The background features several Earth globes of varying sizes and orientations, set against a dark background. A large, prominent white sphere is positioned in the lower right quadrant, partially overlapping the text.

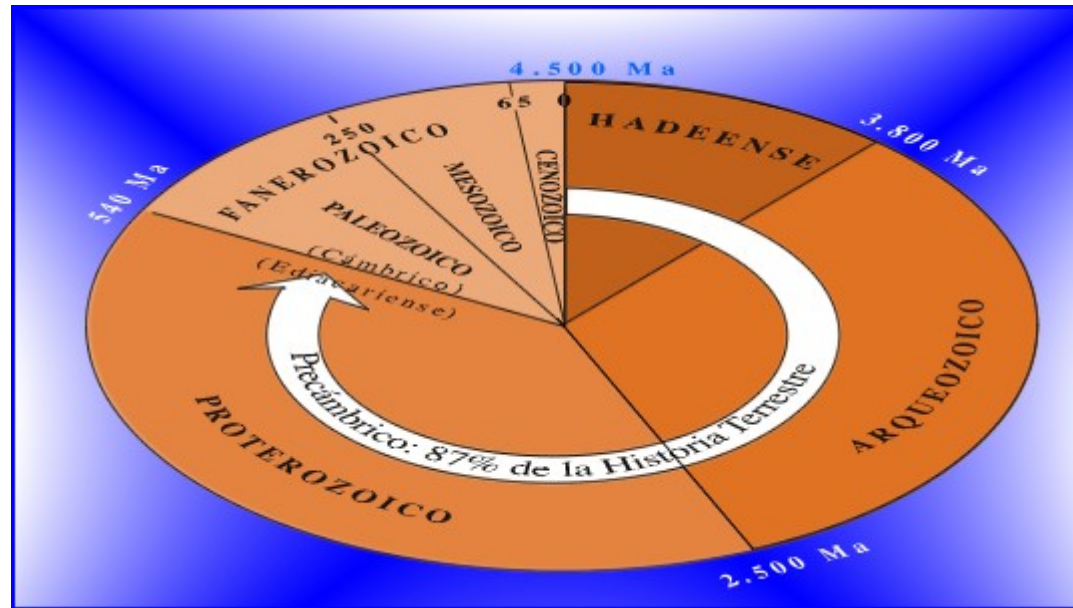
Historia del clima: Pre-Cuaternario



Gerardo Benito Ferrández

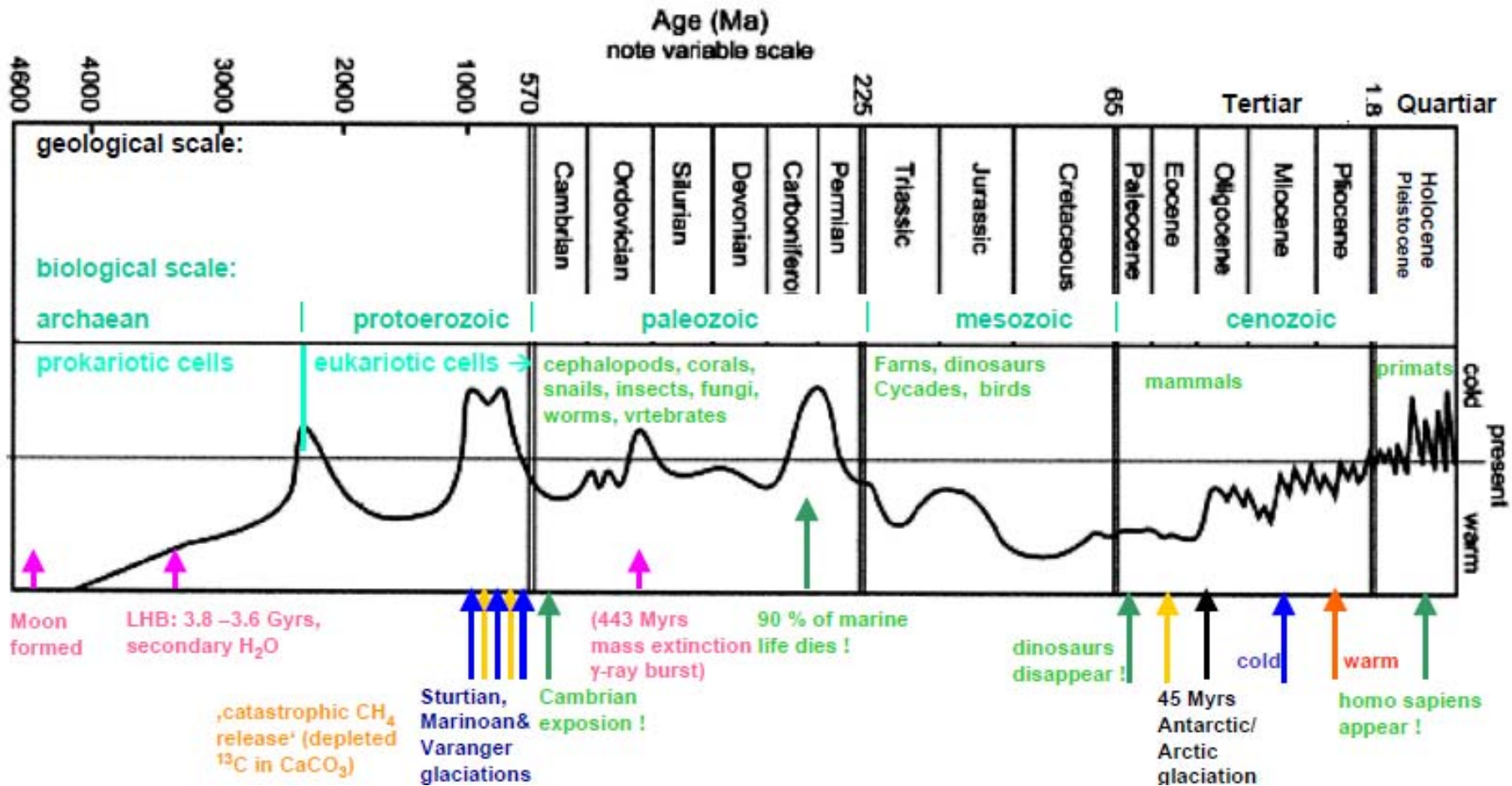
CSIC-Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid

Cambio Climático Precuaternario



División geológica de la Tierra desde sus orígenes (hace 4.500 millones de años) hasta la actualidad. Queda dividida en cuatro eones: Hadeense, Arqueozoico, Proterozoico y Fanerozoico, cuyos nombres hacen referencia a la evolución de la vida terrestre. El último eón, el Fanerozoico, se divide en tres eras: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. Las eras, a su vez, se dividen en períodos.

Evolución del clima en la Tierra



Arqueozoico 3.8 - 2.5 Ga

- La atmósfera era muy diferente a la actual, con elevadas concentraciones de CH_4 , NH_3 (amoníaco), y otros gases que serían tóxicos para la mayor parte de los seres vivos actuales.
- La corteza terrestre comenzaría a enfriarse y a formarse las placas continentales. La vida comenzó a aparecer en el Arqueozoico temprano.
- Los fósiles más antiguos datan de aprox. 3458 ± 2 Ma BP, y consisten en microfósiles de bacterias procariotas (Ueno et al., 2006). Toda la vida durante más de un billón de años era bacteriana.
- Los estromatolitos, que son colonias de cianobacterias fotosintéticas se han encontrado fósiles en rocas del Arqueozoico temprano de Australia.
- Los estromatolitos incrementaron su abundancia en el Arqueozoico, pero comenzaron a descender en el Proterozoico. En la actualidad no son muy comunes.

Cianobacterias

Las cianobacterias (antecesoras de los cloroplastos de las células vegetales) son bacterias fotosintéticas, que fabrican carbohidratos y oxígeno a partir del dióxido de carbono y del agua, usando la luz solar como energía.

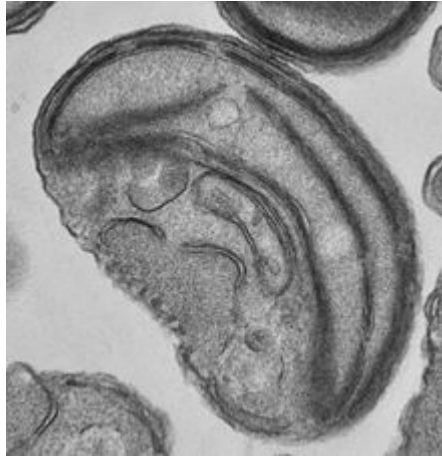


A lo largo de la historia de la Tierra, las cianobacterias han sido los principales organismos creadores de oxígeno

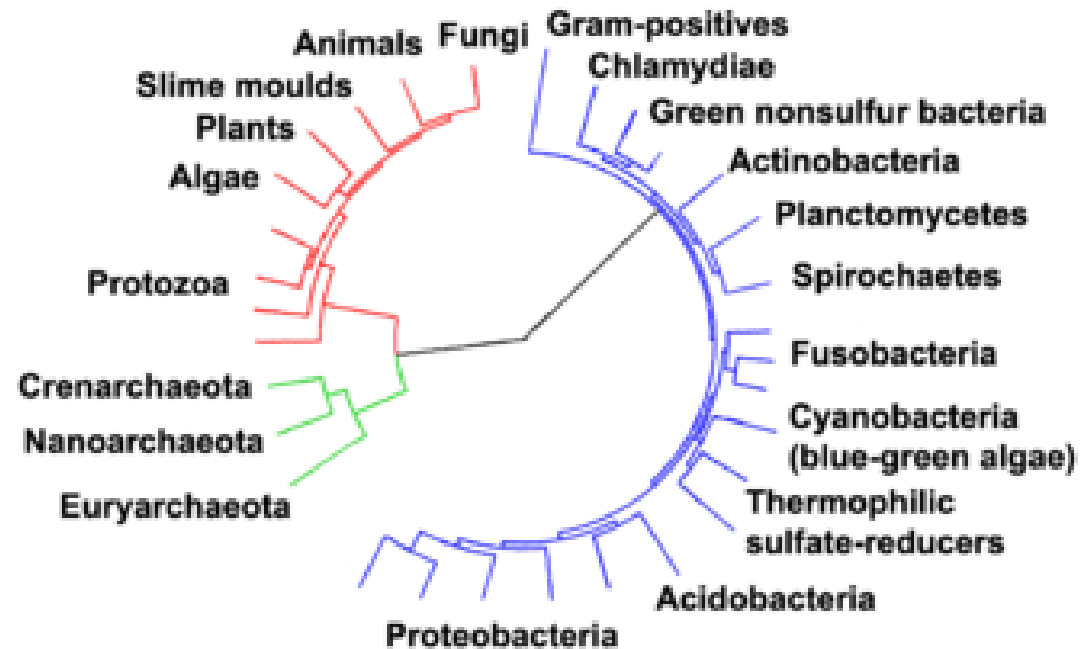
Eón Proterozoico: 2.5 - 0.543 Ga

- Tienen lugar algunos de los hitos más importantes de la historia de la vida y de la Tierra.
- Se generan continentes estables y comienzan su agradación, un proceso que dura varios billones de años. Se tienen evidencias fósiles de abundantes organismos vivientes, principalmente bacterias y arqueobacterias, pero solamente hace 1.8 Ga aparecen las primeras células eucariotas (eucariontes).
- Con el inicio del Proterozoico (2.32 ± 0.015 Ga BP) se presentan las primeras evidencias de aumento del oxígeno en la atmósfera. Esta catástrofe global fue posible gracias a la actividad de numerosos grupos de bacterias, que hicieron posible la explosión de las formas eucariontes.
- Estos eucariontes incluyen las algas, y hacia el final del Proterozoico, los primeros animales.

Eucariontes



Ostreococcus es el euraciota
viviente de menor tamaño ~ 0.8 μm .



Organismos unicelulares y pluricelulares con núcleo verdadero, en los cuales las diferentes células se especializan para diferentes tareas y que, en general, no pueden sobrevivir de forma aislada. Pertenecen al dominio Eukarya animales, plantas, hongos, así como varios grupos denominados colectivamente protistas. El resto de los seres vivos son unicelulares procariotas y se dividen los dominios Archaea y Bacteria.

Aumento del Oxígeno atmosférico

2.32±0.015 Ga (Proterozoico)

- Los niveles de O₂ atmosféricos fueron muy bajos antes de hace 2.45 Ga, y que alcanzaron niveles considerables hacia 2.22 Ga. Los isótopos de Sulfuro (³²S, ³³S, ³⁴S) de pirita singenética FeS₂ encontrados en esquistos del hace 2.32 - Ga en el Sur de Africa, indican que los niveles de O₂ atmosféricos eran muy elevados (> 10⁻⁵ veces el actual).
- La reducción de gases invernadero como CO₂ y metano y con el aumento de O₂, la Tierra se enfría. Existen evidencias de glaciaciones en la transición Arqueozoico al Proterozoico (2700-2300 Ma, Hyde, 2000), con al menos tres fases muy frías. Se debieron al efecto depredador del oxígeno sobre el metano. Se han encontrado tillinas, y depósitos de morrenas glaciares correspondientes a la glaciación palaeo-proterozoica.

Bekker et al., Nature 427, 2004

Glaciaciones Neoproterozoicas

Teoría Snowball Earth (~600-700 Ma)

Evidencias

- Depósitos glaciares intercalados entre capas de carbonatos ("cap carbonates") en todos los continentes, incluyendo el paleoecuador
- Hierro bandeado en los depósitos glaciares → anoxia (océano cubierto de hielo donde no puede circular hacia abajo el O_2)
- Varias inversiones paleomagnéticas dentro de cada capa glacial → glaciación de millones de años y afectando zonas tropicales
- Planeta no apto para la vida.

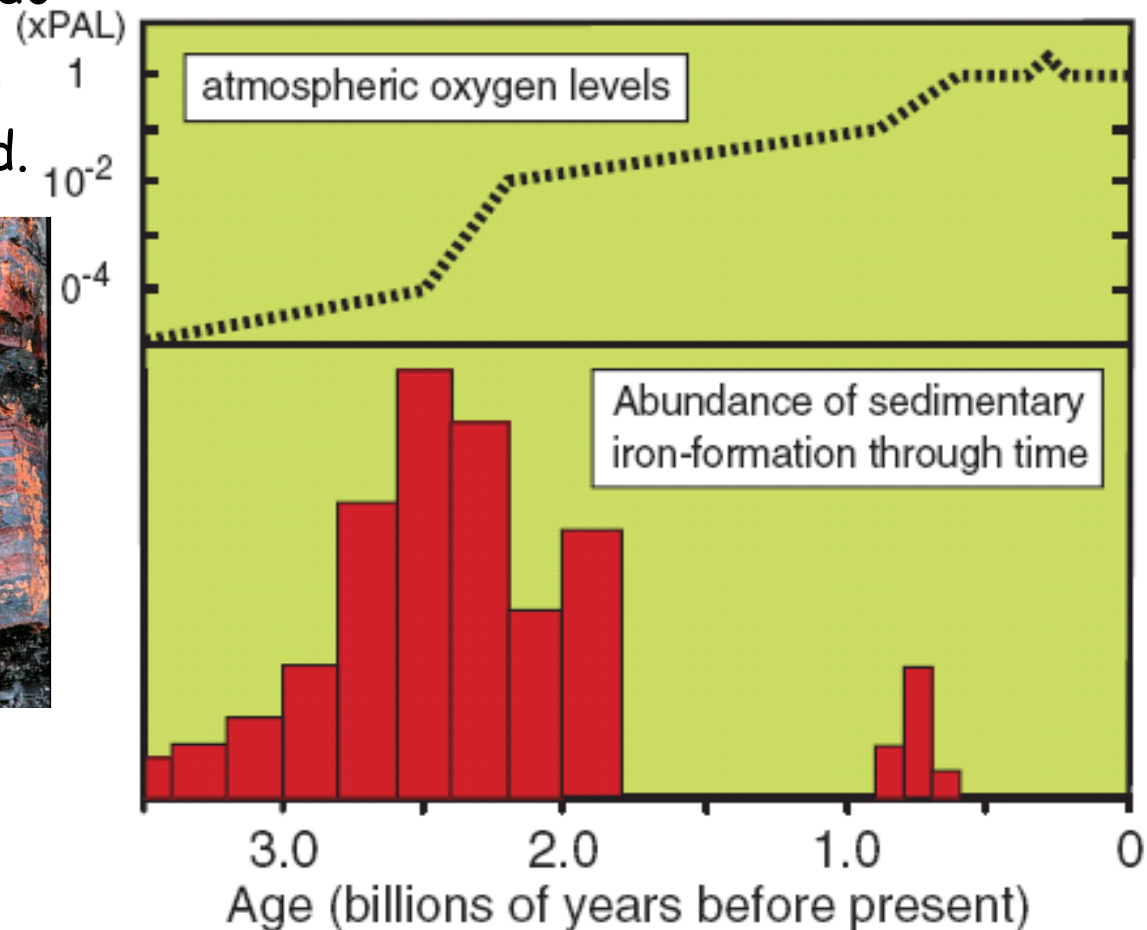
Los picos indican la evolución del O_2 en la atmósfera

If O_2 is absent, iron is soluble as ferrous (Fe^{2+}) ion.
If O_2 is present, iron is insoluble as ferric (Fe^{3+}) ion.

Formación Hierro bandeado:

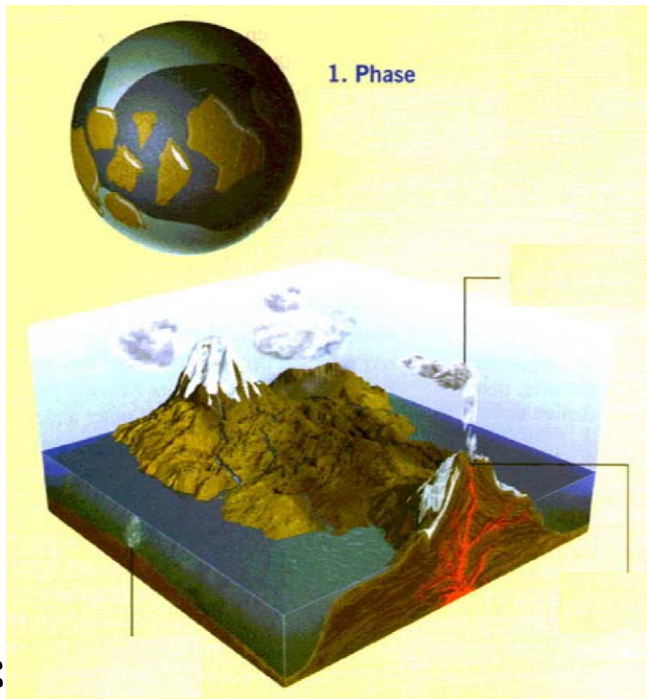
Pico aislado de 600 Ma

"Snowball Earth" period.



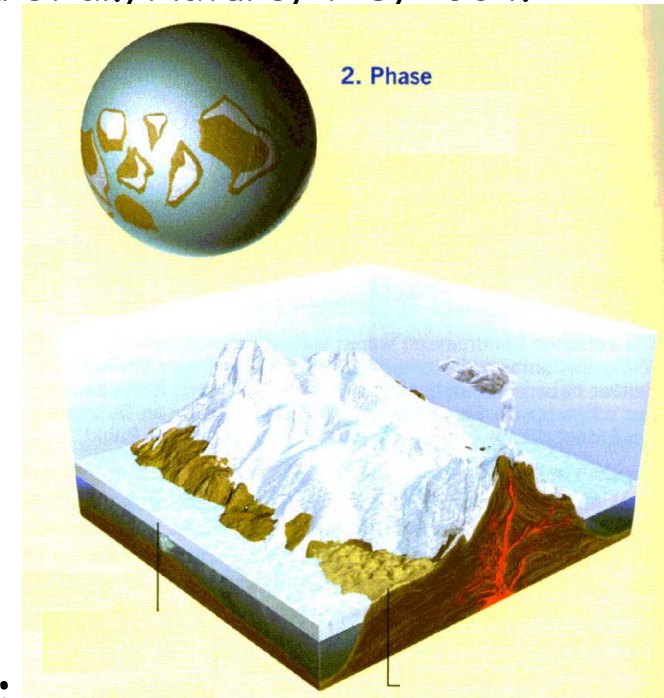
Snow Ball Theory

Según Hoffmann & Schrag, *Sci. Amer.* 2003
Donnadieu et al., *Nature*, 428, 2004.



Fase 1:

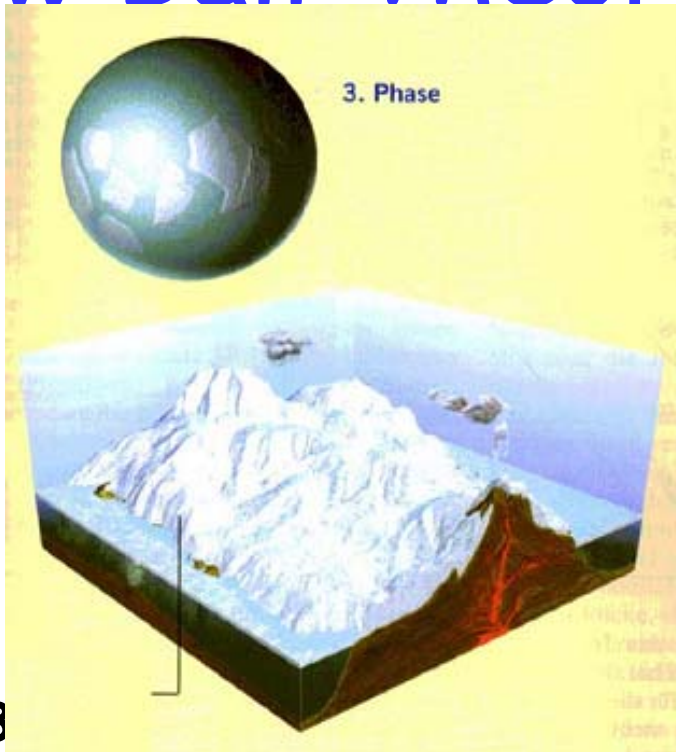
- Sol ~6 % más tenue hoy
- Fragmentación del continente Rodinia (~ 800 Ma)
- Eliminación del CO_2 atmosférico por meteorización de rocas (e.g. basaltos)
- Enfriamiento (8°C) debido a disminución de CO_2 atmos.
- Disminución de T adicional por aumento de albedo del hielo



Phase 2:

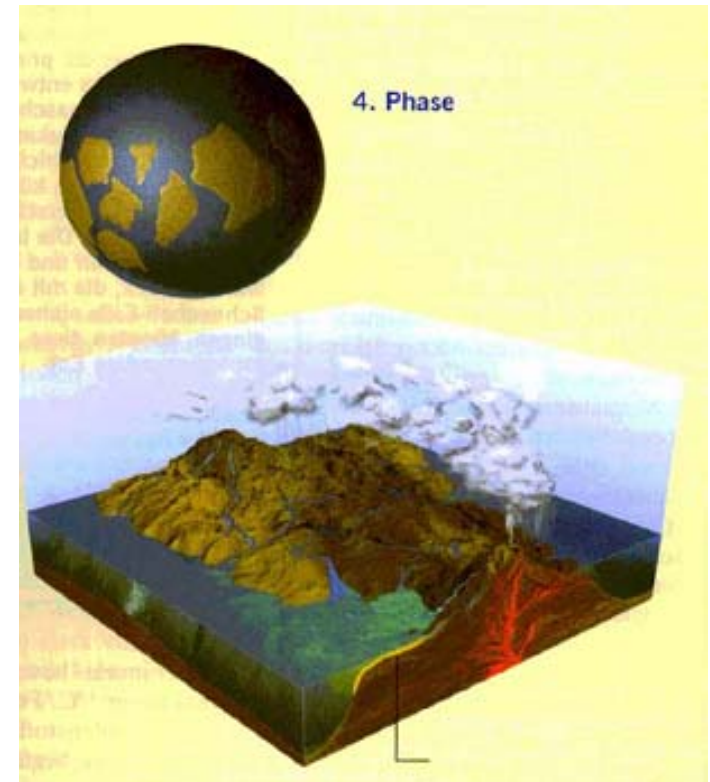
- T media global = -50°C
- Hielo en oceano ~ 1 km, bajo O_2 en oceano
- Mayor parte organismos marinos desaparecen, excepto en fuentes termales
- Ciclo hidrológico se desacelera. Baja precipitación
- CO_2 atmosférico desaparece

Snow Ball Theory



Fase 3

- Emisiones de CO_2 de volcanes se incrementa
- Hielo ecuatorial se derrite y absorbe más energía solar
- Calentamiento por reducción de albedo
- Vapor de agua atmosférico se incrementa

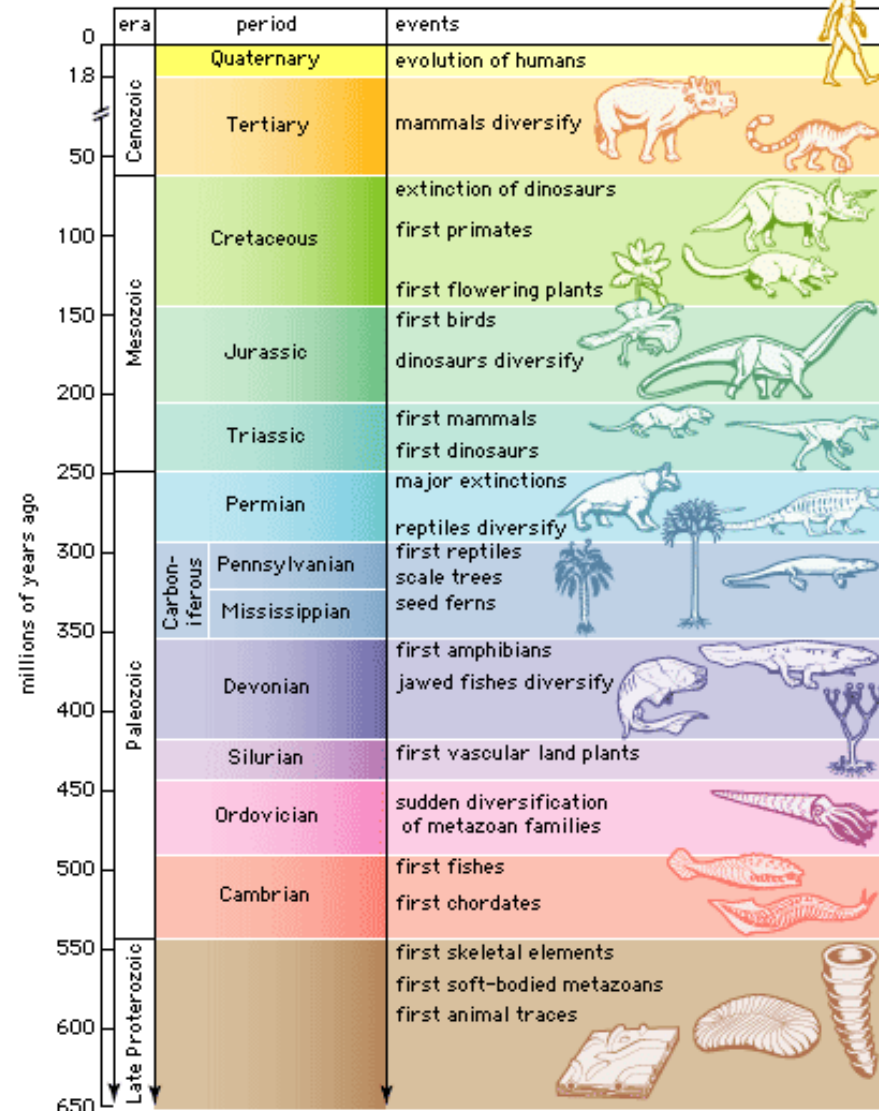


Fase 4:

- T media Global = $50^{\circ} C$
 - Incremento de precipitación conduce a intensificación de desaparición de CO_2 .
- ($CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2$)
- Formación de capa de sedimentos carbonatas en los fondos oceánicos
 - Explosión de biodiversidad

Tiempo Geológico durante el Fanerozoico (últimos 540 Ma)

Geologic time scale, 650 million years ago to the present



Paleoclima en el Fanerozoico

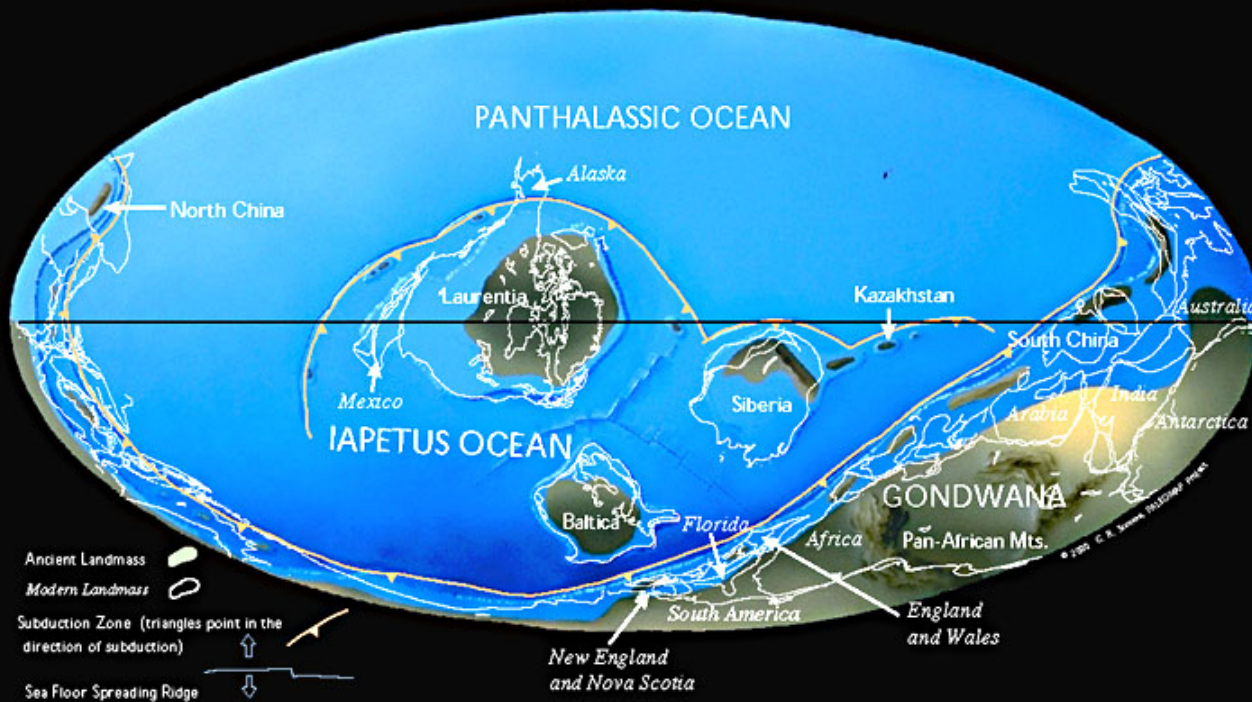
- Controlado por tendencias a largo plazo de factores que influyen o son influidos por el clima, tales como paleogeografía, temperatura, nivel del mar, CO_2 , química del agua marina.
- La información disponible decrece con la edad, debido a los escasos afloramientos de rocas antiguas

Hitos climáticos en el Fanerozoico

- 600-750 Ma: Snowball Earth (Neoproterozoico)
- 300 Ma-5Ma: Hot house world (Mesozoico/Cenozoico)
- 3 Myr-presente: Varibilidad a escala Orbital:
secuencias de glaciación y deglaciación
- 20 Kyr: Last glacial maximum (LGM)
- ~13 Kyr: calentamiento Bolling/Allerod
- ~12 Kyr: Younger Dryas (YD)
- Eventos Heinrich y ciclos D-O
- 1000-1300 BP: Anomalía Climática Medieval (P. cálido)
- 1400-1800 BP: Pequeña Edad del Hielo

Paleogeography

Late Cambrian 514 Ma

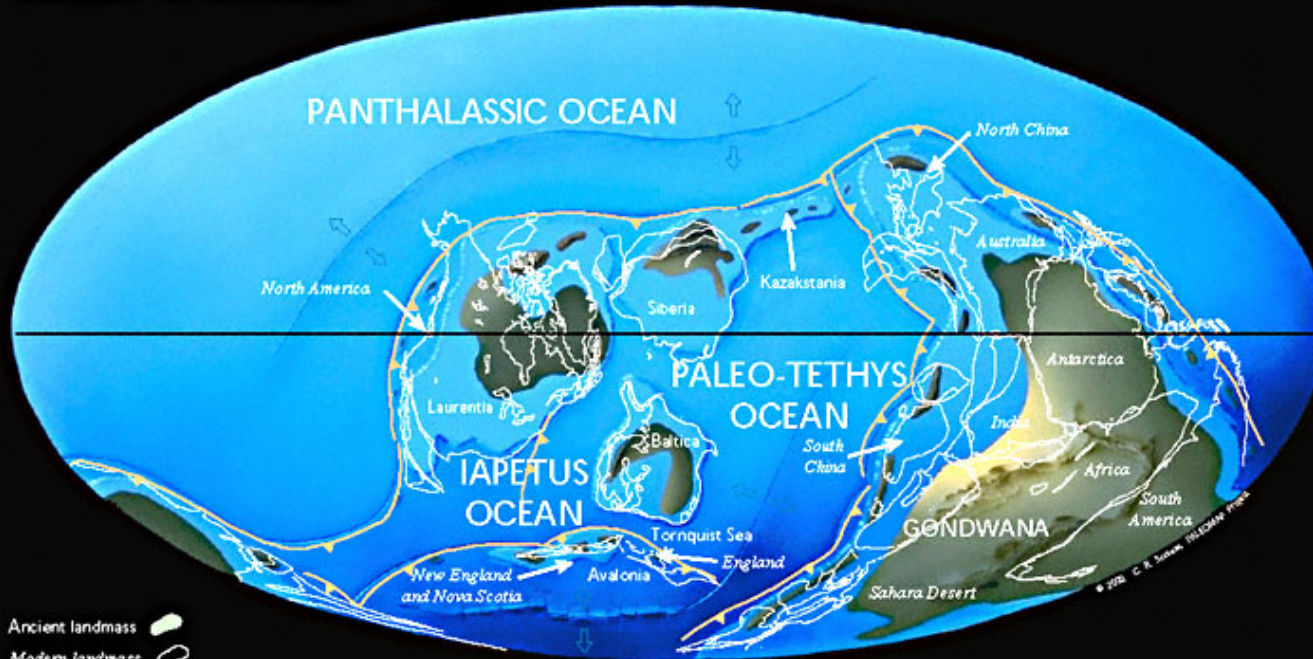


Gondwana-
marginal pole

Continents along
the equator

Paleogeography

Middle Ordovician 458 Ma

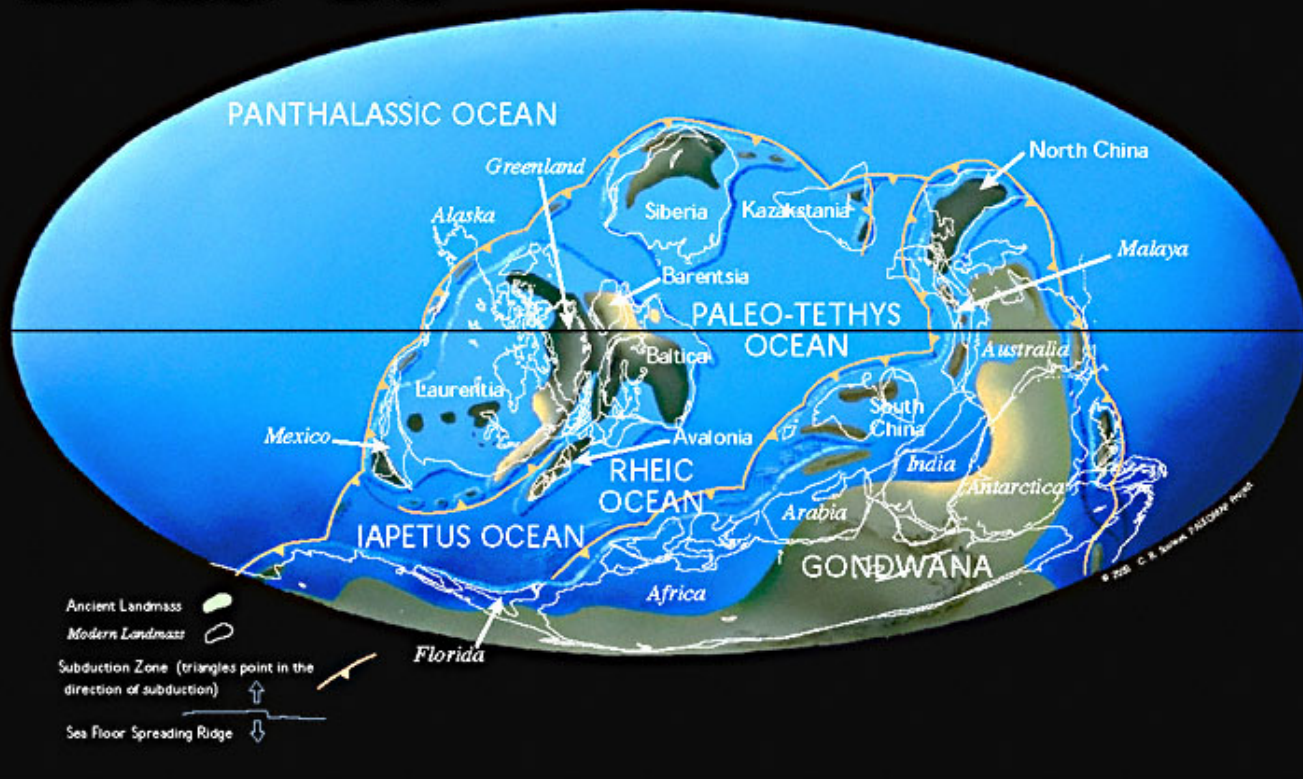


Gondwana-
marginal pole

Beginning of
cooling

Paleogeography

Middle Silurian 425 Ma



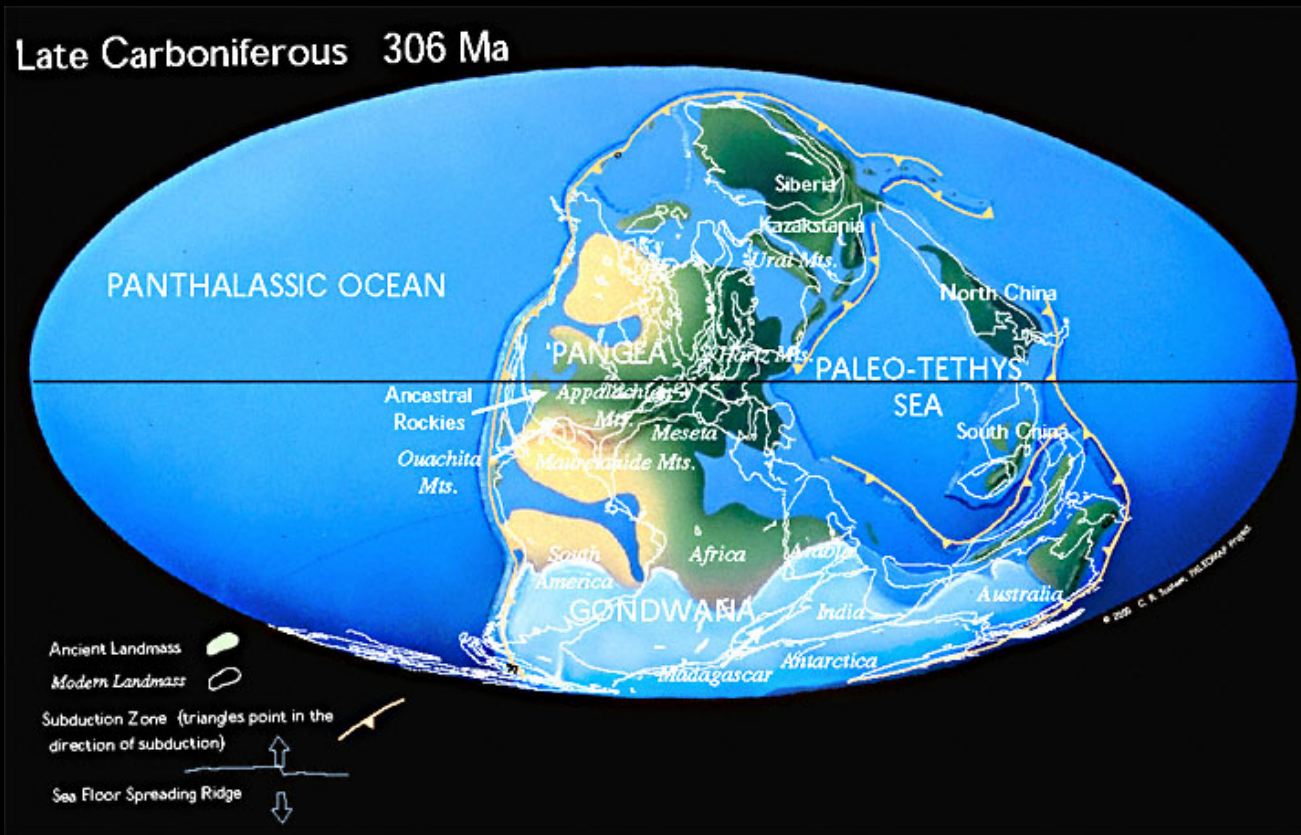
Laurentia and Baltica collide (Appalachians)

Expansion of coral reefs

Continental pole = ice house

Paleogeography

Late Carboniferous 306 Ma



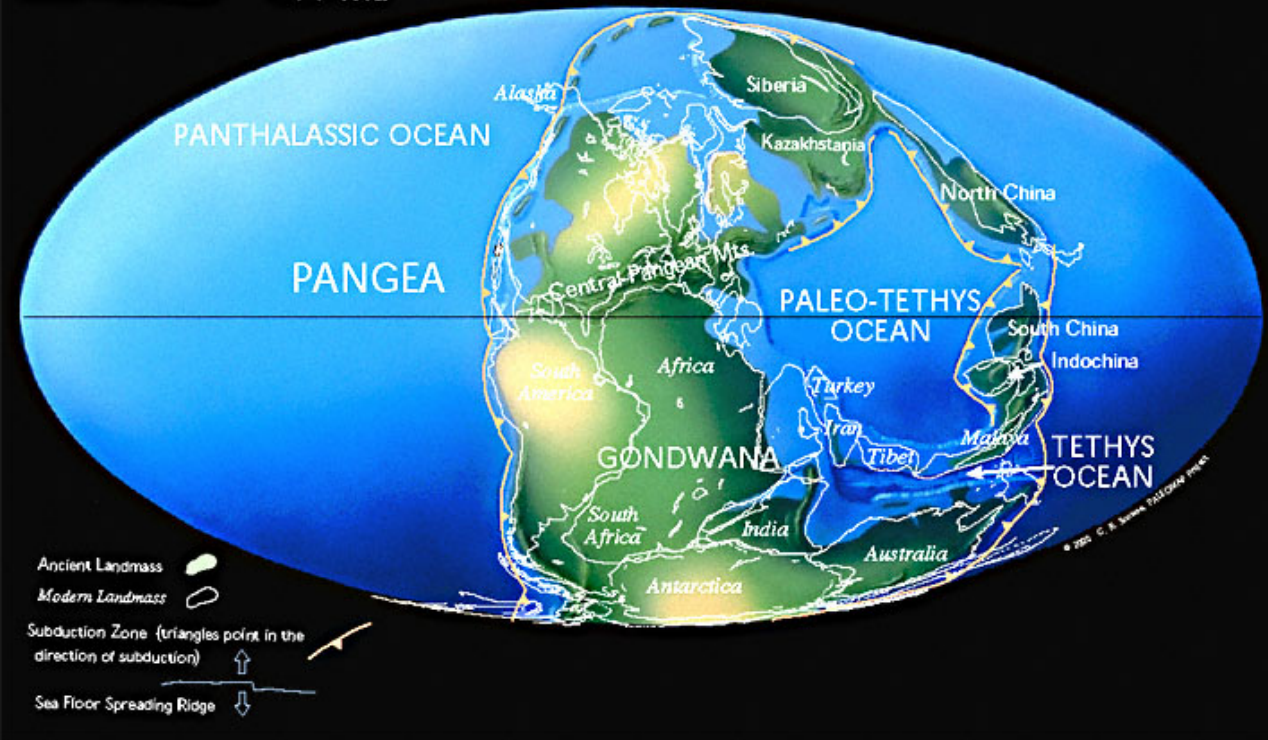
Assembly of Pangea

Ice sheets high southern lats

Coal/swamps along equator

Paleogeography

Late Permian 255 Ma



Pangea
Megamonsoons
of the mega
continent

Deserts and
evaporites

Tethys= warm
water fauna

Lower sea level

Paleogeography

Late Jurassic 152 Ma

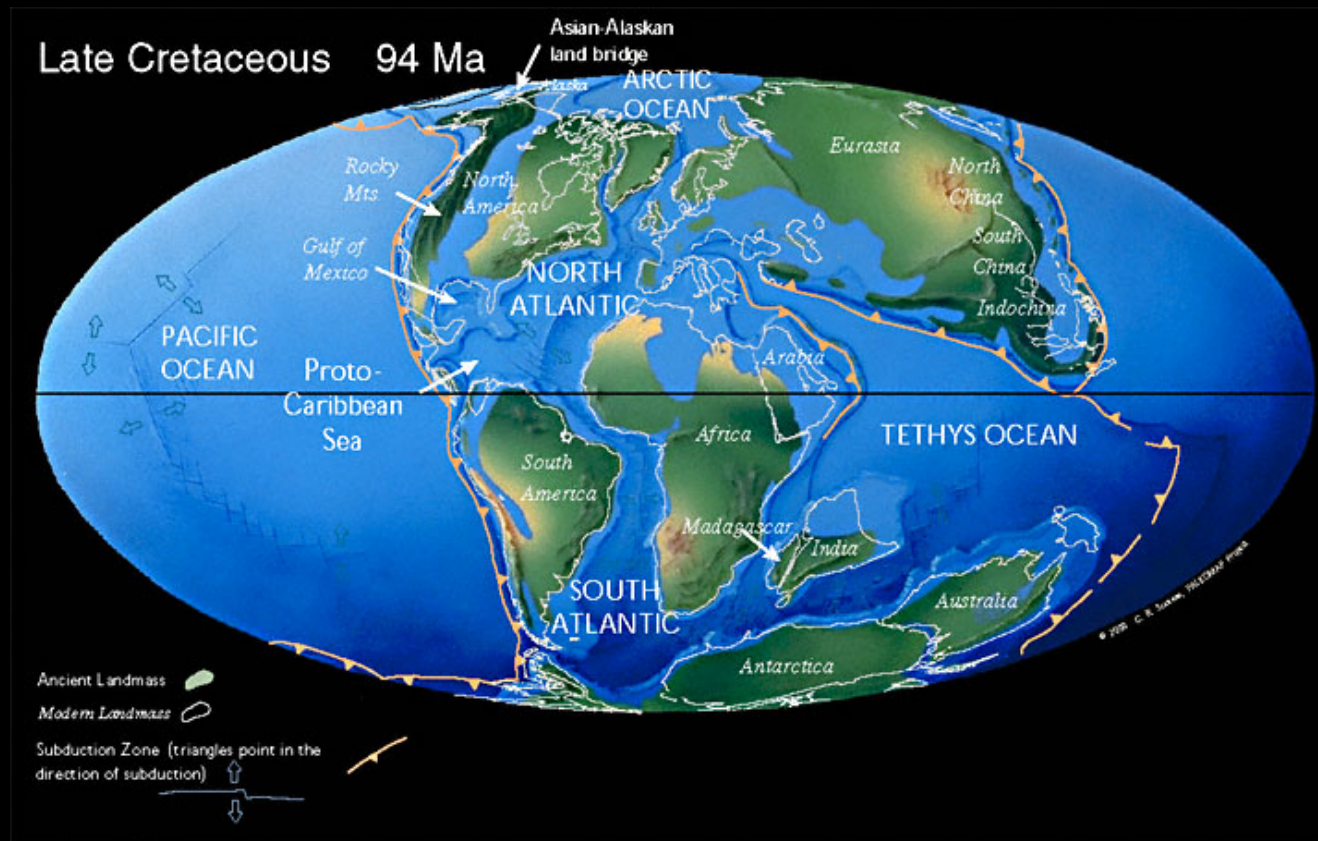


Break up of Pangea

Opening of Atlantic

Separation of east and west Gondwana

Paleogeography



Opening of South Atlantic

Separation of India from Madagascar

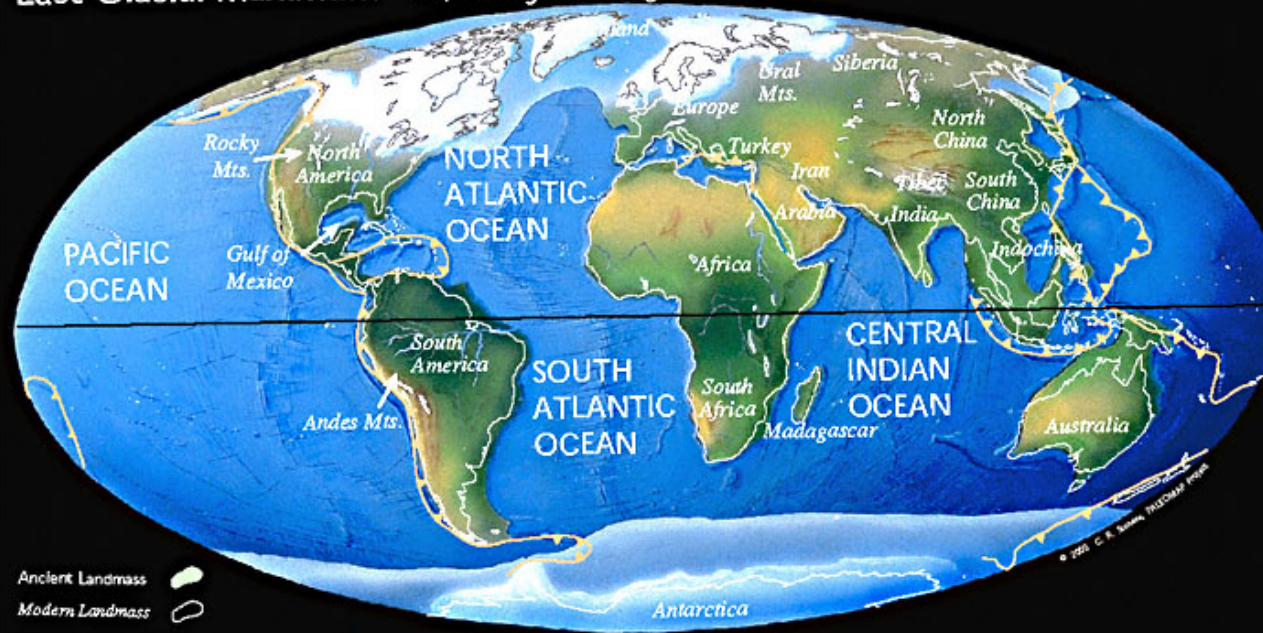
High sea level

Large Igneous Provinces

Ocean anoxic events

Paleogeography

Last Glacial Maximum 18,000 years ago

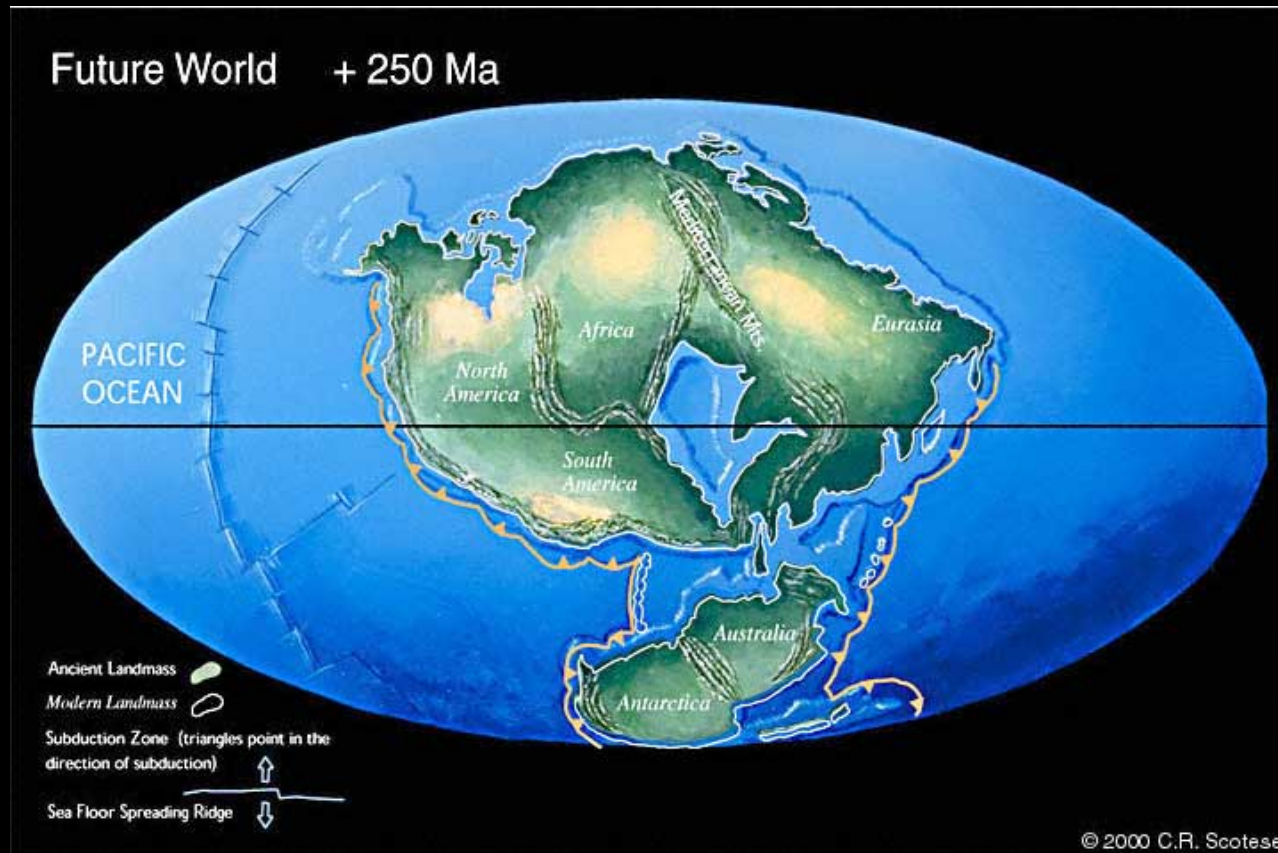


Modern
continental
positions

Extent of ice
(N and S)

Sea level

Paleogeography



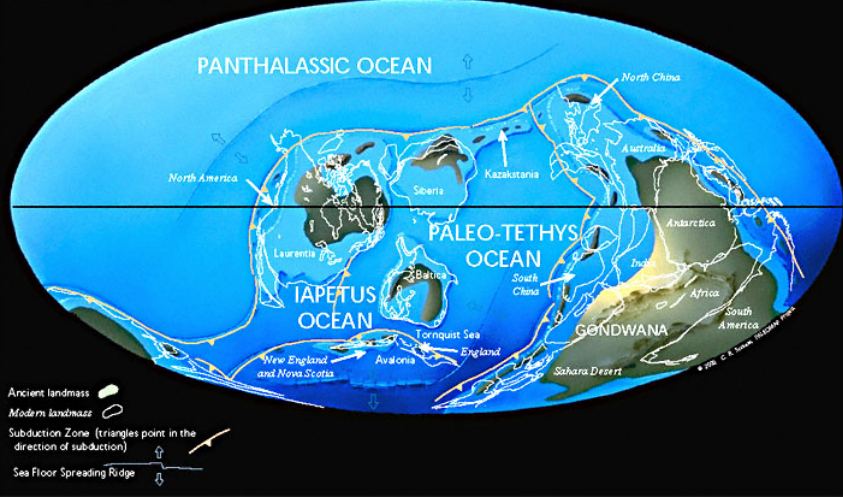
The next
supercontinent

Subduction in
Atlantic
- Spreading in
Pacific

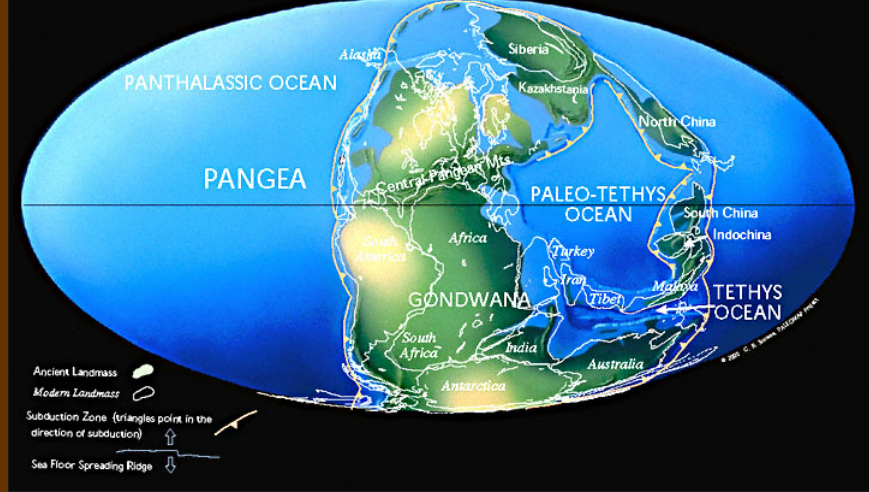
Wilson cycle

Paleogeography

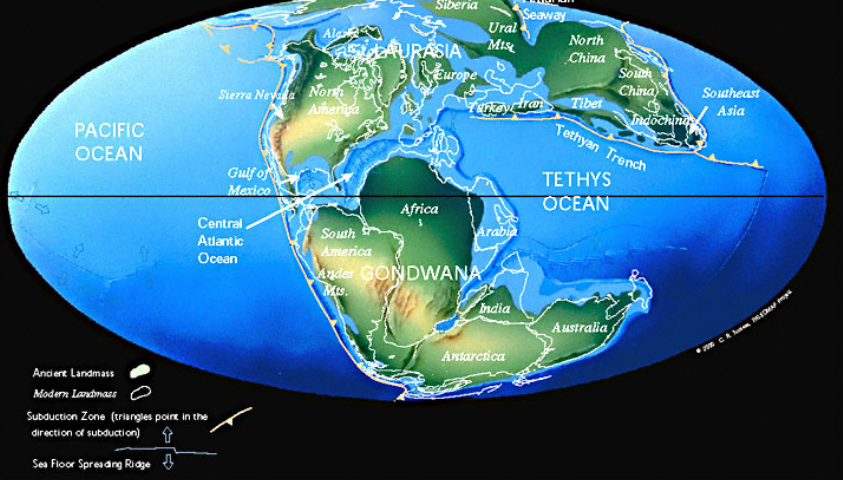
Middle Ordovician 458 Ma



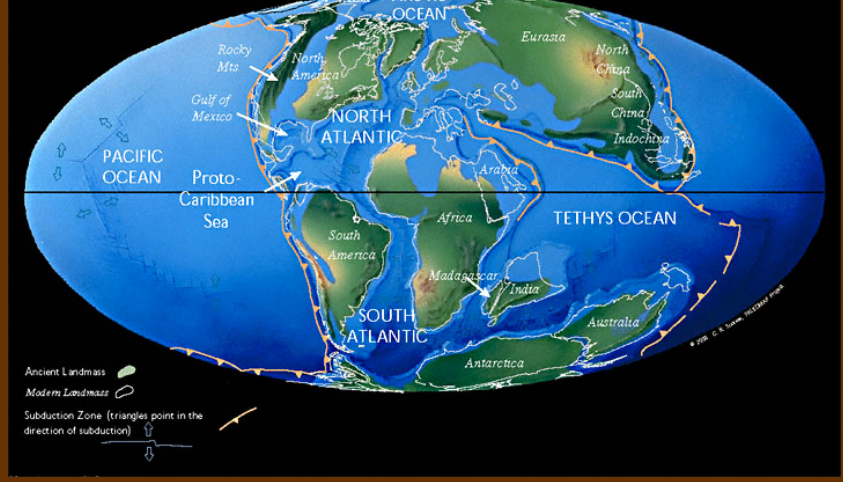
Late Permian 255 Ma



Late Jurassic 152 Ma

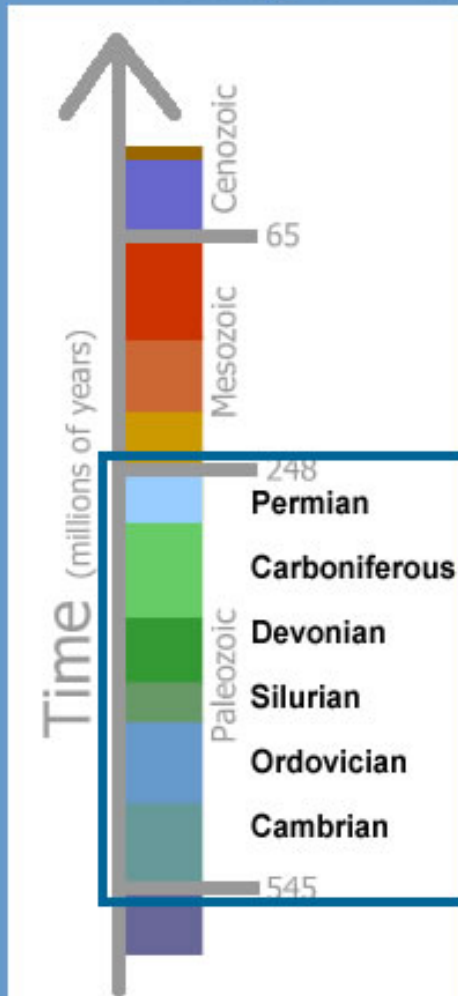


Late Cretaceous 94 Ma



During the Paleozoic...

Geologic Time



Paleogeography

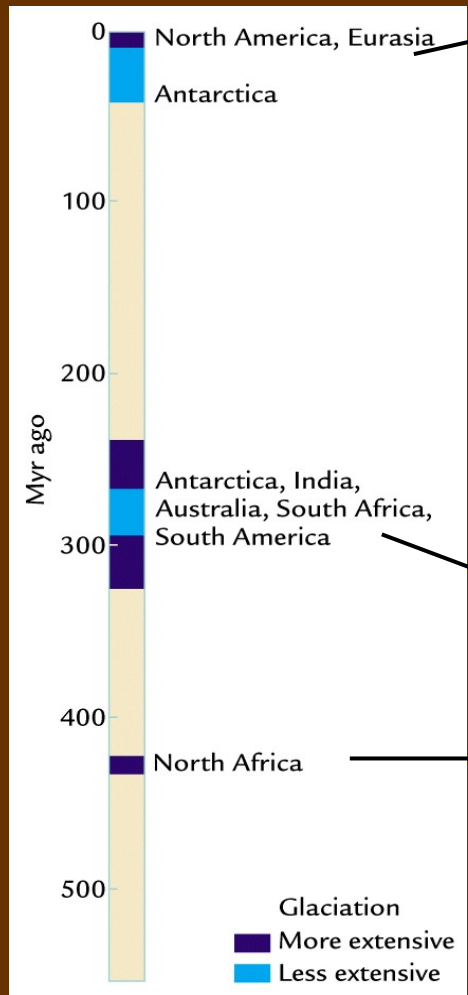


Living Things

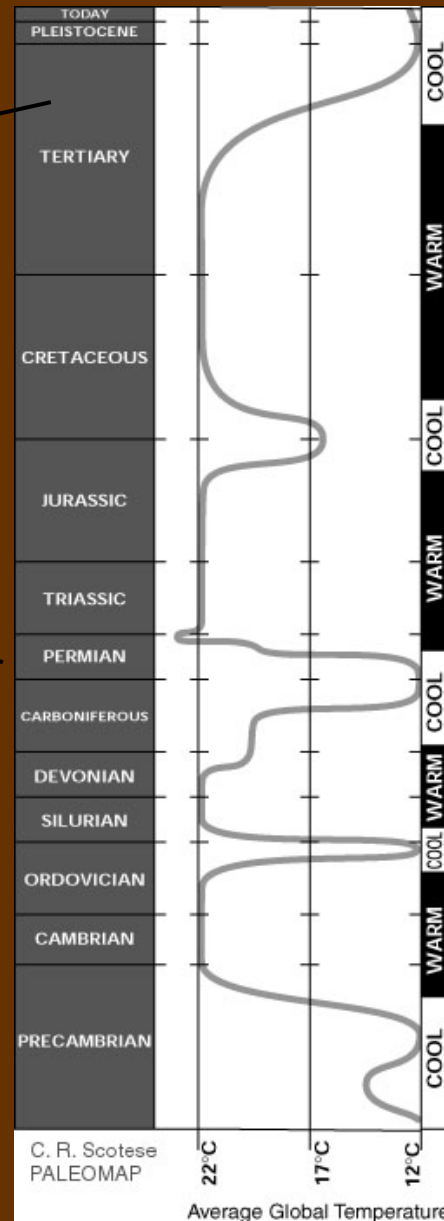


Clockwise from top left: eurypterid fossils, Silurian Eryops fossil, trilobite fossil, brachiopod fossil (A. Copley/U. Oklahoma)

Variaciones en la temperatura



Ruddiman Fig. 5-1



3 Myr-presente: Secuencias de glaciación y retroceso

300 Ma-5Ma: Hot house world (Mesozoico/Cenozoico)

Invernadero

Glaciaciones

Invernadero

Glaciaciones

Invernadero

600-750 Ma: Snowball Earth (Neoproterozoico)

Glaciaciones del Ordovícico/Silurico y Carbonífero-Pérmico

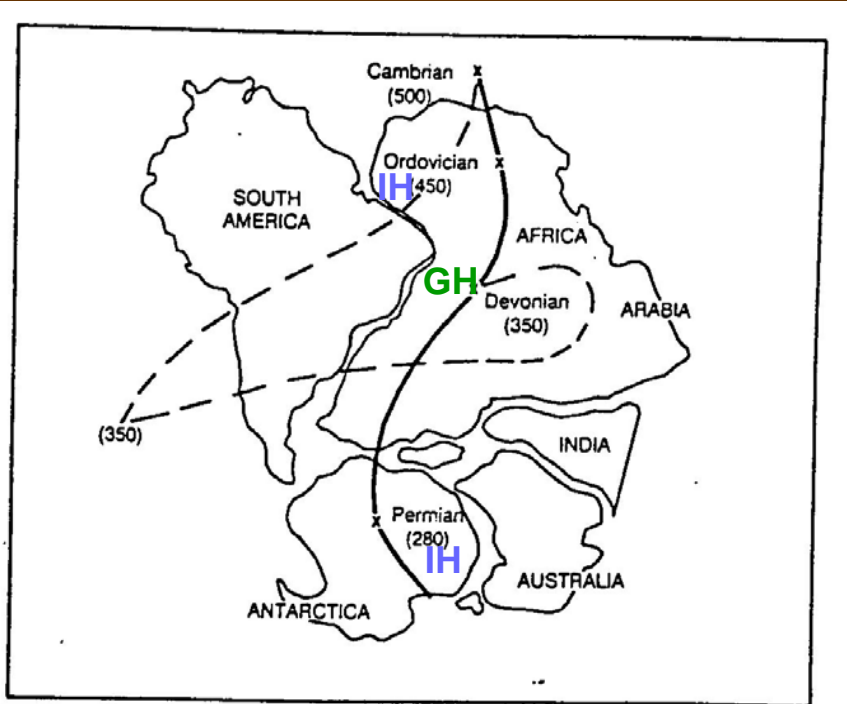
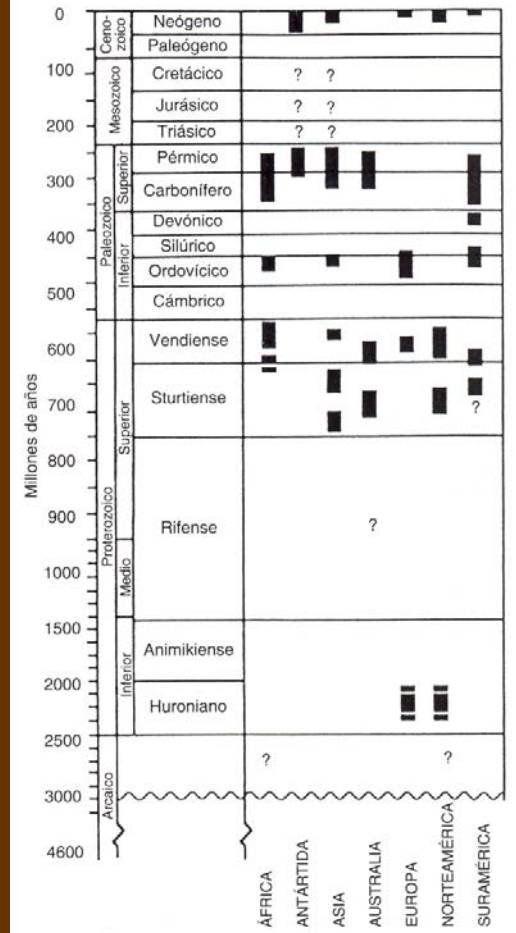


Fig. 1 Postulated Palaeozoic apparent polar wander paths of the South Pole with respect to Gondwanaland (after ref. 25). Dashed line indicates alternate path based on different data sources^{25,26}. Numbers in parentheses are ages in Myr

Crowley et al., 1987



Se observa que:

- Temperaturas de verano $>20^{\circ}\text{C}$ si el polo se localiza en el centro de la masa continental
- Temperatura de verano $\sim 0^{\circ}\text{C}$ si el Polo en las márgenes del continente

Cambios en CO_2 Atmosférico

- La posición Polar no explica las variaciones del clima durante los últimos 500 my
- Los cambios en CO_2 atmosférico jugaron un papel importante
 - ◆ Modelo de BLAG
 - ◆ Clima afectado por cambios en CO_2 que se deben a las emisiones procedentes de los fondos marinos como consecuencia de la deriva continental
 - ◆ Modelos de T. C. Chamberlain ó Raymo/Ruddiman
 - ◆ Clima afectado por los cambios en la tasa de levantamiento de los continentes y de la meteorización (sumidero de CO_2 en océanos)

■ GEOCARB

◆ Entradas:

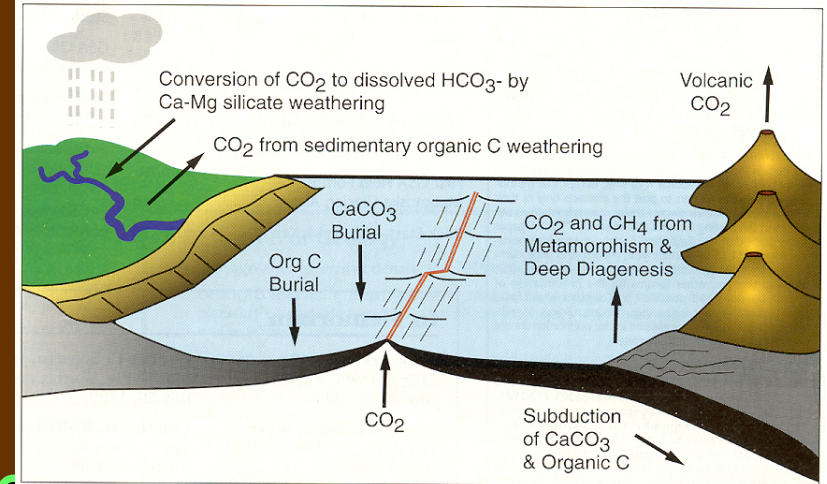
- ◆ Degaseado volcánico, metamórfico y diagenético

- ◆ Oxidación de la materia orgánica expuesta en continentes

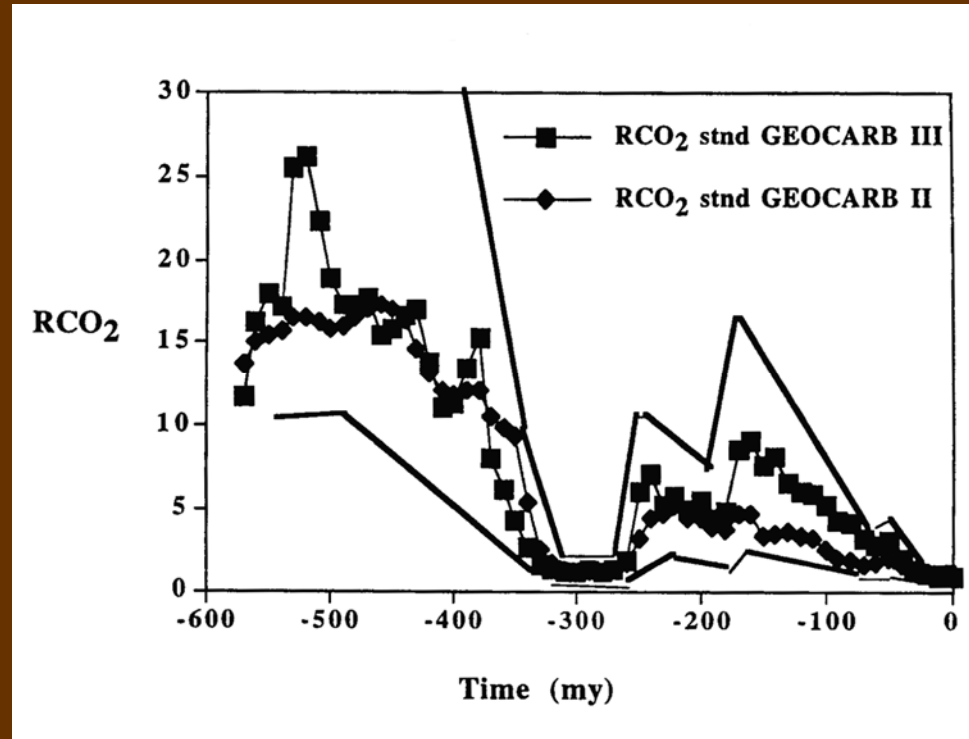
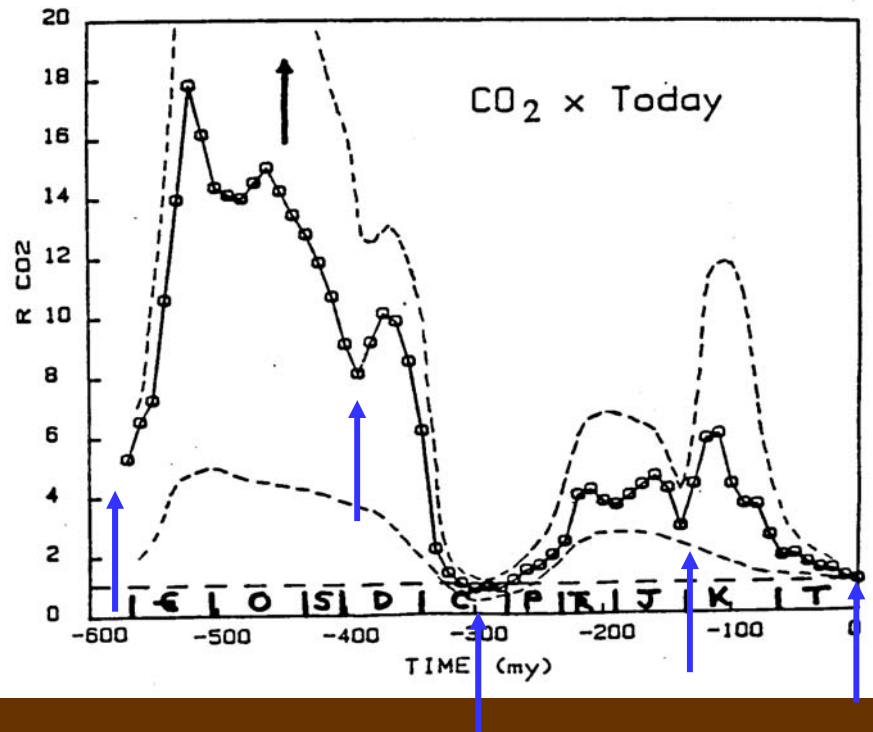
◆ Salidas:

- ◆ Meteorización de los silicatos y carbonatos enterrados ($\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{oceanos} \rightarrow \text{sedimentos carbonatados} = \text{CO}_2 \text{ procedente atm} \rightarrow \text{calizas}$)

- ◆ Enterramiento de carbón orgánico (marino y no marino)



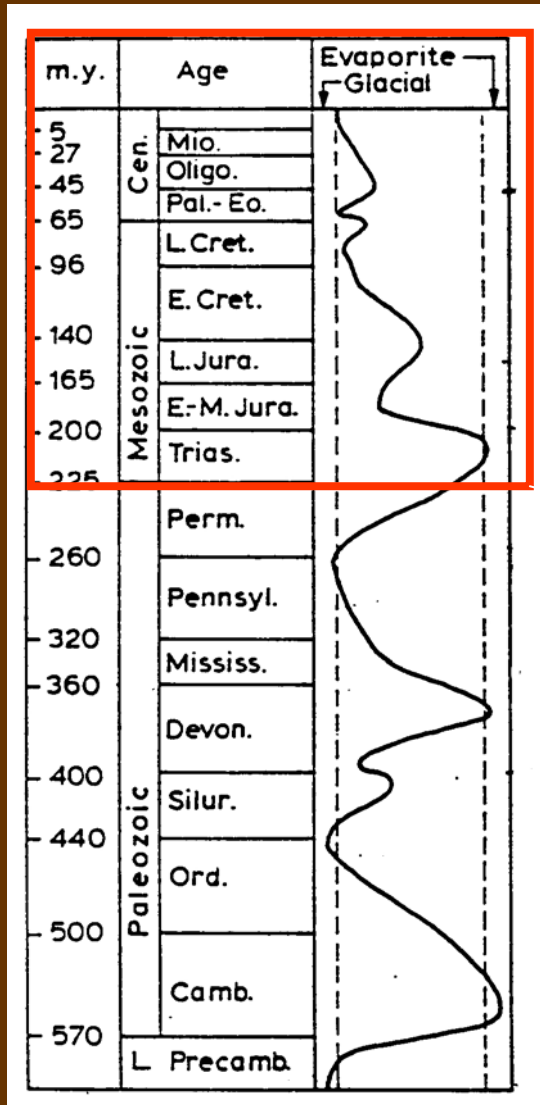
GEOCARB



Berner, 1991, American Journal of Science

Royer et al., 2001

Paleoclima Mesozoico



Icehouse

Greenhouse

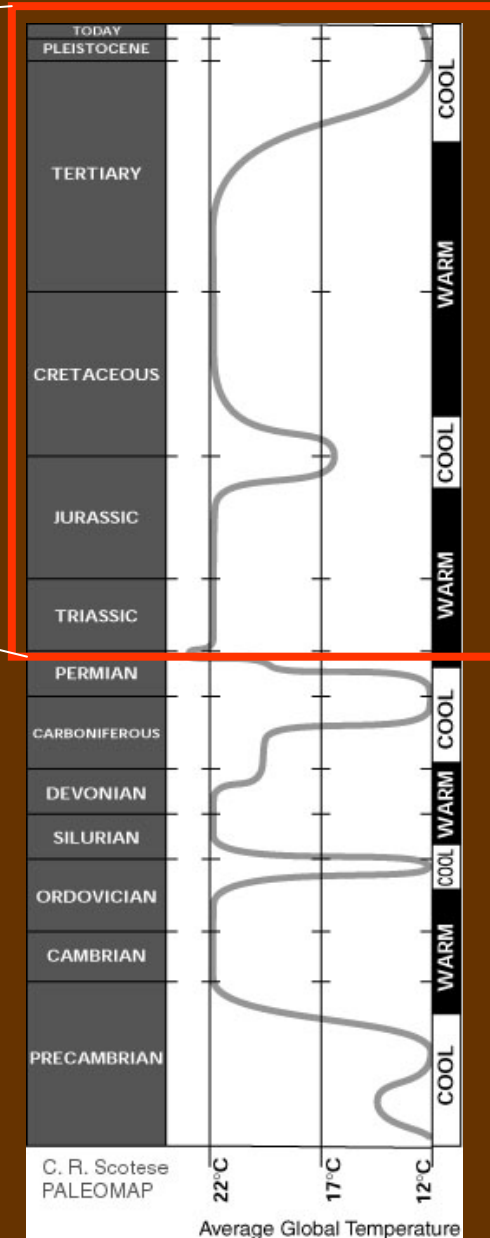
Icehouse

Greenhouse

Icehouse

Greenhouse

Frakes, 1979

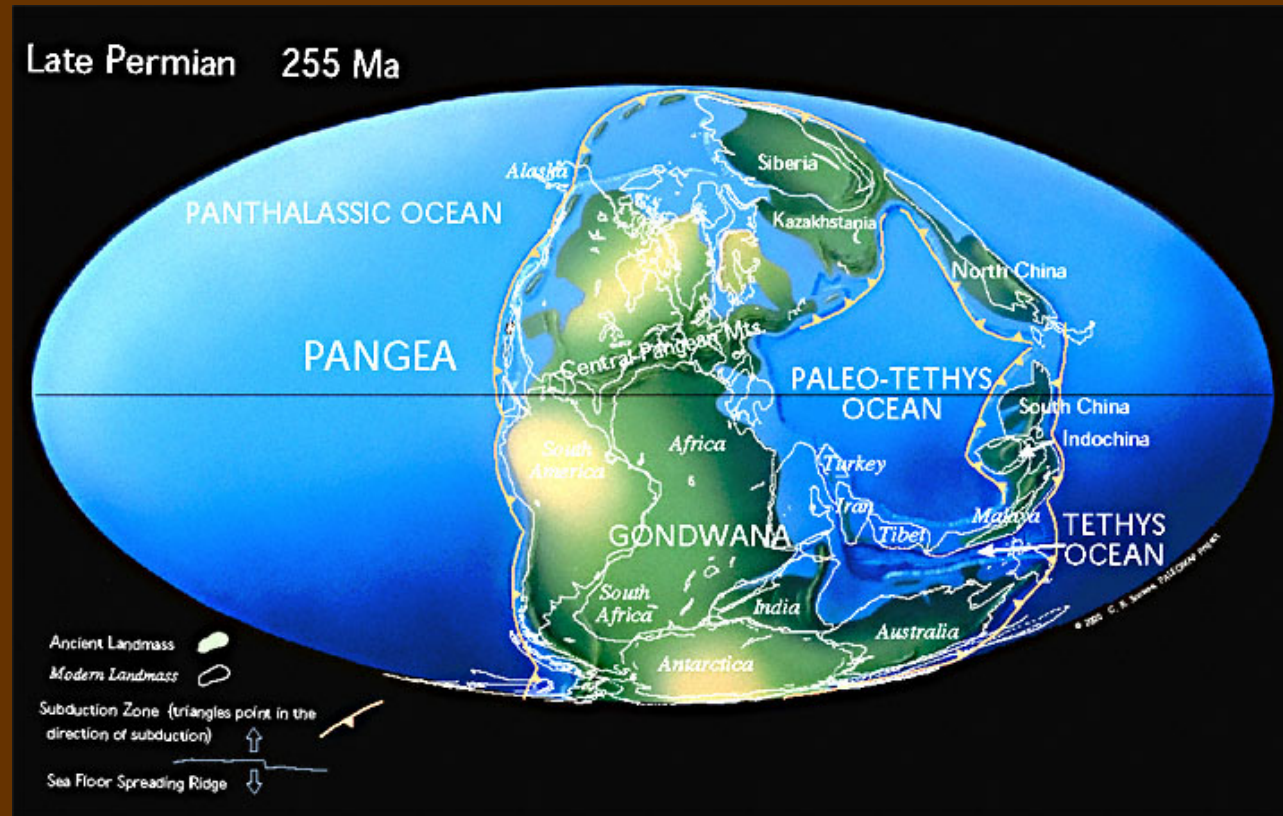




"The Great Dying" del Permo-Trias

- Se refiere a la catástrofe ecológica del P-T con extinciones masivas incluyendo 70% vertebrados y 85 % especies marinas.
- Teorías: (1) choque de asteroide de 6-12 Km diámetro (Restos de fulerenos con trazas de helio, neon y argón); (2) masivas erupciones volcánicas en Siberia (Siberian traps; emisiones de azufre, carbono y aerosoles, nubes de ácido sulfúrico y carbónico).
- Periodo seguido de calentamiento brusco debido a elevado CO₂ con efecto invernadero del Trias.

La separación de la Pangea y clima en el Mesozoico

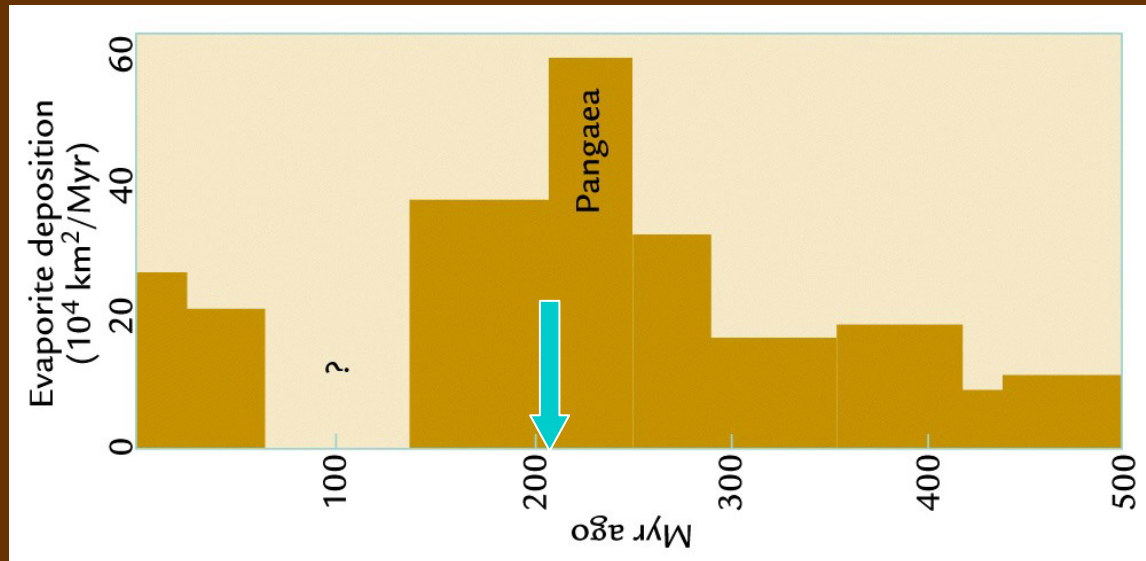
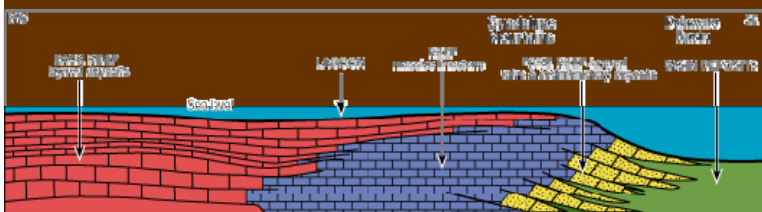
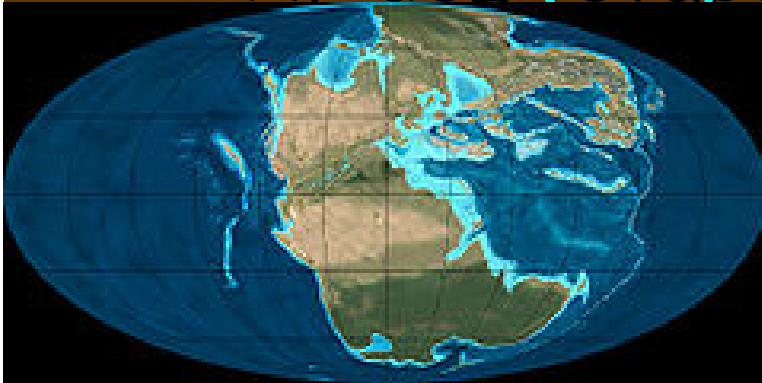


Distribución de los continentes hace 255 millones - Pérmico

Clima Triásico

- Se comienza a separar la Pangea, pero todavía existen grandes masas continentales
- Elevada estacionalidad
- Aridez (evaporitas)

Deposición de evaporitas (Ruddiman, 2008)



Extinciones del Triásico Jurásico

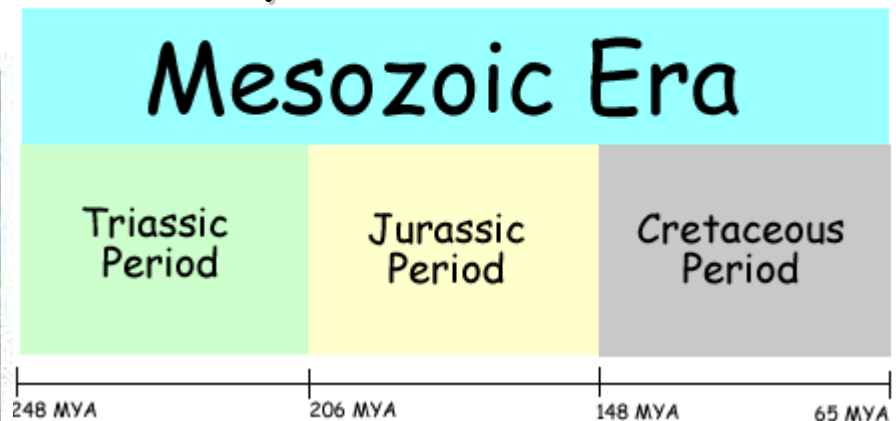
Episodio (transición)	Edad (millones de años)	Especies extintas (porcentaje %)
Ordovícico/Silúrico	438	85
Devónico Final	367	82
Pérmico/Triásico (P/T)	250	96
Triásico/Jurásico	202	76
Cretácico/Terciario (K/T)	65	70

Las cinco grandes extinciones del Fanerozoico (fuente Hallam & Wignam)

- Posiblemente debido a emisiones de gases durante la separación de la Pangea (S. América-Africa).
- Otra teoría se decanta por variaciones rápidas en el nivel del mar.
- La extinción afectó al 76% de las especies, y facilitaron la extensión de los dinosaurios durante el Jurásico

Jurásico y Cretácico: Calor y Humedad

- Rotura de la Pangea, mares someros asociados a importantes transgresiones marinas
- Suelta masiva de metano a la atmósfera procedente del subsuelo marino (e.g. Toarciense 183 Ma). Extinciones masivas debido a condiciones de anoxia en océanos y sedimentación de barros orgánicos.
- 100 Ma: temperatura media entre 6 y 12°C superior a la actual: Dinosaurios y elevada biomasa vegetal.

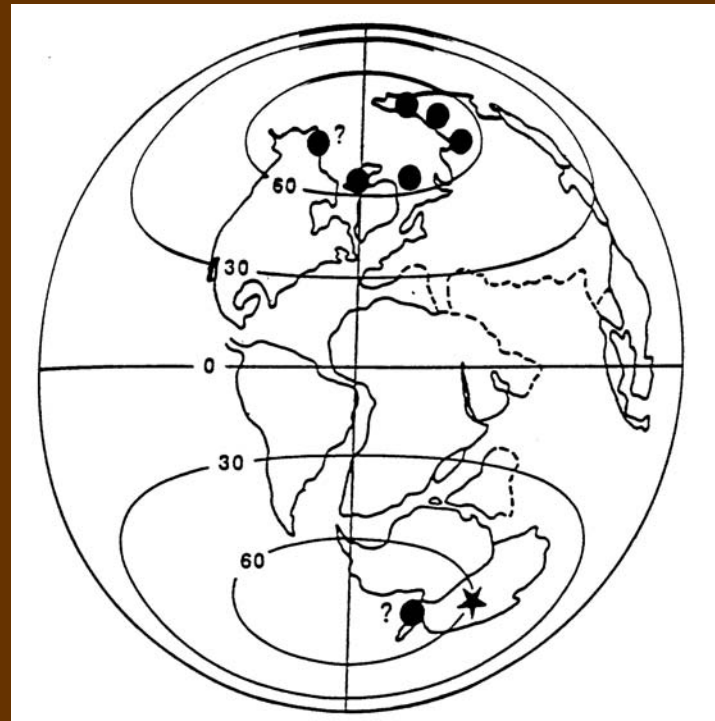


Jurásico Medio/ Cretácico inferior

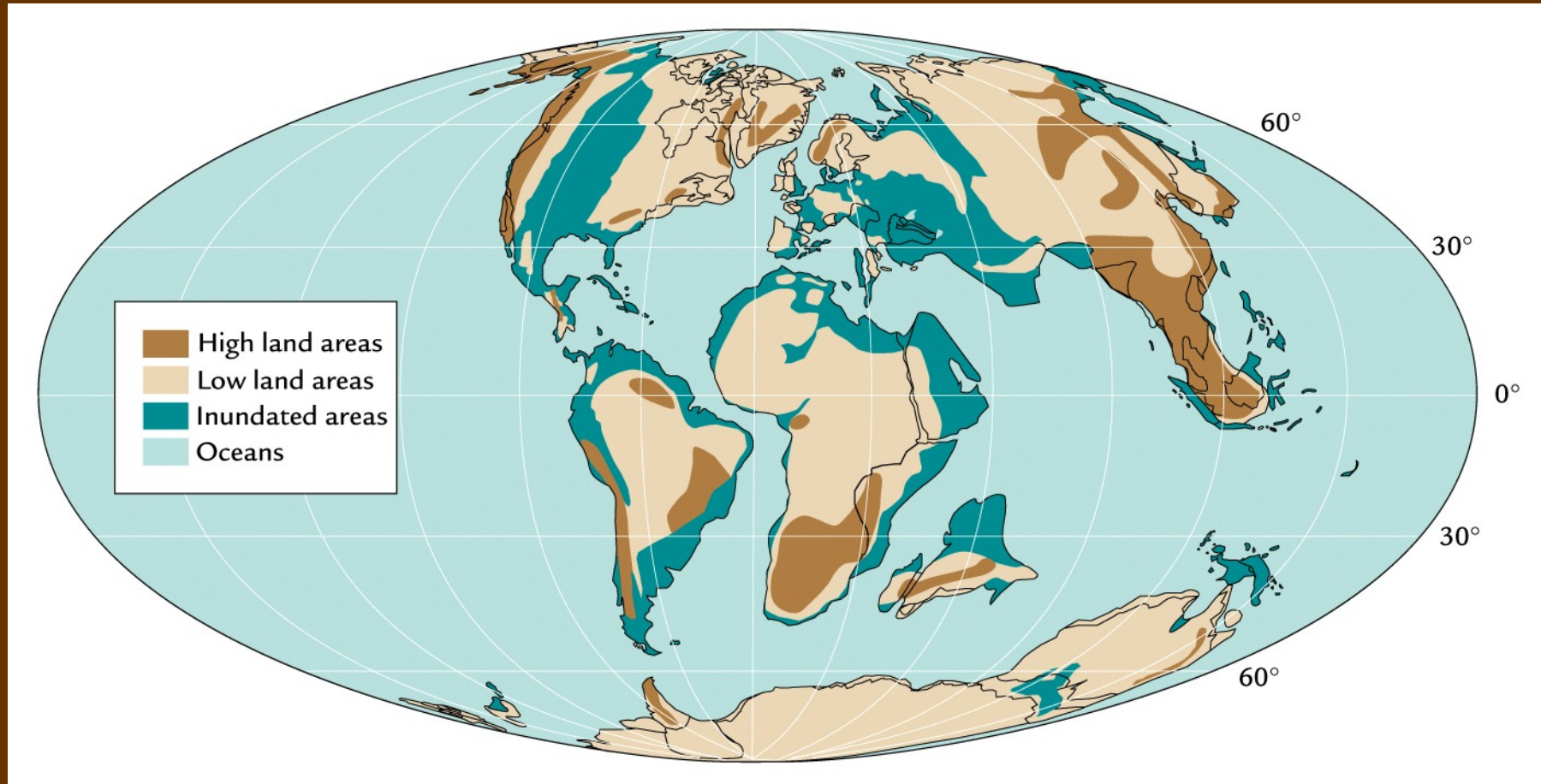
■ Enfriamiento

- ◆ Enterramiento de materia orgánica (¿Snowball Earth?)
- ◆ Se encuentran detritos transportados por icebers (IRD) en latitudes altas que indican la existencia de hielo estacional

Cretácico inferior IRD
Frakes and Francis, 1988

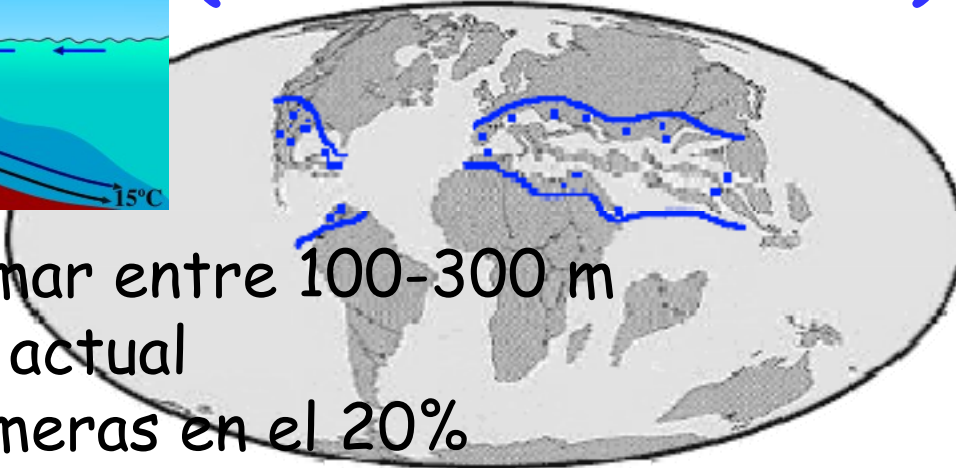
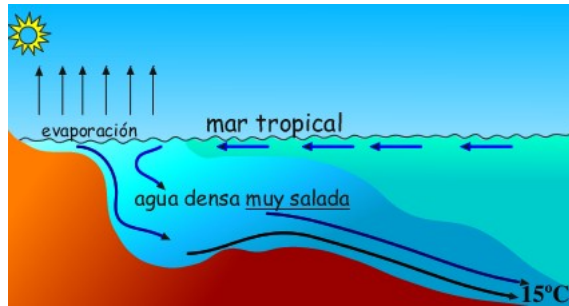


Cretácico Medio



Ruddiman, 2008. Fig. 6-1

Barrera de corales Cretácio Medio (Cenomaniense)



- Nivel del mar entre 100-300 m superior al actual
- Aguas someras en el 20% continentes actuales. Europa: archipiélago de islas y mares someros.

- Producción de agua profunda en latitudes tropicales. Intensa evaporación y hundimiento de agua muy salada, y relativamente cálida. Temperatura de agua profunda de 15°C (actual 2°C).

Corales en las calizas de Altamira cerca de Cobreces



Rudistas del cretácico

Cretácico: Calor y humedad



- La concentración de CO_2 entre 900 y 3300 ppm
- Desarrollo y auge de las angiospermas, plantas con flores, con máxima eficiencia fotosintética con CO_2 entre 1000-1500 ppm
- CO_2 debido a intensa desgasificación volcánica
- Elevado vapor de agua, tanto en ecuador como en polos. Llegada de calor tropical a los polos.

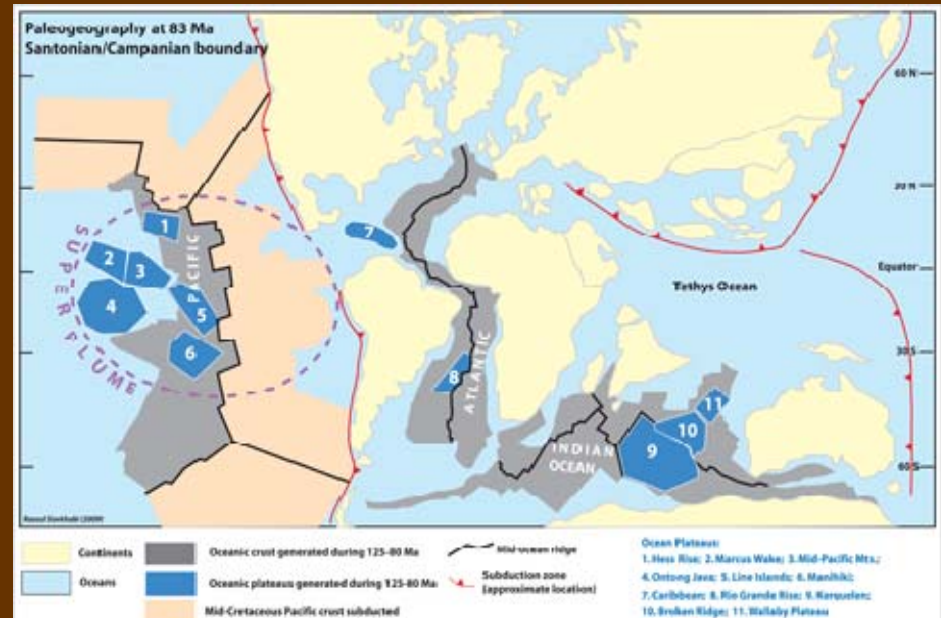
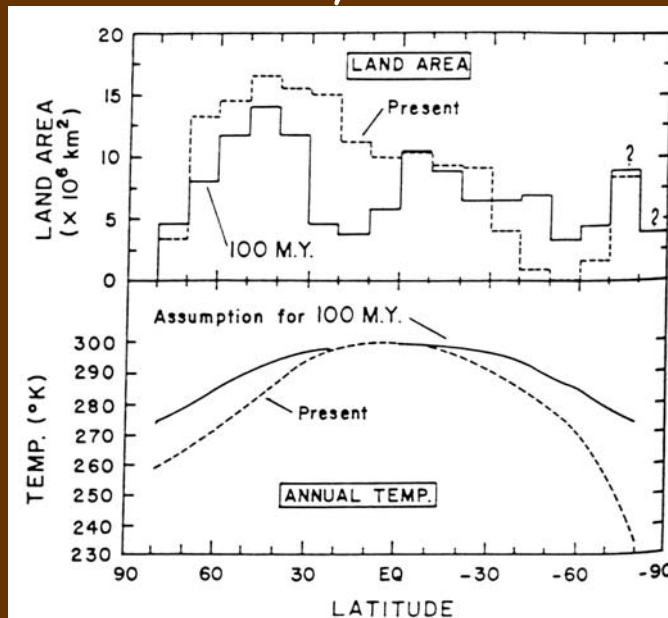
Evidencias del Calentamiento Cretácico

- ◆ Calizas biogénicas (chalk)
- ◆ Desplazamiento hacia los Polos de los límites faunísticos y florales (~10-15 degrees)
 - ◆ Desarrollo de corales a 40° latitud
 - ◆ Bosques de perennifolios en latitudes altas
 - ◆ Indicación ($\delta^{18}\text{O}$) de aguas calientes profundas, polos y trópicos más calientes
 - ◆ champosaurus (saurópsido diápsido) en el círculo ártico
- ◆ No existen evidencias de IRD. Ausencia de hielo → menor albedo
- ◆ Se desarrollan sedimentos como carbón, lateritas y bauxitas indicativas de climas cálidos
- ◆ Nivel del mar aprox 200 m mas elevado (albedo) debido a elevadas tasas de movimiento de placas, falta de hielo y expansión termal,

Causas del calentamiento Cretácico

- Aumento del aporte de gases invernadero (CO_2)
- Niveles del mar elevados
- Elevadas tasas de actividad convectiva del manto, tal y como lo demuestran las numerosas provincias igneas (basaltos, rocas intrusivas, rocas de márgenes volcánicos pasivos y basaltos de fondos oceánicos)

Thompson and Barron, 1981



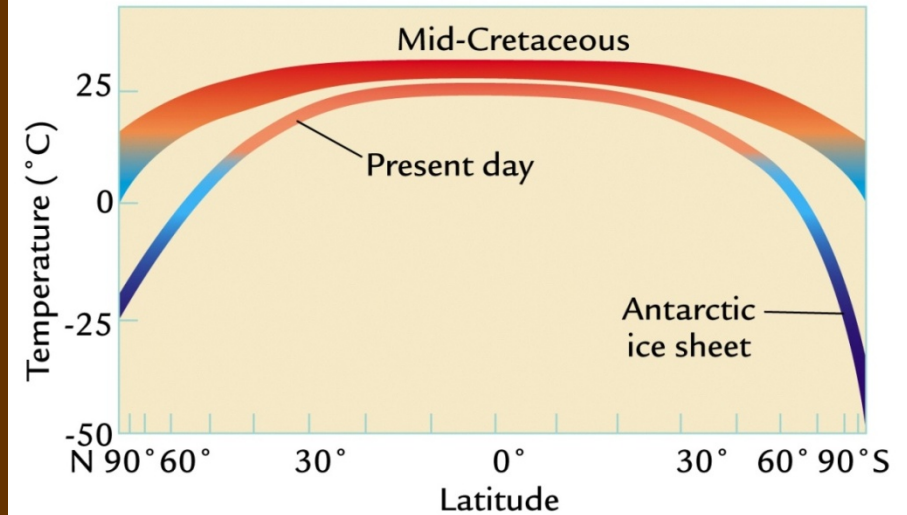
Calentamiento Cretácico

■ Requiere:

- ◆ Calentamiento global generalizado
 - ◆ Bajo gradiente entre Polo y Ecuador

■ Mecanismo para calentamiento de los Polos

- ◆ Incremento de CO_2
 - ◆ Calentamiento de polos y trópicos
- ◆ Incremento del calor latente hacia los polos

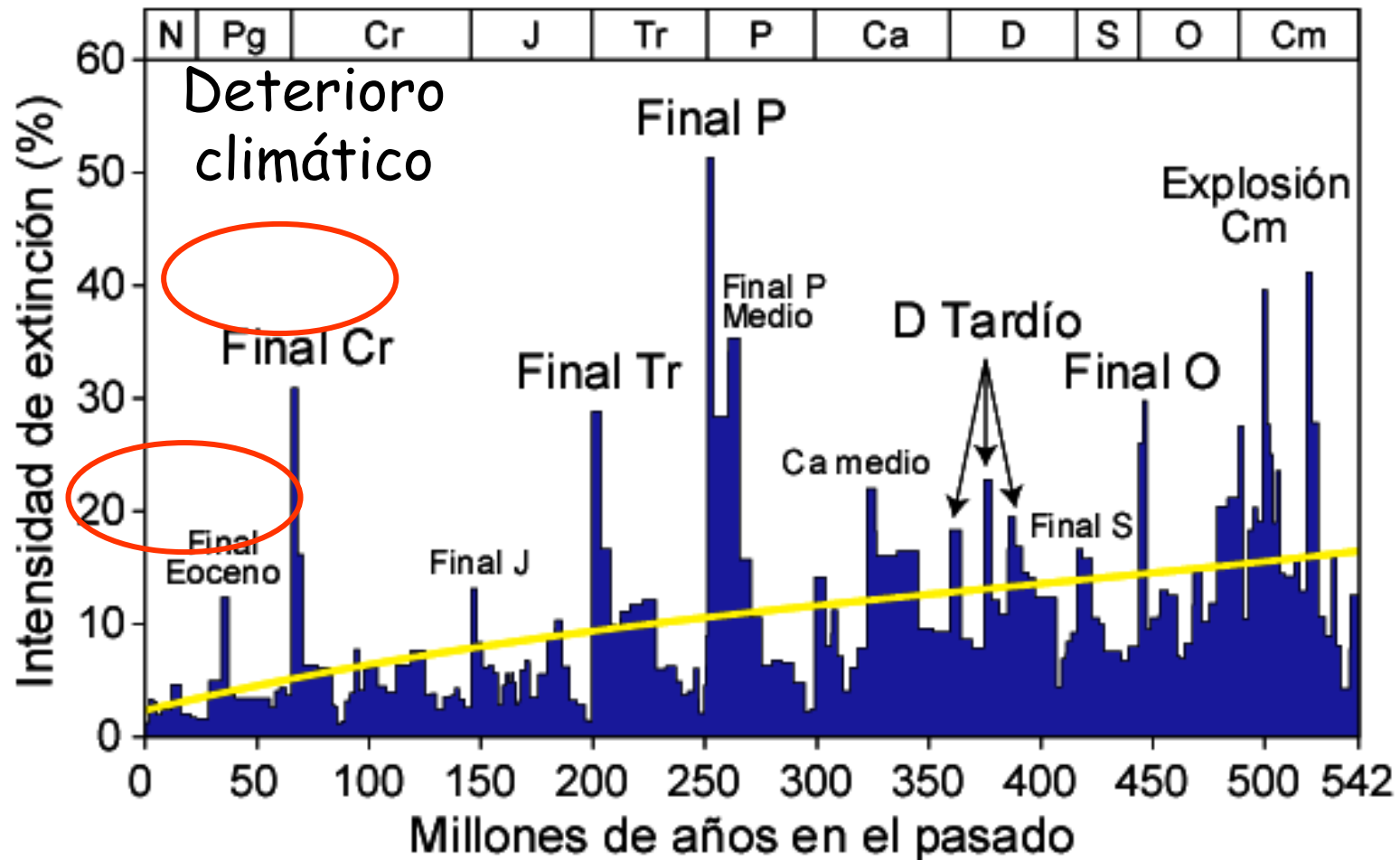


Ruddiman
(from Barron and Washington, 1985)

Cambio Climático K-T:

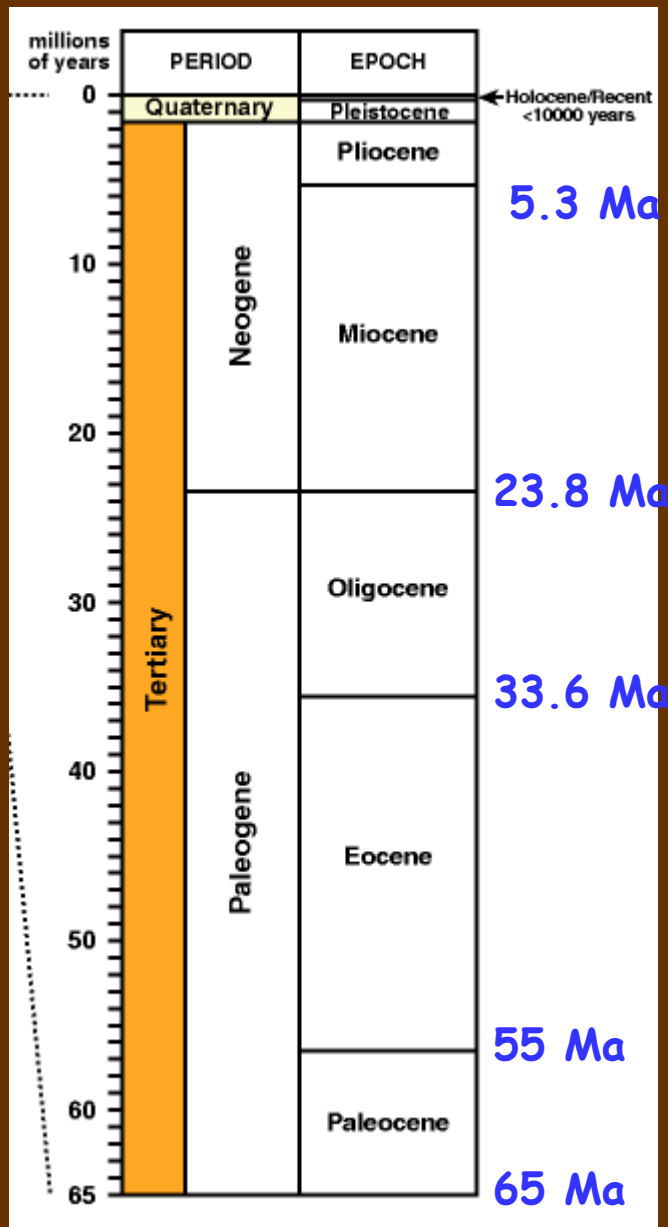
Extinción de ammonites, especies de plancton y dinosaurios

Diversidad de géneros marinos: Intensidad de extinción



Rohde & Muller (2005)

Clima en el Paleógeno



2.5 Ma

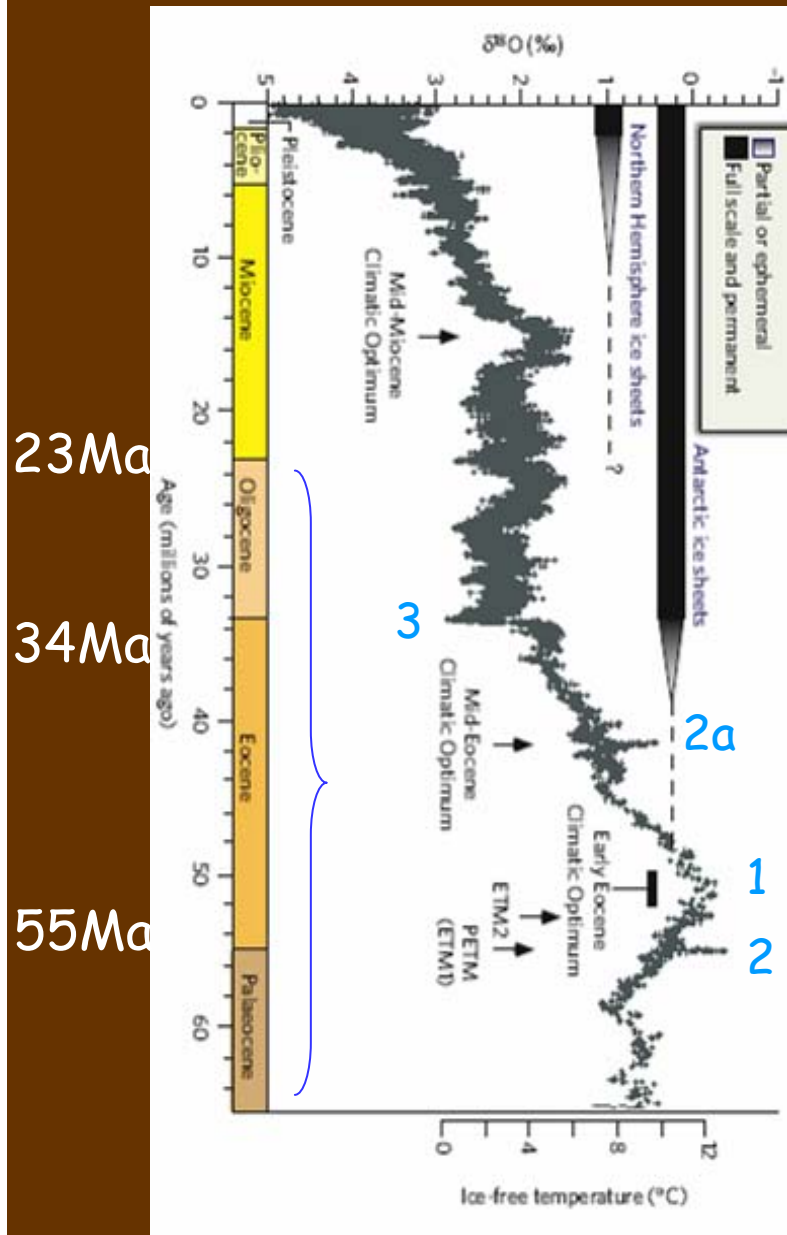
Neogeno - Frío

Paleogeno -

Variable: Cálido, pero con
tendencia al enfriamiento;
hipertermales"

Cretácico Superior: Cálido

Eventos



23Ma

34Ma

55Ma

Zachos et al., 2007

Hitos del Clima Paleógeno

1. Eoceno temprano: Óptimo Climático
2. Paleoceno/ Eoceno Máximo Termal (PETM) - hipertermal
- 2a. Eocene Medio: Óptimo climático (MECO)
3. Eoceno/Oligoceno- Hielo Antártico-Oi1

Paleoceno y Eoceno inferior Óptimo Climático

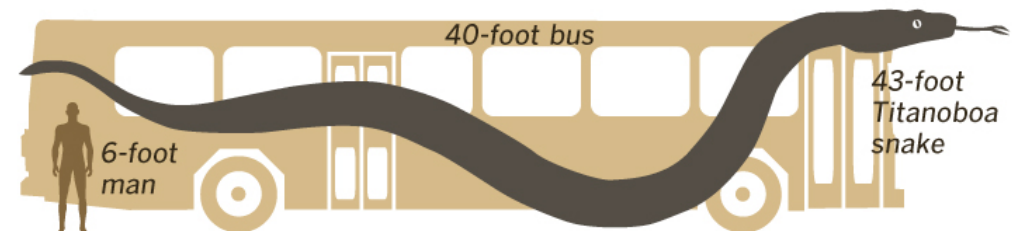
Evidencia de calentamiento

- ◆ Vegetación (Eoceno Temprano)
 - ◆ Selva tropical lluviosa en el NW Pacífico y Europa
 - ◆ Palmeras en Alaska
- ◆ Fauna
 - ◆ Aparición de pequeños mamíferos modernos
 - ◆ Asociaciones de foraminíferos planctónicos desplazados a 45°N
 - ◆ Reptiles a 78°N
 - ◆ Restos de Titanoboa (13 m), Paleoceno de Colombia → $T_m = 30 - 34^\circ\text{C}$
- ◆ Litología
 - ◆ Lateritas hasta 45° N



King of the snakes

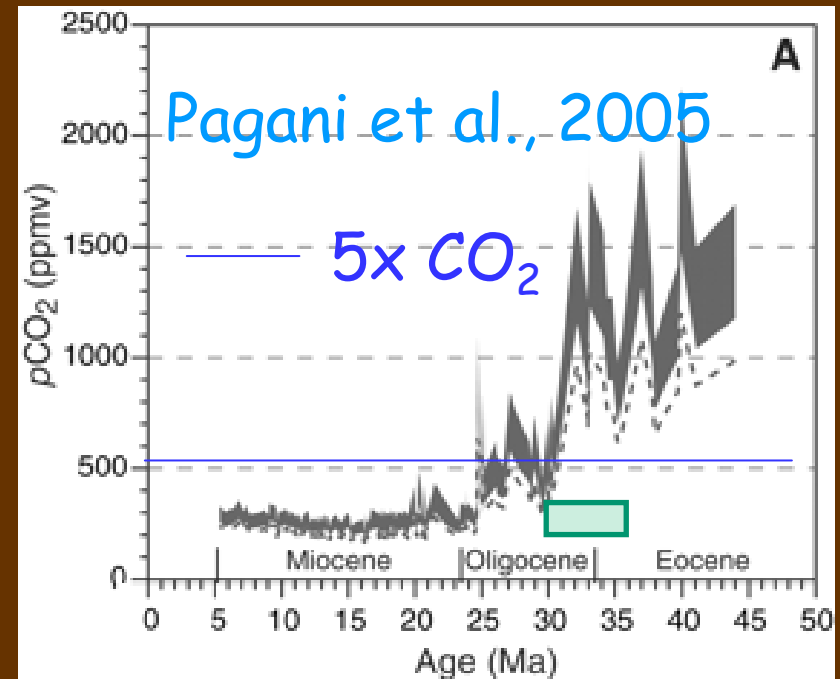
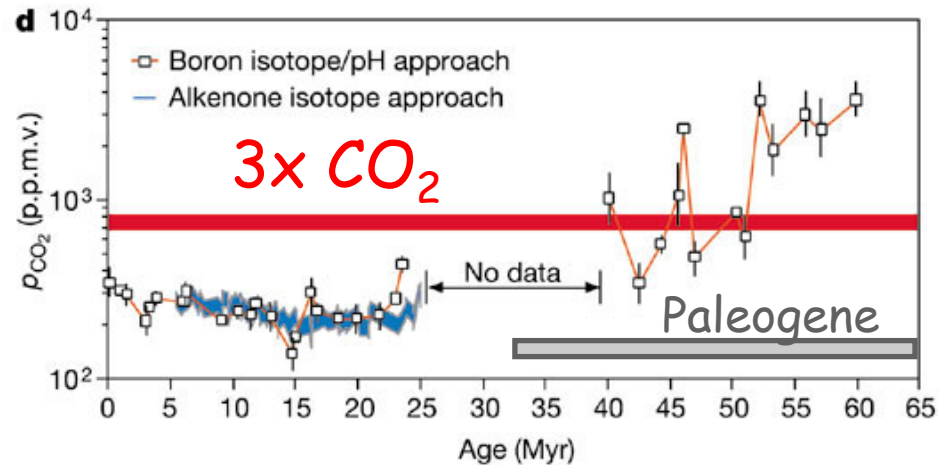
At one time, the prehistoric *Titanoboa* snake was probably the largest non-marine creature living on Earth.



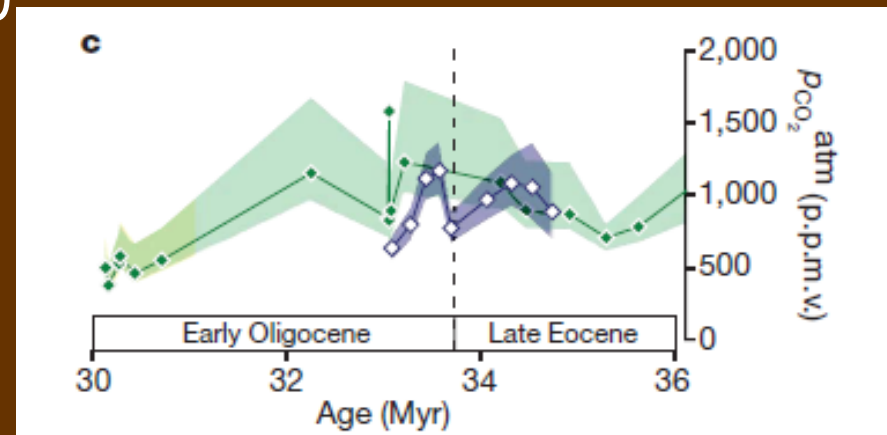
Source: Journal of Nature

BRADY MACDONALD Los Angeles Times

CO₂ Paleogeno



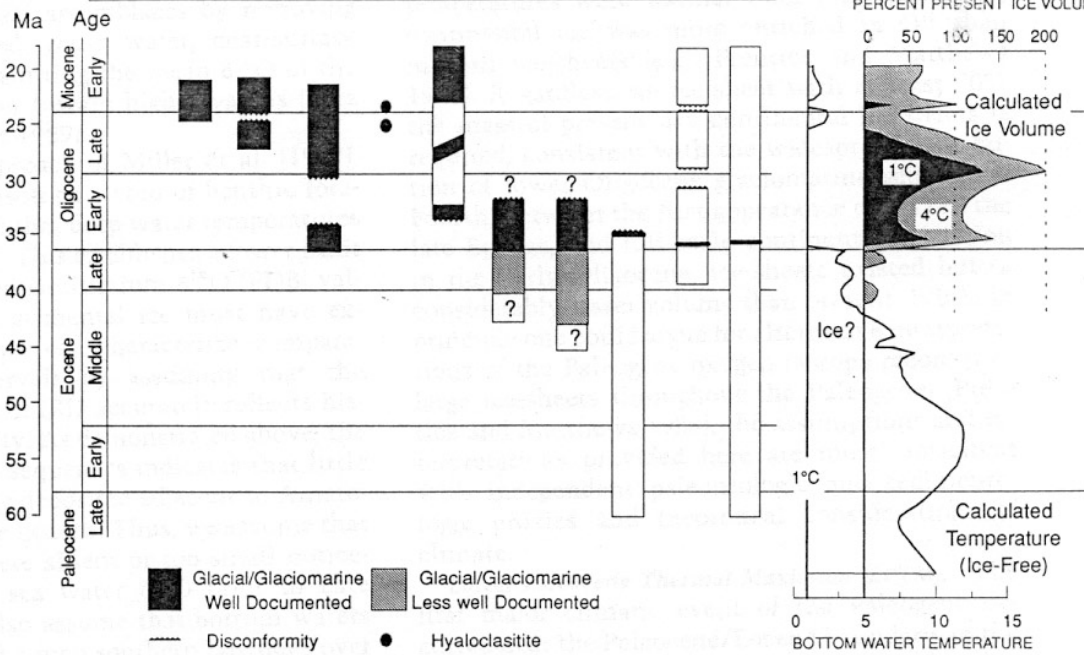
Boron- Pearson and Palmer, 2000
 Alquenonas- Pagani et al., 1999



Green = Pagani 2005- alk
 Blue = Pearson and Palmer, 2009- $\delta^{11}\text{B}$

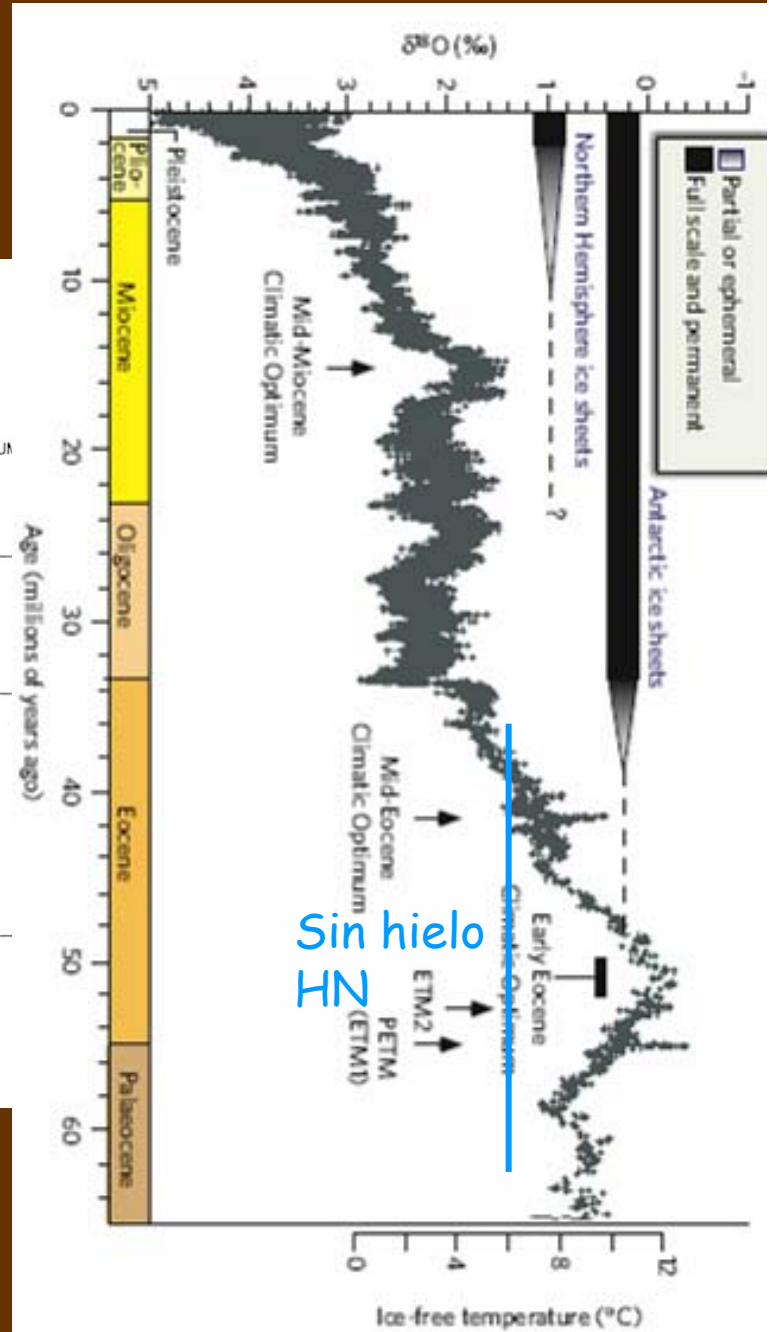
Paleogene-Eocene: Sin Hielo

Region	Ross Sea			Marie Byrd Land	Weddell Sea	Prydz Bay		Kerguelen Plateau		
Site	DSDP 270	MSSTS-1	CIROS-1	Mt. Petras	ODP 693	ODP 739	OPD 742	ODP 738	ODP 744	ODP 748
Latitude	77°S	78°S	77°S	76°S	71°S	67°S	67°S	63°S	62°S	58°S

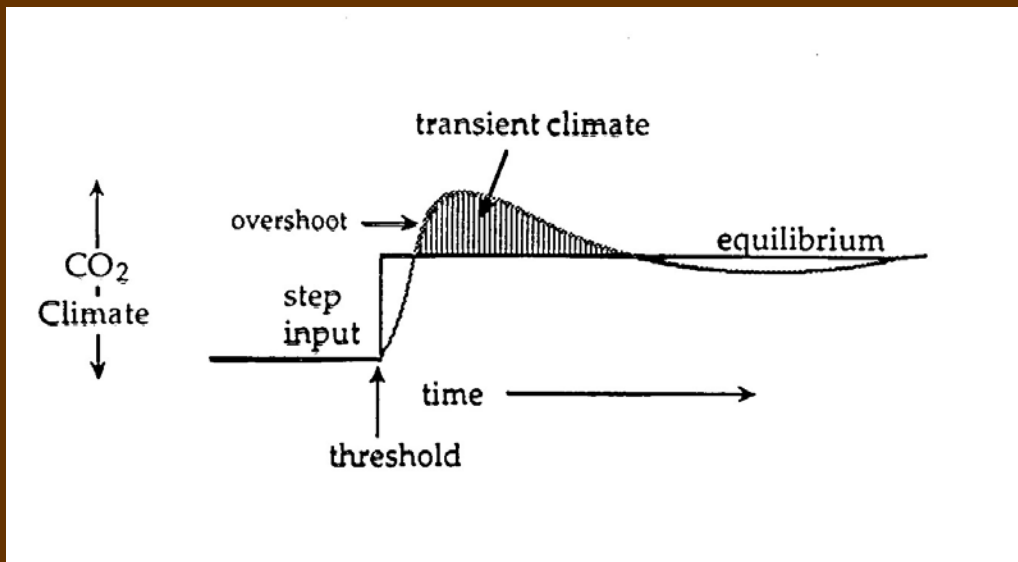


Zachos et al., 1994, *Paleoceanography*

Zachos et al., 2007

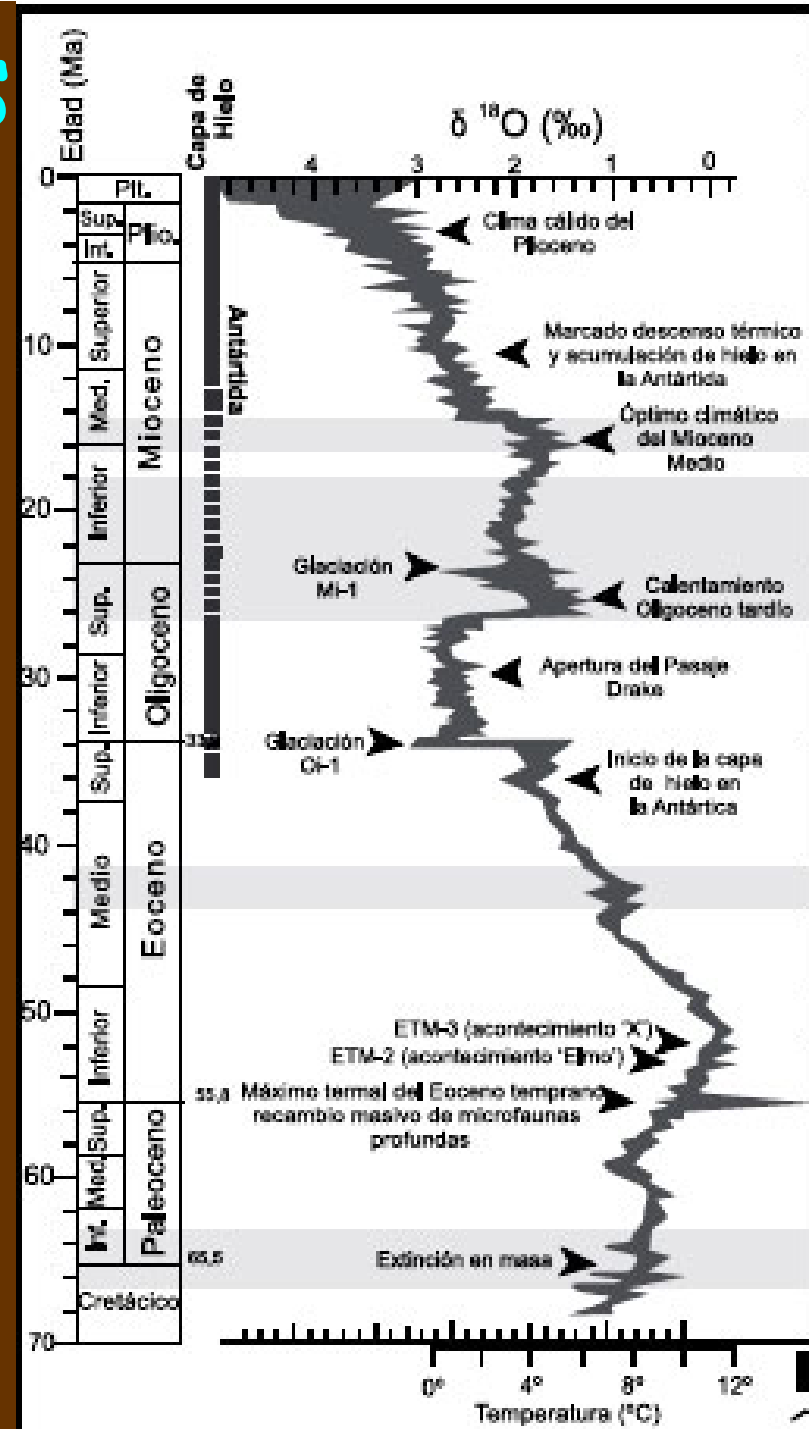


Tránsitos climáticos



"Rebote" en el Calentamiento
 "Retobe" en el enfriamiento

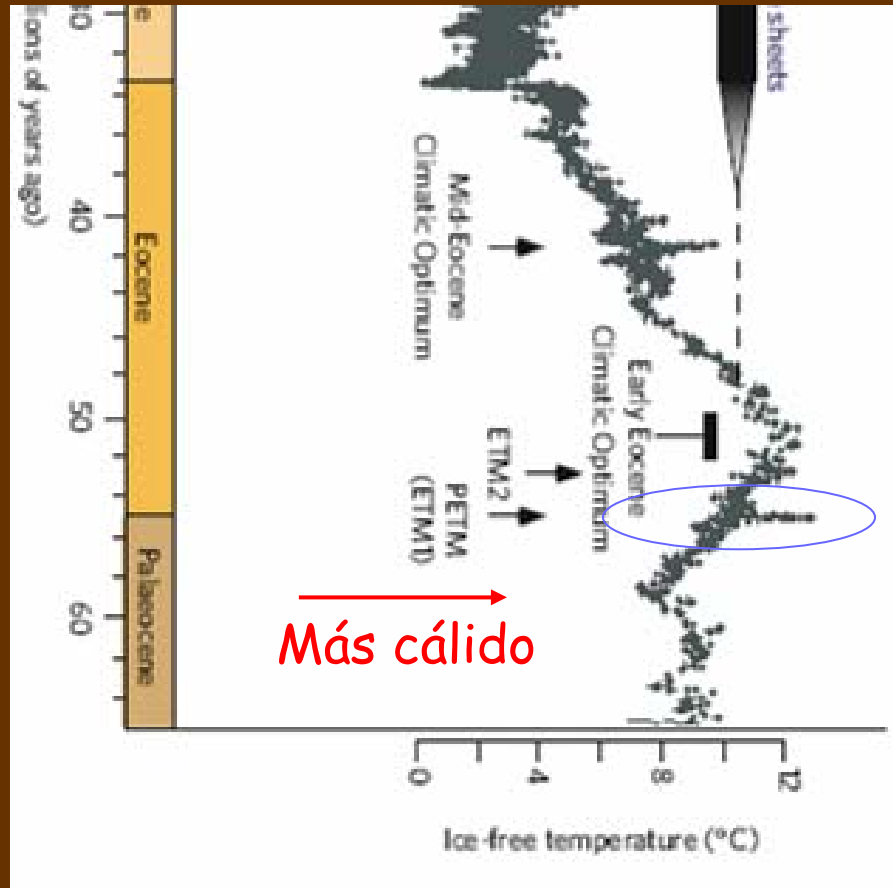
Zachos et al., 1993 from Berger, 1982



Máximo Hipertermal

- El Máximo Termal (hipertermal) en el límite Paleoceno/ Eoceno (55,5 - 54,8 Ma) se caracterizó por uno de los períodos más significativos del cambio global del Cenozoico. Este máximo térmico del Paleoceno-Eoceno cambió la circulación atmosférica y oceánica y condujo a la extinción de numerosos foraminíferos bentónico de aguas profundas y un importante número de los mamíferos terrestres.

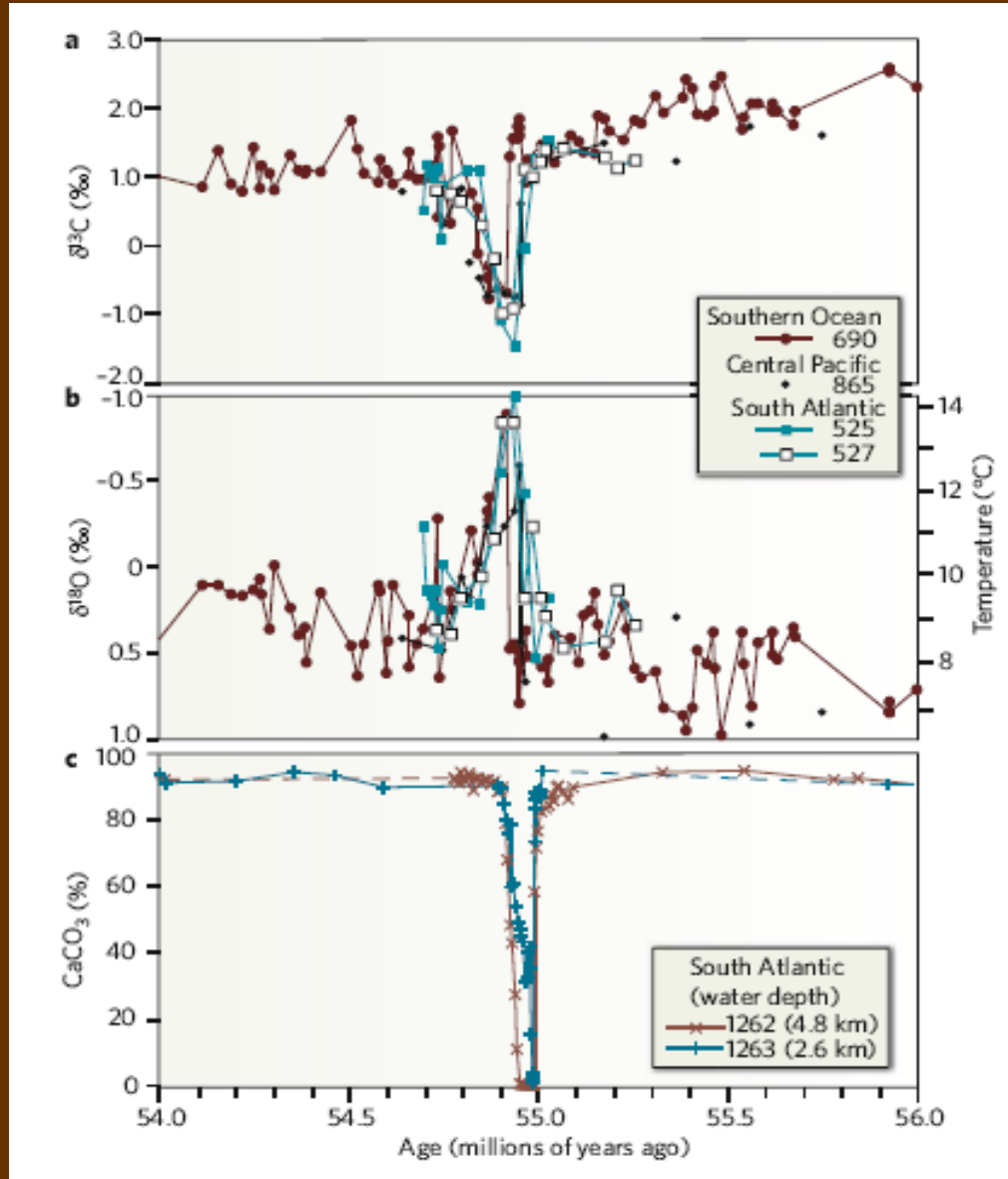
Hipertermales Paleoceno-Eoceno



Hipertermales

- < pocos 10,000's años
- Caluroso
- Elevado CO_2 (fuentes inciertas)
- Acidificación del océano
- PETM (~55 Ma) - más prominente - renovación de mamíferos (extinciones)

PETM



Zachos et al., 2007

Excursión
Negativa de $\delta^{13}\text{C}$
- 2.5‰
-20-40 ky

Excursión
Negativa de $\delta^{18}\text{O}$

Disolución de
carbonatos por
acidificación de los
océanos

metano hydratos

Estimación de temperaturas PETM

- Global
 - ◆ 5°C en <10,000 años
- Agua superficial en latitudes altas
 - ◆ 6-8°C - $\delta^{18}\text{O}$ (Thomas et al., 2002)
- Aguas profundas
 - ◆ 4-5°C - Mg/Ca (Tripathi and Elderfield, 2005)
- Aguas tropicales
 - ◆ 4-5°C - Mg/Ca + $\delta^{18}\text{O}$ (Zachos et al., 2003)

Desencadenante PETM

- Calentamiento de aguas profundas de 4-5°C
 - ◆ Conduciría a la disociación de carbohidratos → input de CO_2 a la atm.
 - ◆ Requiere otras fuentes de calentamiento
 - ◆ ¿Existiría suficiente carbono?
- Retroalimentación positiva a corto plazo

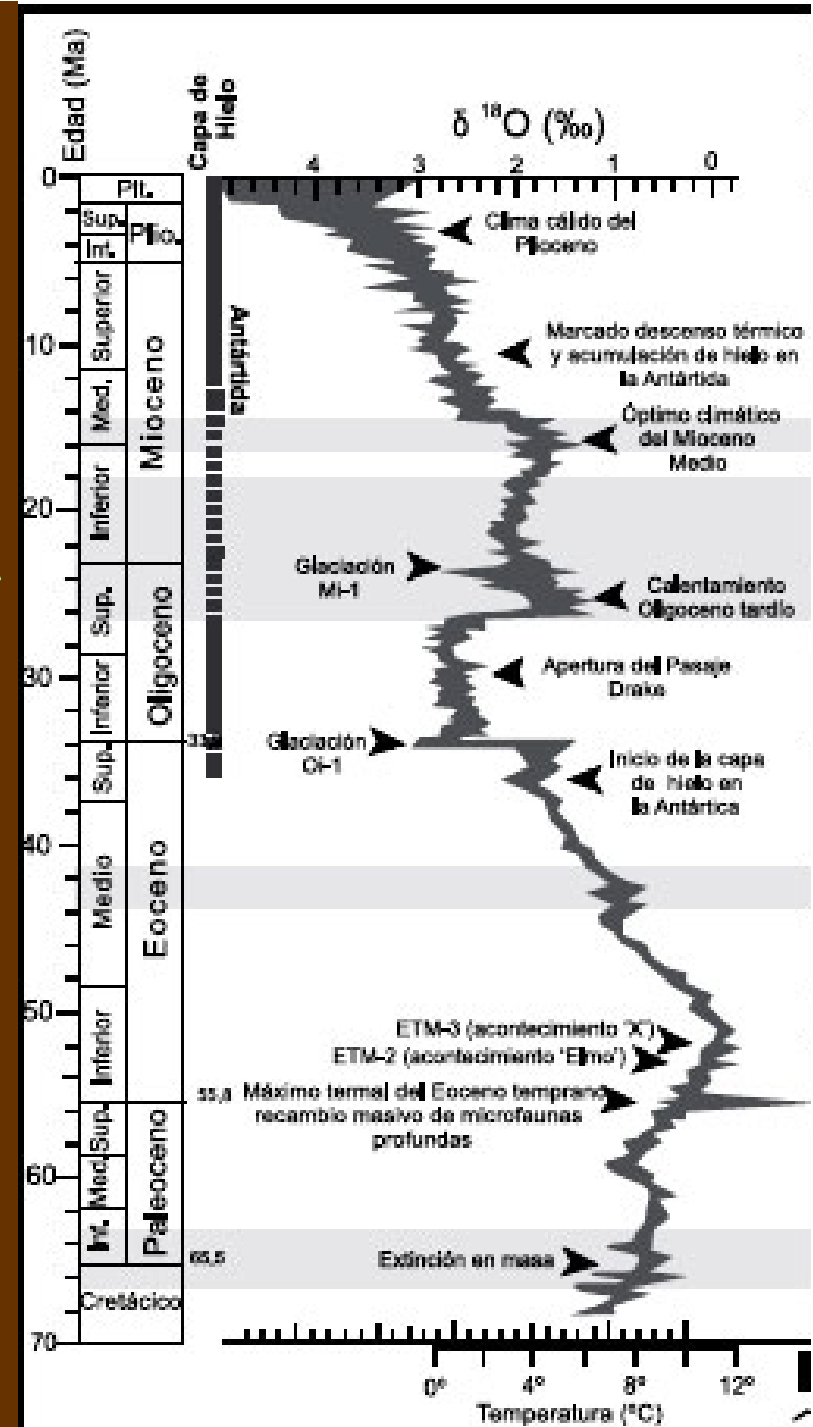
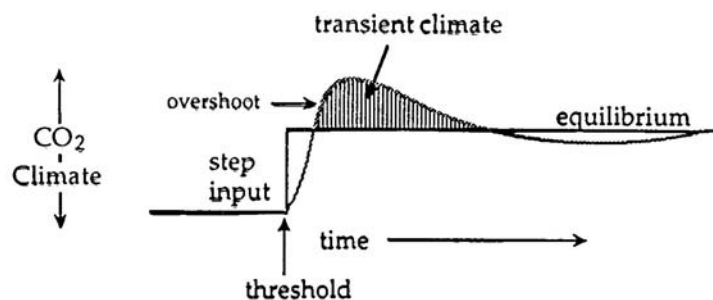
Enfriamiento Cenozoico

Enfriamiento generalizado

Enfriamiento escalonado

- Inicio de la capa de hielo de la Antártica
- Eoceno/Oligoceno (glaciación Oi1)
- Oligoceno/Mioceno (glaciación Mi1)
- Mioceno Medio (Óptimo climático)
- Plioceno (relativamente cálido)

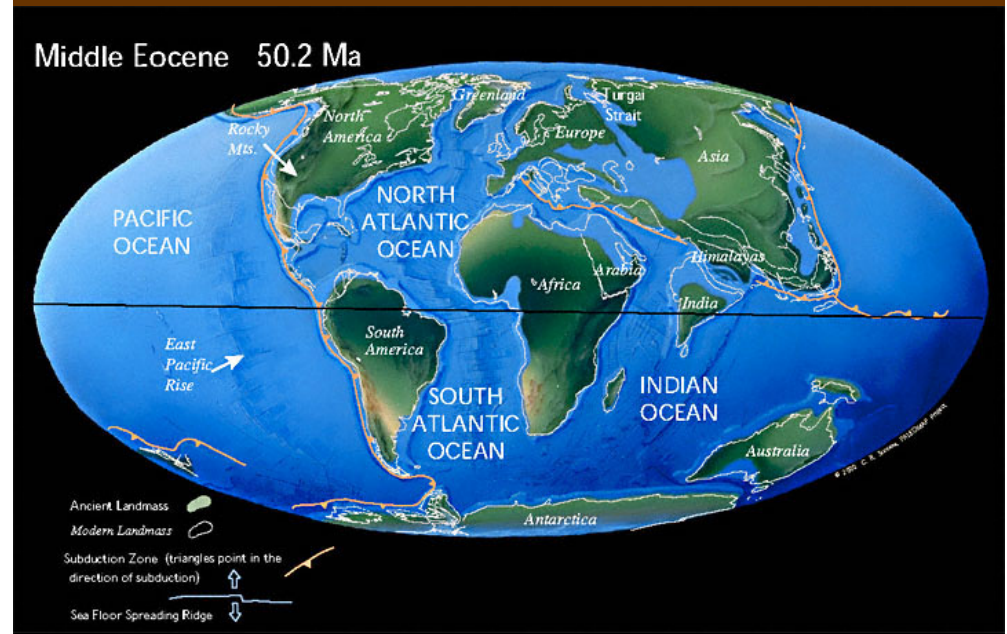
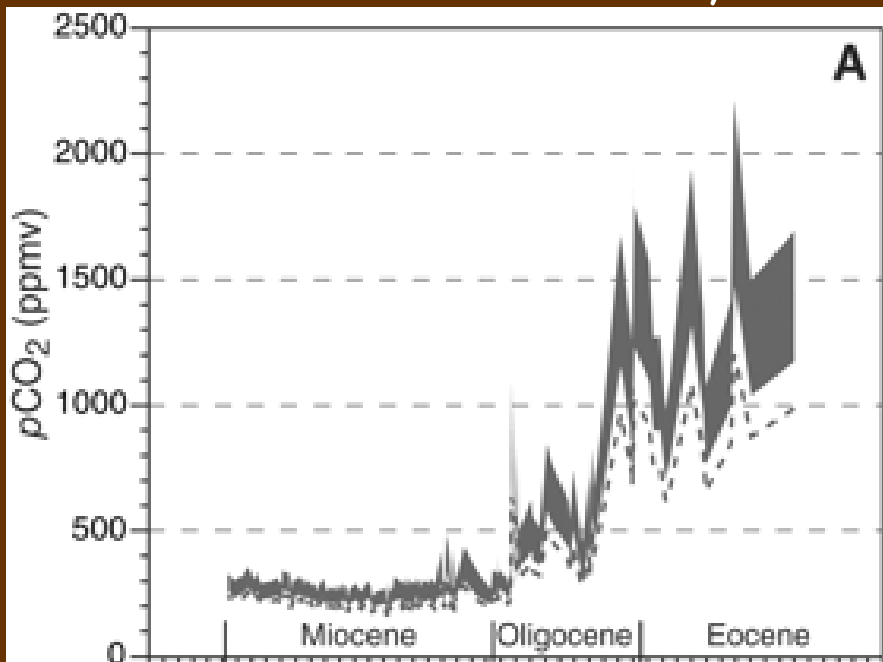
Rebotes climáticos



Enfriamiento Cenozoico

- Posibles causas
 - Paleogeográficas (posición polar): Antártica de situación marginal a su posición polar completa
 - Tasas de expansión cortical (CO_2)
 - Cambio en el transporte de calor de las corrientes oceánicas (e.g. Océano Antártico)

Boron- Pearson and Palmer, 2000



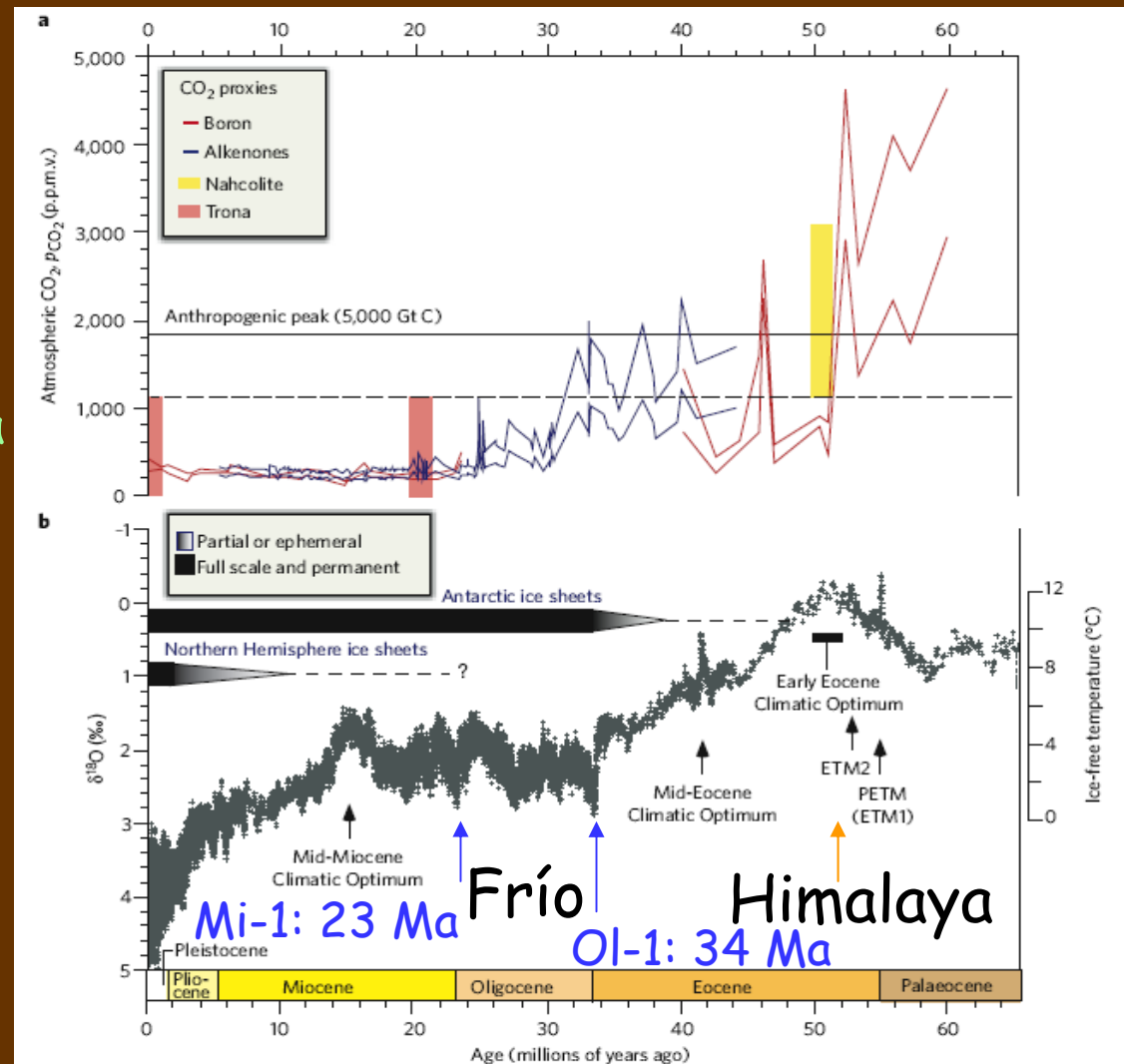
Enfriamiento Cenozoico y CO₂

Patrones de enfriamiento no son consistentes con cambios en el CO₂ producidos por las tasas de expansión cortical y actividad volcánica

Hipótesis de sumidero de CO₂ por levantamientos Alpinos

- Enfriamiento empieza ~50Ma
- Plataforma de los Himalayas sumergida hasta ~52 Ma
- Igual en otras cordilleras alpinas, Andes, Alpes, Pirineos

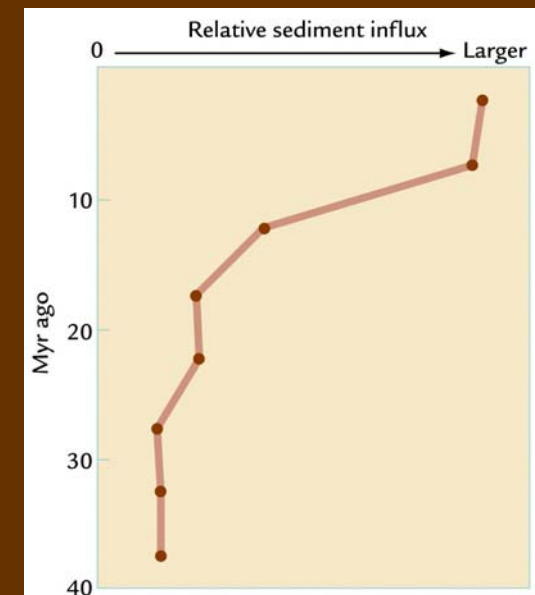
Zachos et al., 2007



Hipótesis de levantamiento

- Intensificación de la circulación monzónica
- Perturbación de la circulación atmosférica
- Raymo and Ruddiman- Las variaciones de CO_2 están generadas por los términos de salida en el ciclo del carbono. Tasas de meteorización química elevada conducen a bajos contenidos de CO_2

Flujo de sedimentos en el Océano Indico se incrementa hace 25 My, y se acelera hace 10 My.
Ruddiman, 2008

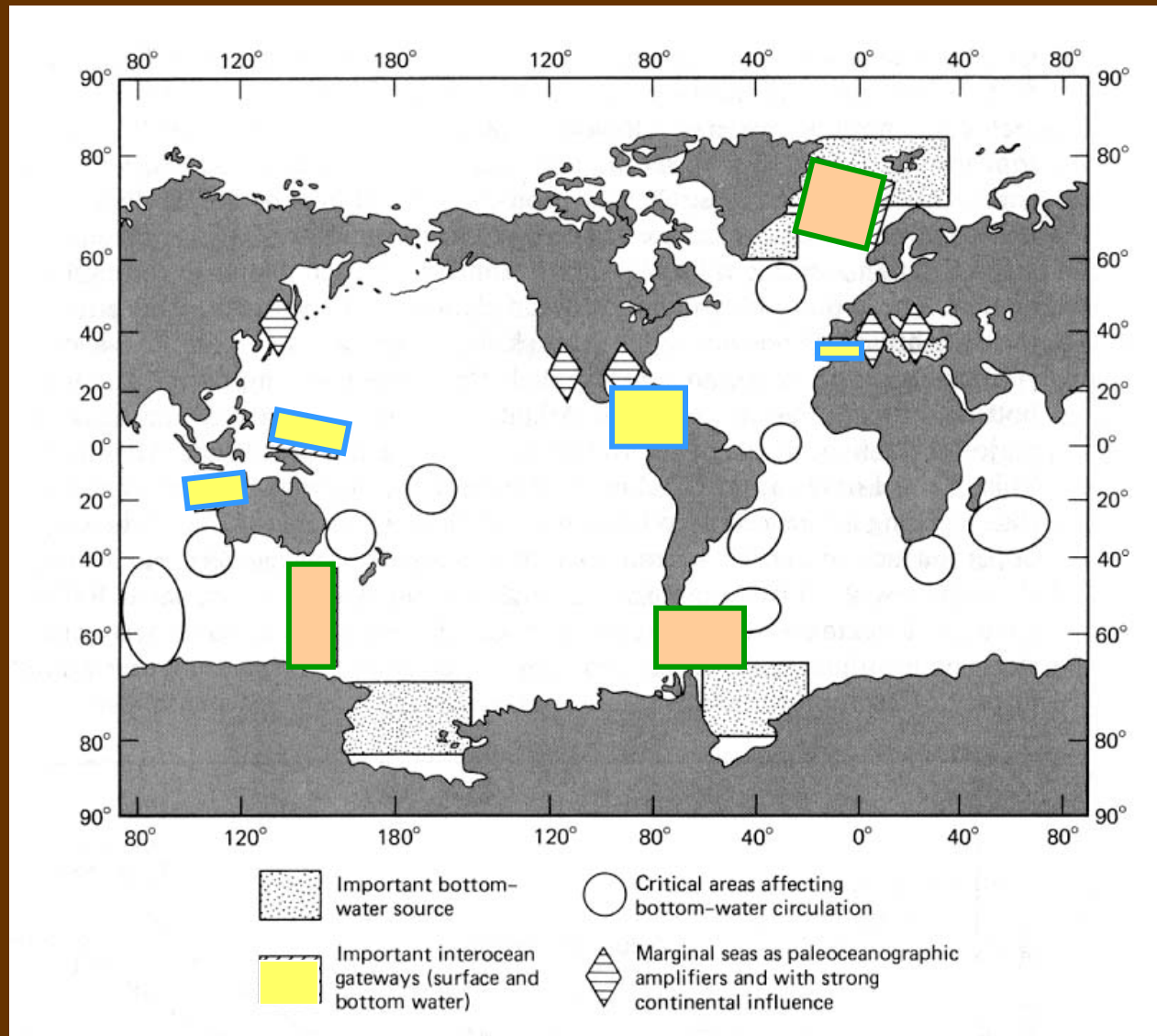



Enfriamiento Cenozoico

Hipótesis del transporte de calor de los Océanos

- Vías de conexión y transporte de calor
 - ◆ Abertura y cierre de vías de conexión en el Cenozoico, que conducen a:
 - ◆ Descenso del transporte de calor en dirección a los polos
 - ◆ Incremento del transporte de humedad
 - ◆ Fraccionamiento cuenca a cuenca (sales, temp, geoquímica)

Vías de conexión oceánicas



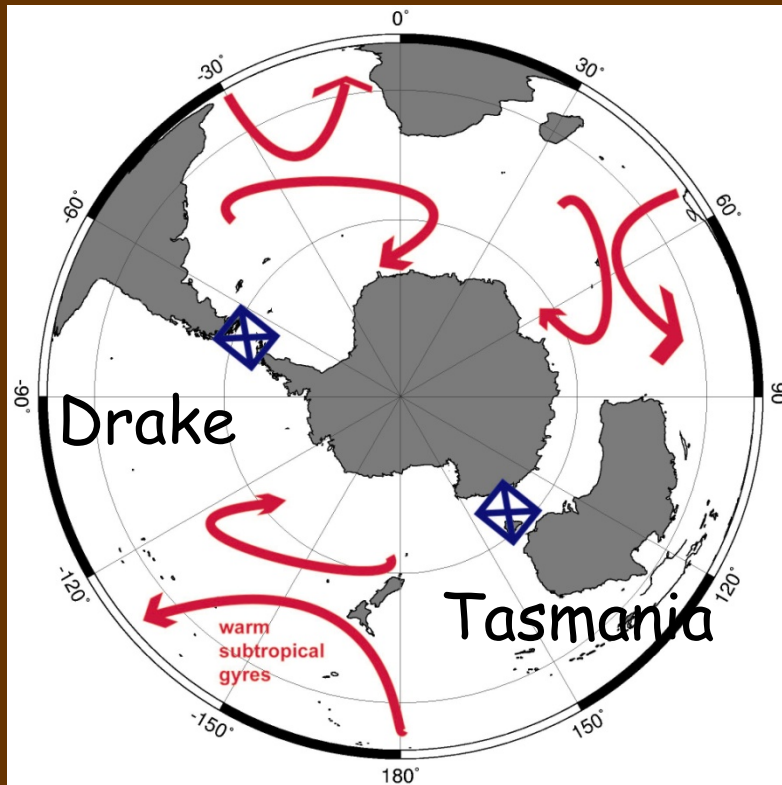
 Cierre a través de la región ecuatorial

 Abertura en latitudes altas

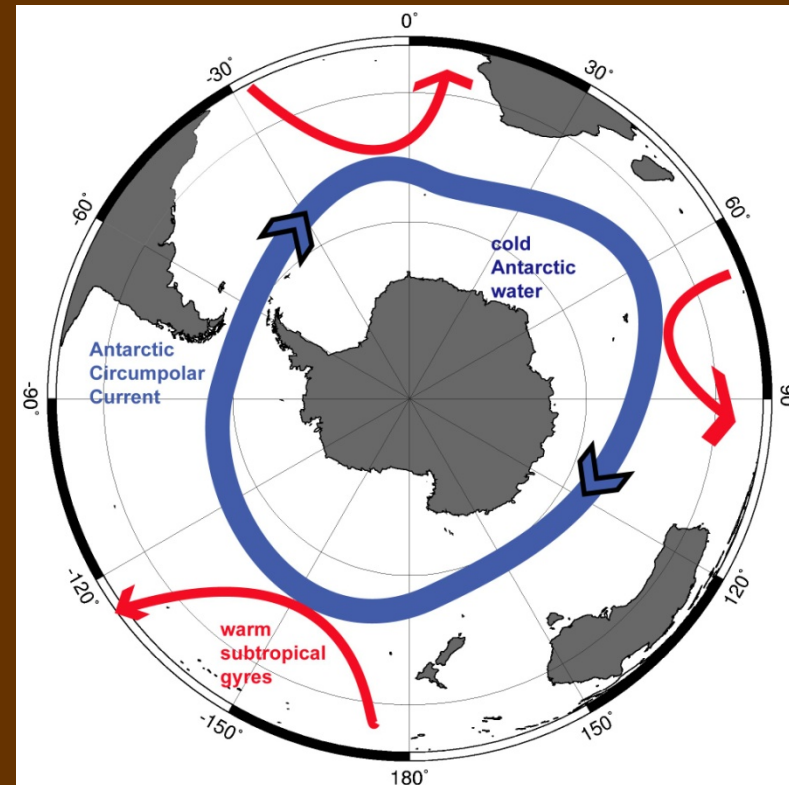
Kennett, Marine Geology, 1982

Cambios en circulación oceánica

La Corriente Circumpolar Antártica se formó cerca del límite Eoceno-Oligoceno, cuando la Antártida y Sudamérica finalmente se separaron para formar el Paso de Drake hace unos 34-30 millones de años. En este momento la Antártida quedó aislada de las aguas más cálidas y se enfría. Los glaciares empezaron a formar sobre el continente que anteriormente estaba cubierto por bosques



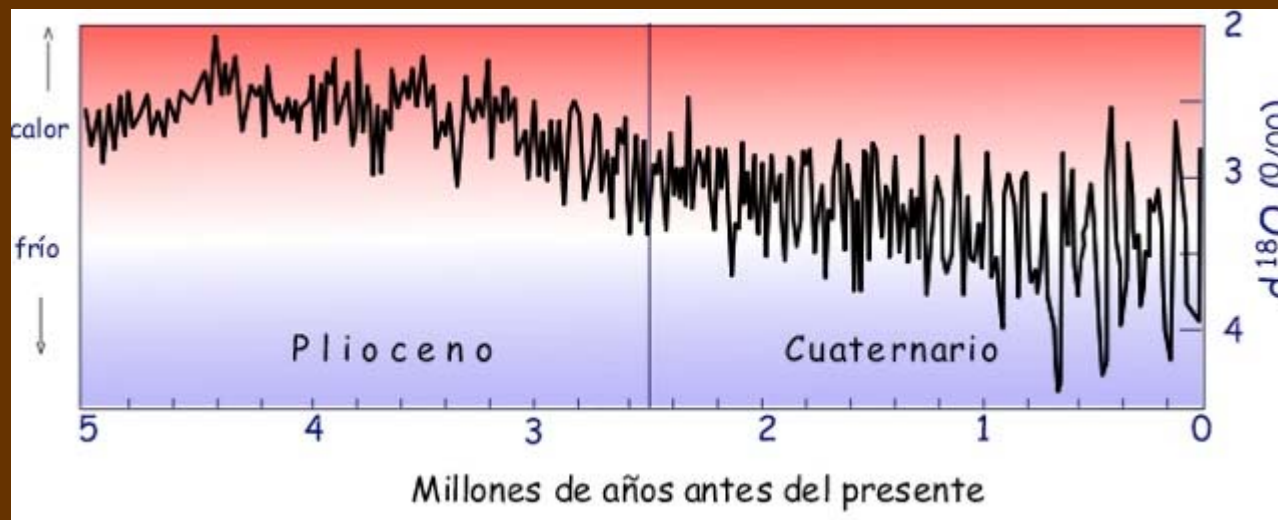
Kennett, 1977



(Antarctic Circumpolar Current)

Clima Plioceno

- Plioceno 5.3 - 1.8 Ma
- Dos partes:
 - ◆ Inicio cálido* (5-3Ma): +calido en 7 Ma
 - ◆ Deterioro del Clima (3-2.5)

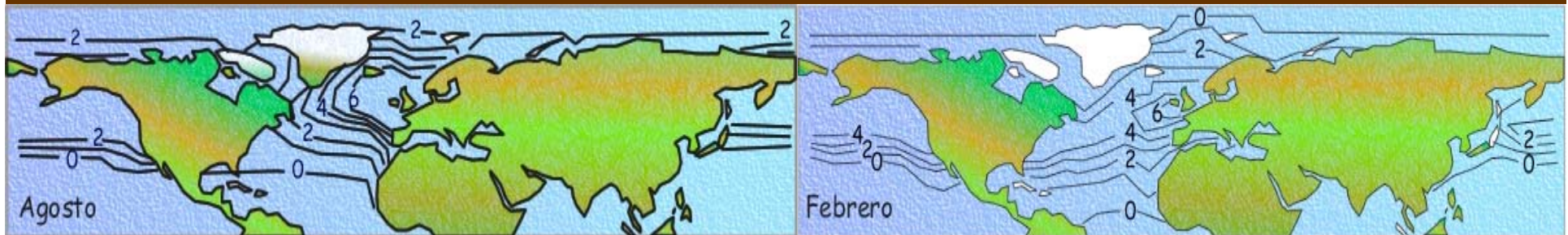


Uriarte, 2003
Datos ODP

*Calentamiento Plioceno - próximo al equilibrio
Calentamiento antropogénico en condiciones de no equilibrio

Evidencia del calentamiento Plioceno

- ◆ Bosques boreales en los márgenes del Océano Ártico (Matthews and Ovenden, 1990)
 - ◆ Atlántico Norte y Pacífico SST $\sim 5^{\circ}\text{C}$ \rightarrow que el presente (Dowsett and Poore, 1991)
 - ◆ Temperaturas del Océano Sur $\sim 5^{\circ}\text{C}$ más cálidas (Ciesielski and Weaver, 1974)
 - ◆ En los trópicos SST ligeramente más cálidas
 - ◆ Temperaturas globales 3°C más cálidas
- Uriarte, 2003: Temperaturas medias en relación a las actuales

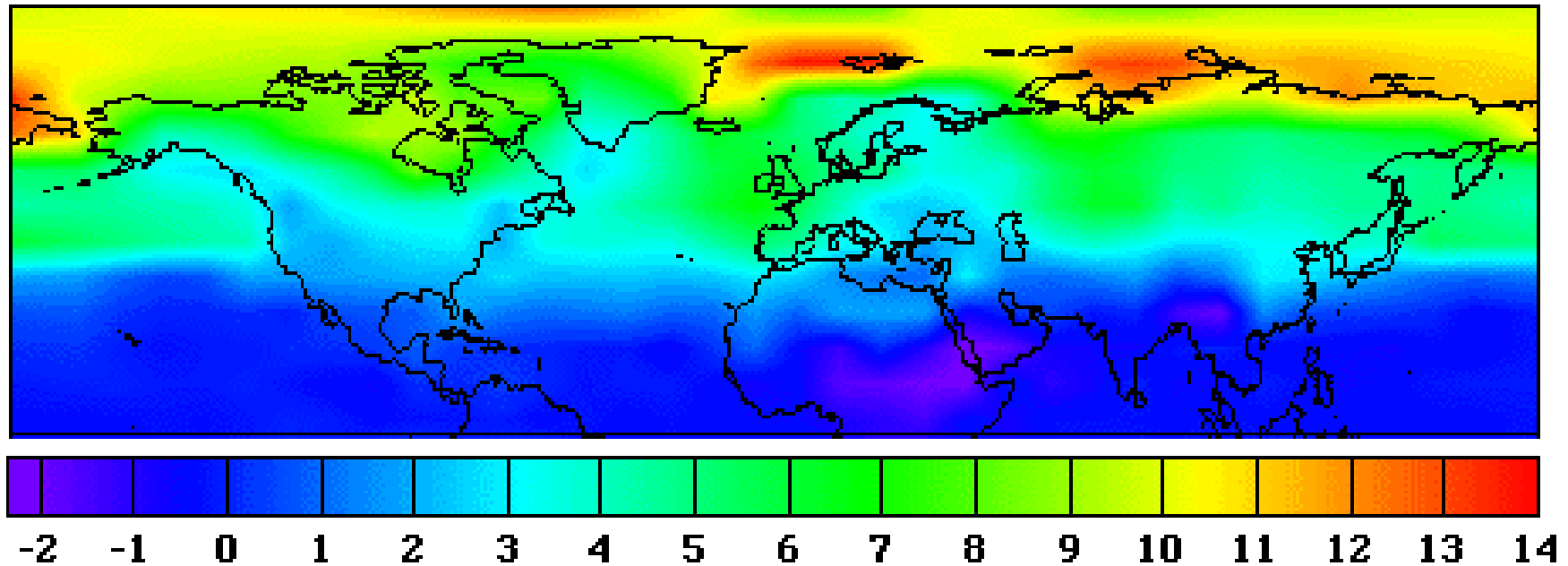


Evidencia del calentamiento Plioceno

■ Otras condiciones

- ◆ Ártico sin hielo estacional (Cronin et al., 1993)
- ◆ Nivel del mar- amplio rango (10-20 m superior; 30-35 m superior Krantz, 1991); hasta 60 m : Haq et al., 1987)
- ◆ Circulación Termohalina fuerte (Raymo et al., 1996)
- ◆ Hielo en Antártica reducido (Diatoms- Barron, 1996)
 - ◆ Límite actual de verano ~ Límite plioceno invernal)
- ◆ Antártica menos hielo que el actual (Webb and Harwood, 1991)

Temperaturas medias en el Plioceno en relación con las actuales

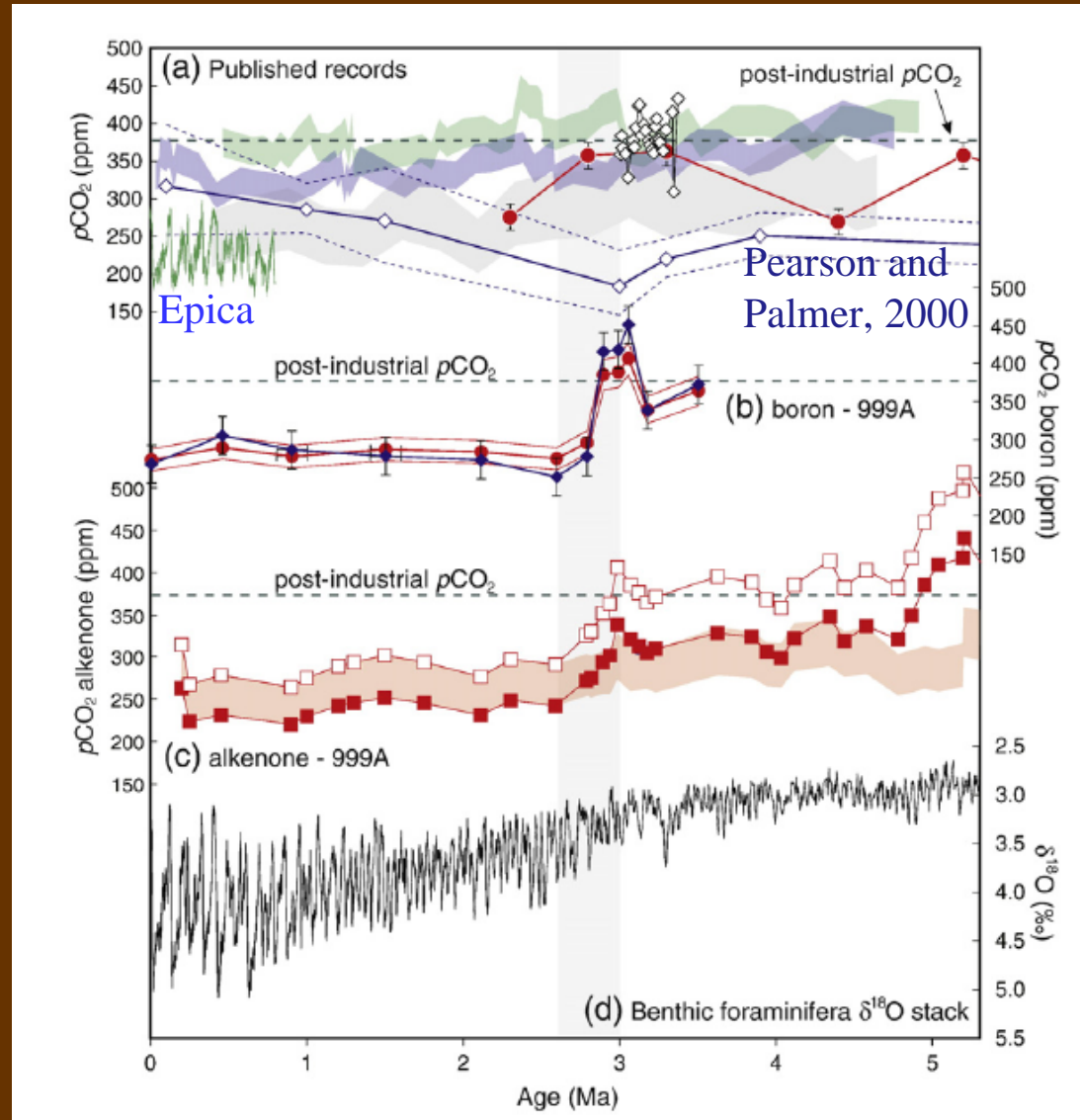


Las temperaturas medias eran particularmente elevadas en latitudes. <http://www.giss.nasa.gov/research/paleo/pliocene>

Modelo Crowley

- ◆ Para conseguir 6° calentamiento en latitud alta (SST) requiere 2xCO₂ (580 ppm)
- ◆ No se pudo alcanzar sólo con condiciones paleogeográficas o cambios en circulación oceánica

CO₂ Pliocene



Raymo et al., 1996- $d^{13}D C_{org}$

Kurschner et al., 1996-
stomatal indices

Shaded = Pagani et al., 2009-
alkenones

Causas del calentamiento Plioceno

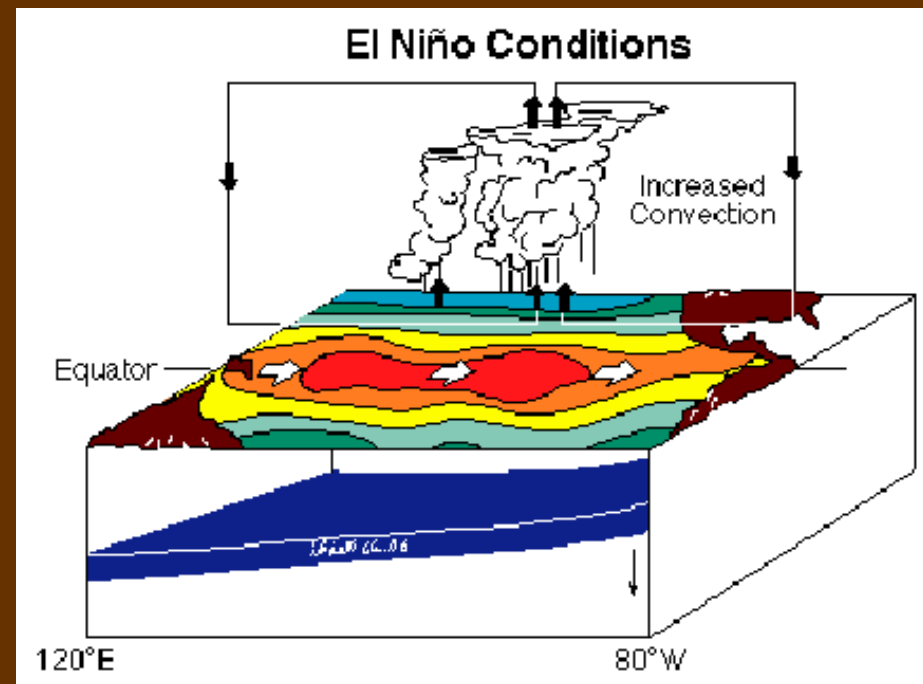
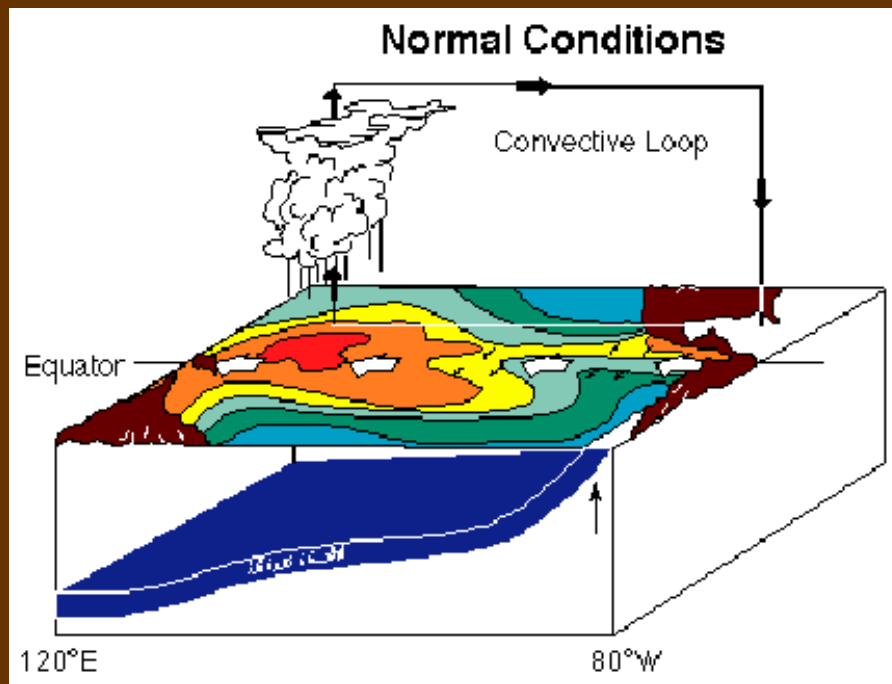
◆ CO_2

- ◆ Los proxies indican 300-380 ppm (~1.5x CO_2)

◆ Intensificación del transporte de calor oceánico

- ◆ Raymo et al. (1996), Billups et al. (1999), Ravelo and Andreasen (2000)
- ◆ Condiciones de El Niño permanente. Contribuye/agudiza el calentamiento

Condiciones El Niño



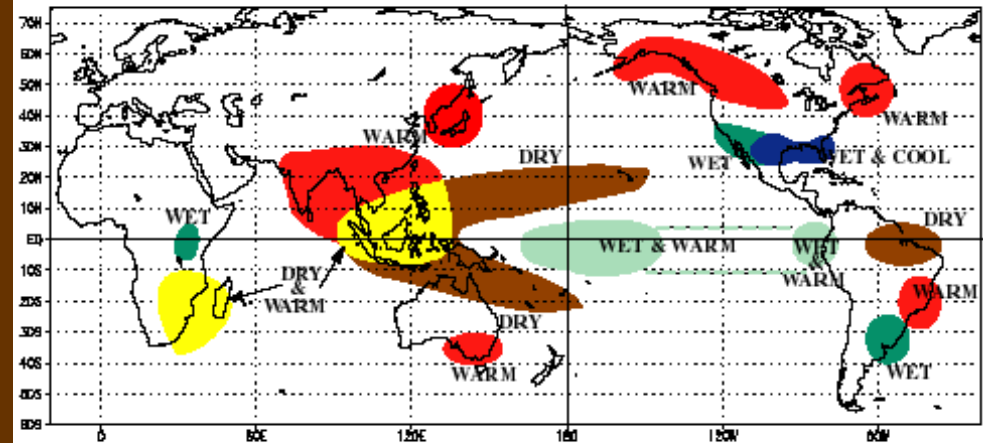
~2 a 7 años

From NOAA website

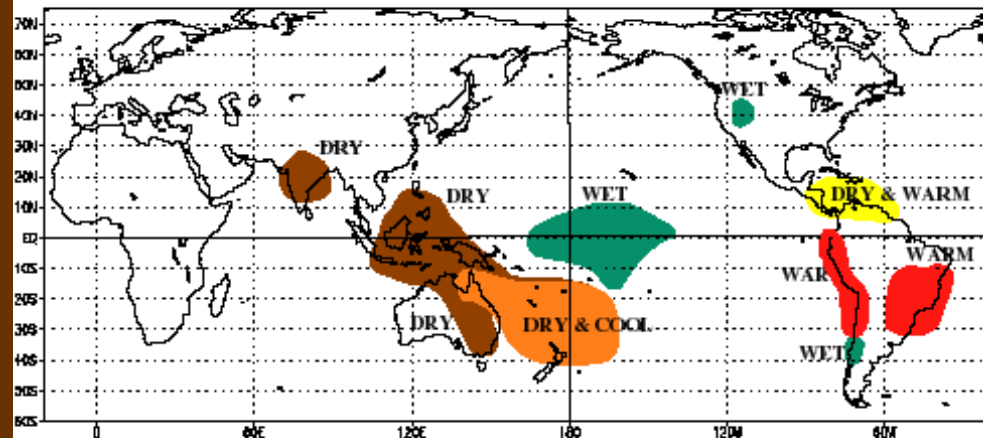
Teleconexiones El Niño

Patrón de teleconexiones de El Niño, similar a las que ocurrirían en el Plioceno

WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST

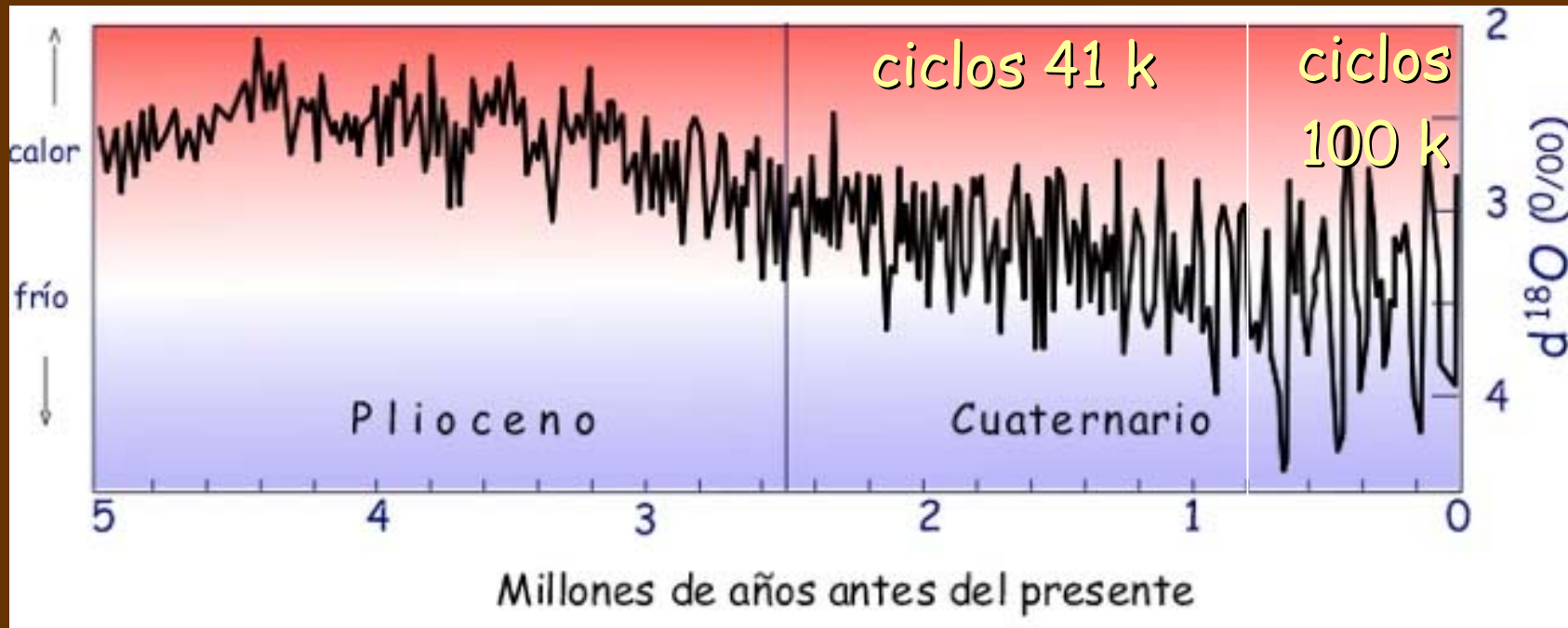


Climate Prediction Center
NCEP

Enfriamiento Plioceno Tardío

- ~ 2.7 Ma
 - ◆ Transición gradual
 - ◆ Final de las condiciones permanentes de El Niño
 - ◆ Abertura y cierre de vías de conexión
 - ◆ Ciclos Milankovitch. Comienzan los ciclos 41 k
 - ◆ Se reduce la corriente termohalina del Atlántico Norte (Transporte de calor oceánico)
 - ◆ IRD en Pacífico norte y Atlántico (~2.5 Ma)

Comienza el Pleistoceno



Uriarte, 2003
Datos ODP

Ciclos 41 k: Oblicuidad

Ciclos 100 k: excentricidad

Posiblemente debido a cambios de circulación atmosférica por levantamiento del Tibet?



Icehouse vs. Greenhouse Earth

Bibliografía

- Frakes, L.A. and Francis, J.E. 1988. A guide to Phanerozoic cold polar climates from high-latitude ice-rafting in the Cretaceous. *Nature*, 333, 547-549.
- Barron, J.A., 1992b. Paleooceanographic and tectonic controls on the Pliocene diatom record of California. In: R. Tsuchi and J.C. Ingle Jr. (Editors), Proc. Vth Int. Congr. Pacific Neogene Stratigraphy and IGCP 246, Shizuoka, Oct. 6-10, 1991. Univ. Tokyo Press, pp. 25-41
- Bekker, A., Holland, H.D., Wang, P.-L., Rumble, D., Stein, H.J., Hannah, J.L., Coetzee, L.L. and Beukes, N.J., 2004, Dating the rise of the atmospheric oxygen, *Nature*, v. 427, 117-120
- Berner, R.A. (1991). A model for Atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 291, 339-376.
- Ciesielski, P.F. and Weaver, F.M., 1974. Early Pliocene temperature changes in the Antarctic Seas. *Geology*, 2: 511-515.
- Cronin, T.M., Whatley, R.C., Wood, A., Tsukagoshi, A., Ikeya, N., Brouwers, E.M. and Briggs Jr., W.M., 1993. Microfaunal Evidence for elevated mid-Pliocene temperatures in the Arctic Ocean. *Paleoceanography*, 8: 161-173.
- Crowley, T.J., Mengel, J.G., and Short, D.A., 1987. Gondwanaland's seasonal cycle. *Nature*, 329, 803-807.
- Datos en <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/metadata/noaa-forcing-5784.html>
- Donnadieu Y. et al., 2004, "A 'snowball Earth' climate triggered by continental break-up through changes in runoff", *Nature*, 428, 303-306

Bibliografía

- Dowsett, H.J. and Poore, R.Z., 1991. Pliocene sea surface temperatures of the North Atlantic Ocean at 3.0 Ma. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 189-204.
- Frakes, L.A. (1979). *Climates Throughout Geologic Time*, Elsevier, Amsterdam
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987b. The new chronostratigraphic basis of Cenozoic and Mesozoic sea level cycles. *Cushman Found. Foram. Res. Spec. Publ.*, 24: 7-13.
- Hoffman P & D. Schrag, 1999, The Snowball Earth, http://www-eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/snowball_paper.html
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. & Schrag, D.P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science* **281**, 1342-1346.
- Kennett, J.P. 1979. Recent zoogeography of Antarctic plankton microfossils, p. 328-355. In van der Spoel, S. and Pierrot-Bults, A.C. (eds.), *Zoogeography and Diversity of Plankton*. Halstead, New York.
- Kennett, J.P. 1982. *Marine Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kennett, J.P. and Barker, P.F. 1990. Latest Cretaceous to Cenozoic climate and oceanographic developments in the Weddell Sea, Antarctica: an ocean-drilling perspective, p. 937-962. In Barker, P.F. and Kennett, J. P. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results., Leg 113*. ODP, College Station, Texas.
- Krantz, D.E., 1991. A chronology of Pliocene sea-level fluctuations: the U.S. middle Atlantic coastal plain record. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 163-174.

Bibliografía

- Matthews, J.V. and Ovenden, L.E., 1990. Late Tertiary plant macrofossils from localities in Arctic/Subarctic North Amer
- Pagani M. et al., 2005, Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene, *Science*, 309, 600-603
- Pearson P. & Palmer M., 2000, Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years, *Nature*, 406, 695-699
- Raymo, M.E., Ruddiman, W.F., Backman, J., Clement, B.M. and Martinson, D.G., 1989. Late Pliocene variation in Northern Hemisphere ice sheets and North Atlantic deep water circulation. *Paleoceanography*, 4: 413-446.
- Rohde & Muller (2005). Mass extinctions in the marine fossil record. *Science* 215: 1501-1503
- Royer, D.L., S.L. Wing, D.J. Beerling, D.W. Jolley, P.L. Koch, L.J. Hickey, and R.A. Berner. 2001. Paleobotanical Evidence for Near Present-Day Levels of Atmospheric CO₂ during Part of the Tertiary. *Science*, vol. 292, pp. 2310-2313, 22 June 2001.
- Ruddiman, W.F. 2008. *Earth's Climate. Past and Future. Second Edition*, W.H. Freeman and Company. Chapter 1. Overview of Climate Science. pp. 4-16.
- Thomas D., 2004, Evidence for deep-water production in the North Pacific Ocean during the early Cenozoic warm interval, *Nature*, 430, 65-68
- Thompson, S.L., and Barron, E.J., 1981. Comparison of Cretaceous and present Earth albedos: Implications for the causes of paleoclimates. *J. Geol.*, 89, 143-167.
- Tripathi A. & H. Elderfield, 2005, Deep-sea temperature and circulation changes at the Paleocene-Eocene thermal maximum, *Science*, 308, 1894-1898

Bibliografía

- Webb, P.-N. and Harwood, D.M., 1991. Late Cenozoic history of the Ross Embayment, Antarctica. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 215-223.
- Webb, P.-N., Harwood, D.M., McKelvey, B.C., Mercer, J.H. and Stott, L.D., 1984. Cenozoic marine sedimentation and ice volume variation on the East Antarctic craton. *Geology*, 12: 287-291.
- Zachos J. et al., 2001, Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present, *Science*, 292, 686-693
- Zachos J. et al., 2003, A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene thermal maximum, *Science*, 302, 1551-1554
- Zachos J. et al., 2005, Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, *Science*, 308, 1611-1615
- Zachos J., Lohmann, K.C., Walker, J.C.G., Wise, S.W., Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A Marine perspective. *The Journal of Geology* 101. 191-213.
- Zachos, J.C., Stott, L.D., Lohmann, K.C., 1994. Evolution of Early Cenozoic marine temperatures. *Paleoceanography* 9, 353-387.

Bibliografía

- Uriarte, A. 2003. Historia del clima de la Tierra. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306pp.

<http://homepage.mac.com/uriarte/>