

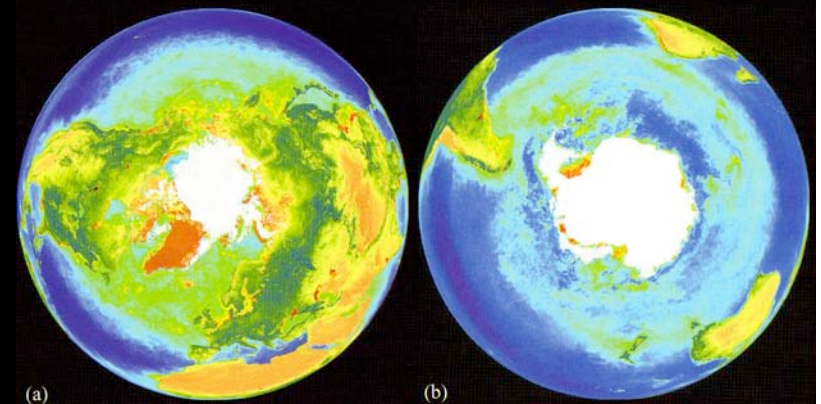


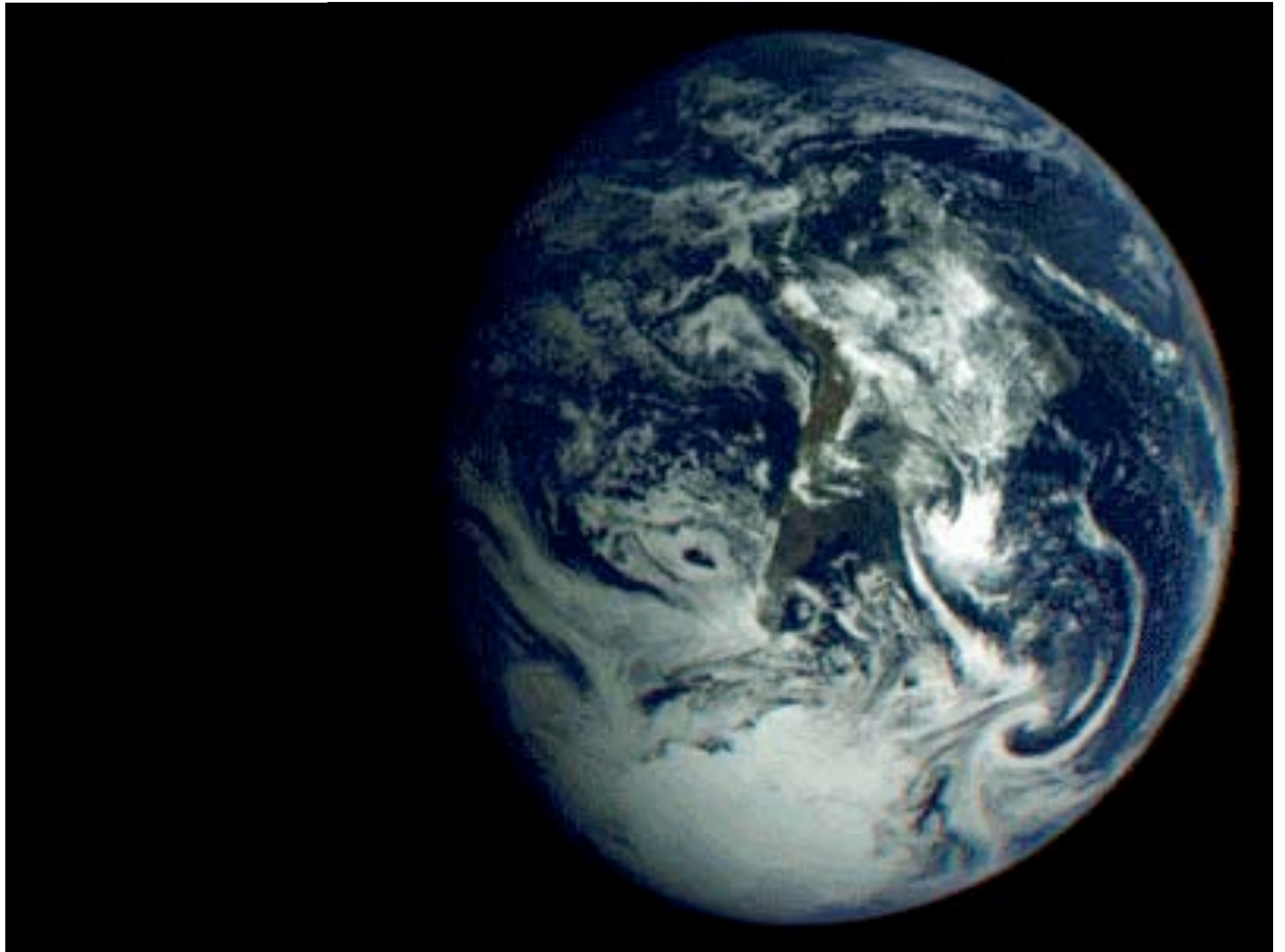


La Tierra de hoy es un lugar muy diferente al que existía hace 4.5 Ga atrás.

Examinando nuestro planeta desde el espacio se aprecian varias condiciones favorables para la vida y en especial para la existencia de vida en su superficie.

- Presencia de H_2O líquida (aunque esto solo no es suficiente).
- Color del planeta (regiones del espectro electromagnético que la Tierra refleja hacia el espacio).
- La fluorescencia de la Tierra en el Ultravioleta es un indicador que nuestro planeta tiene una atmósfera con casi 20% de Oxígeno.





La Tierra: un planeta evolutivo

- ¿Cómo hizo la Tierra para pasar de un aglomerado de detritos de materia a un planeta con continentes, océanos y una atmósfera?
- La respuesta está relacionada en la transformación de una Tierra homogénea a un cuerpo (planeta) diferenciado.
- **Planeta diferenciado** → Planeta que en su interior está dividido en capas que difieren químicamente y físicamente.

Pensemos cómo era la Tierra hace 4.6×10^9 años. Tres procesos comenzaron a elevar la temperatura del planeta: (a) colisión de planetesimales; (b) compresión del planeta; (c) radioactividad.

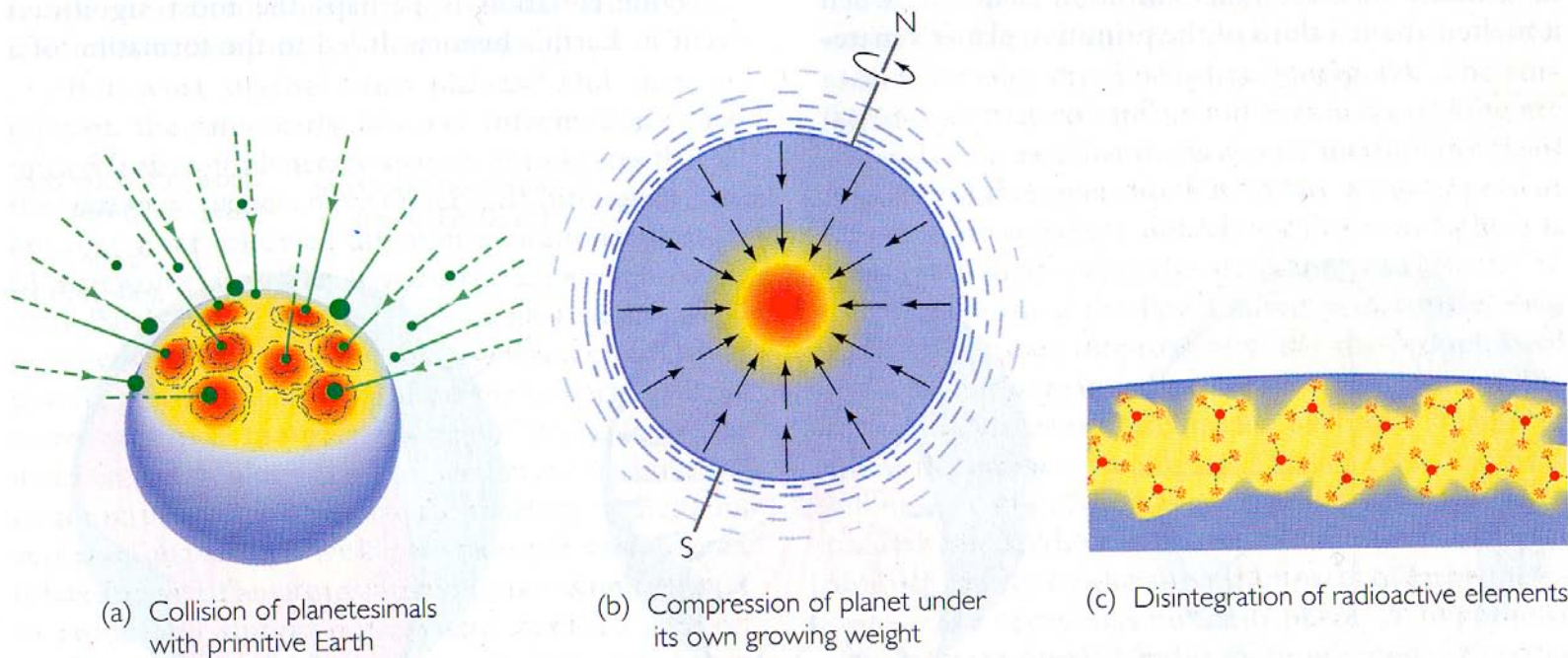


FIGURE 1.6 Three mechanisms that would cause the early Earth to heat up. (a) In accretion, colliding bodies bombard Earth and their energy of motion is converted to heat. (b) Gravitational compression of Earth into a smaller volume causes its interior to heat up. (c) Disintegration of radioactive elements releases particles and radiation, which are absorbed by the surrounding rock, heating it.

Se inicia una reorganización interna del planeta:

El calor liberado por impacto de planetesimales y por compresión bajo su propio peso hace que la temperatura interna de este nuevo objeto (planeta) se eleve en promedio a unos 1000°C.

El calor liberado por desintegración radioactiva en los inicios del planeta también produjo elevación de la temperatura interna a unos 2000°C (temperatura a la cual el Fe funde).

→ El Fe constituye aprox. 1/3 de la materia del planeta.

→ La fusión de este Fe inició el proceso de diferenciación de reservorios en el interior del planeta.

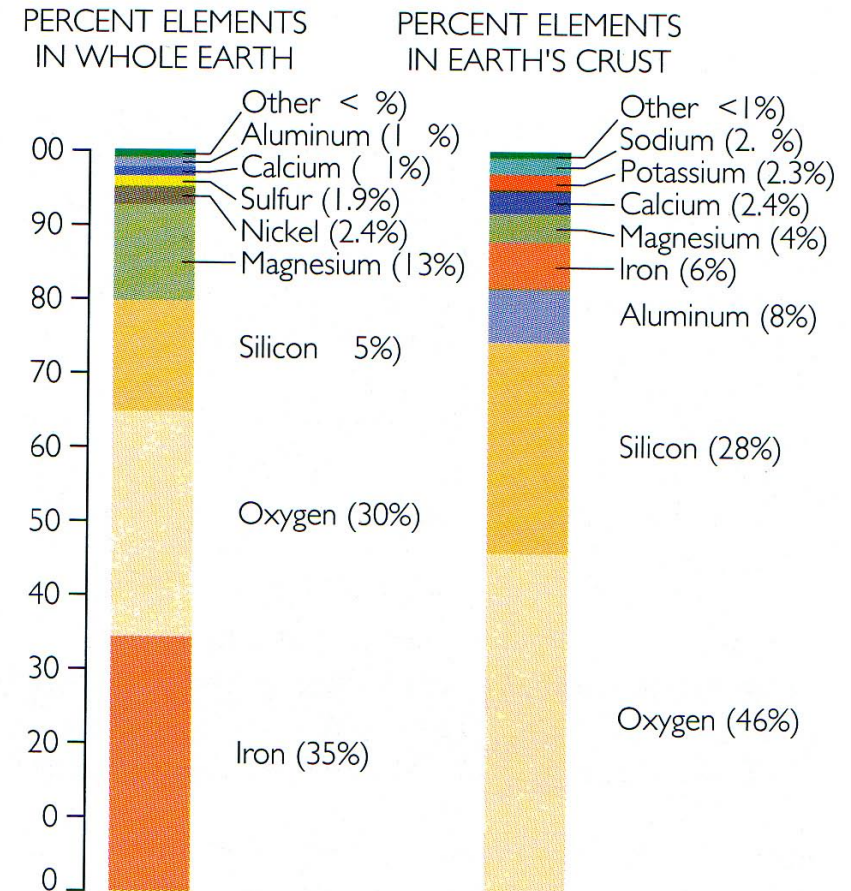


FIGURE 1.8 The relative abundance by weight of elements in the whole Earth and in its crust. Differentiation has created a light crust depleted of iron and rich in oxygen, silicon, aluminum, calcium, potassium, and sodium.

Diferenciación:

- Al comienzo de la historia la Tierra primitiva era un planeta homogéneo
- Durante los primeros 100 a 200 millones de años la Tierra sufrió una profunda reorganización interna cuando su temperatura se elevó a valores de la fusión parcial del Fe.
- Debido a su mayor densidad relativa, el Fe migró hacia el centro del planeta formando el núcleo.

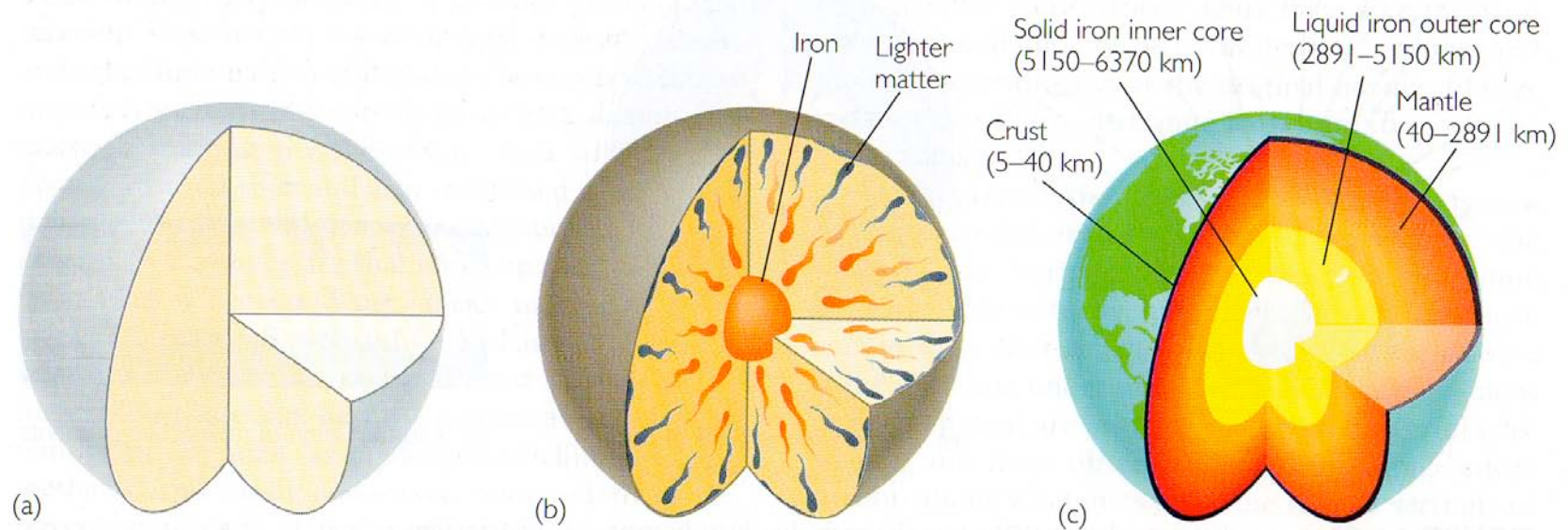
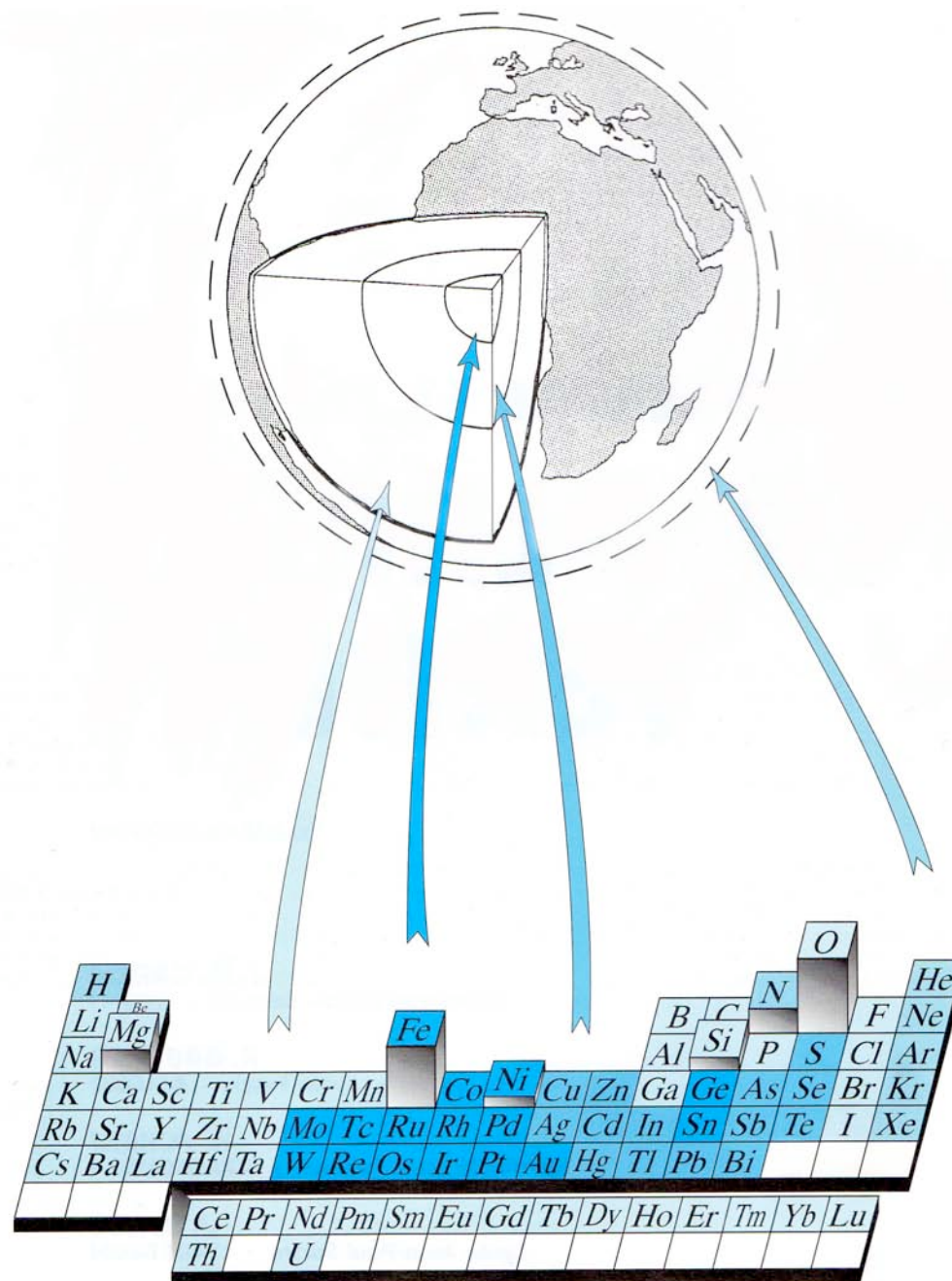


FIGURE 1:7 Early Earth (a) was probably a homogeneous mixture with no continents or oceans. In the process of differentiation, iron sank to the center and light material floated upward to form a crust (b). As a result, Earth is a zoned planet (c) with a dense iron core, a crust of light rock, and a residual mantle between them.



Hay más de 100 elementos, pero el 99% de la masa de la Tierra se explica con sólo 8 de ellos. Alrededor del 90% de la Tierra esta compuesta de sólo 4 de elementos: Fe, O, Si, Mg.

El Fe corresponde al 35% de la masa de toda la Tierra.

Como el Fe se “sumergió” hasta el núcleo, existe muy poco de él en la corteza terrestre (allí sólo es el cuarto en abundancia).

Como resultado del proceso de diferenciación, el Si, Al, Ca, K, y Na, están entre los más livianos de los elementos sólidos y en consecuencia “flotaron” hacia la superficie durante la diferenciación. Ellos son lejos más abundantes en la corteza que en resto del interior de la Tierra.

Esta desigual distribución de elementos es el resultado de la diferenciación terrestre.

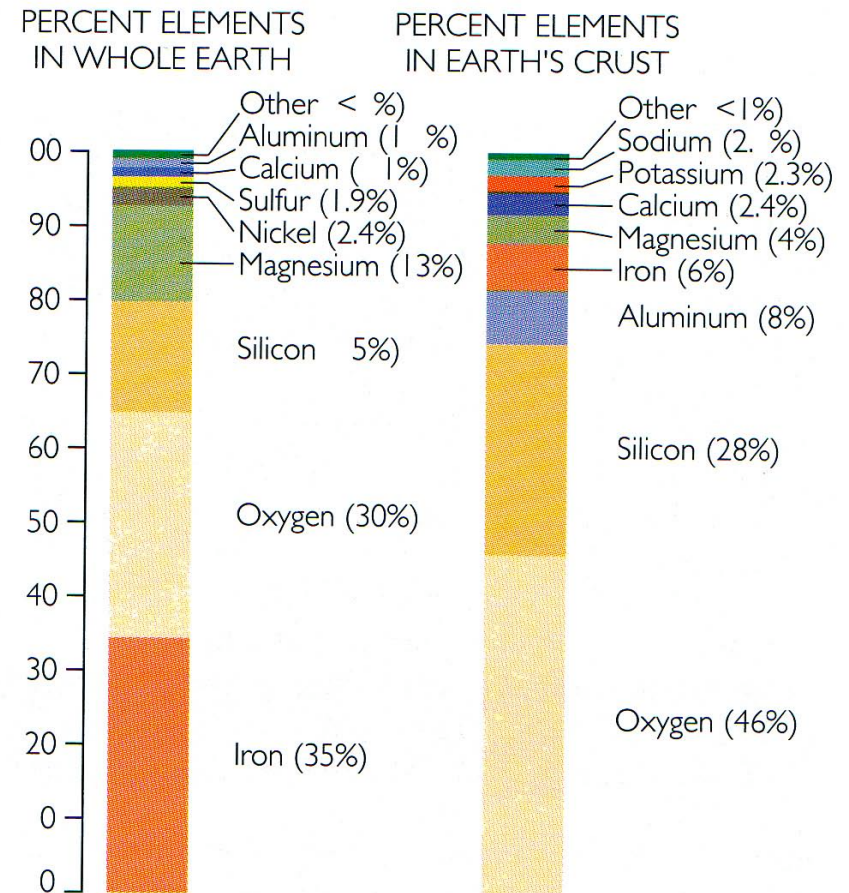


FIGURE 1.8 The relative abundance by weight of elements in the whole Earth and in its crust. Differentiation has created a light crust depleted of iron and rich in oxygen, silicon, aluminum, calcium, potassium, and sodium.

La diferenciación es quizás el acontecimiento más significativo de la historia de la Tierra.

Este proceso permitió la creación de la CORTEZA y de los CONTINENTES.

La diferenciación llevó los elementos más livianos hacia los estratos más externos de la Tierra; Inició el proceso de escape de los gases más ligeros desde el interior del planeta permitiendo la formación de la atmósfera y océanos. Los gases continúan escapando hoy desde interior de la Tierra en las emisiones que acompañan las erupciones volcánicas.

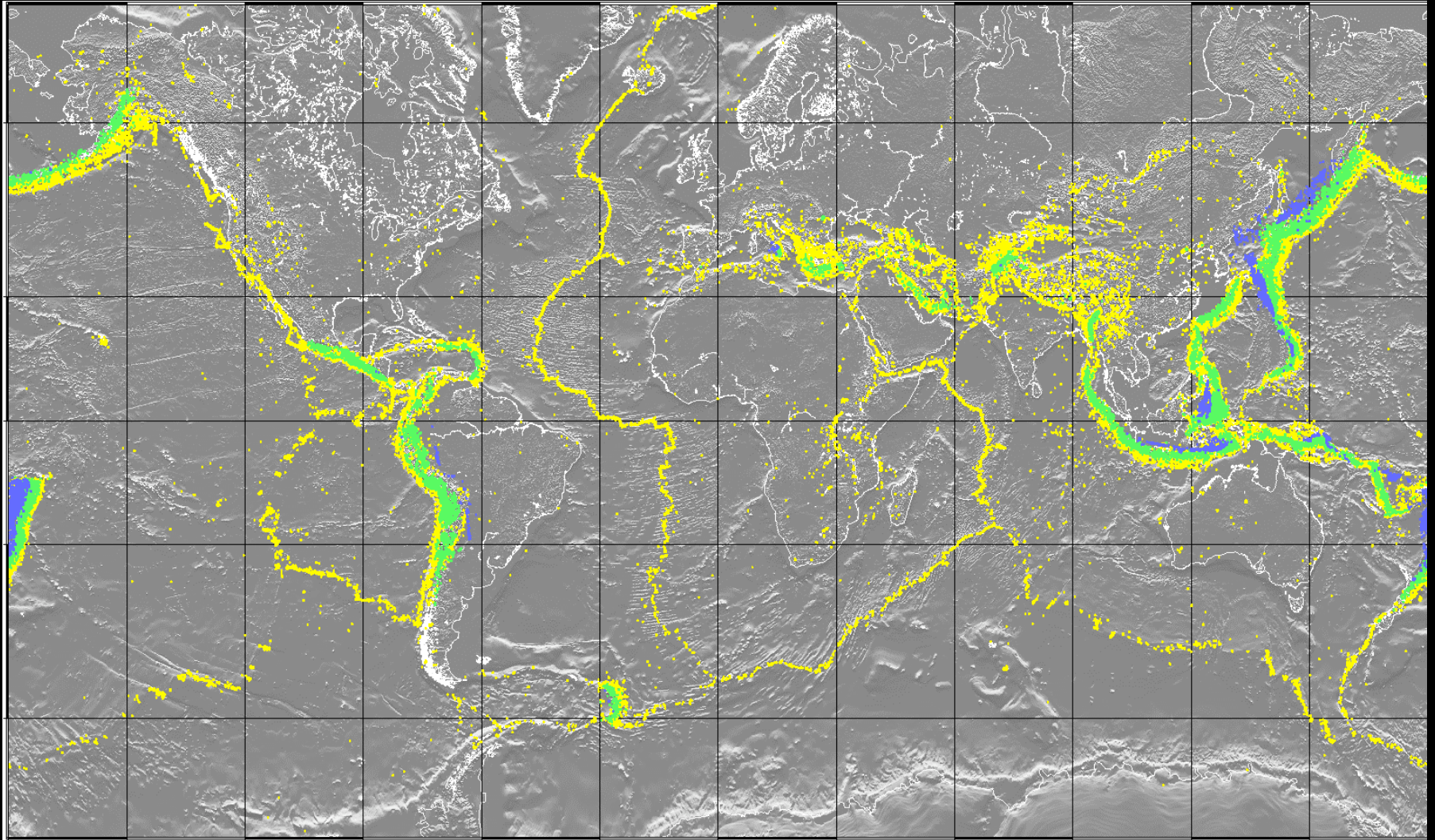
Evidencias de planeta “activo”:

- actividad sísmica
- erupciones volcánicas
- existencia de un campo geomagnético variable
- flujos y reflujos de mareas
- erosión y transporte de partículas por los ríos hacia el océano (ciclos erosión)
- movimientos en la atmósfera, etc.

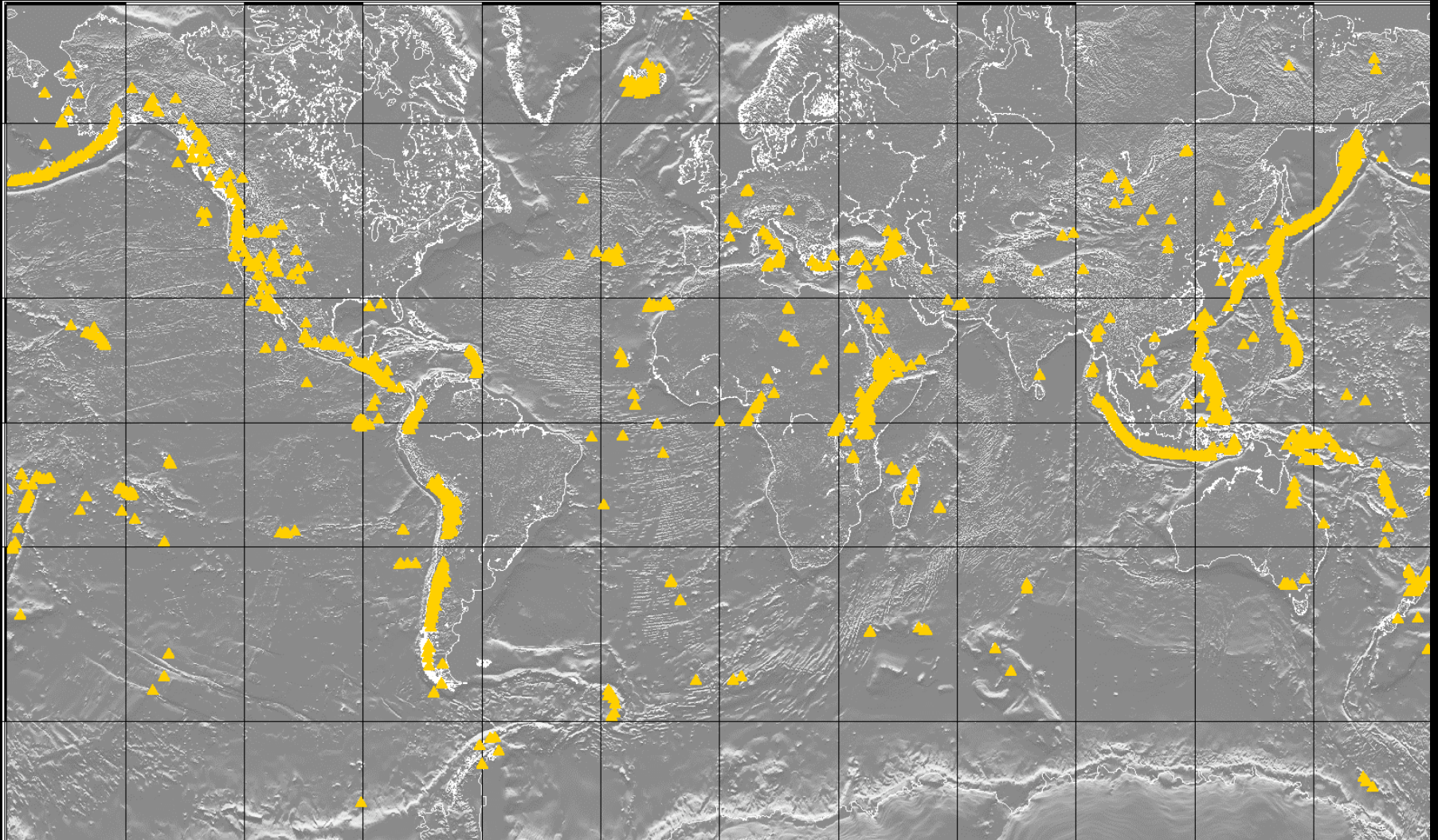
- 0-70 km
- 70-300 km
- 300-700 km

Terremotos

(Engdahl et al., *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1998)



VOLCANES ACTIVOS





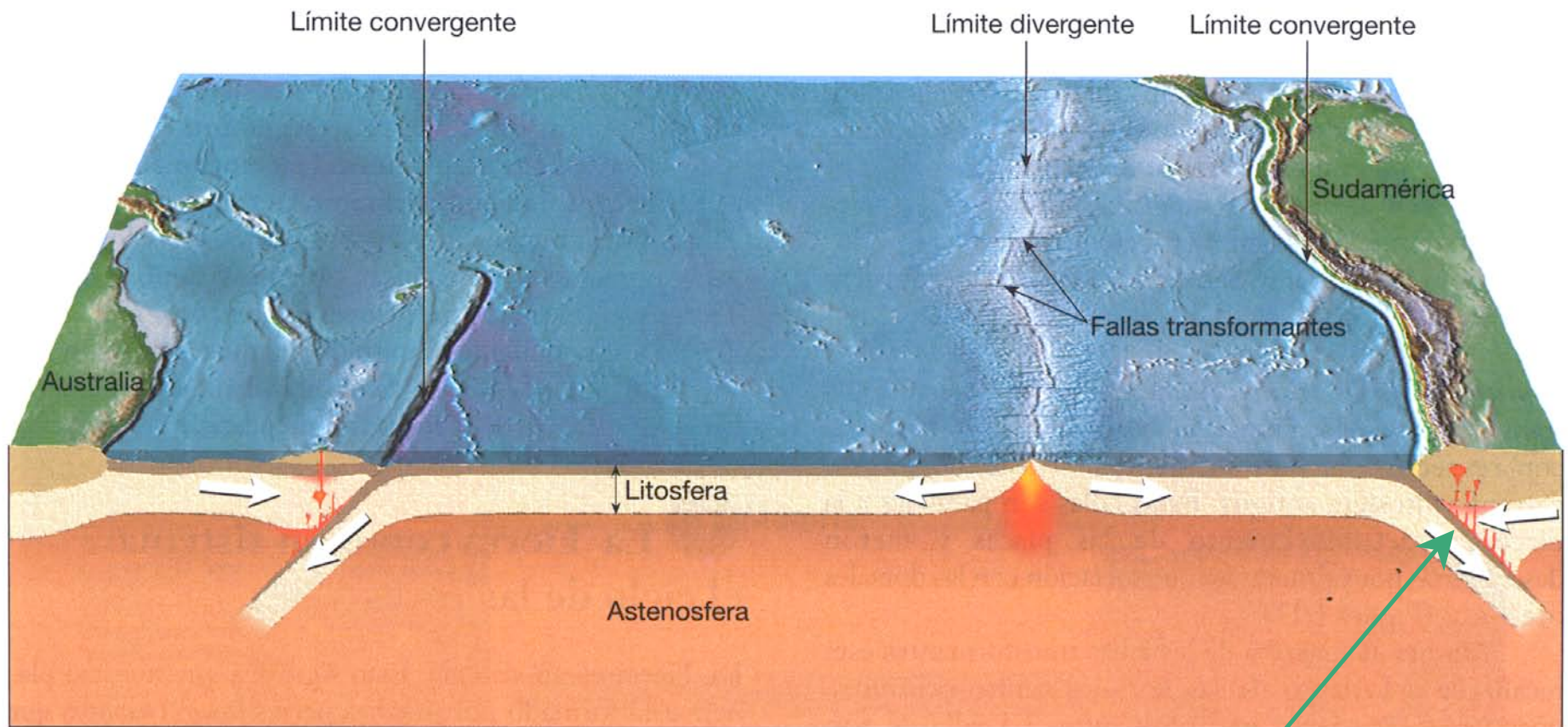


Figura 1.11 Vista de la Tierra en la que se muestra la relación entre los límites de placa divergentes y convergentes.

Fuente de Magmatismo de
Volcanes de Subducción

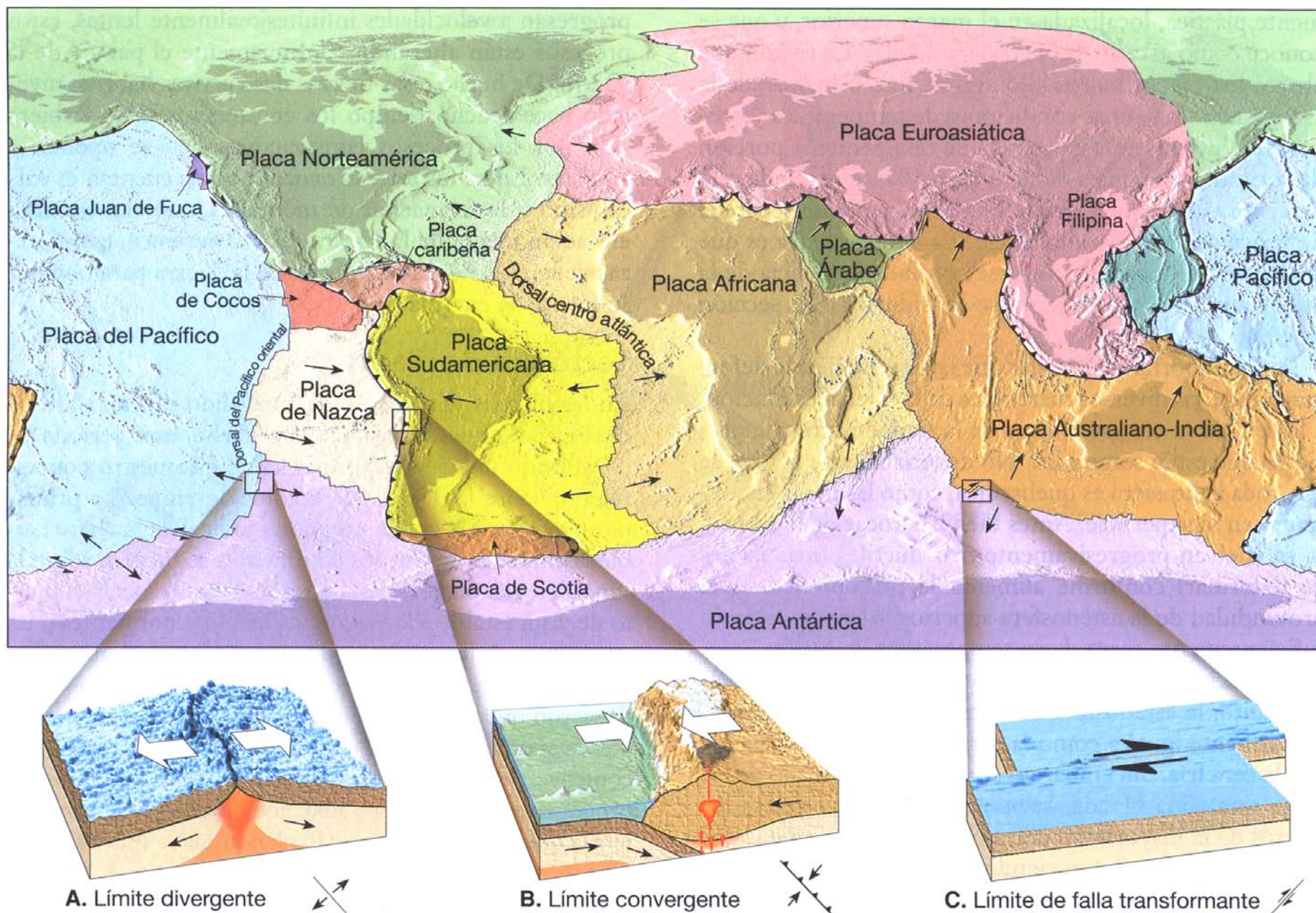
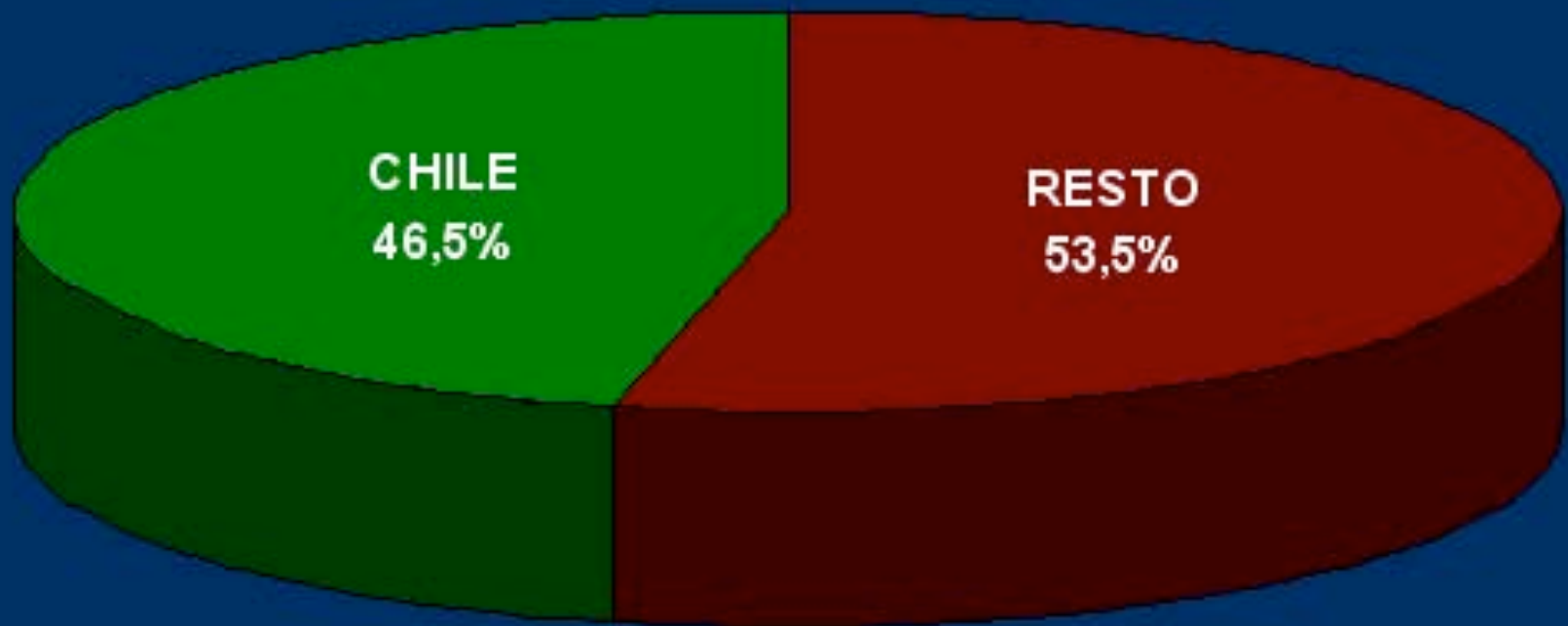


Figura 1.10 Mosaico de las placas rígidas que constituyen la envuelta externa de la Tierra. (Tomado de W. B. Hamilton, U.S. Geological Survey).

Energía Sísmica Liberada en el Planeta en el siglo XX



Período 1900-2000

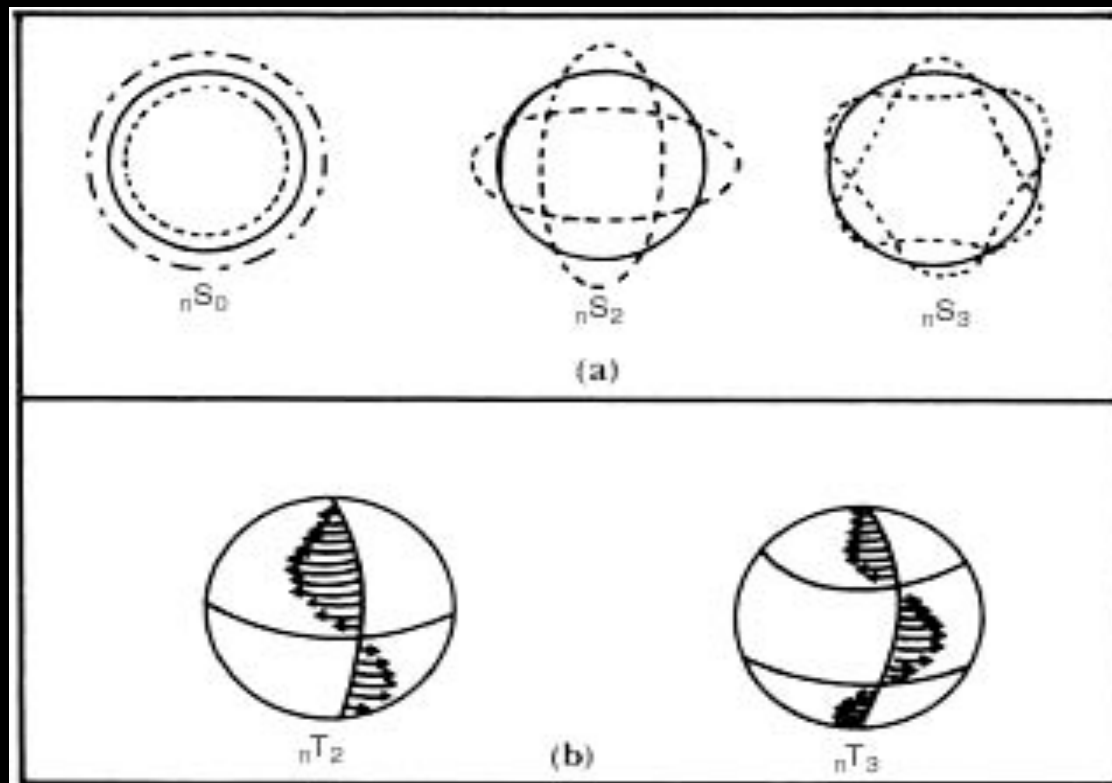
(Pacheco et al., 1993; Catálogo CMT de Harvard)

Modos de vibración de la Tierra → Acceso a su estructura interna
→ Modelo Mineralógico → Composición Química del Planeta.

MODO FUNDAMENTAL DE LA TIERRA → 54 minutos (MODO ESFEROIDAL)
MODO TOROIDAL → 23.6 minutos ($R=6371$ km y Velocidad $P = 9$ km/s).

(a) Modos volumétricos: modo fundamental y los dos primeros modos superiores.

(b) Primeros dos modos de cizalle.



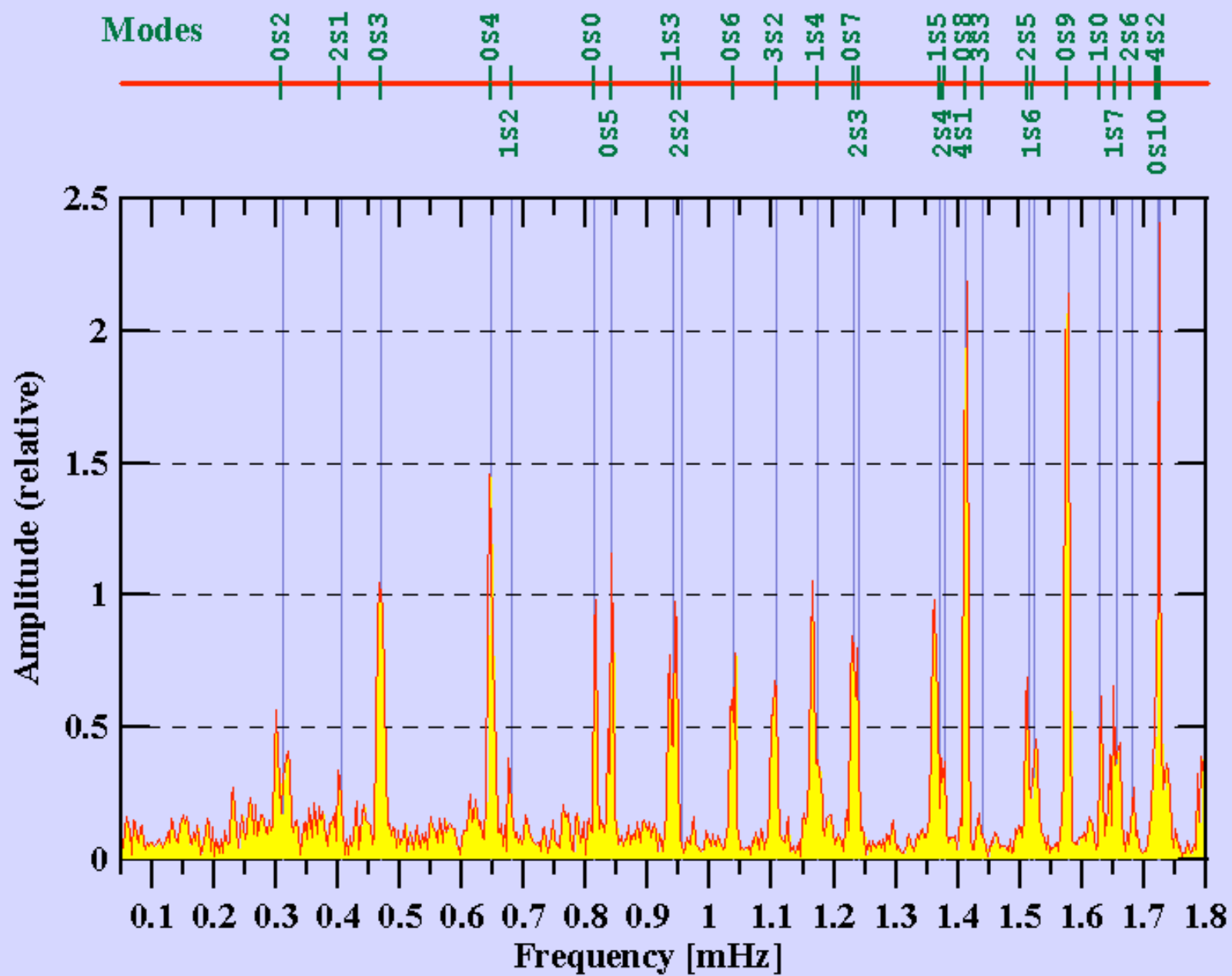
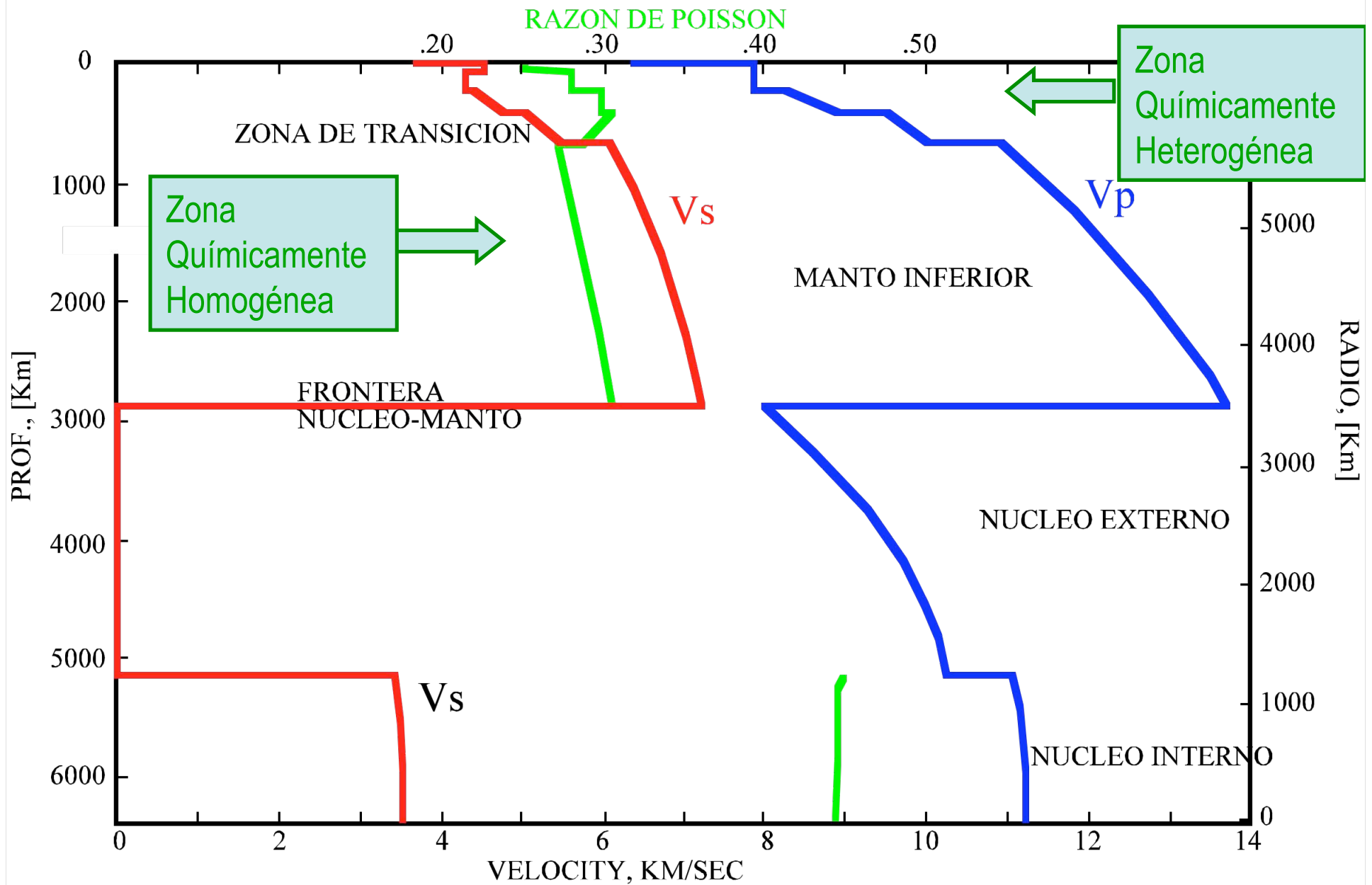
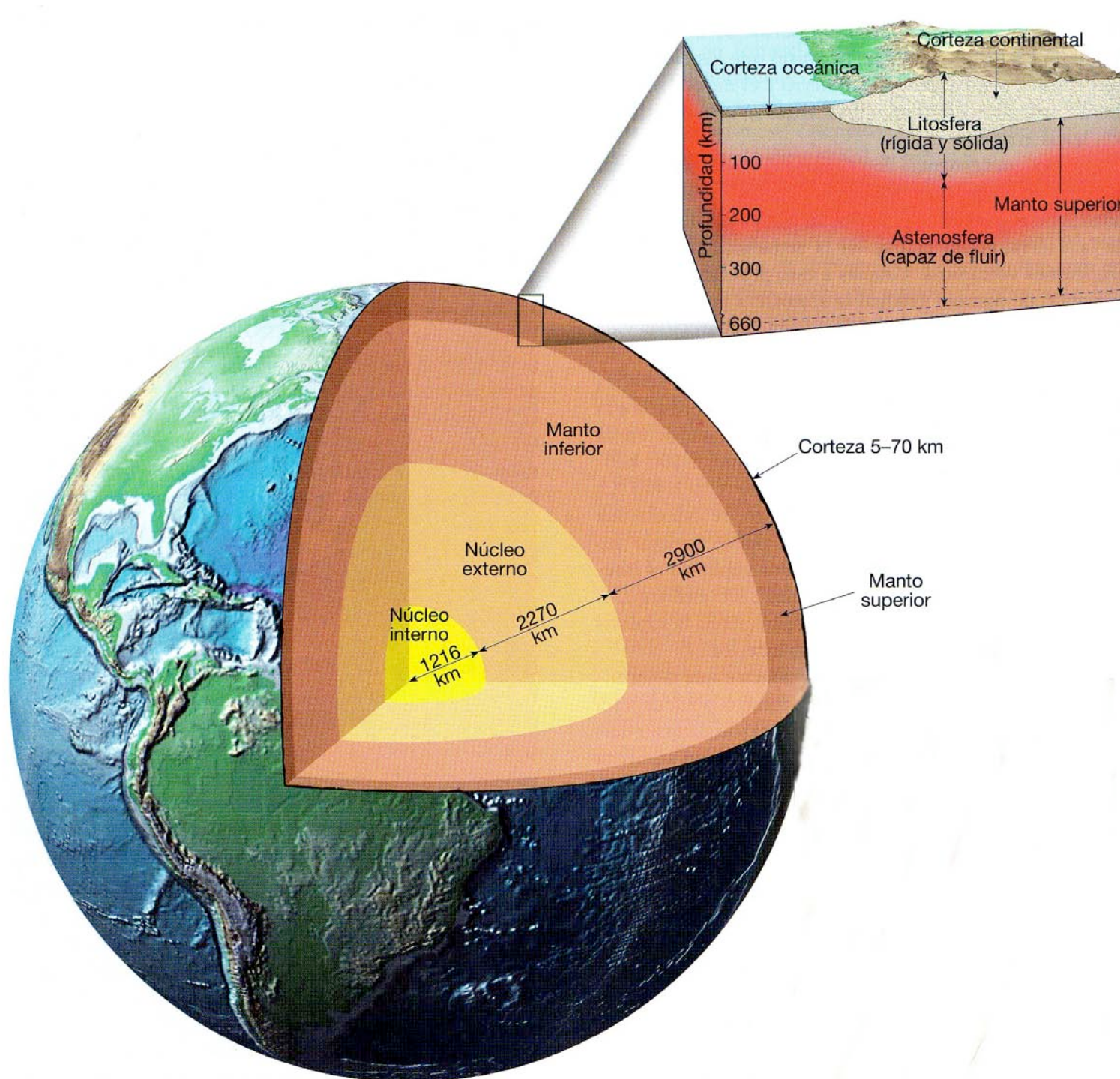


GRAFICO DE VELOCIDAD ONDAS P Y S



	H(Km)	Vol(10^{18} m^3)	%	ρ (10^3 kg/m^3)
Corteza	0-Moho	10	0.9	2.60-2.90
Manto Superior	Moho-670	297	27.4	3.38-3.99
Manto Inferior	670-2891	600	55.4	4.38-5.56
Nucleo Externo	2891-5150	169	15.6	9.90-12.16
Nucleo Interno	5150-6371	8	0.7	12.76-13.08



Evidencias de un planeta “activo”:

- actividad sísmica (Terremotos)
- erupciones volcánicas
- existencia de un campo geomagnético variable e intenso
- flujos y reflujos de mareas terrestres
- erosión y transporte de partículas por los ríos hacia el océano (ciclos erosión)
- movimientos en la atmósfera
- alzamiento de montañas
- movimientos horizontales de las capas superficiales de la Tierra (Placas Tectónicas)
- movimiento del polo magnético terrestre (~25 km/año)
- lento alejamiento de la Luna respecto a la Tierra
- perturbaciones y movimiento de “cabeceo” del eje de rotación de la Tierra
- existencia de edades glaciales y cálidas en el pasado de la Tierra
- cambios en el nivel del mar
- etc

Como en todo sistema, comprender la dinámica de esta actividad es en el fondo evaluar las fuentes de energía, sus transferencias y modalidades de disipación.

Tierra = Sistema evolutivo / habitable = Sistema Complejo

Evaluar estas fuentes = Cuantificar los procesos

Cuantificar los flujos de materia ligados a flujos de energía nos aporta una respuesta a la pregunta ¿cómo este sistema complejo funciona?

Para eso es necesario:

- Determinar lo que transita (¿Qué?)
- A través de cual geometría (¿Dónde?)
- Durante cuanto tiempo (¿Cuándo?)

¿Qué?

¿Cuál es su naturaleza, la composición del material geológico?

¿De qué están hechos los minerales, las rocas, los magmas, los océanos, etc?

La geología es una química de 103 elementos y sus isótopos.

¿Dónde?

¿De qué manera están distribuidos estos diferentes componentes en el espacio?

La geología es una ciencia tridimensional y debe llegar a cubrir todas las escalas del problema (10^{-9} m a 10^7 m).

¿Cuándo?

¿En qué orden se suceden estos fenómenos? ¿Cuánto tiempo han durado?

Escala de algunos segundos a miles de millones de años.

Flujos de energía - Flujos de masa



Energía recibida del Sol es la fuente de energía que controla los procesos que ocurren en la superficie de la Tierra: Circulación de los Océanos; Procesos Erosivos en la corteza terrestre; Atmósfera; Biósfera;

Las fuentes de Calor interno de la Tierra controlan los procesos físicos que dan origen al Campo Magnético, Movimiento de las Placas, y variación del Campo Gravitacional.

Comprender los fenómenos físicos que ocurren en la Tierra nos confronta al problema de comprender cómo el “Sistema Tierra” funciona-

¿Cuáles son los Balances de Energía y de Masa involucrados?

¿Qué es lo que “fluye”? ¿Qué es lo que transita?

¿A qué escala de tiempo?

¿Dónde se produce y las escalas espaciales involucradas?

Esto nos lleva al problema de determinar los “Balances de Energía y Materia”

¿Cuáles son los flujos de masa y energía que mantienen la dinámica de la Tierra?

La temperatura promedio en el espacio exterior es de 3°K.

La energía proveniente del Sol calienta la Tierra y genera las condiciones aptas para la vida.

La Tierra se ubica a 1 U.A. del Sol, dentro de la zona que los astrónomos denominan HZ (Habitable Zone), es decir, aquella región en torno a una estrella de luminosidad L tal que el planeta en esa región presenta las condiciones favorables para la ocurrencia de agua que se manifiesta simultáneamente en sus estados líquido, sólido y gaseoso.

En promedio, la Tierra recibe del Sol 342 Watts por metro cuadrado de superficie. Esto significa 4.4×10^{16} Watts de potencia “inyectada” al Sistema Tierra-Atmósfera.

Todo el sistema de generación eléctrico instalado en Chile produce del orden de la treinta millonésima parte de la energía que nos llega del Sol (Toda la industria eléctrica nacional con un total aproximado de 31 empresas generadoras suministran 48.879,8 Gigawatts-hora es decir unos 13 GWatts, CNE-2004).

Esto significa que se requiere 30 millones de veces la producción total de energía eléctrica chilena para igualar la energía que nos llega del Sol.

BALANCE ENERGÉTICO EN LA TIERRA

Estimaciones del balance energético anual de la Tierra a partir de observaciones compiladas por satélites del flujo de energía, a largas y cortas longitudes de onda en el tope superior de la atmósfera, indican que la partición de la energía radiativa a través de la atmósfera mantiene el balance entre el flujo total de energía recibida desde el Sol y la energía re-emitida por la Tierra hacia el espacio.

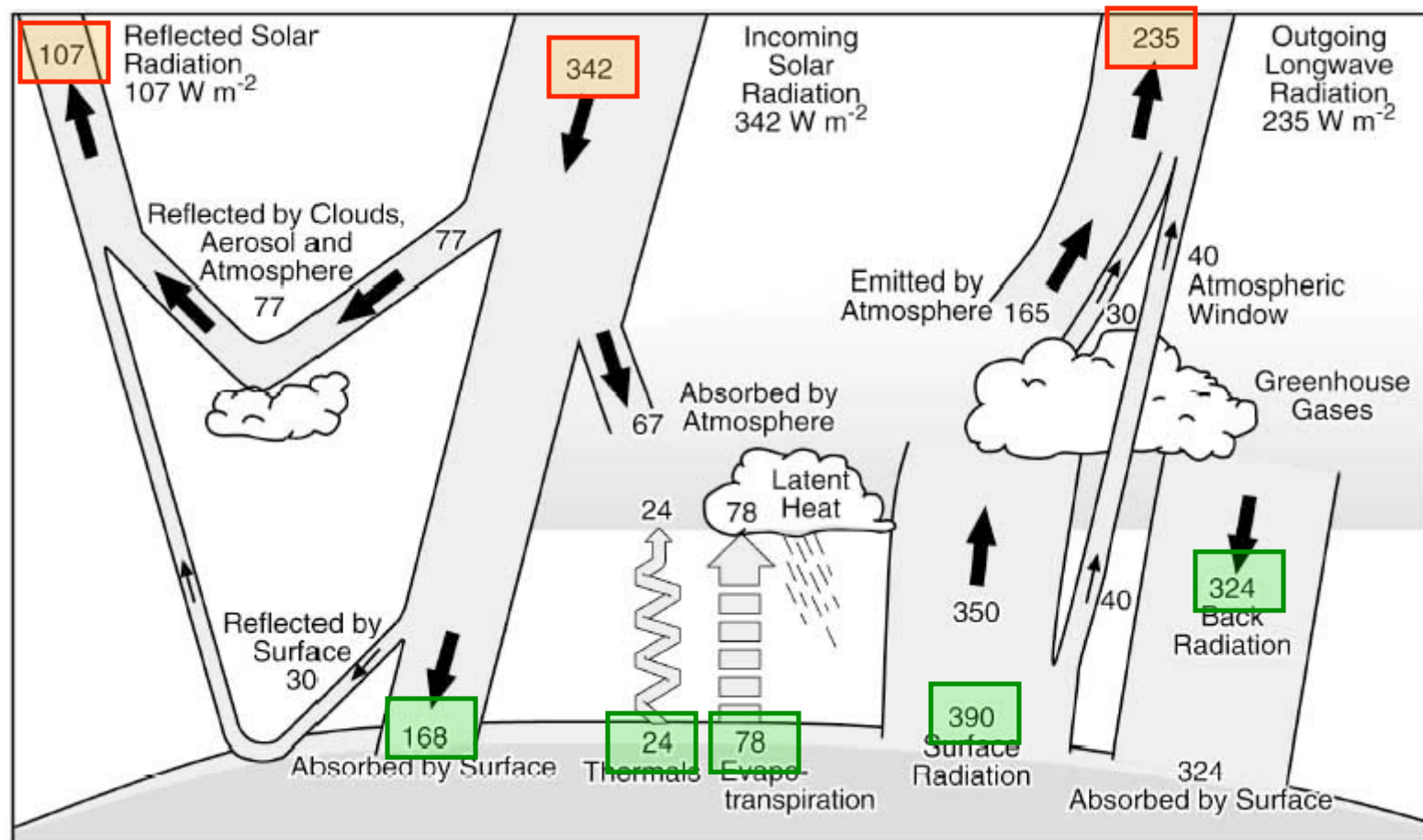
- **Flujo de energía re-emitida hacia el espacio exterior:** 107 W/m^2
correspondiente a la radiación solar reflejada más 235 W/m^2 de radiación infraroja -longitud de onda larga- correspondiente a la pérdida de calor de la Tierra.

- **Flujo de energía proveniente del Sol:** 342 W/m^2

Así la Tierra está aproximativamente en balance energético siguiendo este análisis.

Ref.: Earth's Annual Global Mean Energy Budget (Kiehl, J. T. And Trenberth, K. E.; Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 197-208, 1997).

Balance de Energía en la Tierra: Valores corresponden a watts por metro cuadrado de la superficie de la Tierra. Las incertezas son menores que el 20%. El efecto invernadero está asociado a la absorción y reradiación de energía por efecto de los gases y partículas atmosféricas produciendo un flujo neto de radiación infraroja de retorno desde la atmósfera hacia la superficie de la Tierra, elevando su temperatura.



Energía Liberada

Equivalencia de energía

63.000.000.000 Joules

Energía emitida por un relámpago

2.000.000.000.000.000.000 Joules

Terremoto Chileno de Valdivia 1960

1.400.000.000.000.000.000.000 Joules

Energía anual proveniente del Sol

410.000.000.000.000.000 Joules

Energía eléctrica anual producida en Chile

La energía Solar junto con la energía gravitacional determinan la mayoría de los procesos naturales que ocurren en la superficie de la Tierra.

La generación del campo magnético y el movimiento global de las Placas litosféricas son debido al calor interno de la Tierra.

La radioactividad es la mayor fuente de calor interno de la Tierra.

Algunas cifras a retener:

Fuente de Energía	Energía Anual (Joules)
Energía Solar	1.4×10^{24}
Flujo geotermal del interior de la Tierra	1.4×10^{21}
Desaceleración rotacional por mareas	$\sim 10^{20}$
Energía Terremotos	$\sim 10^{19}$

Flujo interno de calor de la Tierra

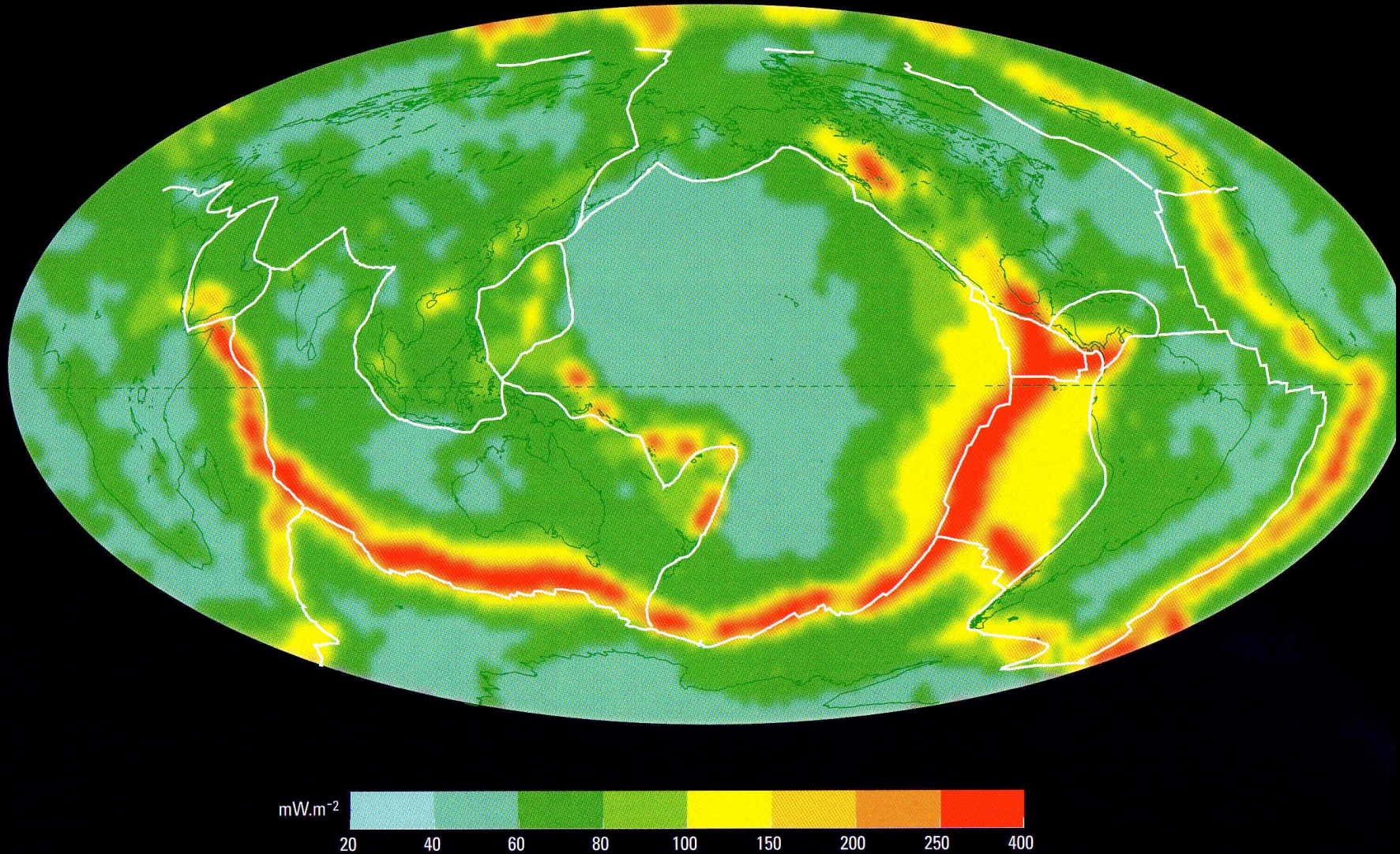


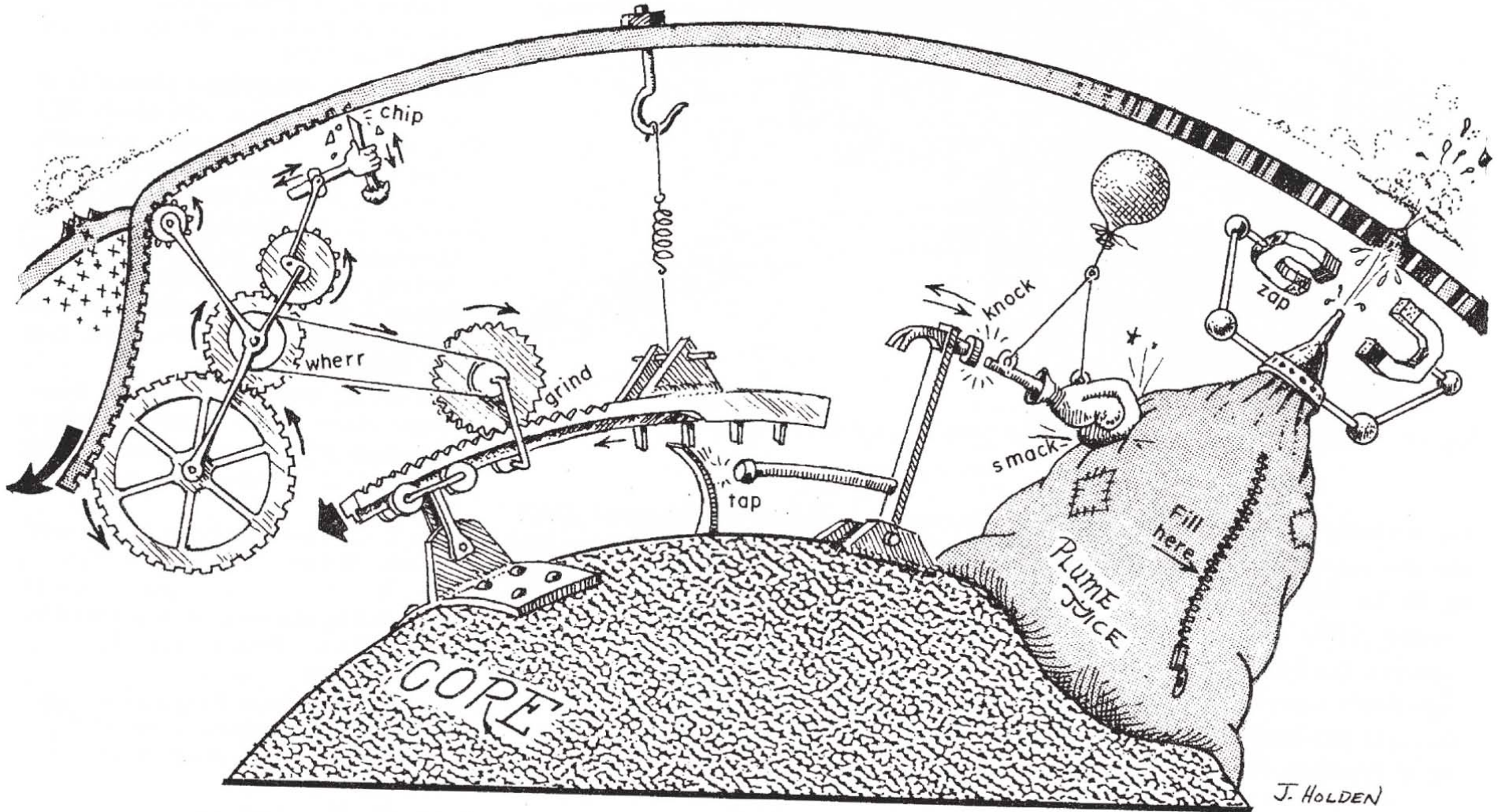
Fig. 2.7 Carte mondiale du flux de chaleur mesuré à la surface terrestre. Compilation de l'International Heat Flow Commission à partir de mesures de terrain réparties sur toute la surface du globe (1993).

PRINCIPAL MOTOR DE LA DINÁMICA INTERNA DE LA TIERRA ES EL BALANCE DE ENERGÍA/MASA

FUENTE: Calor por decaimiento radioactivo → principalmente del manto y corteza terrestre.

Tipo de roca	Producción de calor	Tipo de ambiente
<i>Granito / Ryolita</i>	$2.95 \mu W / m^3$	<i>Corteza Continental Superior</i>
<i>Basalto / Gabro</i>	$0.56 \mu W / m^3$	<i>Corteza Océanica / Corteza Continental Inferior</i>
<i>Peridotita</i>	$0.01 \mu W / m^3$	<i>Manto</i>

¿Dónde buscar la clave para comprender la dinámica interna de la Tierra?



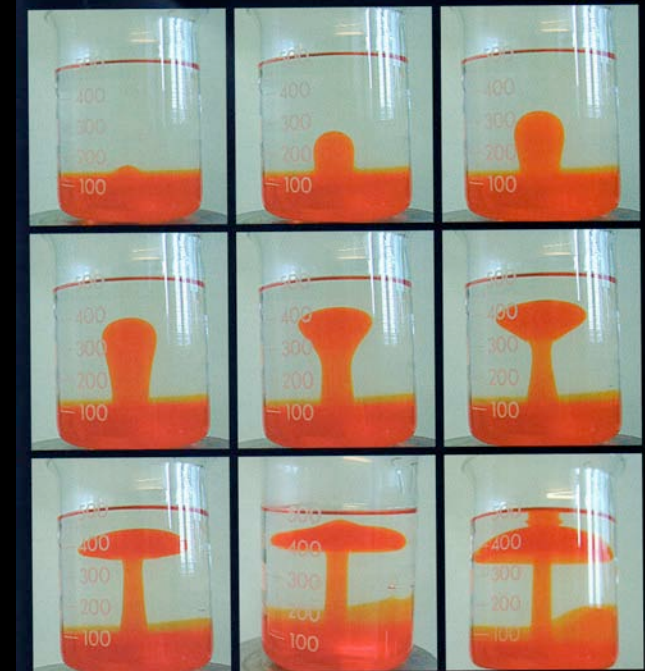
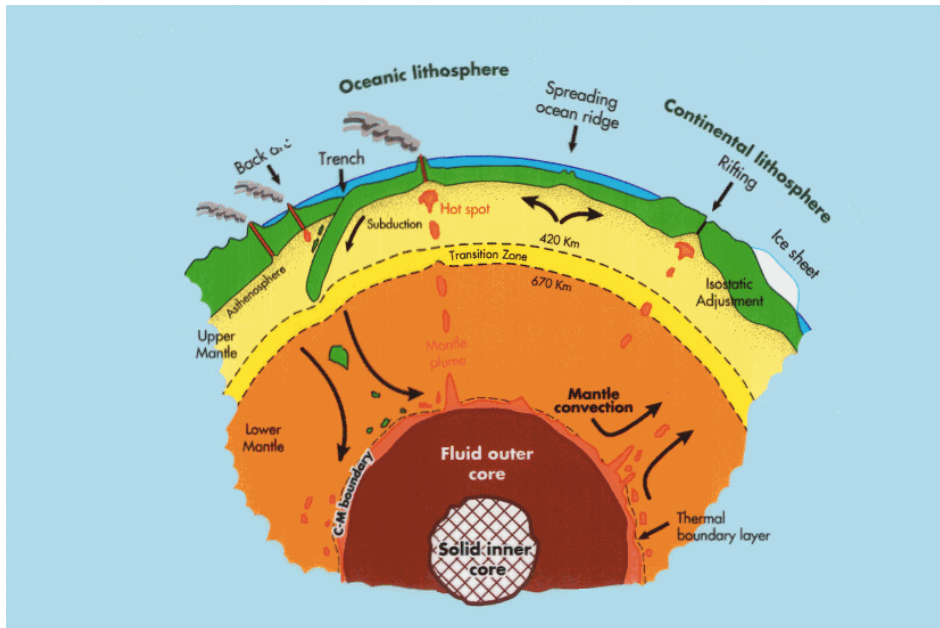
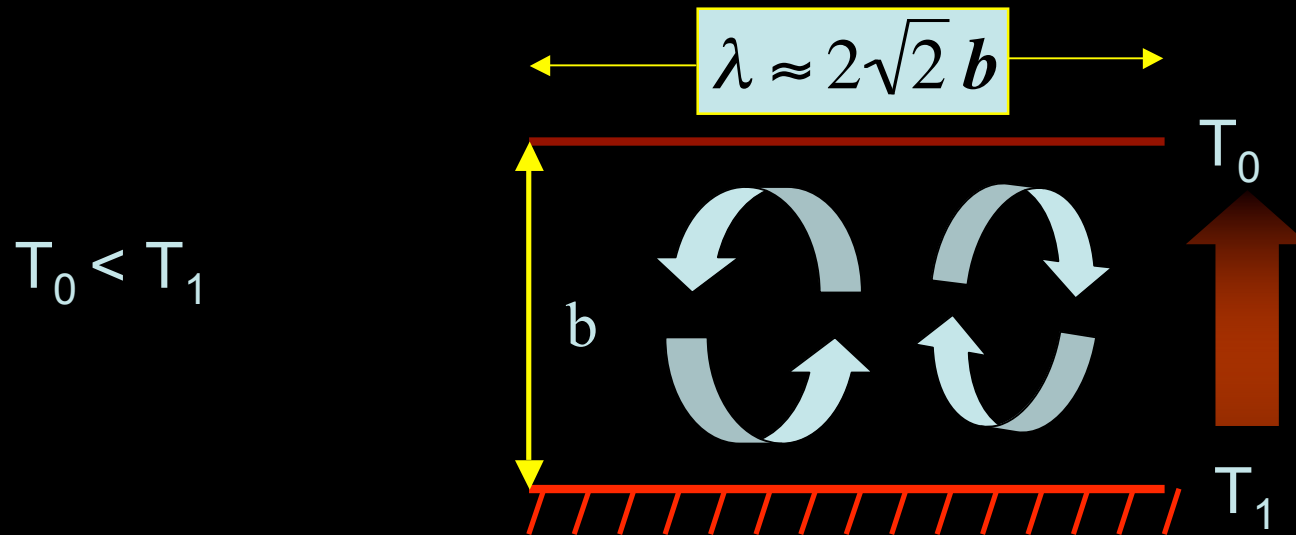
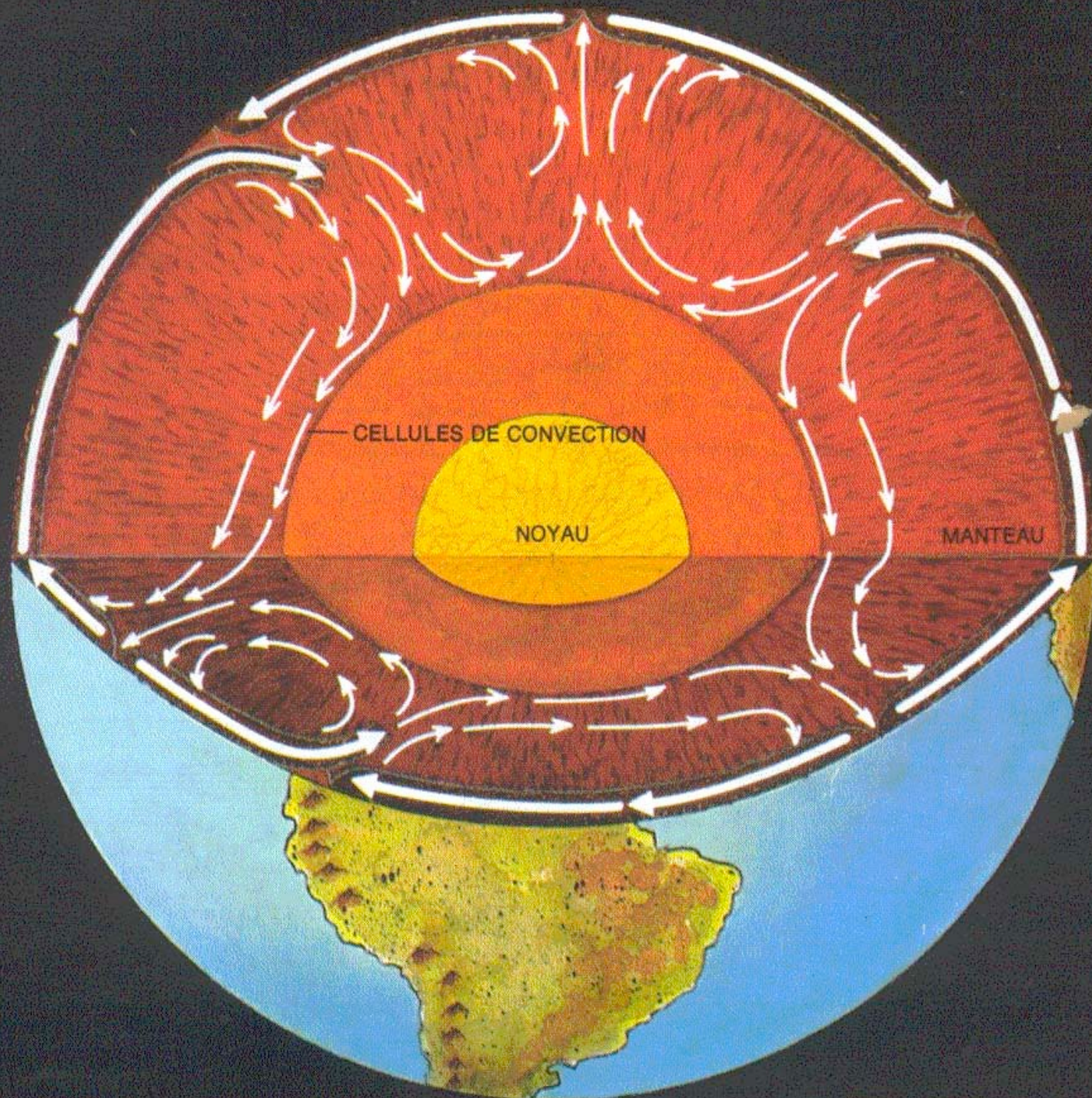


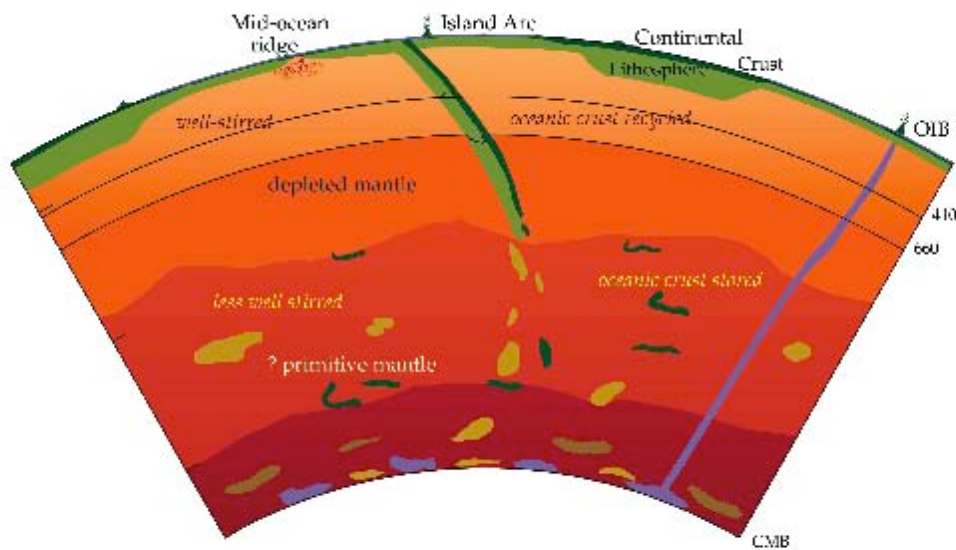
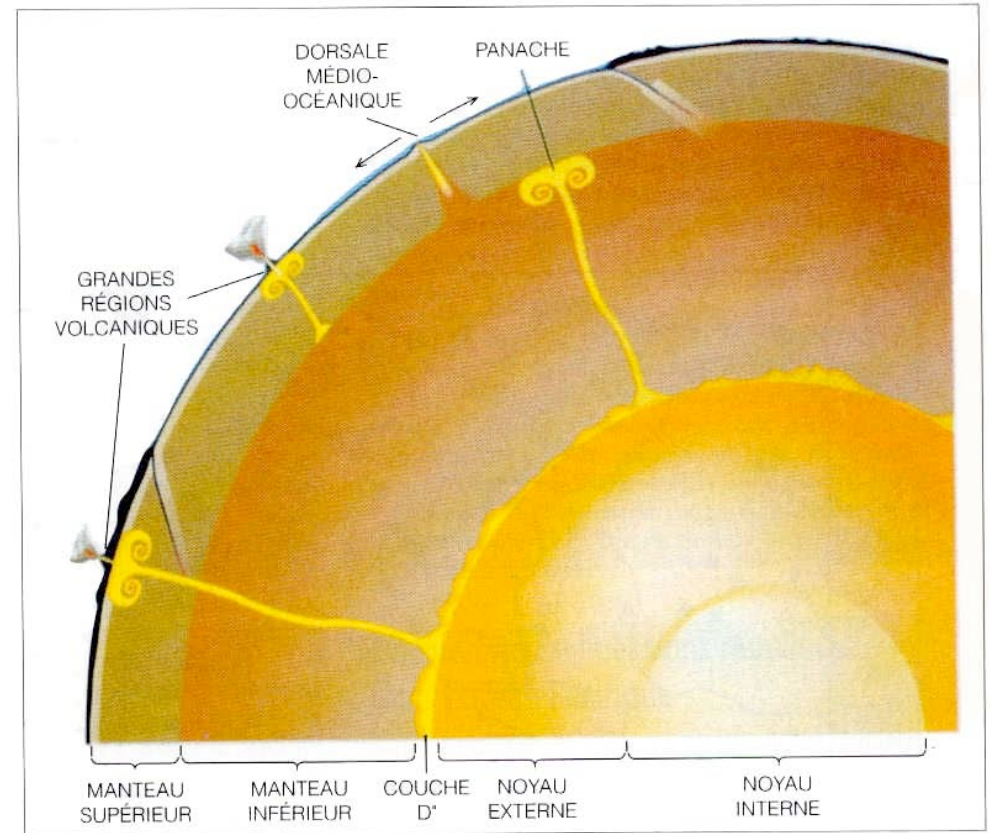
Fig. 2.12. Photographies de l'expérience analogique de convection avec de la cire-gel. De haut en bas et de gauche à droite : situation initiale avant chauffage, formation et élévation d'un panache thermique, étalement du panache sous la couche de cire-gel solidifiée puis épanchement en surface de la cire fondue. Photographies C. Sanloup.

CONVECCION



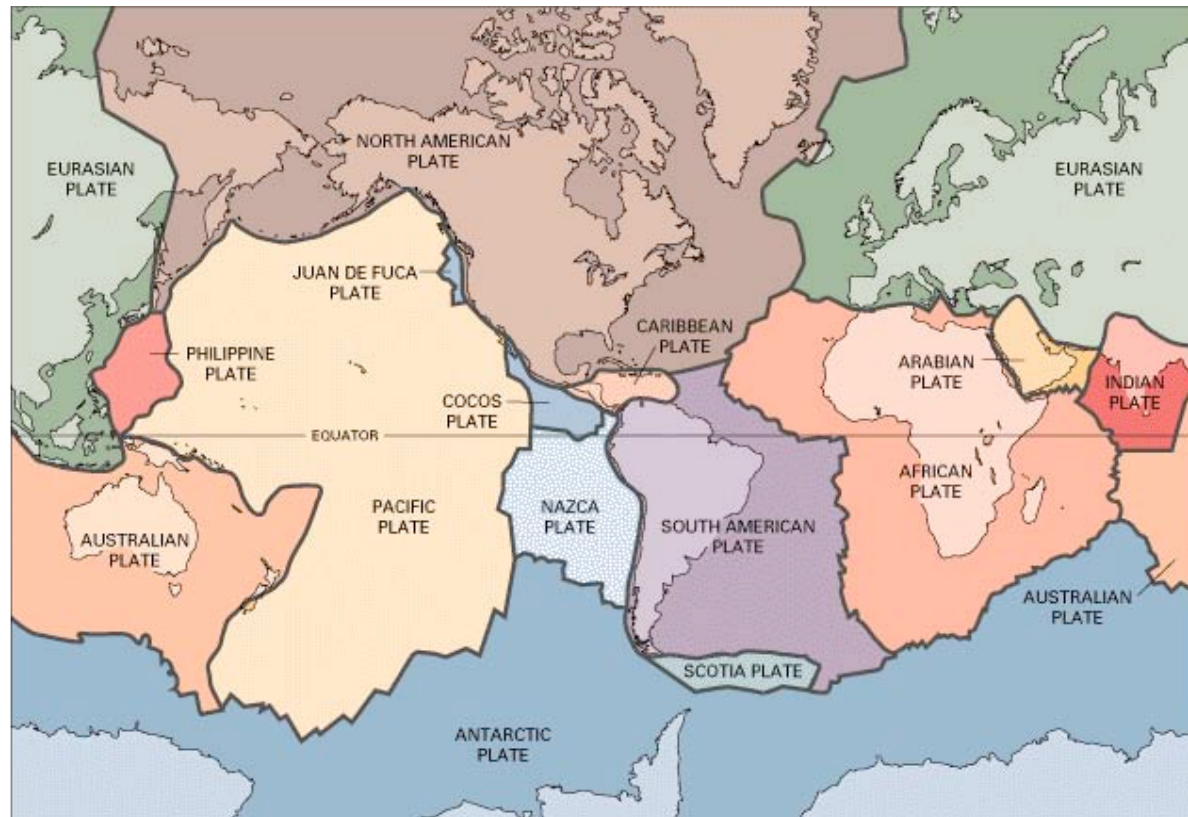


38. La remontée du manteau chaud et peu dense le long d'un panache mantellique donne lieu à une accumulation de matière à la base de la lithosphère qui s'étend latéralement sous la plaque. D'après Coffin et Eldholm, 1993.

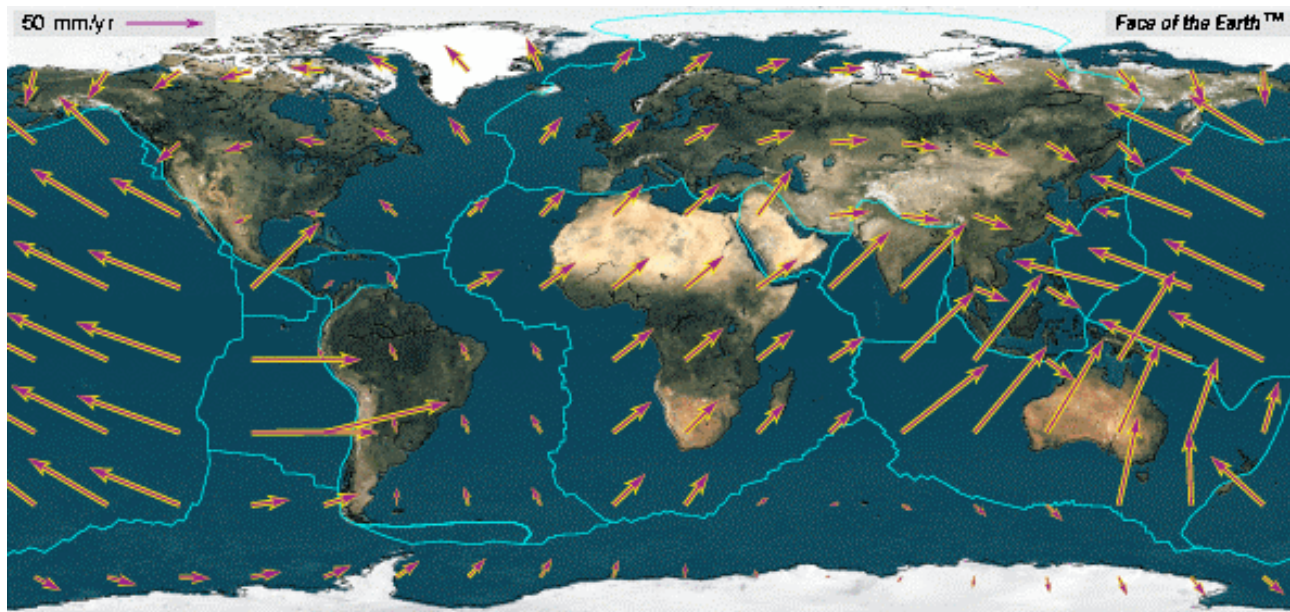


Tectónica de Placas

- Superficie de la Tierra compuesta de placas con un movimiento relativo unas de otras.
- Las Placas se comportan como “sólidos rígidos” moviéndose sobre una Tierra esférica.
- La interacción entre ellas se produce fundamentalmente en sus fronteras generándose allí deformación (aparición de las principales estructuras tectónicas)



from: <http://www-personal.umich.edu/~vdpluijm/gs205.html>



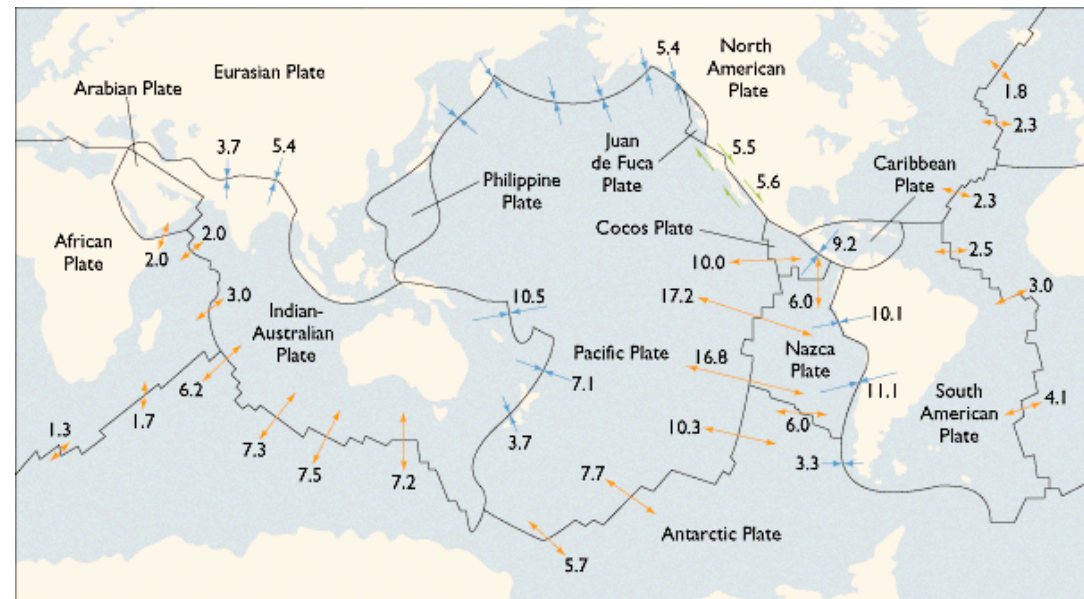
Modelo
NUVEL1

Velocidades

naranja : divergencia

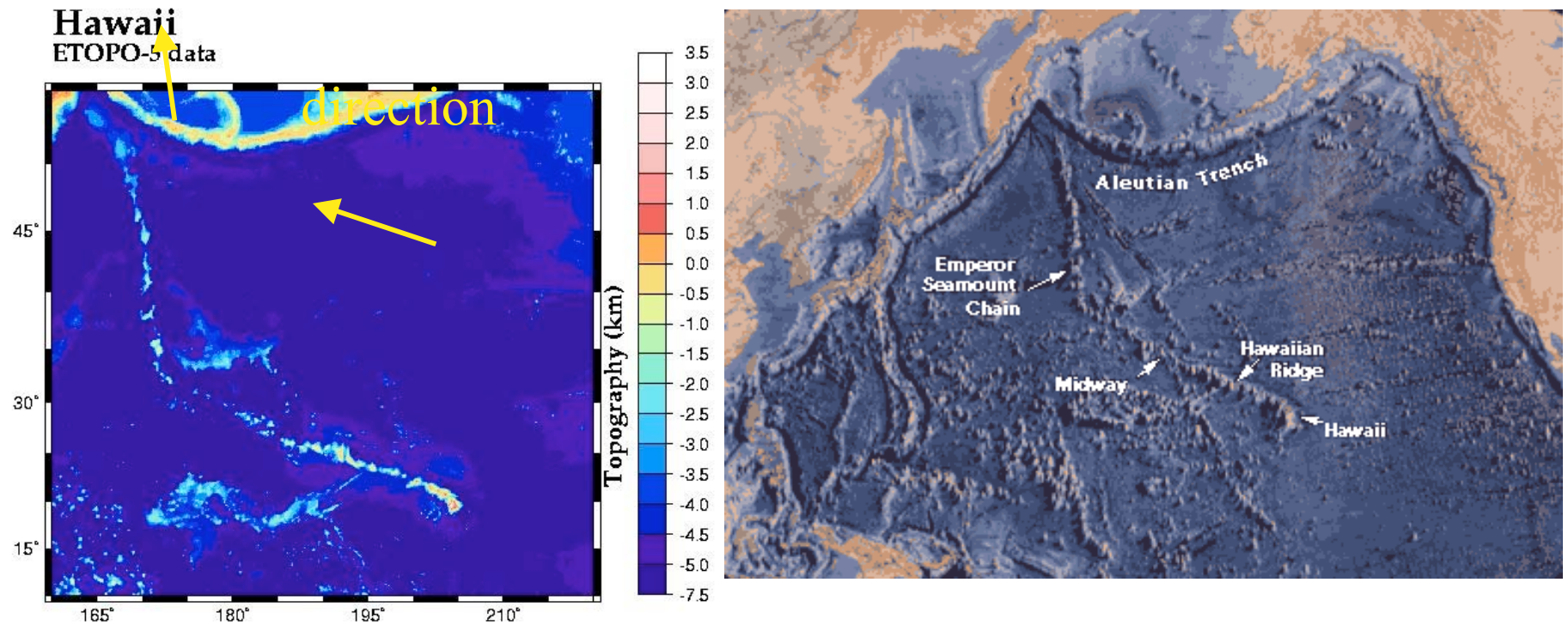
azul : convergencia

verde: transcurrente



movimientos relativos en las fronteras de placas

Evidencias del movimiento de las Placas siguiendo las trazas dejadas de los Hot Spot



Cadena Hawaii-Emperor (hot spot track)

Conceptos claves en la Tectónica de Placas: Litósfera y Astenósfera

La Litósfera y Astenósfera se distinguen por su respuesta al esfuerzo (stress) --No por las discontinuidades sísmicas como la Corteza y Manto. Presentan una frontera definida por límites termales.

La Litósfera (capa más superficial de la Tierra) presenta una reología “rígida” (lithos-roca):

- exhibe un comportamiento flexible y rígido a escalas de tiempo geológicas.
- resistencia al plegamiento y flexuramiento.

En la literatura especializada:

“steel”: alta rigidez ante la flexura

“rubber”: bajos valores de rigidez ante la flexura

La Astenósfera es “débil” y “fluye”

La Litósfera se mueve como una entidad coherente : Placa

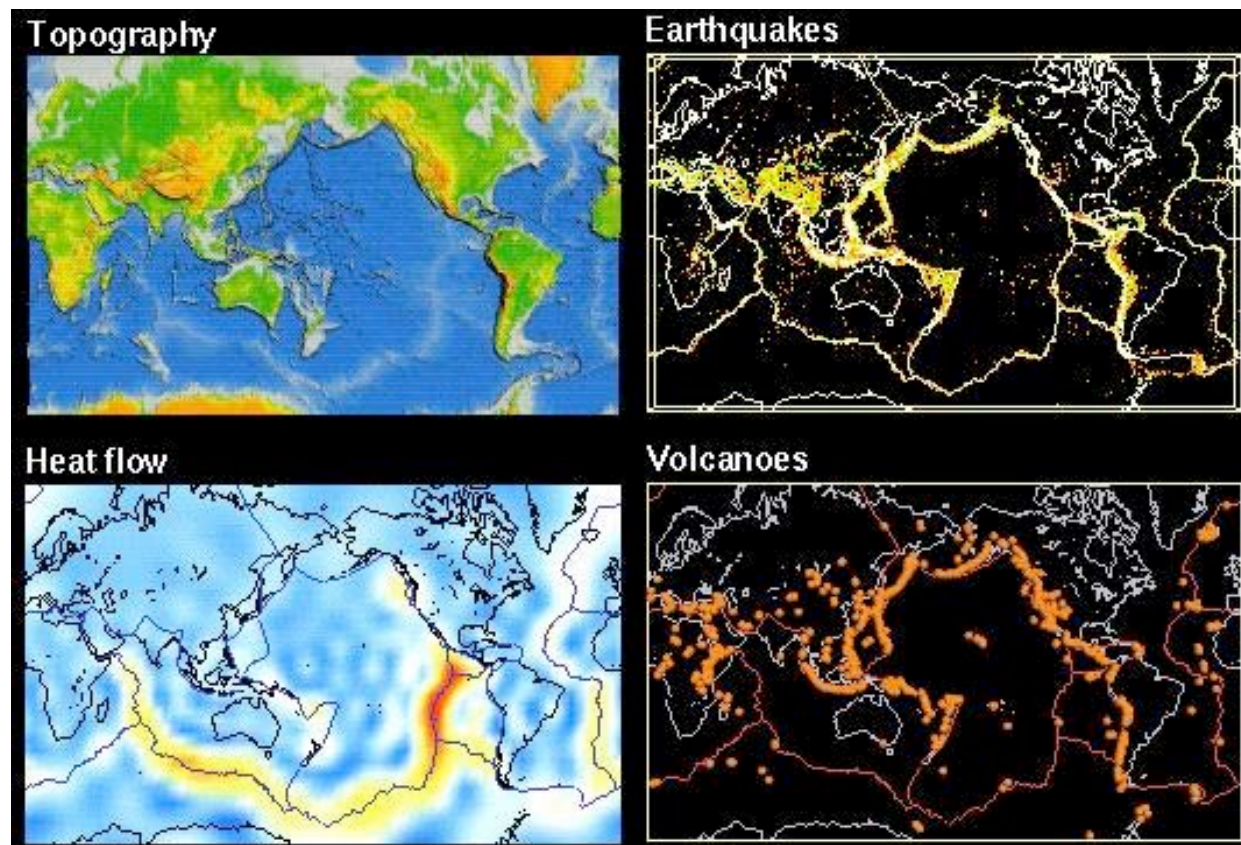
- Contiene corteza y manto superior
- Su base es determinada por la isoterma de 1280°C (límite termal); a esta temperatura, la peridotita es “débil” debido a la facilidad con que se deforma el Olivino.
- Su base no corresponde a una determinada profundidad fija a priori;
- Esta profundidad de la isoterma de 1280°C varía según el contexto tectónico:
 - bajo los ridges, donde el flujo de calor es alto, la litósfera es delgada, sólo de unos pocos km.
 - bajo los cratones, donde el flujo de calor es bajo, la litósfera es gruesa, del orden de los 150 km.

La astenósfera se comporta como un fluido viscoso a tiempos geológicos.

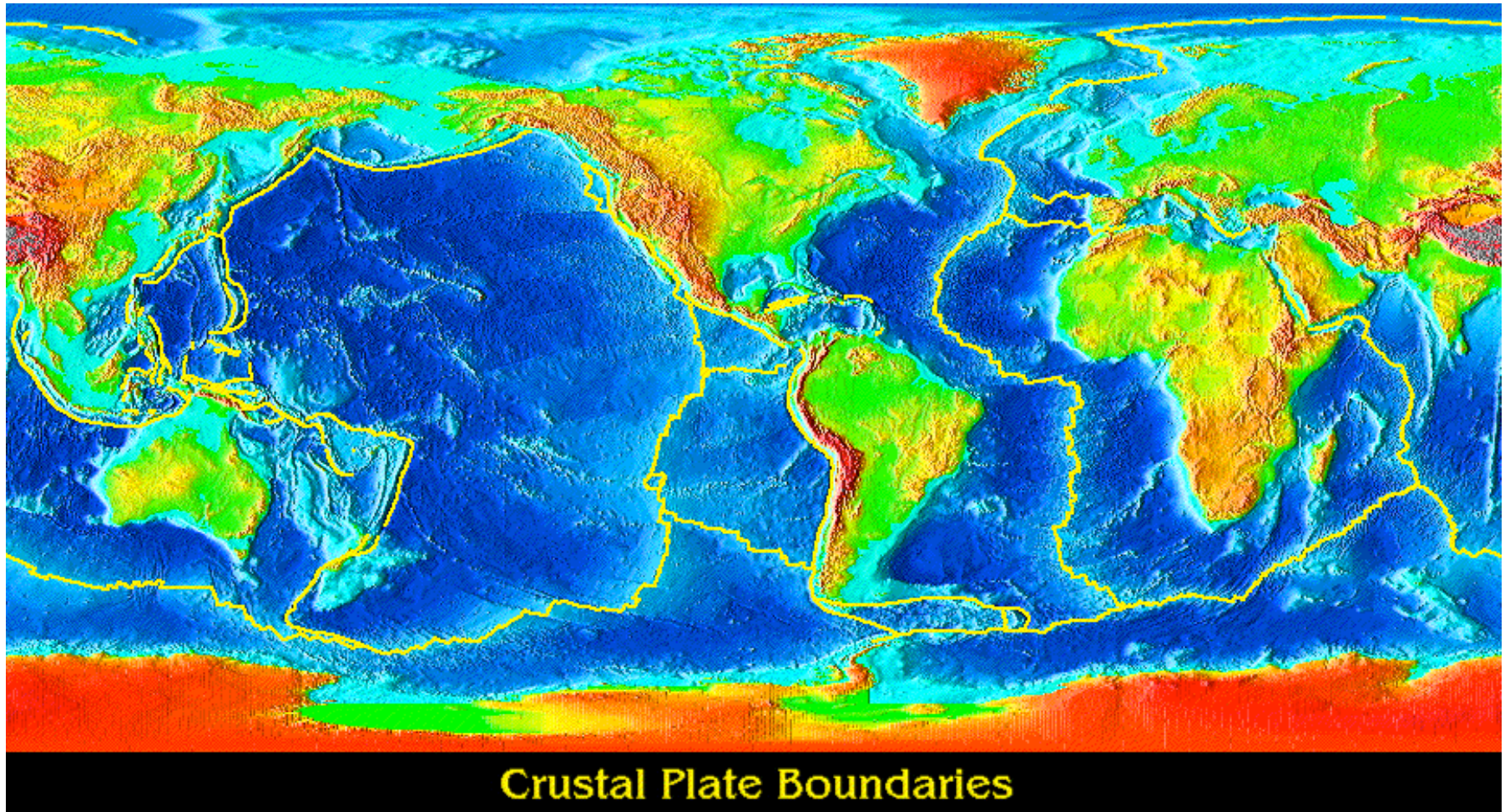
- Es una capa del manto ubicada bajo la litósfera.
- Se compone predominantemente de rocas en fusión parcial (rocas “débiles”)
- Presenta un valor muy débil de rigidez flexural
- El material “fluye” (cristales presentan flujo plástico y difusión): se plantea la ocurrencia de convección
- Corresponde a una zona de baja velocidad para las ondas de cuerpo preferentemente bajo los océanos.
- Problemas abiertos:
 - la base de la astenósfera a 400 km; 670 km; core?
 - presenta una convección estratificada ?
 - involucra esa convección el manto completo ?

La Tectónica de Placas en una Teoría Geotectónica

- Explica un conjunto de ideas y observables coherentemente y permite entender el desarrollo de estructuras geológicas a escala global, regional y local (todas las escalas espaciales y temporales).
- Se hace cargo extremadamente bien de los datos observados (satelitales, sísmicos, magnéticos, termales, volcánicos, balances de masa, tectónicos, gravedad, etc.)
- No ha sido la primera teoría (ej.: shrinking Earth; geosynclines)



from: <http://www-personal.umich.edu/~vdpluijm/gs205.html>



notar que no todos los océanos y continentes están separados por las placas

La Placa Pacífico es completamente oceánica, pero las de Sudamérica, Africana y Norte Americana son tanto oceánicas como continentales.

La Teoría de la Tectónica de Placas permite explicar la expresión de la sismicidad restringida fundamentalmente en las fronteras de las Placas (Las Placas se comportan como cuerpos rígidos donde lo esencial de la deformación frágil se absorbe en sus fronteras).

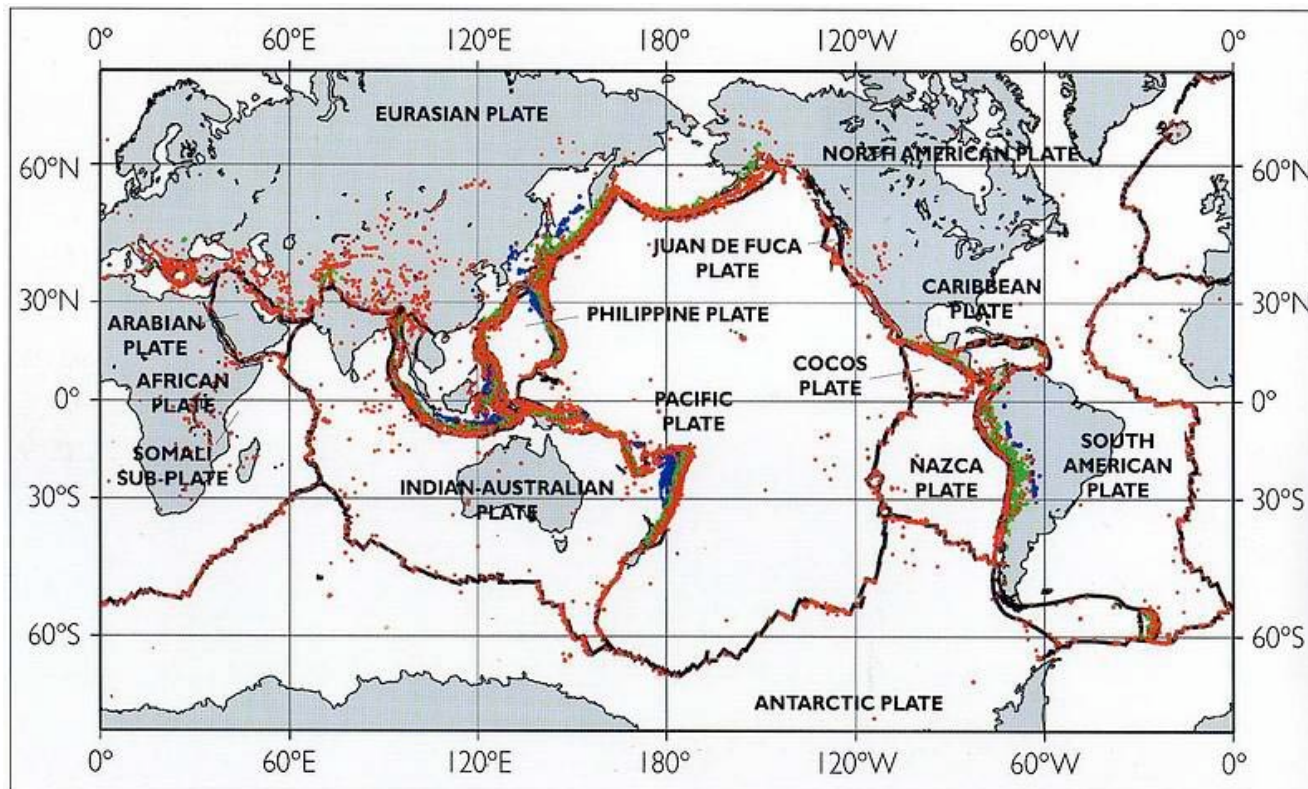
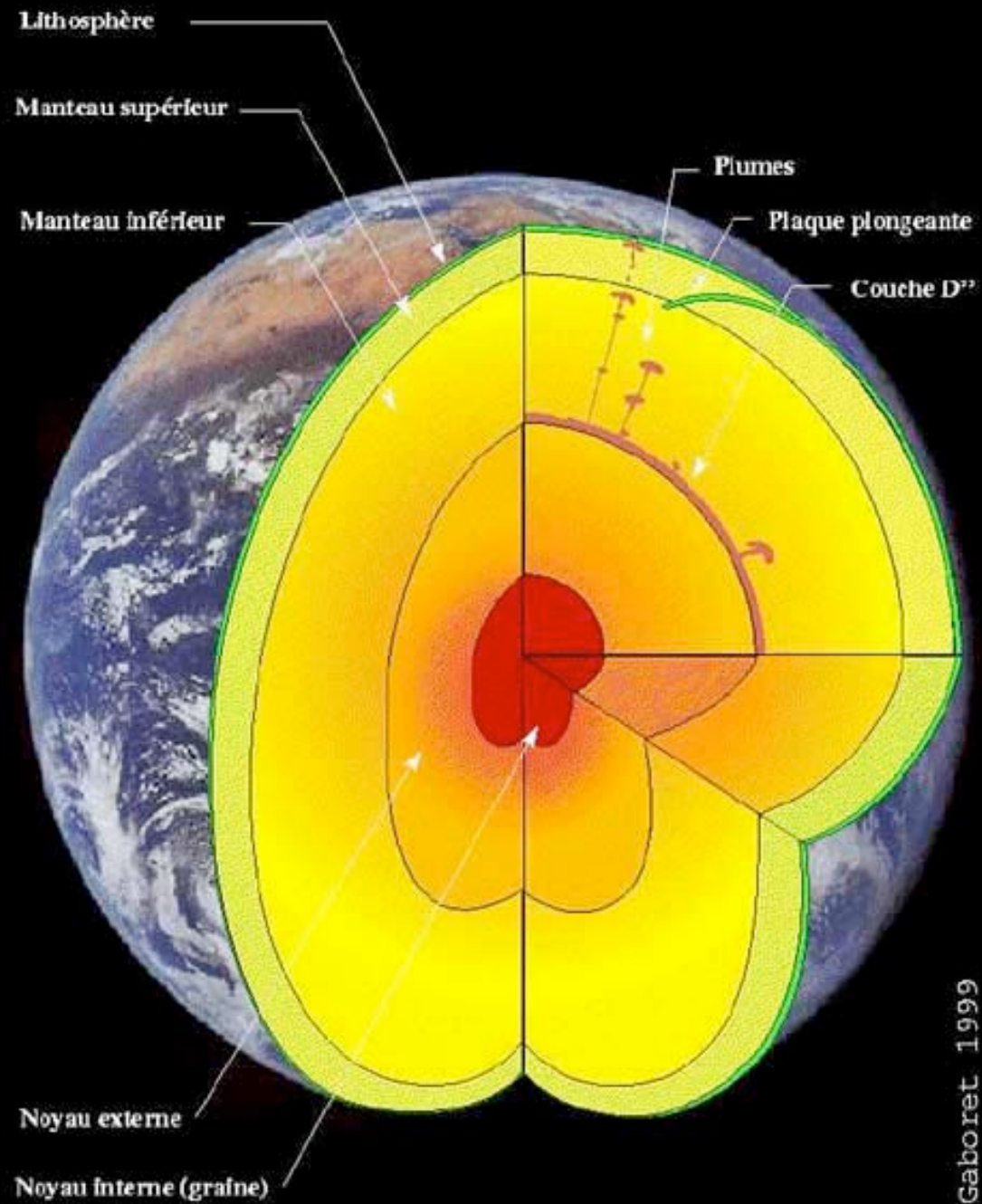


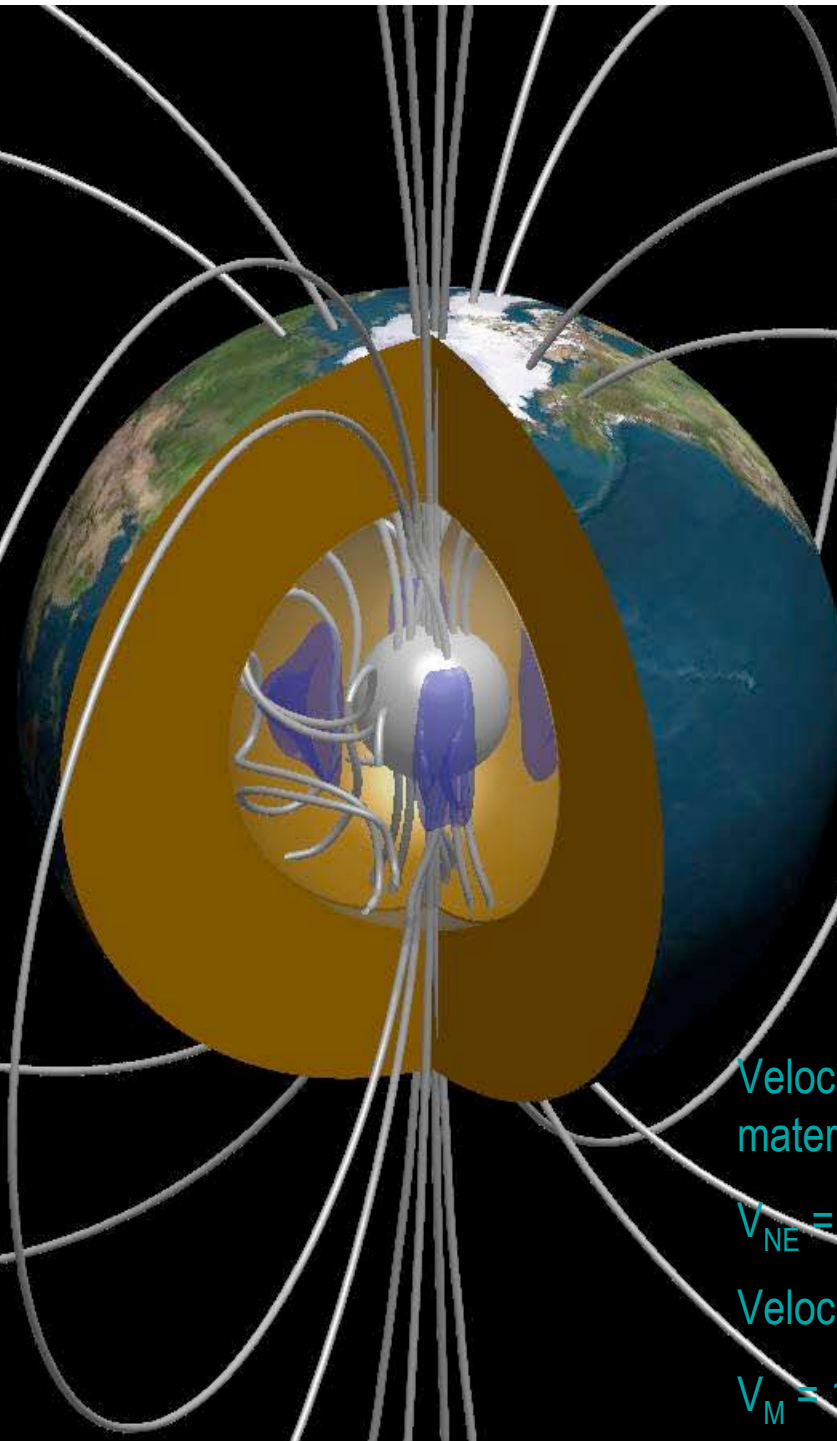
Figure 18-14
Frank Press and Raymond Siever, UNDERSTANDING EARTH, Third Edition.
Copyright © 2000 by W. H. Freeman and Company.

Modelo actual



Gaboret 1999

Tierra: 30.400 nT
Mercurio: 100 a 200 nT
Venus: < 1 nT
Luna: -
Marte: 2 a 60 nT
Jupiter: 450.000 nT
Saturno: 23.000 nT
Urano: 24.000 nT



Tierra

Velocidad movimiento de la
materia en el Núcleo Externo

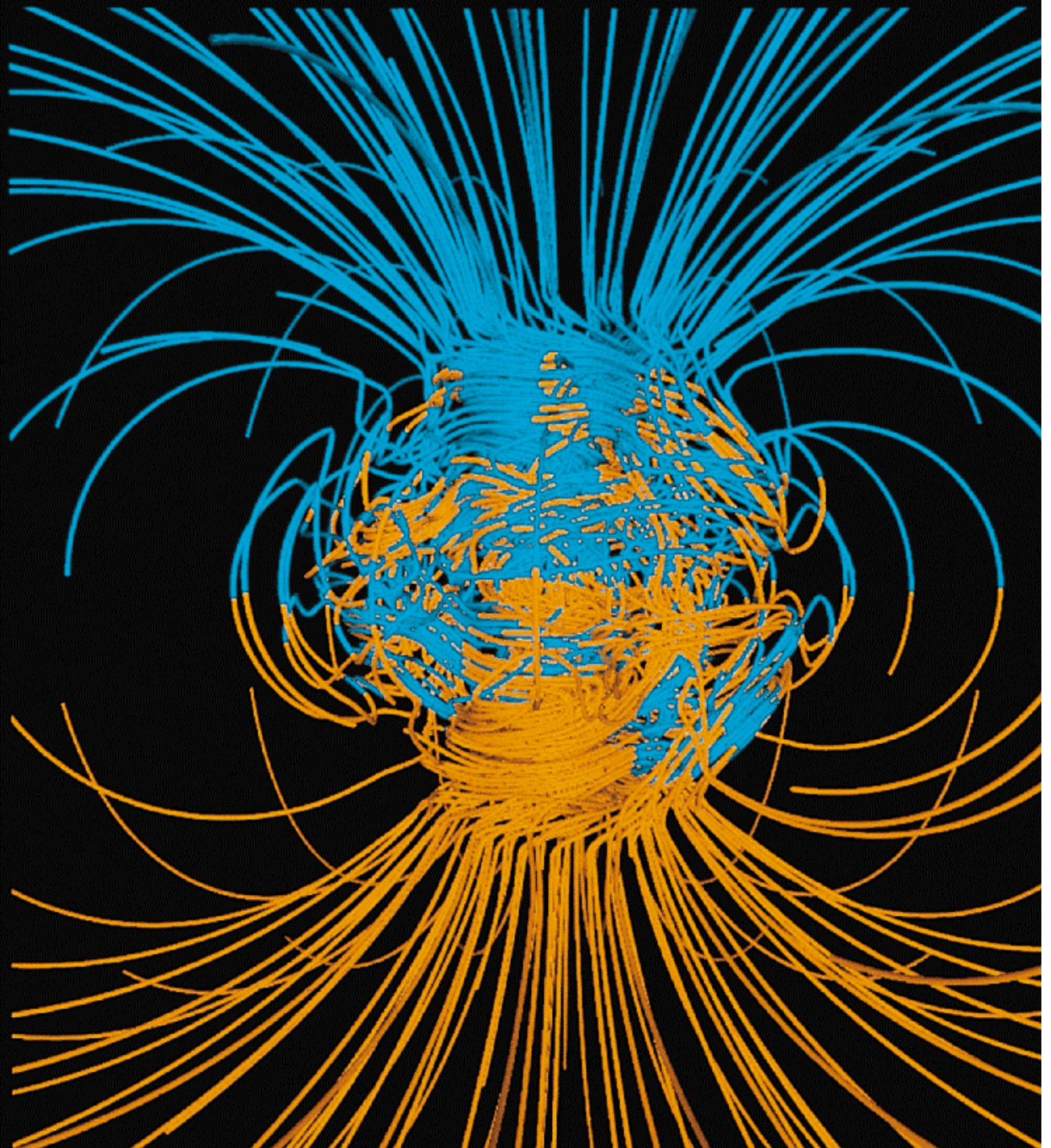
$$V_{NE} = 3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} = 9.5 \text{ km año}^{-1}$$

Velocidad material del Manto:

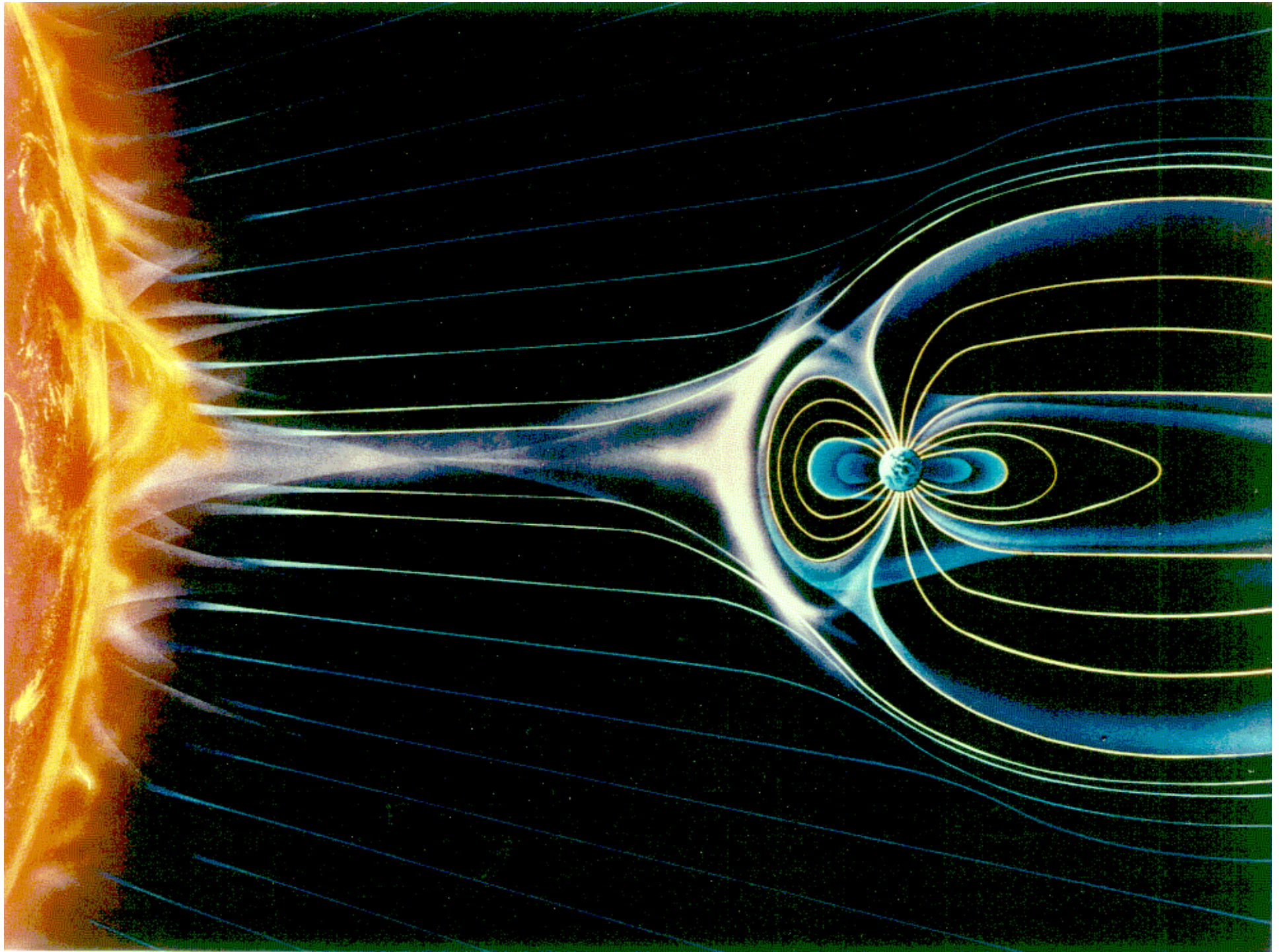
$$V_M = 10 \text{ cm año}^{-1}$$

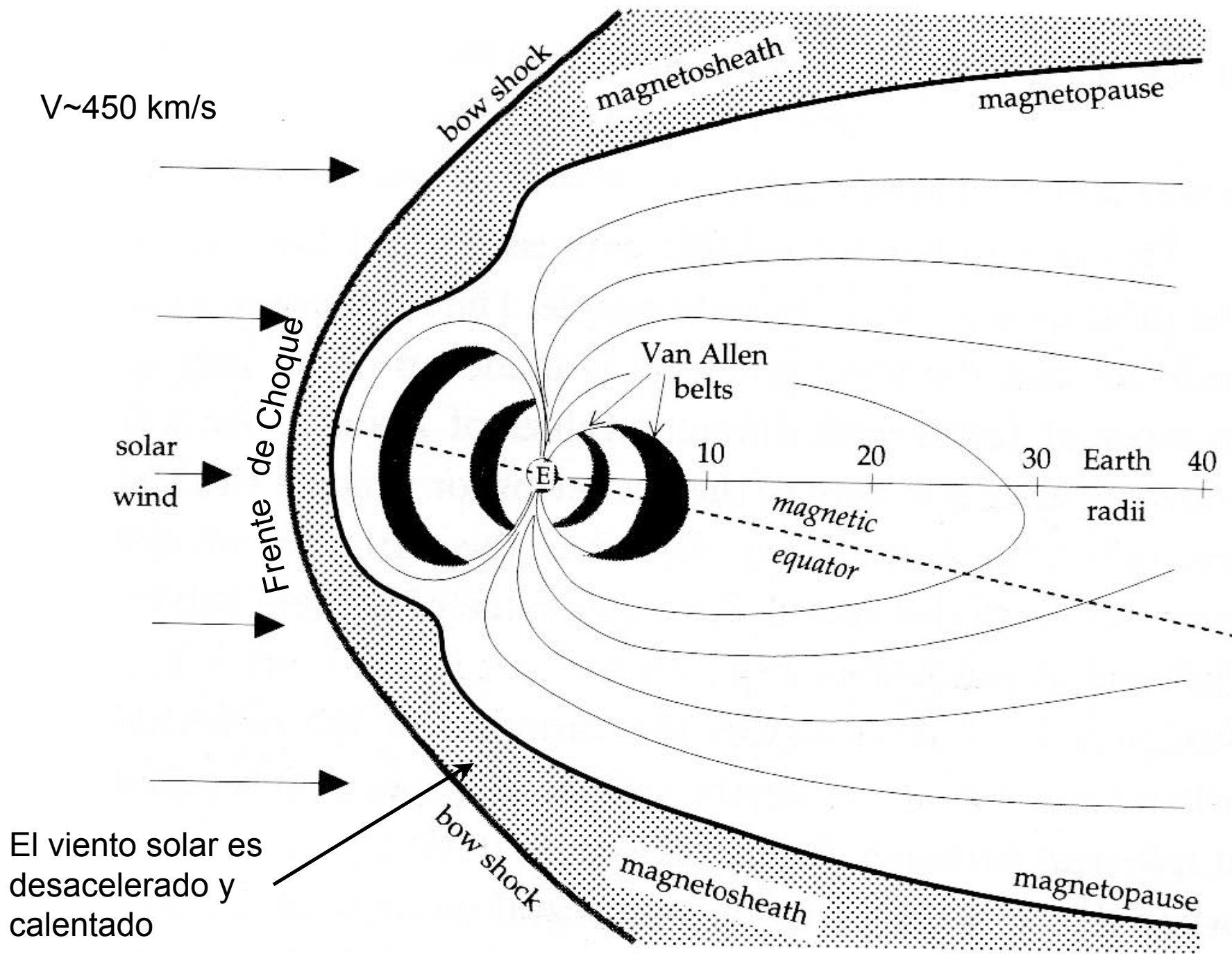
Campo Geomagnético:
Problema abierto en física
hasta 1995 cuando
Glatzmaier and Roberts
(UCLA) realizaron
simulaciones numéricas de
más de 2 mil horas (casi 3
meses) en un CRAY C90.

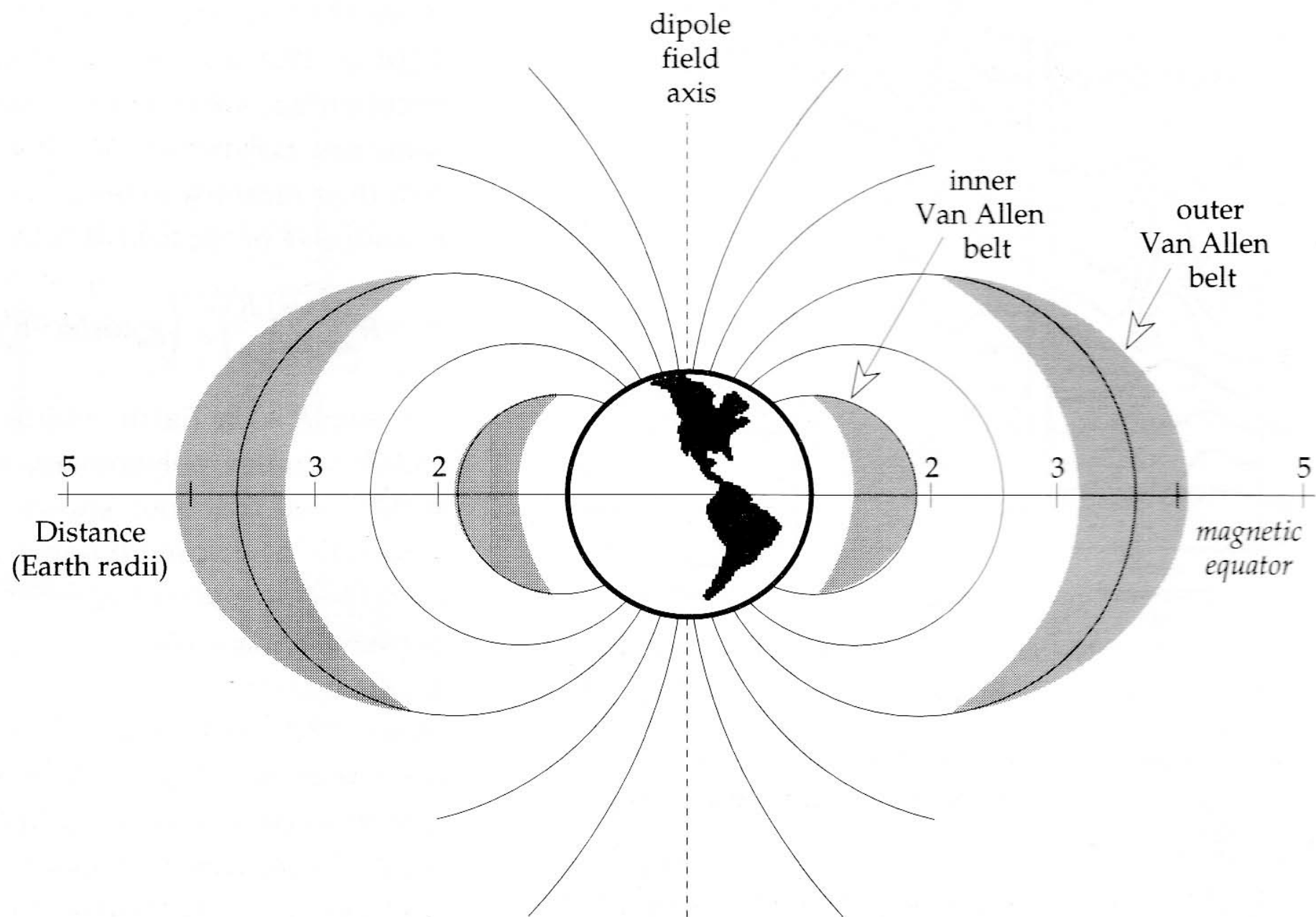
El modelo
electromagnético y
fluidodinámico de los
procesos en el interior de
la Tierra reproducen
estructuras claves
(inversiones) del campo
magnético de los últimos
40 mil años.











La Ionósfera actúa como un casquete de protección contra gran parte de la radiación extra-terrestre. La atmósfera actúa como un escudo protector contra el resto.

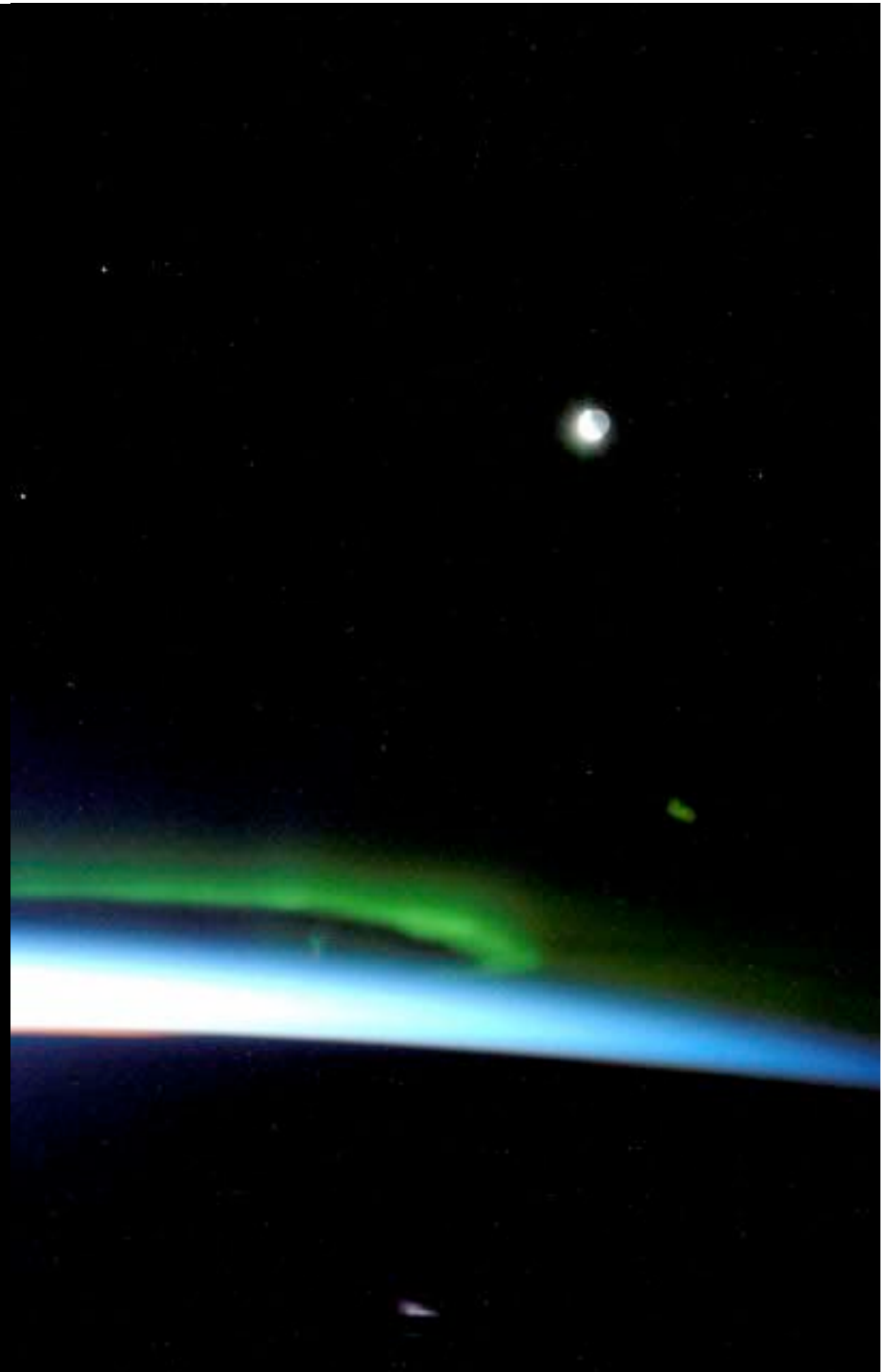
Gran parte de la radiación solar de muy corta longitud de onda que penetra la atmósfera no logra llegar a la superficie de la Tierra.

Los rayos- γ , rayos-X, radiación UV producen ionización de las moléculas de N y O en la alta atmósfera entre 50 km y 1500 km, formando una región ionizada llamada Ionósfera.

La Ionósfera está formada de 5 capas y c/u refleja las ondas de radio.

Los espesores y la ionización de estas capas cambia durante el día; Todas, excepto 1 o 2 de ellas, desaparecen durante el lado “nocturno”, mientras que aquellas en el lado “diurno” se espesan y refuerzan.

La ionización de moléculas libera enjambres de electrones. El efecto de marea (Sol) sobre esta capa junto con el fortalecimiento y aparición de más capas ionosféricas durante el lado “diurno”, generan movimientos de estas partículas cargadas dentro del campo geomagnético lo que a su vez generan poderosos flujos de corrientes eléctricas (por Ley de Lorentz) y se generan campos eléctricos el cual produce corrientes y flujos horizontales --> Tormentas ionosféricas.



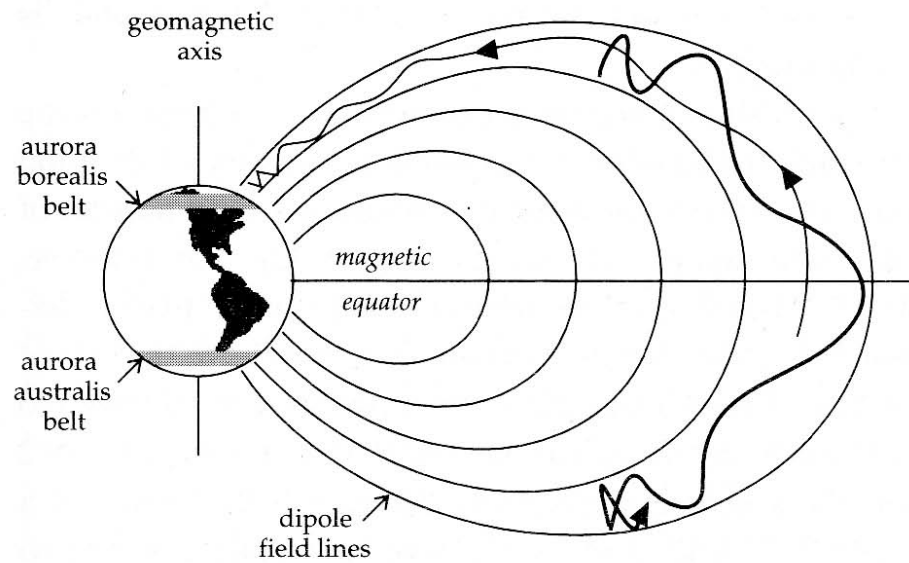


Fig. 5.29 Charged particles from the solar wind are constrained to move in a helical fashion about the geomagnetic field lines (after Vestine, 1962).

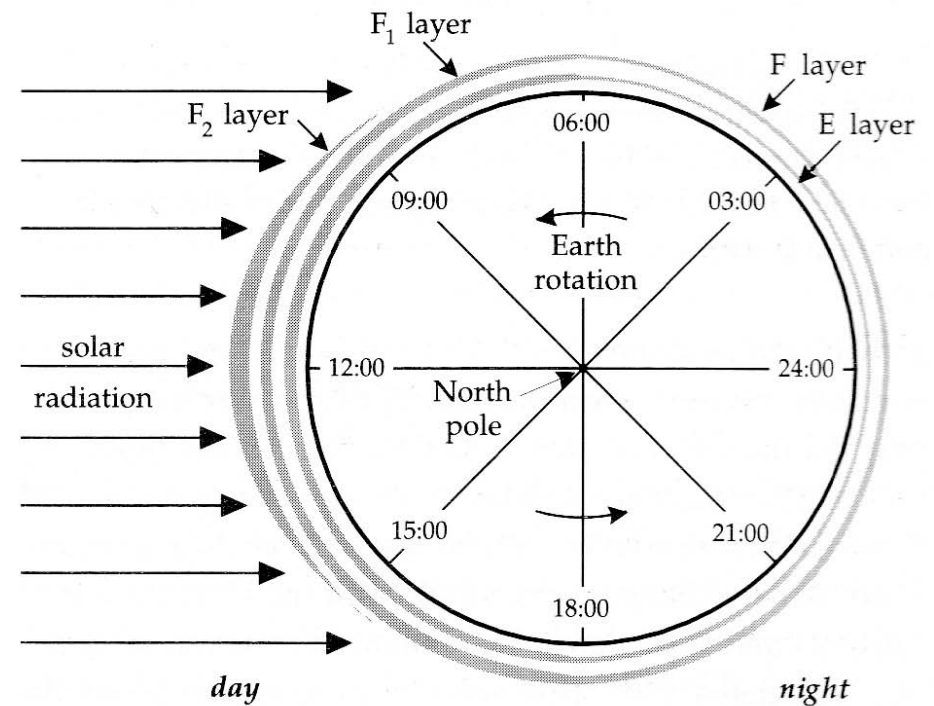


Fig. 5.30 Cross-section through the Earth showing the layered structure of the ionosphere (after Strahler, 1963).

A photograph of a pond with ripples and reflections of trees. The water is dark blue with concentric ripples emanating from a central point. The background shows a dense forest with green foliage and tree trunks reflected in the water.

La Tierra como Planeta Habitable

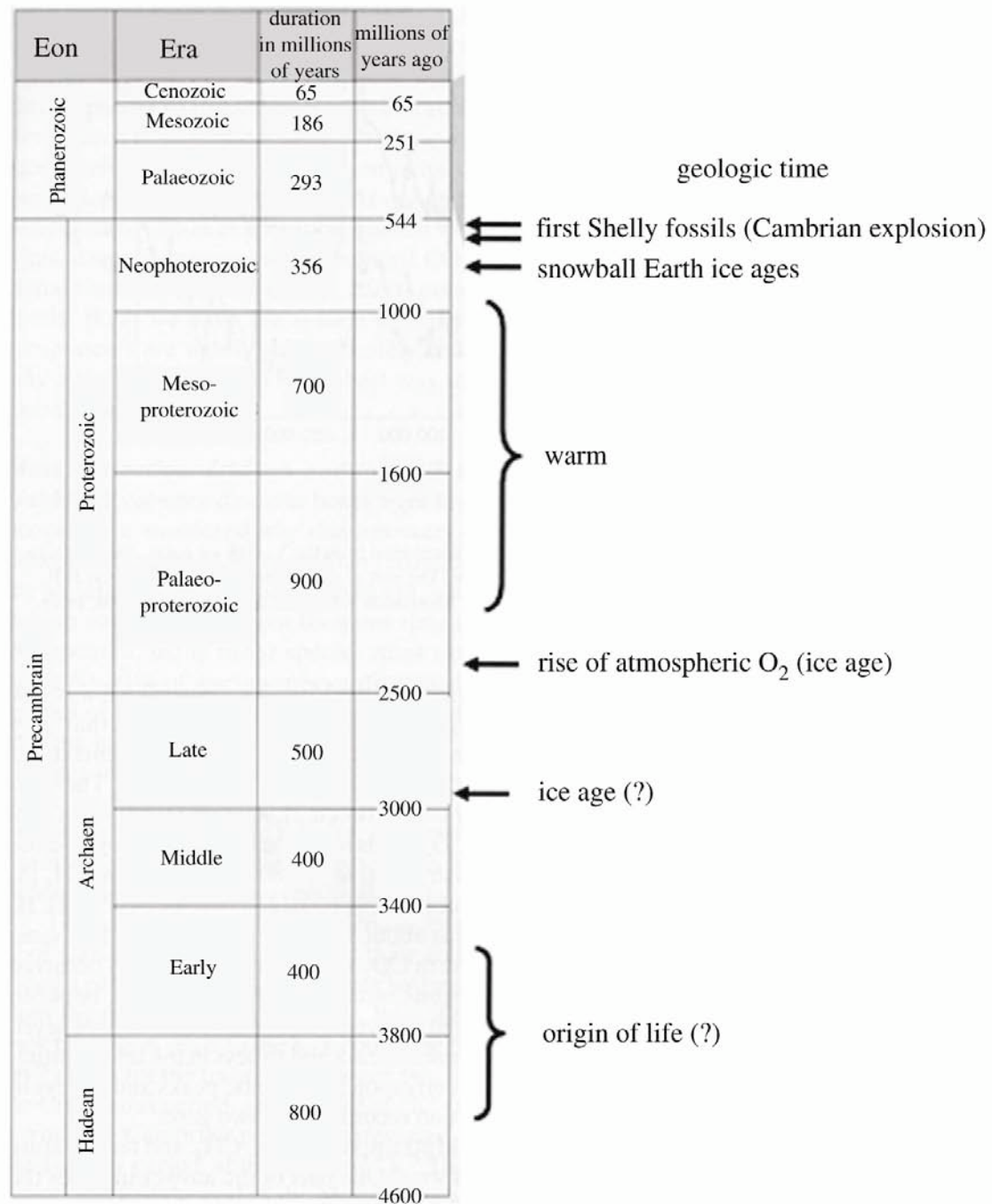
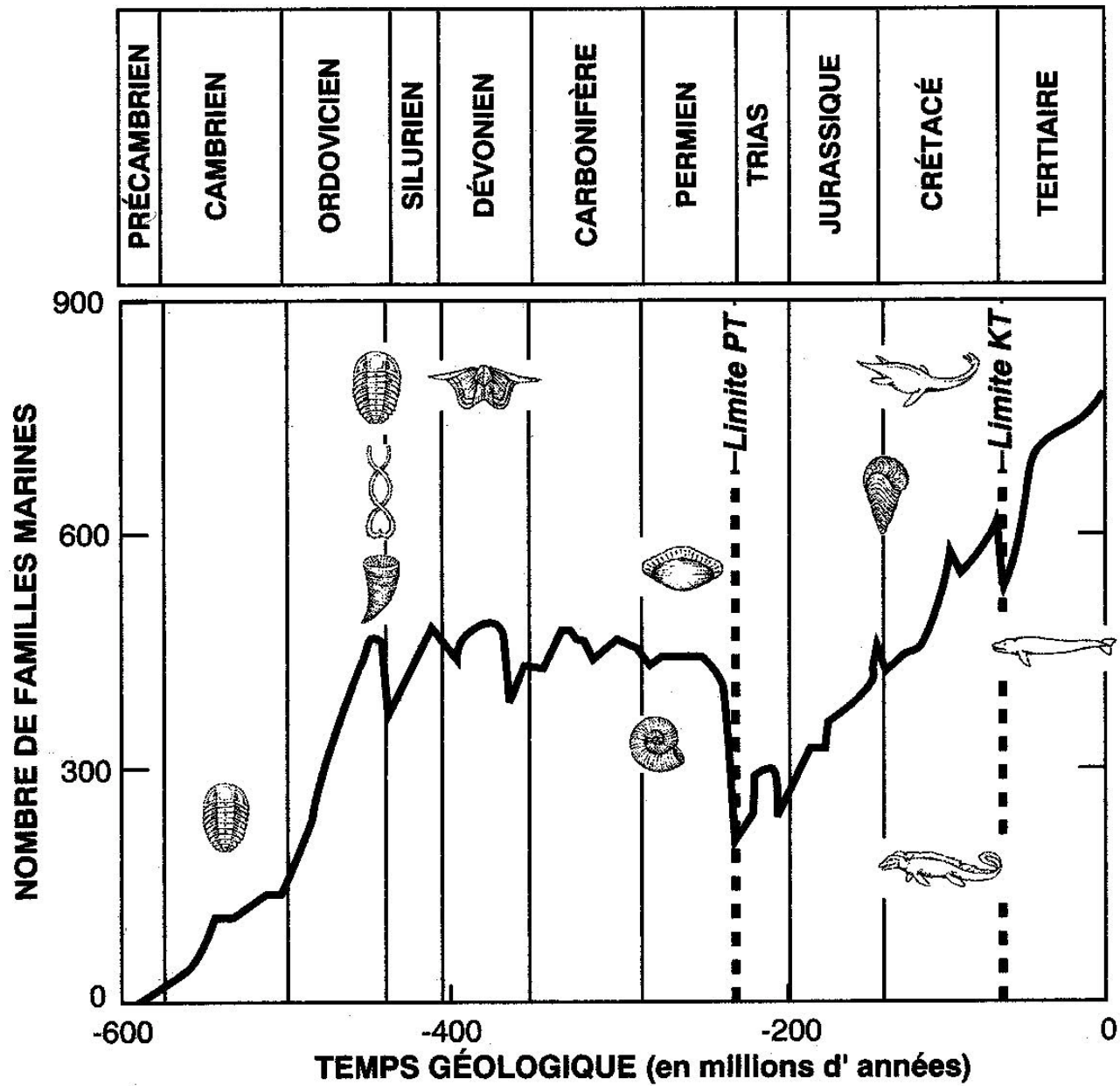
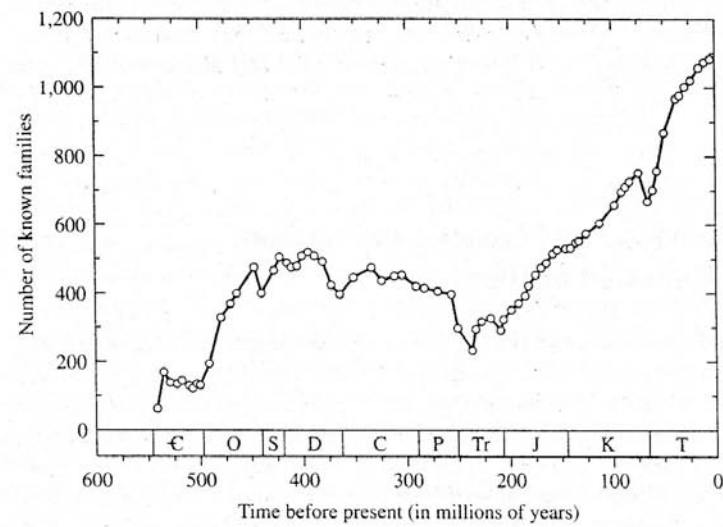


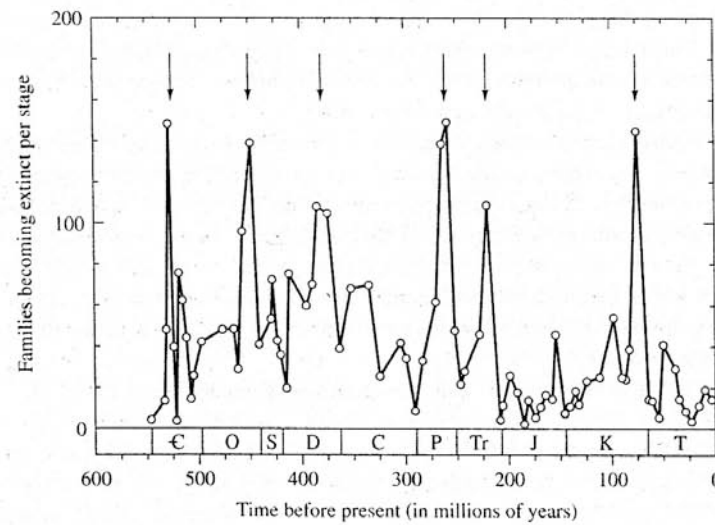
Figure 1. Geologic time-scale showing major climatic and evolutionary events during the Precambrian Era.



Variación de la tasa de extinción en el tiempo



a



b

FIGURE 16.5 (a) Growth in the number of marine animal families alive from the Cambrian to the present plotted versus time before present and versus the Phanerozoic geologic periods (using the standard symbols for, left to right, Cambrian, Ordovician, Silurian, Devonian, Carboniferous, Permian, Triassic, Jurassic, Cretaceous, and the Tertiary). (b) Number of families becoming extinct as a function of time, with arrows indicating the times of major extinctions seen in the fossil record.

Tierra un planeta evolutivo - Condiciones para la vida

La vida en la Tierra es tan abundante que modula prácticamente todos los procesos que ocurren en la corteza y atmósfera terrestre.

La dinámica terrestre (flujos de materia y energía) se manifiesta a todas las escalas espaciales-temporales.

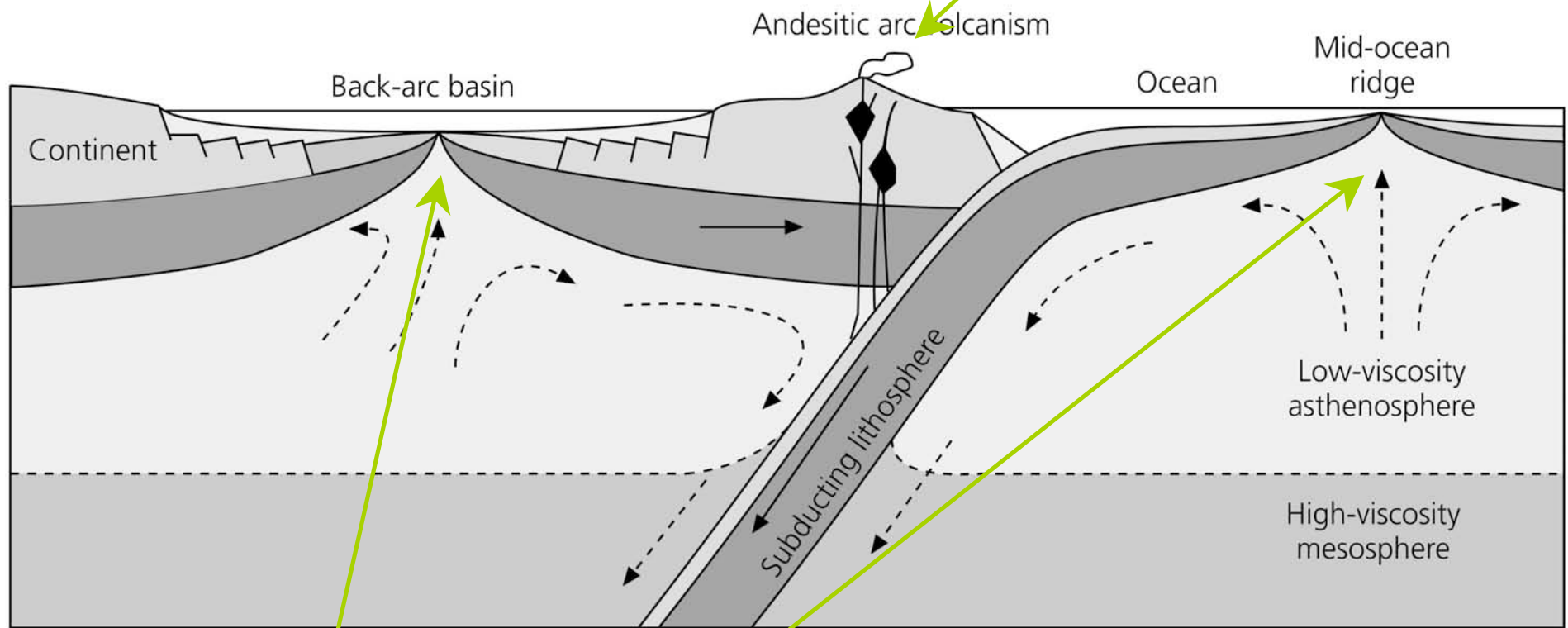
→ La Tierra es un Sistema Complejo

→ Sistemas Complejos se “mantienen” estables en condiciones alejadas del equilibrio (I. Prigogine, Termodinámica del no-equilibrio e irreversibilidad) → Acceden a una cantidad suficientemente importante de Energía Libre (Gibbs) → Esto les permite manifestación de propiedades de “auto-organización” y “auto-complejidad”

→ *La Tierra es un Sistema Complejo lejos del equilibrio capaz de obtener grandes cantidades de energía libre para mantener sus propiedades de auto-organización y auto-complejidad.*

Volcanismo Andesítico (ácido)
→ Inyección de Gases y vapor
de H₂O a la atmósfera

Figure 5.4-1: Cartoon of a subduction zone.



Ridges: Condiciones
Hidrotermales
Extremas → Vida

Concluyendo: en la Tierra al menos hace 3.5×10^9 años, y quizás desde 3.0 a 4.0×10^9 años, se tiene registros o indicios claros de vida -de manera continua- sobre la Tierra.

→ Esto se entiende en el contexto de procesos que permiten y mantienen la HABITABILIDAD en una Tierra EVOLUTIVA.