

# AGG0110

# ELEMENTOS DE GEOFÍSICA

Prof. Manoel S. D'Agrella Filho

AGG0110 – Elementos de Geofísica		IAG/USP - Departamento de Geofísica	
Site da Disciplina		<a href="http://www.iag.usp.br/~agg110/">http://www.iag.usp.br/~agg110/</a>	
Prof. Marcelo Bianchi / Prof. Manoel Dagrella / Prof. Francisco Hiodo			
Plano de Ensino para 2018			
Seg.		Qui.	
19h	Docente	21h	Docente
AGOSTO			
		2/8	Francisco
6/8	Francisco	9/8	Francisco
13/8	Francisco	16/8	Francisco
20/8	Francisco	23/8	Francisco
27/8	Francisco	30/8	Francisco
SETEMBRO			
03/set	Feriado	06/set	Feriado
10/set	Francisco	13/set	Francisco
17/set	Marcelo	20/set	Marcelo
24/set	Marcelo	27/set	Marcelo
OUTUBRO			
1/10	Marcelo	4/10	Marcelo
8/10	Marcelo	11/10	Marcelo
15/10	Marcelo	18/10	Marcelo
22/10	Manoel	PROVA	Marcelo
29/10	Manoel		
NOVEMBRO			
		1/11	Manoel
5/11	Manoel	8/11	Manoel
12/11	Manoel	15/11	Feriado
19/11	Feriado	22/11	Manoel
26/11	Manoel	29/11	Manoel - ENTREGAR LISTA DE EXERCÍCIOS
DEZEMBRO			
03/12	PROVA - GEOMAGNETISMO-PALEOMAGNETISMO	17/12	Prova de Recuperação, na mesma sala e horários de aula da disciplina.

Fc, Mn e Mc são as notas de cada um dos blocos da disciplina. Fc = Francisco, Mn = Manoel e Mc = Marcelo. Cada docente pode escolher subdividir a sua nota entre provas e exercícios a seu critério. Nf = Nota final do aluno (Nf < 3.0 reprovado, 3.0 <= Nf < 5 direito a recuperação e Nf >= 5.0 aprovado – esses conceitos são válidos apenas para aqueles que obtenham o mínimo de 70% de presença nas aulas !)

# **AGG0110 – ELEMENTOS DE GEOFÍSICA**

- **PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E  
PALEOMAGNETISMO**

- Prof. Manoel S. D'Agrella Filho

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **1-** Introdução histórica
- **2-** Física do magnetismo
  - **2.1-** Definição de campo de uma força
  - **2.2-** Origem do campo magnético
  - **2.3-** Campo de um dipolo
  - **2.4-** Momento de dipolo
  - **2.5-** Definição de magnetização e suscetibilidade magnética
  - **2.6-** Unidades

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **3-** Coordenadas e elementos magnéticos
- **3.1-** Principais características do campo Geomagnético.
- **3.2-** Cartas magnéticas: declinação, inclinação e intensidade do campo.
- **3.3-** Observatórios magnéticos.

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **4-** Origem do campo externo
- **4.1-** Atmosfera: composição, estrutura (ozonoesfera, ionosfera) e temperatura (Troposfera, estratosfera, Mesosfera, termosfera).
- **4.2-** Ionosfera.
- **4.3-** Vento solar.
- **4.4-** Magnetosfera (interação do vento solar com o campo geomagnético)
- **4.5-** Variações temporais: diurna e tempestades magnéticas
- **4.6-** Correntes ionosféricas: cinturão de van Allen; Auroras

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **5-** Origem do campo interno
- **5.1-** Campo dipolar
- **5.2-** Campo não dipolar
- **5.3-** Variação secular do campo geomagnético
- **5.4-** Reversões do campo geomagnético

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **6-** Origem do campo geomagnético
- **6.1-** O núcleo da Terra
- **6.2-** Modelo de dínamo
- **6.3-** Fontes de energia

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **7-** Magnetismo das rochas
- **7.1-** Propriedades magnéticas dos materiais: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo
- **7.2-** Histerese
- **7.3-** Minerais magnéticos
- **7.4-** Identificação de minerais magnéticos
- **7.5-** Magnetizações das rochas: MRN, MRT, MRD, MRQ, MRI, MRV
- **7.6-** Dependência dos tamanhos de grãos dos minerais ferrimagnéticos
- **7.7-** Tratamentos de laboratório
- **7.8-** Anomalias magnéticas: aplicações

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **8-** Paleomagnetismo e tectônica de placas
- **8.1-** Modelo de campo de dipolo geocêntrico axial
- **8.2-** Análise de componentes de magnetização
- **8.3-** Desmagnetização térmica e por campos magnéticos alternados
- **8.4-** Separação de componentes
- **8.5-** Testes de campo
- **8.6-** Pólos paleomagnéticos
- **8.7-** Curva de deriva polar aparente
- **8.8-** Reconstruções paleogeográficas
- **8.9-** Paleomagnetismo e a deriva dos continentes

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- **Bibliografia**

- “Decifrando a Terra”, Teixeira, W., Toledo, M.C.M., Fairchild, T.R., Taioli, F., 2000
- “Fundamentals of Geophysics” Lowrie, W., 1997
- “Introdução à Geofísica Espacial”, Kirchhoff, V.W.J.H., 1991.
- “Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes”, Butler, R.F., 1992.
- (Livro disponível no site:  
[www.geo.arizona.edu/Paleomag/book](http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book))
- J M A de Miranda (vários capítulos), Internet.
- Lisa Tauxe, 2005, *Lectures in Paleomagnetism*.  
<http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>
- Apostilas disponíveis no site da disciplina:  
<http://www.iag.usp.br/~agg110/>

# PROGRAMA DE GEOMAGNETISMO E PALEOMAGNETISMO

- Site da disciplina:

<http://www.iag.usp.br/~agg110/>

- **Uma lista de exercícios (20%)**
- **Data máxima de entrega: 29/11/18**
- **Prova dia 03/12/18 (80%)**

# Campo Geomagnético

Nossa primeira experiência com o campo geomagnético é através da bússola.

# Magnetismo

- Os primeiros contatos com o magnetismo surgiram de um mineral que tinha uma curiosa propriedade atrativa.
  - Mineral Loadstone –
    - Forma de ocorrência natural da Magnetita.
      - Load – caminho, curso
        - Stone – pedra
  - Pedra que mostra o caminho

# Origem da palavra magnetismo

- Século V A.C. – Ásia Menor
- região de domínio grego – hoje Turquia
- Foi fundada uma Colônia - **Magnésia**
- Após 133 A.C – Império Romano
- Jazida de magnetita
- Latim – chamada de **magneta**
- Originou a palavra **magnetismo**

- 800 A.C. – Filósofos gregos já falavam da magnetita em seus relatos
- Os gregos acreditavam que a magnetita possuía alma
- Eles relacionavam as forças magnéticas e elétricas à forças invisíveis.
- 300 A.C. – Os chineses já conheciam as propriedades da magnetita

## Chineses – Dinastia Han (300 – 200 AC)

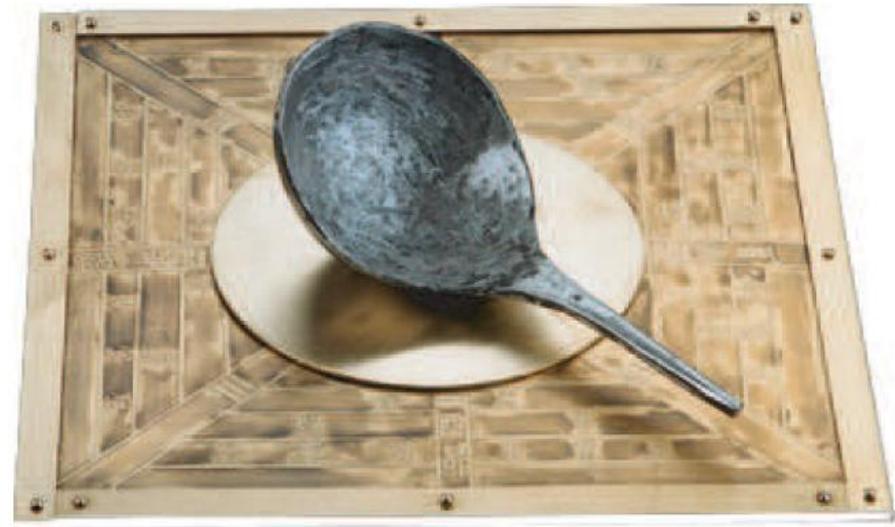
A magnetita alinhava-se na direção N-S magnética.

Primeira bússola: século II AC, na China (colher que aponta para o sul)

Bússola suspensa por um pivô – anterior a 1000 DC

Variação do campo magnético: Yi-Ching (variação de declinação desde 750 DC)

a)



No Ocidente:

Chegada da bússola: século XII (Petrus Peregrinus)

Acreditava-se que ela apontava para a estrela polar.

Descoberta de variações no campo pelos europeus: 1634 DC !

# Magnetismo Terrestre

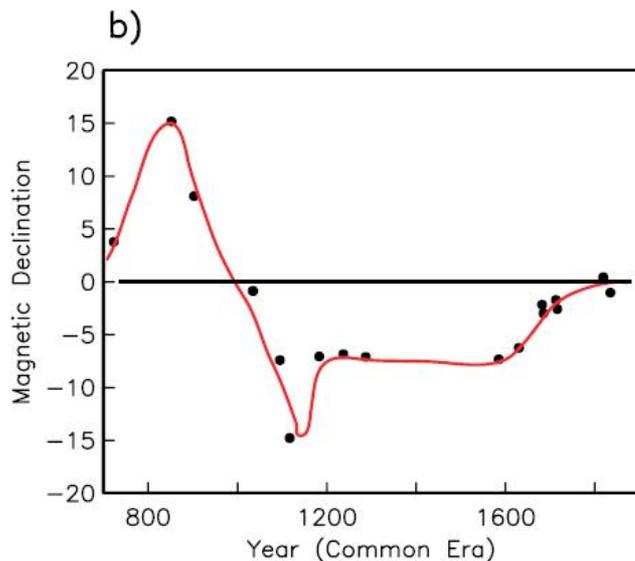
- 1269 – Pierre Pélerin de Maricourt
- Petrus Peregrinus (Latim)
- Escreveu o primeiro tratado de física experimental.
  - Epistola “de Magnete”
- Leis simples da atração magnética

# Terrela – esfera de magnetita

- Esfera de magnetita sobre uma placa de ferro – comportamento da esfera.
- Traçou linhas ao longo de meridianos que convergiam em dois pontos antipodais
  - Polos do magneto
  - Análogo aos polos geográficos

# Declinação Magnética

- 500 D.C. – Dinastia Tang - China
- A bússola não aponta para o norte geográfico.
- O desvio local entre o norte magnético e geográfico – Declinação magnética.



Varição do campo magnético: Yi-Ching (variação de declinação desde 750 DC).

# Declinação Magnética

- Somente no Século XIV – navios britânicos eram equipados com bússola
- Verificou-se que a declinação muda com a posição no globo.
- Modelo mundial da declinação magnética.

# Inclinação magnética

- Georg Hartmann – 1544
- Clérigo alemão
- Uma agulha magnetizada não assume a posição horizontal.
- O desvio em relação a horizontal é chamada de **Inclinação magnética**.

# Inclinação magnética

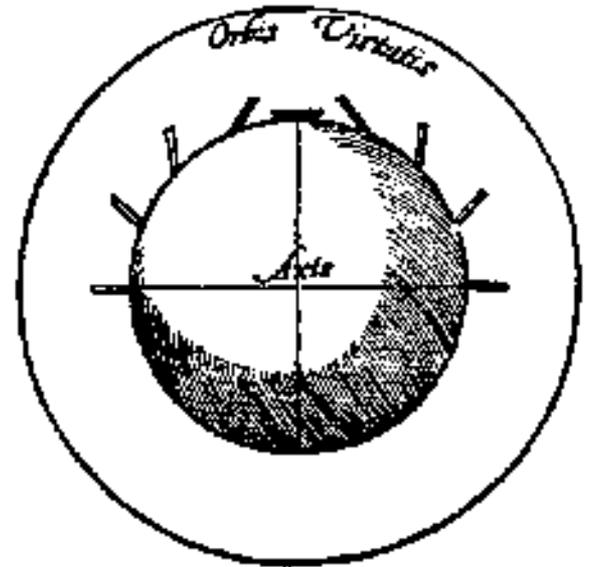
- Georg Hartman relatou sua descoberta ao seu superior,
  - Duque Albrecht de Prússia.
- Sua carta foi descoberta somente em 1831.
- Robert Norman - Cientista Inglês
- Redescobriu a inclinação do campo magnético da Terra em 1576

# De magnete

- William Gilbert (1544 -1603)
- Cientista Inglês – Rainha Elizabeth
- Publicou “De Magnete” em 1600
- Um tratado que resumia todo o conhecimento de magnetismo, incluindo os 17 anos de sua própria pesquisa.
- Seu trabalho foi publicado quase três séculos depois do trabalho de Petrus Peregrinus.

# De Magnete

- - foi o primeiro a distinguir entre efeitos elétricos e magnéticos;
- - usando pequenas agulhas magnéticas, colocada sobre uma esfera de magnetita reconheceu:
  - - os polos magnéticos
  - - e o equador magnético



# De Magnete

- Gilbert teve a perspicácia de verificar a analogia existente entre a atração de uma esfera de magnetita e as propriedades magnéticas da Terra;
- Ele reconheceu que a própria Terra era um grande ímã;
- Foi o primeiro reconhecimento inequívoco de uma propriedade geofísica;

# De Magnete

- Precedeu as leis de gravitação de Newton (1642-1727), em seu trabalho Principia (1687), por quase um século;
- Foi considerado o trabalho mais importante de magnetismo até o século XIX.

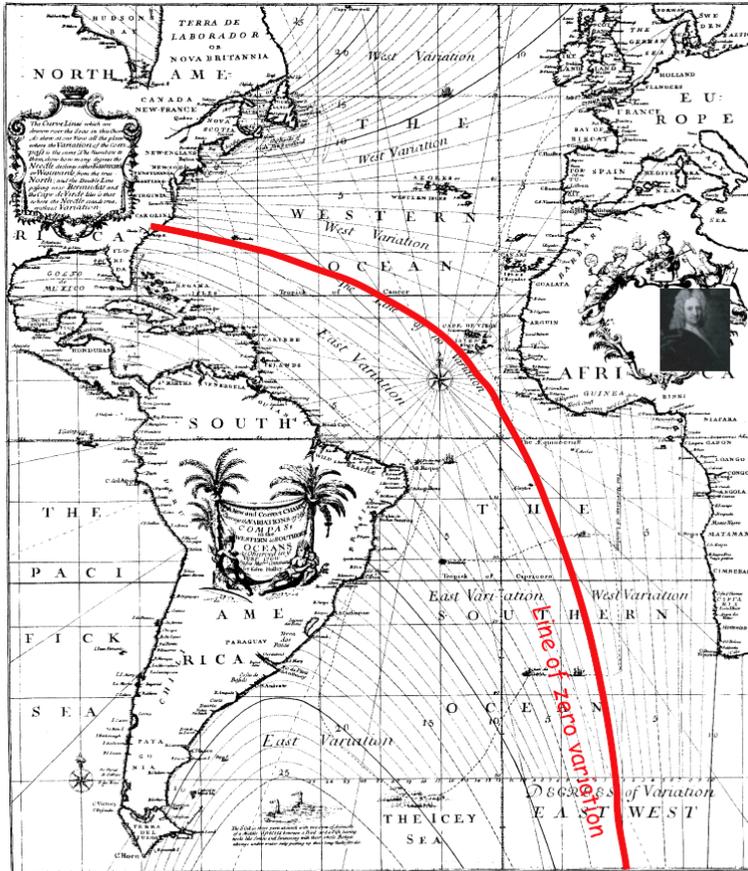
# Variação secular

- Variação lenta do campo geomagnético com o tempo
- Henry Gellibrand (1597-1637)
- Matemático e Astrônomo
- 1634 – verificou que a declinação magnética varia no tempo através de três medidas

# Variação Secular

- William Borough – 1580
- Edmund Gunter – 1622
- Henry Gellibrand – 1634
  
- Decrescimo da declinação –  $7^\circ$
- Usando somente estes três valores, ele deduziu o que conhecemos como **Variação Secular**.

# Variação Secular



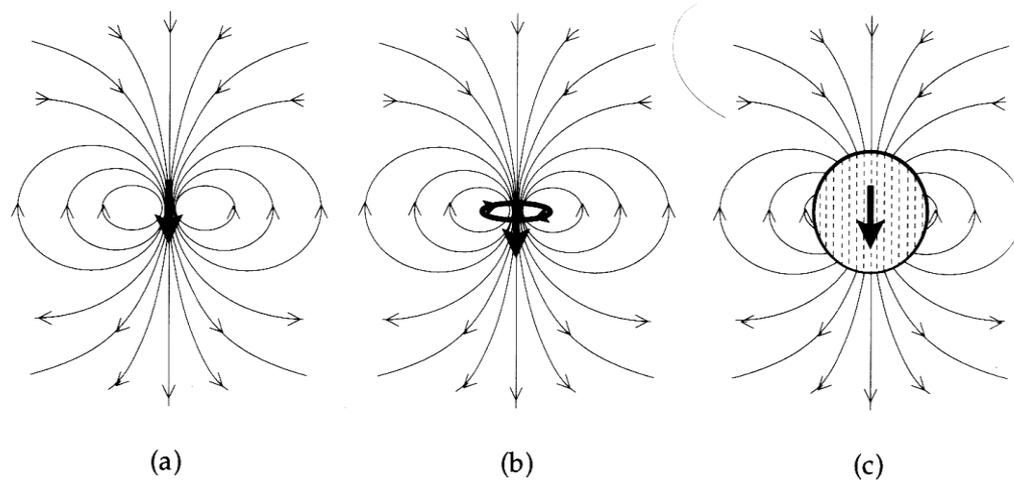
- Gradualmente, a variação do campo magnético sobre a superfície da Terra foi sendo estabelecida.
- Entre 1698 e 1700, Edmund Halley (astrônomo e matemático Inglês) realizou uma importante pesquisa oceanográfica no Oceano Atlântico.
- Em 1702, publicou a primeira carta de declinação magnética.

# Origem do Campo Geomagnético

- Em 1600, Gilbert já havia proposto que a Terra se comportava como um imenso ímã.
- Carl F. Gauss (1777-1855) desenvolveu a matemática de análise por harmônicos esféricos.
- Com esta matemática, ele demonstrou que a maior parte do campo geomagnético era de origem interna e que mais de 90% dele podia ser representado pelo campo de um dipolo centrado na Terra.

# Campo dipolar

Fig. 5.1 The characteristic field lines of a magnetic dipole are found around (a) a short bar magnet, (b) a small loop carrying an electric current, and (c) a uniformly magnetized sphere.



# Origem do campo geomagnético

- Blackett (1952)
- Propôs que qualquer corpo em movimento de rotação gera campo magnético.
- Desenvolveu um aparelho para medidas de campo magnético fraco, originado por uma pequena esfera de ouro.
- Seu experimento não deu certo, mas seu aparelho pode ser usado para outros propósitos, como no estudo paleomagnético.

# Paleomagnetismo

- Estudo do campo geomagnético registrado pelas rochas (magnetismo fóssil)
- A rocha contém pequenos minerais magnéticos (magnetita, hematita, pirrotita,...) que são capazes de guardar a direção do campo geomagnético na época de sua formação.
- Com isto, podemos estudar o comportamento do campo geomagnético no passado.
- Foi crucial para a comprovação da deriva continental – Tectônica de Placas

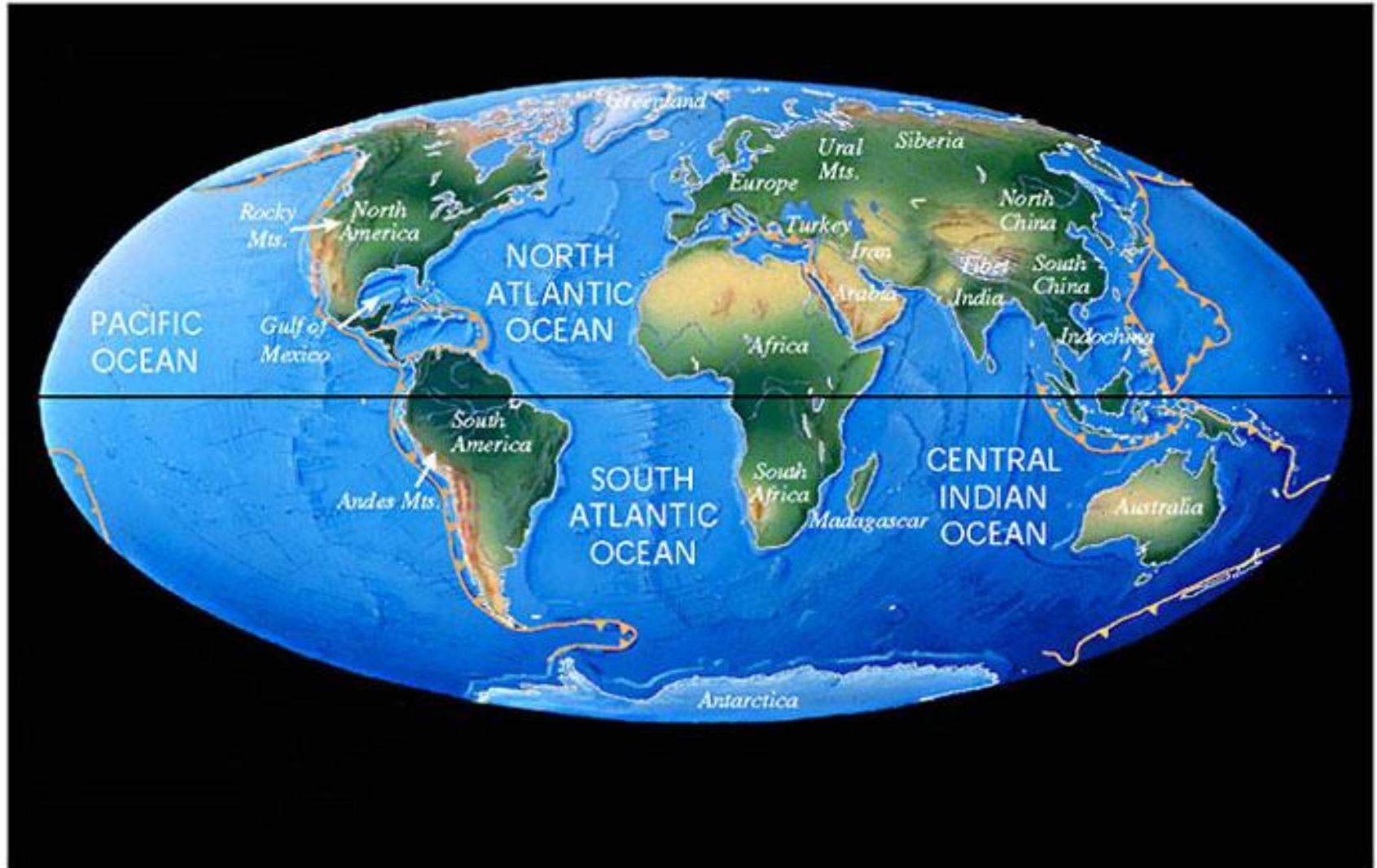
# DERIVA DOS CONTINENTES



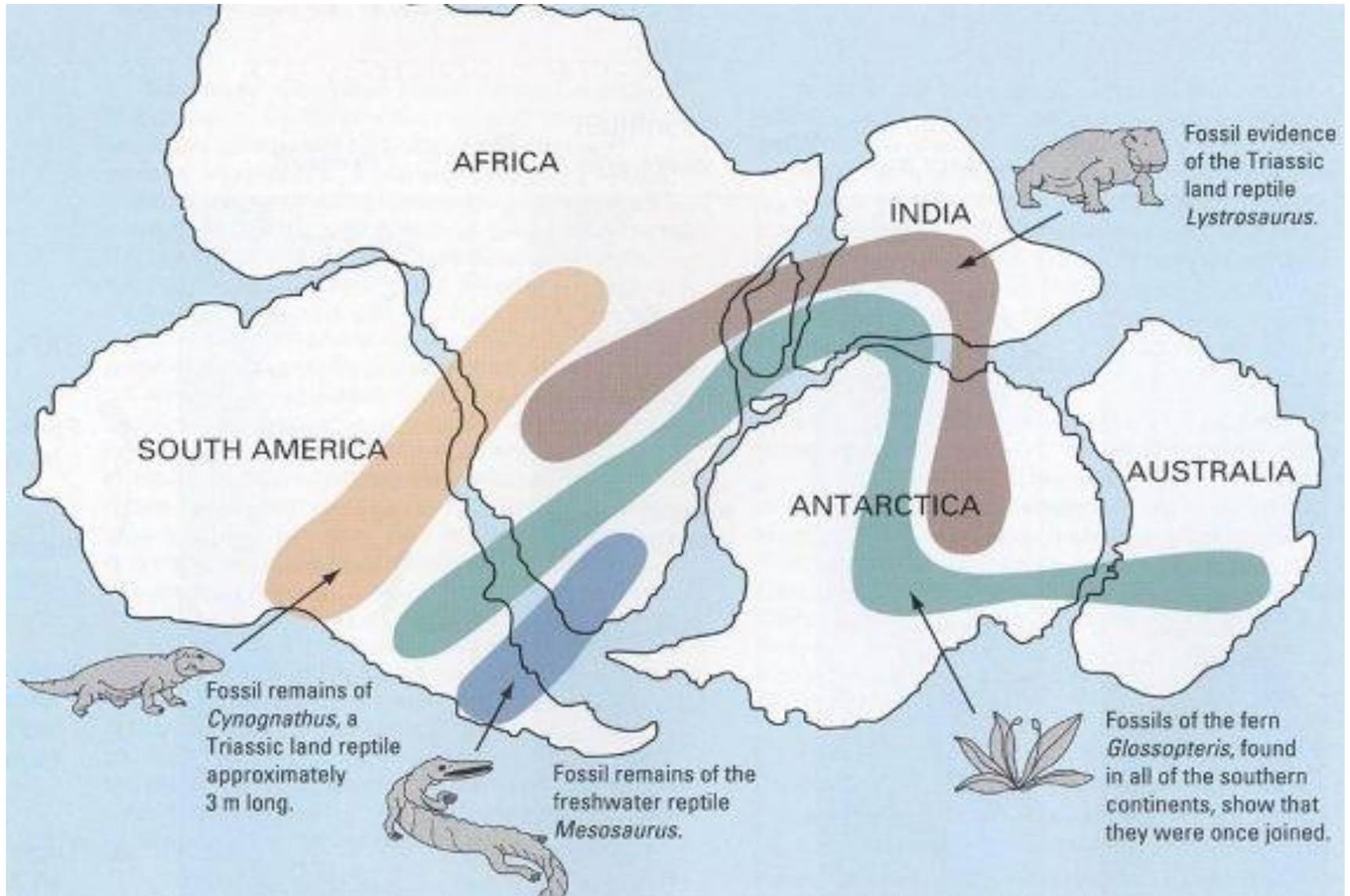
Alfred Wegener

Em 1915, o alemão Alfred Wegener publicou a Teoria da Deriva dos Continentes, propondo que há 200 milhões de anos atrás todos as massas emersas de terra estariam reunidas em um único super-continente, denominado Pangea, envolto por um mar universal, a Panthalassa.

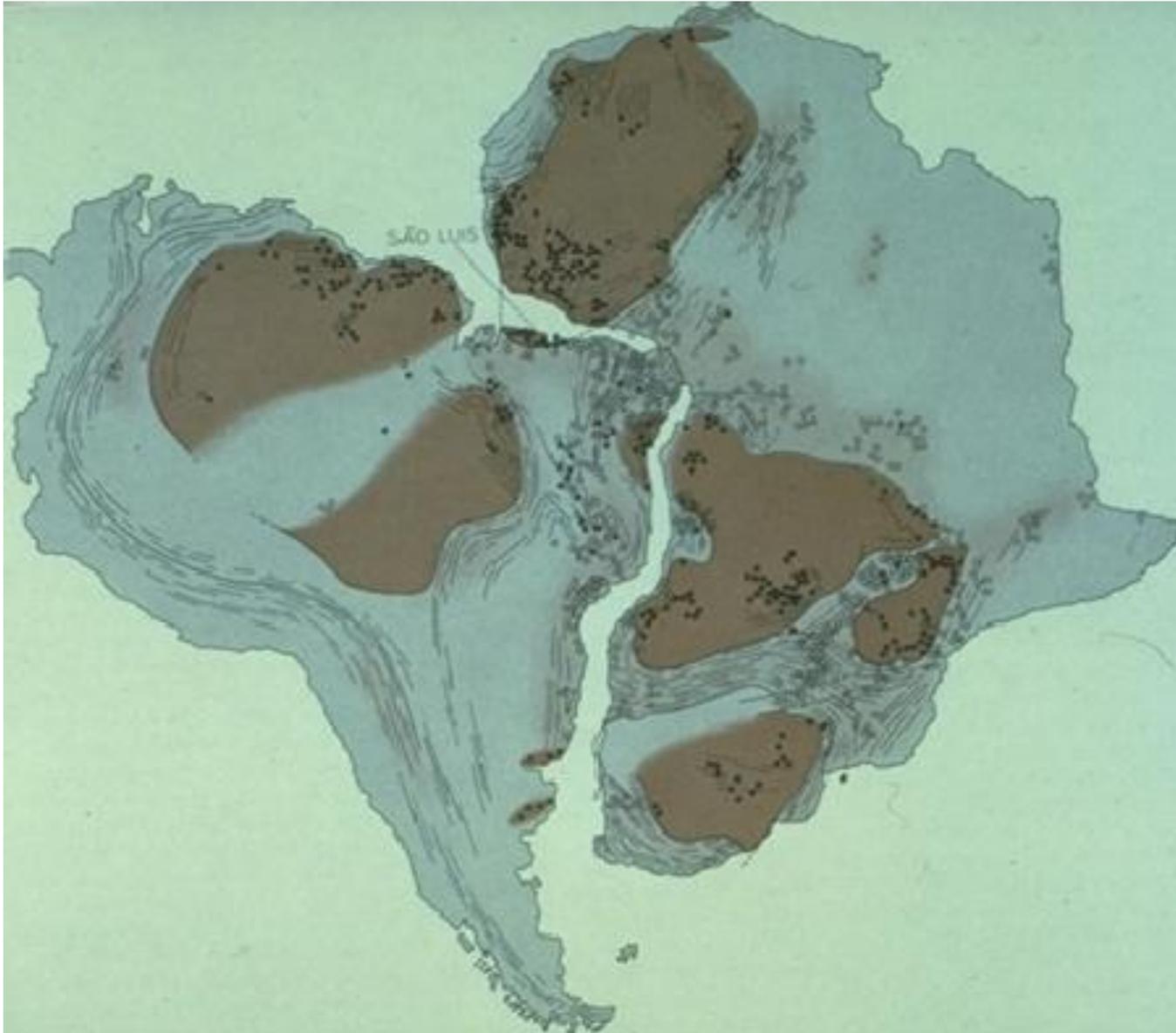
# AJUSTES DAS LINHAS DE COSTAS



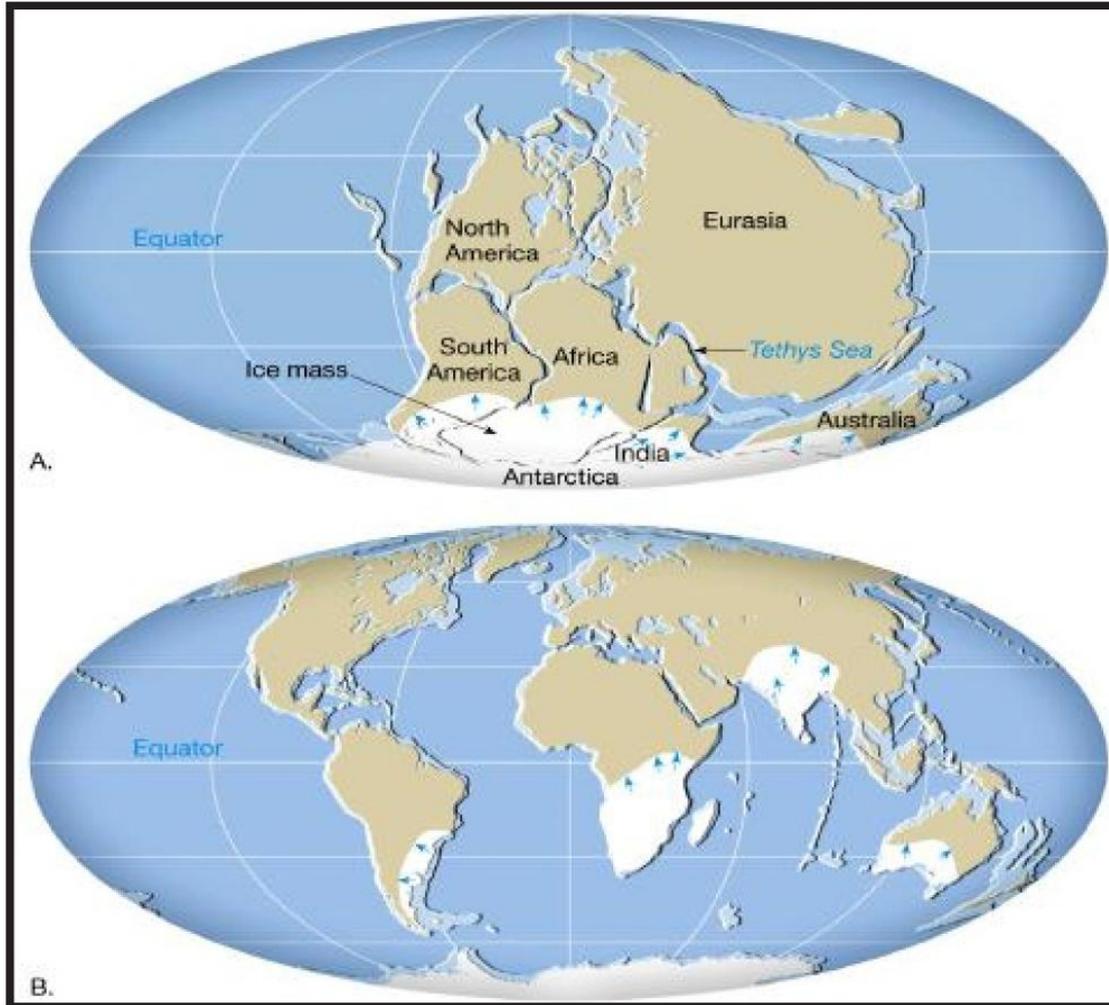
# DISTRIBUIÇÃO DE FÓSSEIS ATRAVÉS DOS CONTINENTES QUE FORMAVAM O GONDWANA



# EVIDÊNCIAS GEOLÓGICAS

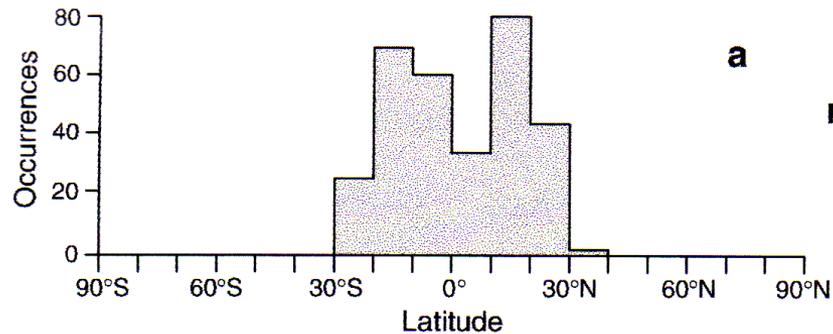


# EVIDÊNCIAS CLIMÁTICAS

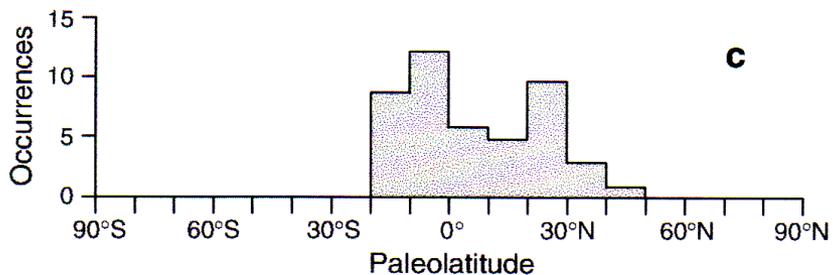
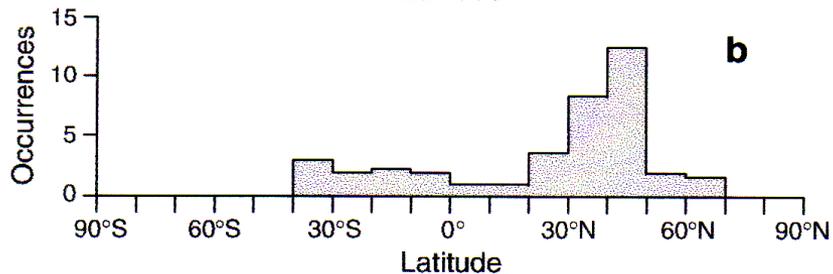


Glaciações do  
Permiano  
280 Ma

# Evidências paleoclimáticas



Fi Corais, evaporitos e sedimentos vermelhos são encontrados em regiões próximas de equador.



A Figura mostra em (a) um histograma com as latitudes em que ocorrem os corais modernos; em (b) um histograma com as latitudes atuais em que ocorrem antigos corais e em (c) um histograma com as paleolatitudes de corais fósseis na configuração do Gondwana.

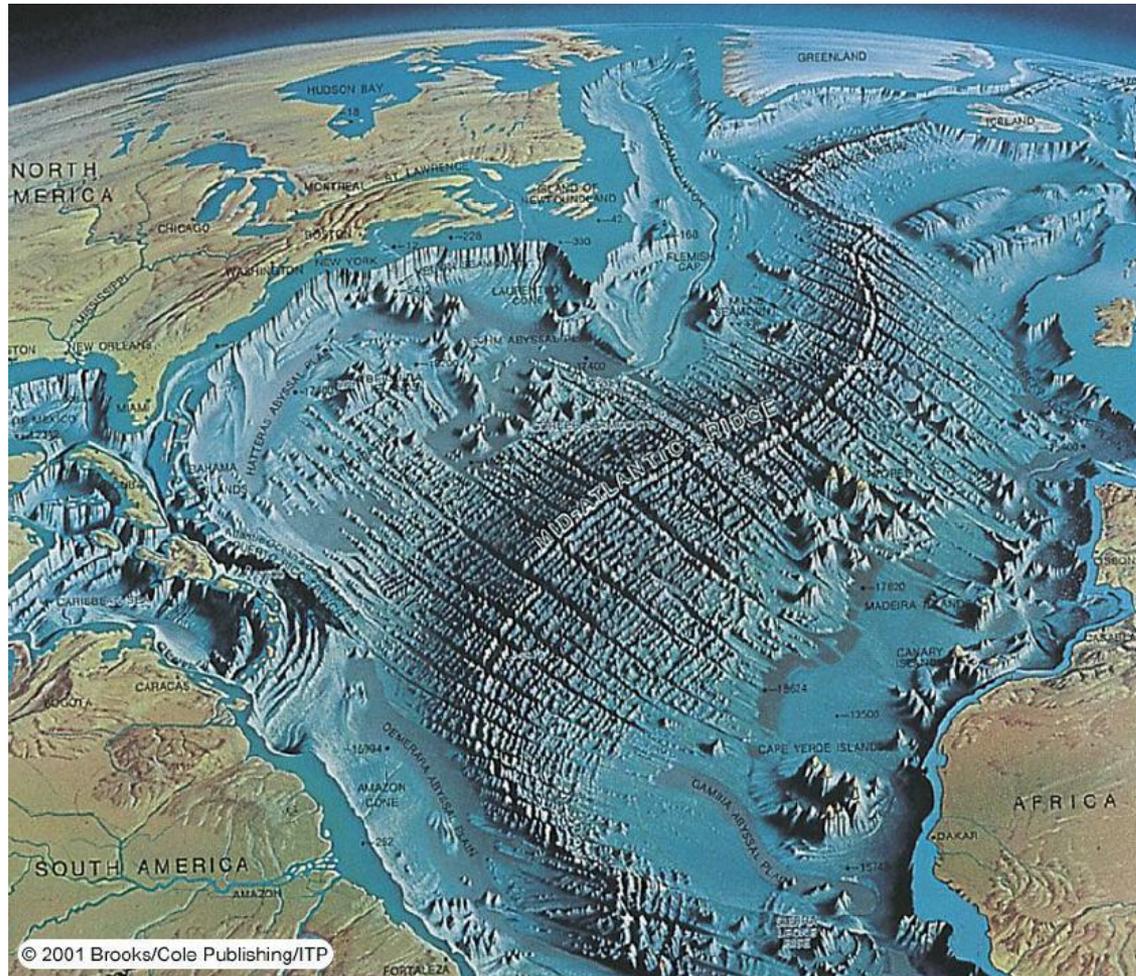
# O GRANDE DEBATE

- Wegner foi criticado e até ridicularizado pelos cientistas da época;
- A principal objeção à sua hipótese foi a dificuldade de se encontrar um mecanismo capaz de mover grandes massas continentais através do globo;
- A teoria da deriva continental não foi aceita pela comunidade científica durante a sua vida;
- Ele morreu em 1930, mas a sua ideia não morreu com ele.

# COMEÇO DA REVOLUÇÃO CIENTÍFICA

- Durante os anos das décadas de 50 e 60, a evolução tecnológica permitiu uma série de estudos do nosso planeta;
- Sonares permitiram estudar a topografia do fundo oceânico;
- magnetômetros foram desenvolvidos, os quais permitiram determinar o campo geomagnético e a magnetização das rochas;
- Datações radiométricas permitiram determinar as idades das rochas.

# FUNDO OCEÂNICO

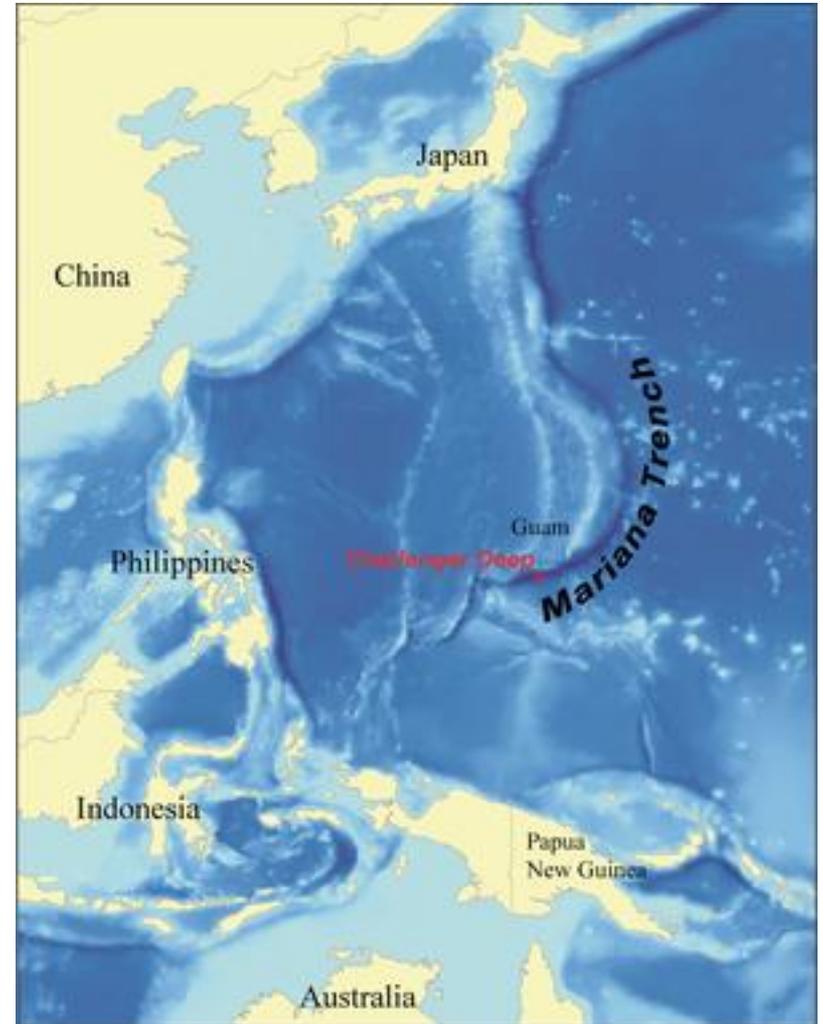


H. Hess descobriu a existência da cadeia de montanhas meso-Atlântica, a qual é paralela às margens continentais de ambos os lados do Atlântico.

# FOSSAS GEOLÓGICAS



Fossa de Peru-Chile, também conhecida como fossa de Atacama. Profundidade máxima de 8,065 km.



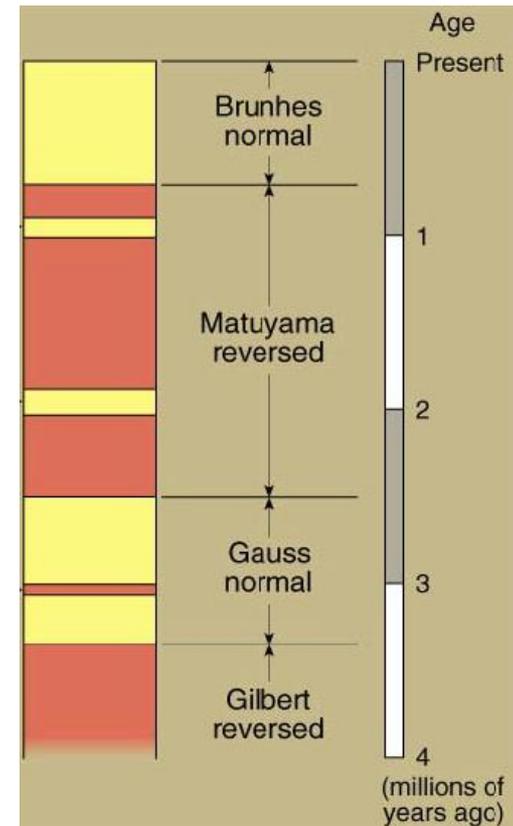
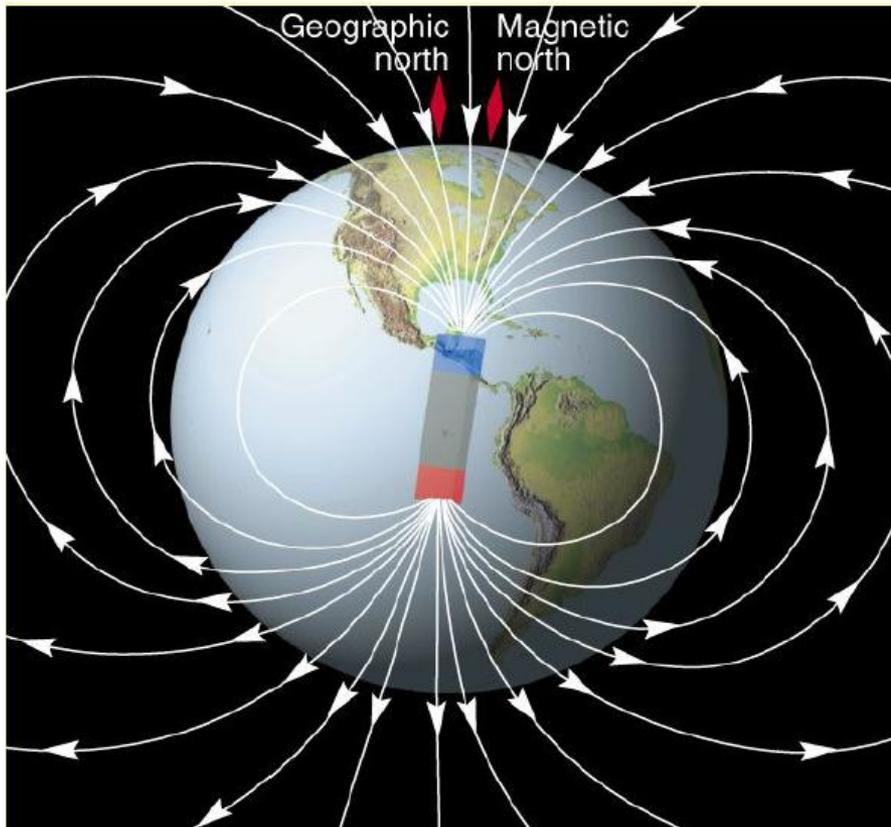
Profundidade máxima de 10,911 km

# HIPÓTESE DO ESPALHAMENTO DO ASSOALHO OCEÂNICO

- Rochas do assoalho oceânico foram amostradas e datadas;
- Descobriu-se que elas eram geologicamente jovens ( $< 200$  Ma) – muito jovens próximo às cadeias meso-oceânicas e iam ficando progressivamente mais antigas quando progressivamente mais distantes das cadeias;
- A hipótese do espalhamento do assoalho oceânico foi proposta por Harry Hess no início da década de 60.

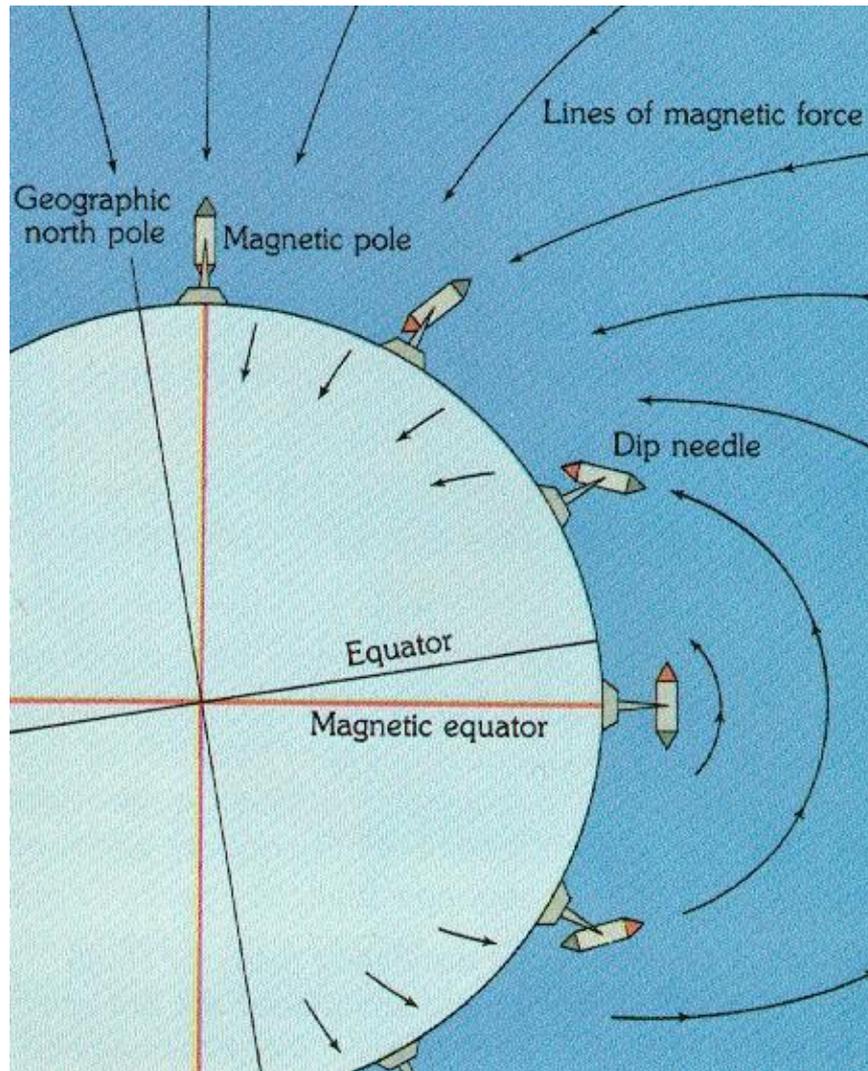
# MAGNETISMO

- O campo da Terra é essencialmente dipolar e inverte de polaridade durante o tempo geológico.



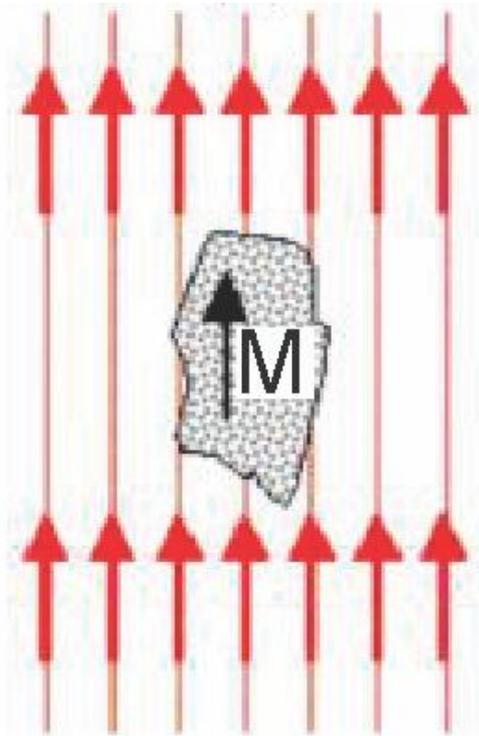
Amarelo – polaridade normal;  
Vermelho – polaridade reversa

As rochas registram a direção do campo geomagnético como se fossem ímãs imantados

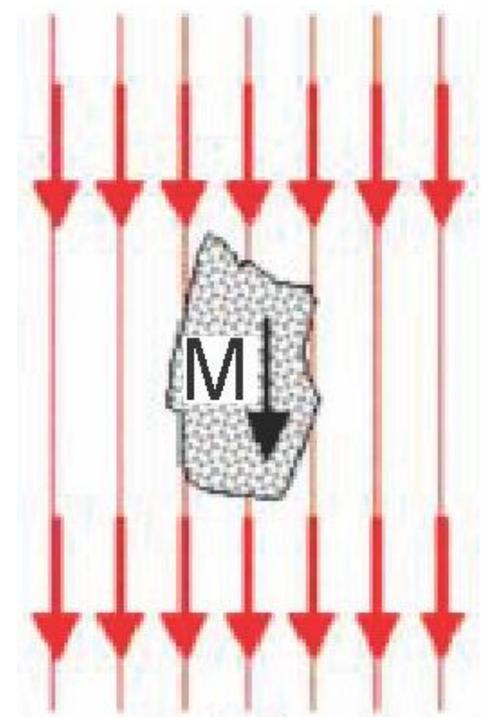


# Magnetização das rochas

Campo geomagnético normal

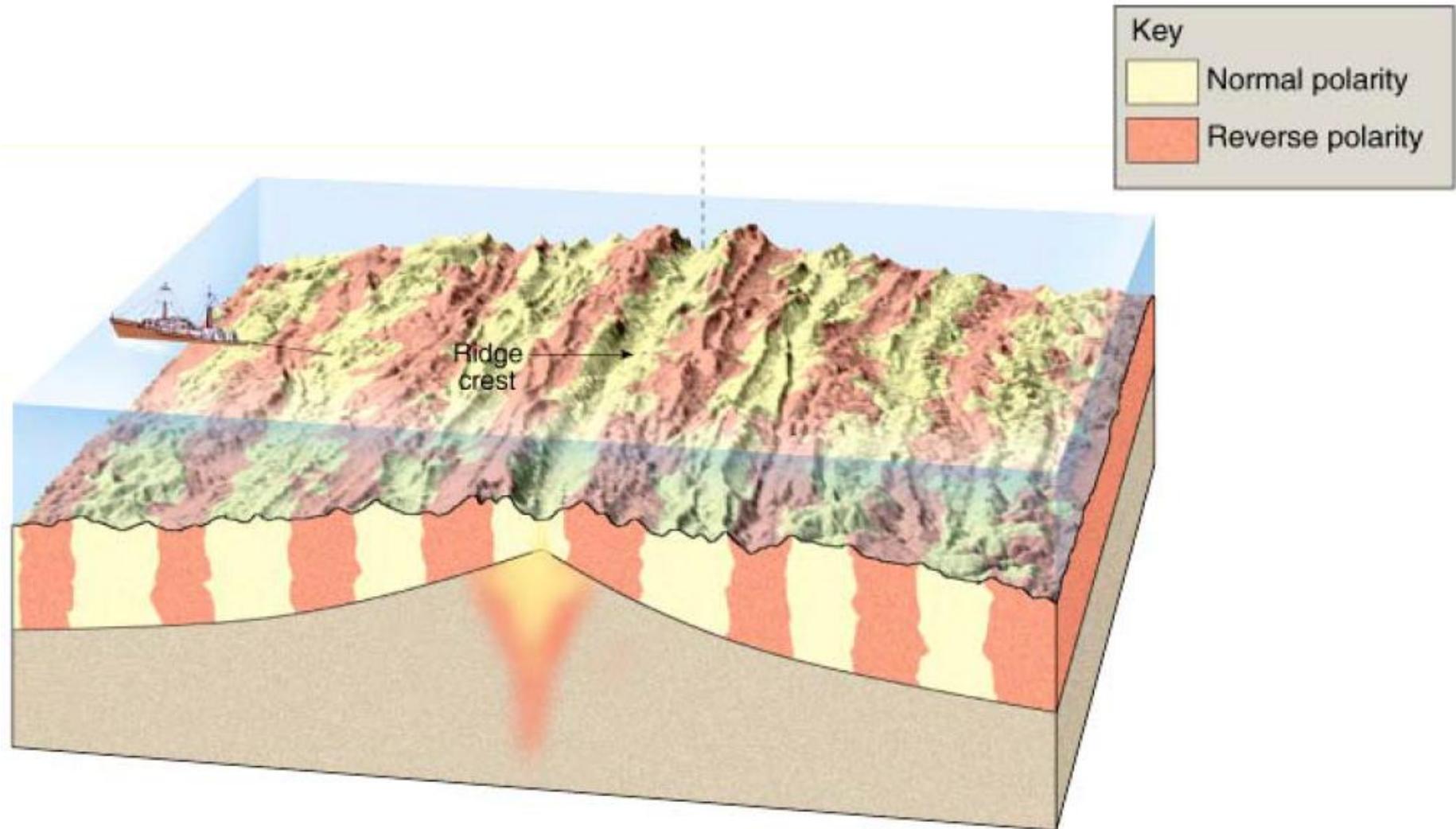


Campo geomagnético reverso

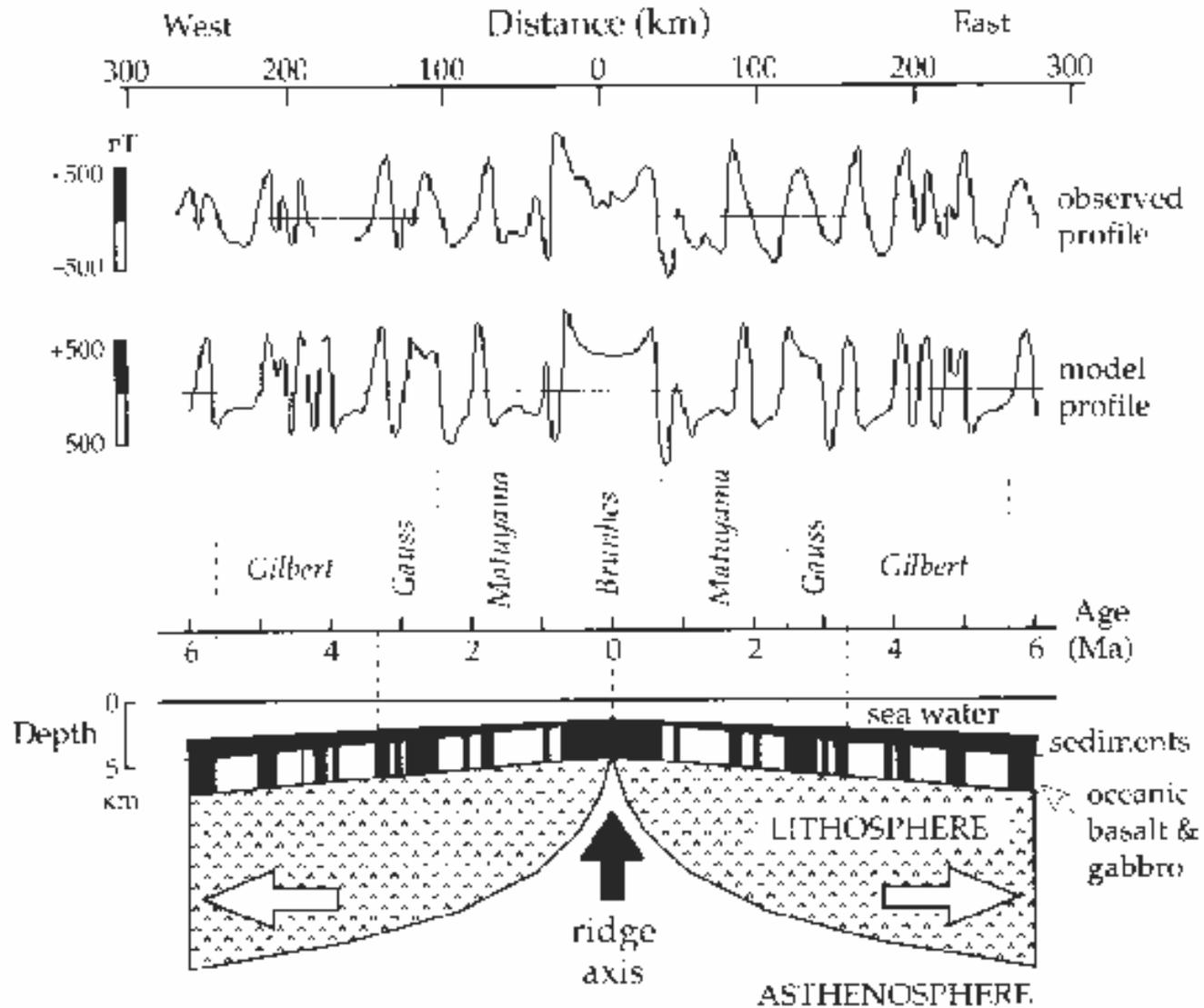


Durante a formação da rocha, ela adquire uma magnetização paralela ao campo geomagnético. O campo geomagnético fica armazenado na rocha.

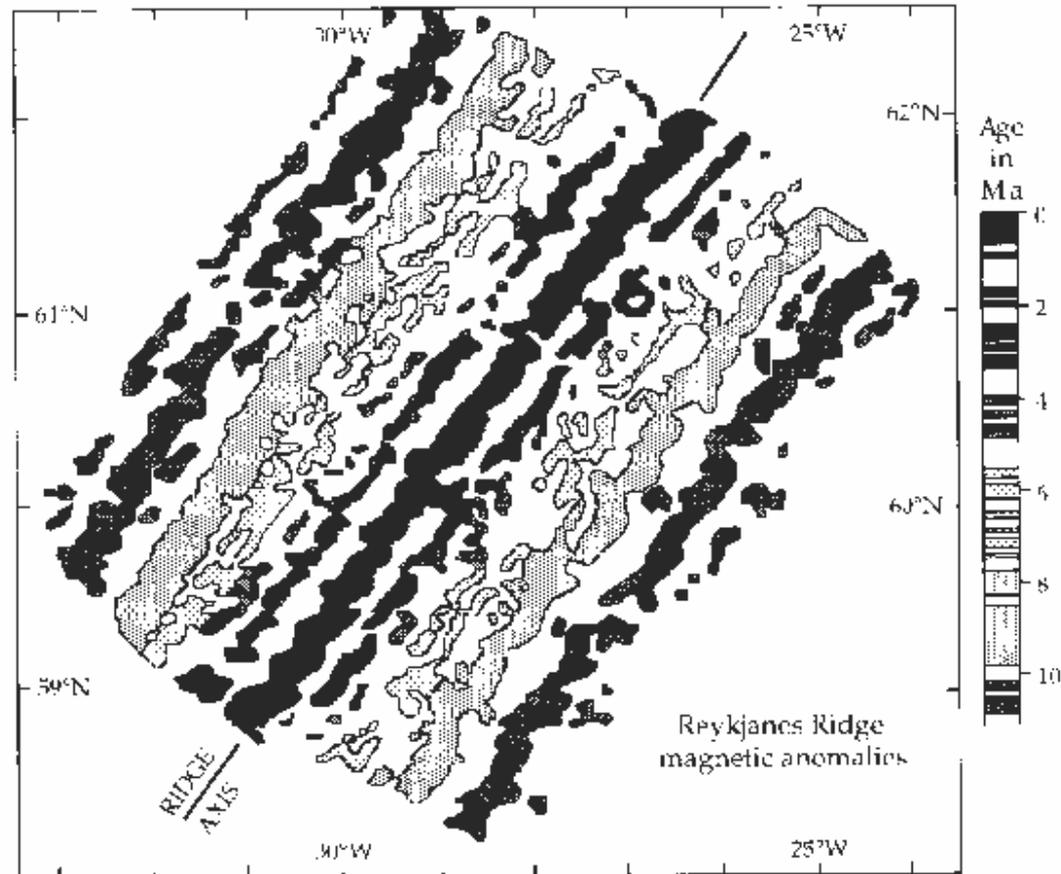
# ORIENTAÇÃO DO CAMPO GEOMAGNÉTICO REGISTRADO PELA ROCHA DO FUNDO OCEÂNICO



# ANOMALIAS MAGNÉTICAS DO FUNDO OCEÂNICO



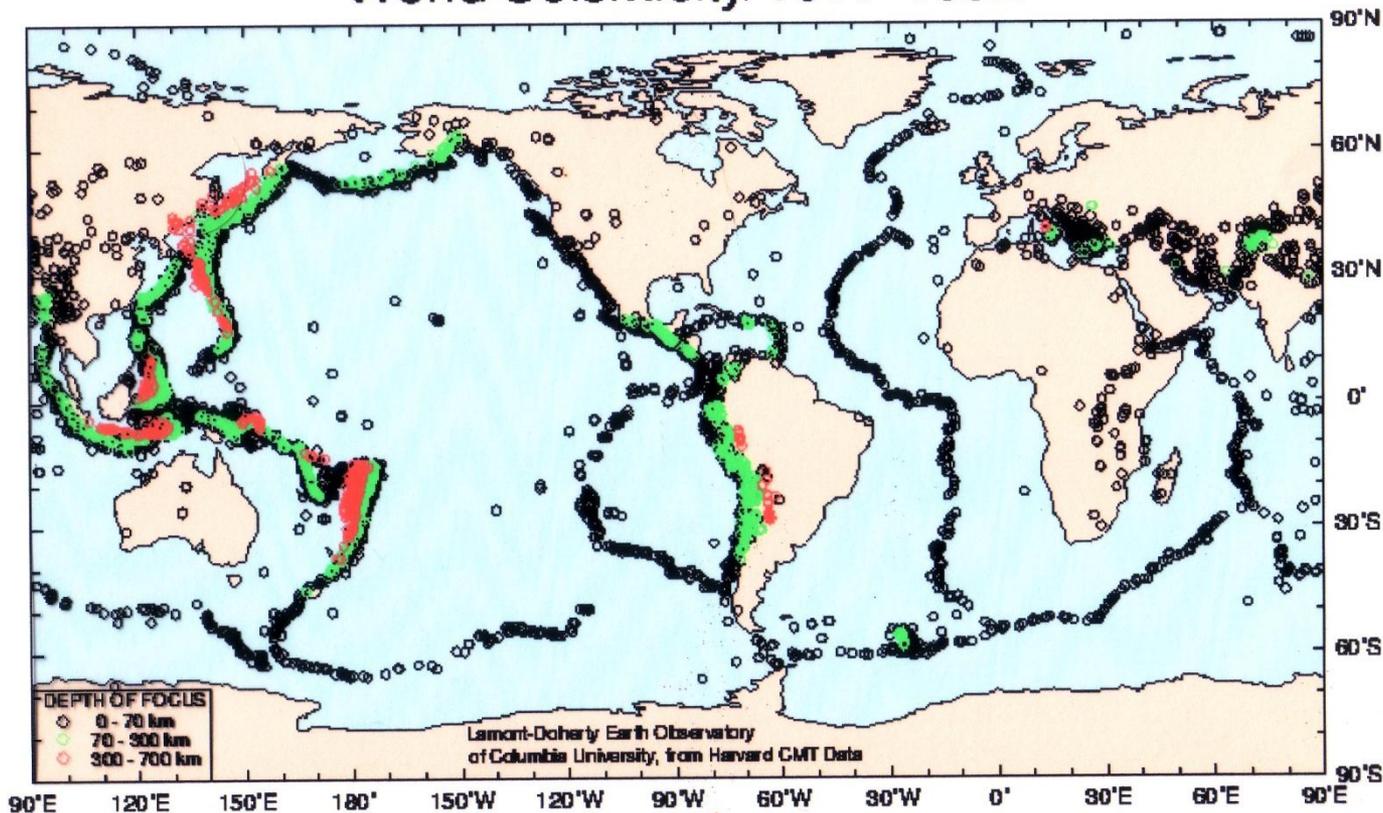
# PADRÃO ZEBRADO



Em 1963, F. Vine e D. Matthews ligaram a descoberta das faixas magnéticas na crosta oceânica paralelas às dorsais, ao conceito de Hess de espalhamento do assoalho oceânico.

# SISMICIDADE MUNDIAL

World Seismicity 1977-1992



## Energia liberada anualmente

Cinturão Circum-Pacífico – 75-80%;

Zona Mediterrânea-Asiática – 15-20%;

Cadeias Meso-Oceânicas – 3-7%

Focos rasos (0-70 km) – 85%;

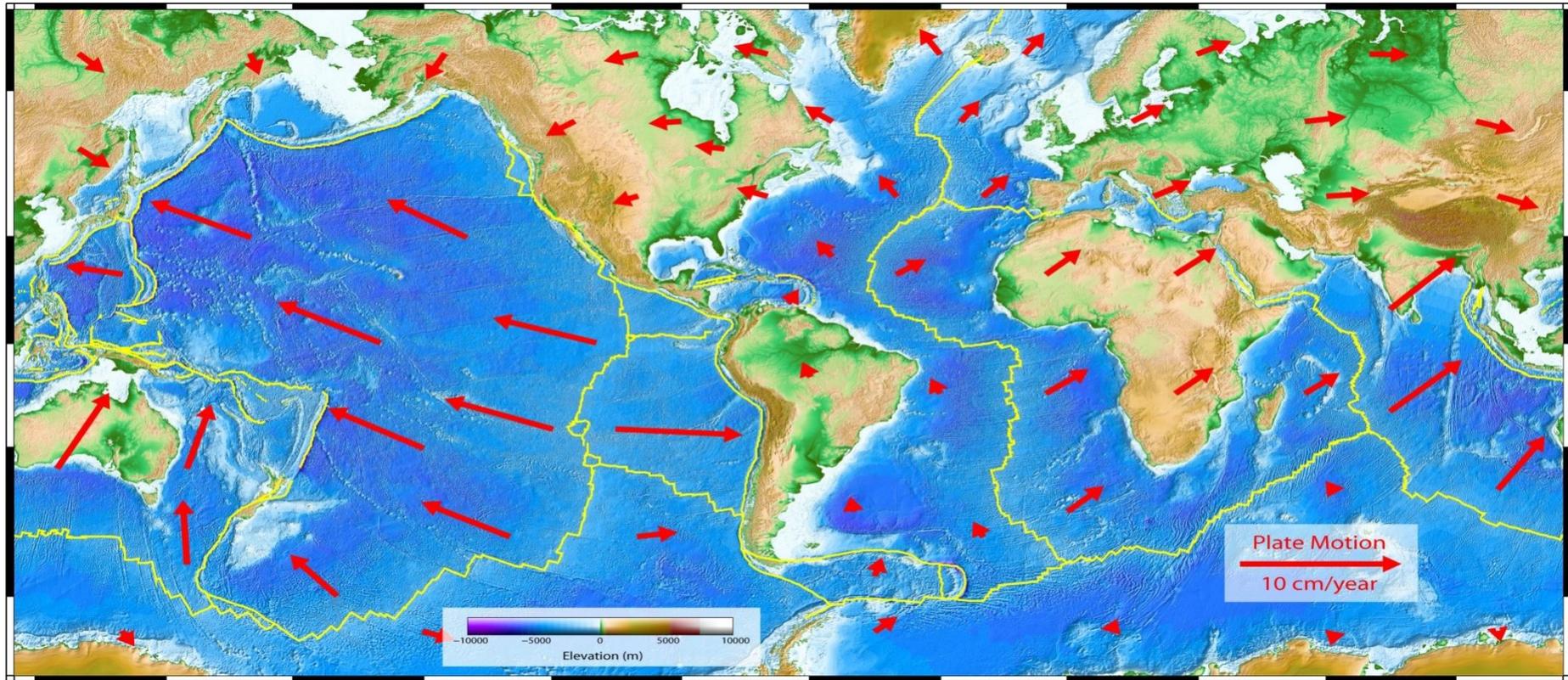
Focos intermediários (70-300 km) – 12%;

Focos profundos (300-700 km) – 3%

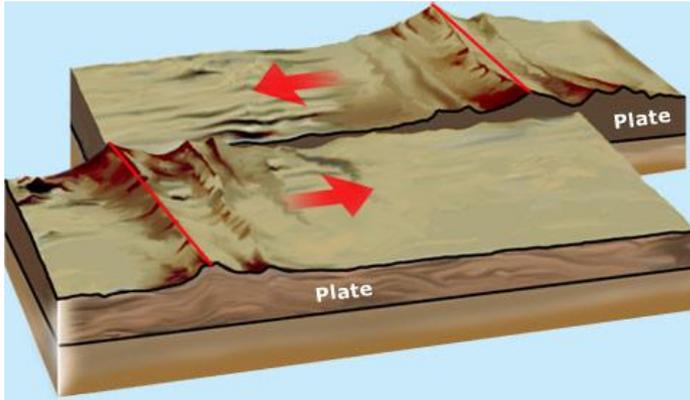
Padrão em linha – esforços tracionais

Padrão em faixa – esforços compressivos

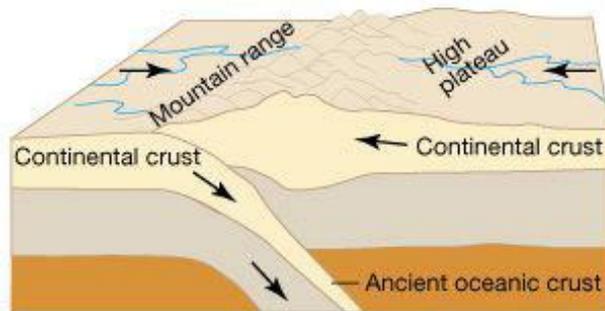
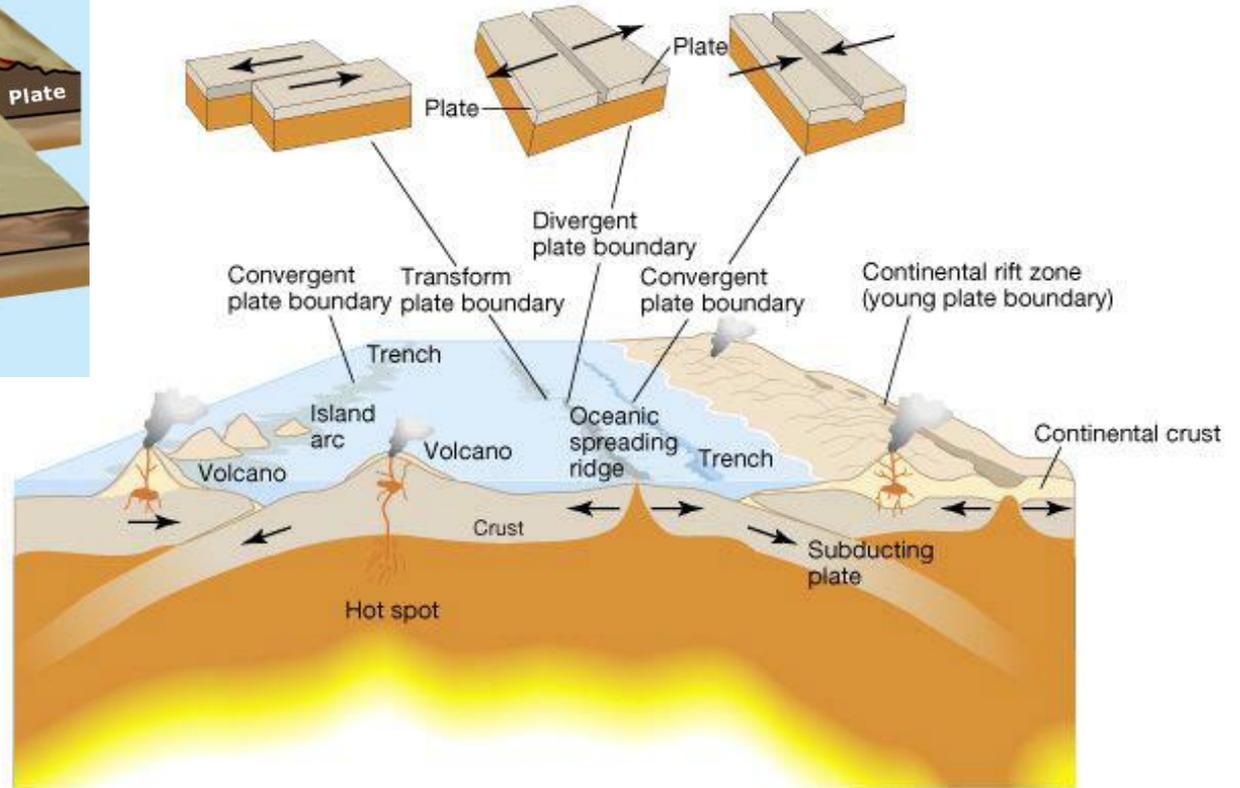
# MOVIMENTO DAS PLACAS TECTÔNICAS



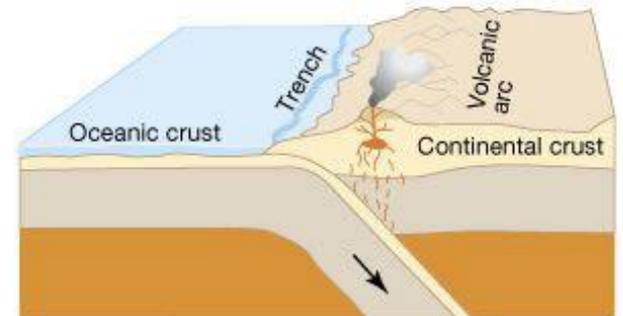
# TECTÔNICA DE PLACAS



Falhas transformantes

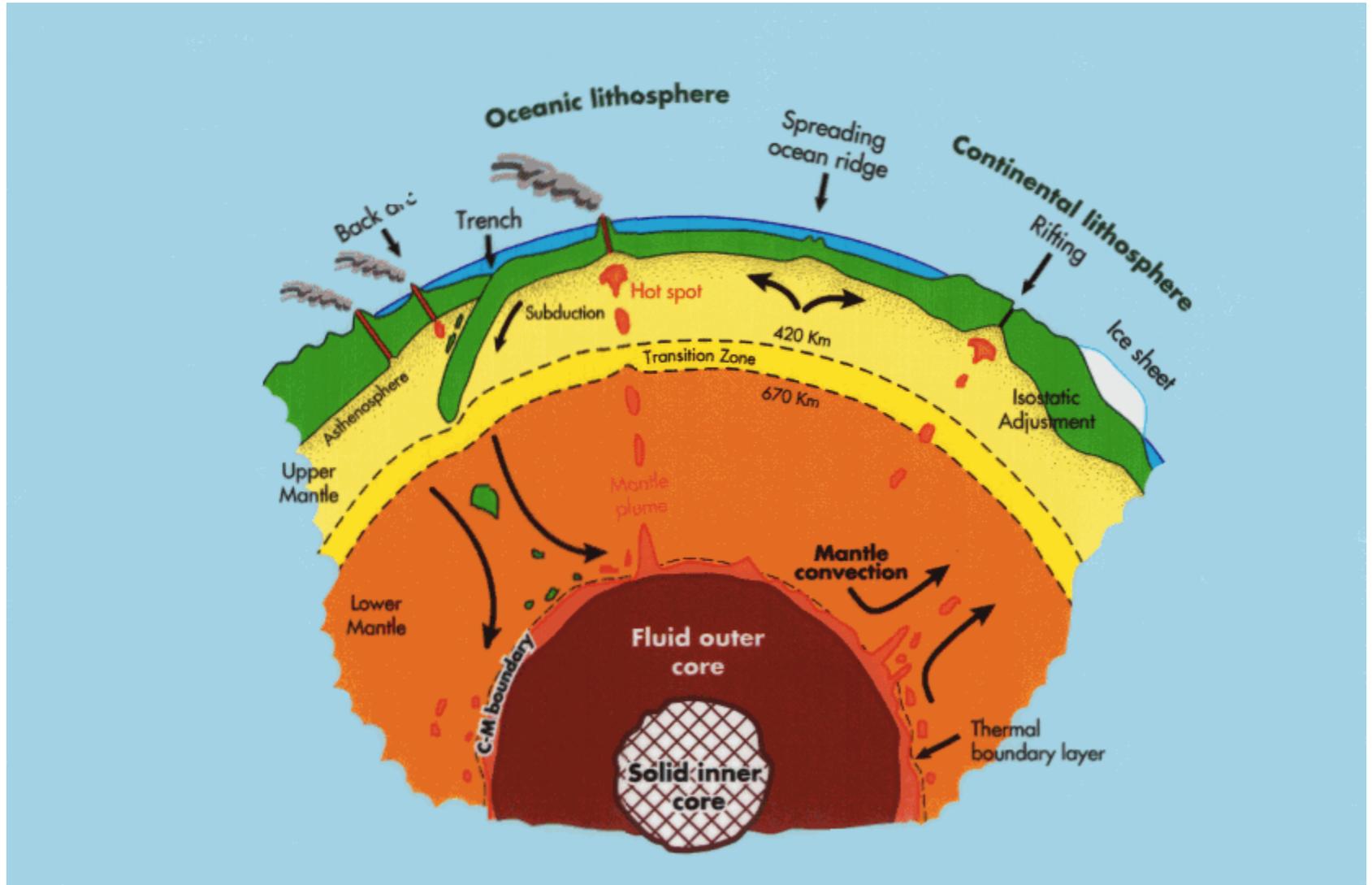


Continental-continental convergence



Oceanic-continental convergence

# TECTÔNICA DE PLACAS



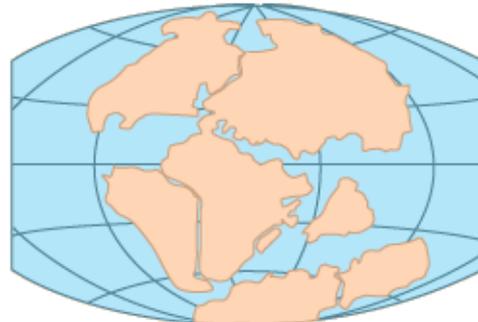
# SUPERCONTINENTE PANGEA ATÉ OS DIAS DE HOJE



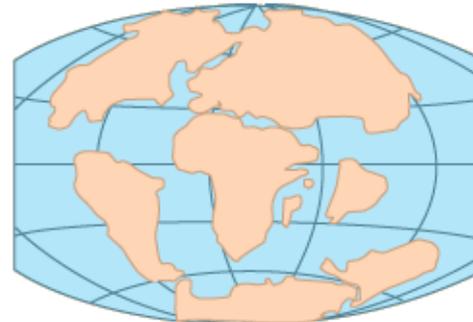
PERMIAN  
225 million years ago



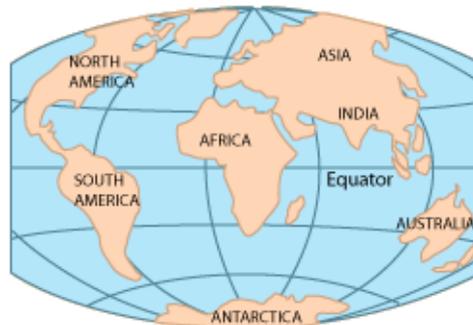
TRIASSIC  
200 million years ago



JURASSIC  
135 million years ago



CRETACEOUS  
65 million years ago



PRESENT DAY

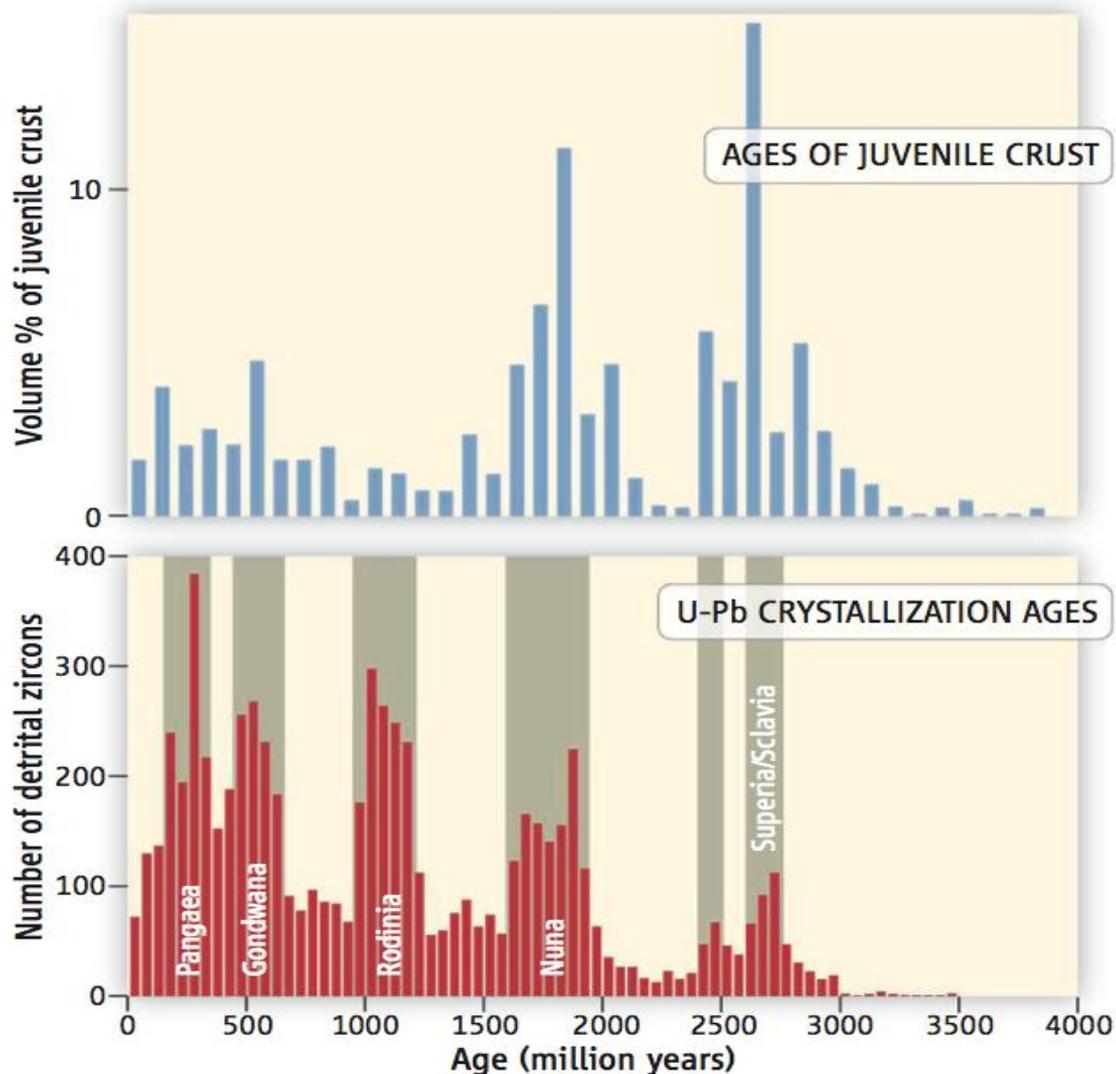
*Several times in earth history the continents have joined to form one body, which later broke apart. The process seems to be cyclic; it may shape geology and climate and thereby influence biological evolution*

**Nance et al. 1988. The Supercontinent Cycle**

## ***Mas o, que é um ‘supercontinente’ ?***

- “um agrupamento de quase todos os continentes” (Hoffman, 1999)
- “Uma reunião de quase todos os blocos continentais da Terra” (Rogers and Santosh, 2003)
- “Um agrupamento de continentes, inicialmente dispersos” (Bradley, 2011)
- “*usando o Pangæa como modelo, qualquer supercontinente deve incluir, pelo menos, ~75% da crosta continental preservada relacionada ao período de máximo empacotamento*” (Meert, 2012)

# Registro Geocronológico.



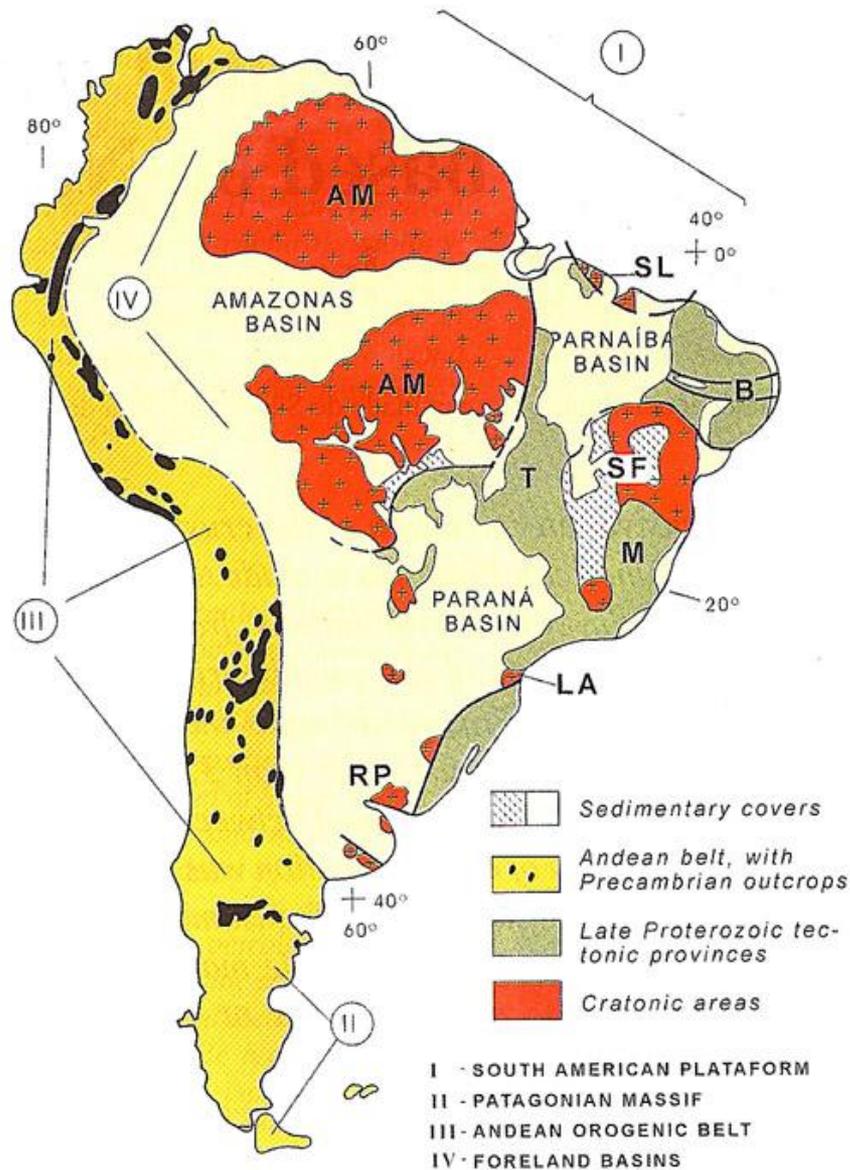
*Em ambos os casos há uma conexão de continente.*

Análises de 7.000 zircões detríticos.

Ciclo continental – período de 750 Ma

Hawkesworth et al., 2009. Science  
Campbel & Allen, 2008. Nature Geoscience  
Condie, 2008. EPSL

# CRUSTAL PROVINCES OF SOUTH AMERICA

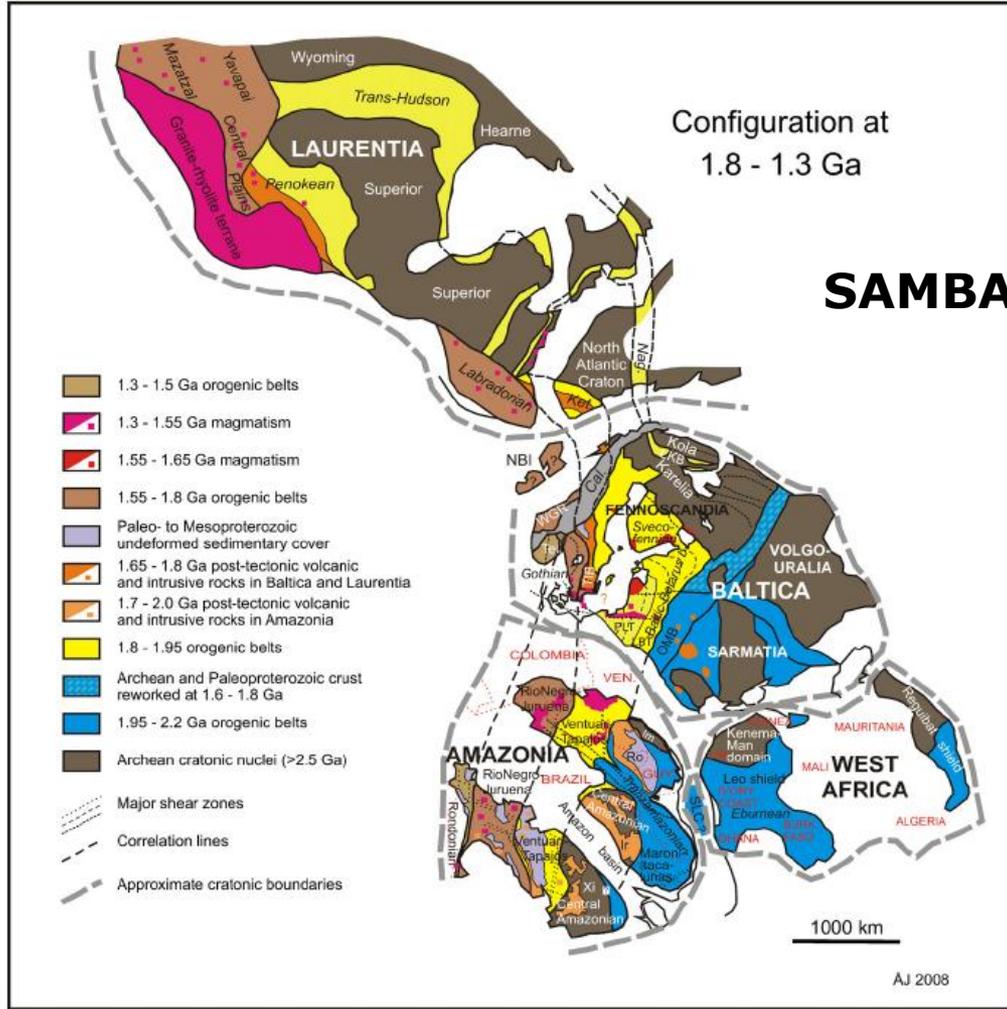


# SUPERCONTINENTE COLUMBIA (NUNA)

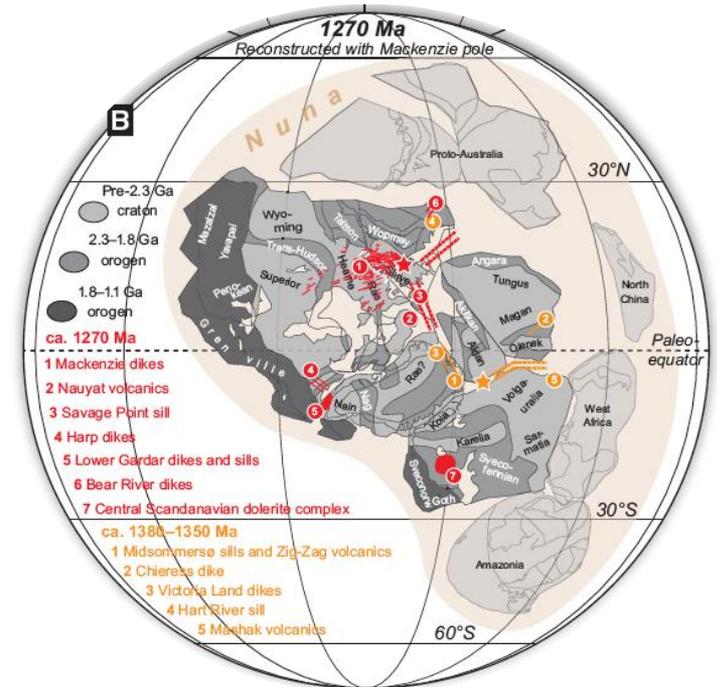
Johansson 2009, Prec. Res.

222

Å. Johansson / Precambrian Research 175 (2009) 221–234



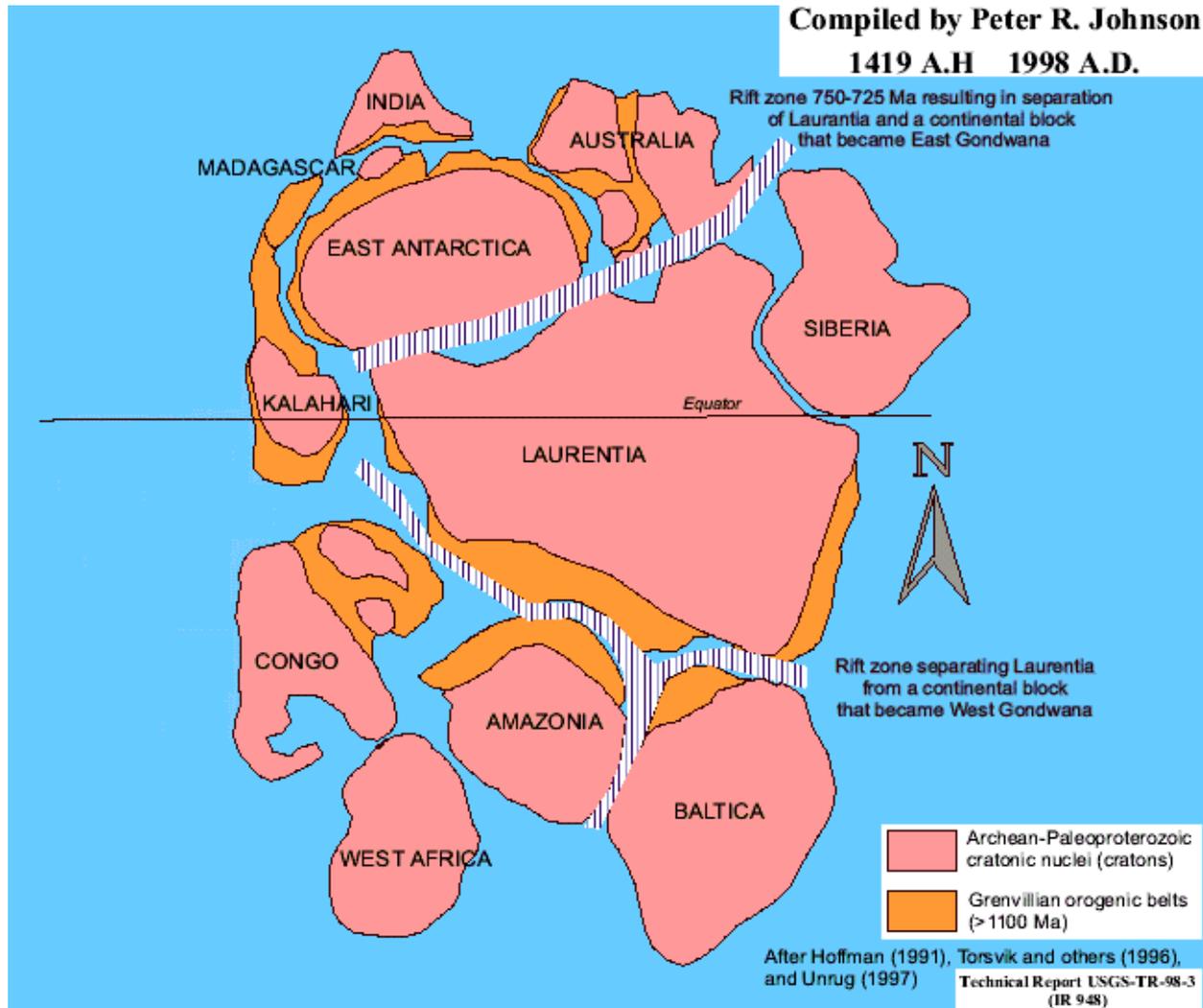
Evans and Mitchell 2011, Geology



**Com base em dados Paleomagnéticos**

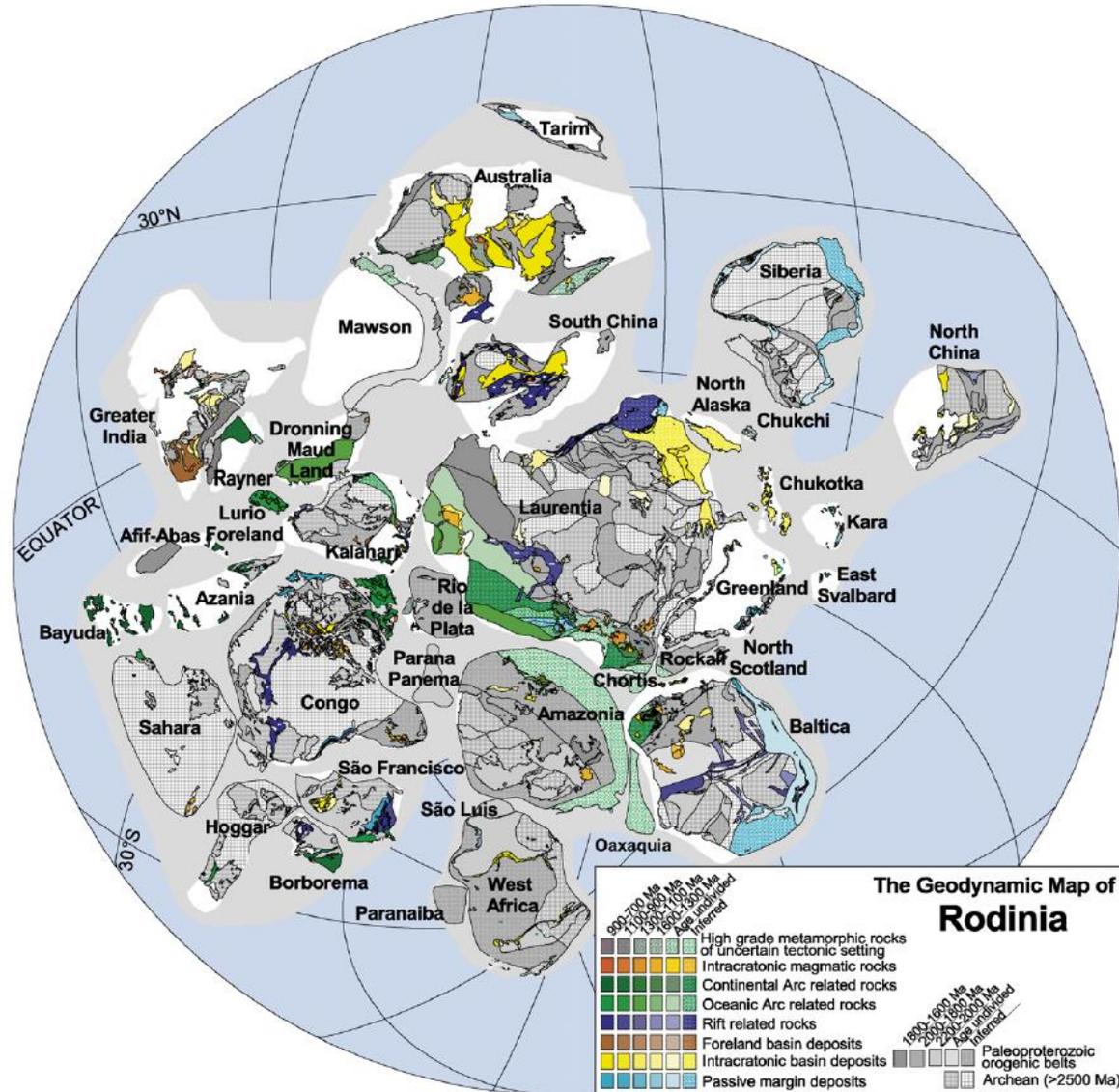
**Com base em dados geológicos**

# Rodinia – 1000 Ma (Hoffman, 1990)



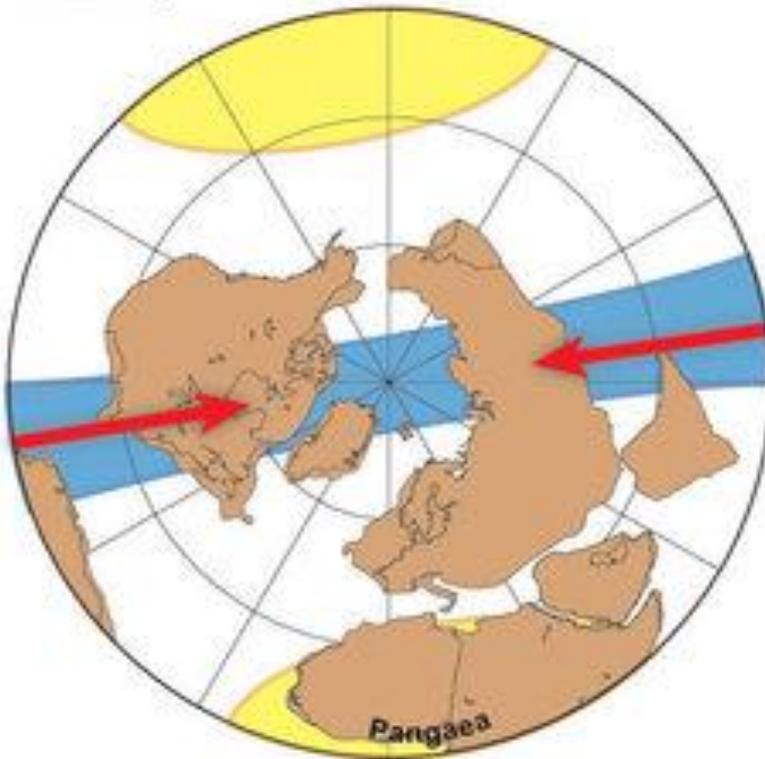
# SUPERCONTINENTE RODINIA – 1.000 Ma

Z.X. Li et al. / Precambrian Research 160 (2008) 179–210



# SUPERCONTINENTE AMASIA

*Present day*



*Speculation ~100 million years into the future*



•

FIM