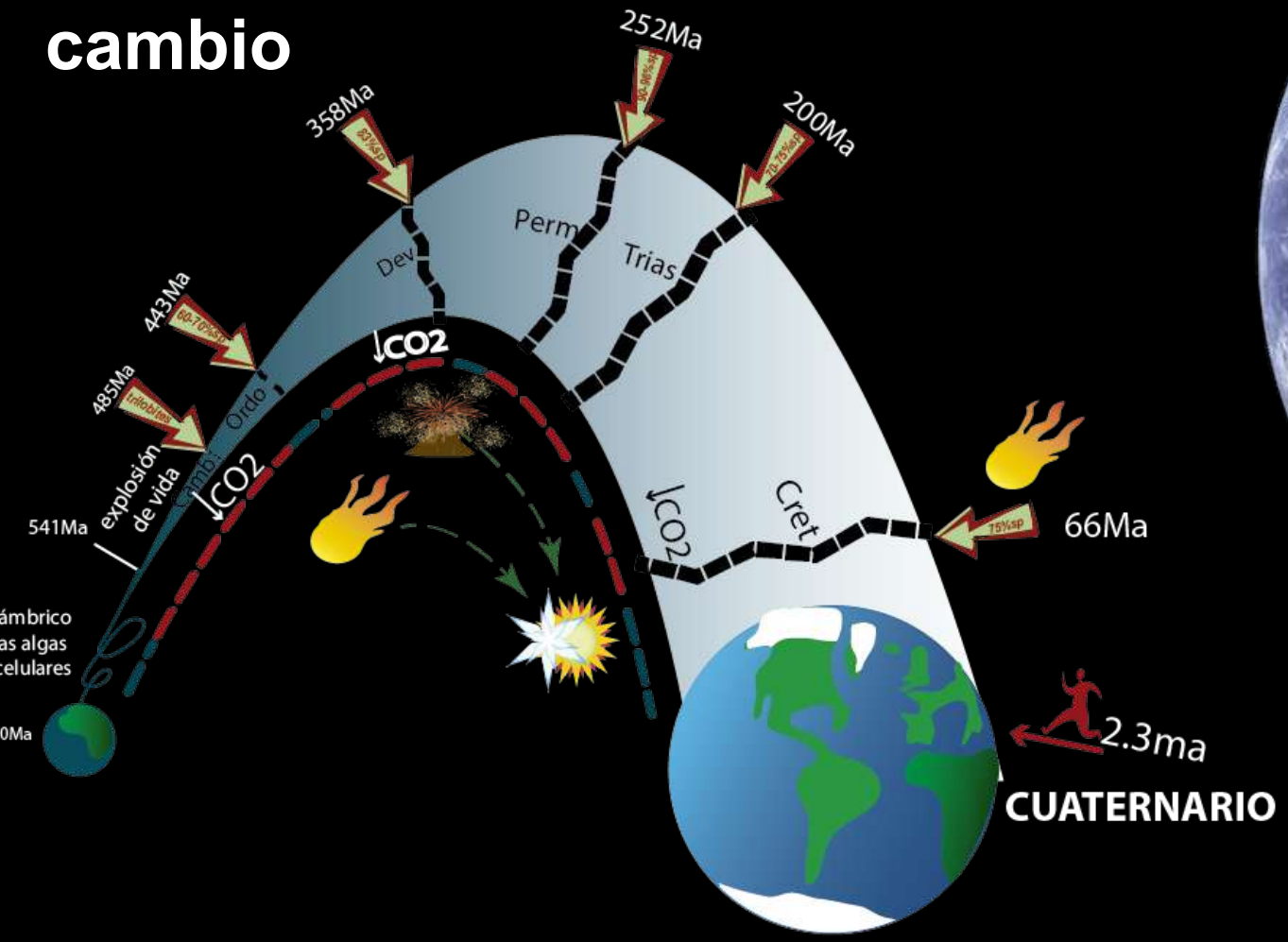
Causas de los cambios climáticos en la historia de la Tierra

Teresa Bardají

Universidad de Alcalá

l clima en el planeta Tierra

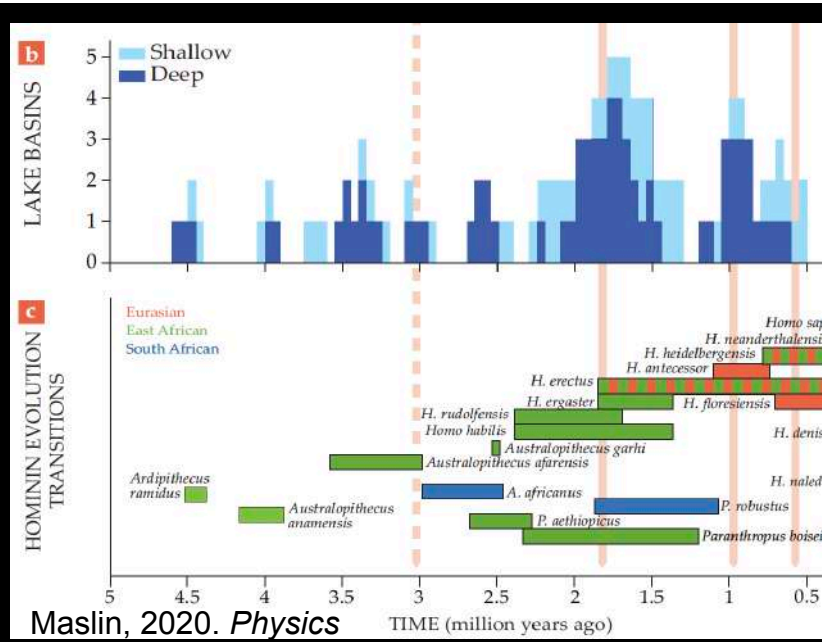
- 4500 Ma en constante **cambio**



La "*canica azul*", 7 Diciembre 1972, Apolo 17, N

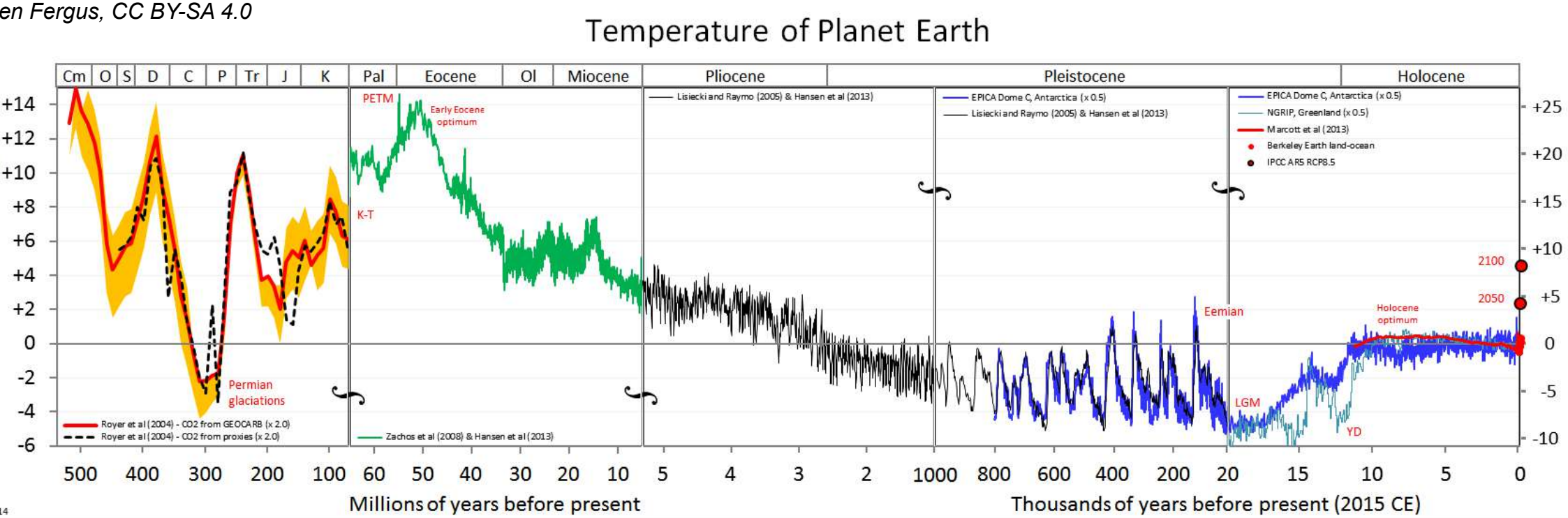
ambios climáticos en la Tierra

ambios de muy diferente escala temporal
egistros en hielo (150ka) → Cambios rápidos, decadales
Gr)
volución y migración del género *Homo* (C.C. África)
ambios en el estilo de vida (agricultura en Oriente medio,
eríodo cálido inicio del Holoceno)
ecadencia y colapso de importantes civilizaciones (valle
el Indo, 4300yBP; civilización Maya, s VIII-IX; Imperio



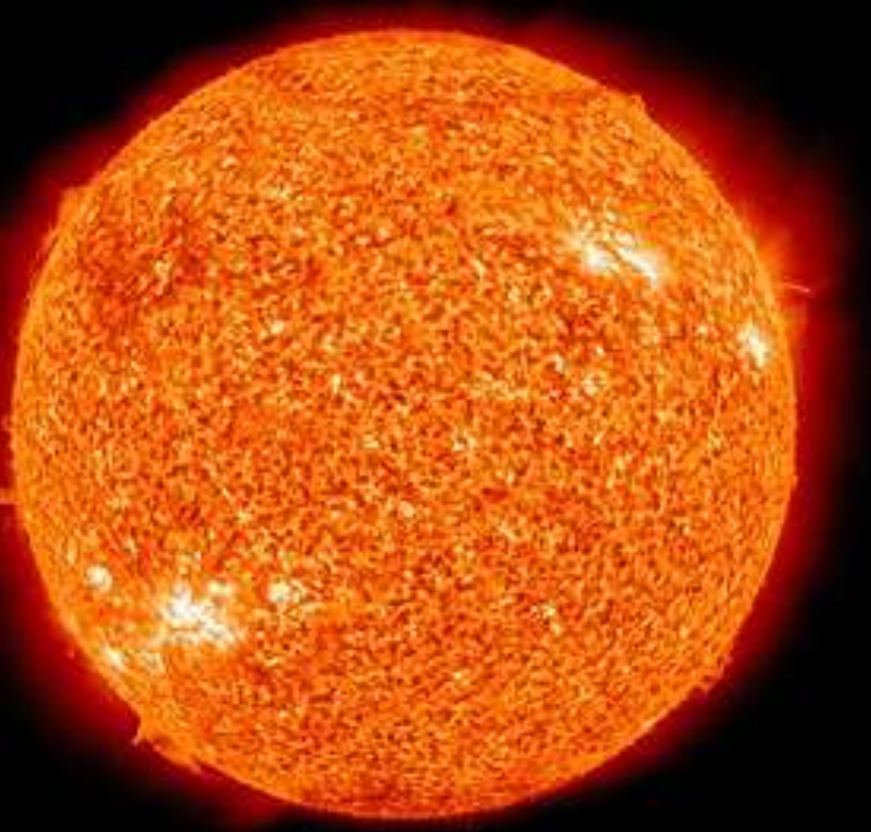
Maslin, 2020. *Physics*

en Fergus, CC BY-SA 4.0



clima en la Tierra

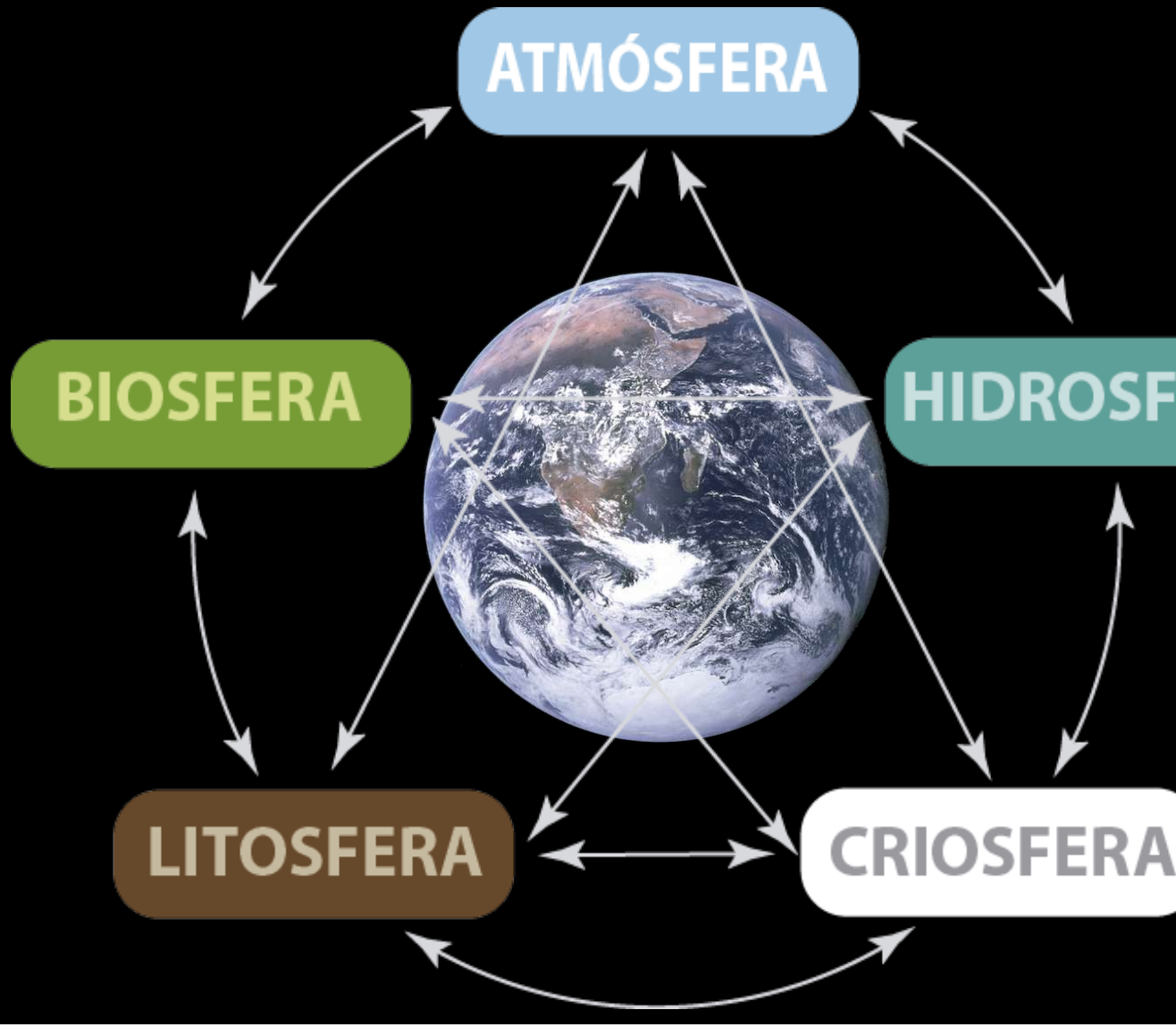
ndicionantes externos



Energía del **Sol**:

- Insolación recibida
- Energía emitida

Condicionantes internos



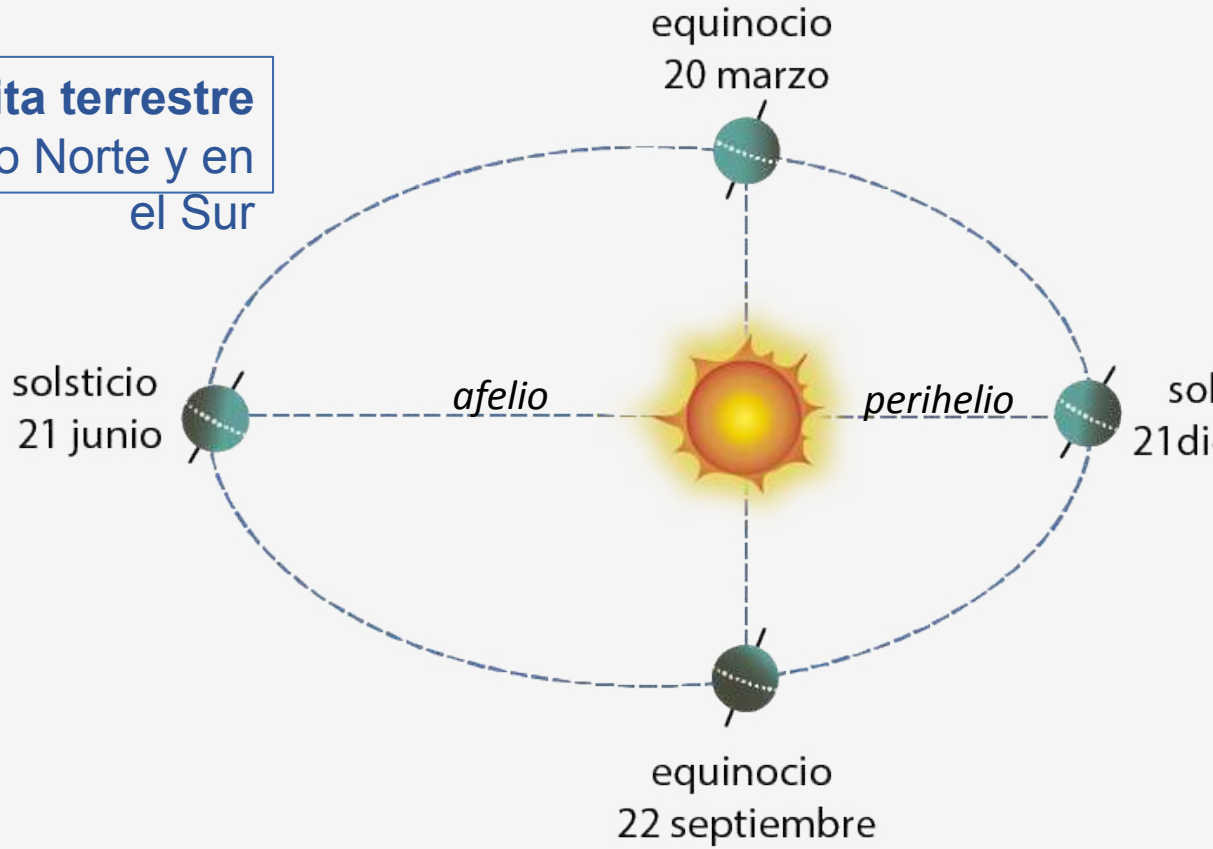
clima en la Tierra: condicionantes externos

olación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

Milutin **Milankovitch**, matemático y climatólogo serbio, 1941:
Alteraciones en la órbita de la Tierra cambian la distribución de la energía en la superficie de la Tierra,
períodos glaciales e interglaciales.
Latitud 65ºN → Insolación en verano no suficiente para fundir todo el hielo → Glaciación

Características de la órbita terrestre
Diferencias en la insolación en el Hemisferio Norte y en el Sur

rámetros Orbitales:
Excentricidad
Oblicuidad
Precesión axial
Precesión apsidal

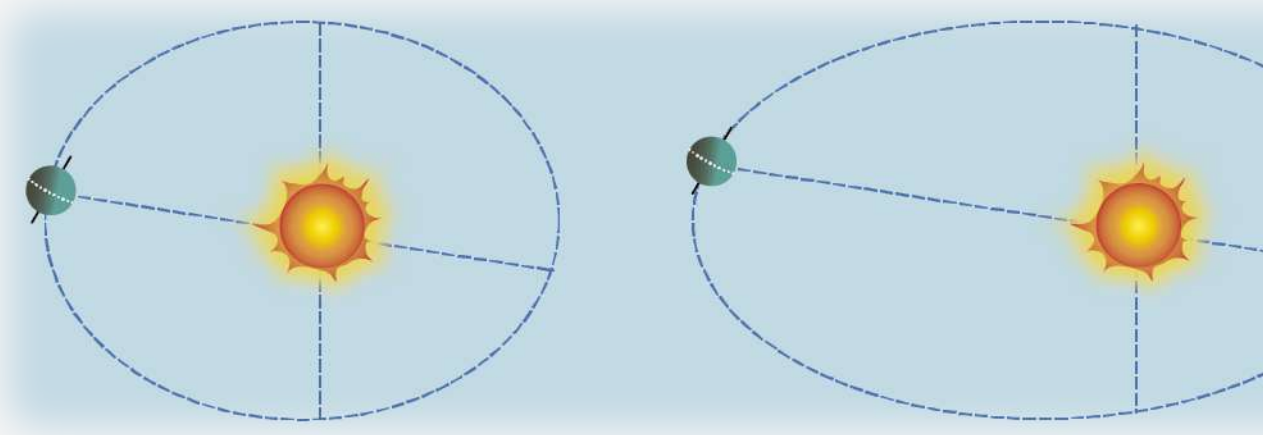


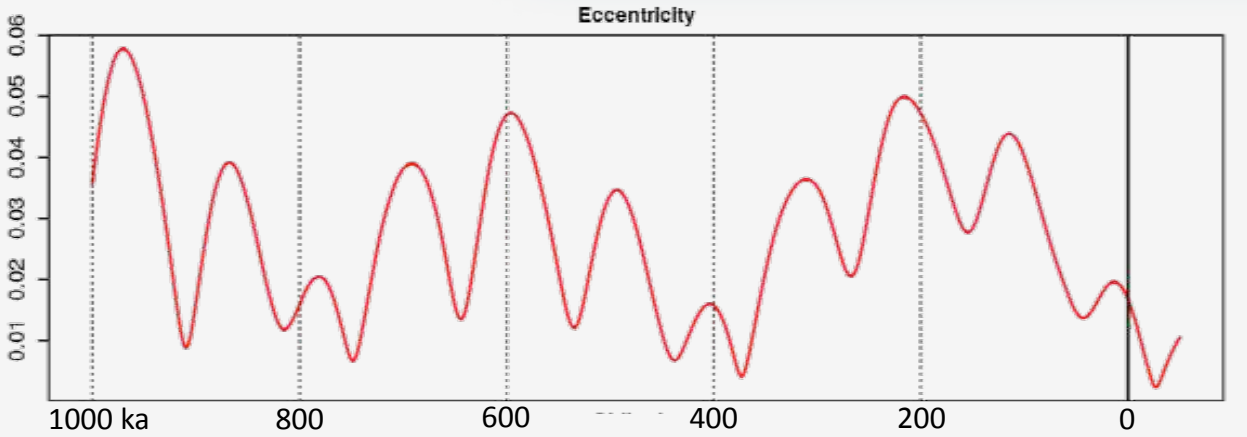
clima en la Tierra: condicionantes externos

olación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

metros Orbitales:
xcentricidad
blicuidad
recesión axial
recesión apsidal

ta terrestre es ligeramente elíptica.
entricidad varía gradual y
ódicamente según diferentes ciclos.
principales: **405ka** y **~100ka**

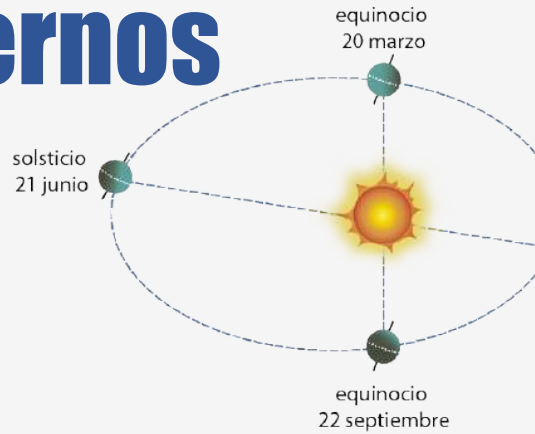




https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

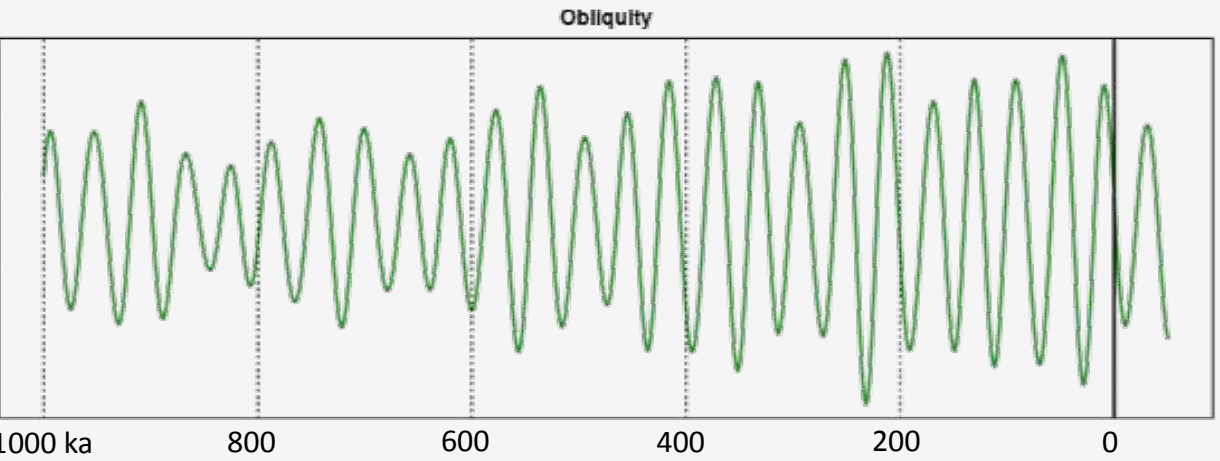
clima en la Tierra: condicionantes externos

olación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

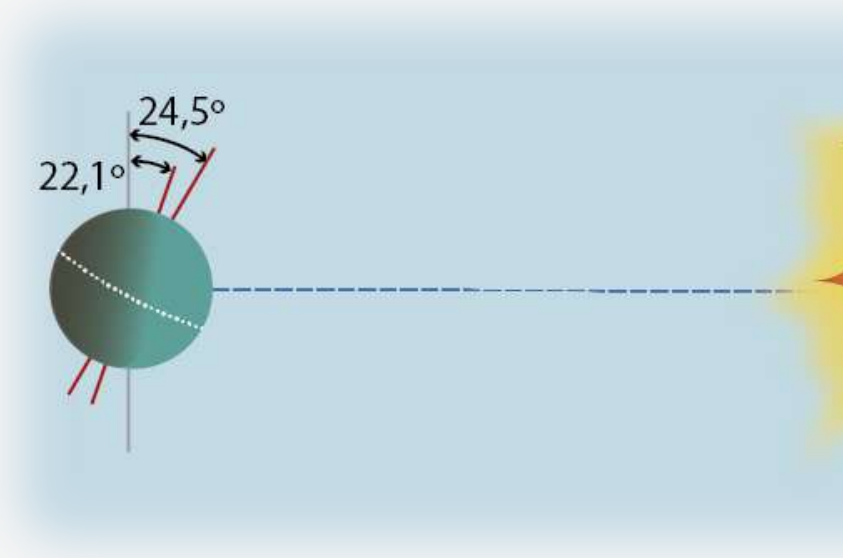


metros Orbitales:
xcentricidad
blicuidad
recesión axial
recesión apsidal

Ángulo que forma el plano ecuatorial de la Tierra con la elíptica
Ciclo principal de **41.000 años**



tps://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

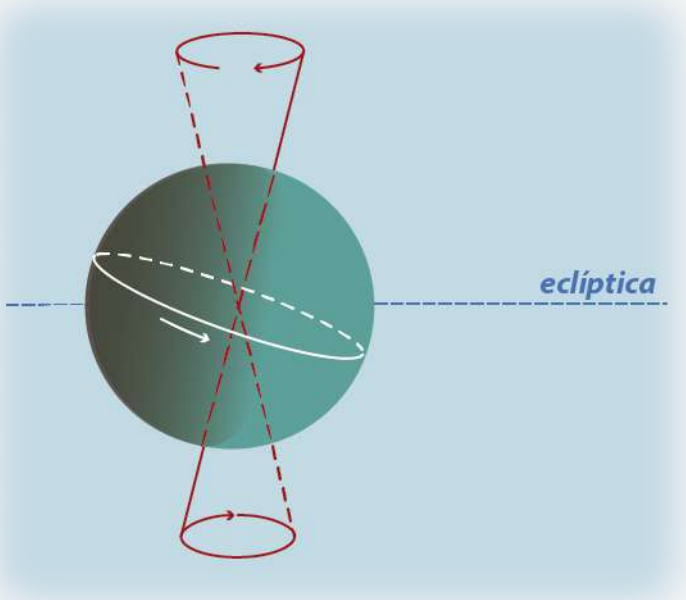


clima en la Tierra: condicionantes externos

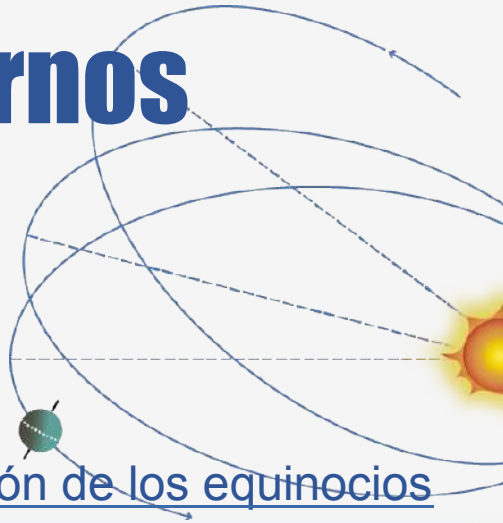
olación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

metros Orbitales:
xcentricidad
blicuidad
recesión

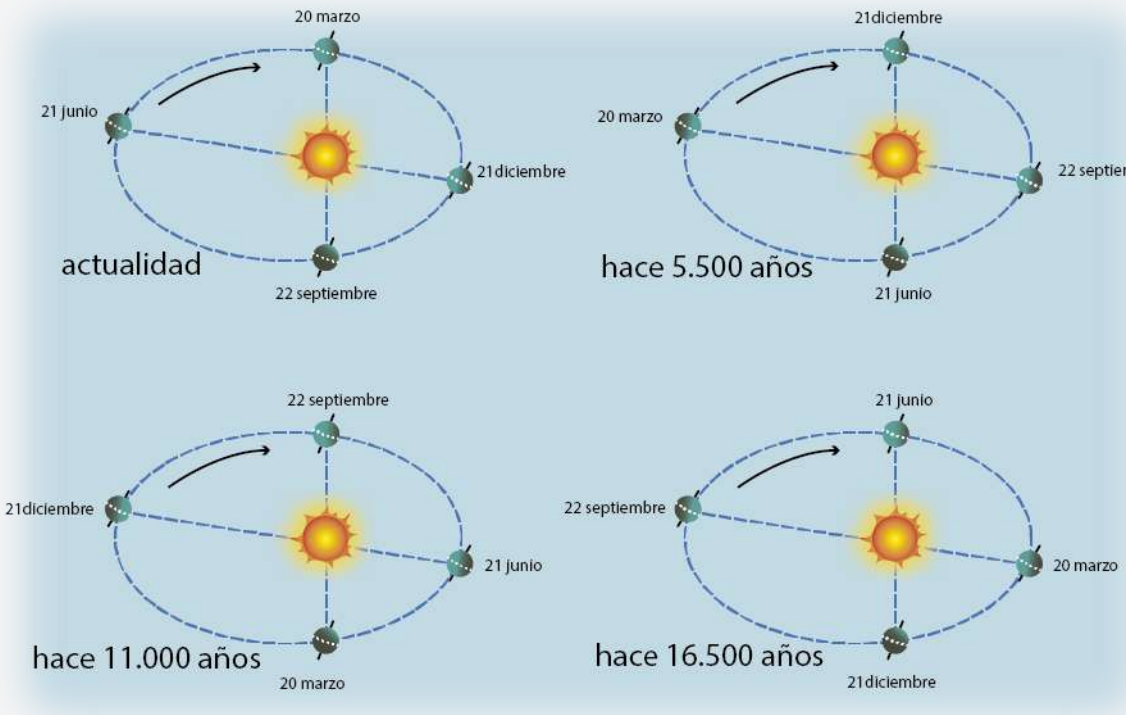
- Precesión axial



Rotación gradual de la línea que conecta los ábsides de la órbita



- Precesión apsidal. Precesión de los equinocios

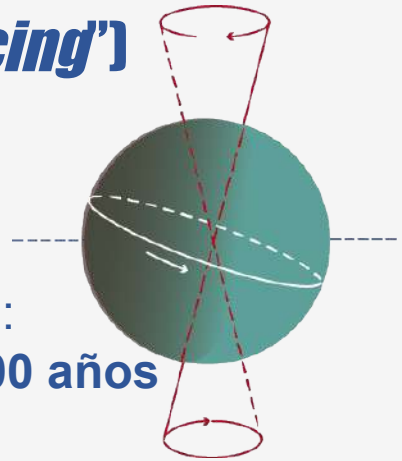


Rotación gradual de los equinoccios (mod. Martín Chivelet et al., 2015)

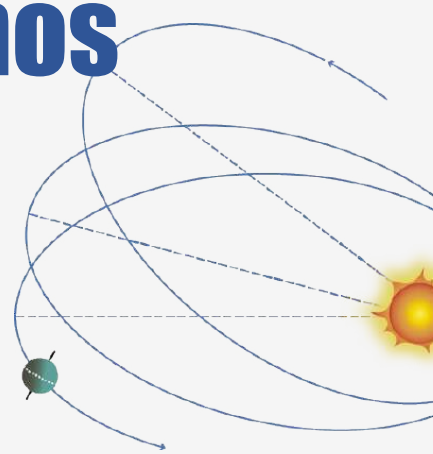
clima en la Tierra: condicionantes externos

olación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

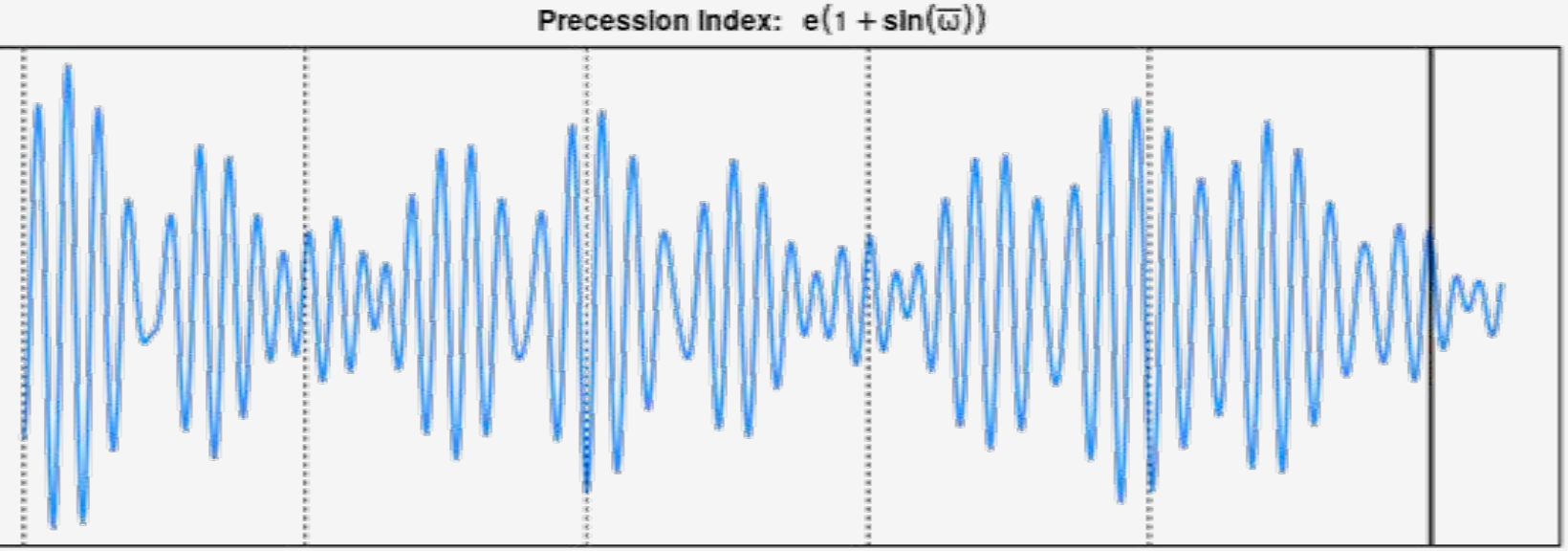
metros Orbitales:
xcentricidad
blicuidad
recesión axial
recesión apsidal o precesión de los
quinocios



Precesión axial:
Ciclos de **26.000 años**



Precesión apsidal:
Ciclos de **112.000 aí**



00 ka 800 600 400 200 0

s://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

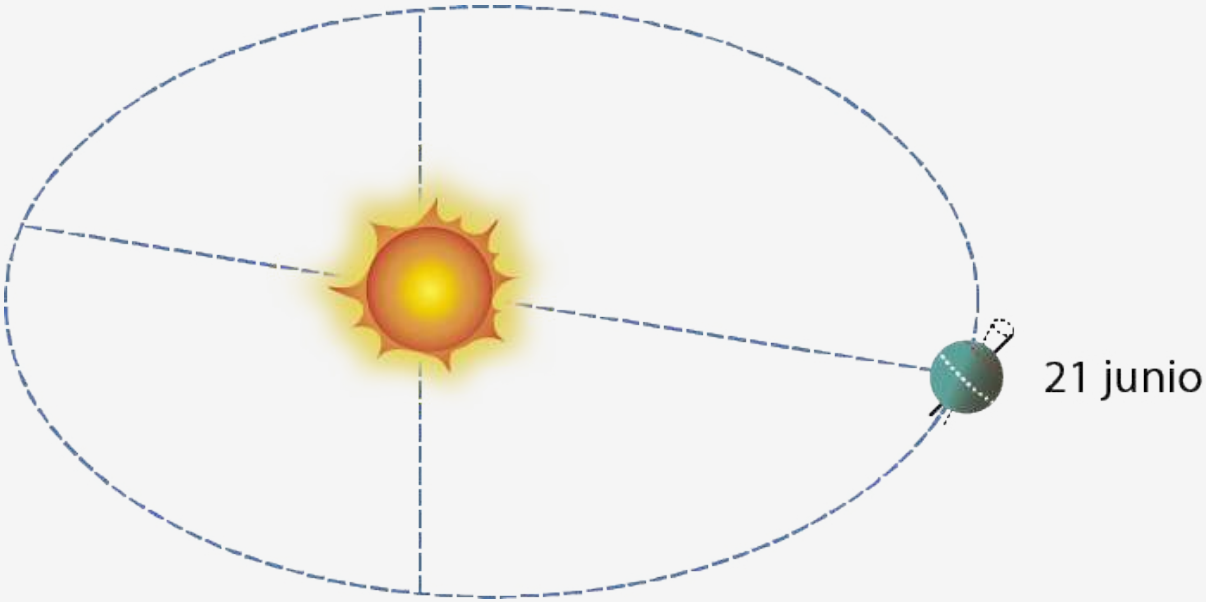
La combinación de ambos c
lugar a la precesión de los
equinocios, período de entr
21.000 y 23.000años

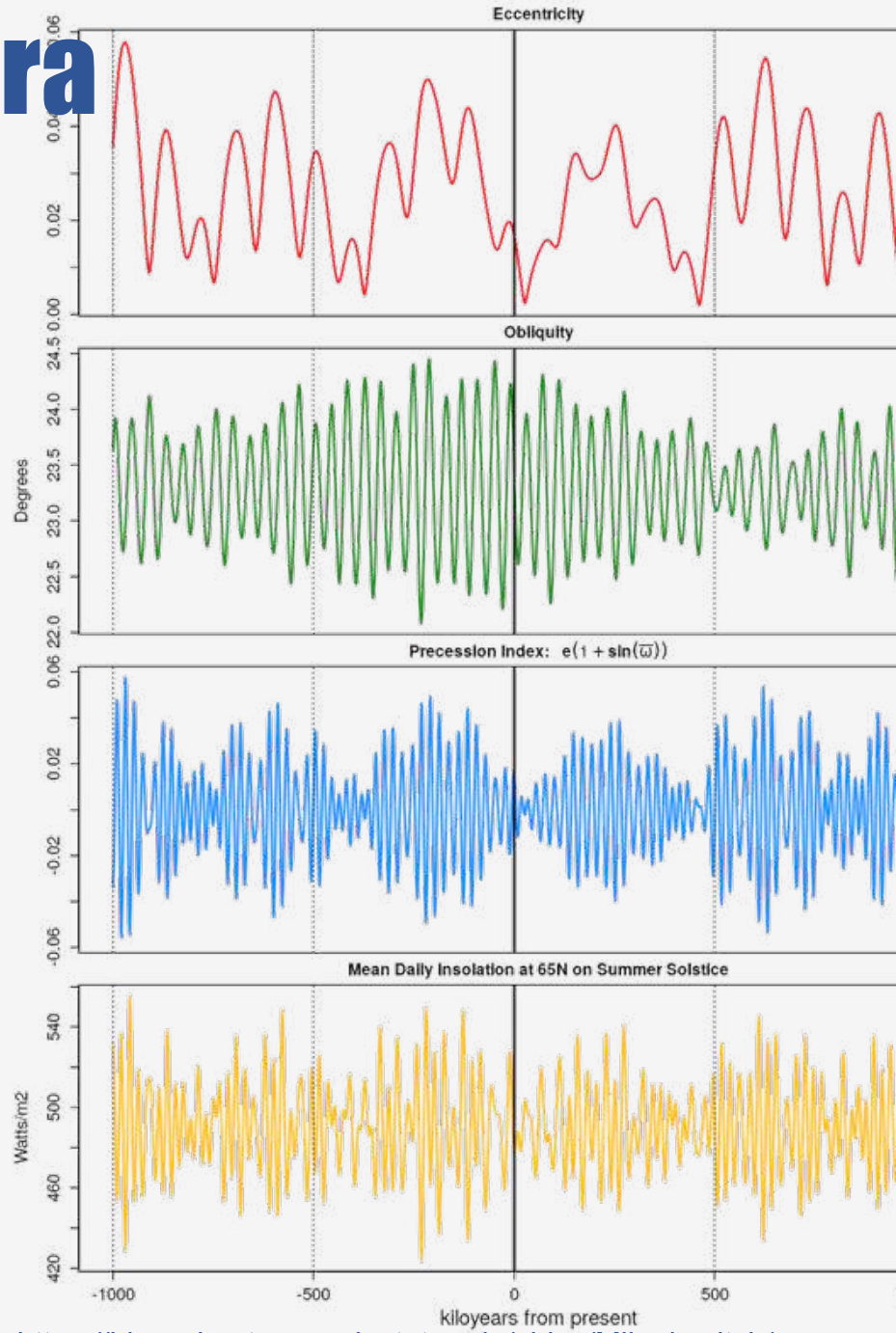
ambios climáticos en la Tierra

olación recibida → Forzamiento orbital

ombinación de todos estos ciclos condiciona la cantidad
adiación recibida (**insolación**) en una latitud dada.

va de insolación presenta un patrón complejo.
odos en los que los tres parámetros se suman
→ máxima insolación
odos en los que la insolación es mínima → glaciación

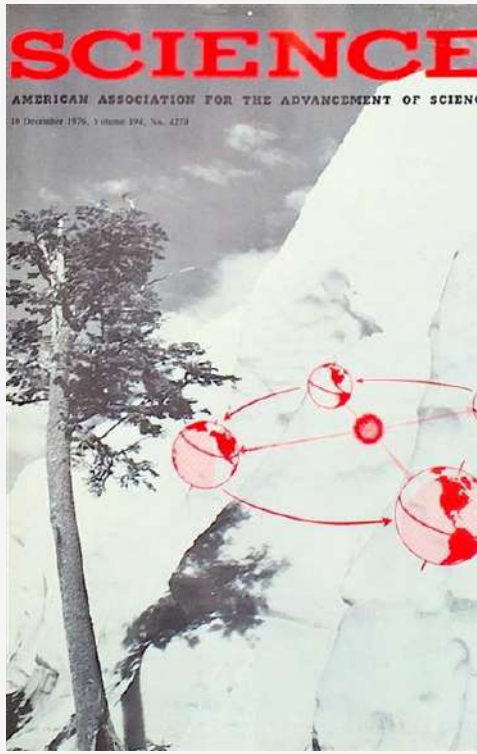




https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

ambios climáticos en la Tierra

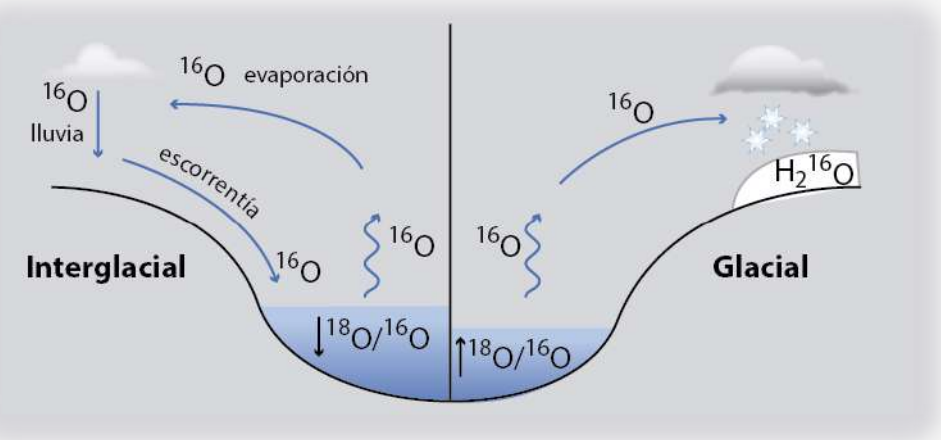
olación recibida → Forzamiento orbital
istro de estas variaciones

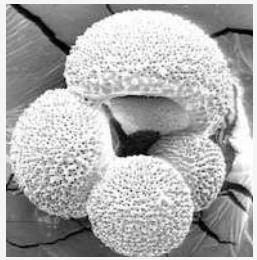


Hays, J. Imbrie & N.J. Shackleton (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages (The Milankovitch theory validation).

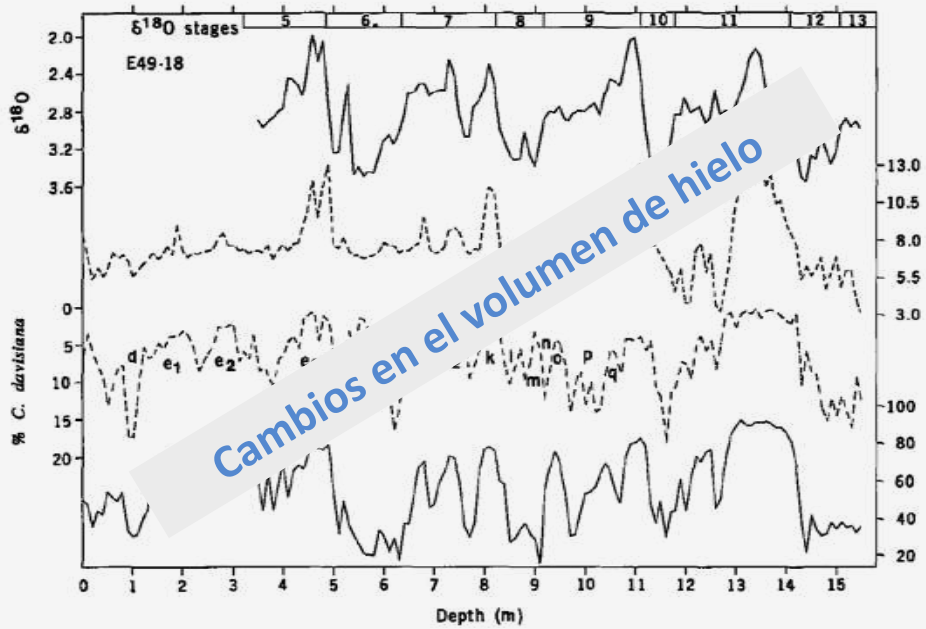
irmación de que las variaciones en la órbita terrestre son la causa amental de la sucesión de las glaciaciones en el Pleistoceno superior

sondeos oceánicos profundos; tres parámetros (zooplancton) ticamente sensibles (**$\delta^{18}O$** en *Globigerina bulloides*; Ts según sis estadísticos de asociaciones de radiolarios; % de *Cycladophora iana*, radiolario no utilizado para Ts); últimos 500 ka





G. bulloides
NOAA reports



ambios climáticos en la Tierra

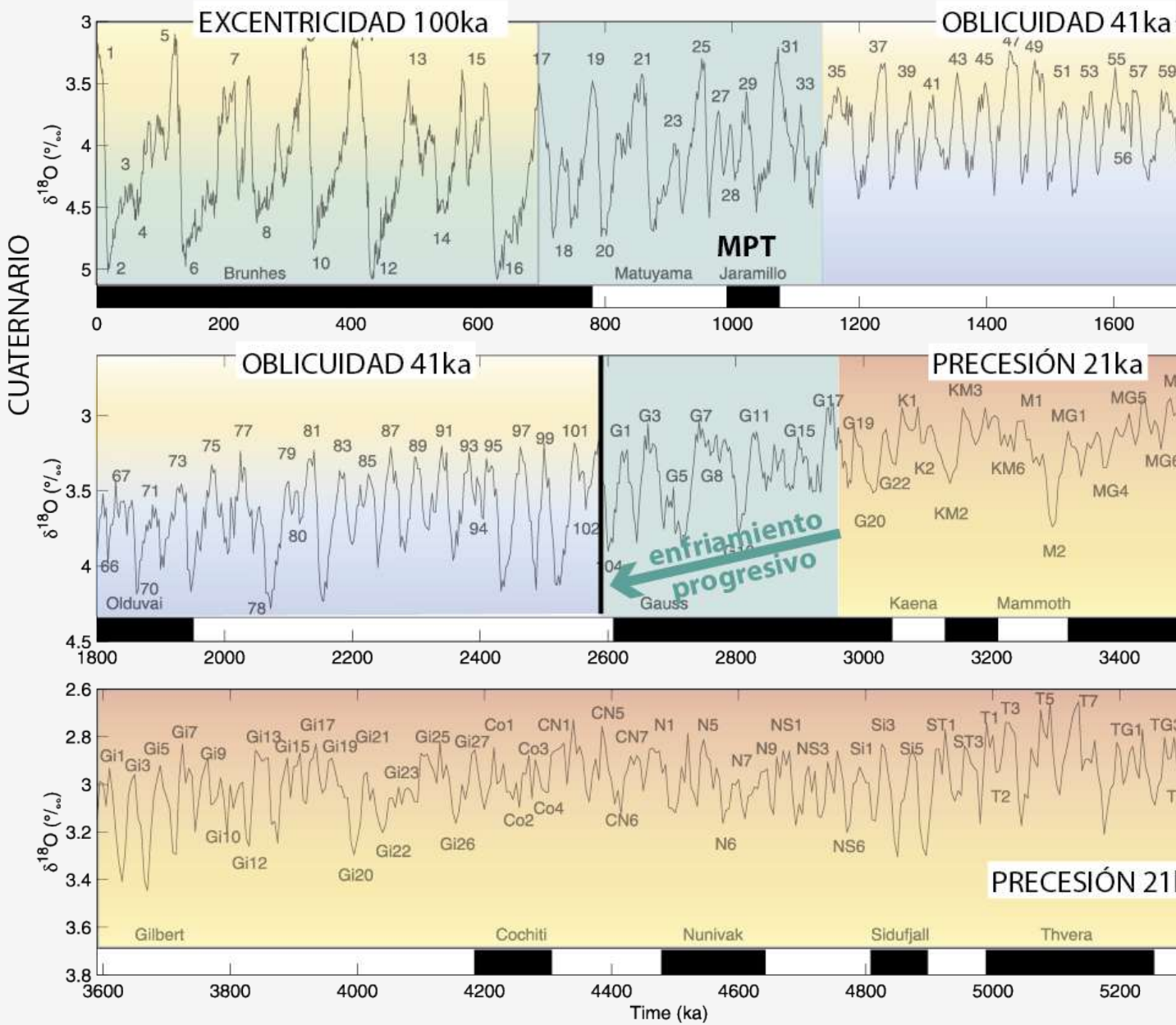
mos 5 Ma: forzamiento orbital

ioceno. Ciclos climáticos irregulares
on predominio de la precesión,
21-23ka
lima en la Tierra es muy **cálido**

ránsito al Cuaternario →
nfriamiento
e superponen los ciclos de 41ka

leistoceno inferior. Alternancia
eríodos glaciales e interglaciales
Predominio de la oblicuidad, **41ka**

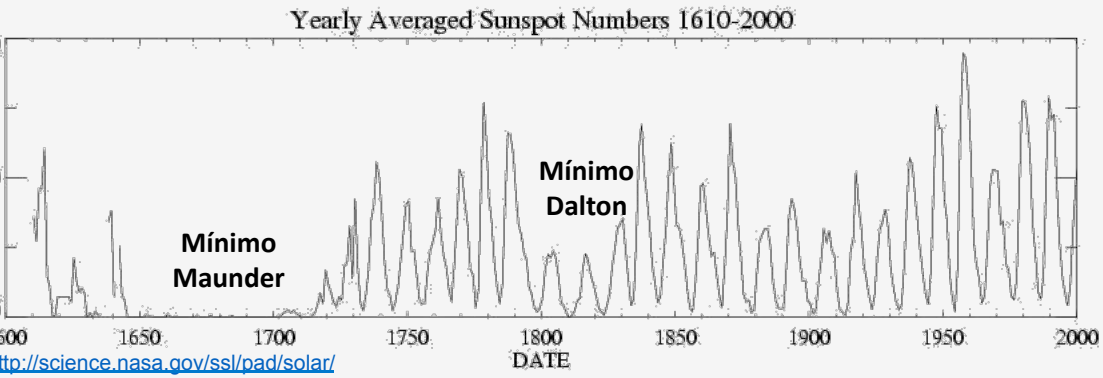
ransición del Pleistoceno Medio
MPT). Cambio hacia una ciclicidad
ominada por la excentricidad, 100ka.
laciaciones extremas,
eglaciaciones abruptas



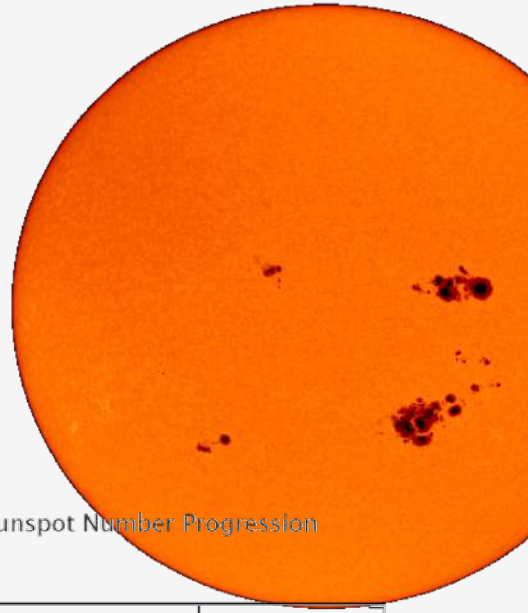
Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleoceanograph

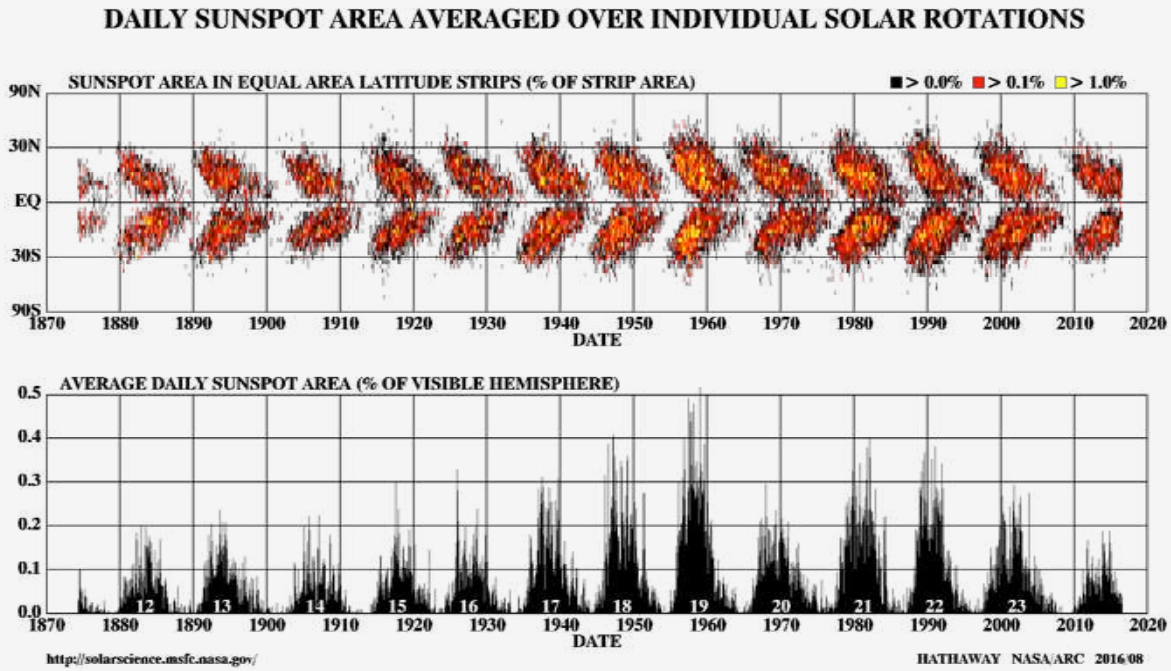
clima en la Tierra: condicionantes externos

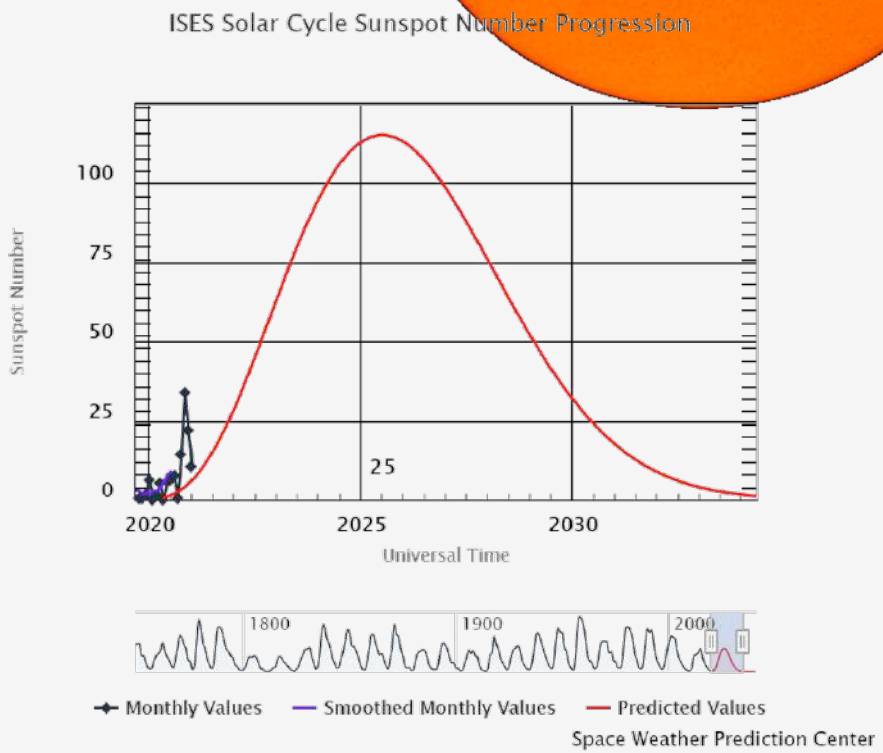
nbios en la actividad solar (Irradiación).



Ciclos de menor escala temporal: **11** y 100 (87) años



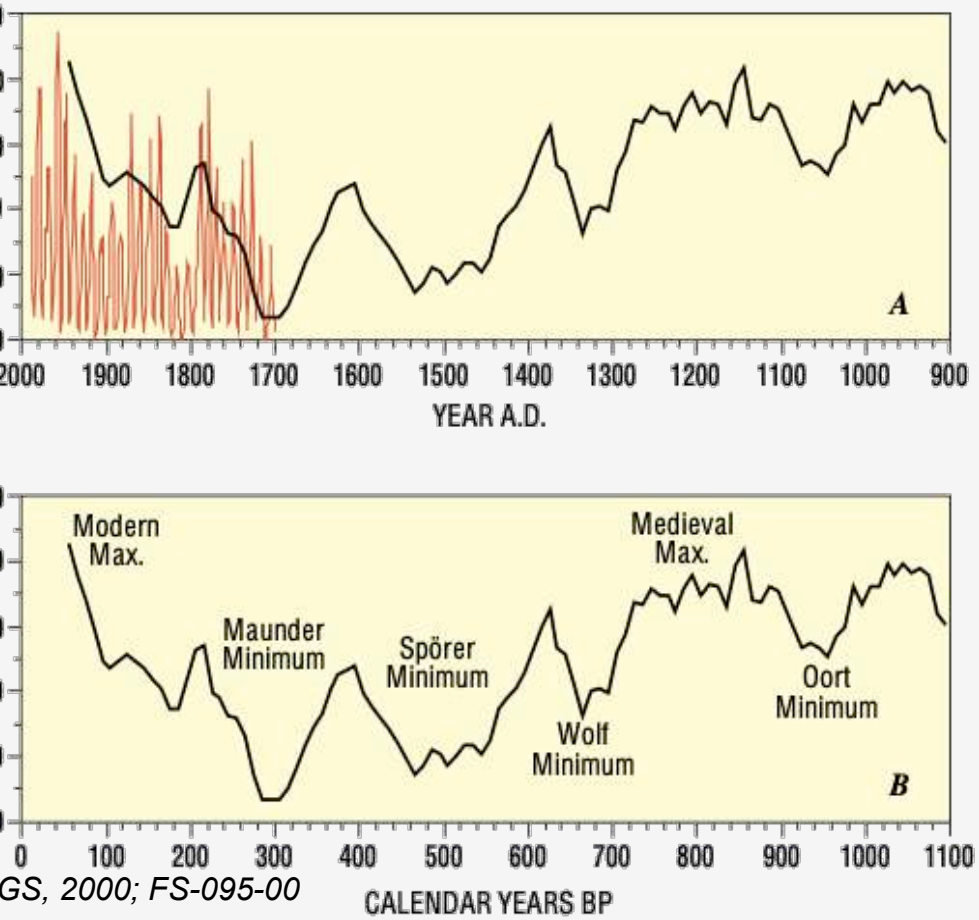




NOAA, Public domain, via Wikimedia Commons

clima en la Tierra: condicionantes externos

nbios en la actividad solar (irradiación).

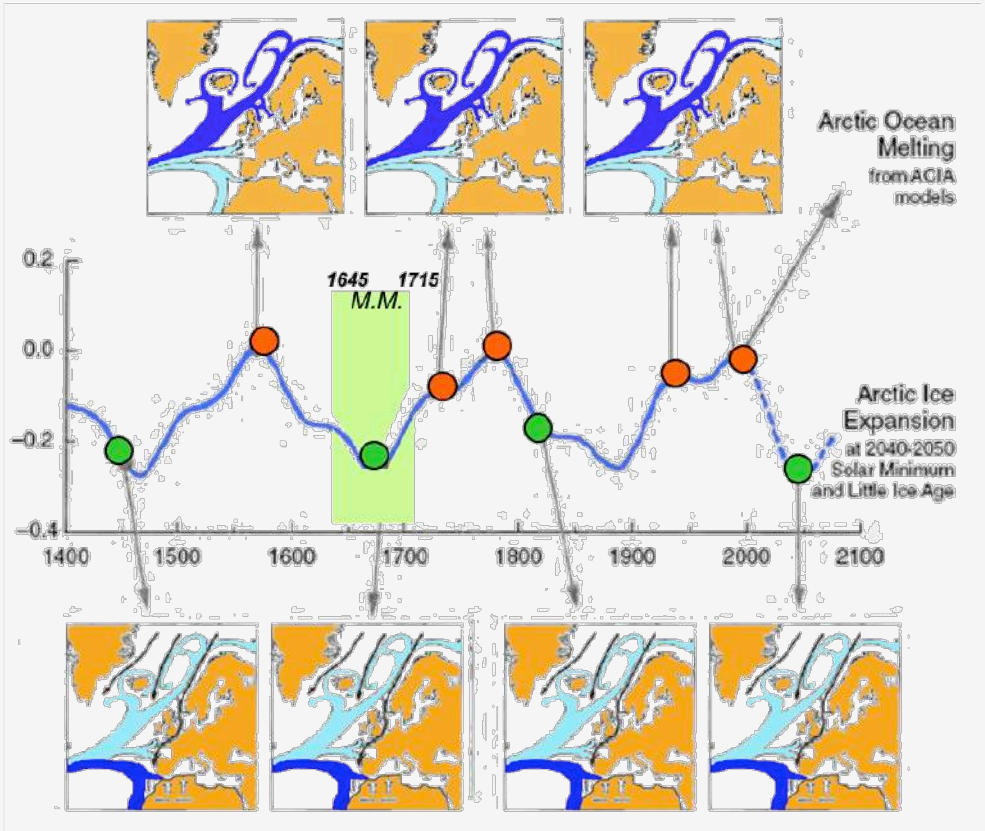


GS, 2000; FS-095-00

Relación con el registro de manchas solares

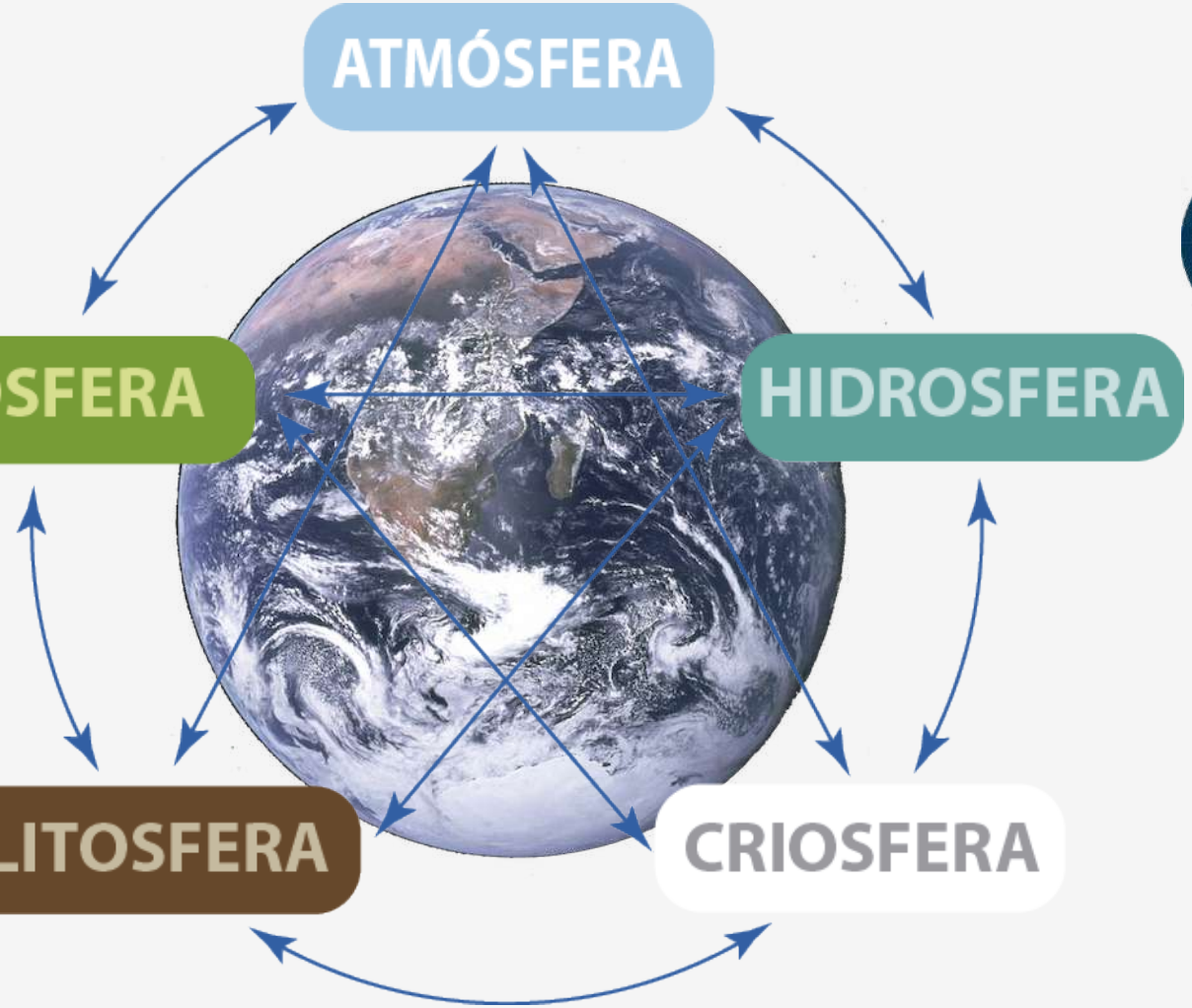
Cambios en la actividad solar (manchas, viento sola

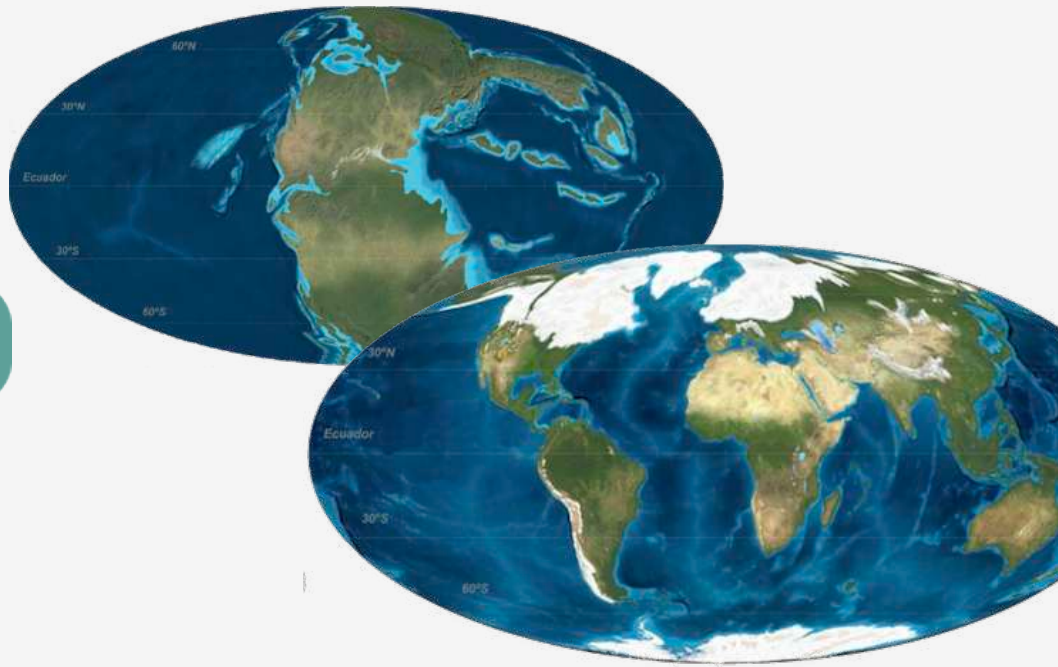
- Cambios en la producción de ^{14}C (bombardeo de con rayos cósmicos en capas altas de la atmósfe
  - > actividad solar < producción
- Ciclos de ~200 años



- Relación con la circulación oceánica (Mörner, 200

clima en la Tierra: condicionantes internos

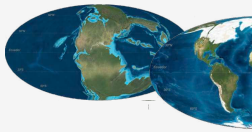




Distribución de las placas tectónicas:

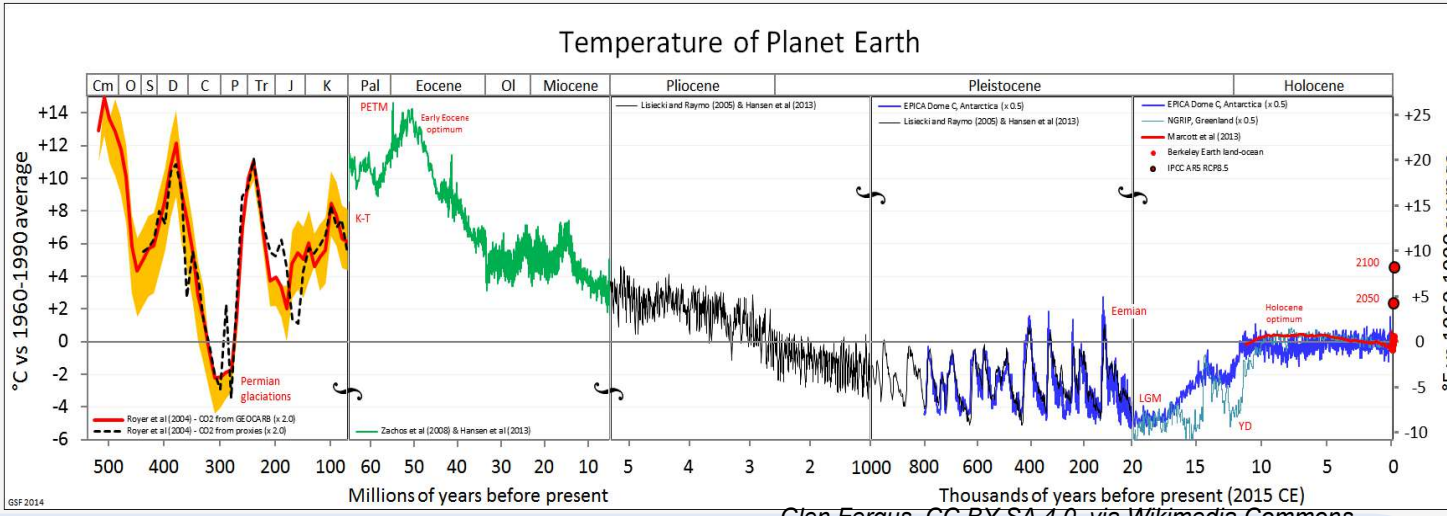
- Redistribución de la energía recibida

clima en la Tierra: condicionantes internos

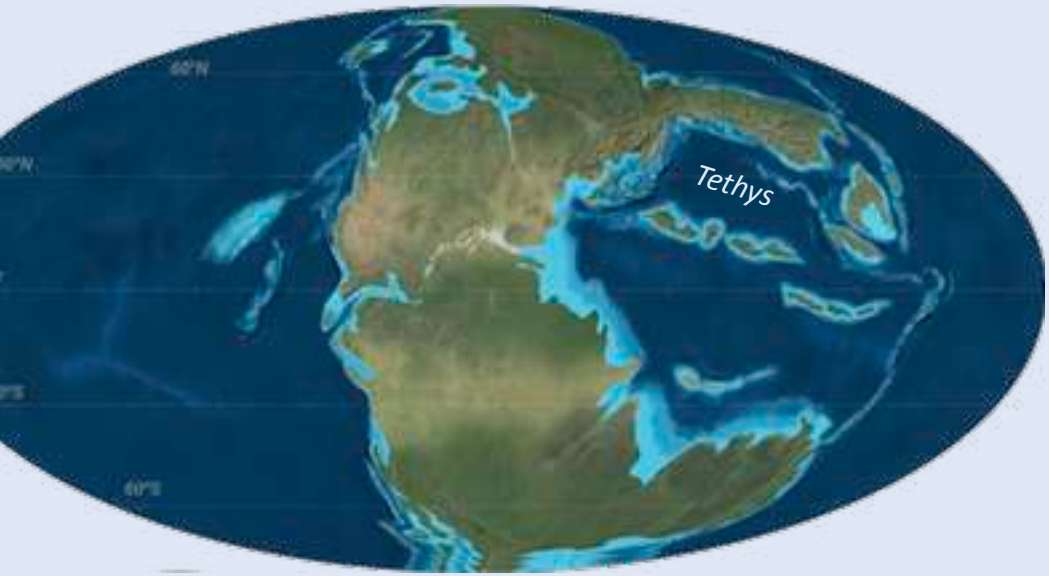


stribución de la energía recibida

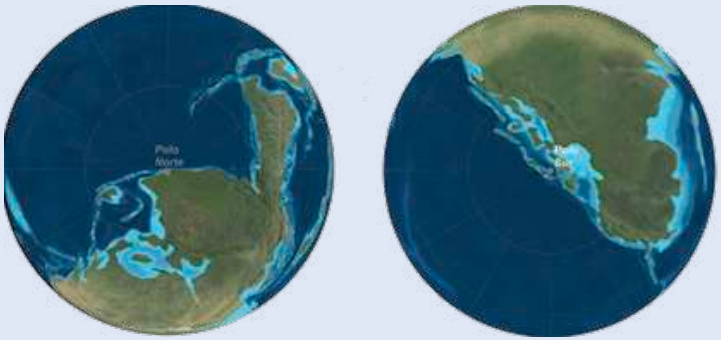
Distribución de las masas terrestres
Circulación oceánica
Circulación atmosférica
Glaciaciones uni- → bipolares



Glen Fergus, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons

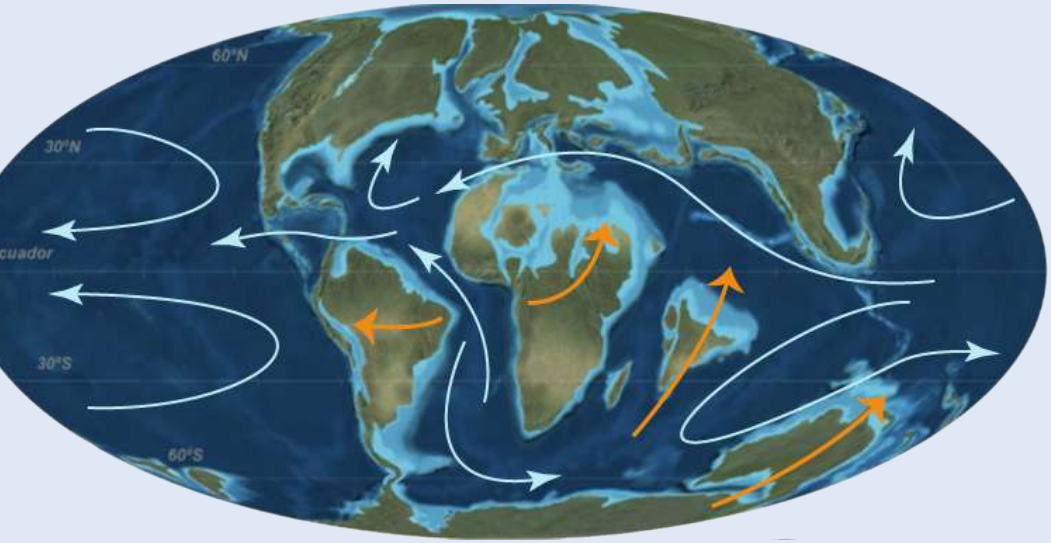


- Hace **200 Ma**
- Tierra emergida concentrada en una única masa continental → PANGEA

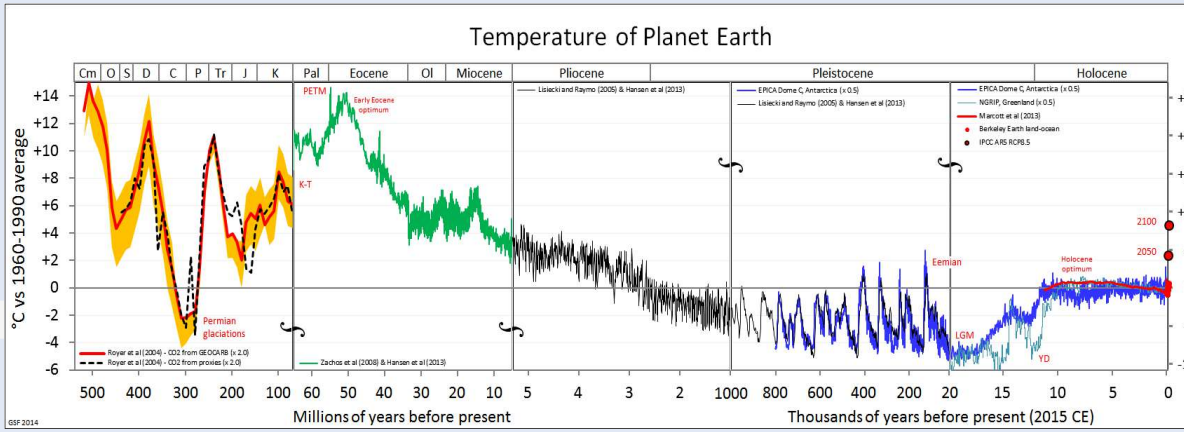


base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

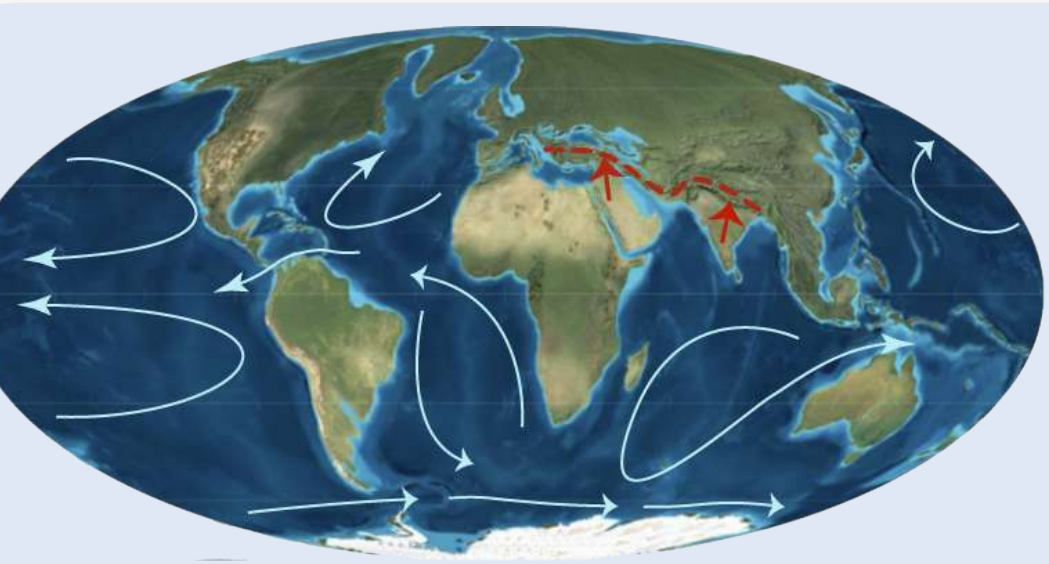
clima en la Tierra: condicionantes internos



- Hace **66 Ma** (final del Cretácico)
- Apertura del Atlántico
- Desplazamiento hacia el N de India y Australia
- Circulación ecuatorial



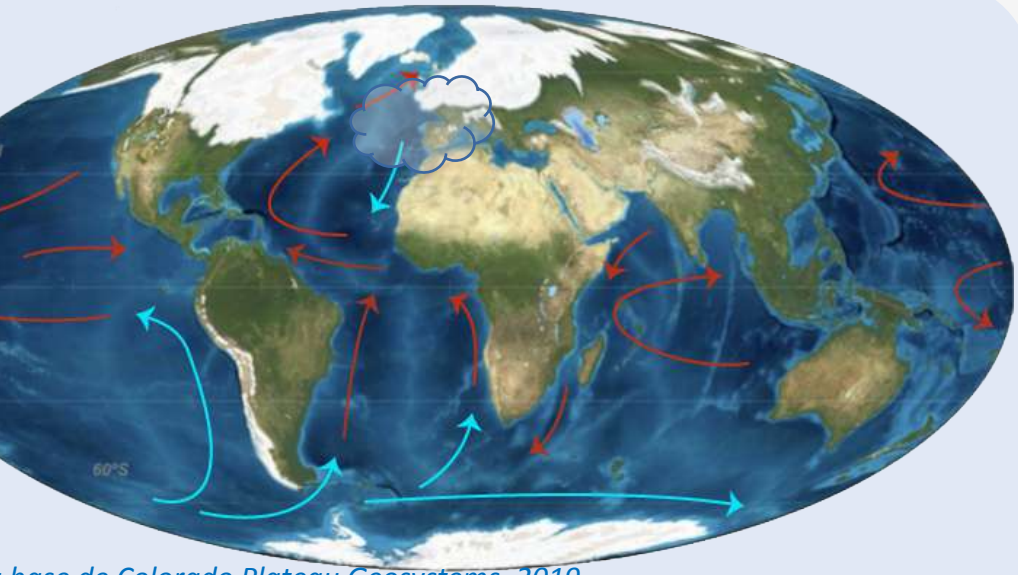
Glen Fergus, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons



- Entre **35-20 Ma**
- <u>Colisión de la India, elevación del Himalaya</u>
  - Intensificación monzones
  - Aumento masivo de alteración química
- Península arábiga migra hacia el N
  - Cierre del Tethys oriental
- Apertura Estrecho Drake → CCA
- Glaciación unipolar (Casquete HS, W Antártida)

base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

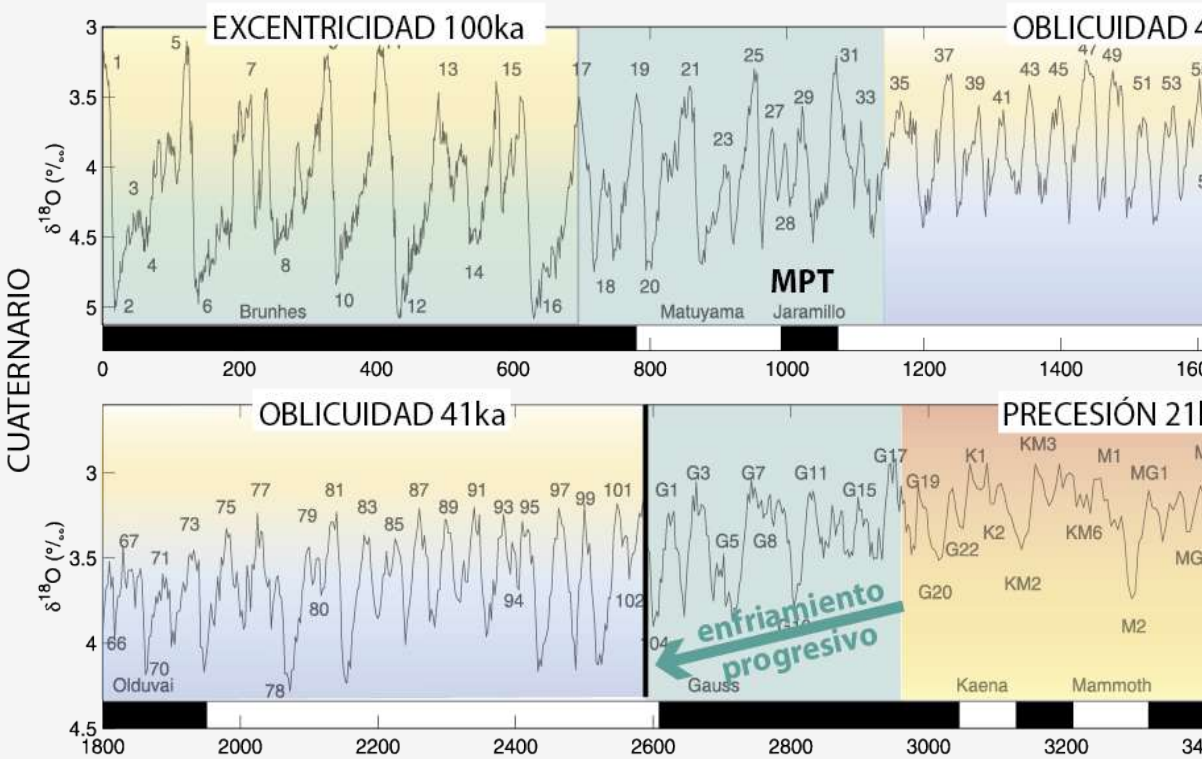
clima en la Tierra: condicionantes internos



base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

- **3 -2,6 Ma**
- Se cierra el **istmo de Panamá**
- Corriente cálida del Golfo circula hacia el N
- >Evaporación
- >Precipitación en forma de nieve
- > Albedo
- > amplitud ciclos oblicuidad → > estacionalidad

Completo desarrollo casquete polar HN
Glaciación bipolar



Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleocean

- **Elevación del Himalaya**: > exposición > alteración quí
- Carbonatación del agua de lluvia (CO_2 se elimina de la atmósfera). $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$
- HCO_3^- + Ca^{++}: metabolizados por plancton marino
- Reducción CO_2 atmosférico → enfriamiento

Causas alternancia Glacial-Interglacial ¿?

iclos Glacial - Interglacial

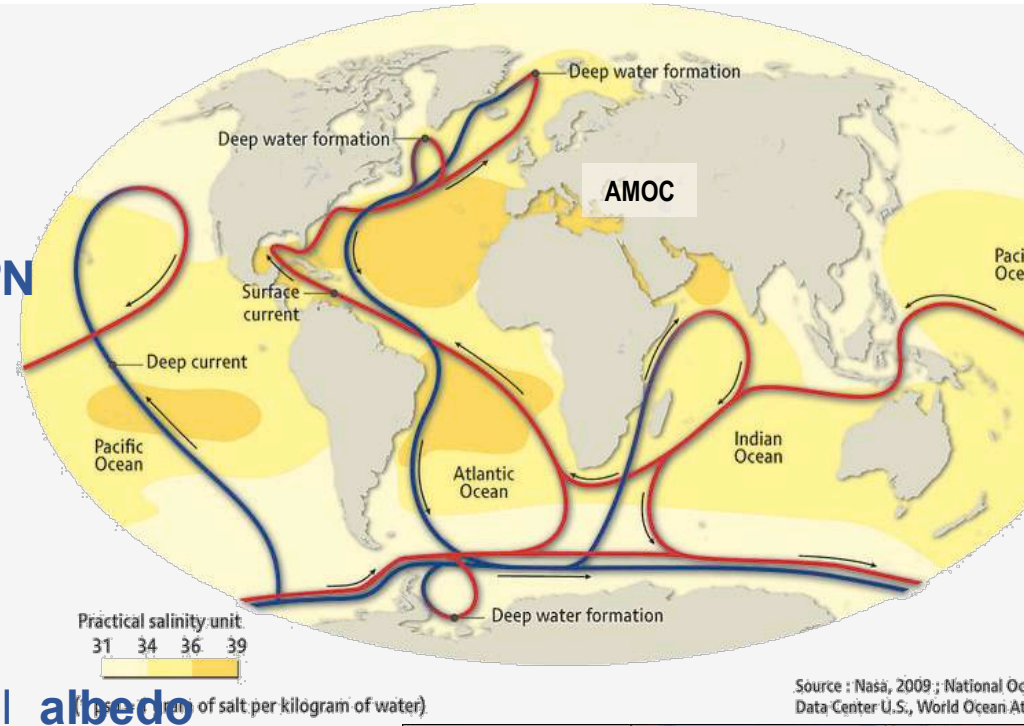
teracción Atmósfera – Hidrosfera – Criosfera

aciación/deglaciación → cambios en la insolación 65ºN

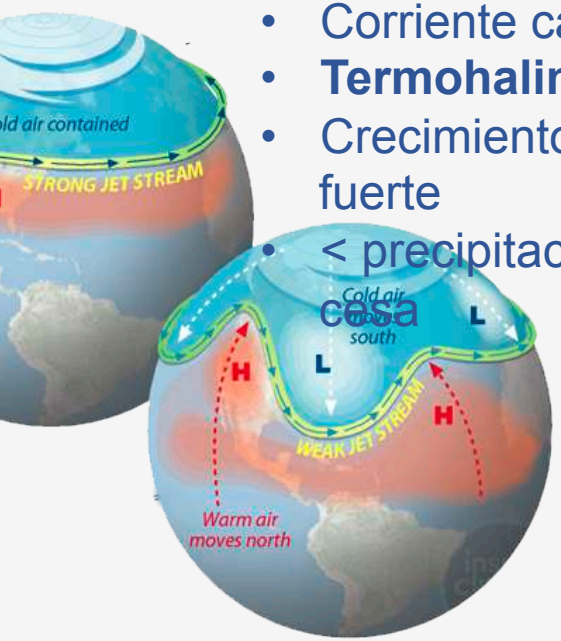
Cambios en los parámetros orbitales

↓

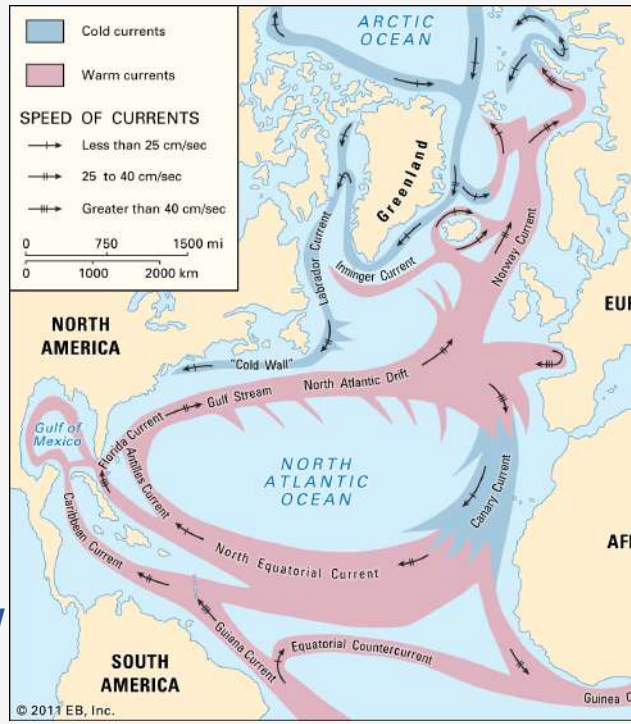
Mecanismos internos de respuesta. Retroalimentación



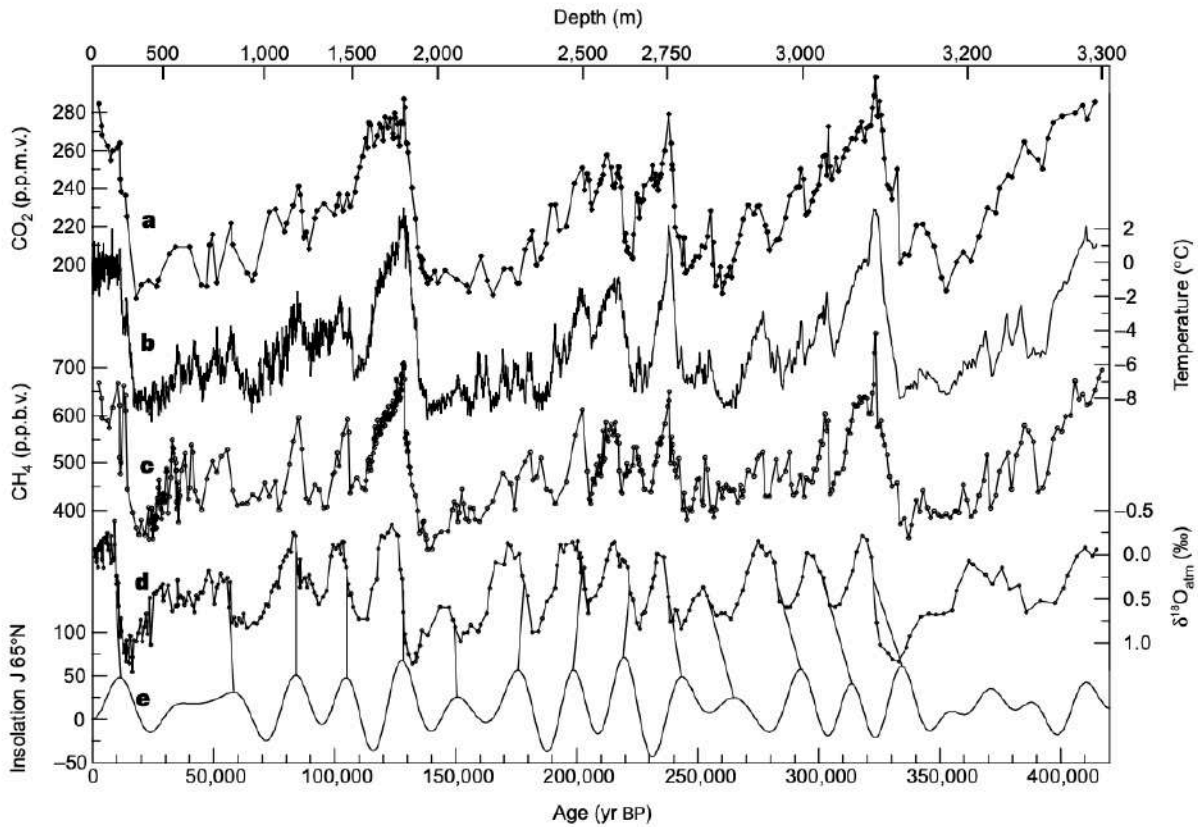
- Inicio glaciación → aumento progresivo del **albedo**
- Corriente cálida del Golfo no puede subir a latitudes altas
- **Termohalina** se frena. Reducción de NADW
- Crecimiento casquete polar HN → **Corriente del Chorro** fuerte
- < precipitación continuada de nieve → expansión hielo cesa
  - Deglaciación → mucho más rápida
  - Retroceso glaciar → disminuye el **albedo**
  - **Corriente del Chorro** sinuosa
  - Se reactiva la Circulación superficial (C. del Golfo)
  - **Termohalina** se activa. Formación de NADW



nsideClimate (Source: cient.Am.)



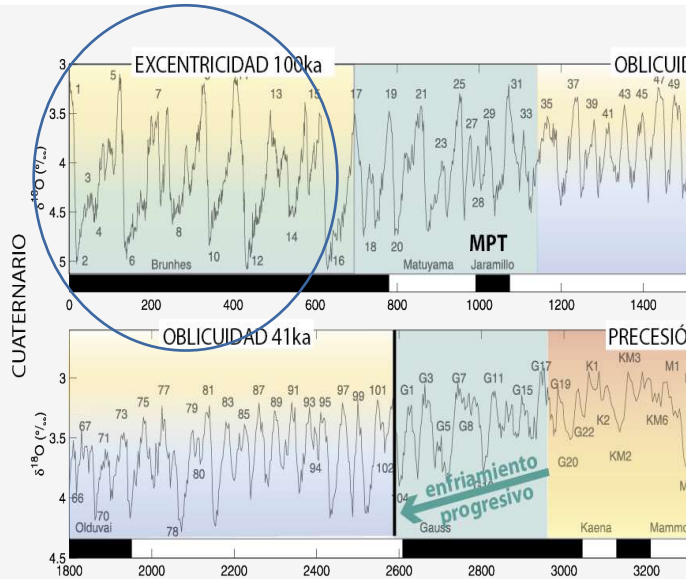
ltimos 400 ka



e 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 cale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the xis) of: **a**, CO_2; **b**, isotopic temperature of the atmosphere (see text); **c**, CH_4; O_{atm}; and **e**, mid-June insolation at 65° N (in $W m^{-2}$) (ref. 3). CO_2 and CH_4 urements have been performed using the methods and analytical pro- res previously described[5,6]. However, the CO_2 measuring system has been ly modified in order to increase the sensitivity of the CO_2 detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO_2 after its transformation into CH_4. The mean resolution of the CO_2 (CH_4) profile is about 1,500 (950) years. It goes up to about 6,000 years for CO_2 in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH_4 time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH_4 and CO_2 measurements are ±20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

t et al.

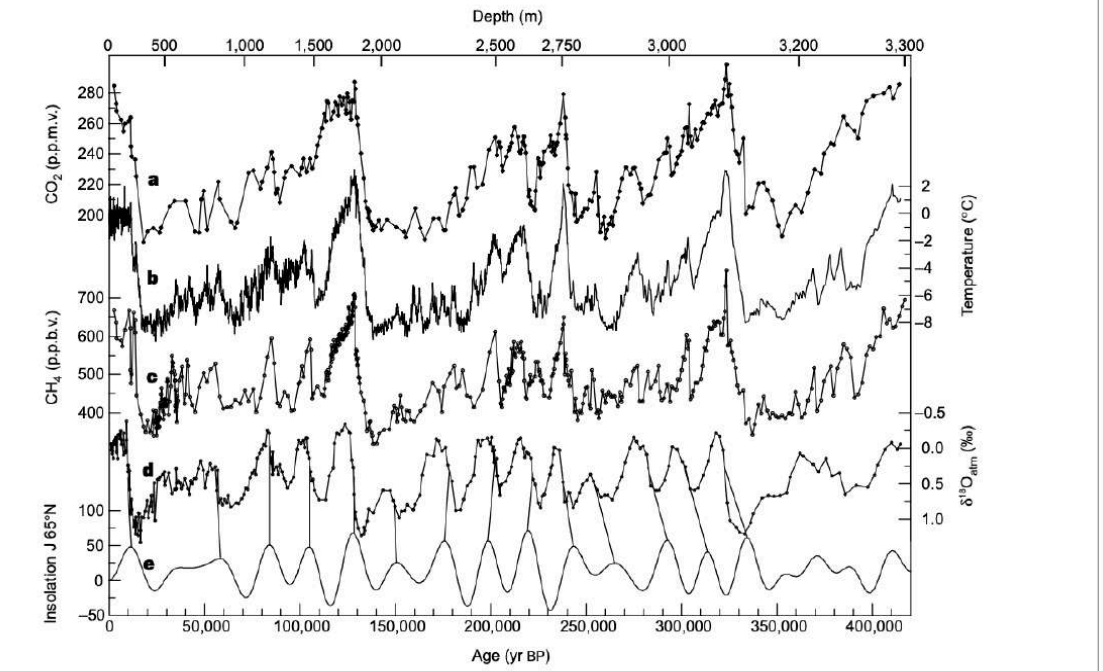
© 1999 Macmillan Magazines Ltd



Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleoce

- Sondeo de hielo en Vostok (Antártida)
- 400ka
- Similar patrón de variación que sondeos oceánicos (cambios volumen de hielo)
- Cambios orbitales de Tª, **CO_2** y **CH_4**
- **CH_4**: ciclos de 23 ka
- ¿Causa o consecuencia?
- Cambios en la intensidad de lo monzones en latitudes bajas
- Fusión superficial del permafrost en latitudes altas

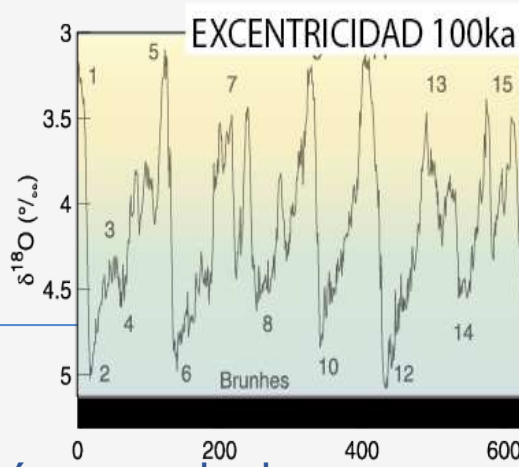
ltimos 400 ka



3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 le for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the) of: **a**, CO_2; **b**, isotopic temperature of the atmosphere (see text); **c**, CH_4; $_m$; and **e**, mid-June insolation at 65° N (in $W m^{-2}$) (ref. 3). CO_2 and CH_4 ements have been performed using the methods and analytical pro- previously described[5,6]. However, the CO_2 measuring system has been modified in order to increase the sensitivity of the CO_2 detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO_2 after its transformation into CH_4. The mean resolution of the CO_2 (CH_4) profile is about 1,500 (950) years. It goes up to about 6,000 years for CO_2 in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH_4 time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH_4 and CO_2 measurements are ±20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

et al.

© 1999 Macmillan Magazines Ltd



CO_2:

- Ciclos de 100ka
- Reducción 90ppm en épocas glaciares
- Relación **cambios volumen de hielo - CO_2 atmosférico**
- ¿cambios CO_2 → cambios volumen hielo?
- ¿cambios volumen hielo→ cambios CO_2?

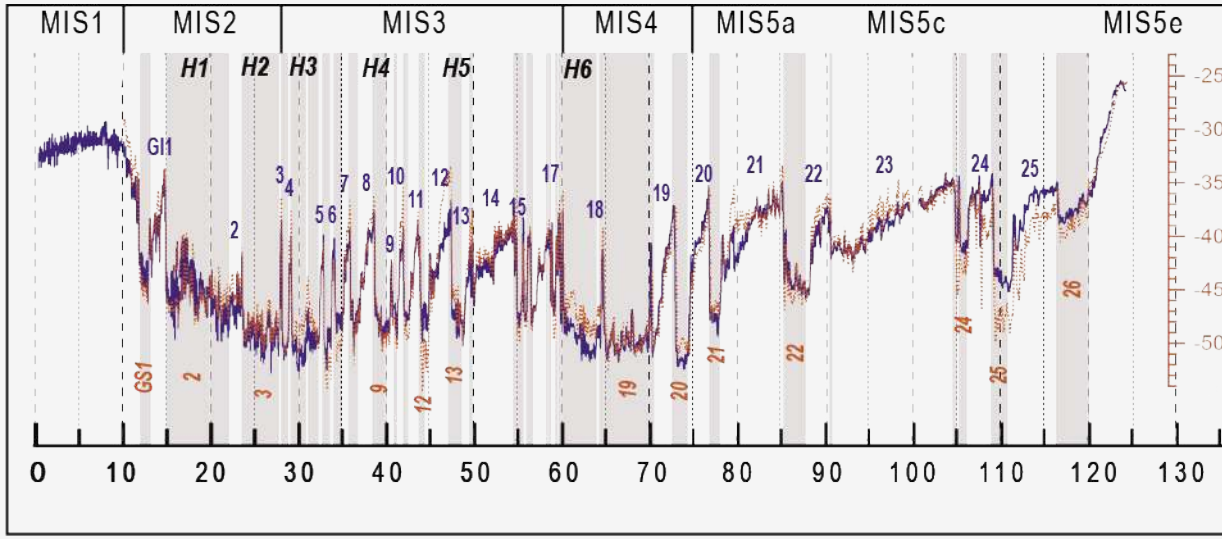
CAUSAS

- Reducción vegetación y suelos → NO suficiente
- Propiedades físicas de las aguas superficiales
  - Agua fría incorpora mejor el CO_2 (-22ppm)
  - Agua más salina dificulta la disolución CO2 (+11ppm)
- Redistribución bioquímica y química de océanos (-75ppm)
  - Zonas de *upwelling*
  - > productividad superficial
  - > fotosíntesis (fitoplancton)
  - Almacenamiento en océanos profundo

Ruddiman (2001) - Earth's Climate:

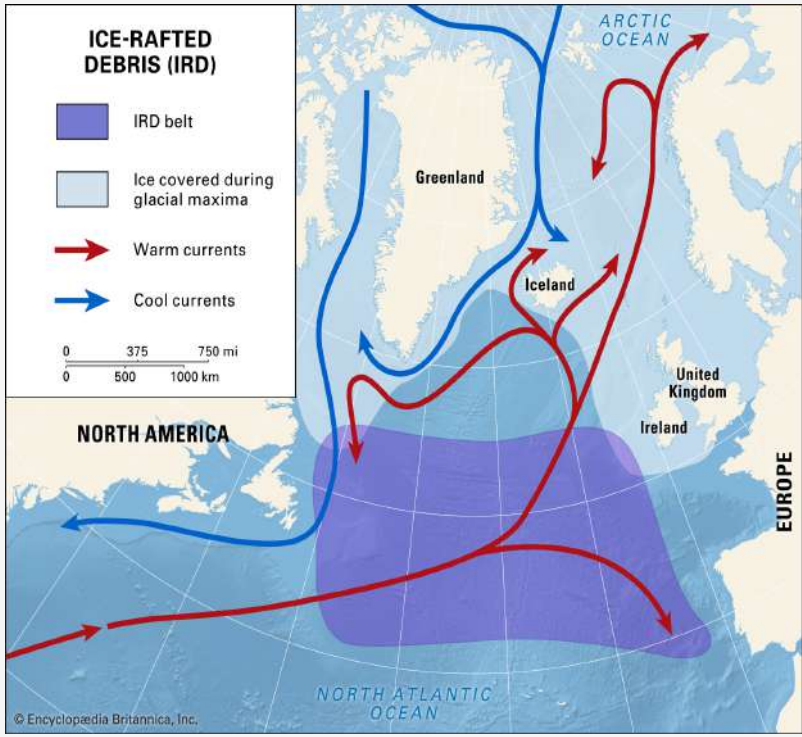
ltimos 100 ka

Atmósfera-Hidrosfera-Criosfera
Cambios climáticos muy rápidos
Escala milenaria



los Dansgaard – Oescher (1500±500 a)
Ciclos casi periódicos de menor amplitud y mayor frecuencia
25 ciclos (GI/GS)
Persisten en el Holoceno (Bond events)
Calentamiento muy rápido (décadas), enfriamiento un poco más gradual
Duración pocos siglos
ntos Heinrich (intervalos irregulares, 7200±2400

6 eventos registrados en el Atlántico Norte
40-55ºN)
Elevado % de sedimentos de grano grueso (IRD)
en sondeos oceánicos profundos; <%
oraminíferos
mportantes descargas de icebergs
nestabilidad climática glacial
3-6ºC menos
60 – 16,8 ka



https://www.britannica.com/science/Heinrich-event#/

timos 100 ka: Causas de los eventos Heinrich

dicionantes externos (Heinrich, 1988)

ariaciones orbitales menores

nfriamiento global o aumento de la humedad lativa

ápido crecimiento/expansión del casquete olar

estabilidad + descarga de icebergs

tabilidades internas (MacAyeal, 1993)

enor masa de hielo → menor descarga

alor geotérmico + calor por fricción base del hielo

slamiento por el propio hielo

umento de la temperatura de los sedimentos bglaciares

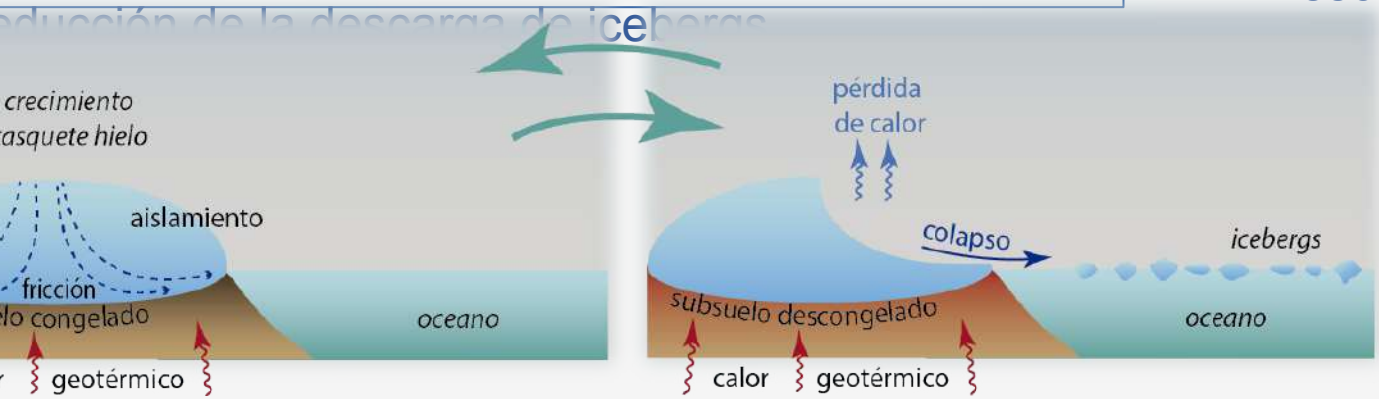
erretimiento → Lubricación → flujo masivo de hielo

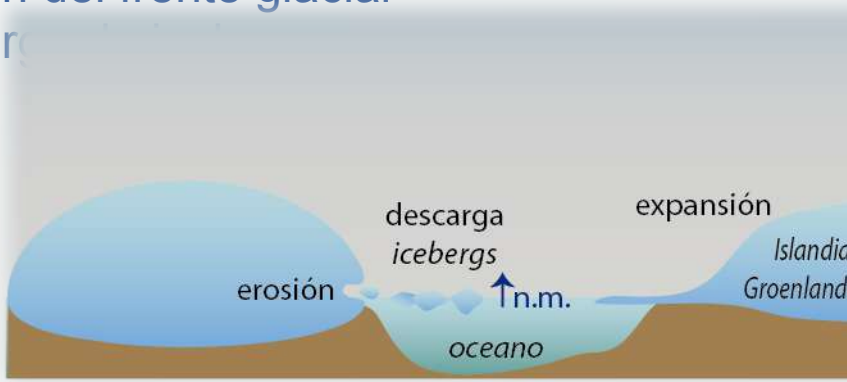
enor masa de hielo→ menor efecto aislante

educción de la descarga de icebergs

Desestabilización casquete polar HN (Sarnthein al, 2000)

- Enfriamiento y expansión del casquete polar (1 a)
- Subida del nivel del mar
- Erosión del frente glacial
- Descar



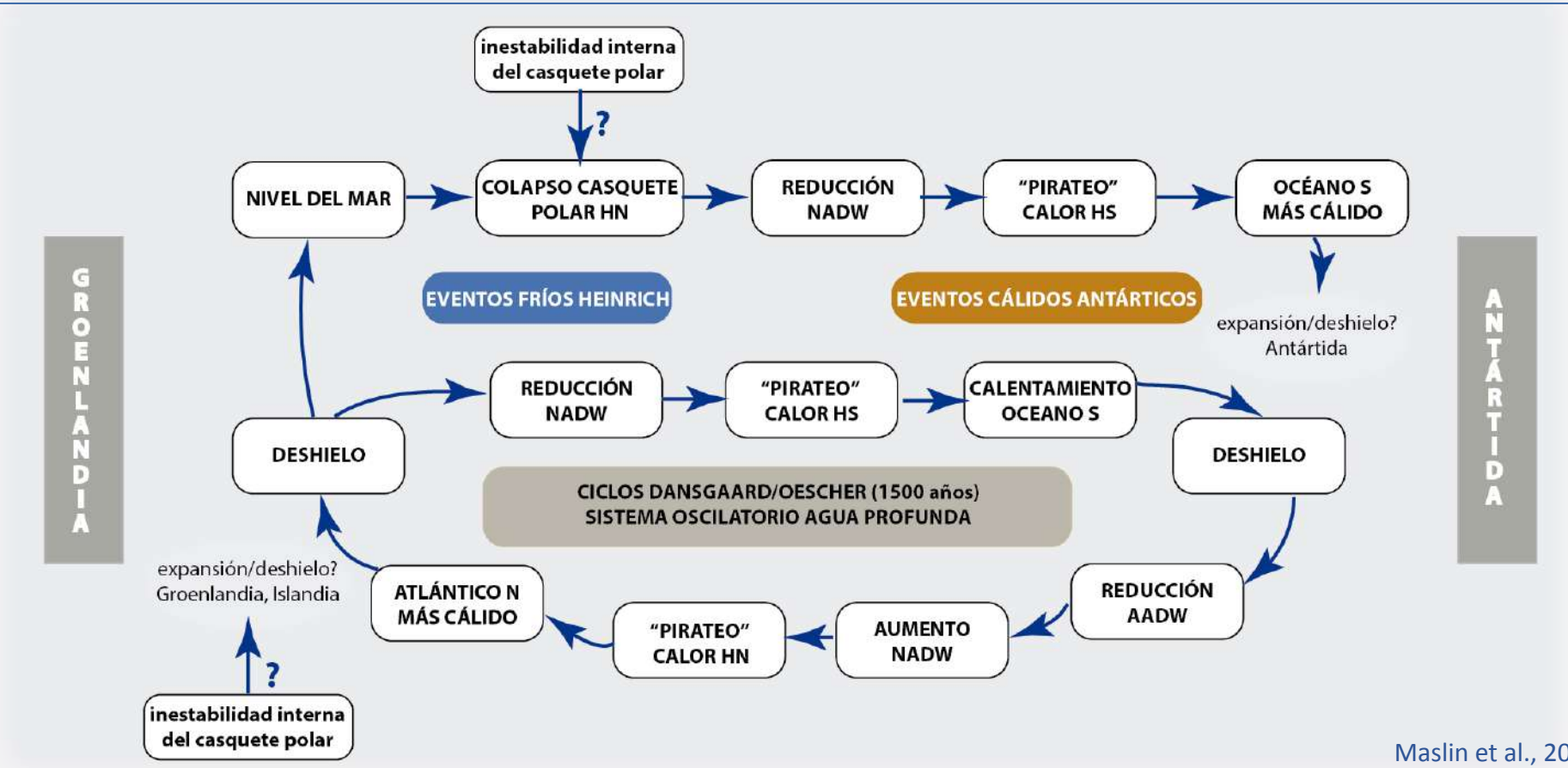


Maslin et al., 2001. Gephysical Monograp

timos 100 ka: Causas de estas variaciones milenaria

cha relación entre eventos Heinrich y ciclos D/O
ancín" bipolar climático y de circulación oceánica profunda

esfase en el clima entre los dos hemisferios (Eventos Heinrich coinciden con eventos cálidos antárticos)
stema climático global debe funcionar como un "balancín" bipolar controlado por la atmósfera y/o el océan
esencadenante D/O: Variaciones orbitales menores (armónicos)



Maslin et al., 2001. Geophysical Monograp

LTIMO 10.000 AÑOS

ansición última glaciación – presente interglacial

ambios muy rápidos y abruptos, globales

Calentamiento muy rápido (Bølling-Allerød, 14,9-12,7 Ka)

Enfriamiento severo pero “gradual” (Younger Dryas, 12,7 – 11,5 ka)

- Breves calentamientos (~1500 años)

Transición muy rápida YD – Holoceno

- sucesivas fases de calentamiento (≤50 años)

ausas La mitad del calentamiento no más de 15 años

A → Cambios orbitales (máximo de insolación)

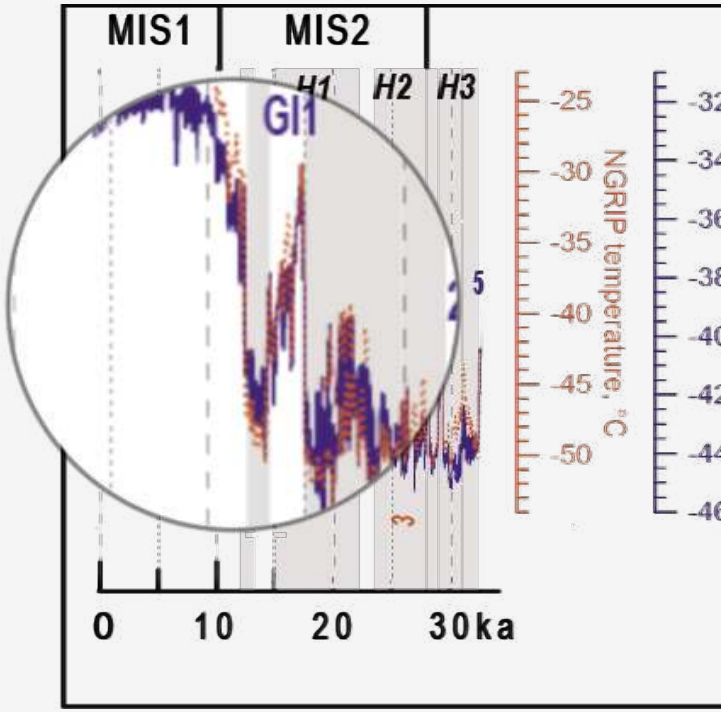
Reducción casquetes polares

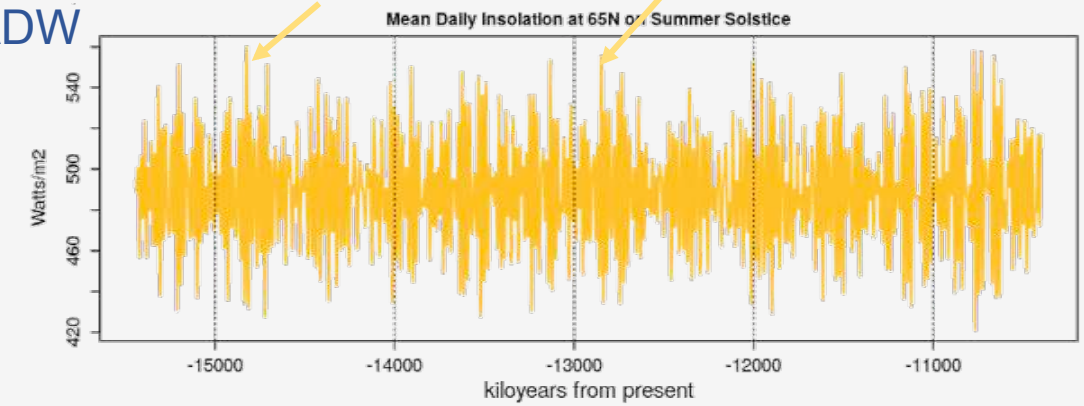
Cambios en la circulación oceánica

D → Máximo de insolación

Llegada súbita de agua dulce fría procedente de N.América y/o Europa

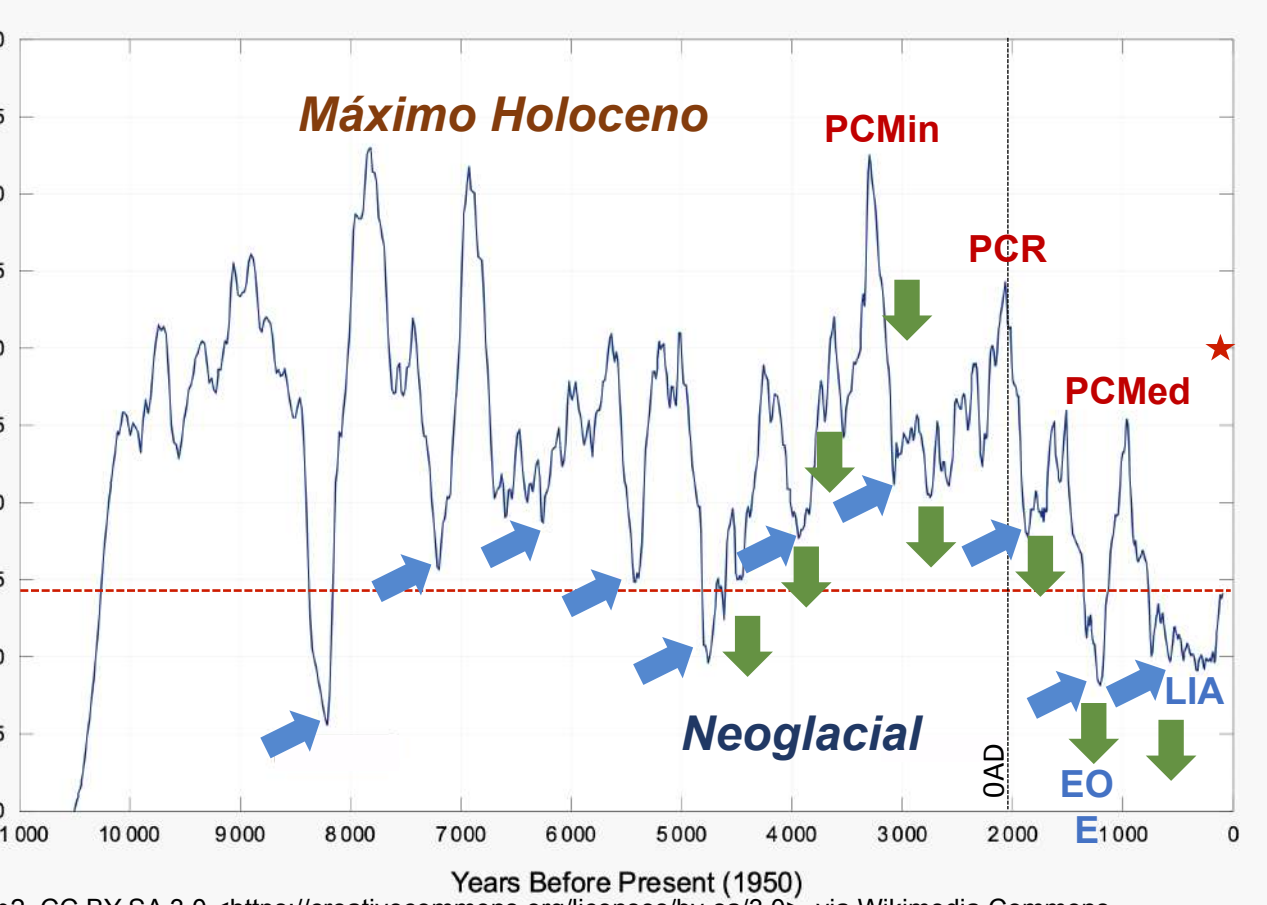
Se frena NADW





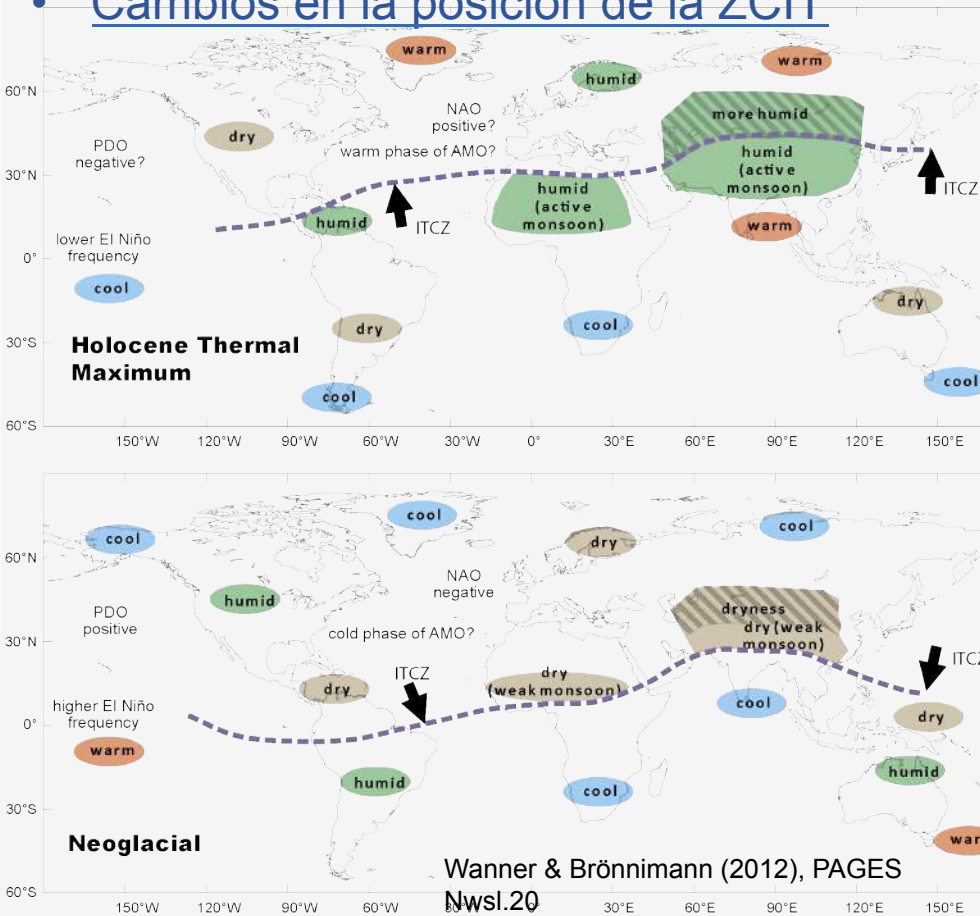
https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

LTIMO 10.000 AÑOS



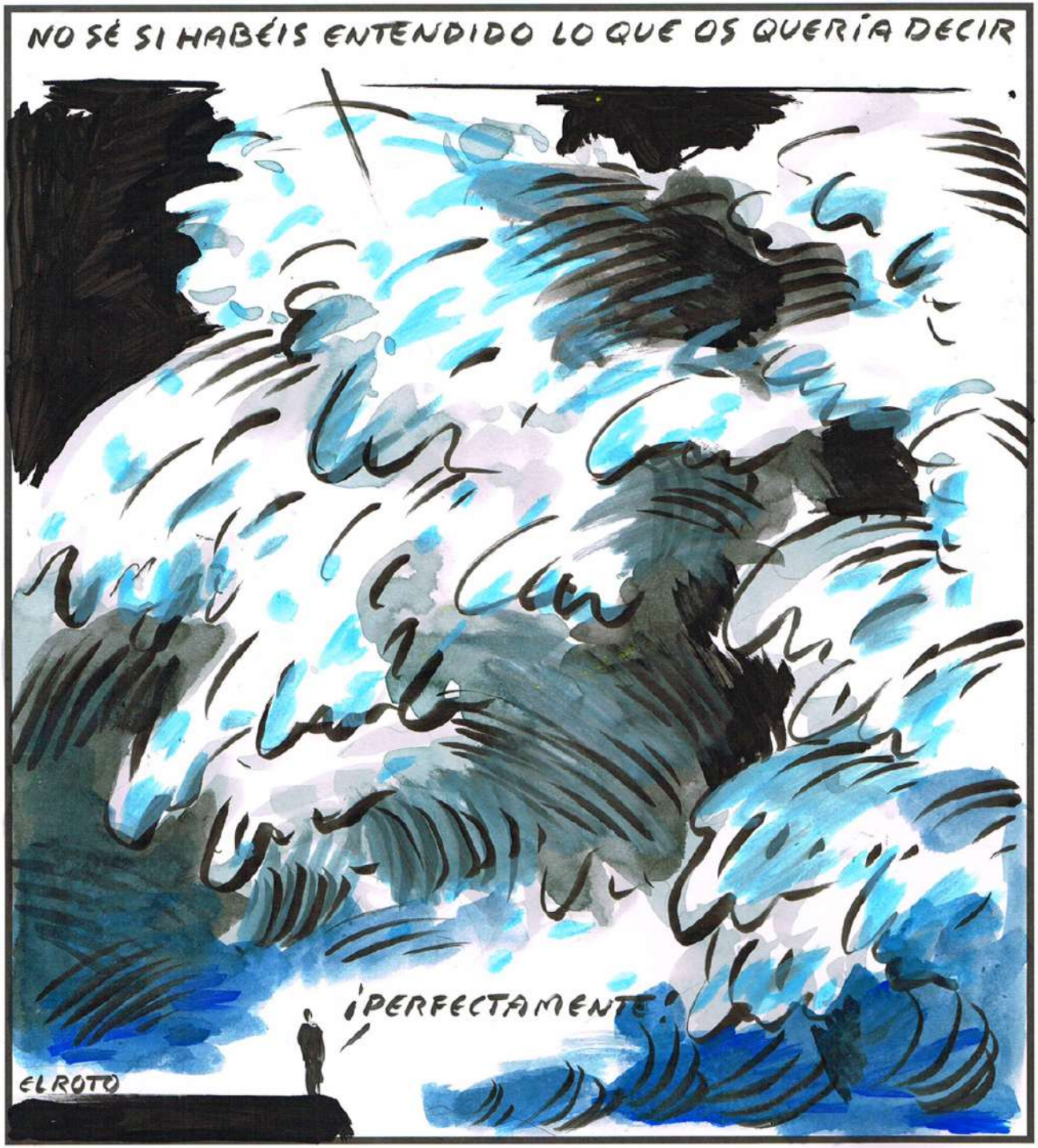
p2, CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>, via Wikimedia Commons

- Máxima insolación HN (disminuyendo últi 7ka)
- Reorganización hidrográfica tras la deglaciación
- Variaciones de diferente escala temporal
- Cambios en la posición de la ZCIT



Wanner & Brönnimann (2012), PAGES Nwsl.20

ventos fríos interrumpen periodos cálidos relativamente estables
scala multidecadal o multicentenial
sminución insolación combinado con debilitamientos de la rmohalina


NO SÉ SI HABÉIS ENTENDIDO LO QUE OS QUERÍA DECIR
¡PERFECTAMENTE!
EL ROTO