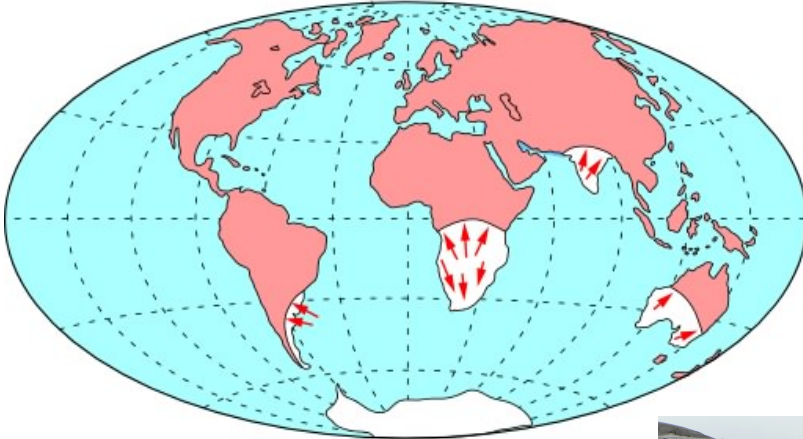
CONTINENTAL DRIFT



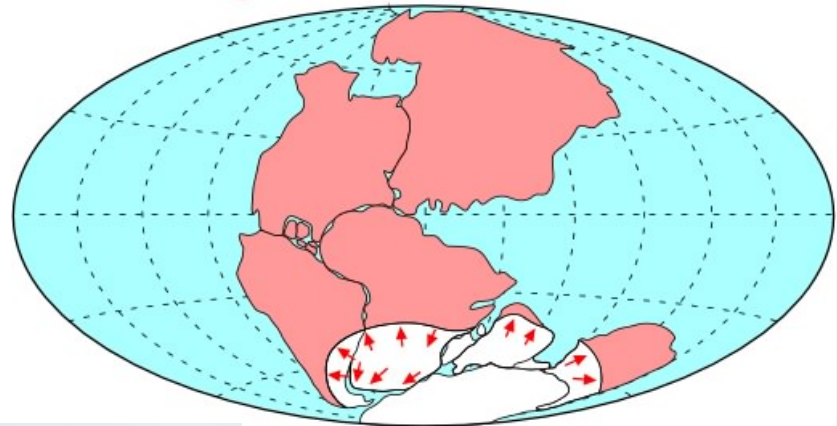
Registros sedimentares e geológicos

- Evidências de antigas glaciações em algumas regiões tropicais dos continentes atuais indicam a existência de geleiras há cerca de 250 milhões de anos. Essas calotas de gelo não teriam existido se os continentes já se situassem na zona tropical.

→ sens d'écoulement de la glace



La solution de Wegener



- concordância das estruturas geológicas no interior dos continentes em ambos os lados do oceano Atlântico:

- entre África e América do Sul: existem crátons de 2 bilhões de anos, cercados por cadeias de montanhas mais jovens, de 450 a 650 milhões de anos;
- entre América do Norte e Europa: as cadeias dos Apalaches (leste da América do Norte), a Mauritânia (nordeste da África) e a Caledoniana (ilhas britânicas, Escandinávia) formam uma única cadeia montanhosa (cinturão orogênico).

(hoje sabe-se que essas cadeias de montanhas datam da mesma época, entre 470 e 350 milhões de anos).



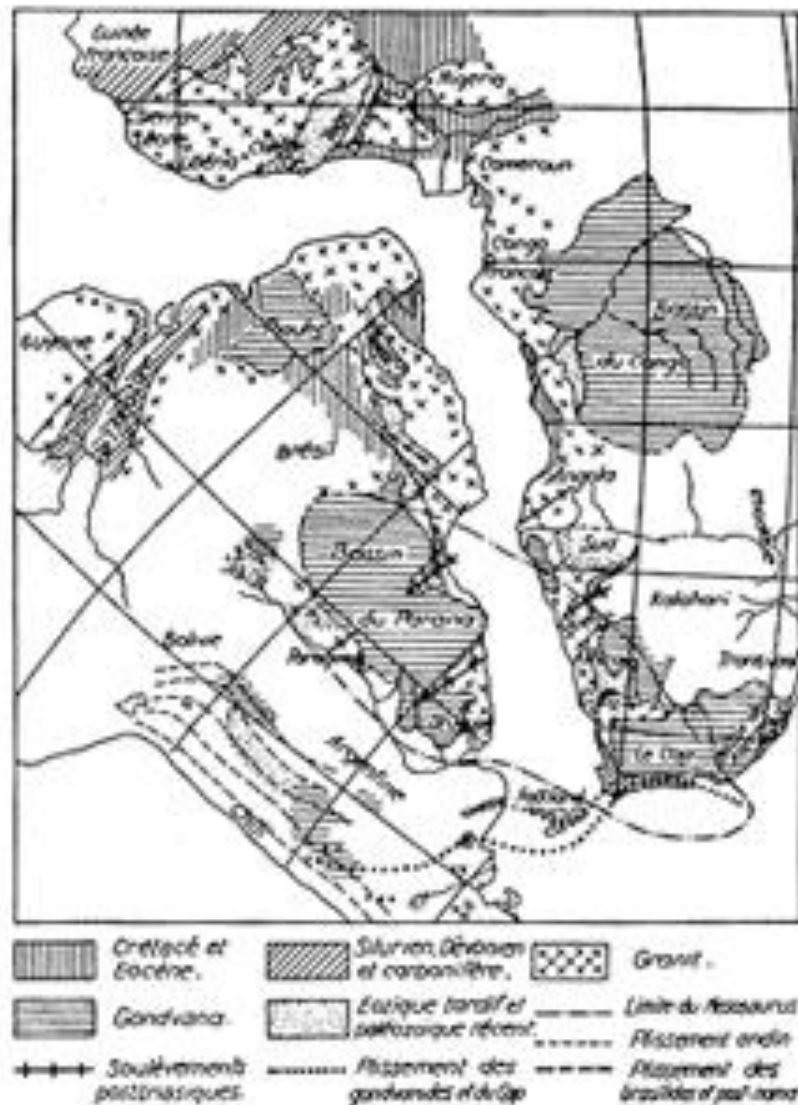
- As concordâncias de natureza estratigráfica, litológica, paleontológica, tectônica e vulcânica entre a costa dos continentes hoje separados constituem uma das « provas » da teoria de Wegener.
- A teoria é grandiosa mas a sismologia no início do século mostra que o planeta é sólido.
- Como os continentes podem se mover em um meio sólido???
- -> a ideia da mobilidade horizontal é rejeitada pela comunidade científica.
- Com base nos movimentos da isostasia, o *sima* pode ter um comportamento fluido. Se os movimentos verticais são possíveis porque os movimentos horizontais não são?

- A continuidade das estruturas geológicas entre os continentes segundo **Alex Du Toit (1927)**, geólogo sul africano.

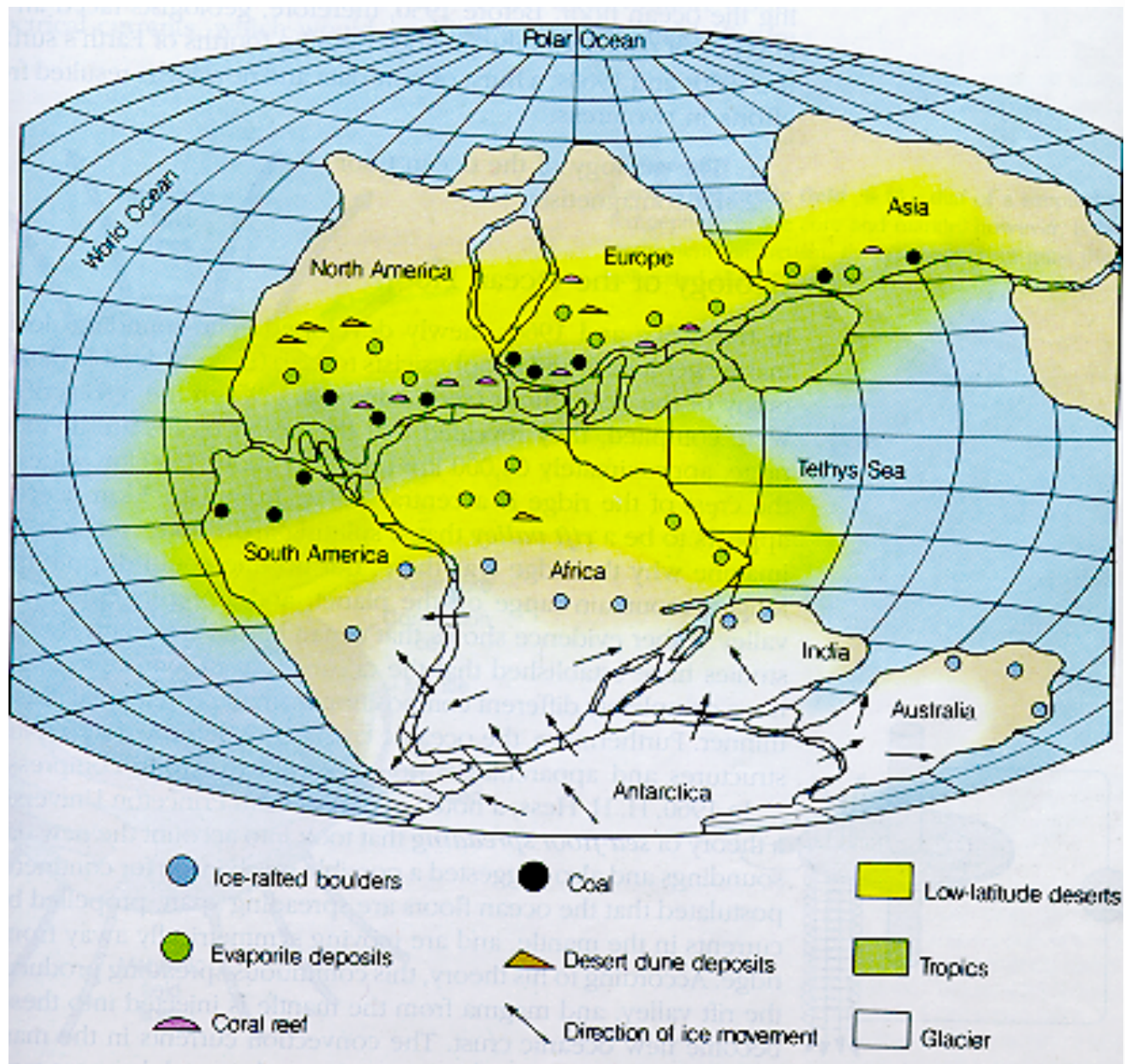
Argumentos adicionais aos de Wegener em apoio a deriva continental.

Em 1937 – publica o livro *Our wandering continents* (nossos continentes errantes) depositos glaciais no Gondwana (sul) e Laurasia depósitos de carvão (no equador) resolve o aparente paradoxo climatológico

Propõe a fragmentação da Pangea em Gondwana ao sul e Laurasia ao norte. Não explica também o que poderia ser responsável pelo movimento das massas continentais.



- Os depósitos de carvão coincidem.



1930

1960

1990



Suess
1883

Wegener
1912

Jeffreys
1924

Rejeição da teoria da deriva

- um dos maiores oponentes é Harold **Jeffreys** (1891-1989) que defende que as forças avançadas por Wegener são fracas demais para mover os continentes.

Wegener:

- Força centrífuga empurra os continentes em direção ao equador.
- Força das marés, que empurra os continentes para o oeste

Na época as propriedades da litosfera e da astenosfera não eram conhecidas

Reações contrárias

- Comentários da época sobre a Deriva dos Continentes de Wegener
 - “muito perigosa e capaz de levar a sérios erros” – H. Jeffreys
 - “se formos acreditar na hipótese de Wegener, teremos de esquecer tudo o que se aprendeu nos últimos 70 anos e começar de novo a partir do zero” – R. T. Chamberlin
 - “ele não está buscando a verdade, mas advogando uma causa, e está cego a qualquer fato ou argumento que vá contra ela” – P. Lake.
- A reação negativa dos cientistas da época foi tão intensa que muitos que poderiam ter apoiado as ideias de Wegener recuaram temerosos de pôr em risco suas carreiras.



Holmes
1928



Suess
1883



Wegener
1912



Jeffreys
1924

1930

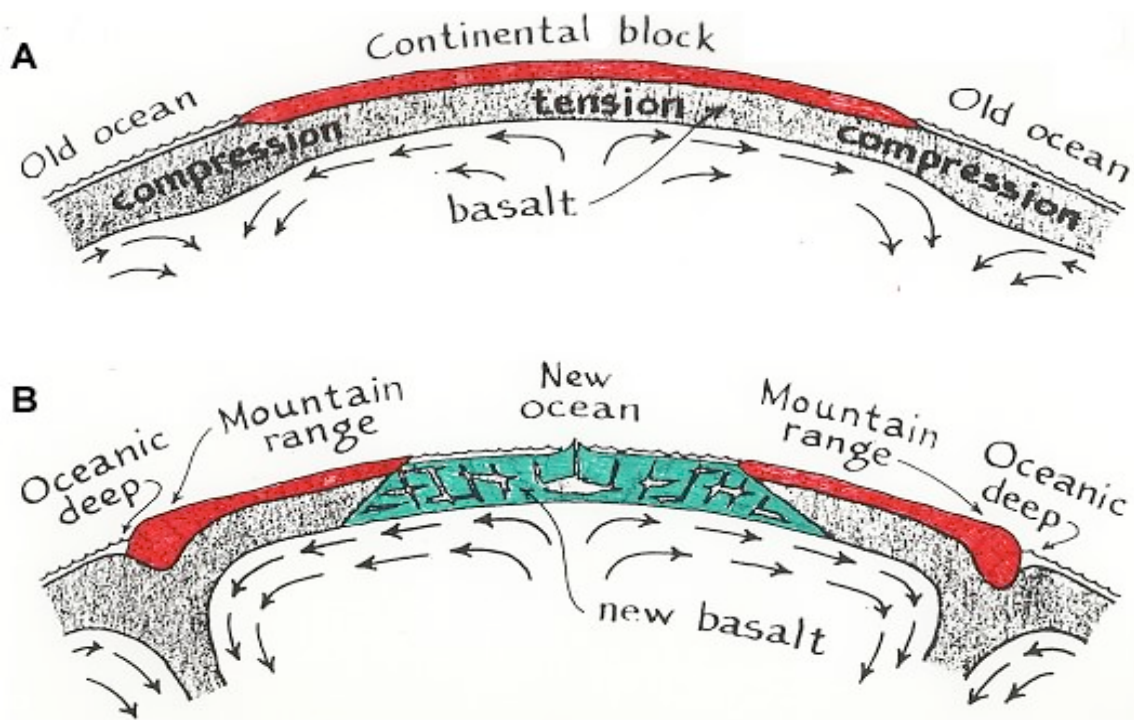
1960

1990

Rejeição da teoria da deriva...

- em 1928 Arthur **Holmes** entra em cena.
- Prof. de geologia na universidade de Edimburgo





Propõe a existência de correntes de convecção no manto (com base na circulação da atmosfera) sob um grande bloco continental, como a Pangea, por exemplo, o que seria responsável por forças de tensão na crosta. A crosta se fratura e magma oriundo do manto entraria nessas fraturas.

A cristalização deste magma criaria a crosta oceânica constituída de basaltos. Essa crosta também se fraturaria, haveria injeção de magma, cristalização etc. Isso explicaria o afastamento de massas continentais devida a criação de nova crosta. Haveria compressão em outro lugar onde a crosta afundaria e seria destruída (em fossas oceânicas). Cadeias de montanhas seriam construídas nas zonas de compressão.

É um modelo conceitual porque Holmes não tinha dados para comprová-lo. Foi rejeitada pela comunidade dos geofísicos liderada por H. Jeffreys.



Holmes
1928

1939-1945
2a guerra mundial



Suess
1883



Wegener
1912

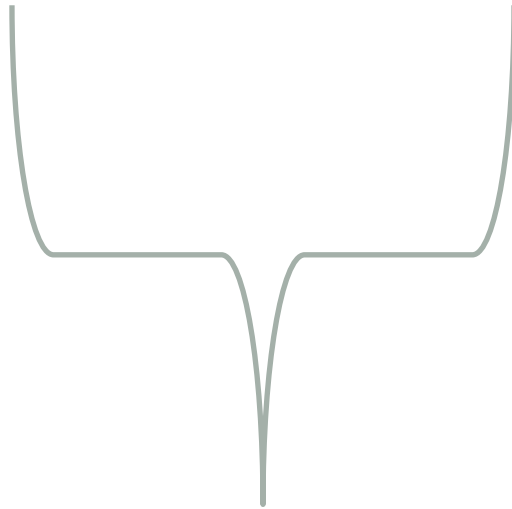


Jeffreys
1924

1930

1960

1990



A teoria cai no esquecimento por 30 anos...

Histórico

- Rápida sucessão de descobertas do **Pós Guerra**:
 - Hess (1946): cadeias de montanhas do fundo do Pacífico
 - Gutenberg (1948): uma camada de rocha “mole” no manto superior
 - Petterson (1949): a extremamente fina camada de sedimentos nas profundezas do Pacífico
 - Ewing (1950): a ausência de uma crosta Si-Al sob o Atlântico
 - Reville e Maxwell (1952): fluxo de calor comparativamente alto no Pacífico
 - Heezen (1953): anomalias magnéticas quase senoidais no Atlântico
 - Benioff (1955): zona de terremotos ao redor do Pacífico
 - Ewing e Heezen (1956): um alinhamento contínuo de terremotos rasos sob as cadeias meso-oceânicas
 - Mason (1958): listras magnéticas no chão do oceano Pacífico
 - Press (1959): extensão global da camada de rocha “mole” descoberta por Gutenberg.



Holmes
1928



1939-1945
2a guerra mundial

1957-1958



1930

A teoria cai no
esquecimento por
30 anos...

1960

1990

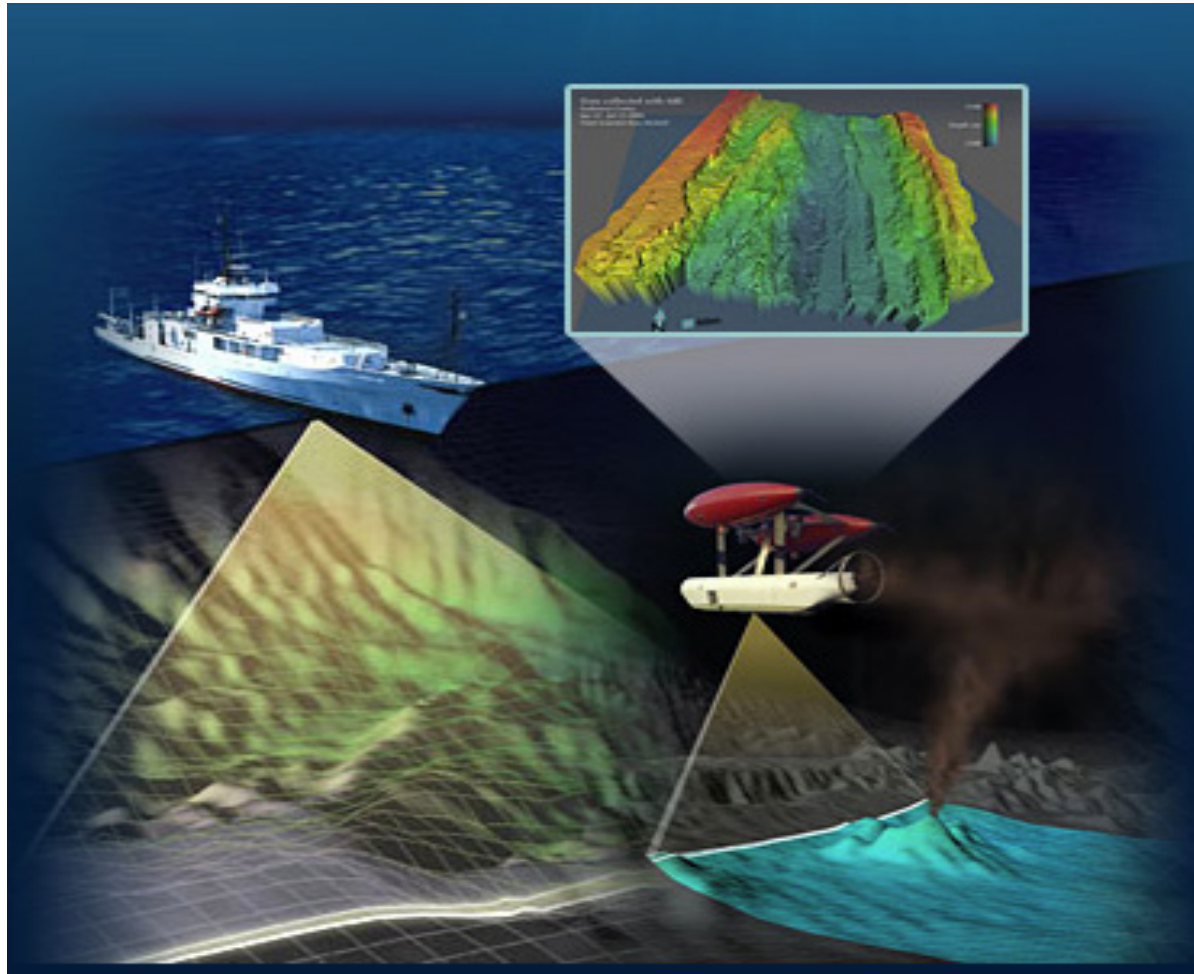
Suess
1883

Wegener
1912

Jeffreys
1924



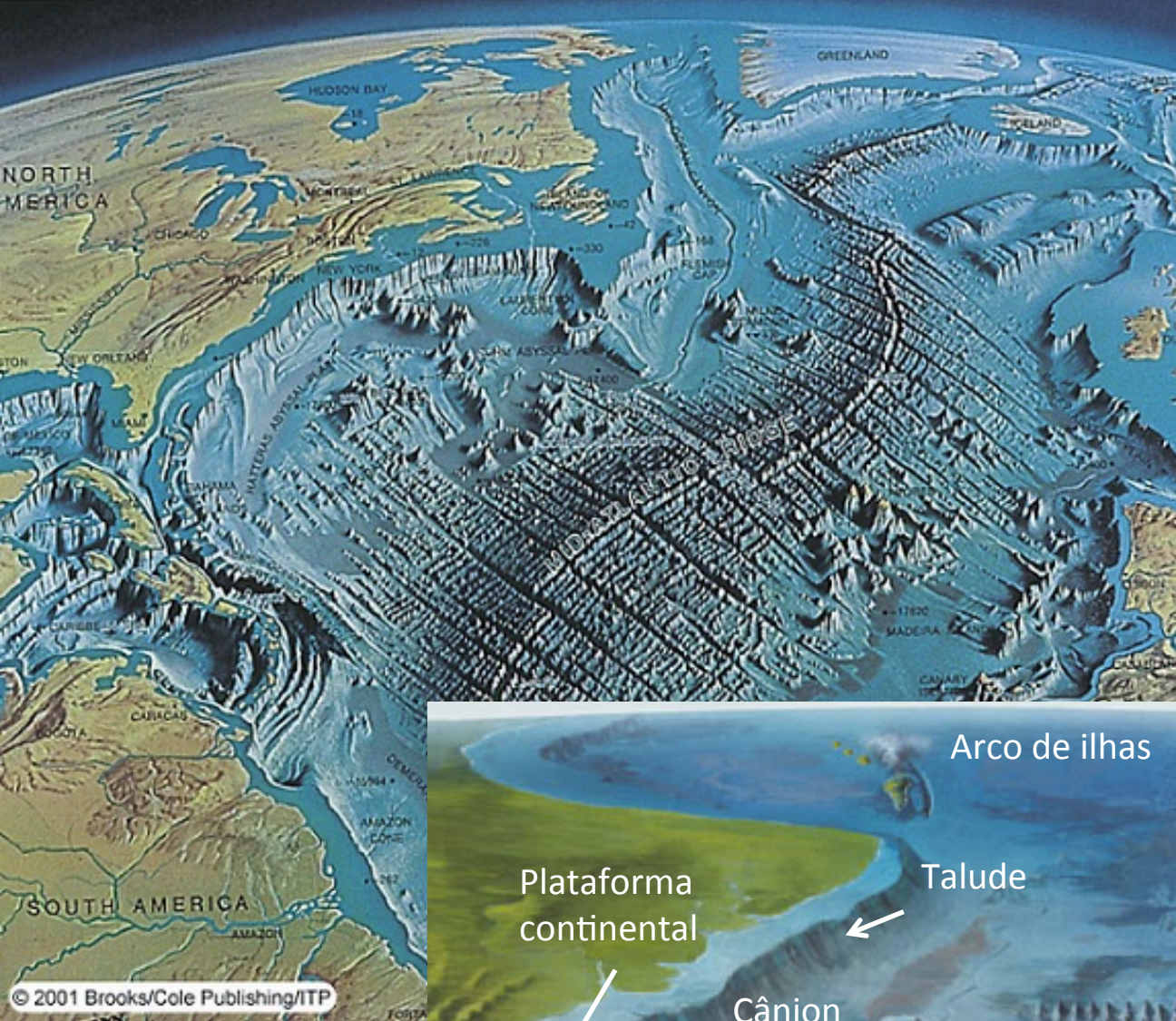
- Sismologia: melhor conhecimento da estrutura interna da Terra
- Oceanografia: exploração dos fundos oceânicos
- Estudo do campo magnético terrestre
- Geoquímica



A EXPANSÃO DO ASSOALHO OCEÂNICO

Topografia do fundo oceânico







Holmes
1928



Suess
1883



Wegener
1912



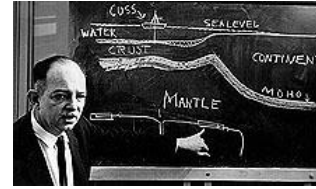
Jeffreys
1924

1930

1960

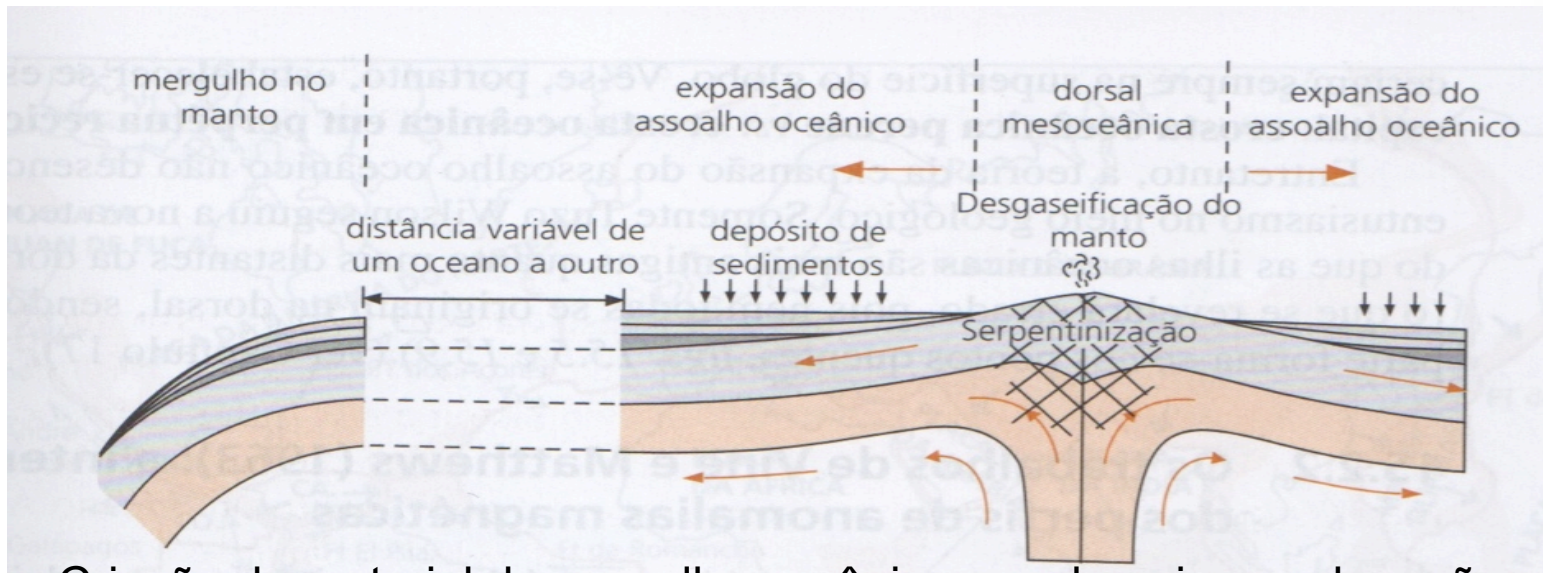
1990

A teoria cai no esquecimento por 30 anos...



Hess
1960

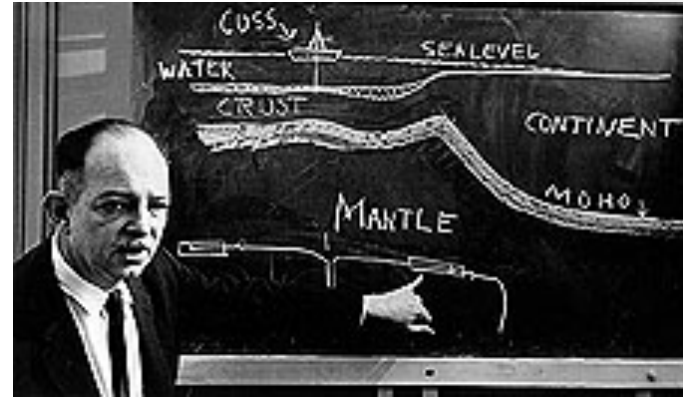
A redescoberta do mobilismo ... pelos oceanos



Criação de material do assoalho oceânico nas dorsais e reabsorção nas fossas oceânicas

Histórico

Harry Hess (1962): “History of Ocean Basin”



- hipótese sobre a expansão do fundo oceânico
- Nova crosta oceânica era formada na cadeia meso-oceânica e “mergulhava” sob os continentes de volta ao manto
- A deriva continental e a expansão do assoalho oceânico seriam consequência de correntes de convecção no manto
- Hess e Dietz (1962) – a historia das bacias oceânicas - demonstram que CC e CO se movem em conjunto e que nova CO é formada periodicamente a partir da consolidação de magma expelido em fissuras na litosfera Oceanica. O magma expelido acrescenta material -> elevação -> cadeias de montanhas = dorsais mesoceanicas. As porções frias e mais antigas e mais distantes da dorsal entrem em subducção formando as fossas oceanicas. Movimento = correntes de convecção



Holmes
1928



Marley, Vine, Matthews
1963



Suess
1883



Wegener
1912



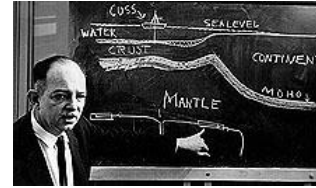
Jeffreys
1924

1930

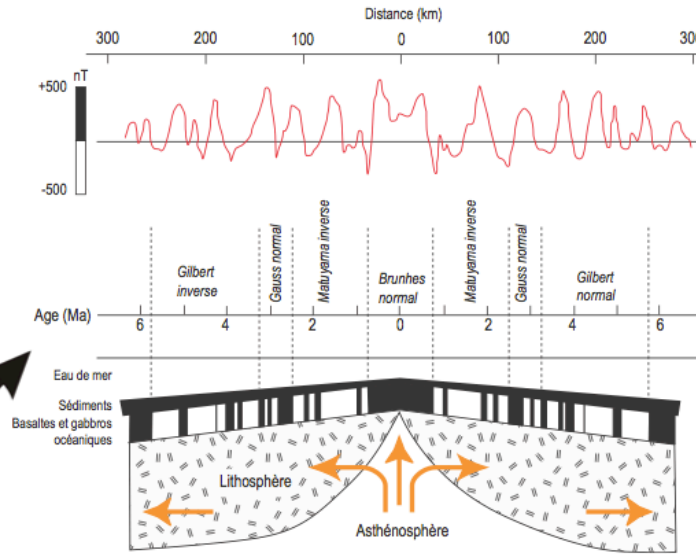
1960

1990

A teoria cai no esquecimento por 30 anos...

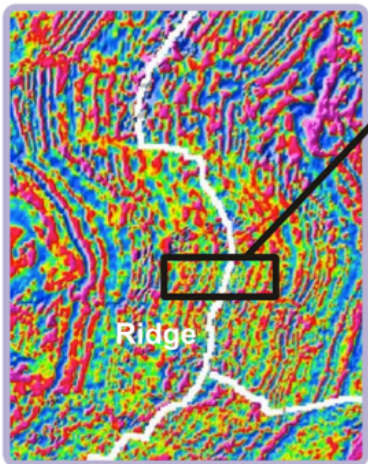


Hess
1960

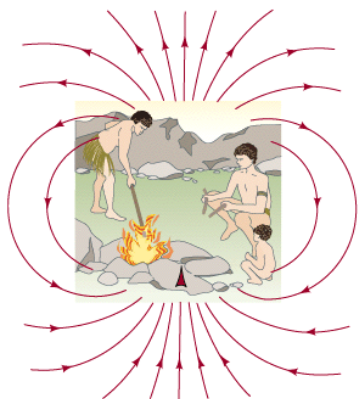
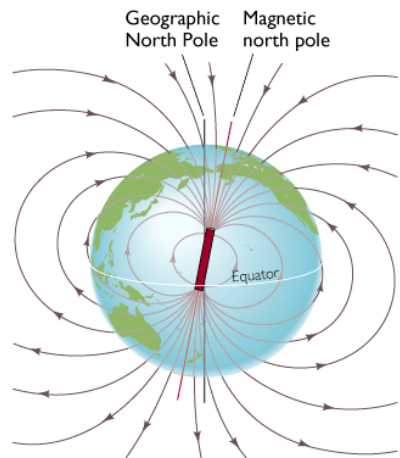
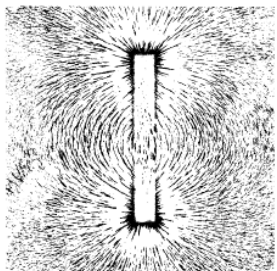


A redescoberta do mobilismo ... pelos oceanos

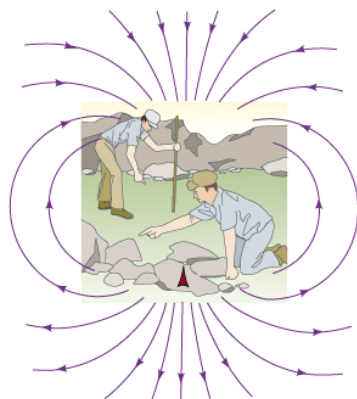
Relacionam as bandas de inversão da polaridade magnética da crosta do assoalho oceânico com o espalhamento do assoalho a partir das cadeias Mesoceânicas.



paleomagnetismo



30,000 years ago



Today



THE AMOEBA PEOPLE
present

Holmes
1928



Marley, Vine, Matthews
1963



JOIDES resolution
1990s



Suess
1883



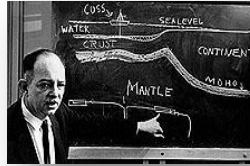
Wegener
1912



Jeffreys
1924

1930

Hess
1960



1960

T. Wilson
1965



1990



Oliver, Isaacs
1967



Le Pichon,
Morgan, Mc
Kenzie
1968

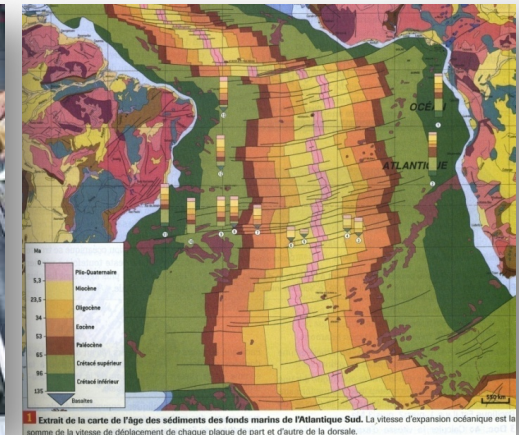
FINAL 60s – formulação e consolidação da Teoria

J. Tuzo Wilson propõe as falhas transformantes como explicação da abertura da dorsal oceânica e é o primeiro a utilizar o termo “tectônica de placas”.

Datação do assoalho oceânico e determinação das taxas de expansão dos oceanos.



Glomar Challenger

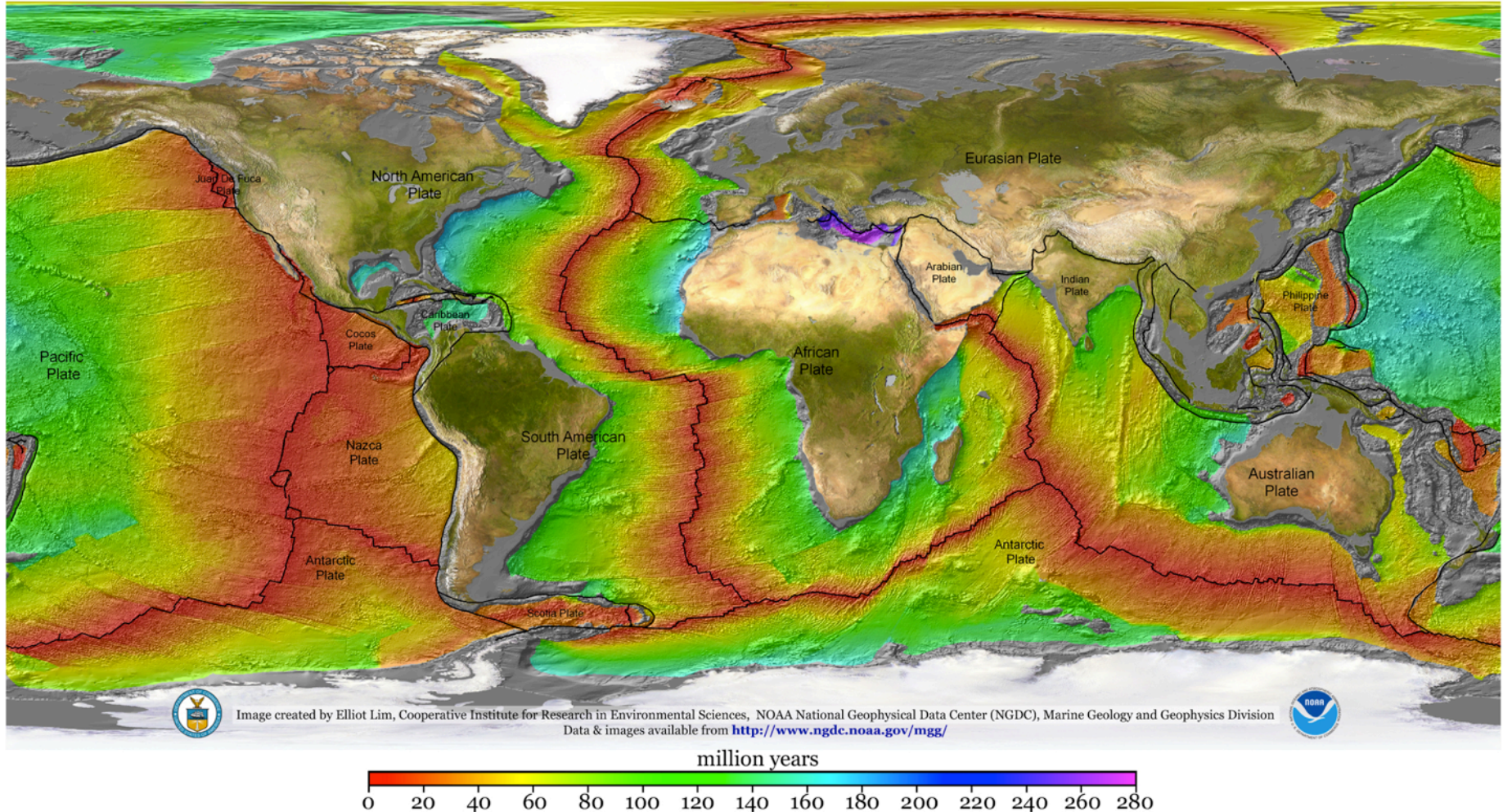


Extrait de la carte de l'âge des sédiments des fonds marins de l'Atlantique Sud. La vitesse d'expansion océanique est la somme de la vitesse de déplacement de chaque plaque de part et d'autre de la dorsale.

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

Data source:

Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.



O assoalho oceânico é formado por **basalto jovem** e não de granito velho!!

Histórico

Contribuição da USP

ARTICLES

Test of Continental Drift by Comparison of Radiometric Ages

P. M. Hurley¹, J. R. Rand¹, W. H. Pinson Jr.¹, H. W. Fairbairn¹, F. F. M. de Almeida², G. C. Melcher², U. G. Cordani², K. Kawashita², P. Vandomos²

¹*Massachusetts Institute of Technology*

²*University of São Paulo*

- Hide authors and affiliations

Science 04 Aug 1967:
Vol. 157, Issue 3788, pp. 495-500
DOI: 10.1126/science.157.3788.495

Histórico

Contribuição da USP

Abstract

1) The distribution of age values obtained by potassium-argon determinations and whole-rock rubidium-strontium determinations appears to be almost identical for West African rocks of the pervasive Eburnean Orogenic Cycle and basement rocks at opposite locations in South America.

2) There is also a close correlation, with respect to potassium-argon age determinations on micas, rubidium-strontium determinations on total-rock samples, and the extent to which these two sets of values differ, between rocks of the Pan-African Orogenic Cycle and rocks of the Caririan Orogenic Cycle in Brazil, where these two groups of rocks lie opposite each other in the two continents.

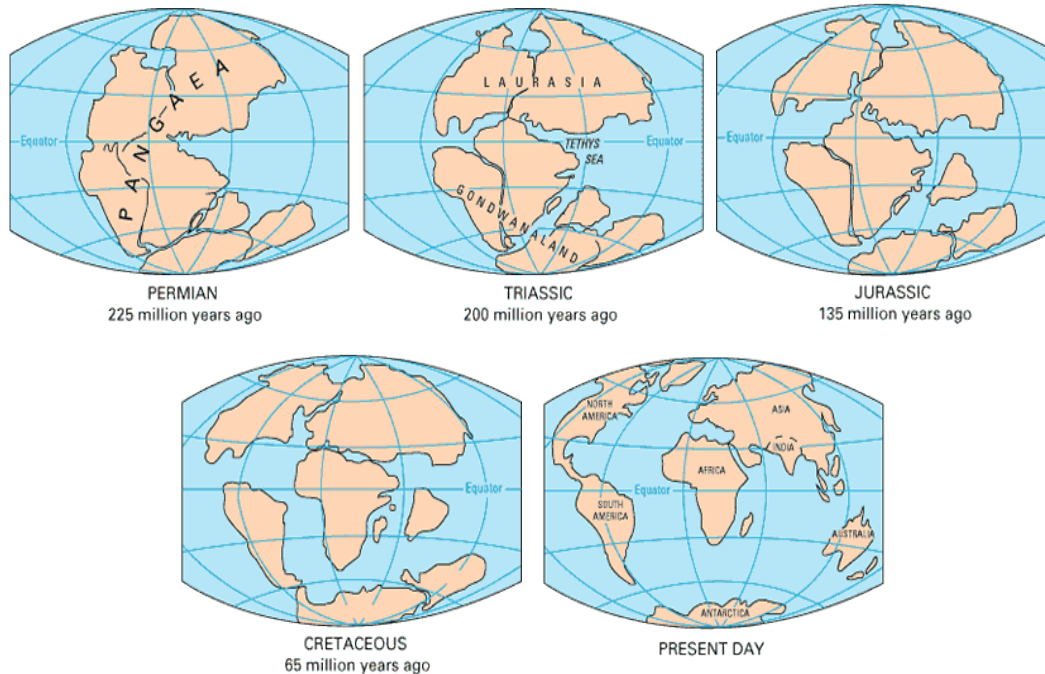
3) When Africa and South America are "fitted together," the sharply defined boundary between the Eburnean and the Pan-African age provinces in West Africa strikes directly toward the corresponding age boundary in northeast Brazil.

4) The transition from the 550-million-year Pan-African age province to the 2000-million-year age province in the Congo Craton in Cameroun-Gabon is matched in the rocks near the corresponding part of the east coast of Brazil. However the geological and age data are insufficient to do more than suggest the possibility of another age-boundary correlation here.

5) The evidence reported here supports the hypothesis of continental drift.

Em suma...

- A partir da teoria da tectônica de placas (anos 60) que teve aceitação mundial nos anos 80, os geocientistas tem visto a terra numa perspectiva global, na qual todos os seus subsistemas e ciclos estão interconectados.



- O movimento das placas é o mecanismo responsável pela reciclagem de materiais rochosos e, portanto, um dos indutores do ciclo das rochas.