



# **El Sistema Climático**

**Maestría en Geociencias**

**2023**

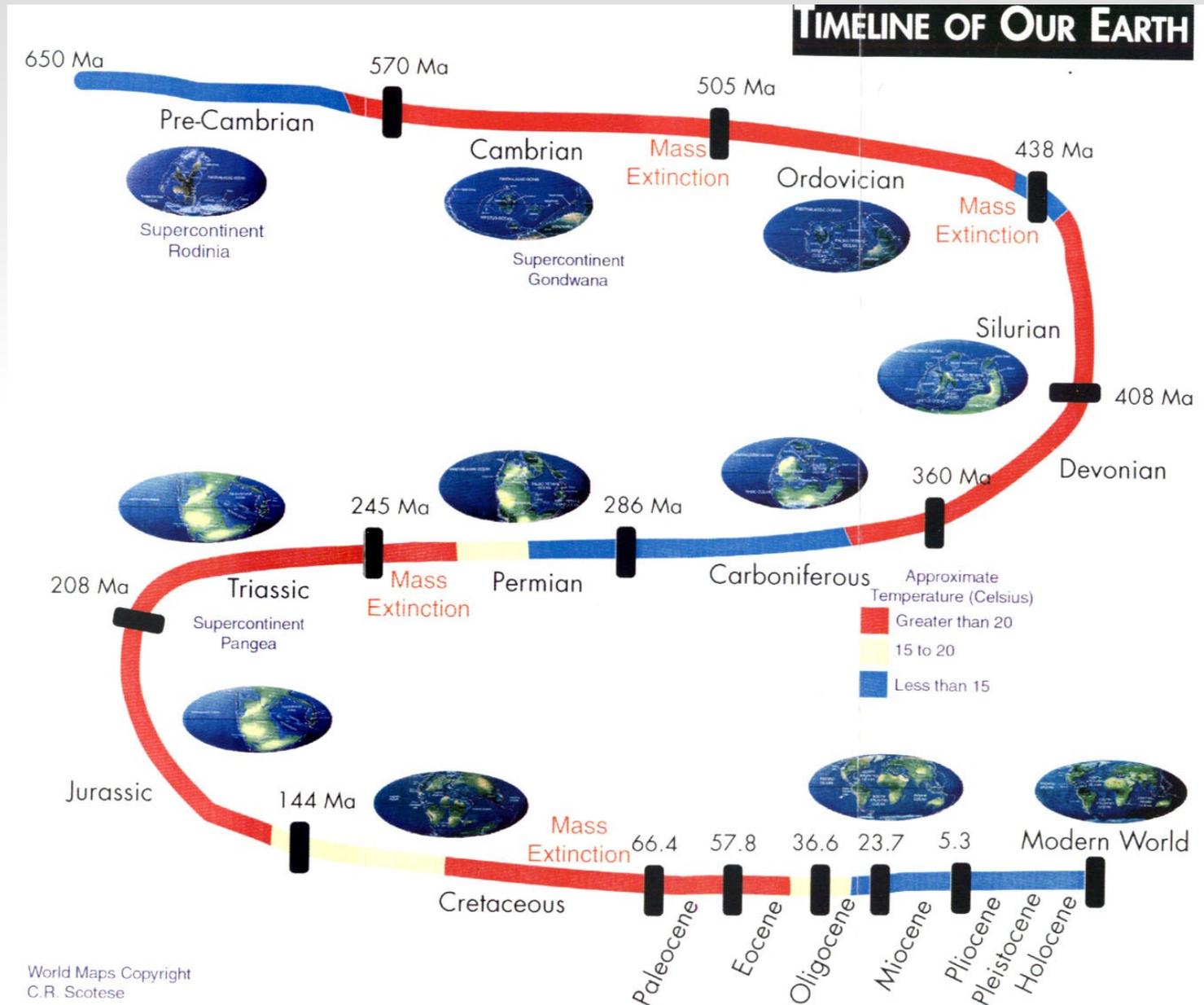
# Variabilidad Climática Natural

Últimos millones de años

# ¿Cuáles son las causas naturales en los cambios climáticos?

- Cambios en el Sol
- Cambios en movimientos de la Tierra
- Distribución océanos – continentes
- *Cambios en la cobertura continental*
- Cambios en composición de la atmósfera
  - Polvo
  - Respiración/fotosíntesis
  - *Actividad volcánica*

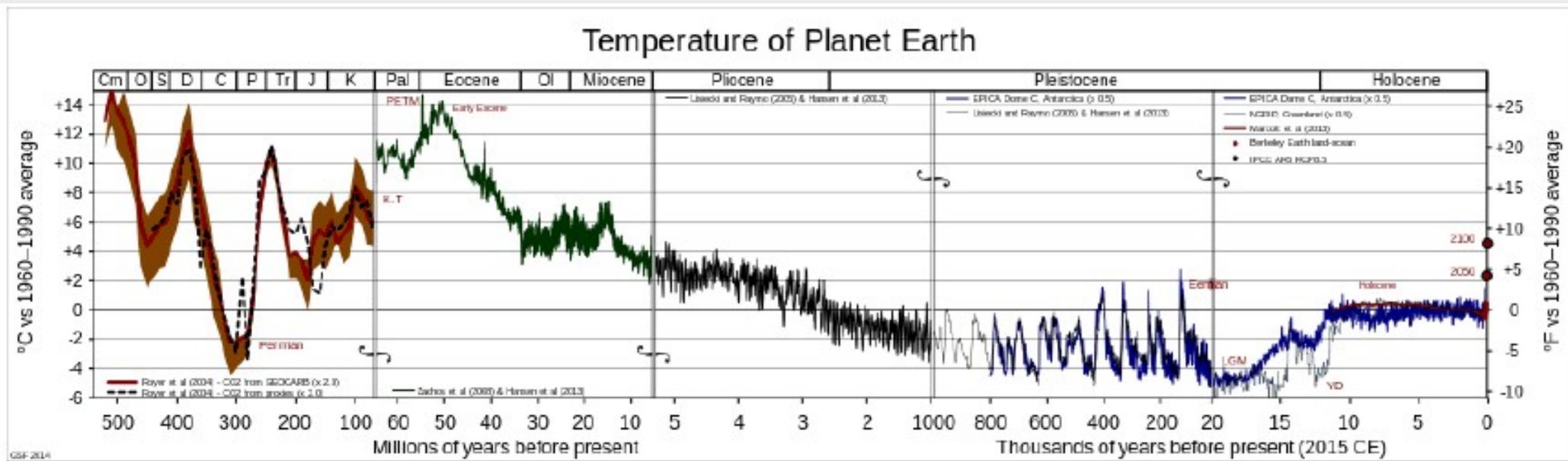
# Evolución del clima en últimos 650 millones de años



# ¿Cuáles son las causas naturales en los cambios climáticos?

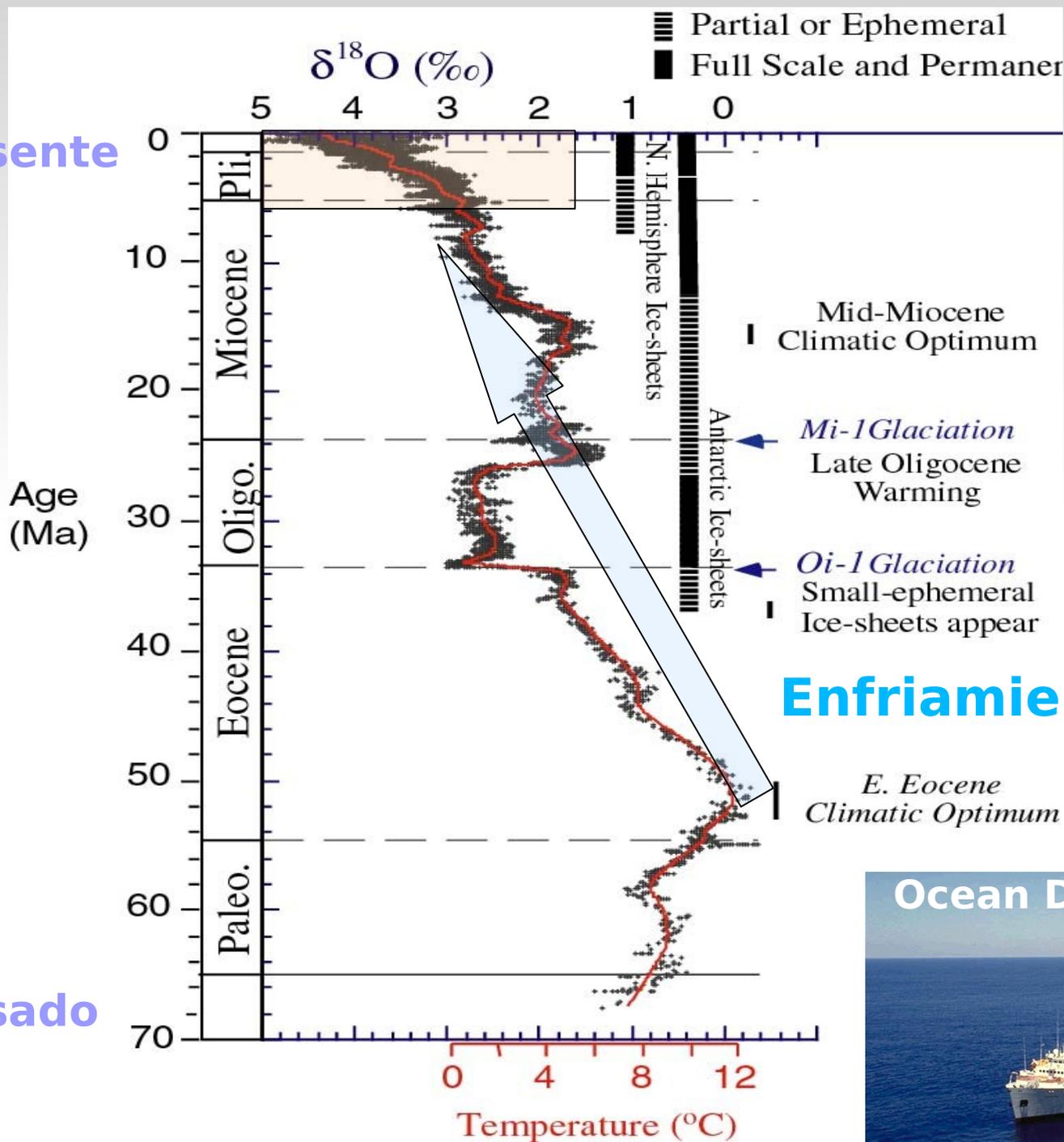
- Cambios en el Sol
- Cambios en movimientos de la Tierra
- Distribución océanos – continentes
- *Cambios en la cobertura continental*
- Cambios en composición de la atmósfera
  - Polvo
  - Respiración/fotosíntesis
  - *Actividad volcánica*

# Evolución del clima en últimos 500 millones de años



# Clima (Artico) en los últimos 70 millones de años

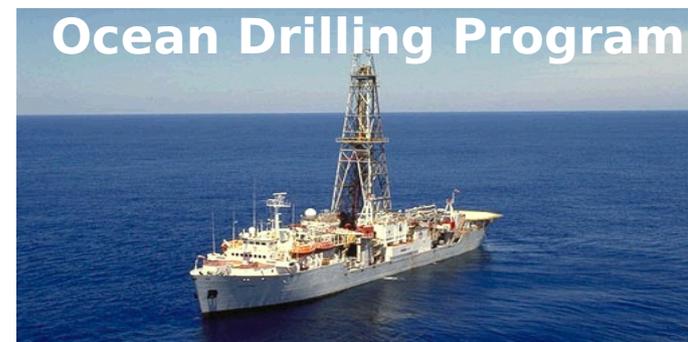
Presente



Zachos et al. (2001)

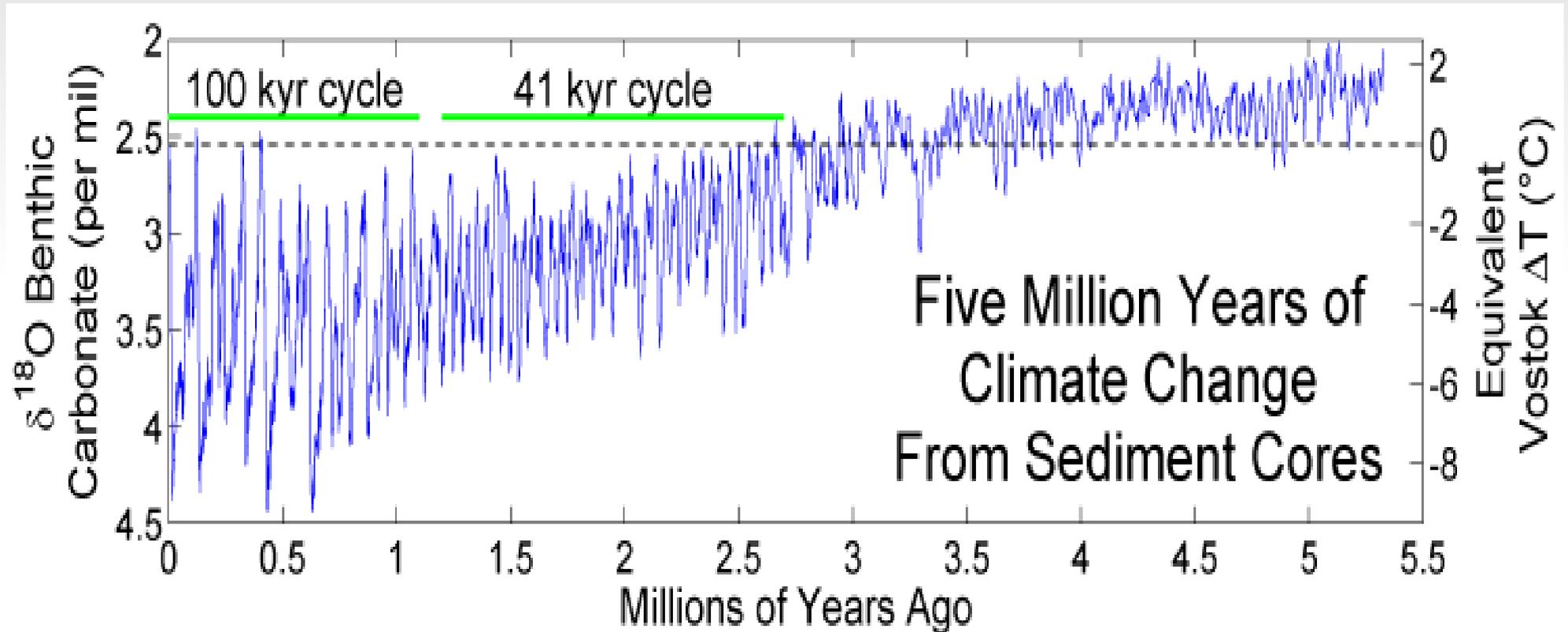
Foraminifera  
CaCO<sub>3</sub>

Enfriamiento global



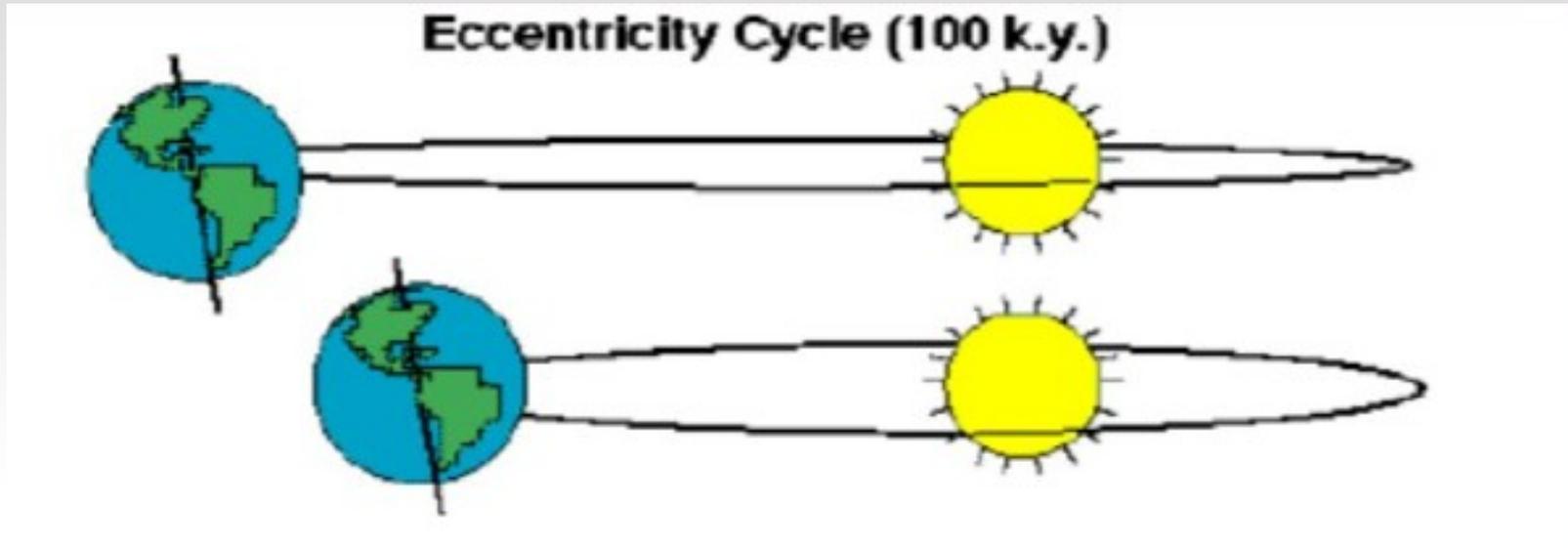
Pasado

# Últimos 5 millones de años



Masa total de hielo global

# Variaciones Orbitales: Teoría de Milankovich



## Excentricidad orbital

La órbita de la Tierra varía de circular a ligeramente excéntrica. La excentricidad ( $e$ ) varía entre 0.00 y 0.06 en un ciclo de **100.000 años**. Cuando  $e = 0.00$  la órbita es circular; el valor actual es  $e = 0.0167$ .

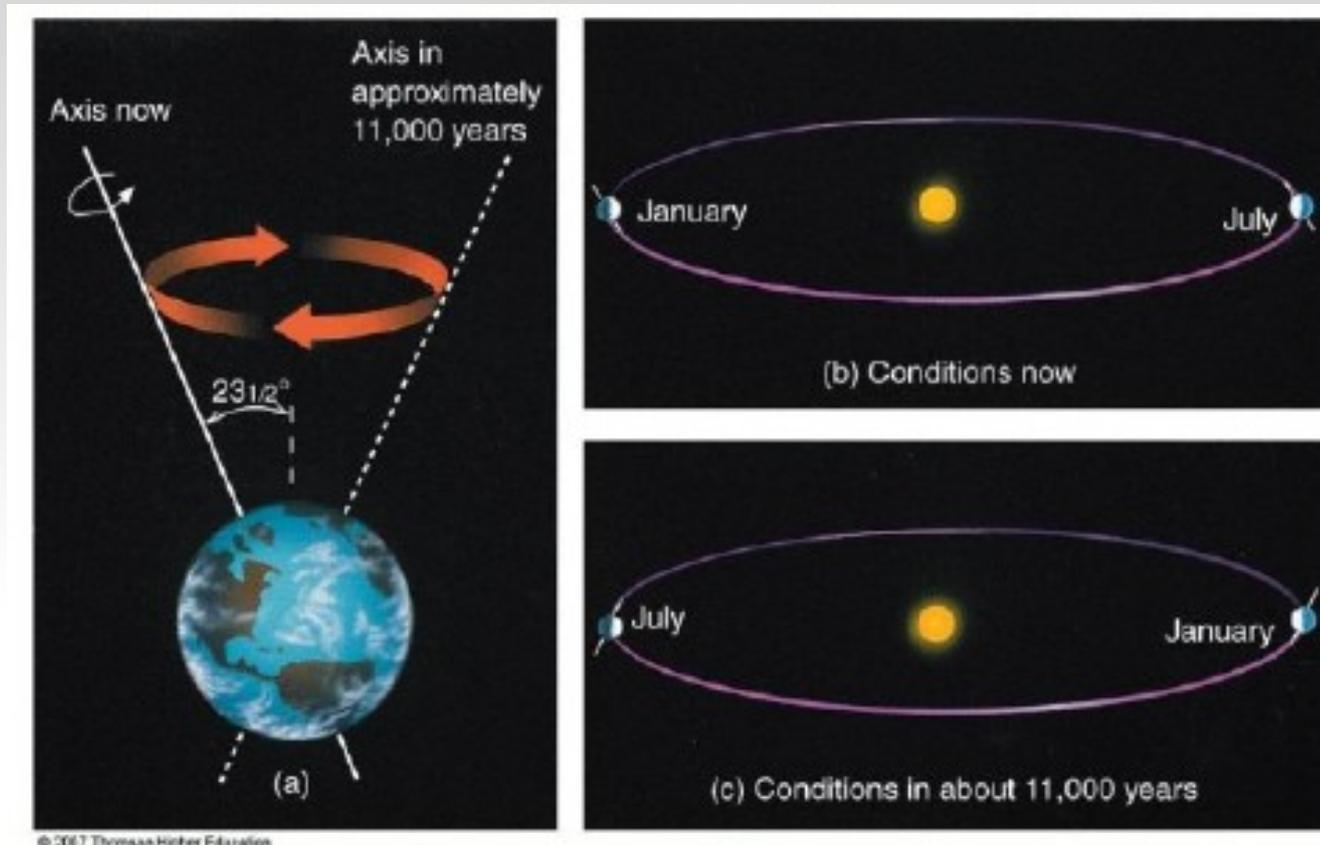
# Variaciones Orbitales: Teoría de Milankovich



## Inclinación de la Tierra (oblicuidad)

La Tierra está inclinada respecto de la normal al plano Tierra-Sol. La inclinación varía entre  $22^\circ$  a  $24.5^\circ$  en un ciclo de 41.000 años. La inclinación actual es  $23.3^\circ$ .

# Variaciones Orbitales: Teoría de Milankovich



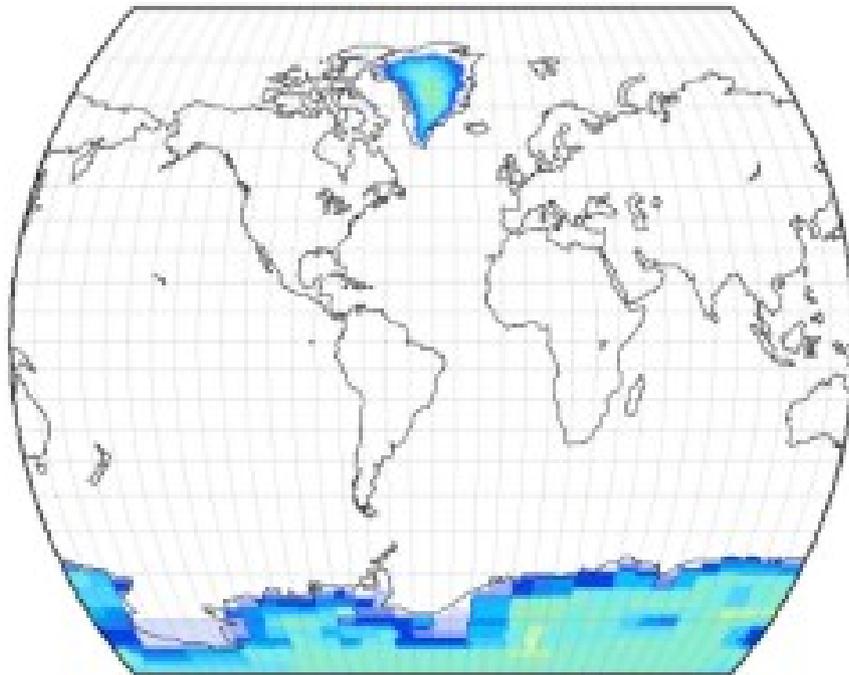
## Precesión (Efecto Wobble)

El eje de rotación de la Tierra se tambalea como un trompo en un ciclo de 23.000 años.

# Cobertura y espesor del hielo

Present Day

Present-Day Ice Sheet Thickness



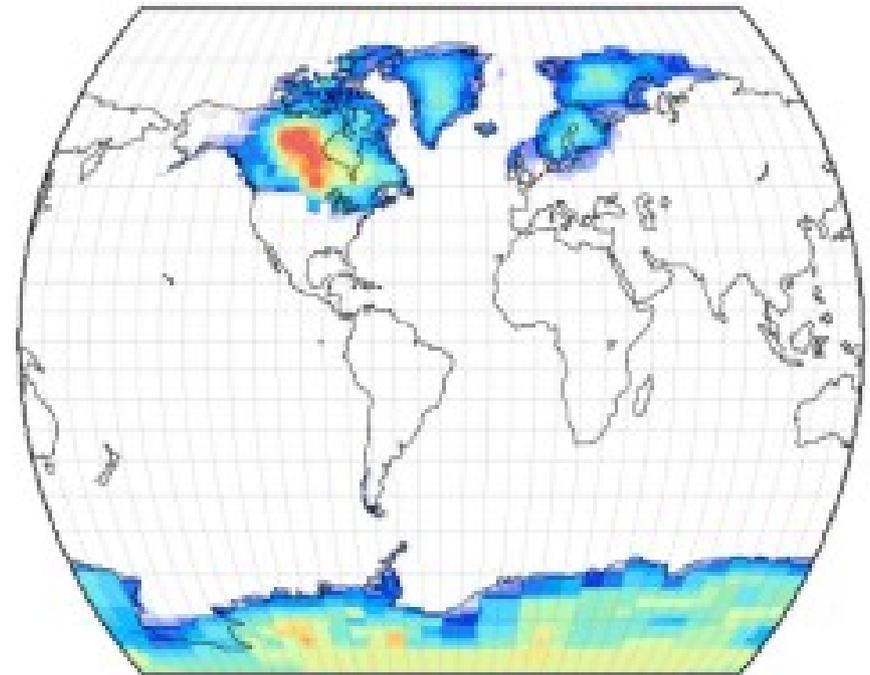
Thickness (m)



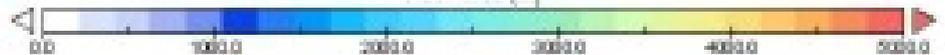
Times Atlas projection centered on 0000E

Last Glacial Maximum

Thickness of the Ice Sheets at the Last Glacial Maximum



Thickness (m)

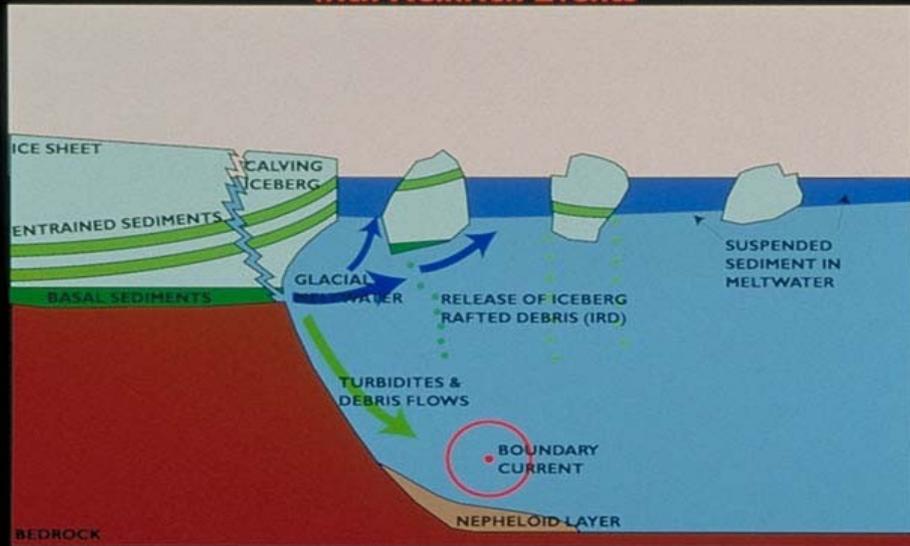


Times Atlas projection centered on 0000E

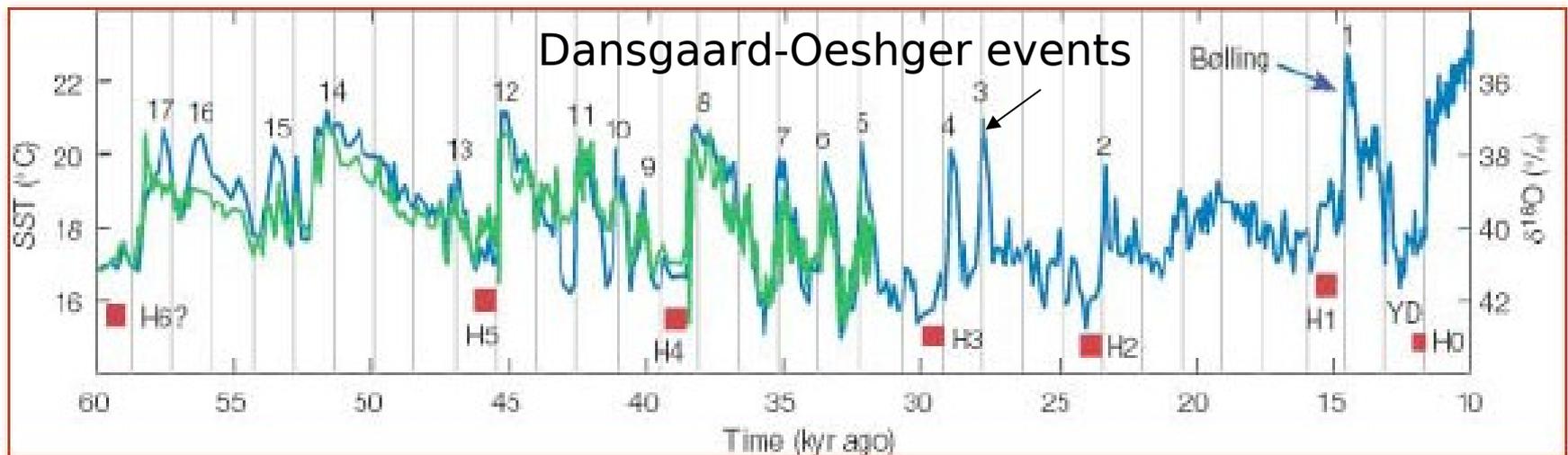
# Dentro de un período glaciario

## Eventos Heinrich: descargas masivas de icebergs en el Atlantico Norte

Sediment Transport and Deposition Associated with Heinrich Events



Asociados con climas frios en el Atlantico norte y menor formacion de aguas profundas

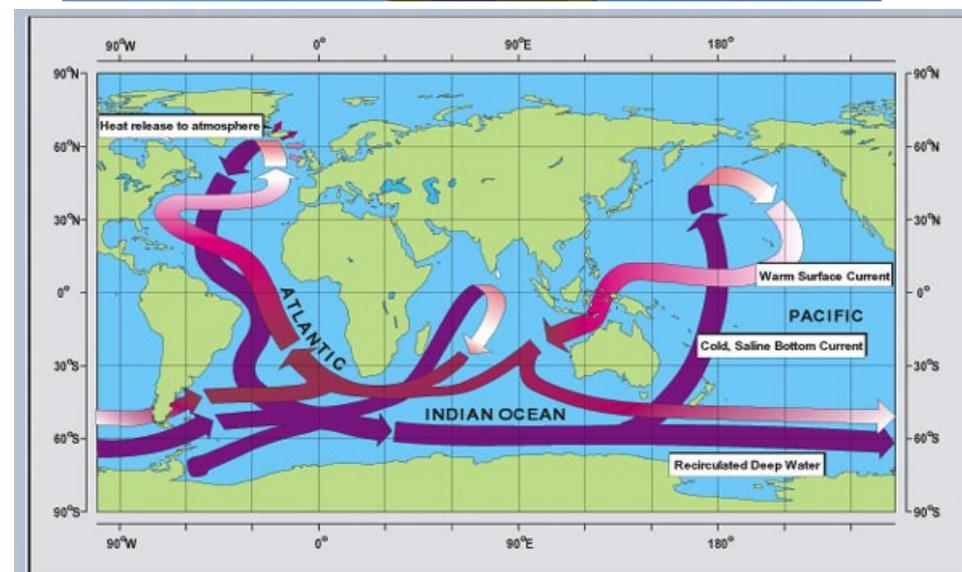


# Younger Dryas - El día después de mañana



Durante la terminacion de la última Edad de Hielo hubo un retorno a clima glacial en Goenlandia.

Colapso de la circulación termohalina?



13/06/23

*Dryas octopetala*



# Younger Dryas - El día después de mañana

Período climático que ocurrió al final del Pleistoceno (12.900 - 11.700 años).

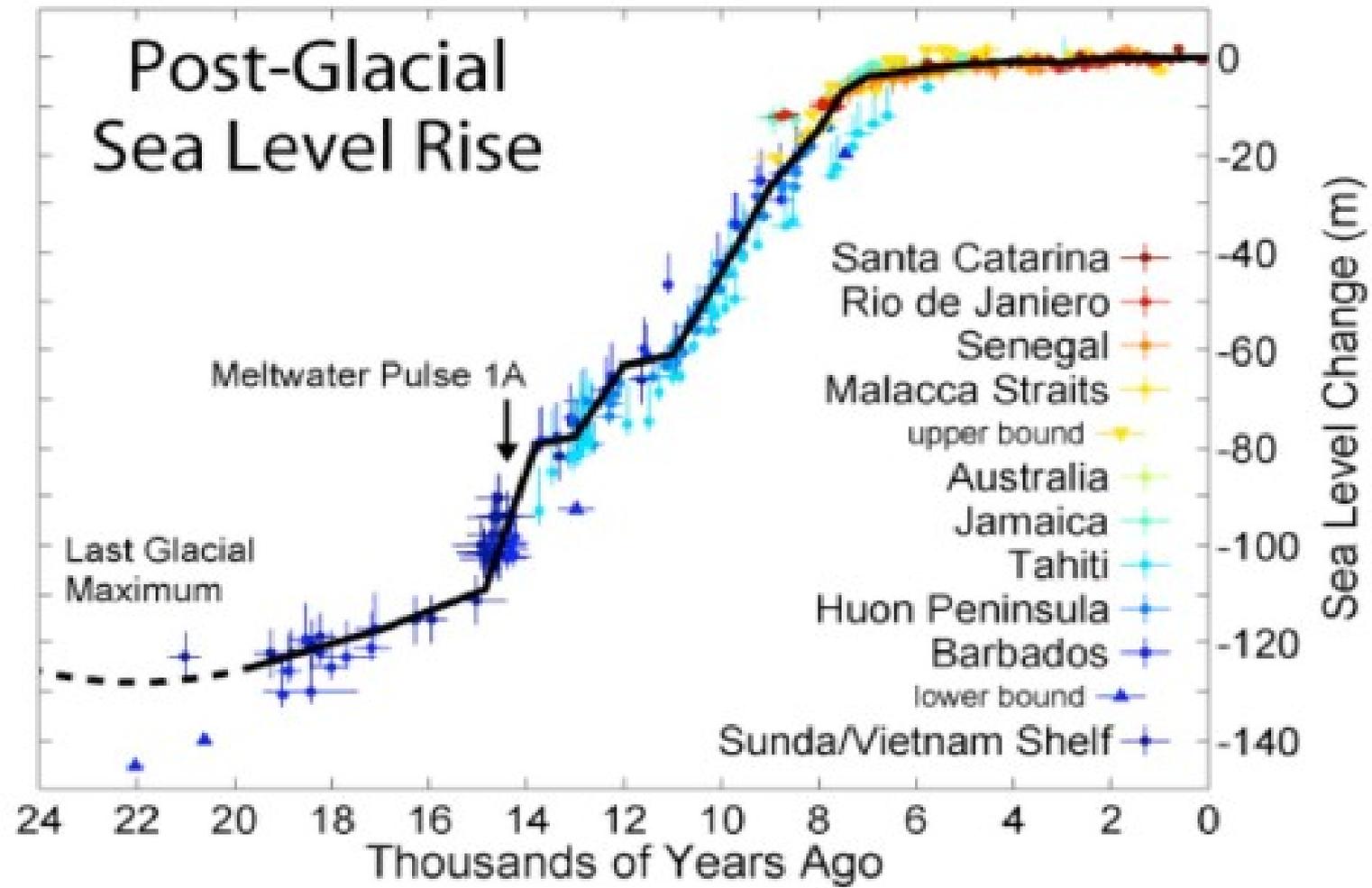
Temperaturas disminuyeron en gran parte del HN y se restablecieron condiciones glaciales en muchas regiones.

Se habría producido debido al colapso de grandes masas de hielo, la capa de hielo Laurentino en AmN.

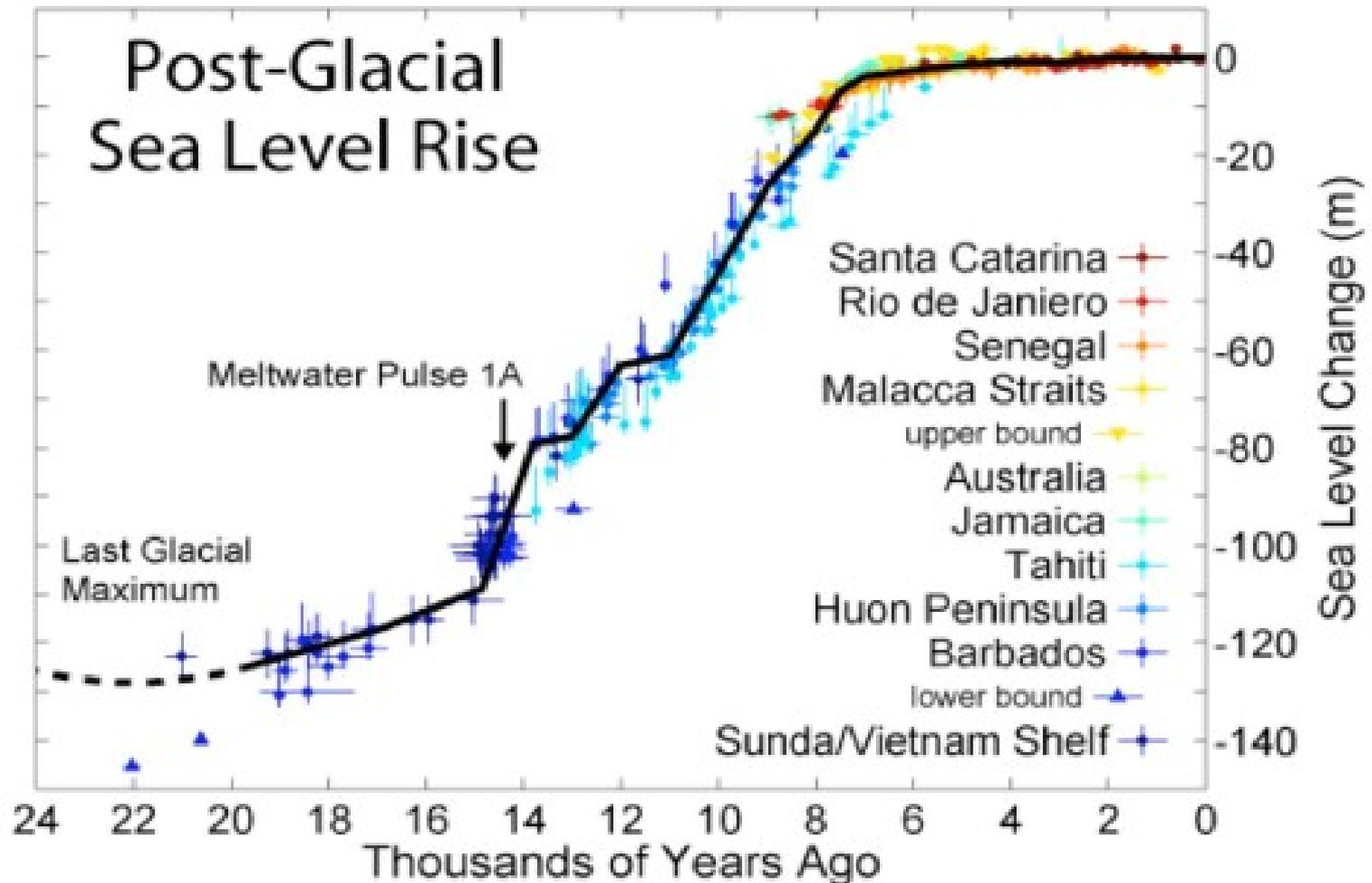
Grandes cantidades de agua dulce fueron liberadas al Atlántico N, interrumpiendo la circulación termohalina.



# Aumento del nivel del mar global en la ultima terminacion

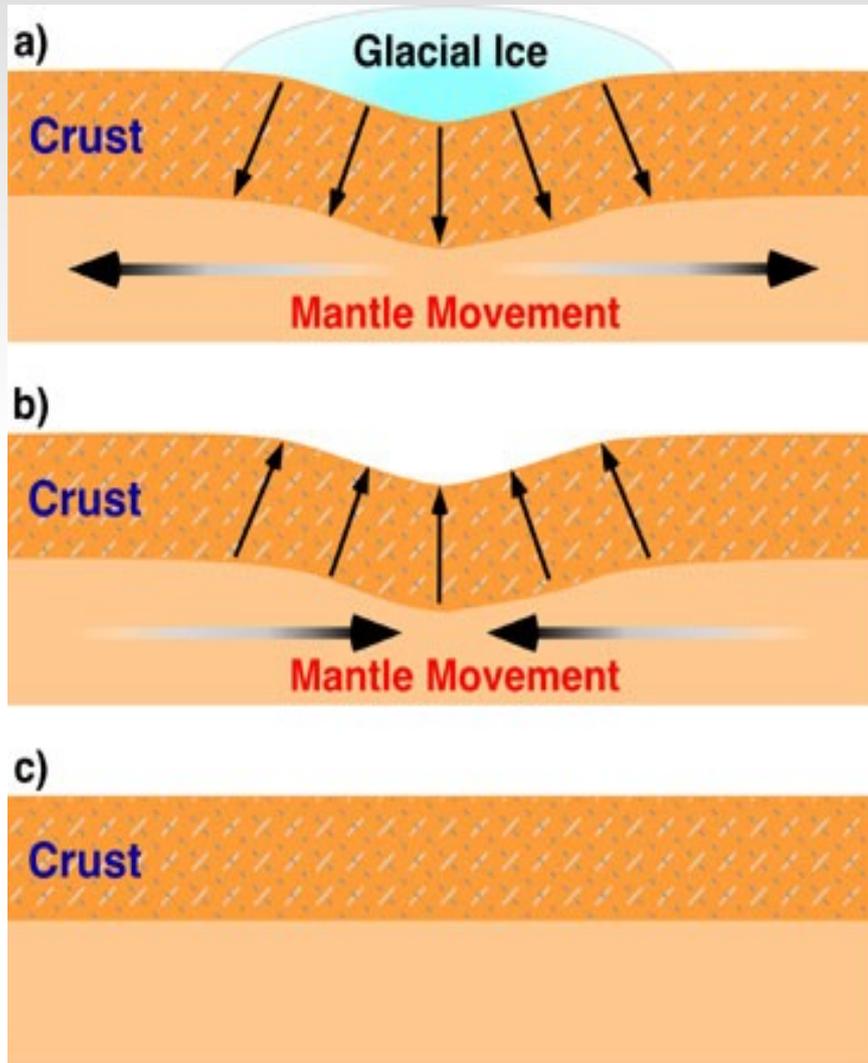


# Aumento del nivel del mar global en la última terminación



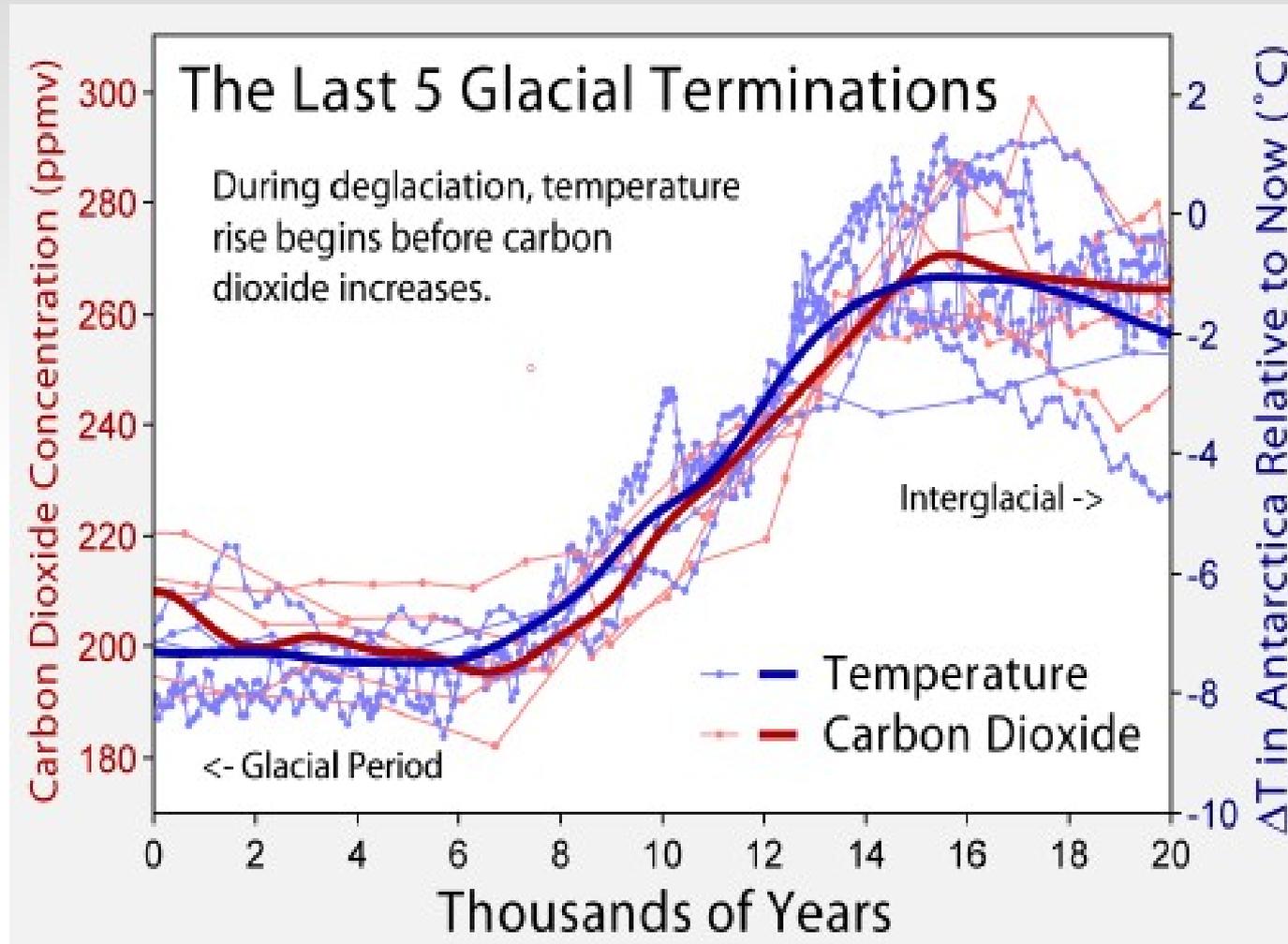
Fusión de los glaciares y casquetes de hielo, expansión térmica del agua, desprendimiento de icebergs y cambios en el equilibrio de las masas de tierra, resultan en un aumento global del nivel del mar al salir de un clima glacial y entrar en un período de calentamiento.

# Rebote isostático de los continentes

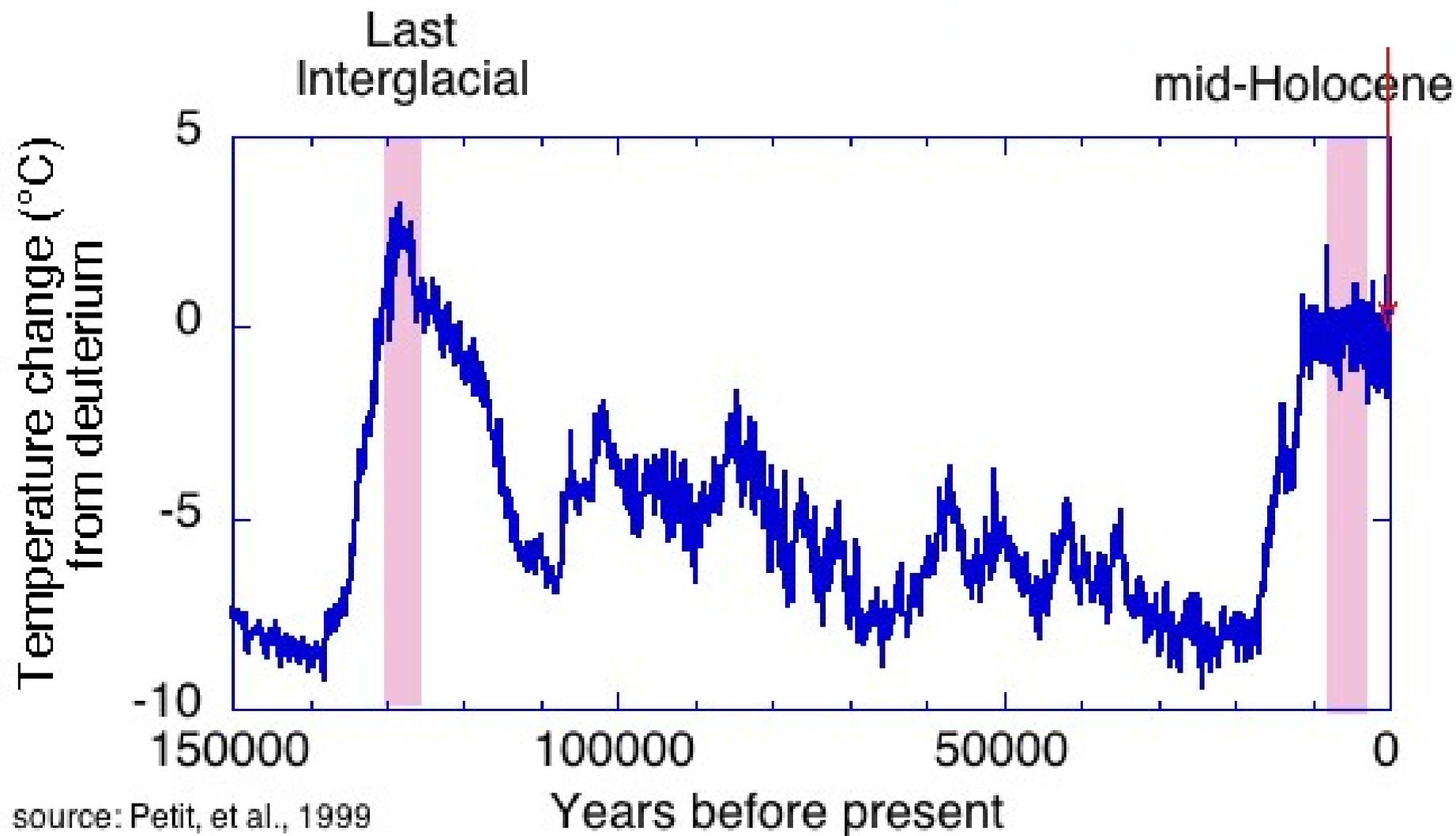


- La corteza terrestre “flota” sobre el manto.
- El peso de los glaciares deforma la corteza empujandola hacia abajo.
- Al derretirse los glaciares la corteza tiende a subir hasta un nuevo nivel de equilibrio.

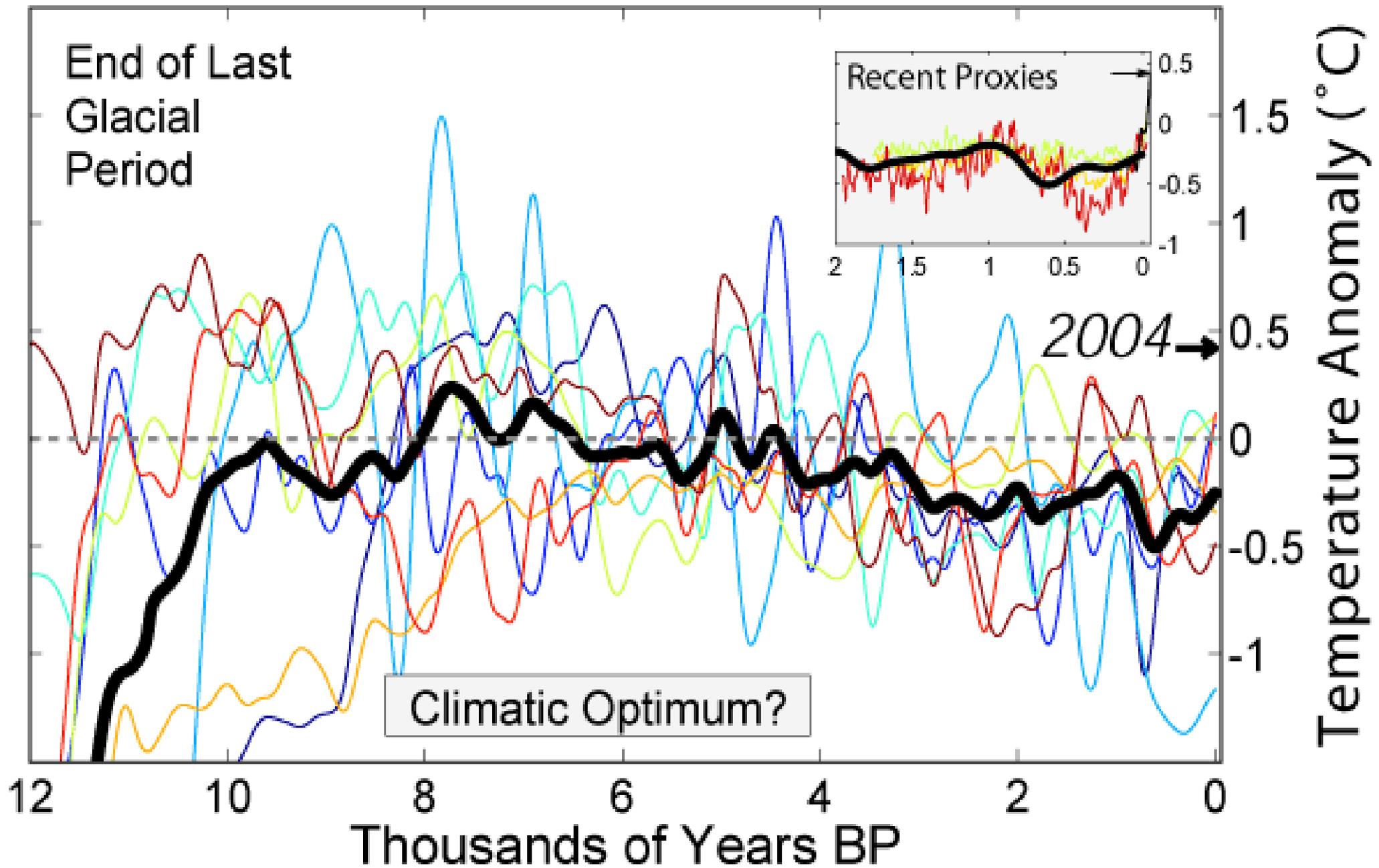
# Terminaciones de las últimas 5 Edades de Hielo



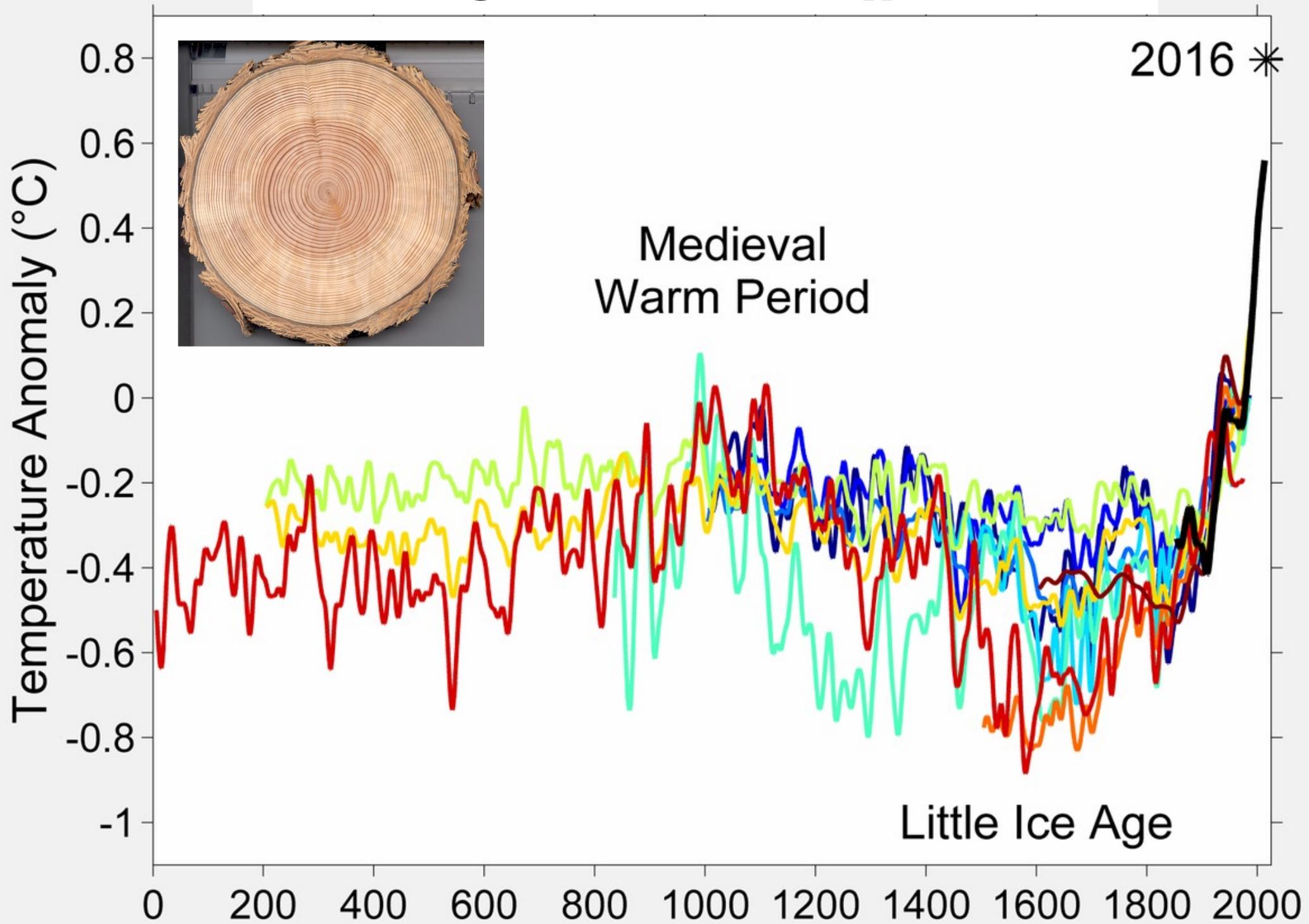
Las terminaciones toman alrededor de 10.000 años y son procesos “discontínuos” con cambios rápidos.



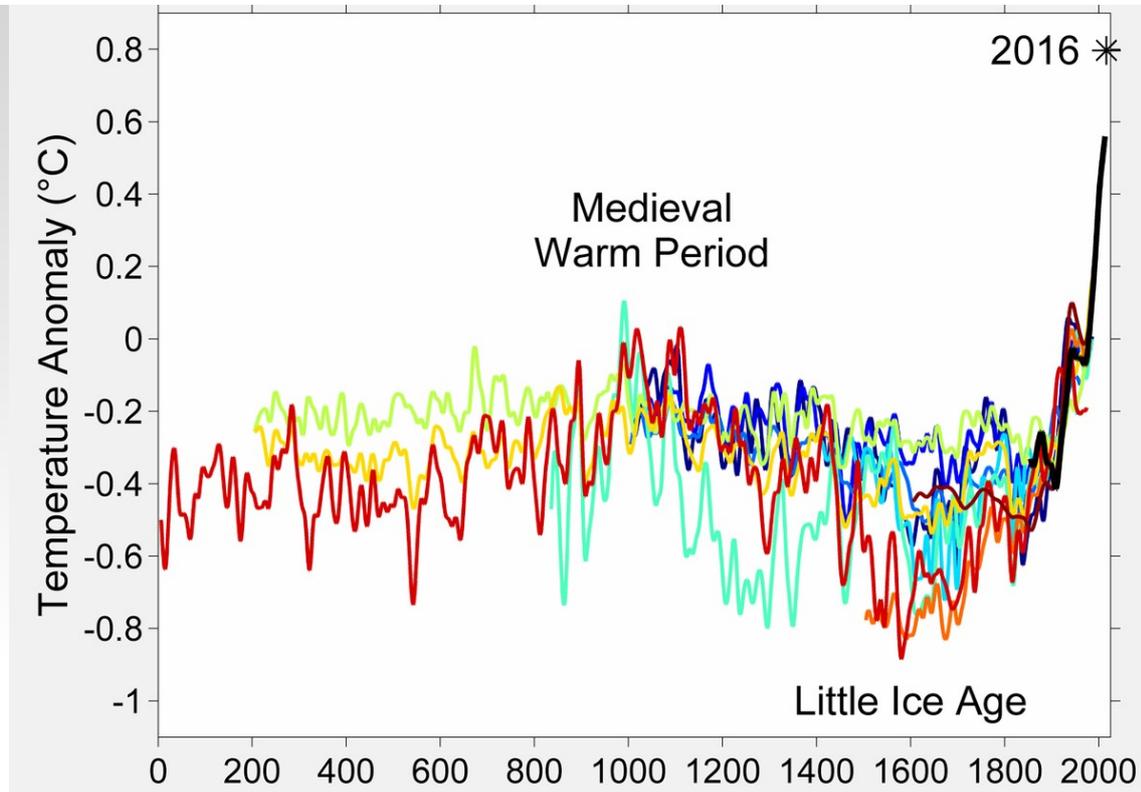
# Holocene Temperature Variations



# Últimos 1.200 años



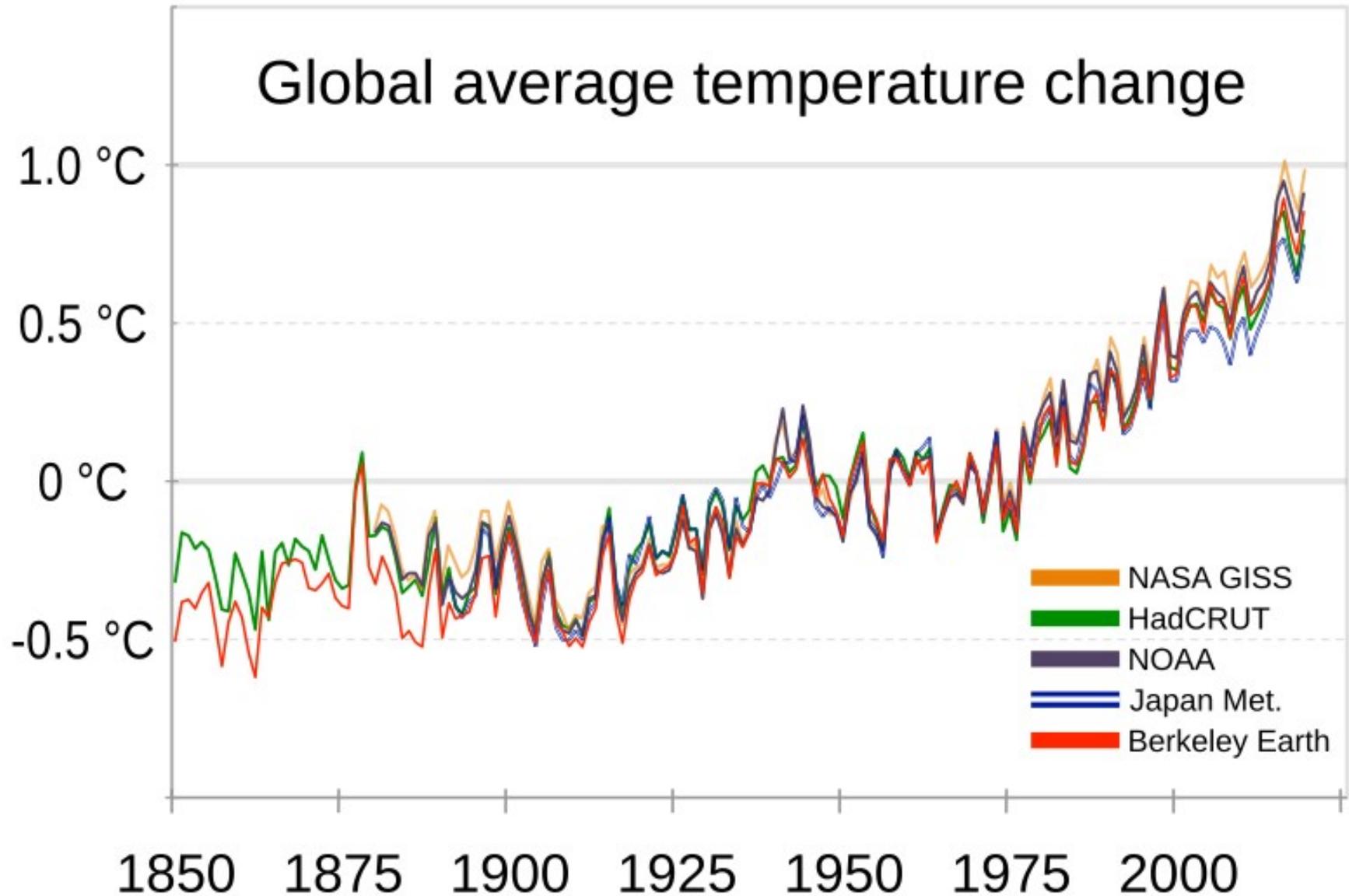
# Últimos 1.200 años



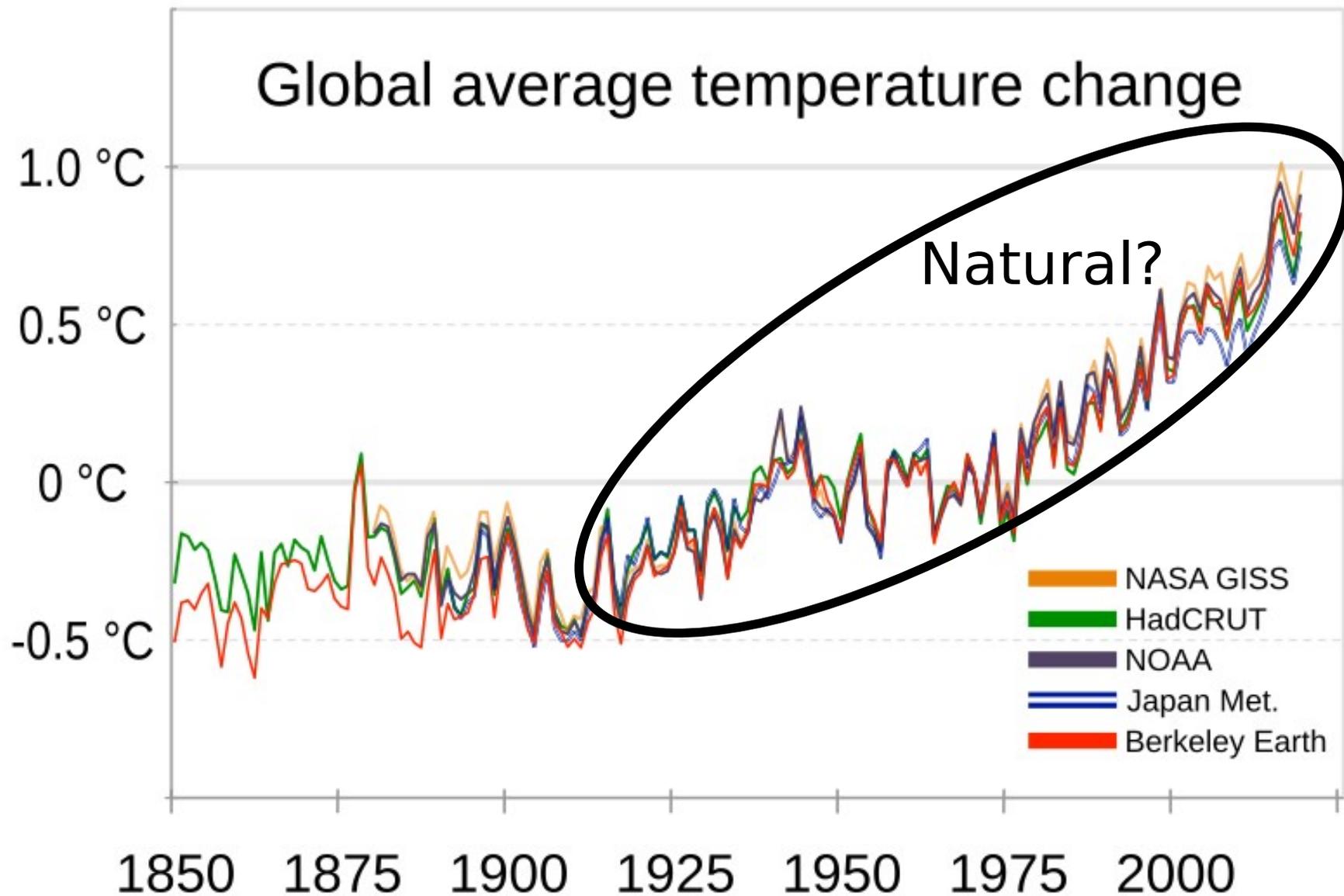
**El Período Cálido Medieval**, se caracterizó por un clima más cálido en el HN. Cambios en la actividad solar, como un aumento en la radiación solar junto con variaciones en los patrones de circulación atmosférica y oceánica afectaron la distribución de las masas de aire cálido y frío.

**La Pequeña Edad de Hielo** se caracterizó por episodios de avance de los glaciares, inviernos más fríos y veranos más cortos. Variaciones en la actividad solar y cambios en los patrones de circulación atmosférica y oceánica pudieron haber desempeñado un rol. También se han considerado erupciones volcánicas importantes que liberaron grandes cantidades de aerosoles y partículas a la atmósfera, lo que pudo haber bloqueado la radiación solar y enfriado el clima.

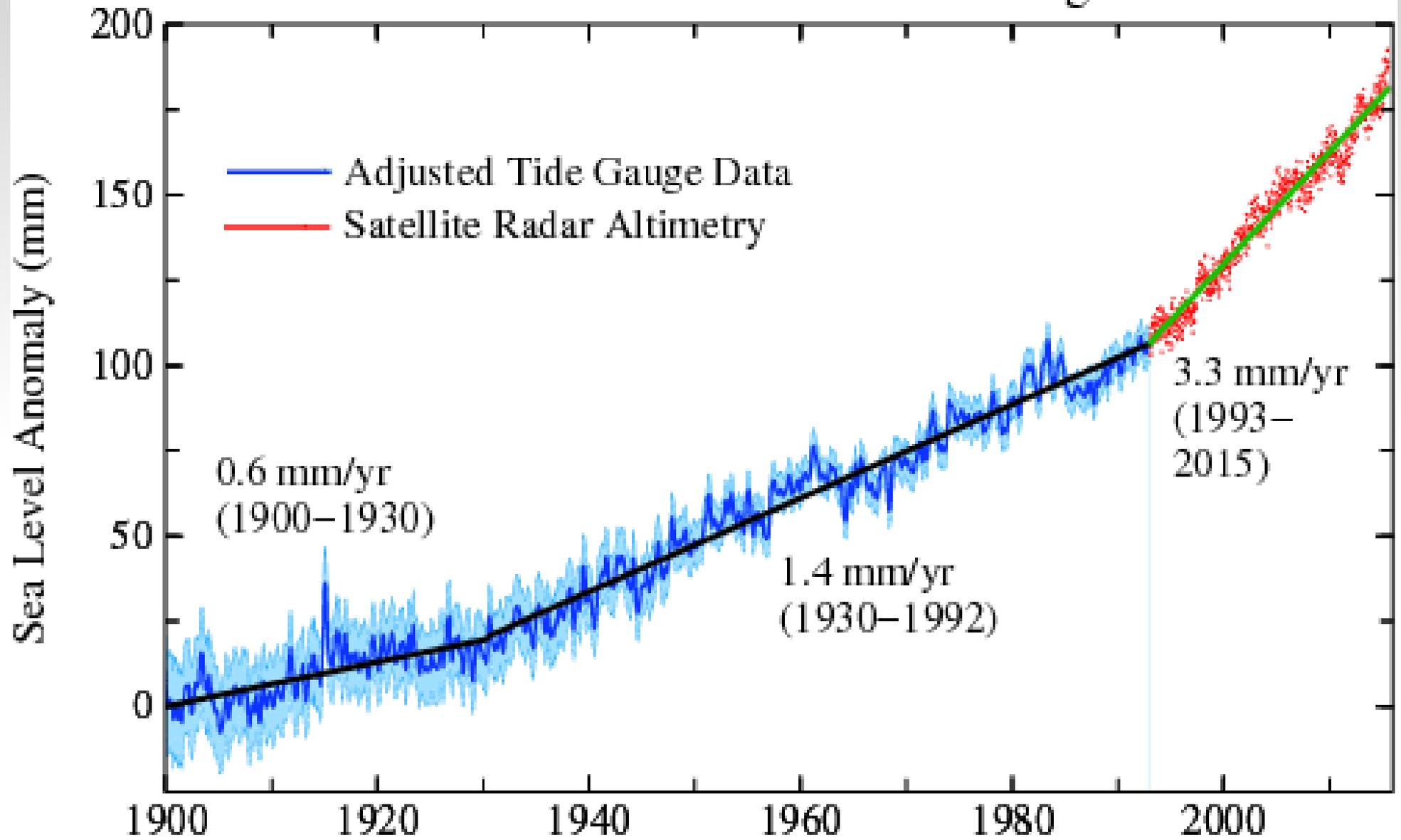
# Registro instrumental



# Registro instrumental

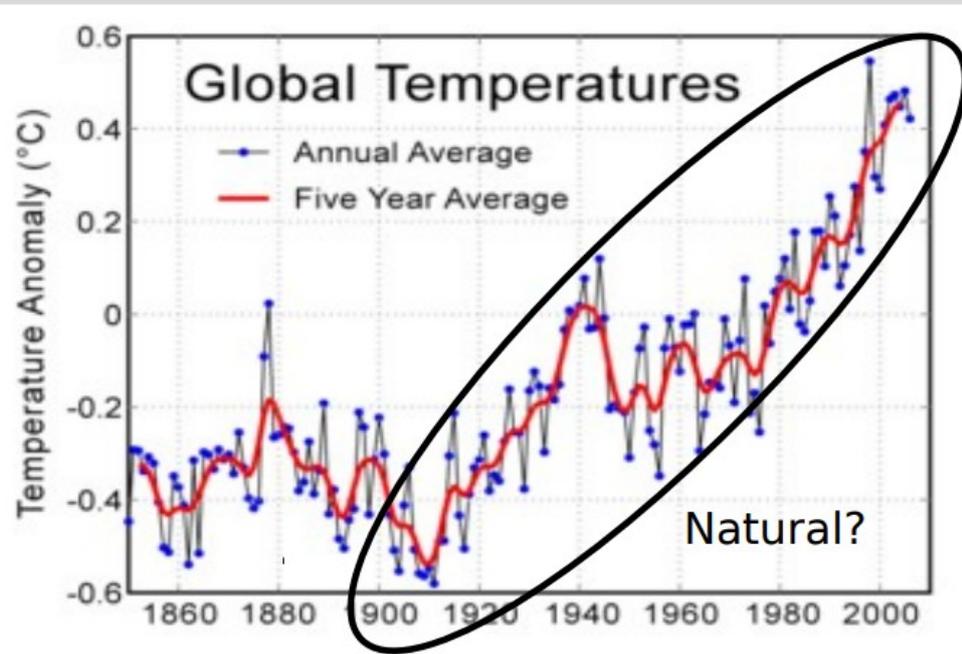
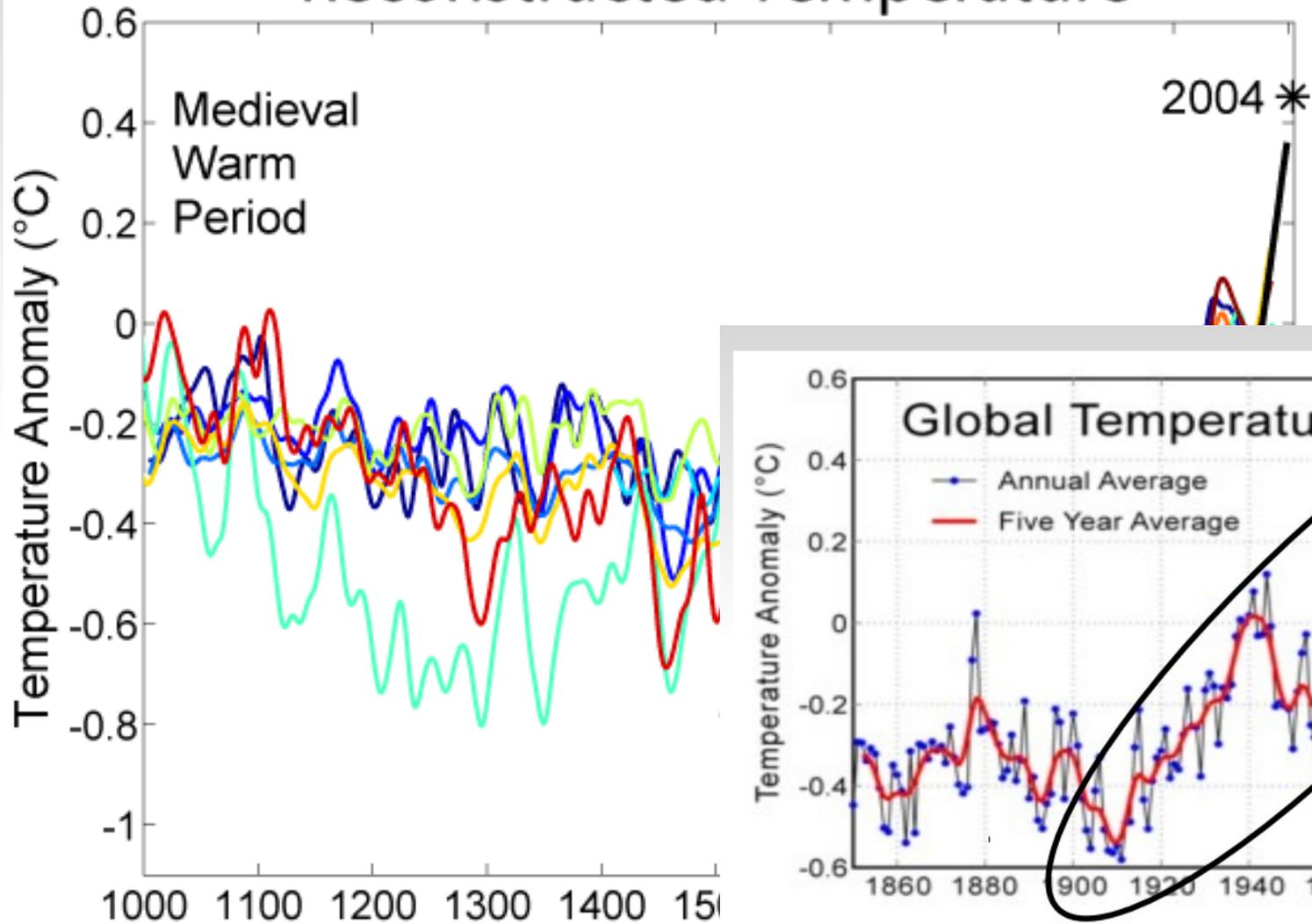


# Global Mean Sea Level Change



# Cambio climático

# Reconstructed Temperature



# ¿Cuáles son las causas en los cambios climáticos?

- Naturales
- *Forzados por el ser humano*
  - Cambios en el Sol
  - Cambios en movimientos de la Tierra
  - Distribución océanos – continentes
  - *Cambios en la cobertura continental*
  - Cambios en composición de la atmósfera por:
    - Descomposición de seres vivos
    - *Quema de combustibles fósiles*
    - *Actividad agropecuaria*

**¿Por qué los cambios actuales en el clima son distintos a los cambios en el pasado?**

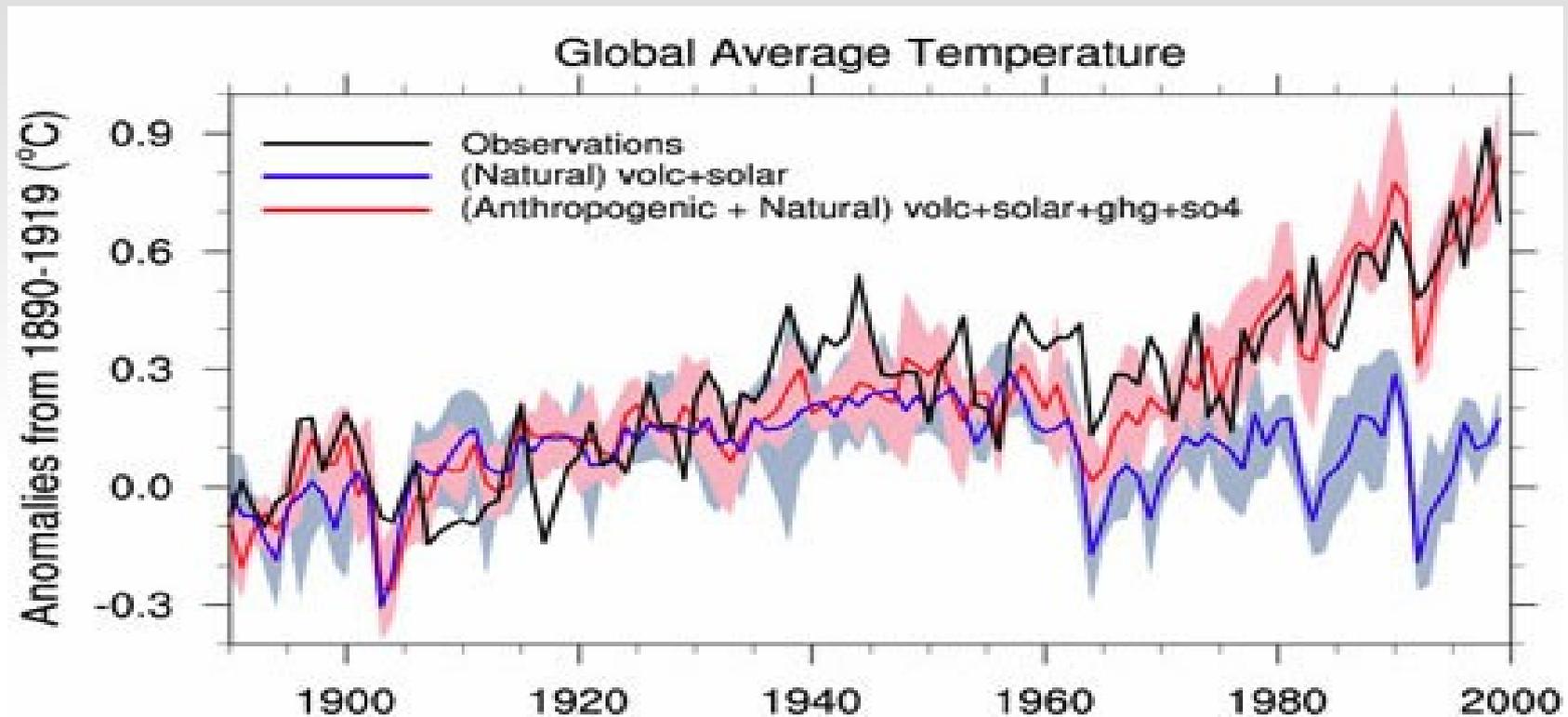
Las causas naturales no explican completamente los cambios observados

# ¿Por qué los cambios actuales en el clima son distintos a los cambios en el pasado?

Cómo sabemos cuando un cambio es forzado por la actividad humana?

- Se deben detectar cambios en alguna de las variables climáticas en un período largo del tiempo
- Se debe caracterizar la variabilidad climática natural
  - Mediante Observaciones de larga duración
  - Teoría, modelos numéricos
  - Proxies
- Atribuir dicho cambio a la acción humana

# ¿Cómo sabemos con certeza que el cambio es provocado por la acción humana?



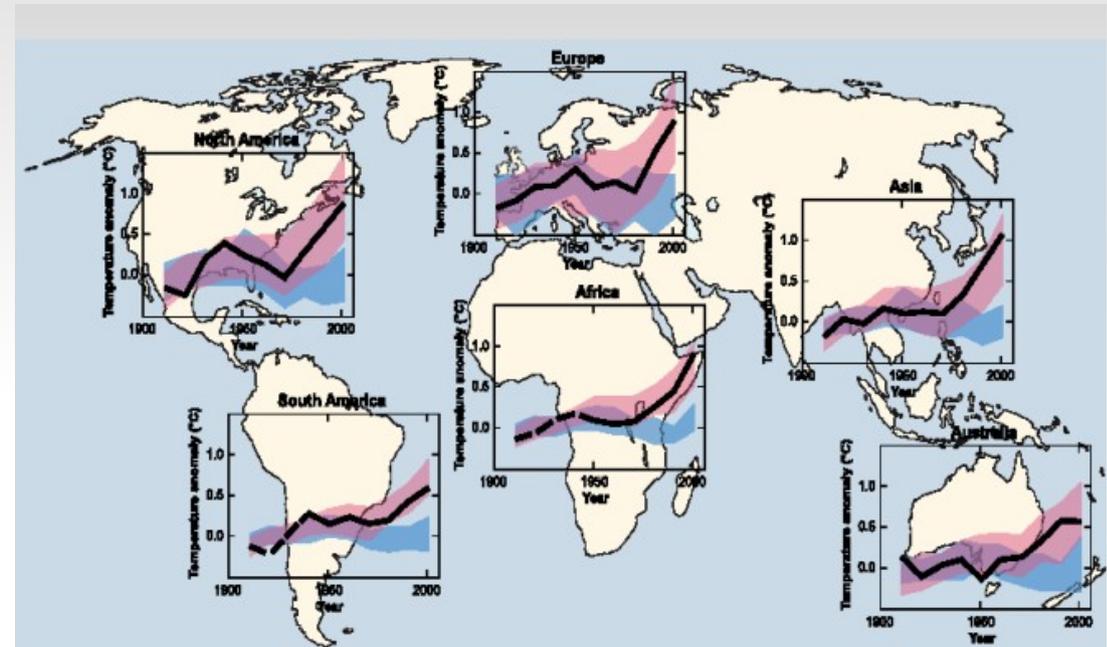
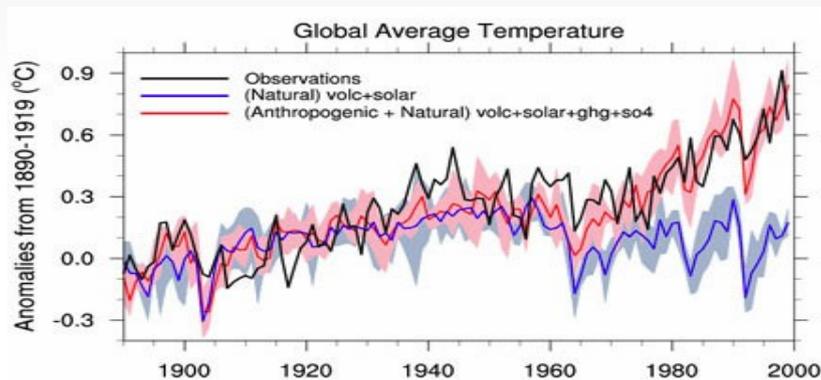
## ATRIBUCIÓN DE CAMBIOS OBSERVADOS A LA ACCIÓN HUMANA

Para explicar el cambio en la SST es necesario considerar el efecto antropogénico

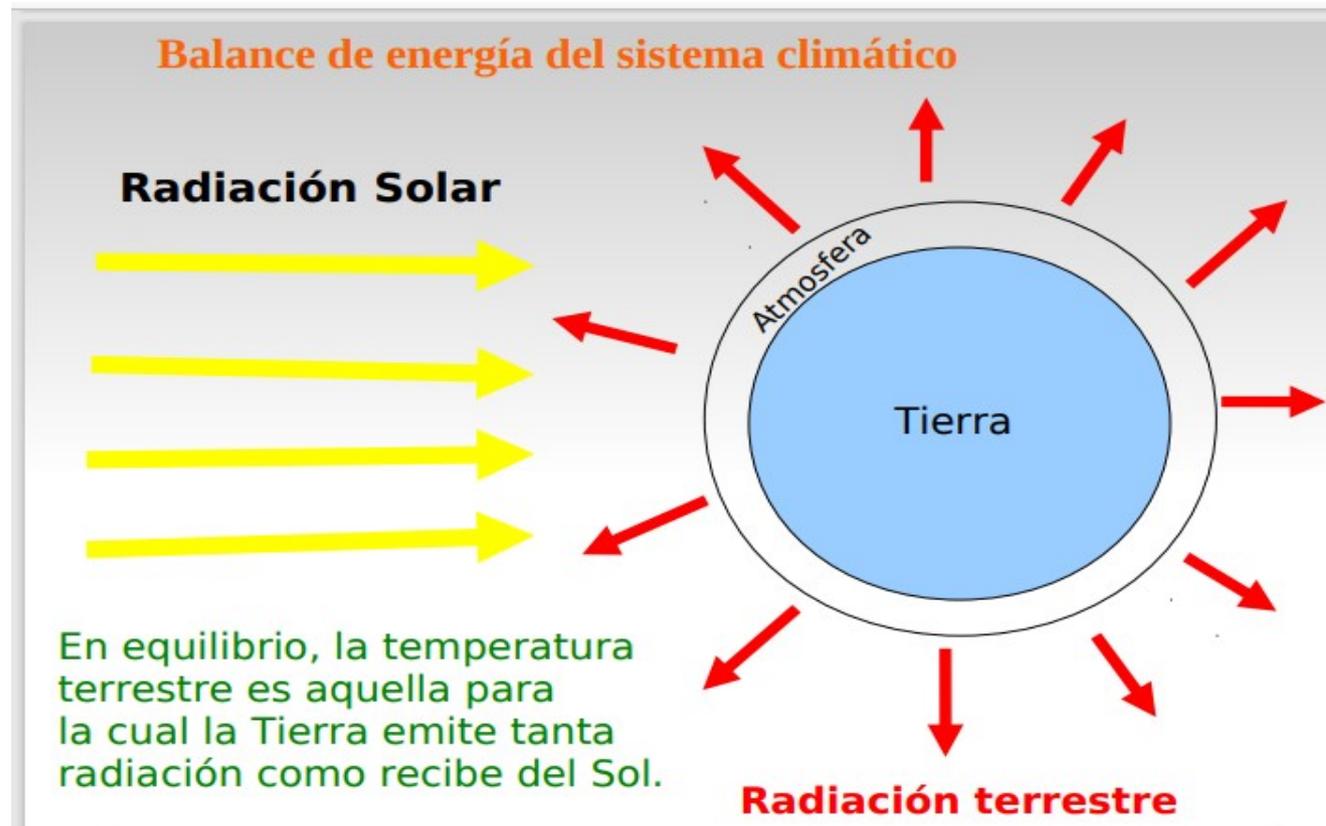
# ¿Cómo sabemos con certeza que el cambio es provocado por la acción humana?

POR CONTINENTE LA COSA NO ES TAN CLARA..

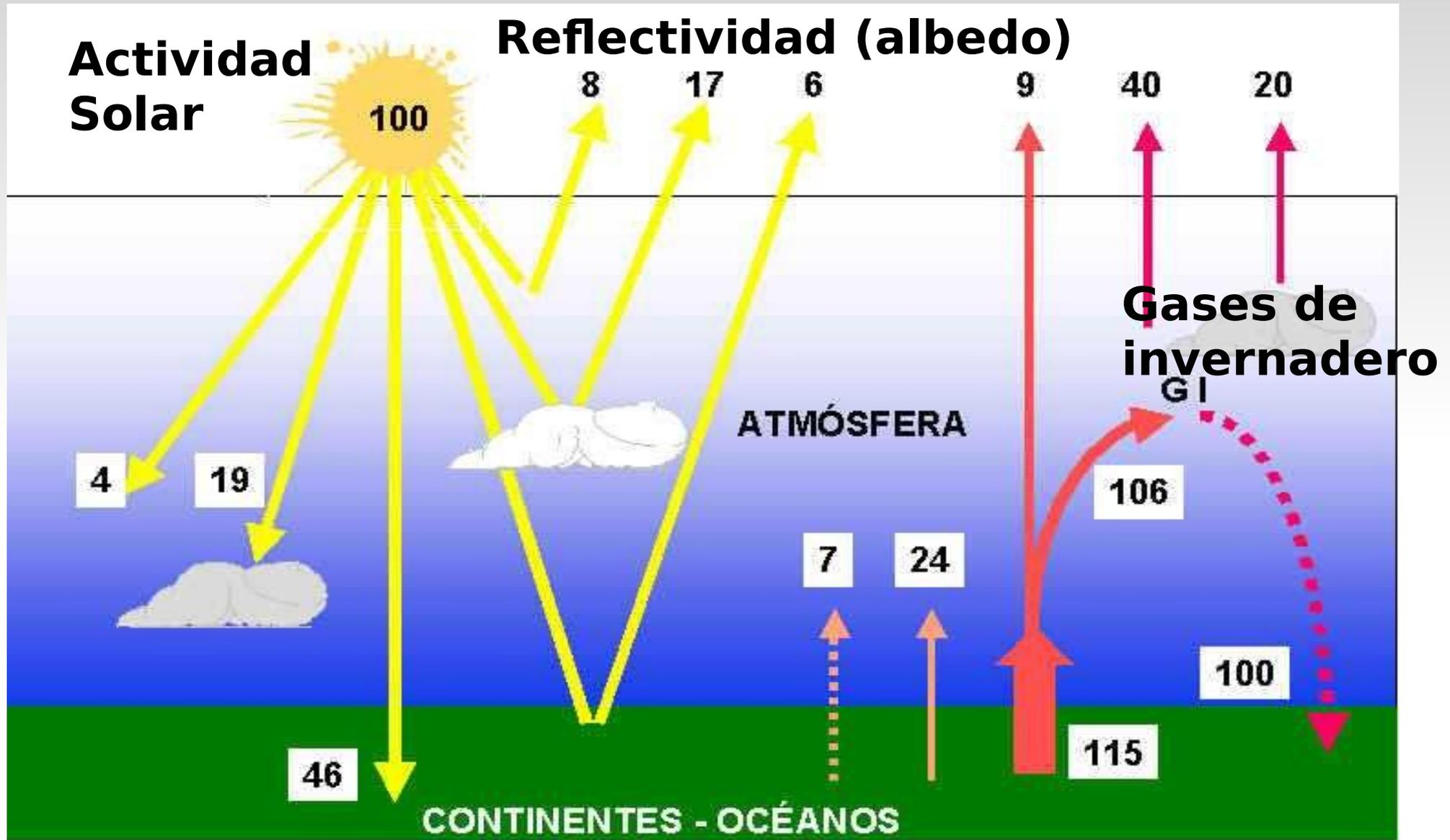
Sólo se puede simular la temperatura observada incluyendo el forzante antropogénico.



# ¿Cómo influye la acción humana sobre el clima?



# El balance radiativo depende de:

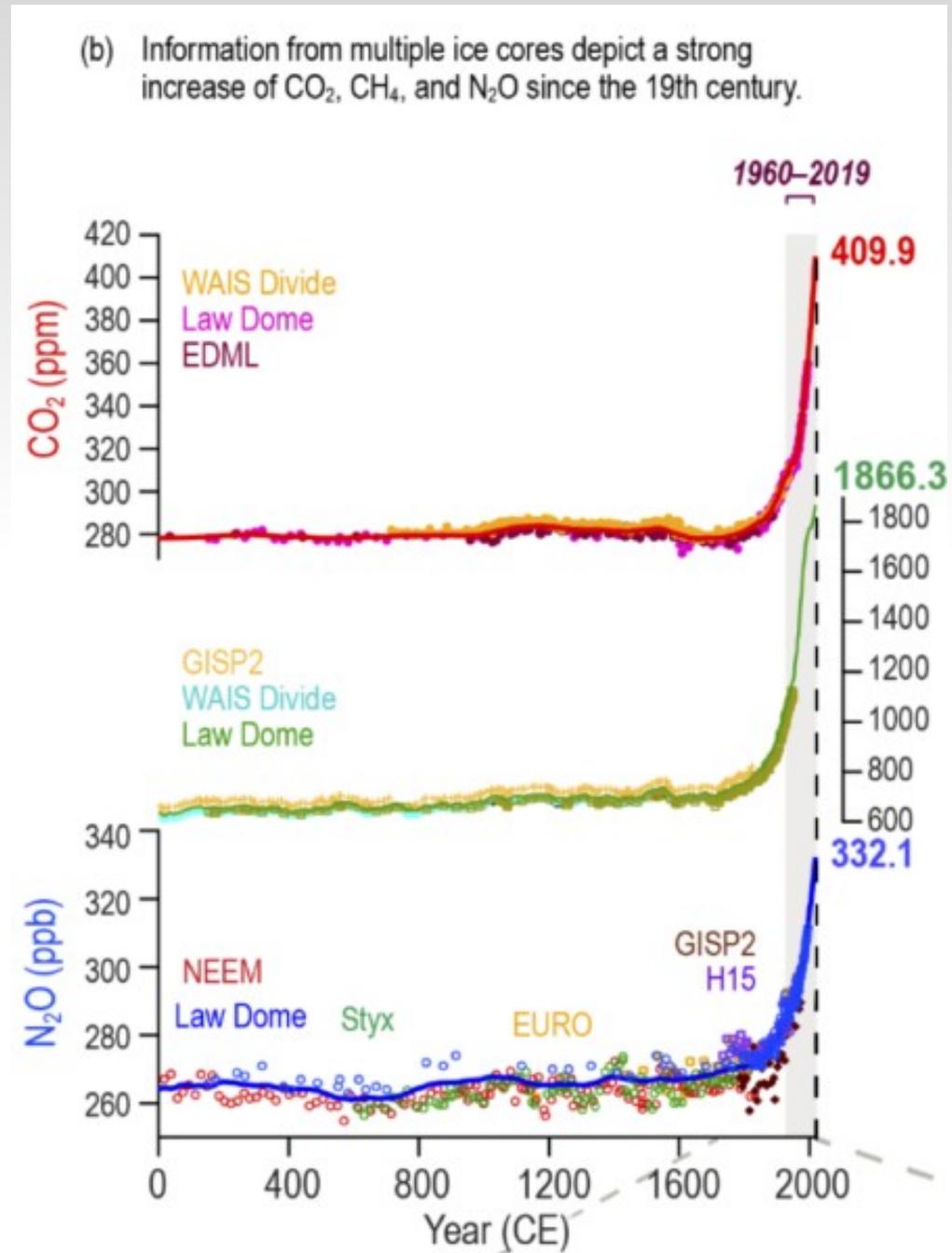


## ESQUEMA DEL BALANCE DE CALOR DEL SISTEMA CLIMÁTICO

-  RADIACIÓN TERRESTRE O DE ONDA LARGA
-  FLUJO DE CALOR SENSIBLE
-  RADIACIÓN SOLAR O DE ONDA CORTA
-  FLUJO DE CALOR LATENTE

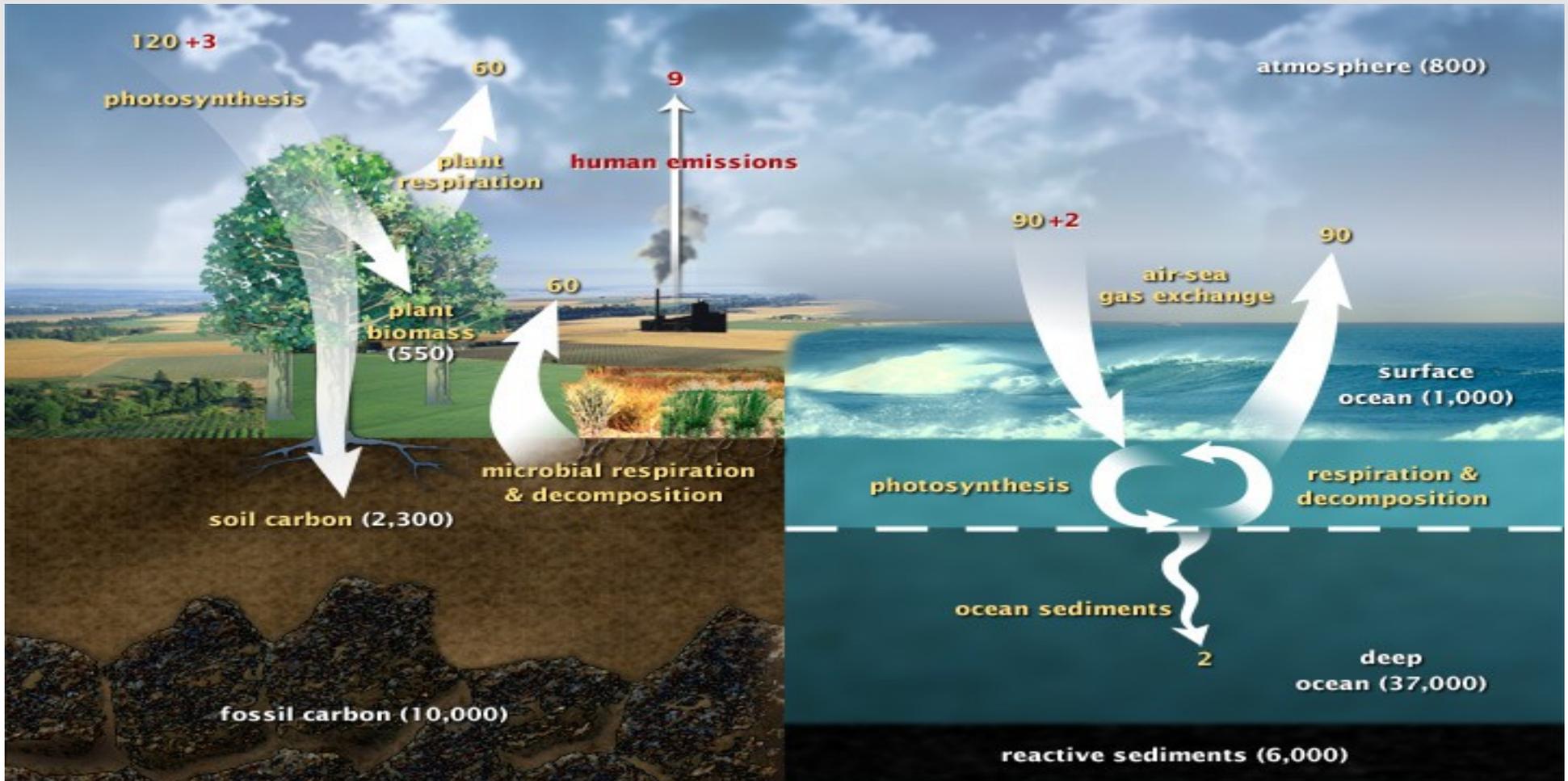
# Gases de invernadero

- Los más importantes son: vapor de agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ , y halocarbonos (grupo de gases conteniendo Cl, Br, F).





# Ciclo del Carbono



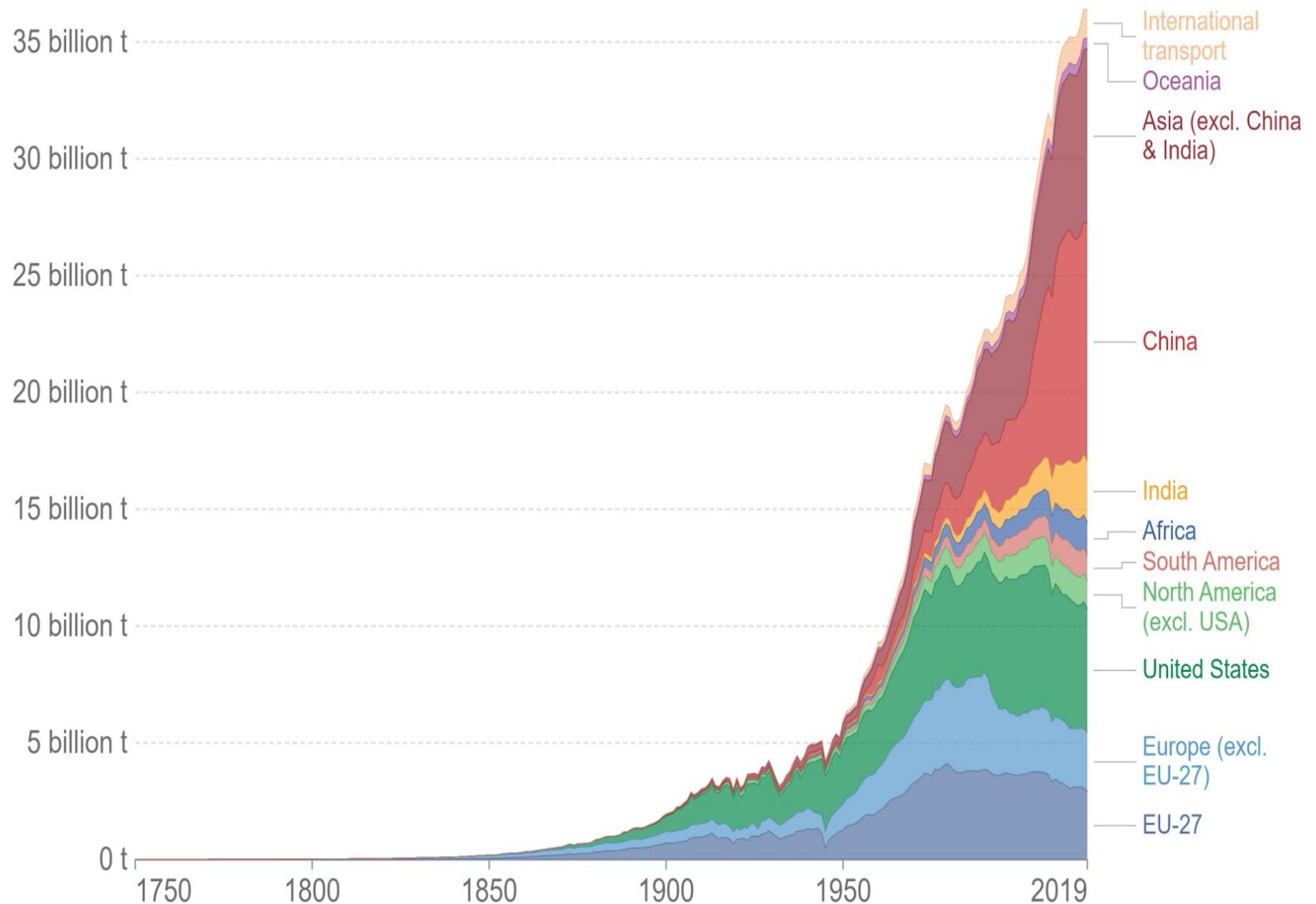
# Global warming potential (100 años)

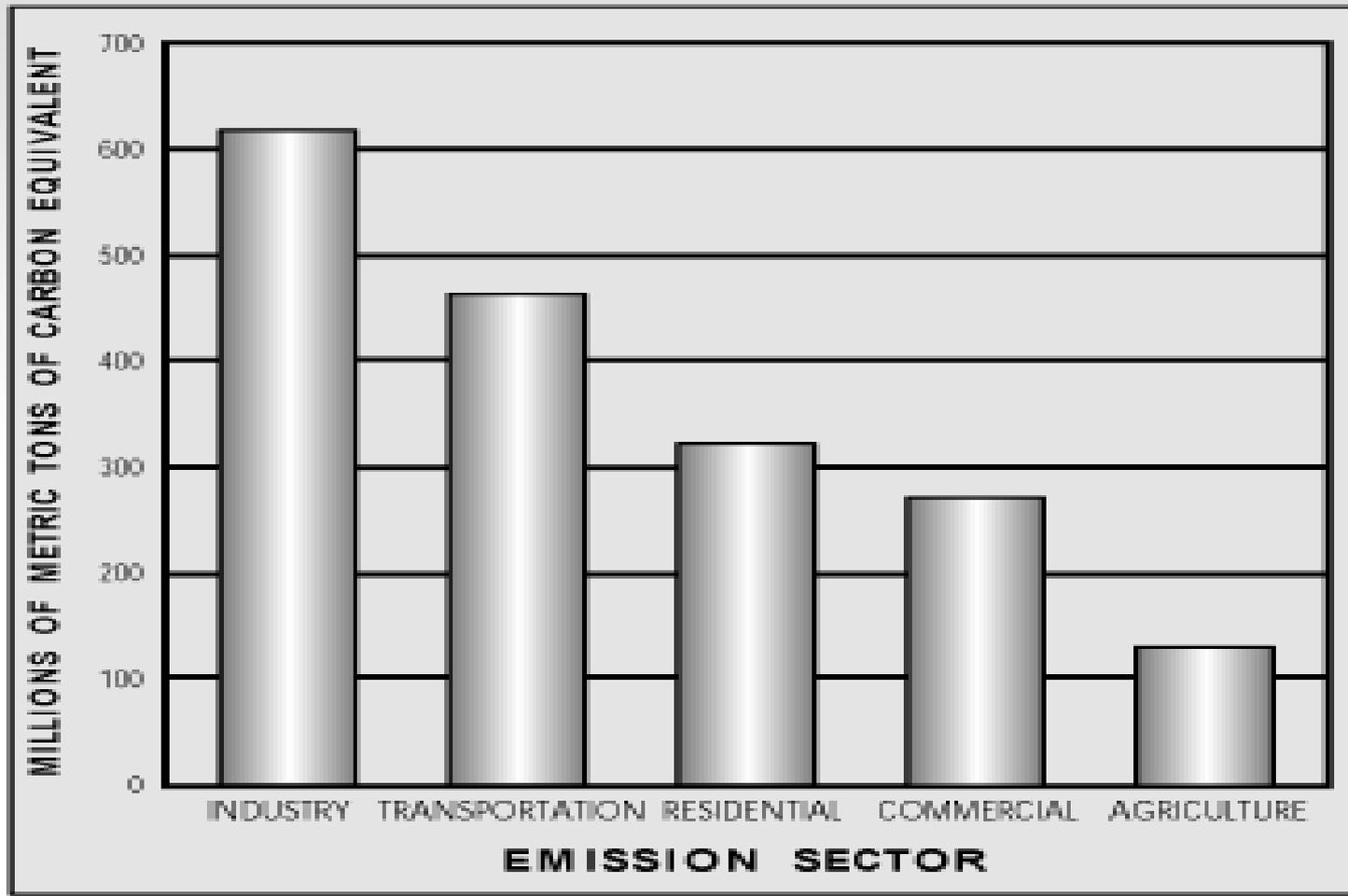
Chemical	GWP	Atmospheric Lifetime
CO <sub>2</sub>	1	50-200
Methane	21	9-12
N <sub>2</sub> O	310	120
HFCs	140-11,700	2-264
SF <sub>6</sub>	23,900	3,200
PFCs	6,500-9,200	3,200-50,000

Source: US E.P.A. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 2004*

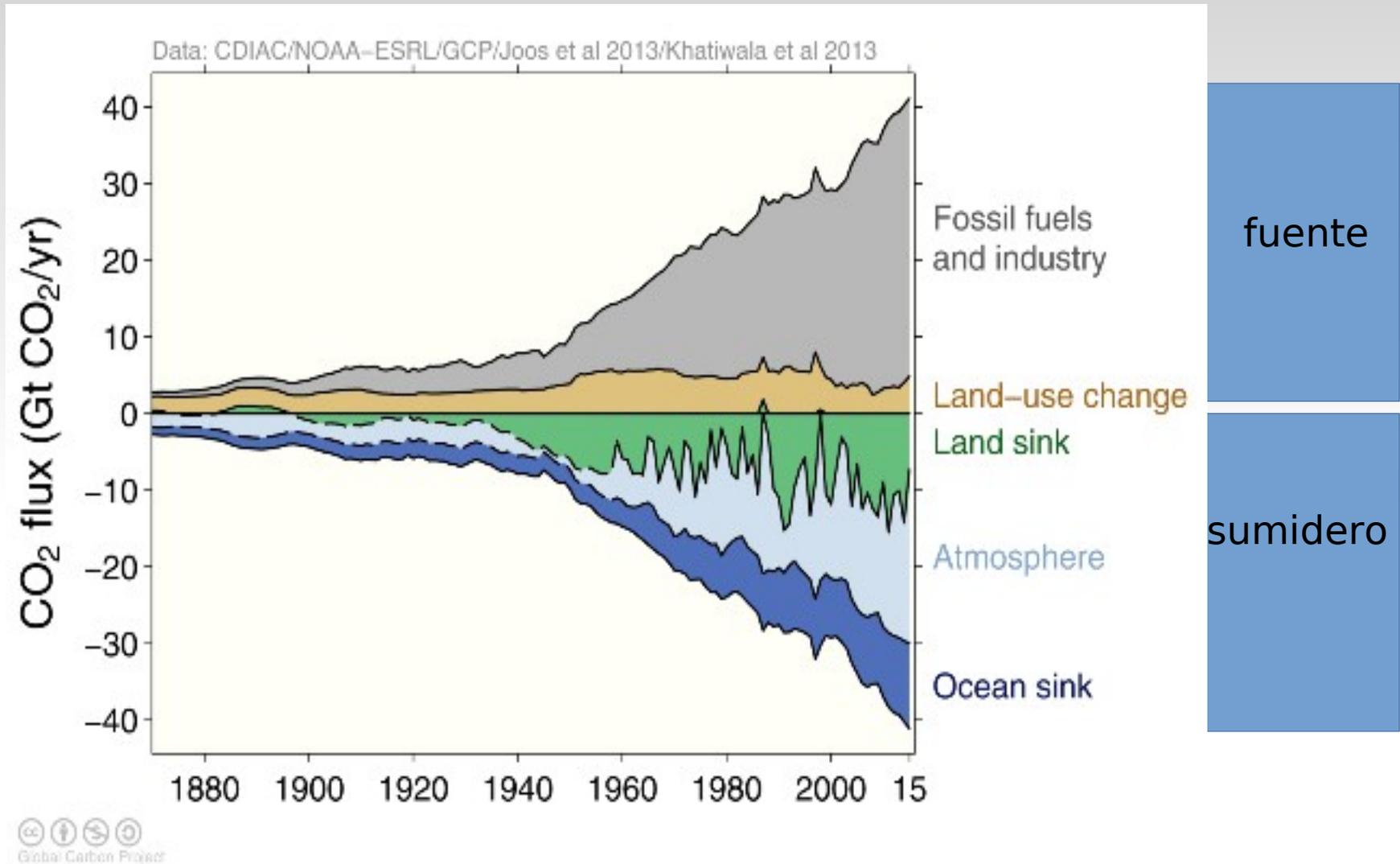
Global Warming Potential (GWP): medida utilizada para comparar el potencial de calentamiento de diferentes GEI en relación con el CO<sub>2</sub>. Se utiliza para evaluar y comparar el impacto climático de diferentes gases, tomando en cuenta tanto su capacidad para atrapar el calor en la atmósfera como su tiempo de permanencia en la atmósfera.

# Annual total CO<sub>2</sub> emissions, by world region



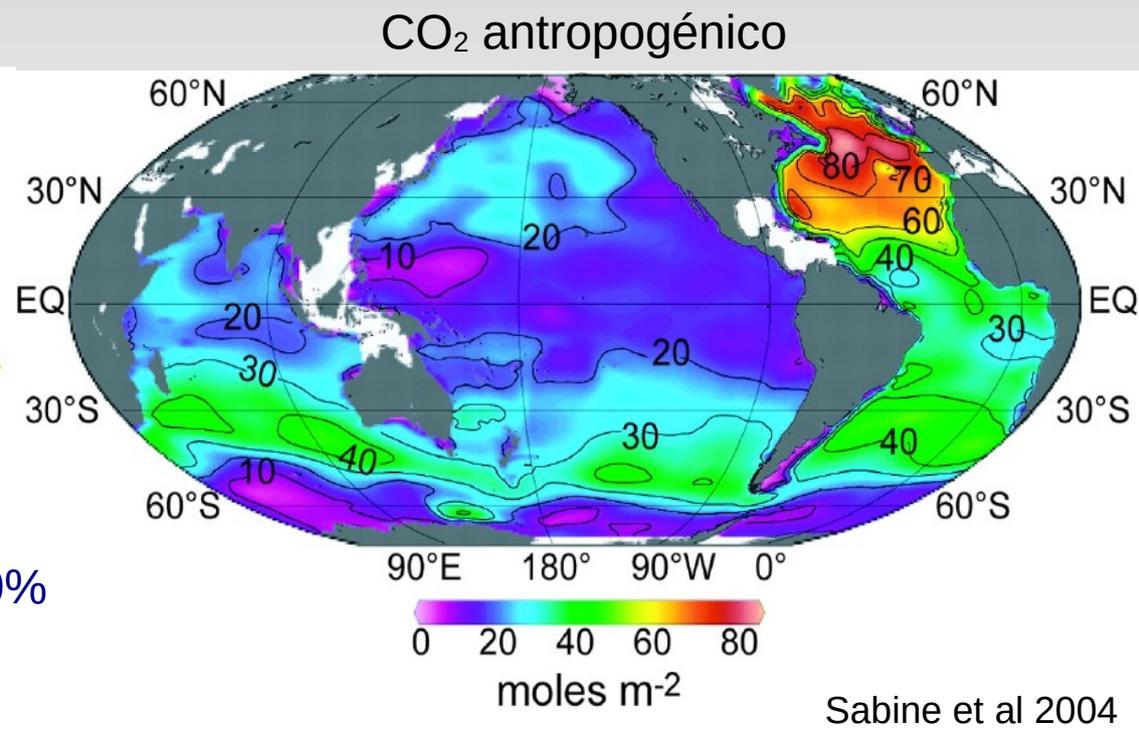
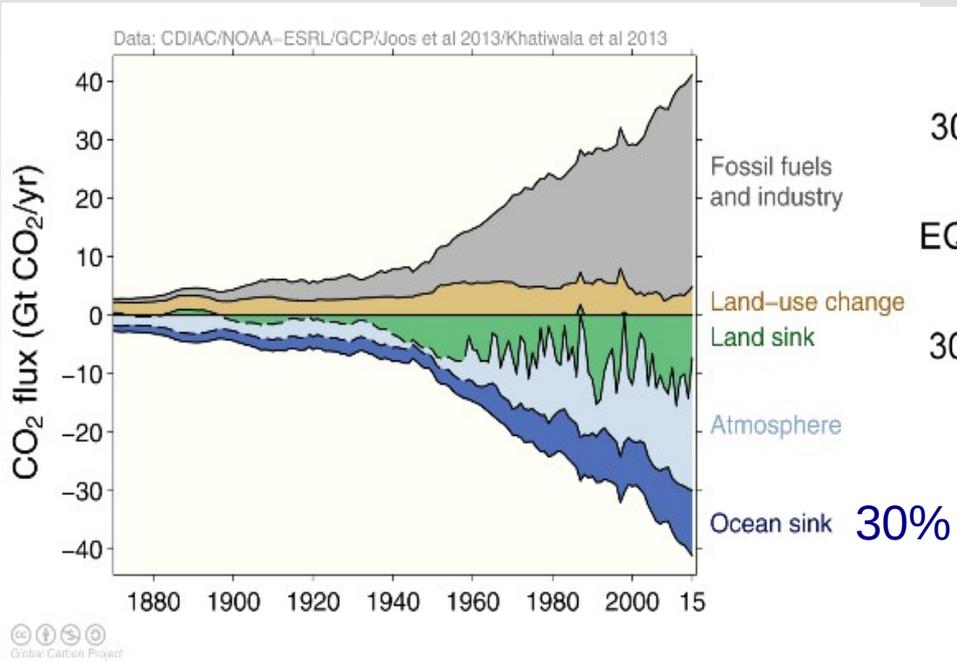


# ¿A donde va el CO<sub>2</sub> emitido?

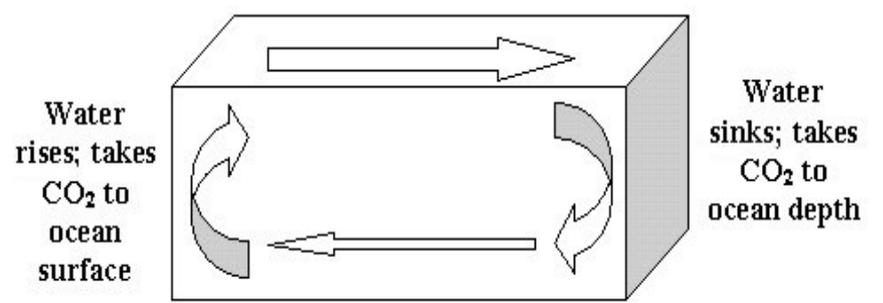


La mitad del CO<sub>2</sub> va a la atmósfera y la otra mitad es absorbida sobre todo por el océano.

# ¿A donde fue el CO<sub>2</sub> antropogénico?



- Máximos CO<sub>2</sub> están asociados a formación de aguas profundas en el Atlántico norte e intermedias en el hemisferio sur.
- Si el océano no hubiera absorbido el CO<sub>2</sub>, ahora habría 55 ppm mas en la atmósfera → 40% lo absorbió el océano Austral.

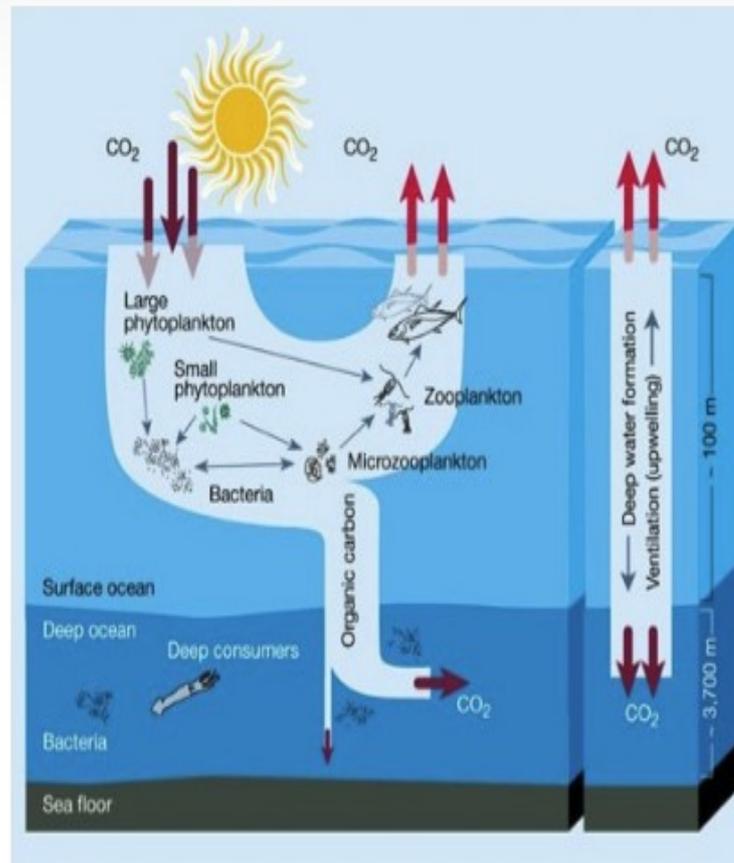


# Los océanos absorben carbono a través de dos mecanismos

## BOMBA BIOLÓGICA

## BOMBA FÍSICA

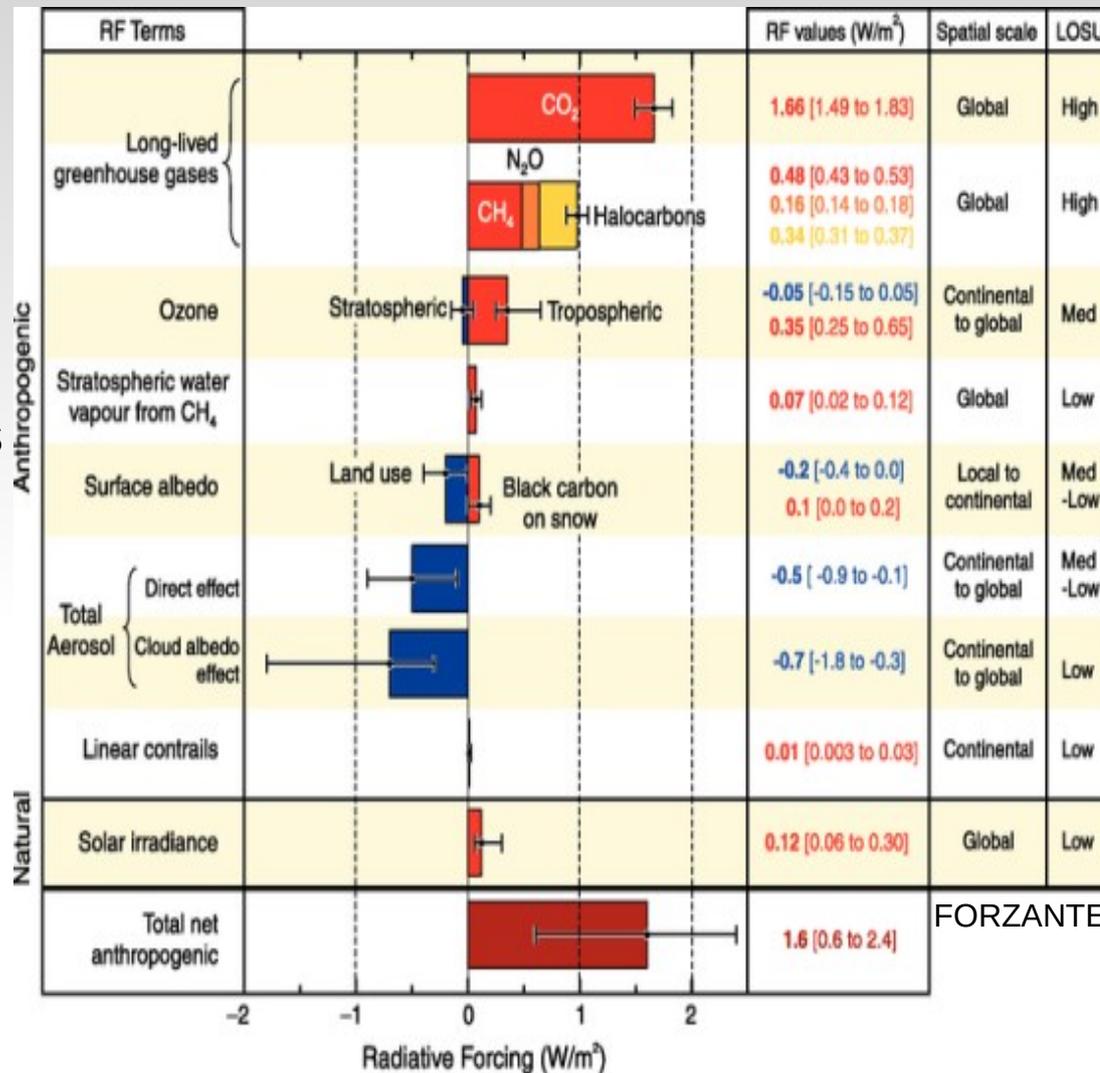
Consumo del  $\text{CO}_2$  por el fitoplancton para crecer, cuando muere se hunde y se remineraliza en el fondo.



Sitios de formación de aguas profundas frías (aumenta solubilidad de  $\text{CO}_2$ ) que llegan a la superficie y tiene un gran poder de absorber, no solo suben, sino que además bajan.

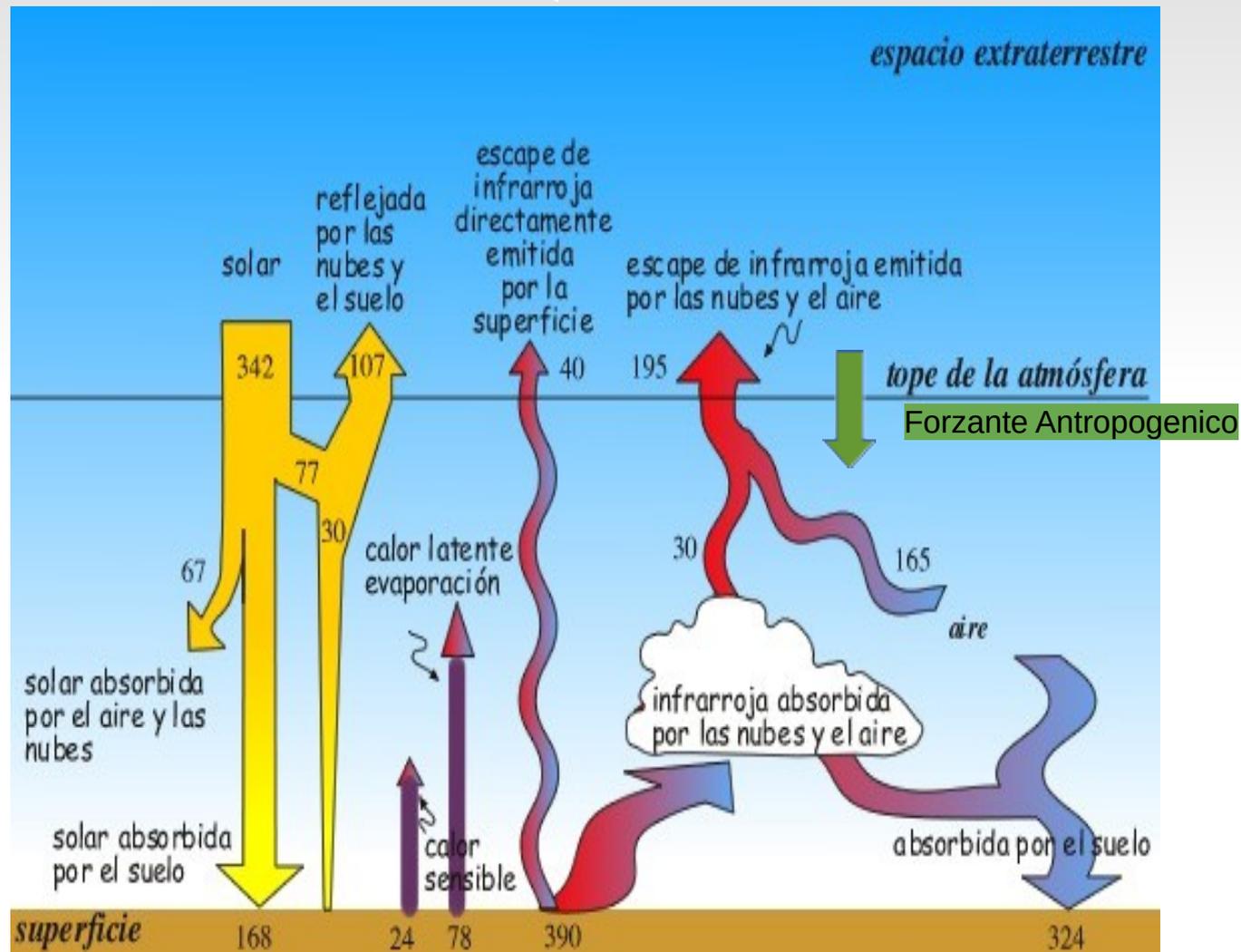
# GEI en la atmósfera

Impactan en el balance radiativo terrestre  
 Generando cambios en los flujos de energía  
 Al tope de la atmósfera

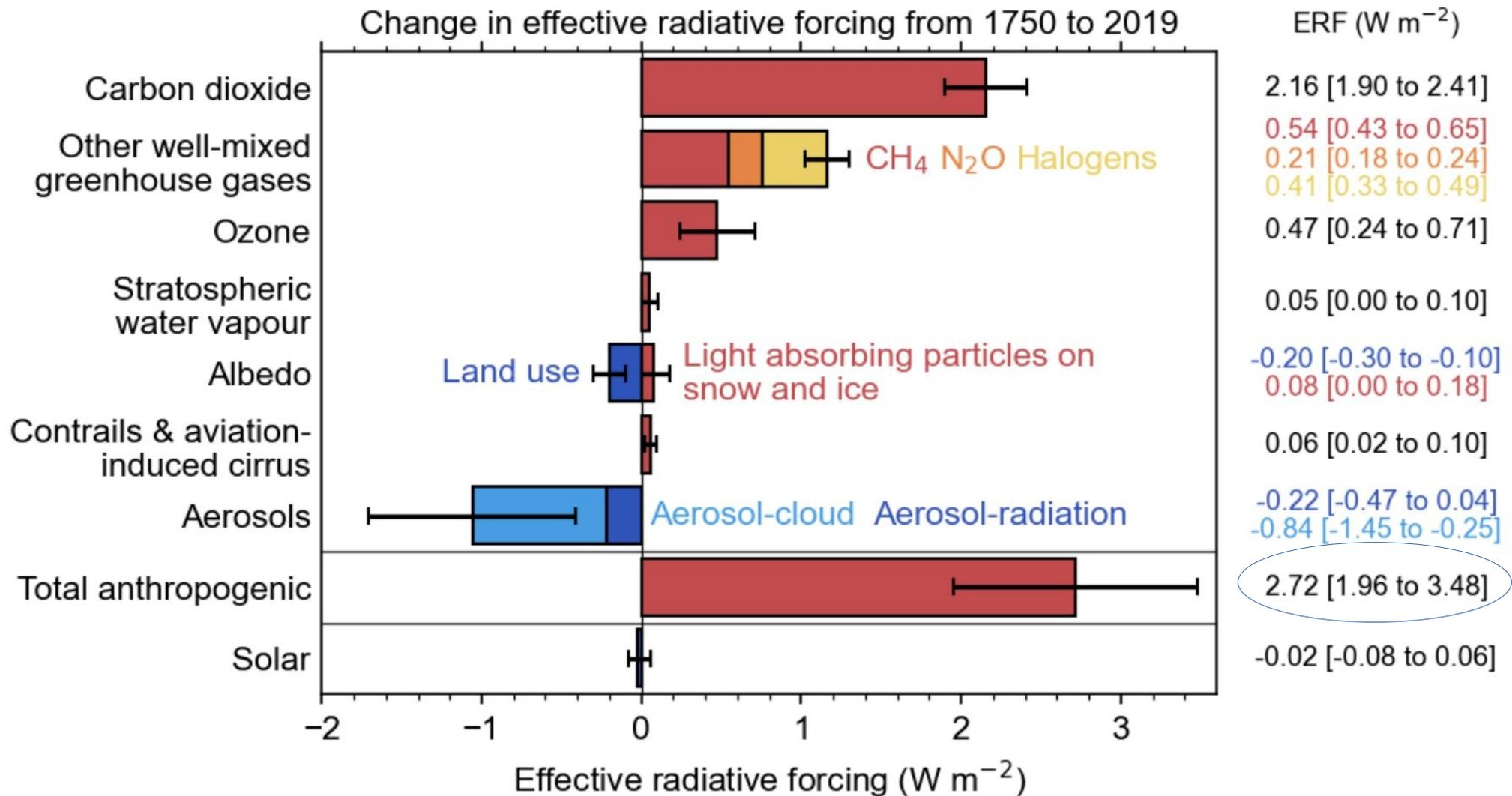


aumento de energía emitida hacia “abajo”  
 desde el tope de la atmosfera (FR resultante)

Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>), .... lo cual generó un aumento en la energía emitida hacia la superficie.



# Componentes de forzante radiativo



# Forzante radiativo

- Cambio neto de radiación en la tropopausa luego de que la estratósfera llega al equilibrio (pero manteniendo la Temp de superficie terrestre constante).

# Forzante radiativo

- Cambio neto de radiación en la tropopausa luego de que la estratósfera llega al equilibrio (pero manteniendo la Temp de superficie terrestre constante).
- El forzante radiativo puede relacionarse linealmente con un aumento de temperatura de superficie si se conoce la **sensibilidad climática  $\lambda$**

$$\Delta T_s = \lambda (FR)$$

# Sensibilidad climática

Broad agreement across multiple lines of evidence, supporting a best estimate of equilibrium climate sensitivity of 3°C, with a *likely* range of 2.5°C to 4°C

Equilibrium Climate Sensitivity in IPCC reports

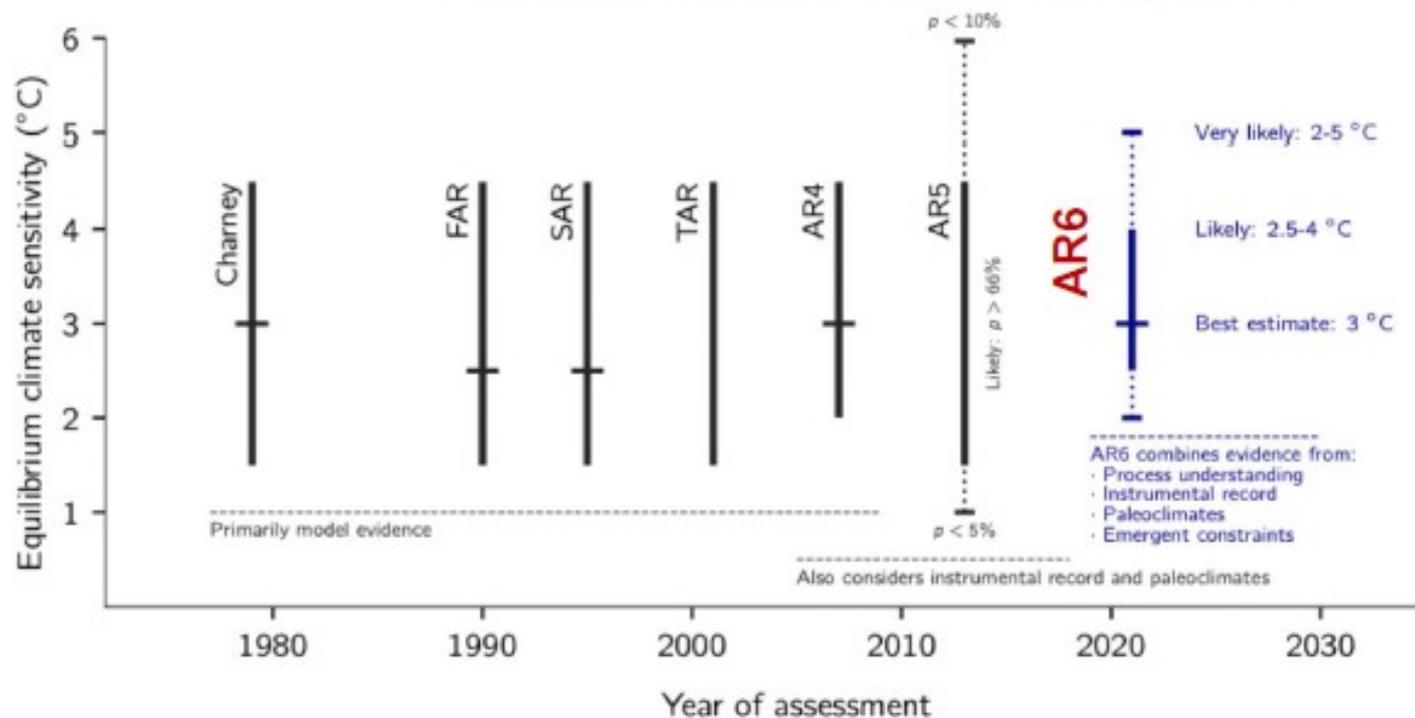


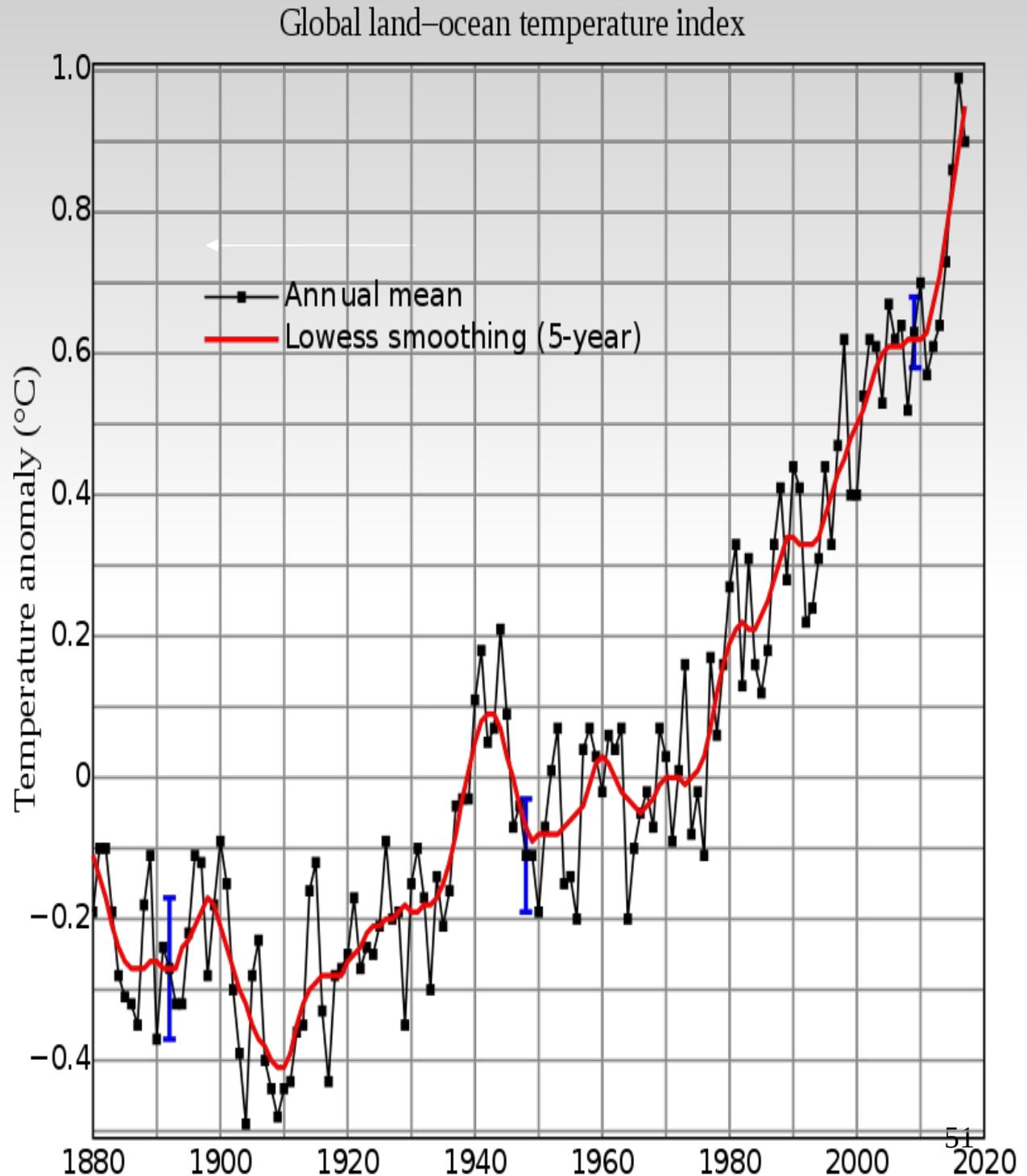
Figure TS.16

**Sensibilidad climática de equilibrio:**  
aumento de T ante una duplicación de concentración de CO<sub>2</sub>  
respecto a valores pre-industriales (o sea de 280 a 560 ppm)

Este incremento en el flujo radiativo se usa en el sistema climático para aumentar el contenido de calor de todos sus componentes y ha resultado en un aumento de la temperatura de superficie cercano a 1°C desde comienzos del siglo XX.

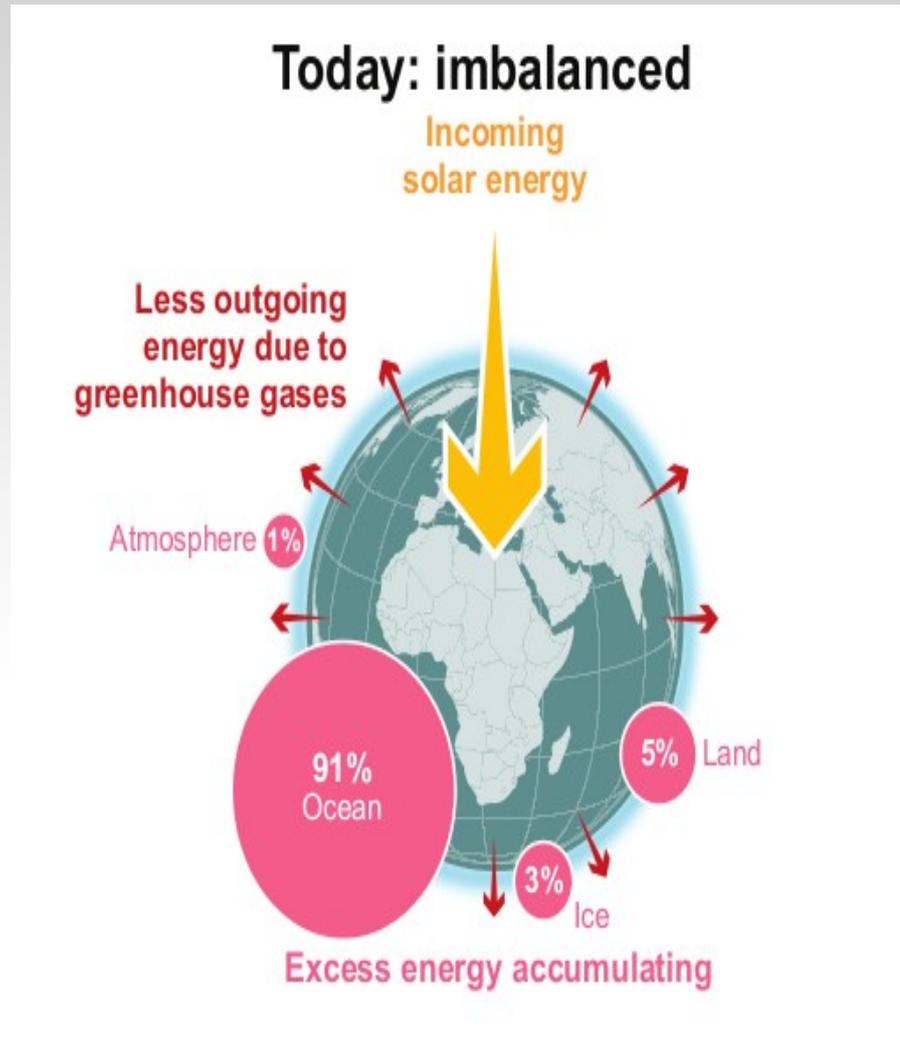
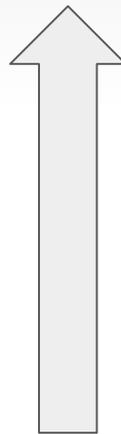
Este aumento en la temperatura de la atmósfera es el efecto más visible del cambio climático

13/06/23



Esa energía extra también ha incrementado el contenido térmico de los otros componentes del sistema climático, de tal forma que entre 1961 y 2003 el contenido de calor ha aumentado en:

- 14.10x10<sup>22</sup> J en el océano
- 0.45x10<sup>22</sup> J en los glaciares
- 0.50x10<sup>22</sup> J en la atmósfera
- 0.75x10<sup>22</sup> J en los continentes



Los océanos han absorbido el 90% del calentamiento adicional inducido por el forzante radiativo antropogénico. De no ser así, la Tierra se hubiera calentado más!

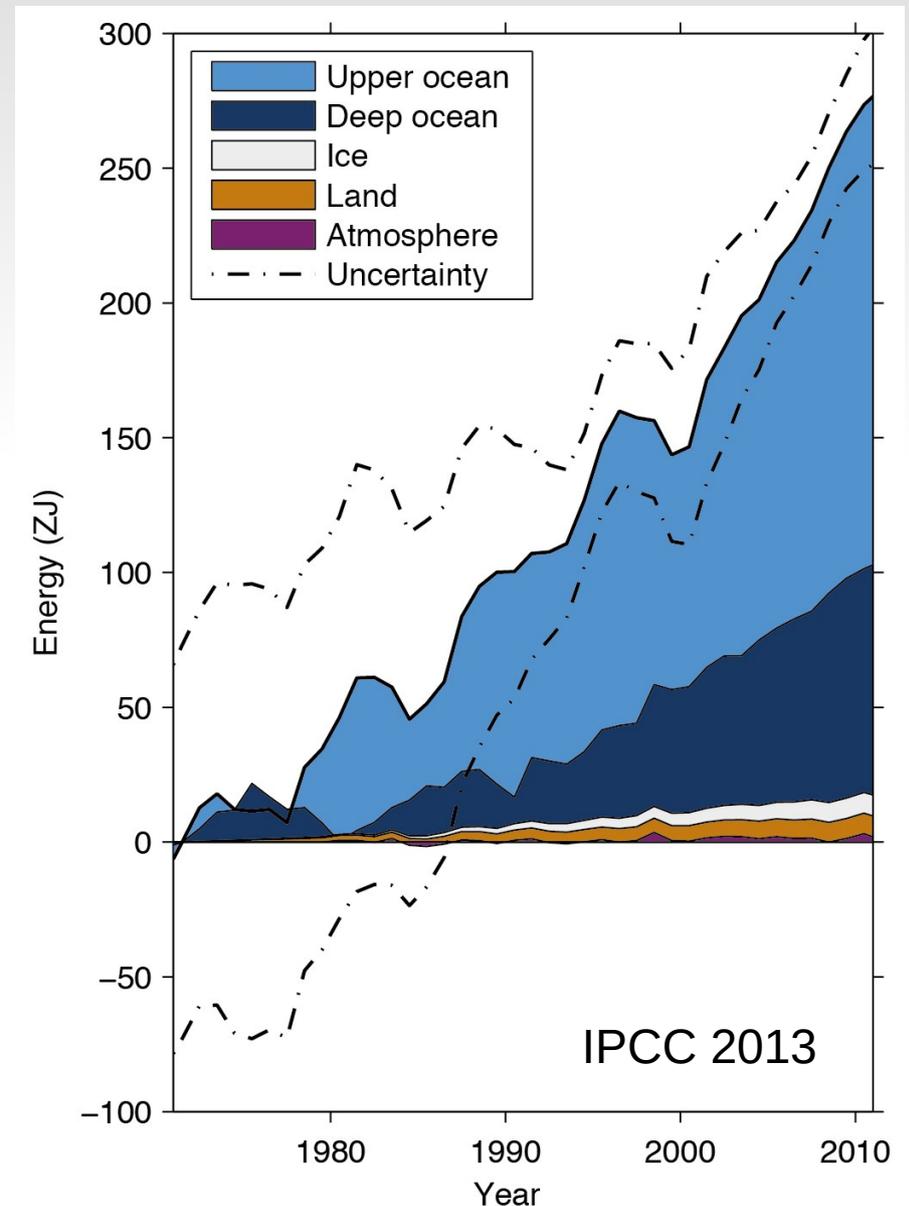
# Energía absorbida por los océanos

El océano global regula los flujos de energía y es el mayor reservorio de calor debido a su gran inercia térmica y transporte.

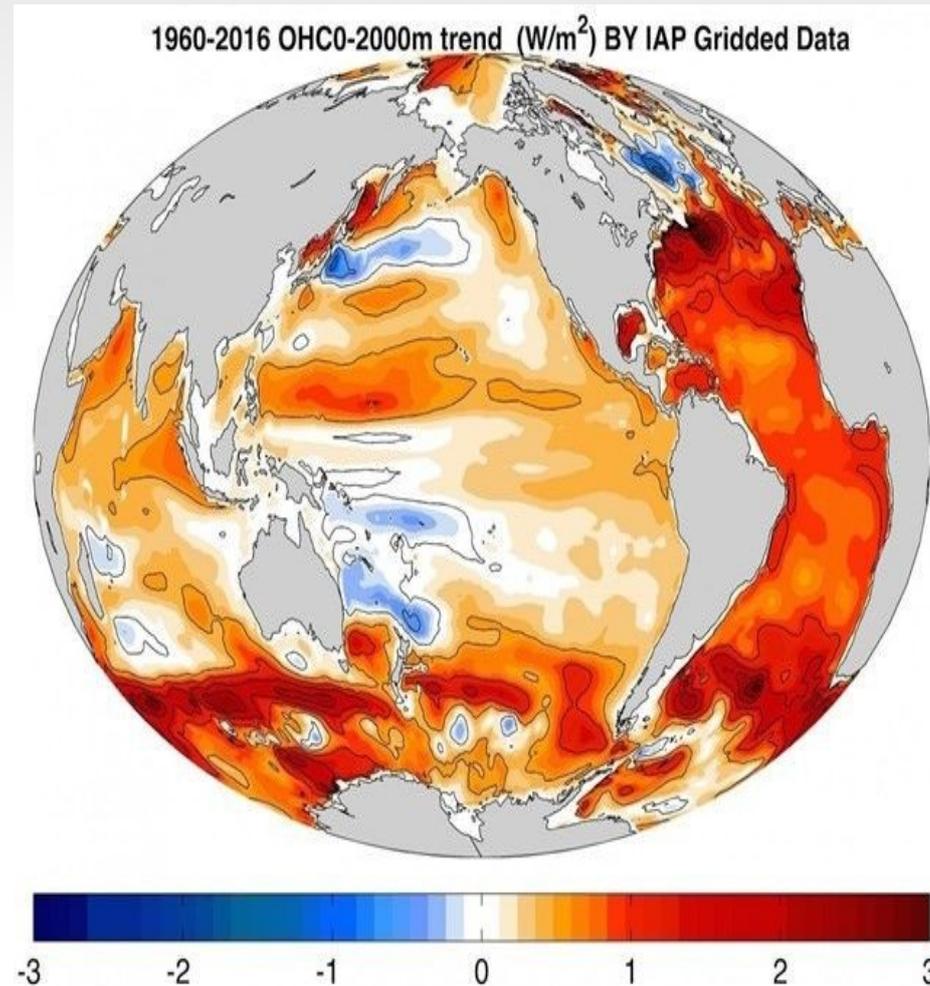
Más del 90% del exceso de energía antropogénica está en el océano.

Esa energía se evidencia en un calentamiento de los primeros 2000 m del océano.

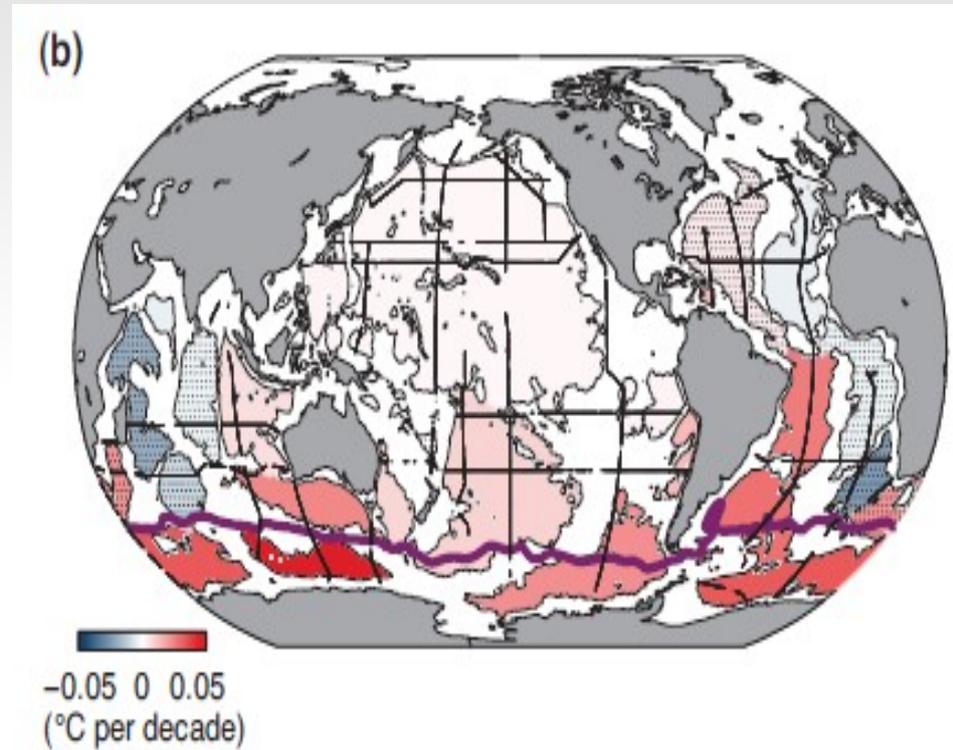
Si todo el calor hubiera ido a la atmósfera ésta se hubiera calentado decenas de grados!



El aumento en el contenido de calor en los océanos es una señal clara del impacto antropogénico en el clima

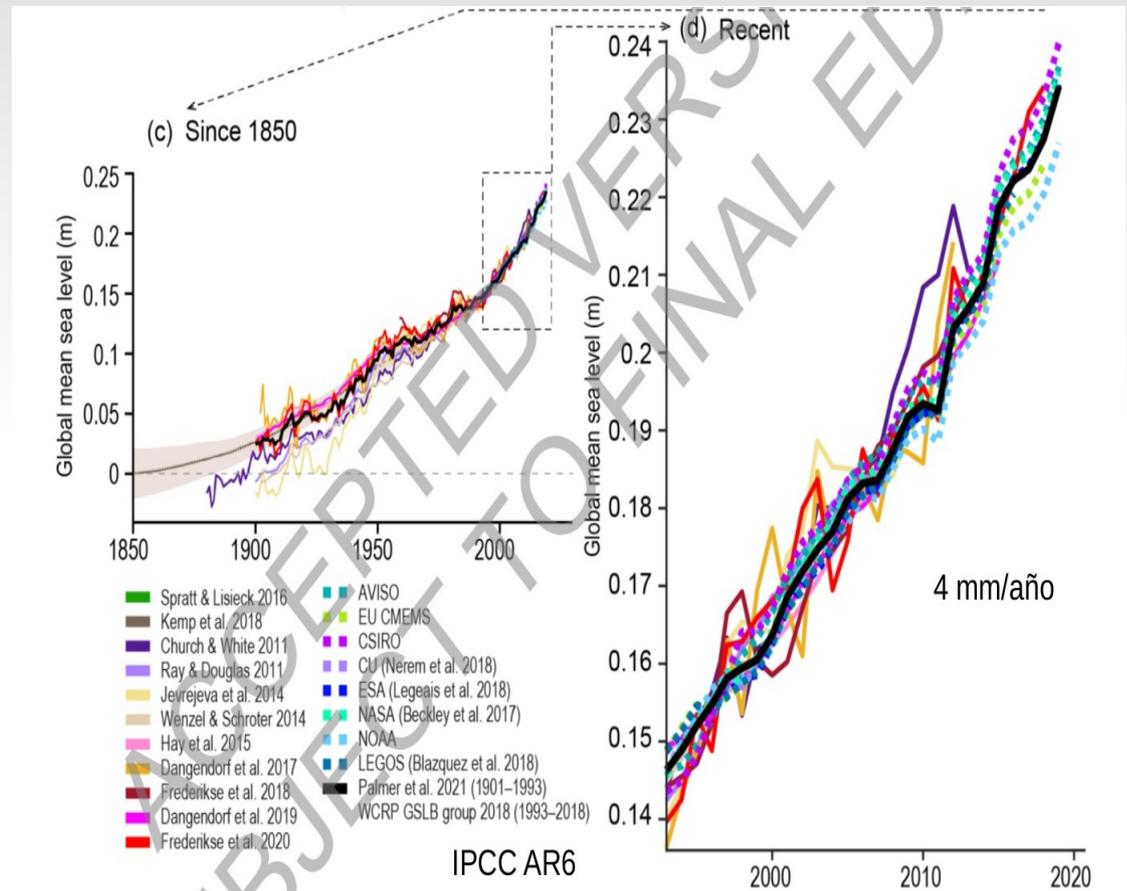


# Calentamiento por debajo de los 4000 m



# Aumento del nivel medio del mar

Este calentamiento de la columna de agua genera un aumento en el nivel del mar por expansión térmica y derretimiento de hielos, que actualmente ocurre a una velocidad media de 3.3 mm/año.



# Aumento del nivel medio del mar



GLOBAL CLIMATE CHANGE  
Vital Signs of the Planet



FACTS ARTICLES SOLUTIONS EXPLORE NASA SCIENCE MORE

## Sea Level

LATEST MEASUREMENT: August 2022

103 ( $\pm$  4.0) mm i

DOWNLOAD DATA \*

### Key Takeaway:

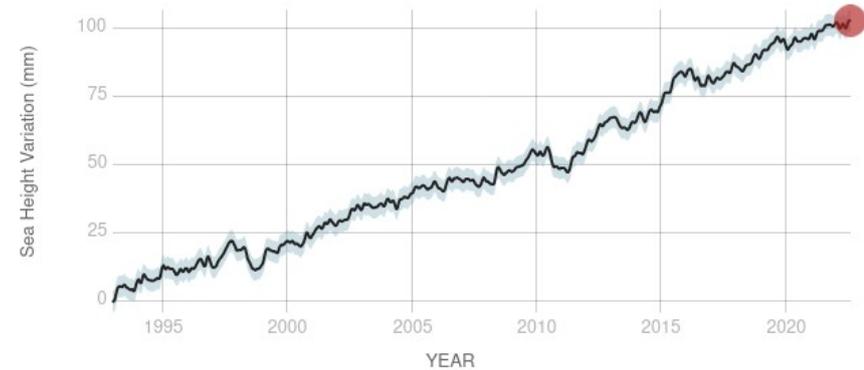
Global sea levels are rising as a result of human-caused global warming, with recent rates being unprecedented over the past 2,500-plus years.

### SATELLITE DATA: 1993-PRESENT

Data source: Satellite sea level observations.  
Credit: NASA's Goddard Space Flight Center

RISE SINCE 1993

↑ 102.5  
millimeters



Click+drag to zoom

RESET

Get Data: [HTTP](#) | Snapshot: [PNG](#)

De esta forma el océano tiene un importante rol en la regulación del clima debido a su gran inercia térmica y a través del transporte y el almacenamiento de calor y dióxido de carbono

# Derretimiento de los hielos



## Arctic Sea Ice Minimum

Arctic sea ice reaches its minimum each September. September Arctic sea ice is now declining at a rate of 13.3 percent per decade, relative to the 1981 to 2010 average. This graph shows the average monthly Arctic sea ice extent in September since 1979, derived from satellite observations.

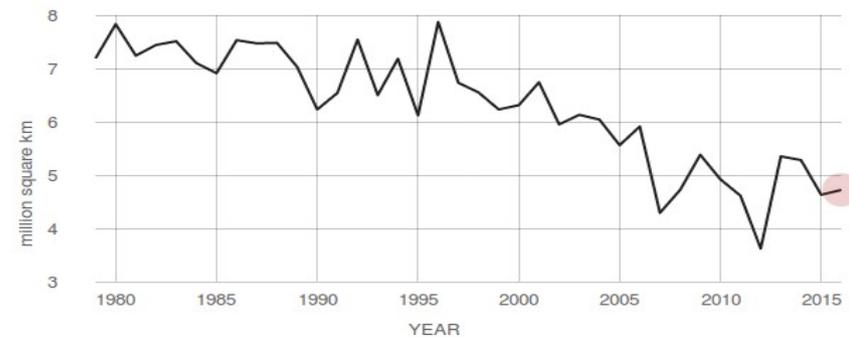
The animated time series below shows the annual Arctic sea ice minimum since 1979, based on satellite observations. The 2012 sea ice extent is the lowest in the satellite record.

### AVERAGE SEPTEMBER EXTENT

Data source: Satellite observations. Credit: NSIDC

### RATE OF CHANGE

↓ 13.3  
percent per decade



Snapshot: [PNG](#)

<http://climate.nasa.gov/vital-signs/>

# Derretimiento de los hielos

## Land Ice

Data from NASA's GRACE satellites show that the land ice sheets in both Antarctica and Greenland are losing mass. The continent of Antarctica has been losing about 134 gigatonnes of ice per year since 2002, while the Greenland ice sheet has been losing an estimated 287 gigatonnes per year. (Source: GRACE satellite data)

### Missions that observe land ice

[Gravity Recovery and Climate Experiment \(GRACE\)](#)

[NASA's IceBridge](#)

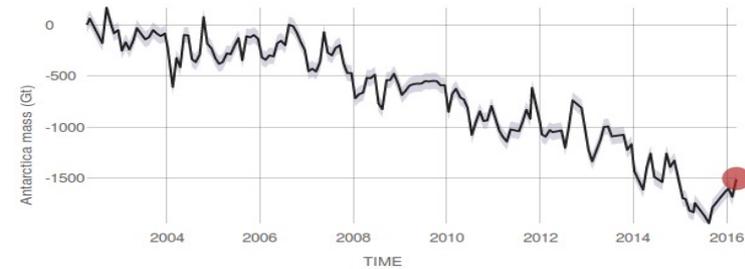
#### ANTARCTICA MASS VARIATION SINCE 2002

Data source: Ice mass measurement by NASA's GRACE satellites.  
Credit: NASA

RATE OF CHANGE

↓ 118.0

Gigatonnes per year  
margin: ±79



Get Data: [HTTP](#) | Snapshot: [PNG](#)

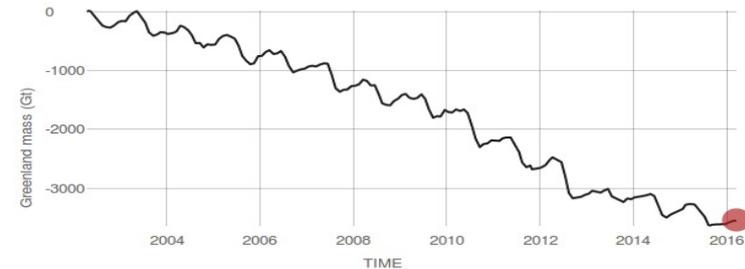
#### GREENLAND MASS VARIATION SINCE 2002

Data source: Ice mass measurement by NASA's GRACE satellites.  
Credit: NASA

RATE OF CHANGE

↓ 281.0

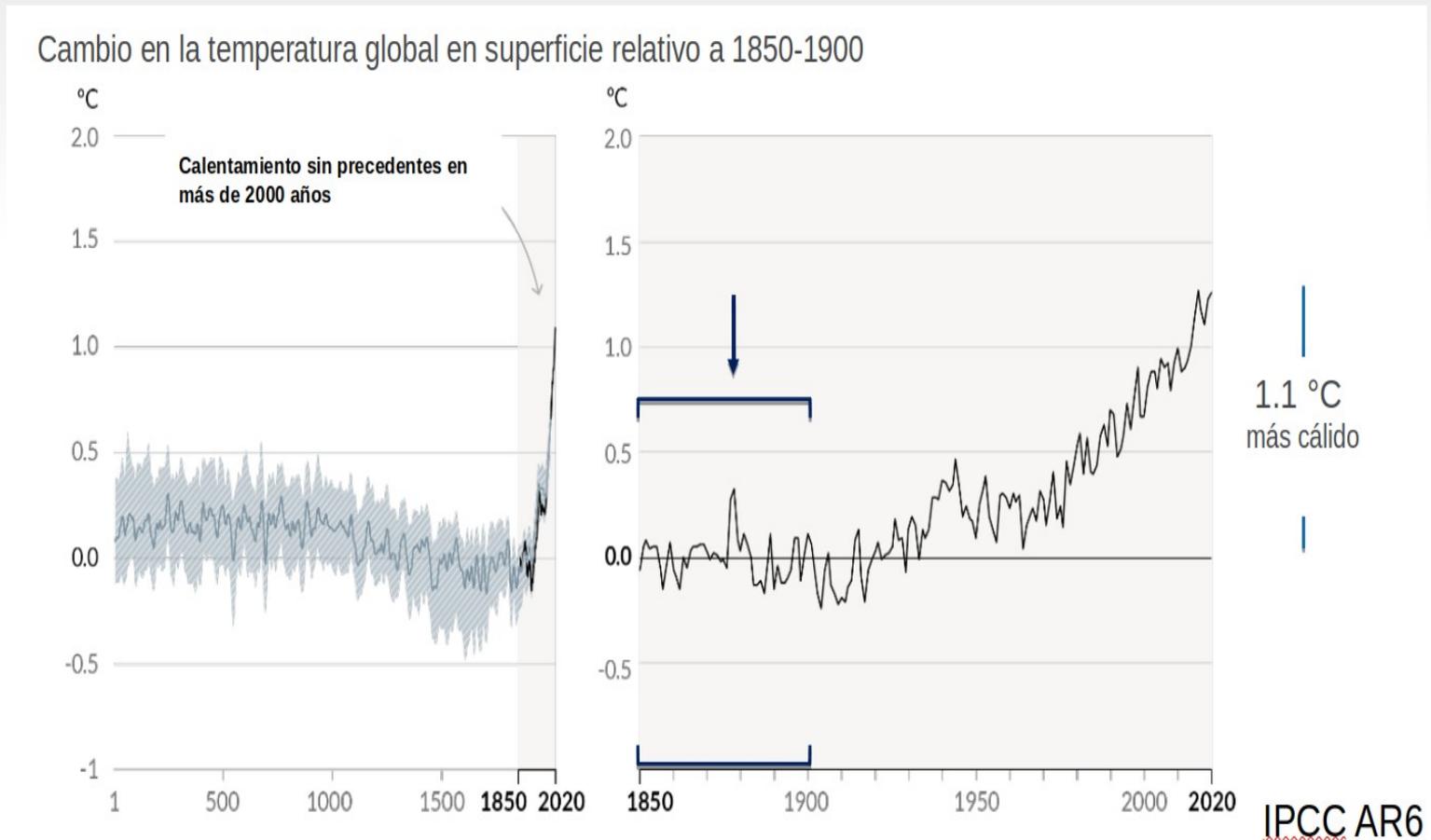
Gigatonnes per year  
margin: ±29



Get Data: [HTTP](#) | Snapshot: [PNG](#)

# Otro síntoma visible claro del aumento de contenido de calor es el aumento de la temperatura superficial

Un aumento exponencial de CO<sub>2</sub> da lugar a un aumento lineal de la T



## Más evidencia del CC

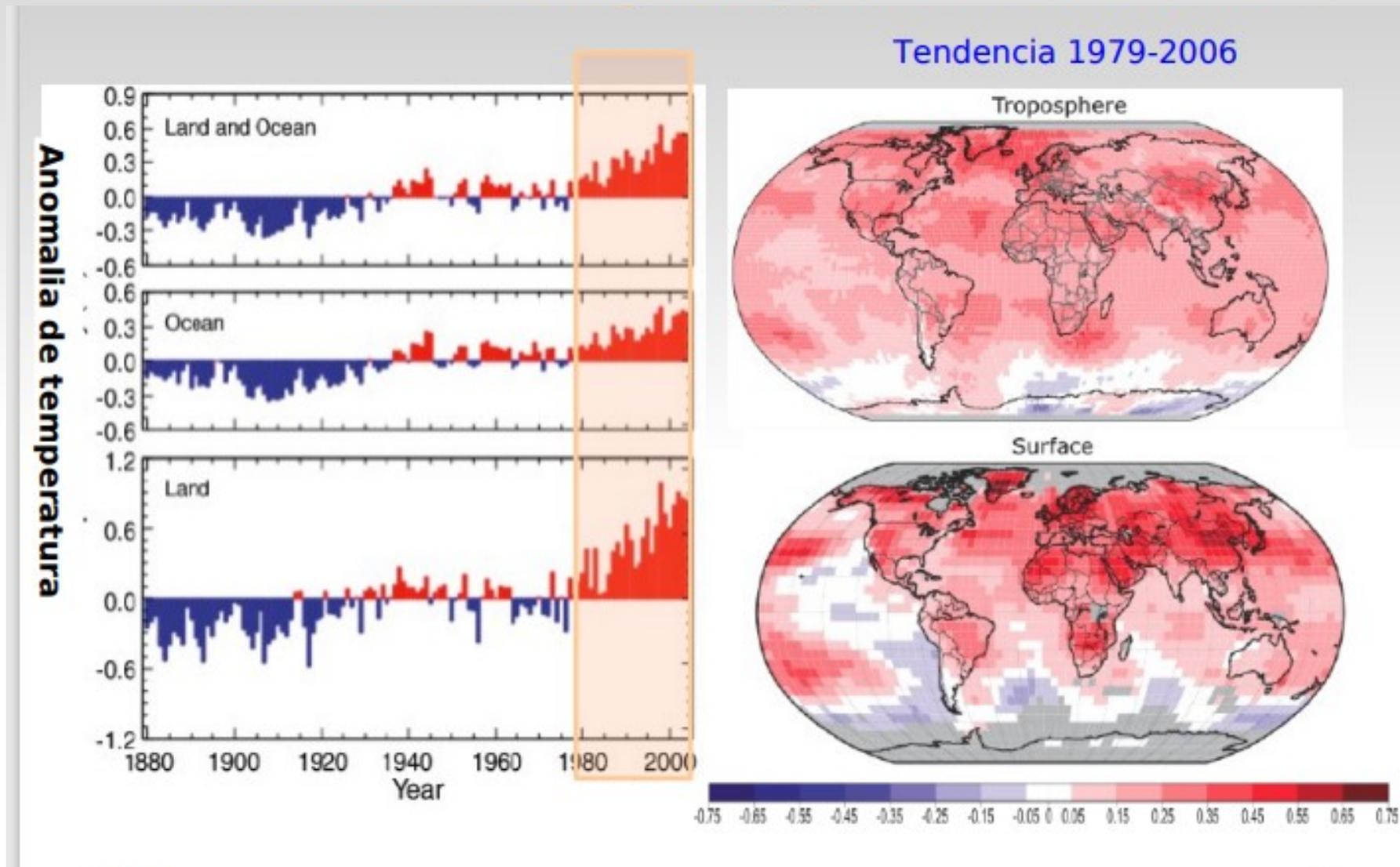
Aumento del nivel del mar en 17 cm en los últimos 100 años  
(derretimiento de hielos)

Aumento de la T:

- desde 1880, en especial desde 1970.
- En los últimos 12 años ocurrieron 10 de los años más cálidos.

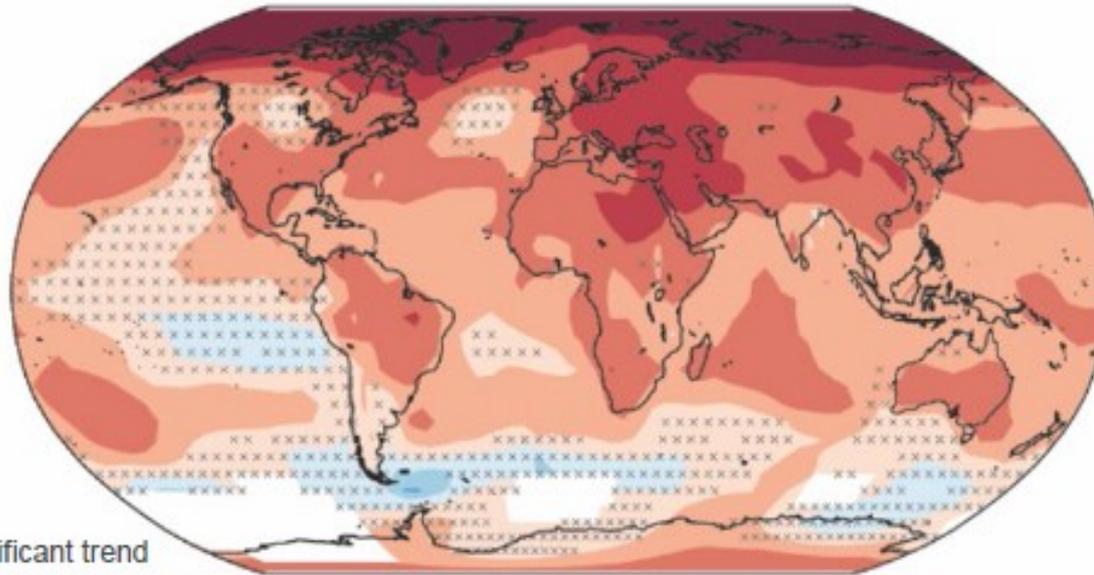
Los niveles de CO<sub>2</sub> están en su nivel más alto en los últimos  
650.000 años

# Calentamiento es global, pero NO uniforme!!!



# Calentamiento es global, pero NO uniforme!!!

1981–2020



x = non-significant trend



-0.6 -0.4 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.4 0.6

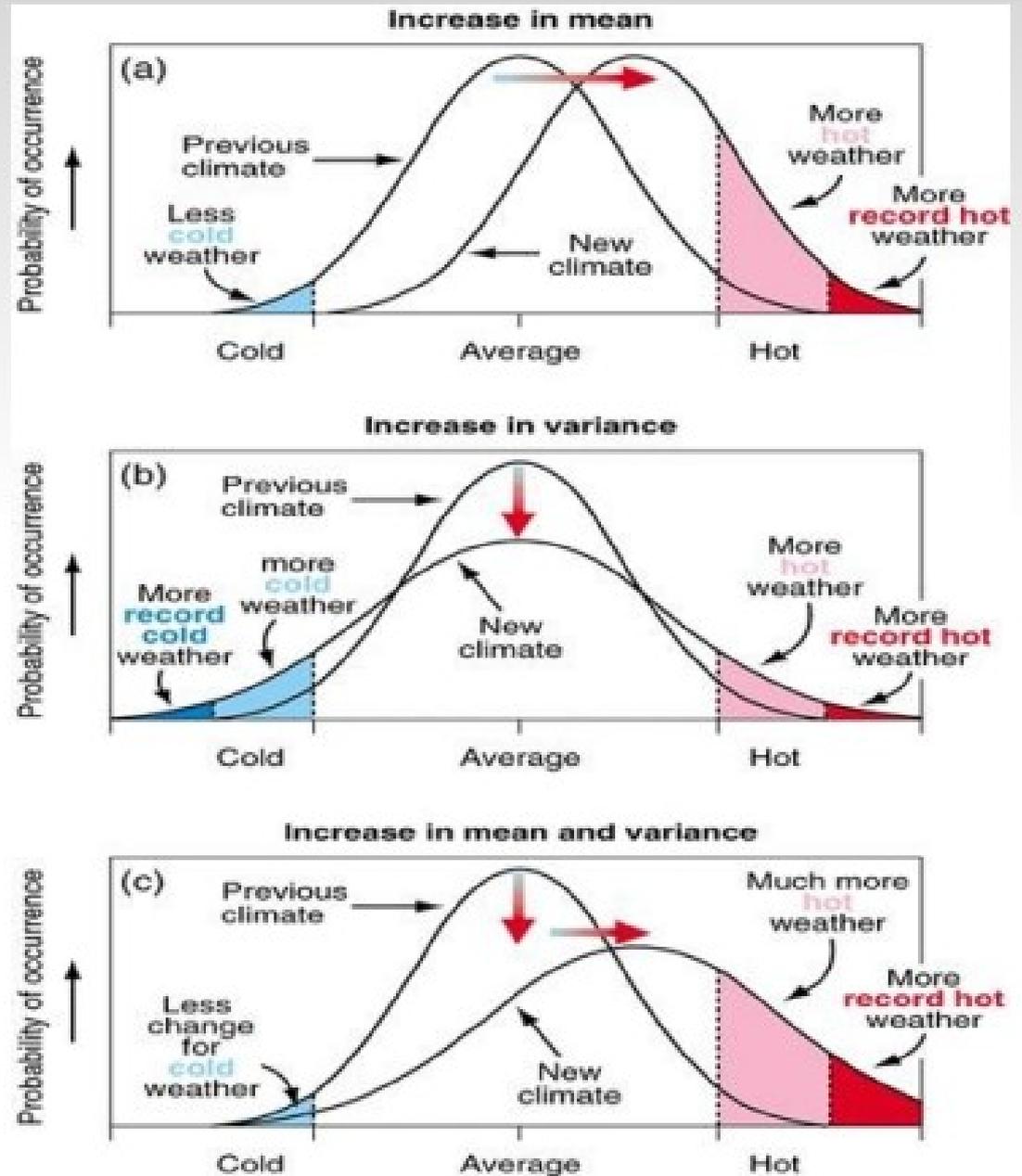
Trend (°C per decade)

Warming occurred at a faster rate after the 1970s compared to the first half of the 21st century.

*Cross-Section Box TS.1, Figure 1*

# Proyecciones climáticas

Las proyecciones buscan dar una idea de los cambios en las distribuciones estadísticas de variables atmosféricas en el clima del siglo XXI



Las proyecciones climáticas se realizan considerando escenarios: “Shared Socioeconomic Pathways” (SSP)

Los SSP5 son cinco.

SSP1 y SSP5 son optimistas con respecto al desarrollo humano con inversiones importantes en educación y salud, crecimiento económico rápido e instituciones fuertes. La diferencia radica en el uso de combustibles fósiles:

- SSP1 asume transición hacia un desarrollo sostenible
- SSP5 asume economía fuertemente basada en uso de combustibles fósiles.

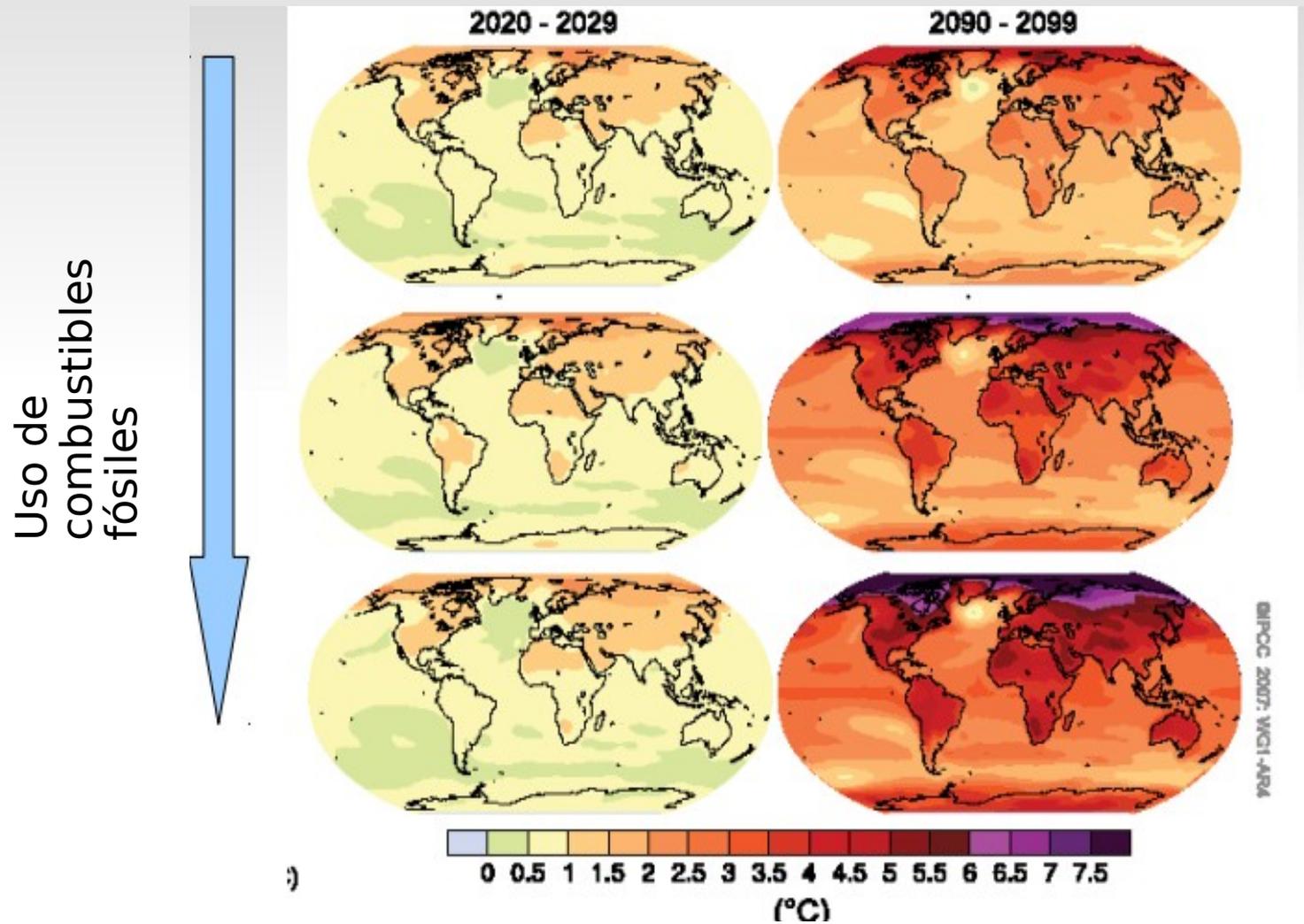
SSP3 y SSP4 son mas pesimistas: asumen poca inversión en educación y salud, crecimiento rápido de la población y desigualdad, lo cual resultaría en sociedades muy vulnerables al cambio climático. La diferencia radica en que:

- SSP3 asume países que priorizan la seguridad regional
- SSP4 asume que las desigualdades dominan en los países

Por último, SSP2 es el caso intermedio de desarrollo.

# Escenarios Futuros

El calentamiento global se acentuará



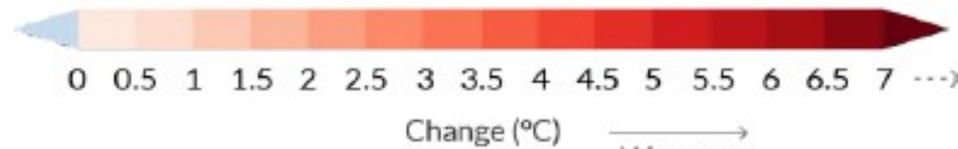
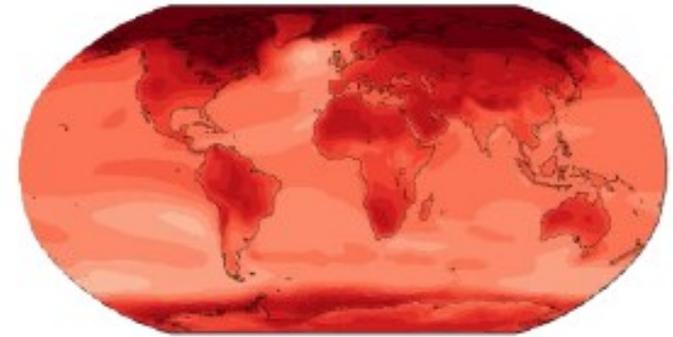
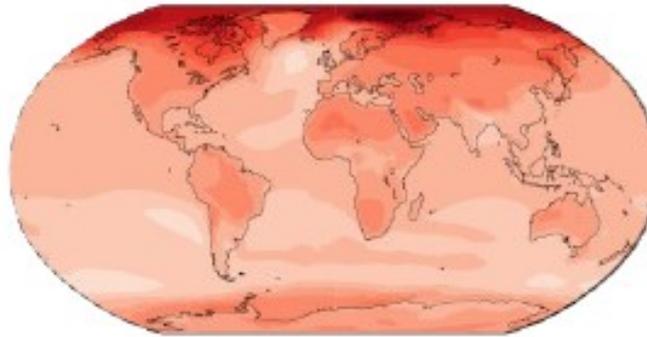
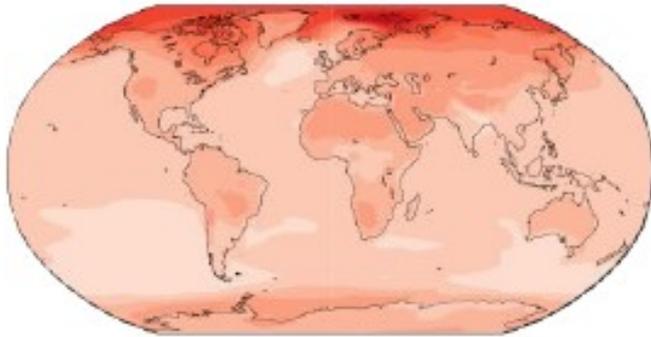
# Escenarios a futuro IPCC AR6

Annual mean temperature change (°C) relative to 1850-1900

1.5°C

2°C

at 4°C

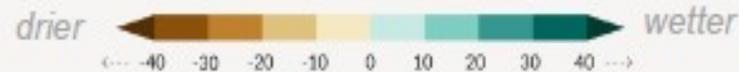
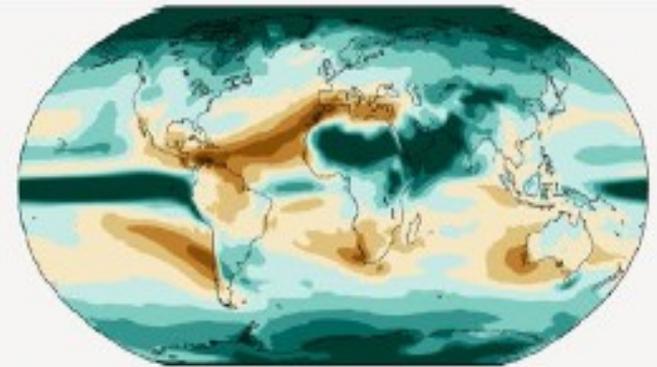
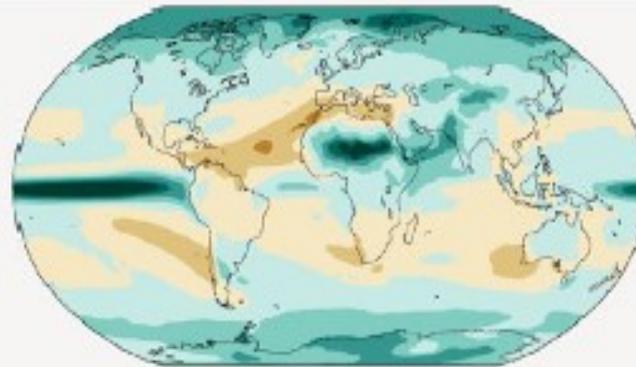
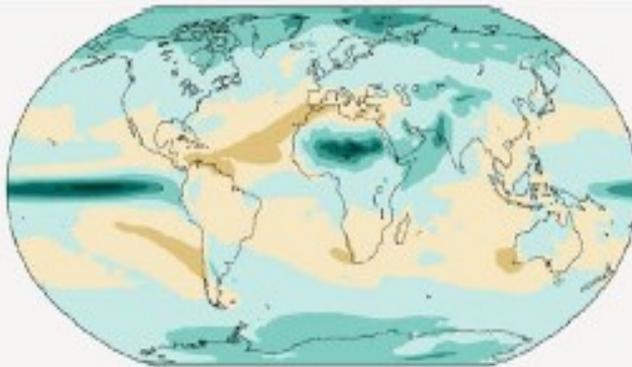


1.5°C

Change in annual precipitation (%) relative to 1850-1900

2°C

4°C



# Escenarios sobre Océanos y criósfera

Todas las predicciones climáticas coinciden en que

El retroceso de los glaciares y pérdida del hielo marino en el Ártico continuarán por décadas.

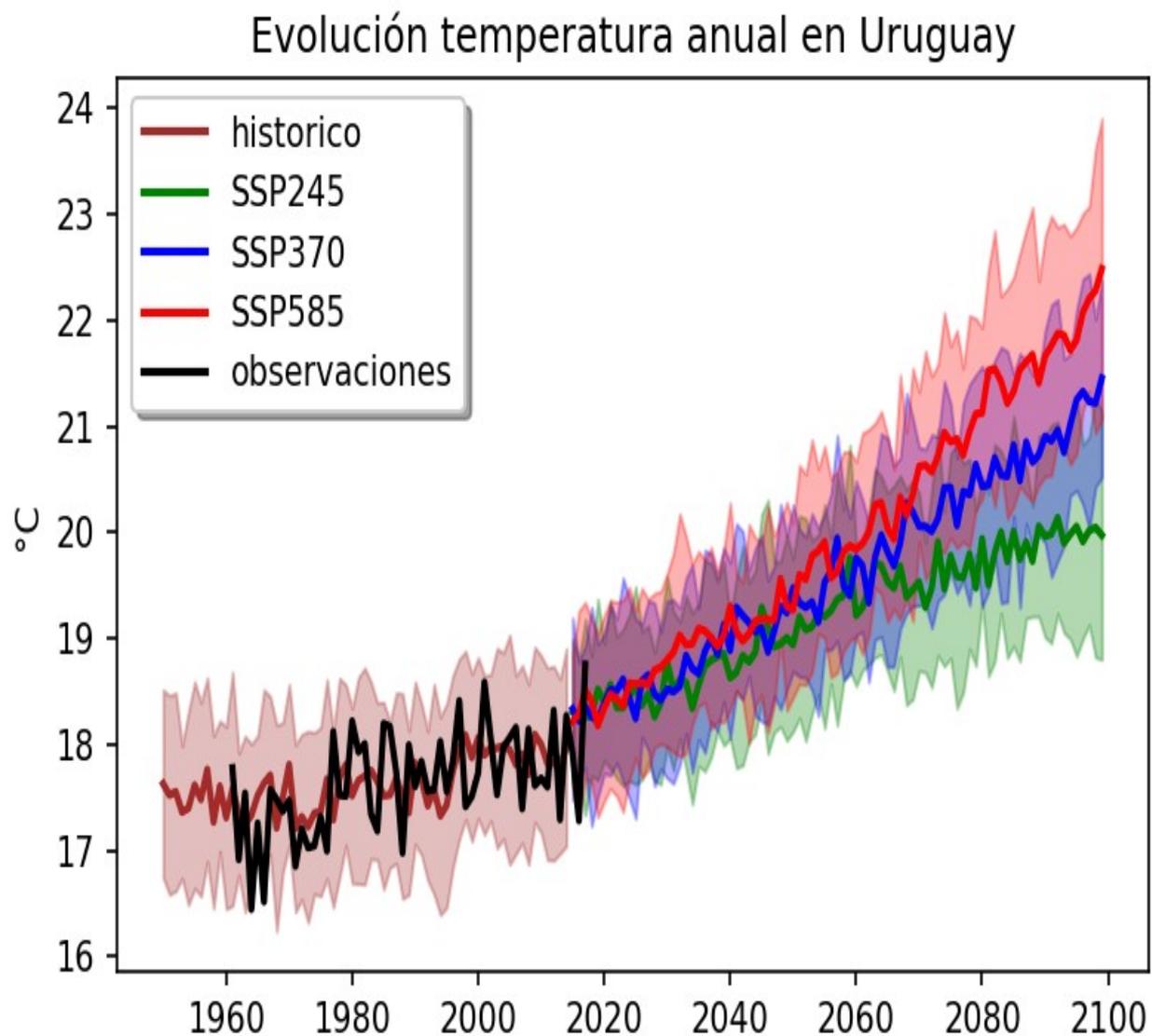
El derretimiento de capas de hielo de Groenlandia y la Antártida continuará por miles de años.

Los cambios en los océanos continuarán por cientos a miles de años (acidificación por absorción de CO<sub>2</sub> con implicancias en la biota)

El nivel del mar continuará aumentando por miles de años debido al aumento de temperatura y derretimiento de hielos.

# A nivel regional

# Proyecciones de temperatura (CMIP6)



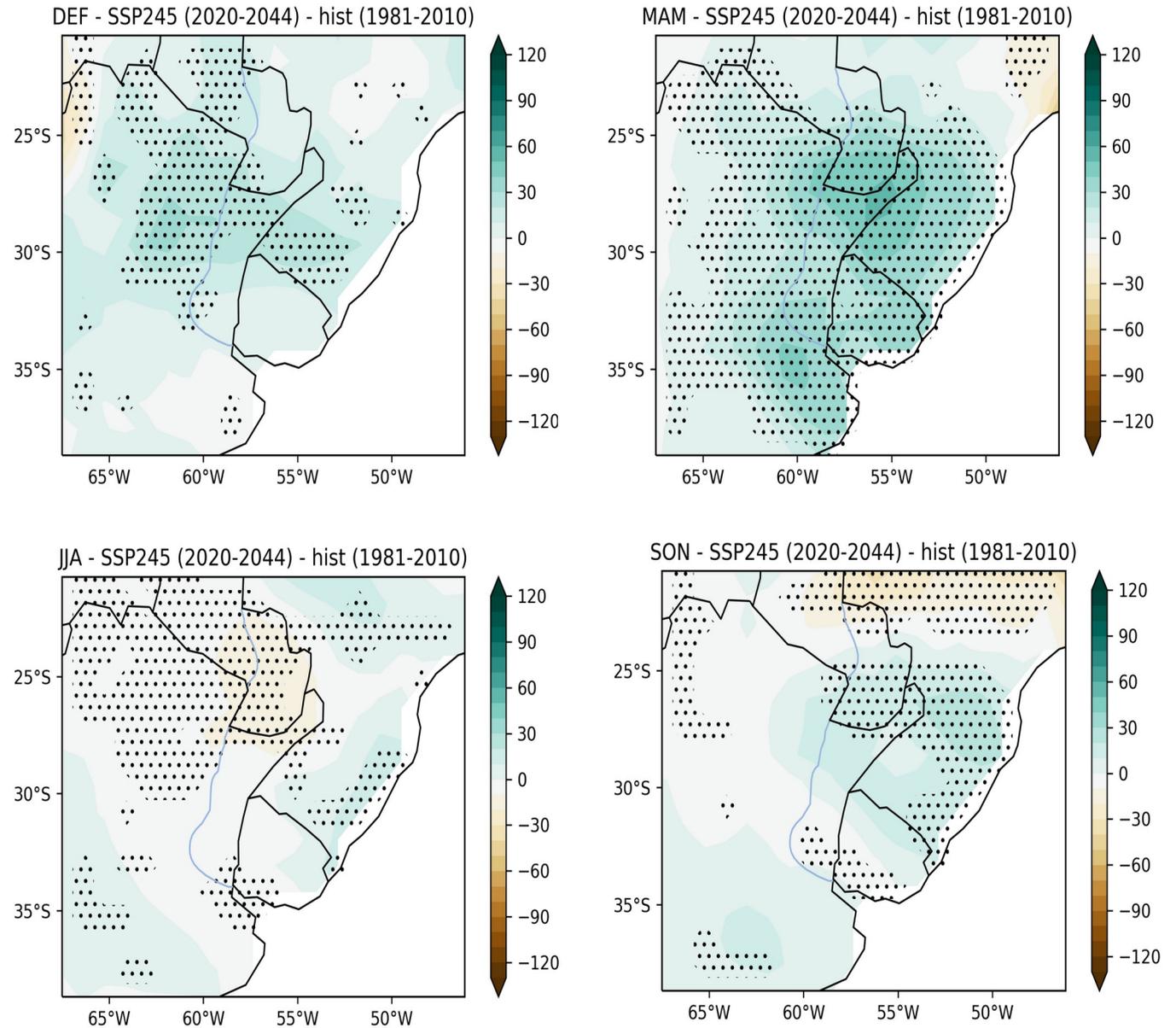
# Proyecciones de precipitación (CMIP6) - 2020-2044

SSP245, 2020-2044

DEF no hay cambios significativos

MAM Máximo aumento

JJA y SON señal débil



# Proyecciones de precipitación (CMIP6) - 2075-2099

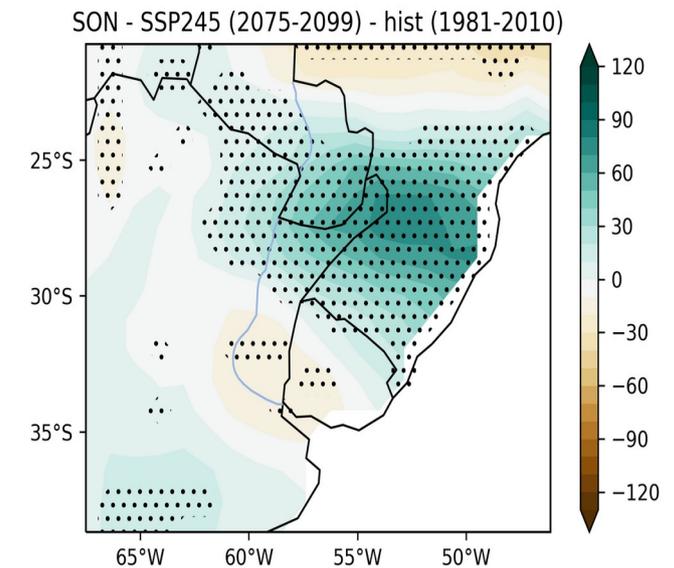
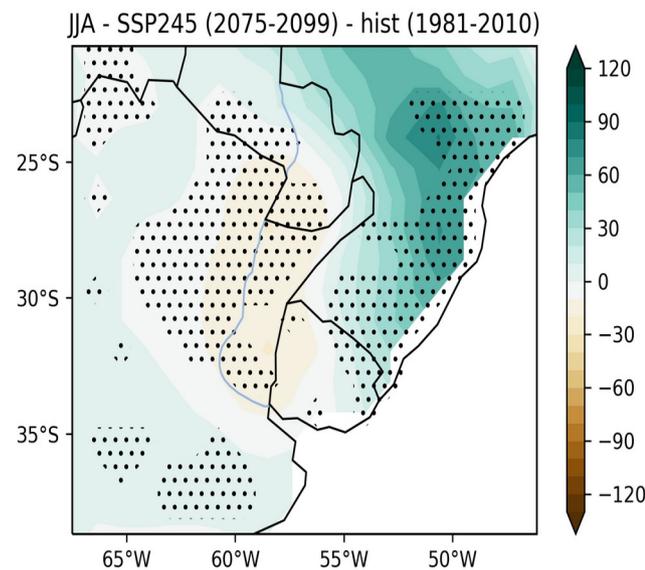
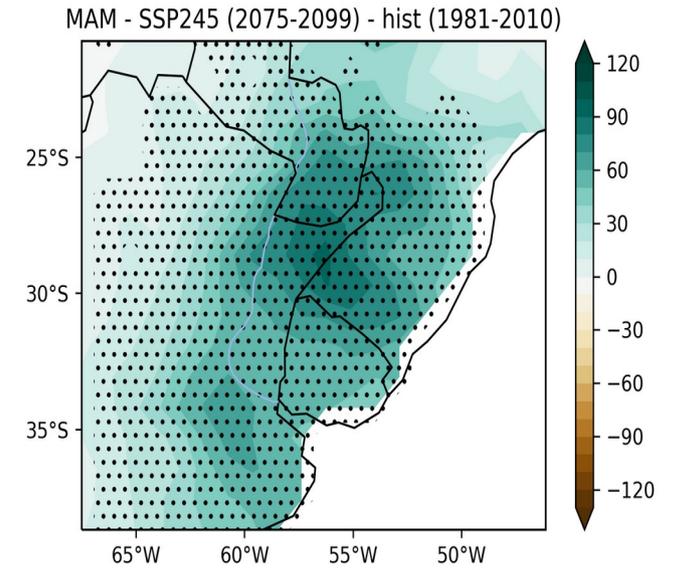
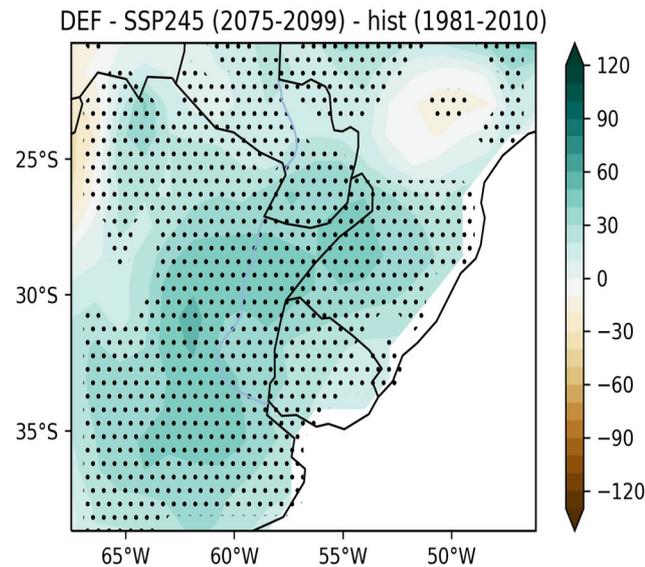
## SSP245, 2075-2099

DEF aumento en casi todo el país, excepto sureste

MAM Máximo aumento en todo el país

JJA aumento al este

SON señal débil, disminución suroeste



## SSP585, 2075-2099

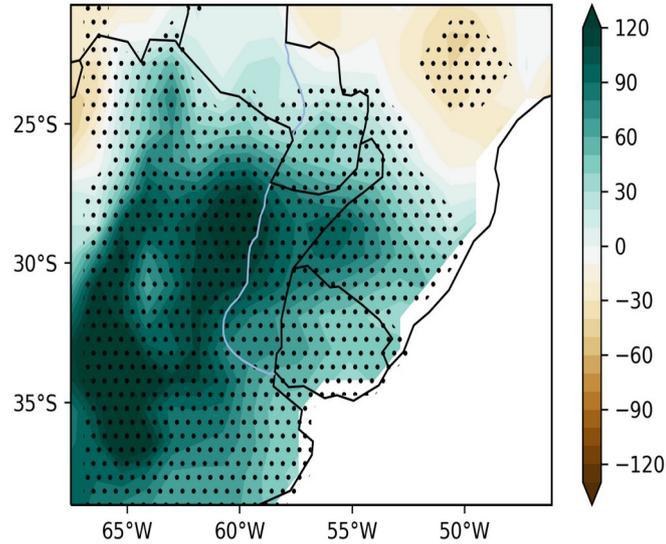
DEF aumento en todo el país

MAM Máximo aumento

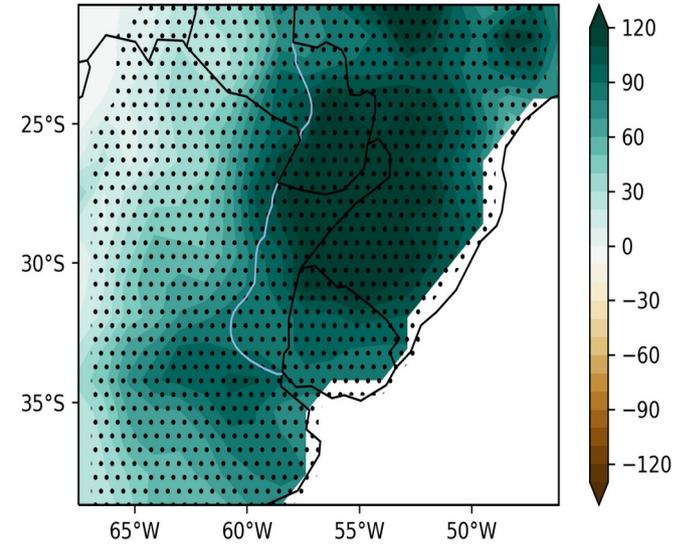
JJA aumento al este

SON disminución al sur

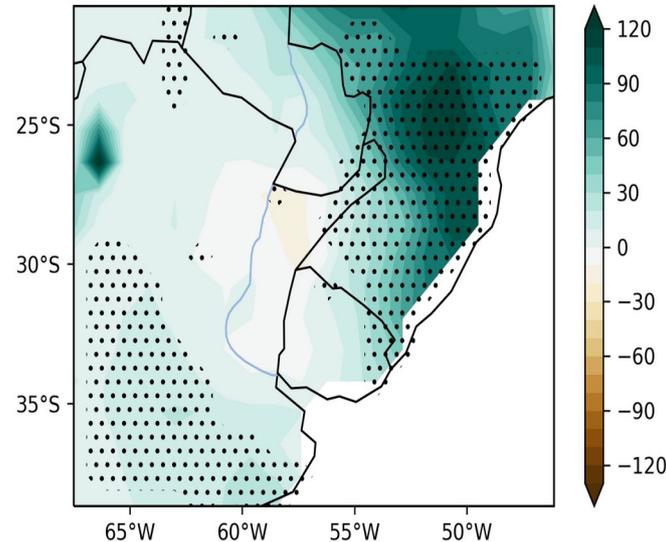
DEF - SSP585 (2075-2099) - hist (1981-2010)



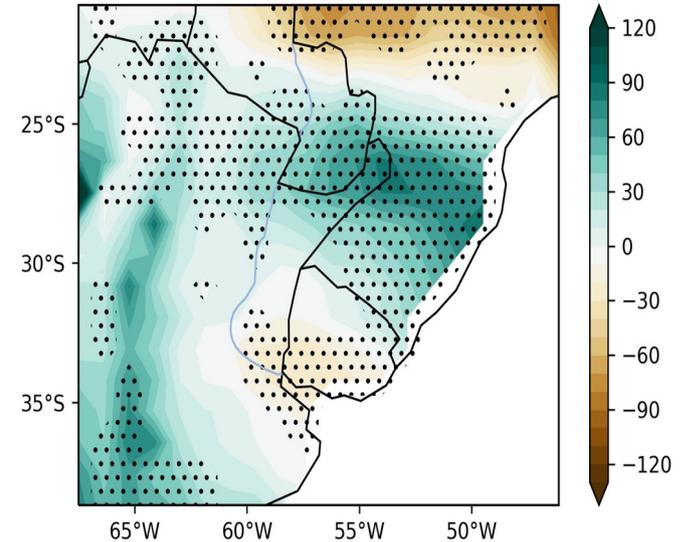
MAM - SSP585 (2075-2099) - hist (1981-2010)



JJA - SSP585 (2075-2099) - hist (1981-2010)



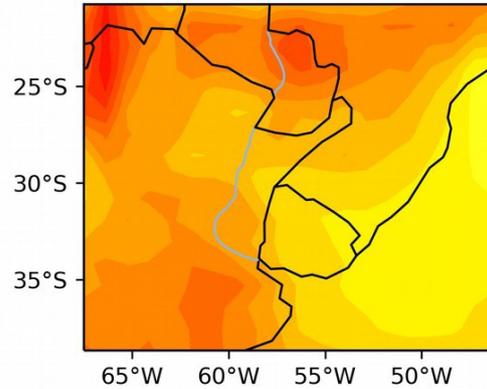
SON - SSP585 (2075-2099) - hist (1981-2010)



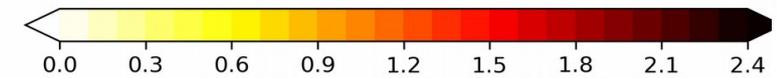
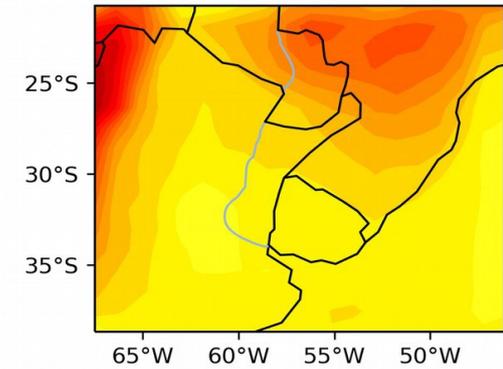
# Proyecciones de temperatura (CMIP6)

SSP245, 2020-2044

DEF - SSP245 (2020-2044) - hist (1981-2010)

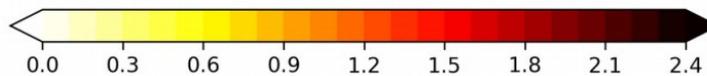
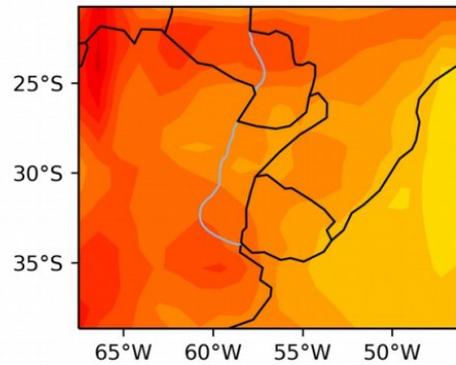


JJA - SSP245 (2020-2044) - hist (1981-2010)

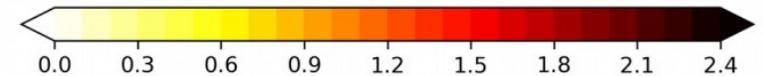
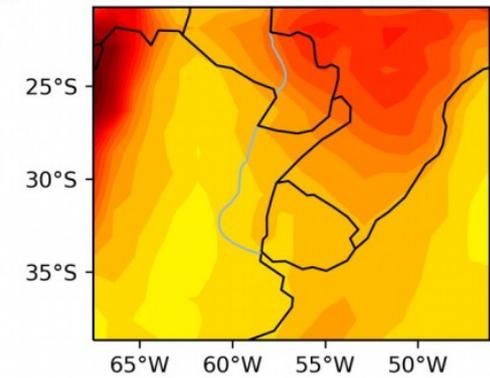


SSP585, 2020-2044

DEF - SSP585 (2020-2044) - hist (1981-2010)

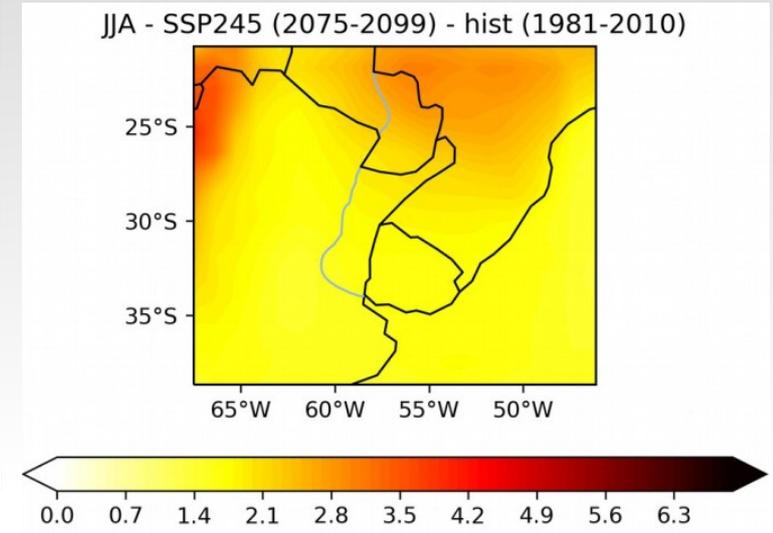
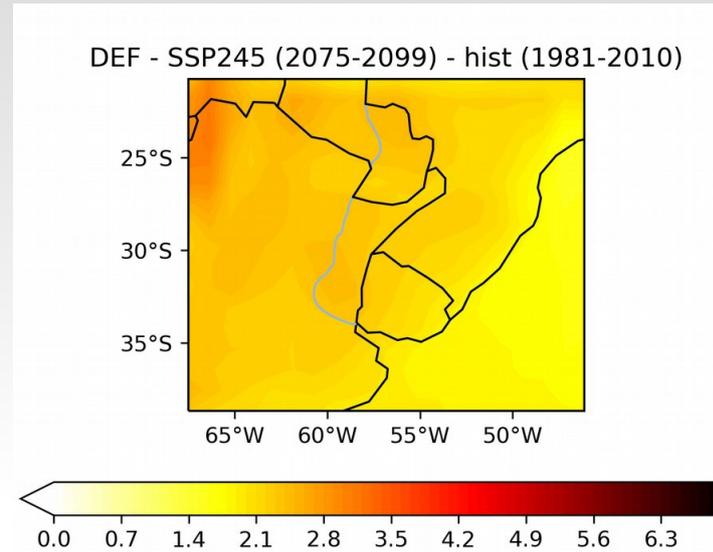


JJA - SSP585 (2020-2044) - hist (1981-2010)

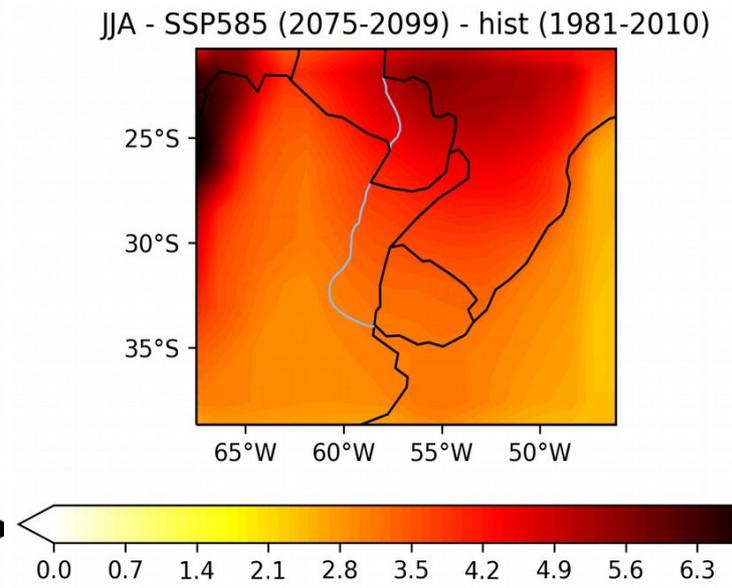
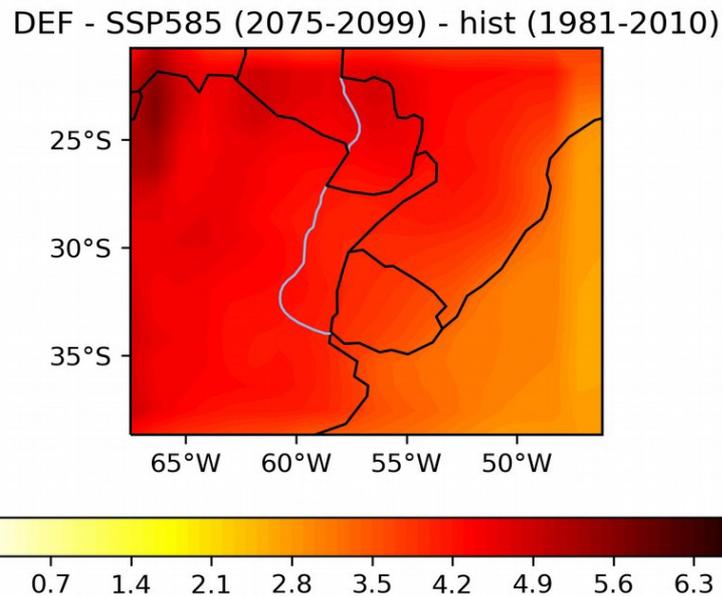


# Proyecciones de temperatura (CMIP6)

SSP245, 2075-2090



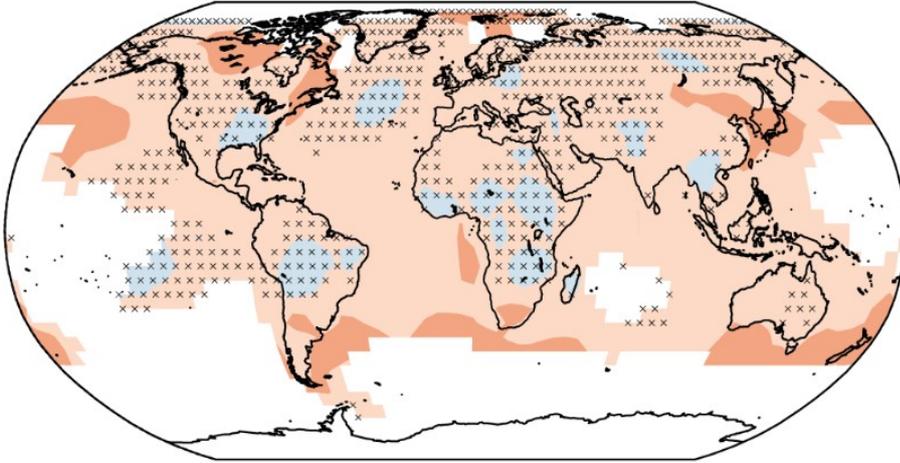
SSP545, 2075-2090



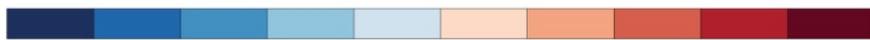
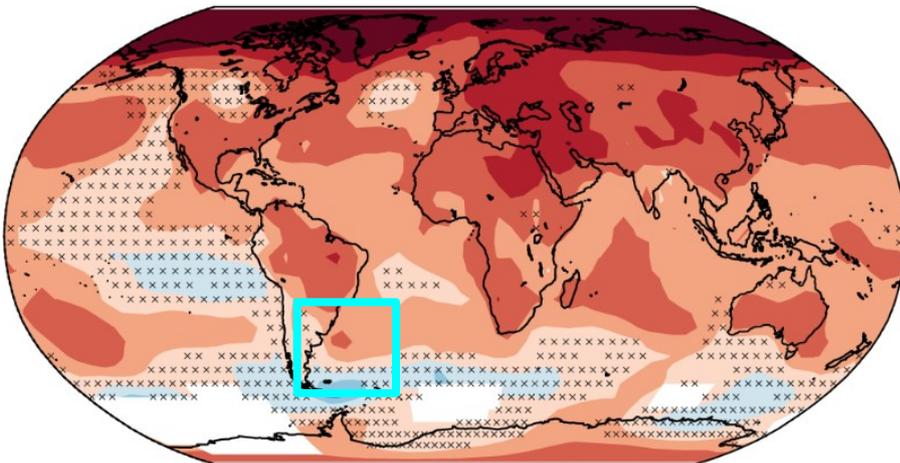
# Confluencia Brasil-Malvinas

(b) Warming accelerated after the 1970s, but not all regions are warming equally

1900–1980



1981–2020



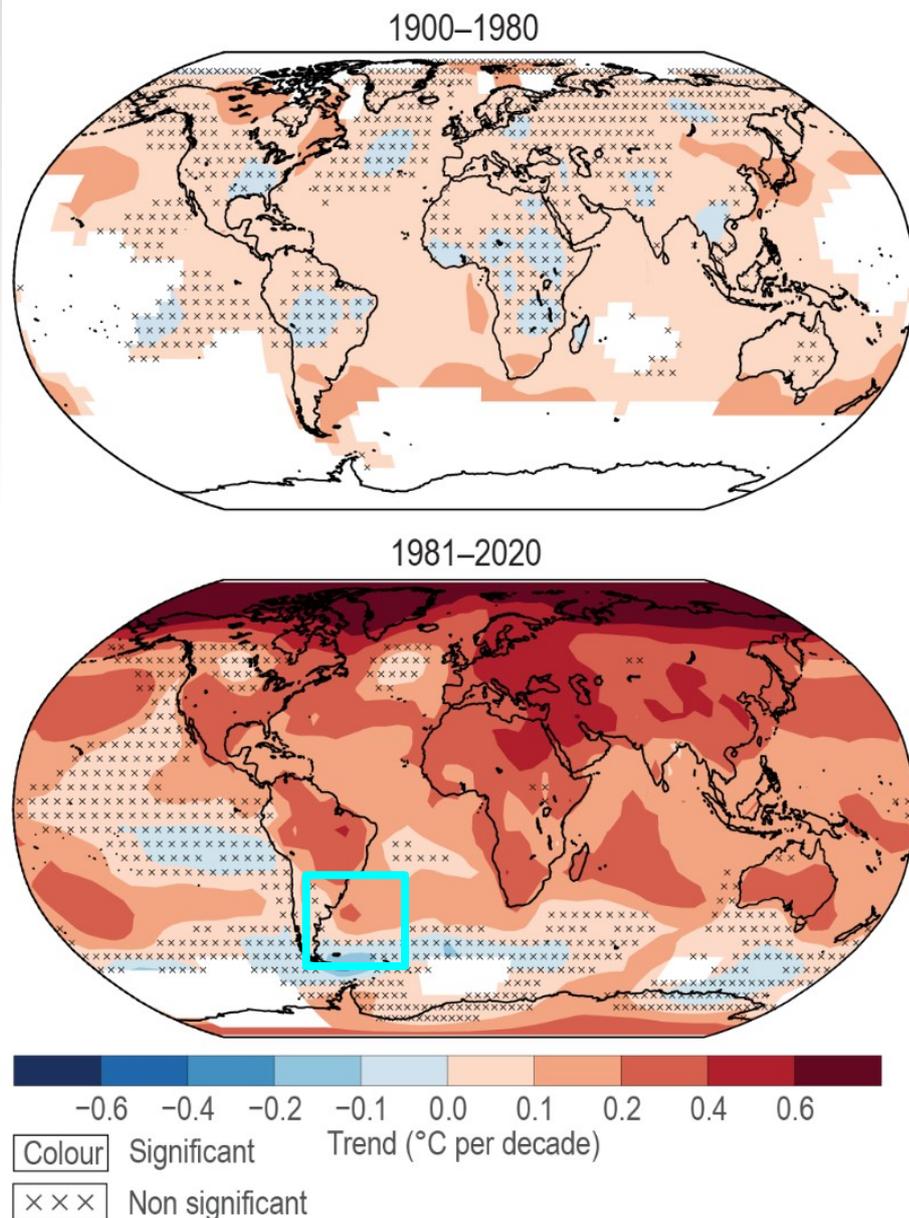
-0.6 -0.4 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.4 0.6

Colour Significant Trend (°C per decade)

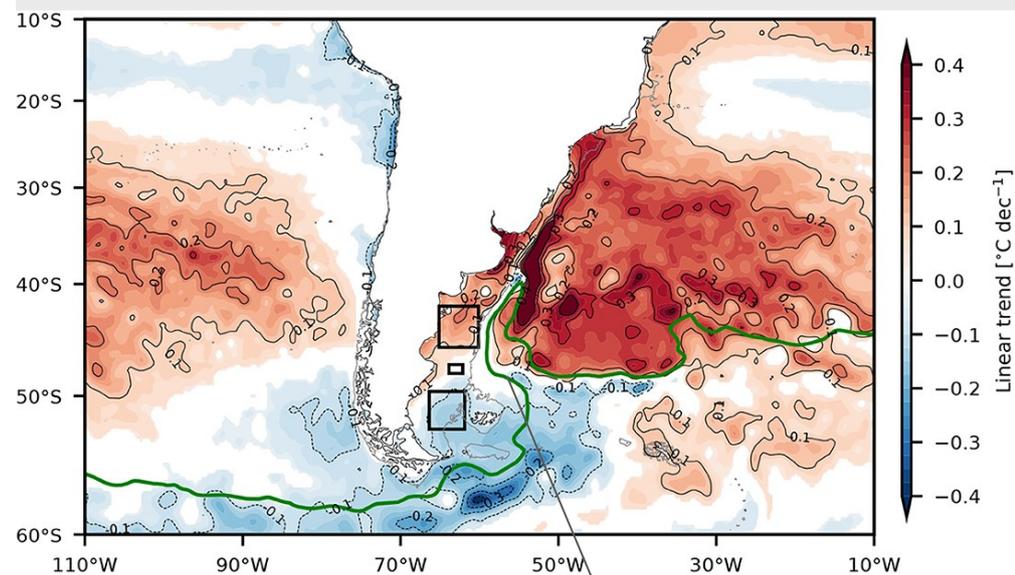
××× Non significant

# Confluencia Brasil-Malvinas

(b) Warming accelerated after the 1970s, but not all regions are warming equally

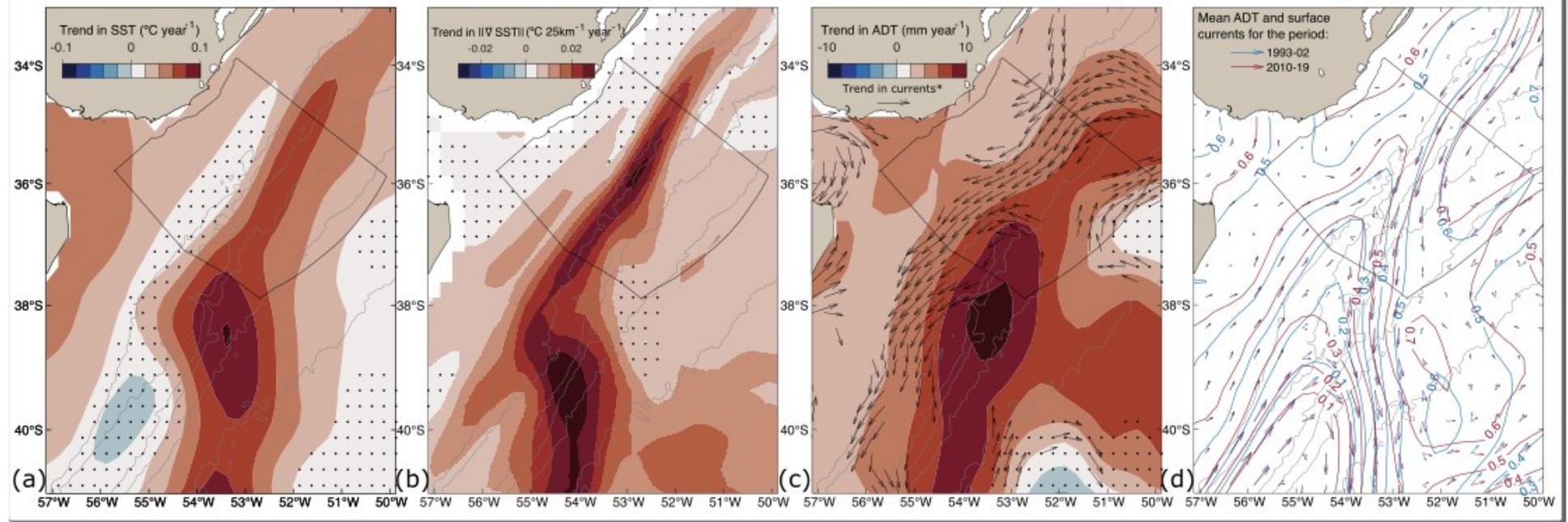


## Tendencias



Frente subantártico

# Tendencias de calentamiento en la ZEEU



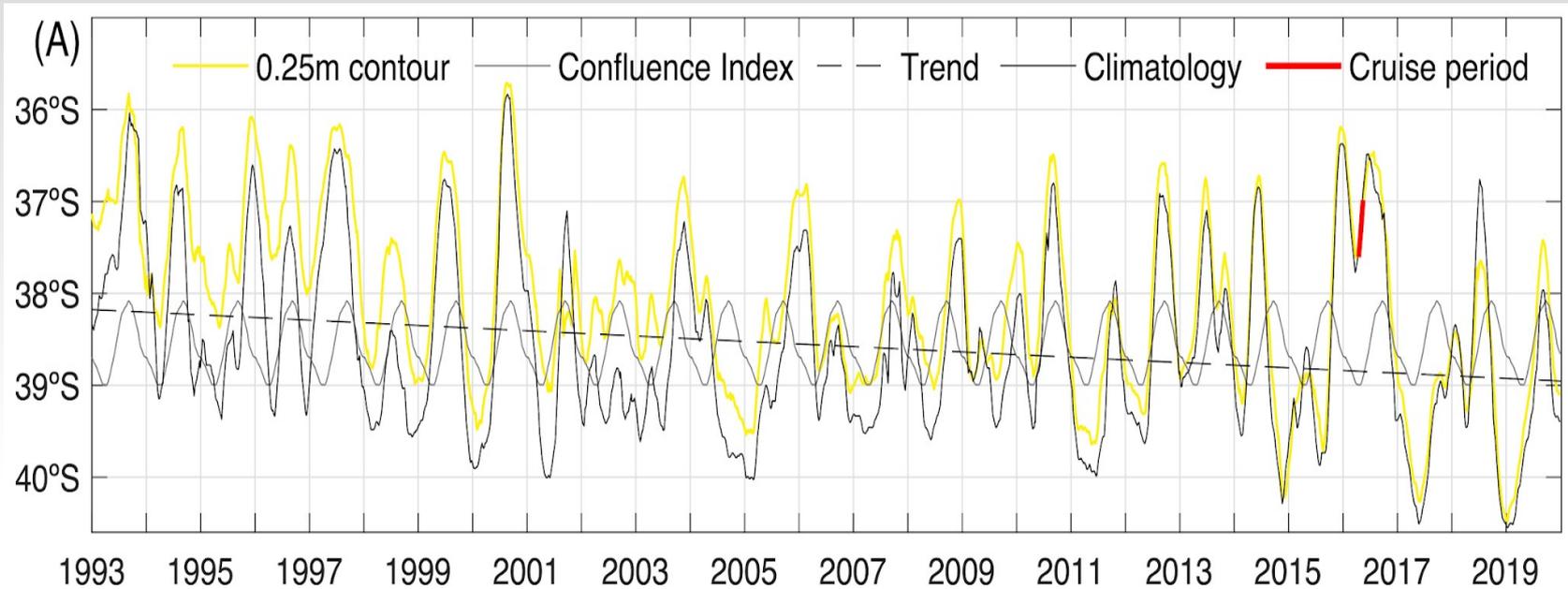
SST (°C año<sup>-1</sup>)

Grad SST (°C 25km<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)

ADT (mm año<sup>-1</sup>)

ADT y Corrientes  
superficiales medias  
Azul: 1993-2002  
Rojo: 2010-2019

# Confluencia Brasil-Malvinas



Asociada a un corrimiento hacia el sur del anticiclón semipermanente

# Ecuación de evolución del clima

