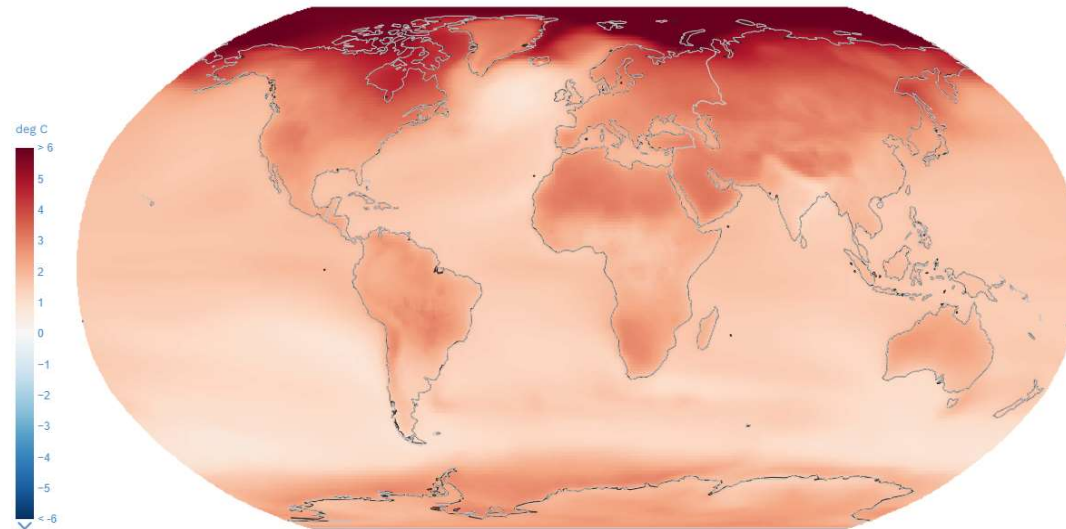


# VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

## PIB-M 2023



CMIP6 - Mean temperature (T) Change deg C - Warming 2°C SSP5-8.5 (rel. to 1850-1900) - Annual (34 models)

Ignacio Prieto Rico  
Área Evaluación y Modelización del Clima  
[iprietor@aemet.es](mailto:iprietor@aemet.es)

# Variabilidad y Cambio Climático

## EL SISTEMA CLIMÁTICO

- Componentes
- Interacciones
- Forzamientos y retroalimentaciones

## VARIABILIDAD CLIMÁTICA

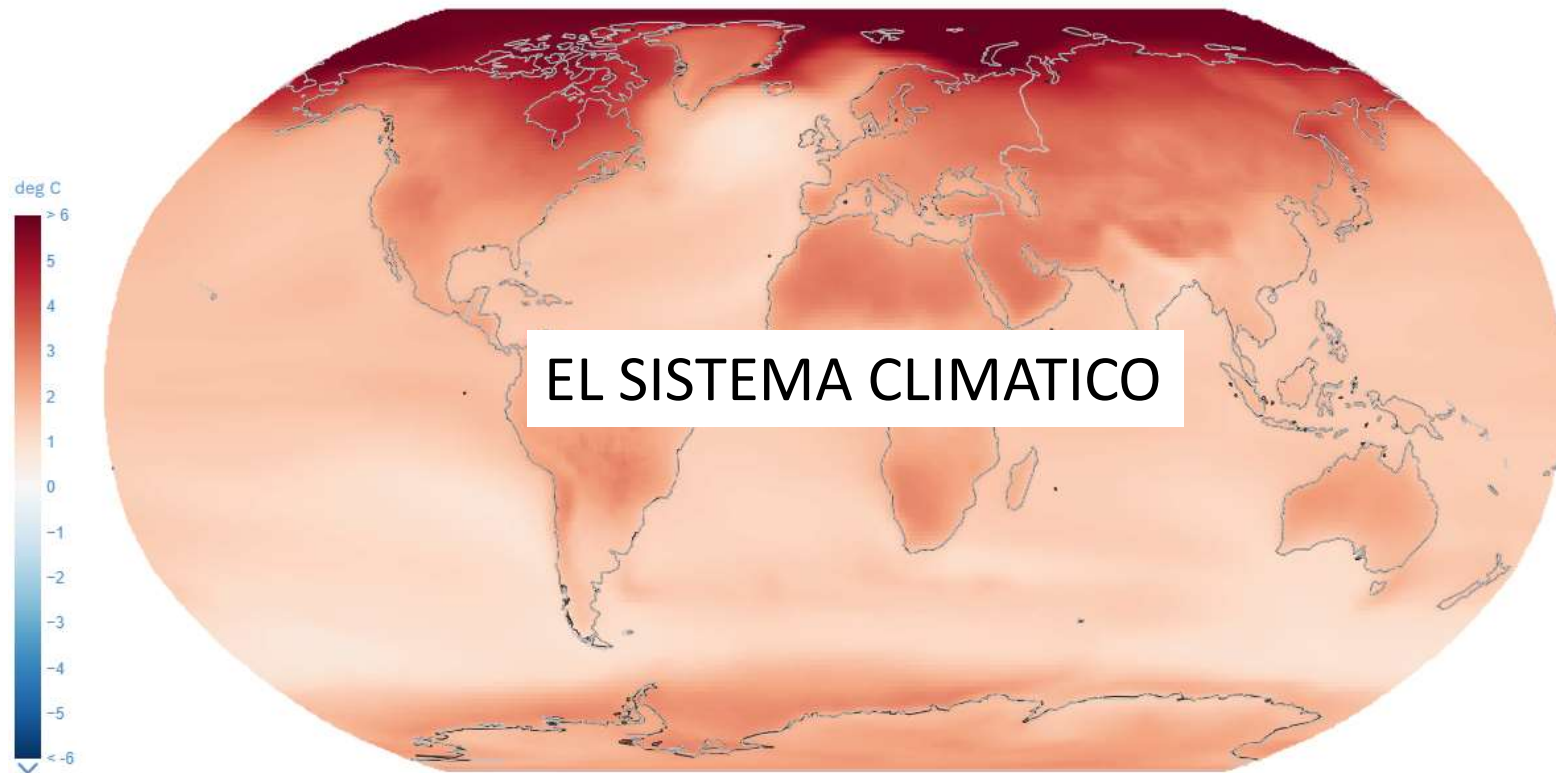
- Clima y variabilidad climática
- Escalas temporales
- El clima en el pasado
- Forzamientos naturales
- Respuesta del sistema climático

## CAMBIO CLIMÁTICO

- Indicadores
- Forzamientos y atribución
- Extremos
- Puntos críticos

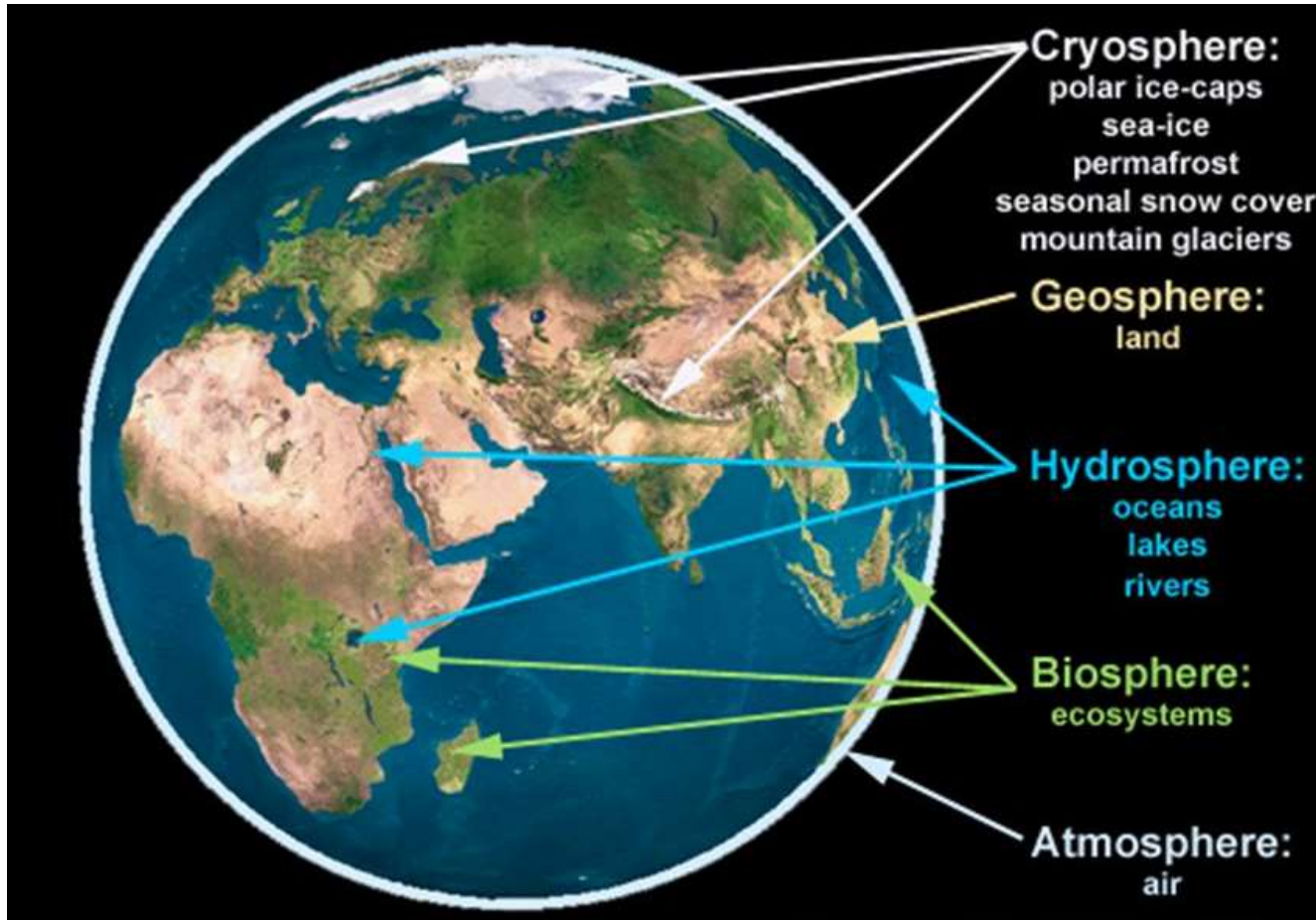
## CONCLUSIONES

## REFERENCIAS



CMIP6 - Mean temperature (T) Change deg C - Warming 2°C SSP5-8.5 (rel. to 1850-1900) - Annual (34 models)

## SISTEMA CLIMÁTICO: Componentes

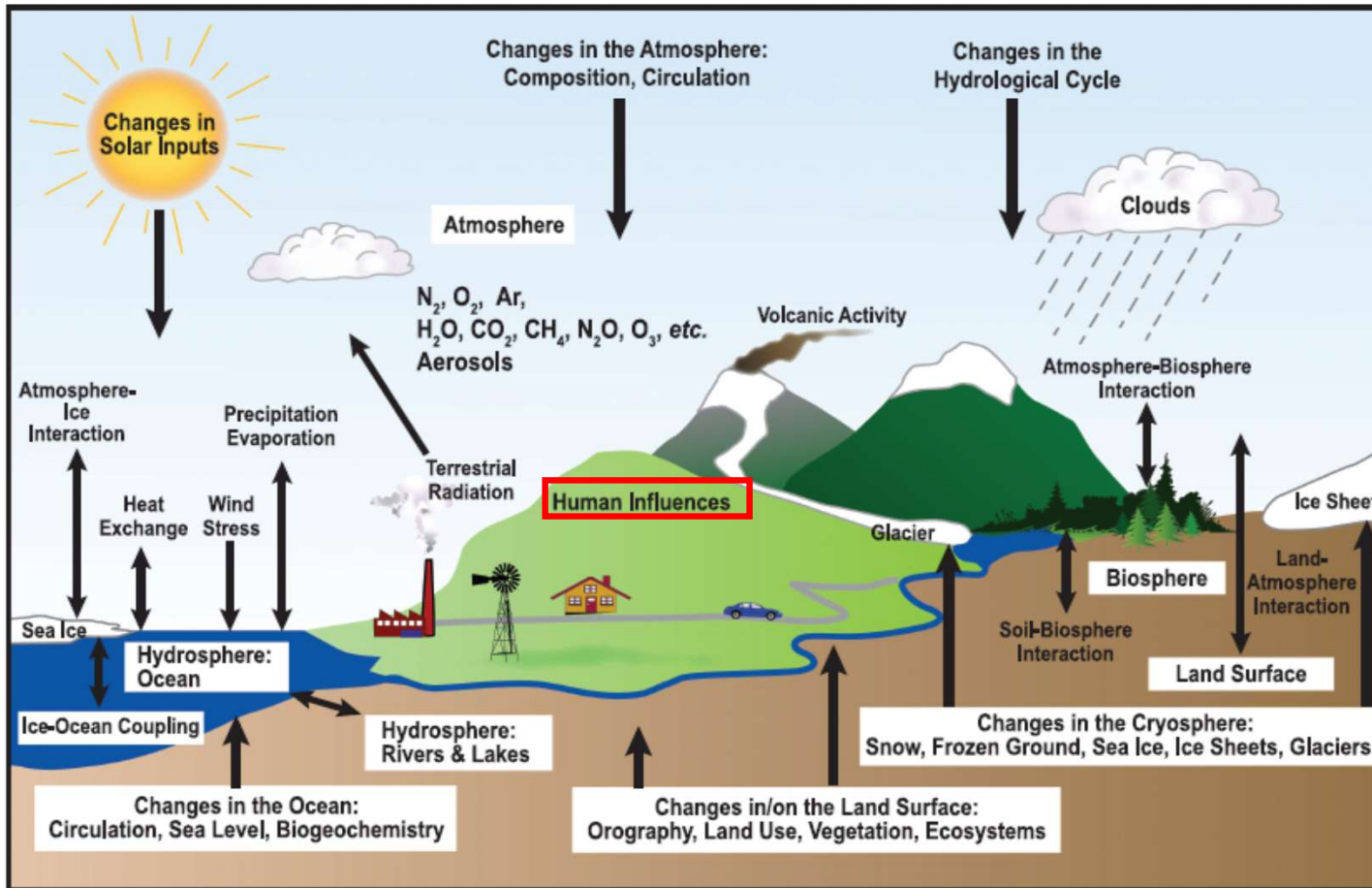


### SISTEMA CLIMÁTICO

*“Sistema muy complejo que consta de cinco **componentes** principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y de las **interacciones** entre ellos”*

(IPCC AR5 WGI Glosario)

# SISTEMA CLIMÁTICO: Interacciones



(IPCC, 2007)

Interacciones del sistema climático:



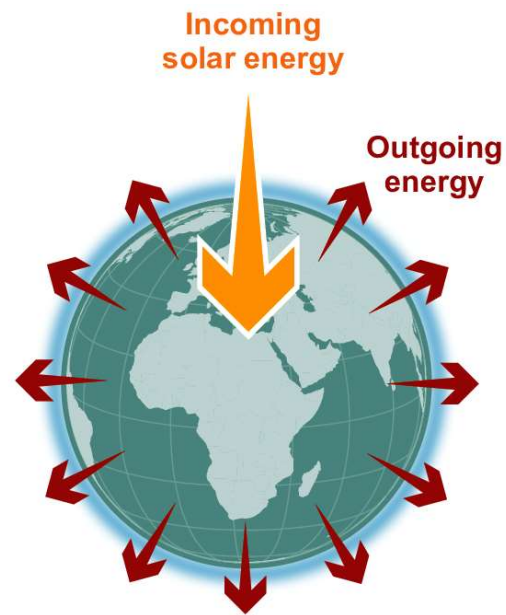
- Intercambios de **masa**
- Intercambios de **momento**
- Intercambio de **energía**



Relaciones complejas,  
no lineales

## SISTEMA CLIMÁTICO: Interacciones. Balance de energía

- Sistema climático → **cerrado**: intercambio de masa despreciable  
intercambio energético con el exterior por radiación
- Equilibrio radiativo → radiación entrante = saliente



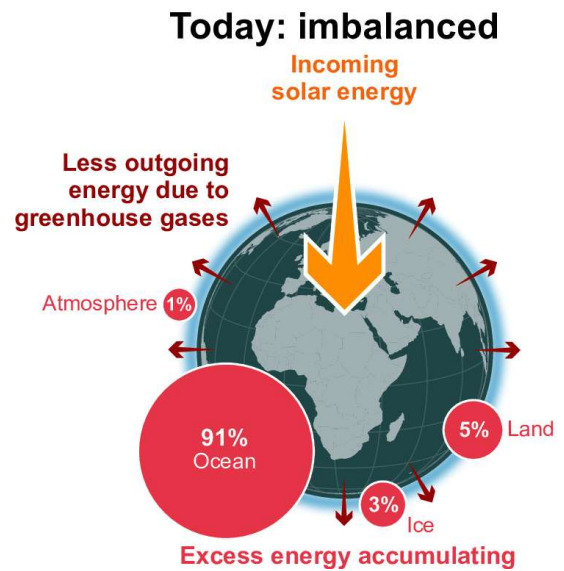
Sin atmósfera →  $T \approx 255\text{K}$

Con atmósfera →  $T \approx 288\text{K}$

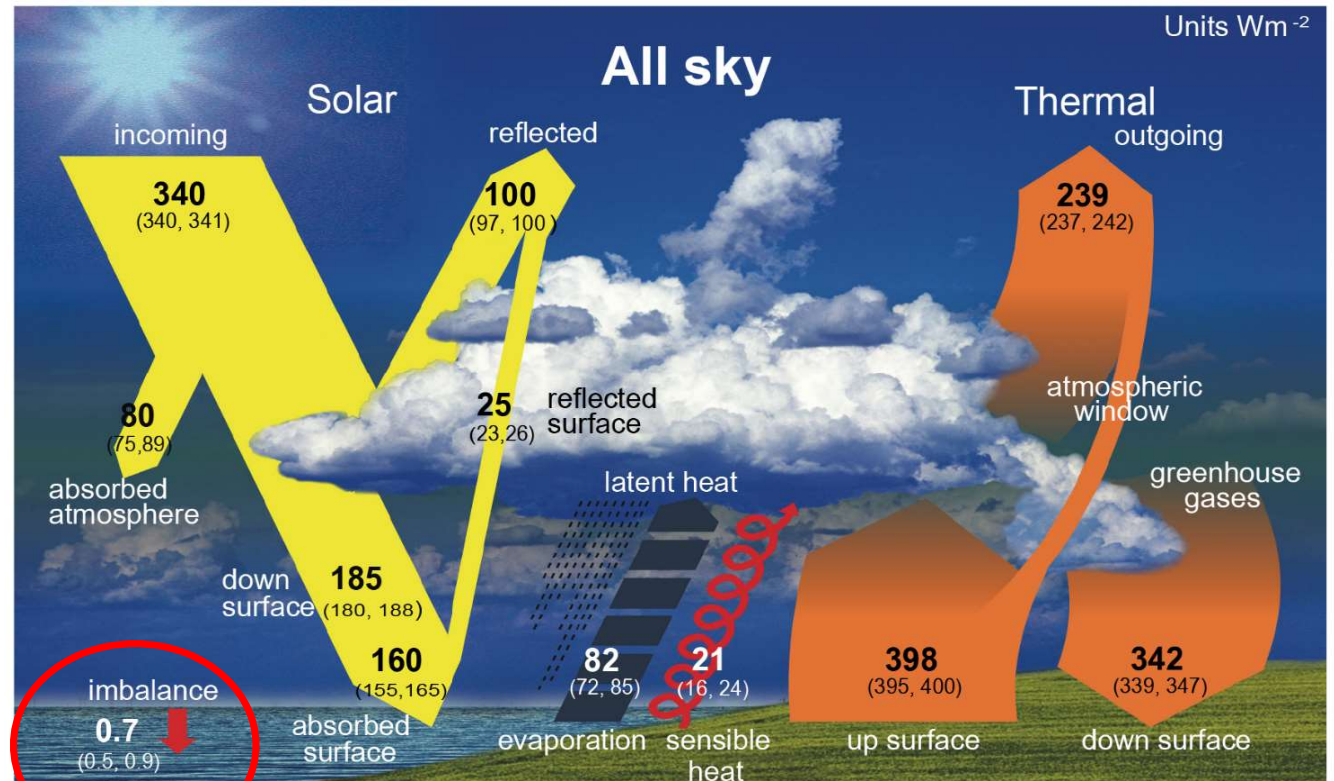
(FAQ 7.1 Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 7)



# SISTEMA CLIMÁTICO: Interacciones. Balance de energía

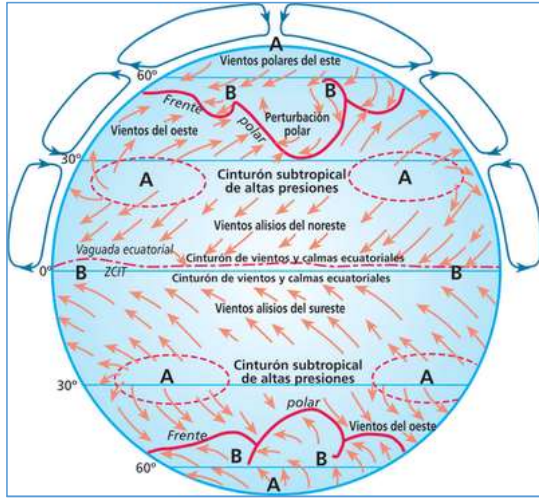
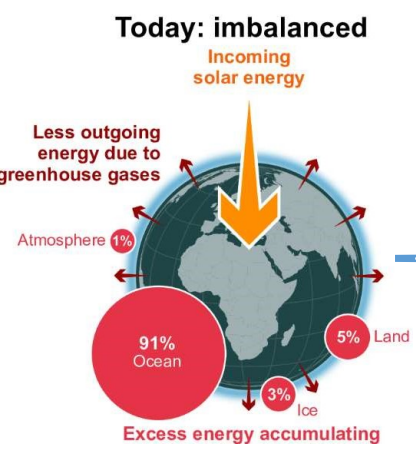


(FAQ 7.1 Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 7)



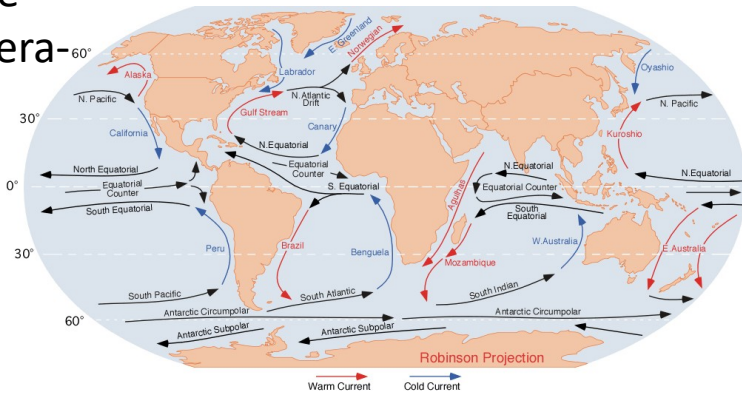
(Figure 7.2 in IPCC, 2021: Chapter 7)

# SISTEMA CLIMÁTICO: Interacciones. Circulación atm. y oceano

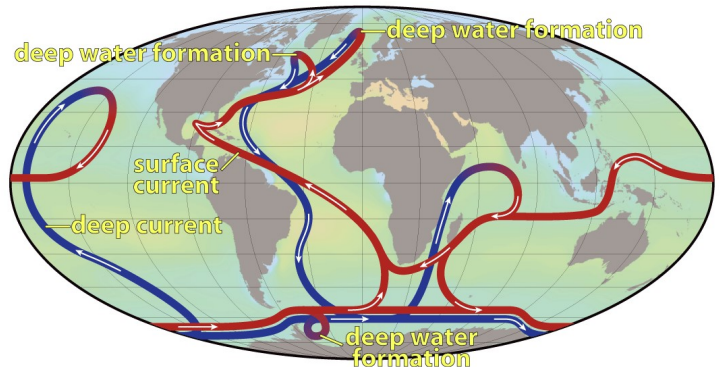


Circulación atmosférica

Intercambios de **momento** atmósfera-oceano



Corrientes superficiales

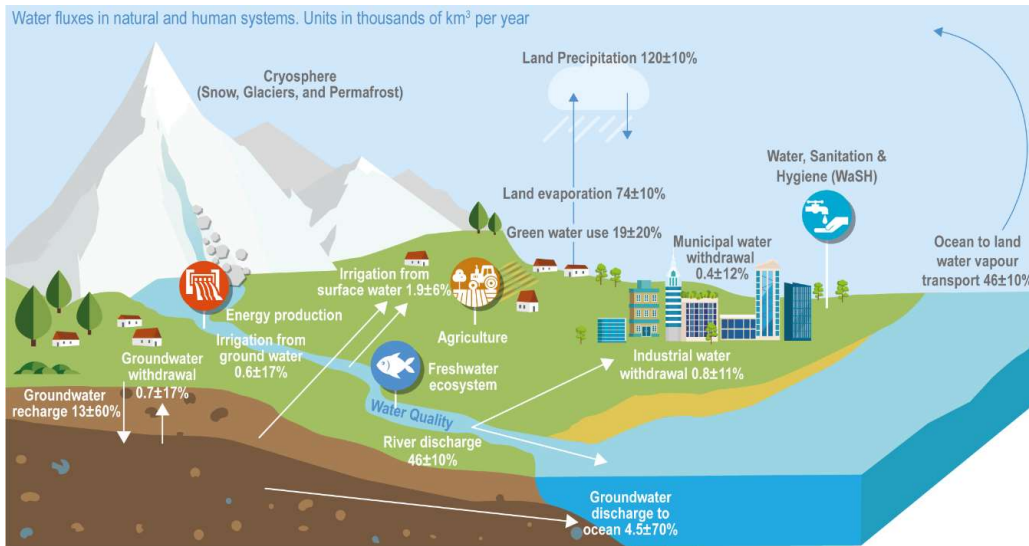


Circulación termohalina

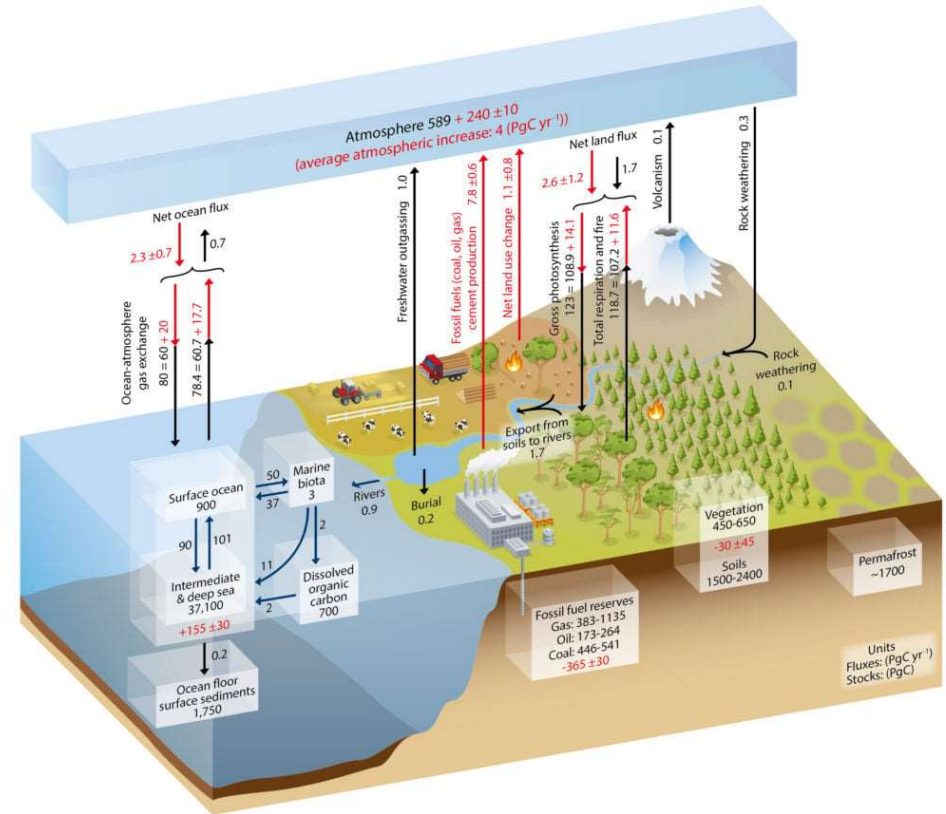


# SISTEMA CLIMÁTICO: Interacciones. Ciclos

Intercambios de **masa** → Ciclo hidrológico, ciclo carbono  
 → Otros ciclos: N, S,....

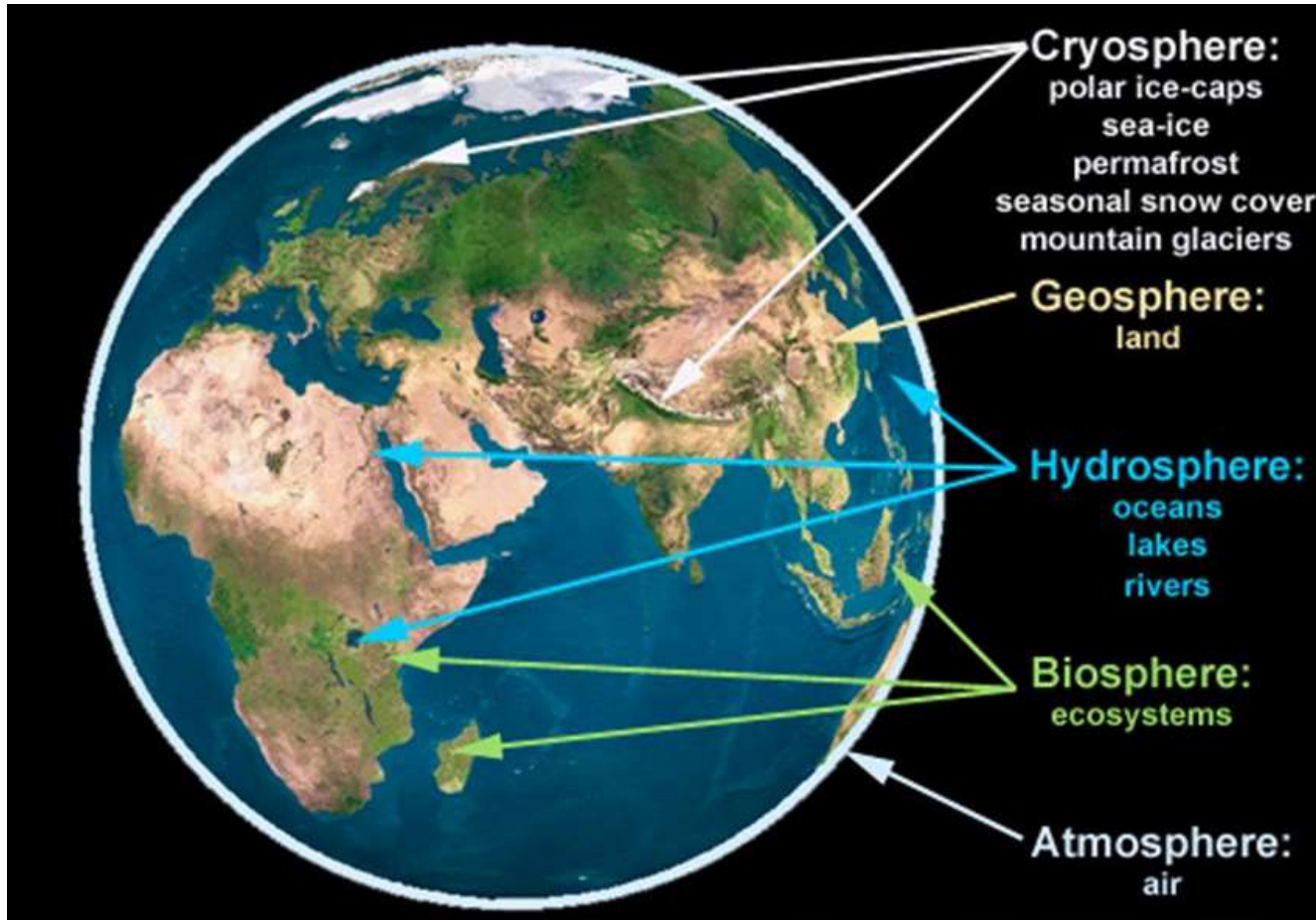


Ciclo hidrológico  
 (IPCC AR6 WGII Figure 4.2)



Ciclo carbono  
 (IPCC AR5 WGI Figure 6.1)

## SISTEMA CLIMÁTICO: Forzamientos y retroalimentaciones



**SISTEMA CLIMÁTICO:** “Sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y de las interacciones entre ellos.”

El sistema climático **evoluciona** en el tiempo bajo la influencia de su propia **dinámica interna** y por efecto de **forzamientos externos**, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de **forzamientos antropógenos**, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso del suelo.”

(IPCC AR5 WGI Glosario)

# SISTEMA CLIMÁTICO: Forzamientos y retroalimentaciones

## FORZAMIENTO EXTERNO

*“Agente de forzamiento ajeno al sistema climático que induce un cambio en éste.*

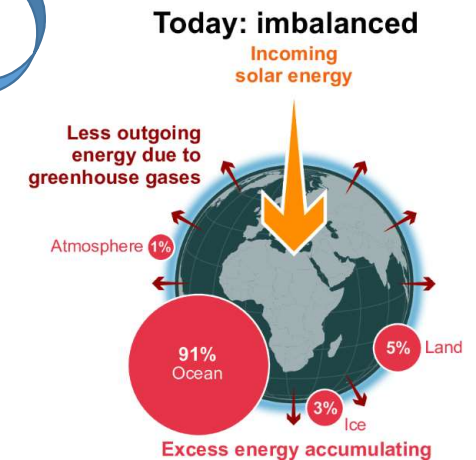
*Son forzamientos externos las erupciones volcánicas, las variaciones solares, los cambios antropógenos de la composición de la atmósfera y los cambios de uso del suelo. El forzamiento orbital es también un forzamiento externo, puesto que la insolación se modifica con la excentricidad de los parámetros orbitales, la inclinación y la precesión de los equinoccios.”*

(IPCC AR5 WGI Glosario)

## FORZAMIENTO RADIATIVO

*“The change in the net, downward minus upward, radiative flux (expressed in  $W m^{-2}$ ) due to a change in an external driver of climate change, such as a change in the concentration of carbon dioxide ( $CO_2$ ), the concentration of volcanic aerosols or the output of the Sun.”*

IPCC AR6 WGI Glossary (Matthews et al., 2021)



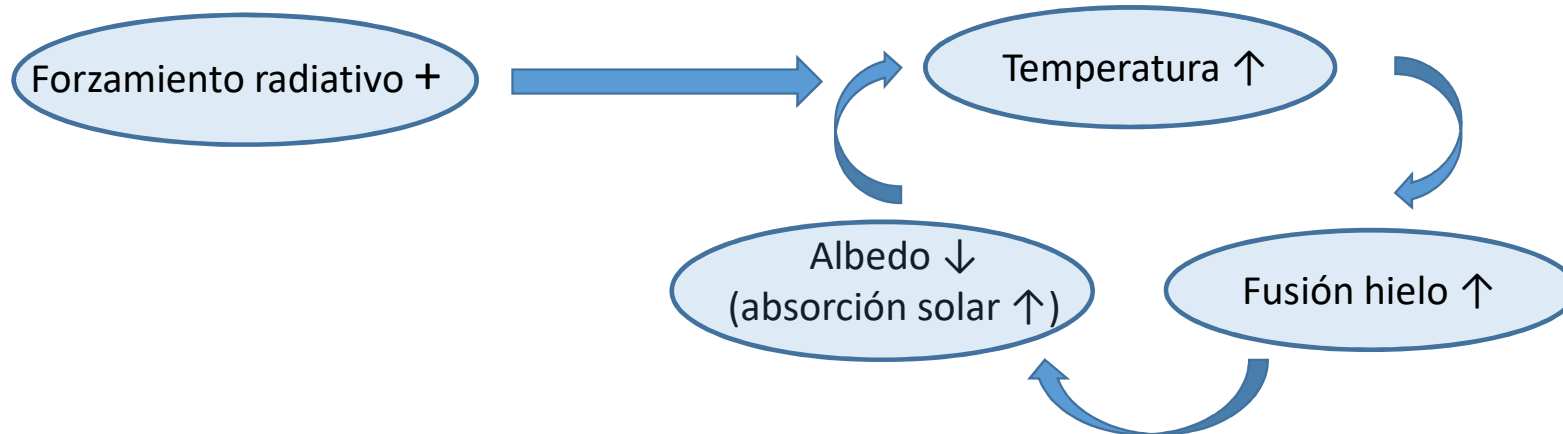
# SISTEMA CLIMÁTICO: Forzamientos y retroalimentaciones

## RETROALIMENTACIÓN CLIMÁTICA (climate feedback)

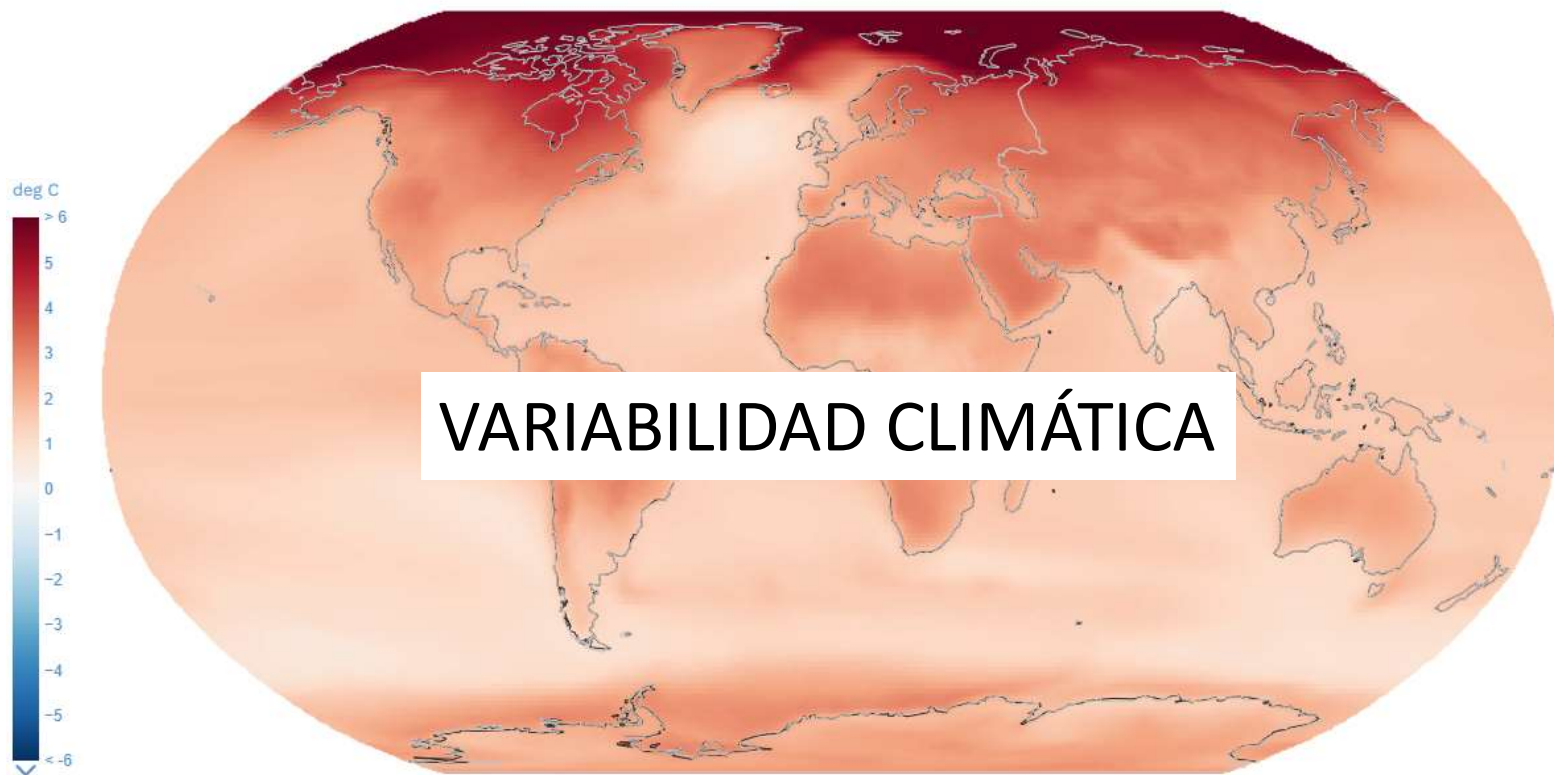
*“Interacción en la que una perturbación en una magnitud climática causa un cambio en una segunda magnitud, y el cambio en esta conduce en última instancia a un cambio añadido en la primera magnitud.”*

*Se experimenta una retroalimentación negativa cuando la perturbación inicial se debilita por los cambios que esta provoca; y se experimenta una positiva, cuando se amplifica por los cambios que provoca.”*

IPCC AR5 WGI Glosario



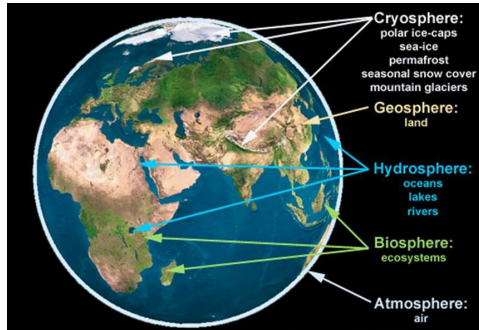
Ejemplo de retroalimentación +: **hielo-albedo**



CMIP6 - Mean temperature (T) Change deg C - Warming 2°C SSP5-8.5 (rel. to 1850-1900) - Annual (34 models)



# VARIABILIDAD CLIMÁTICA



## CLIMA

*“El clima se suele definir en sentido restringido como el **estado promedio del tiempo** y, más rigurosamente, como una descripción **estadística** del tiempo atmosférico en términos de los **valores medios** y de la **variabilidad** de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años.*

*El **período** de promedio **habitual** es de **30 años**, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial.*

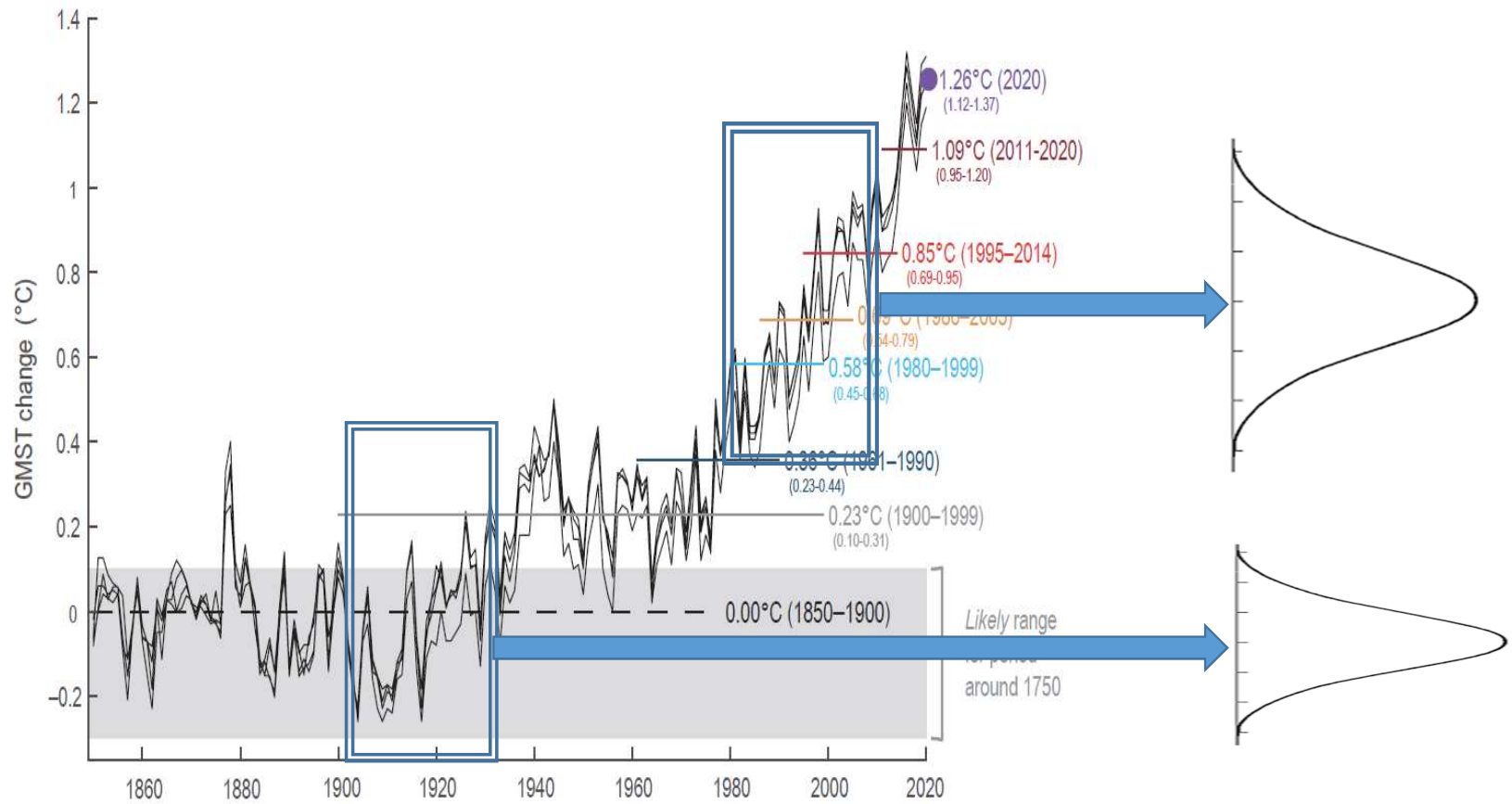
*Las magnitudes son casi siempre **variables de superficie** (por ejemplo, **temperatura**, **precipitación** o **viento**).*

*En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos”*

(IPCC AR5 WGI Glosario)

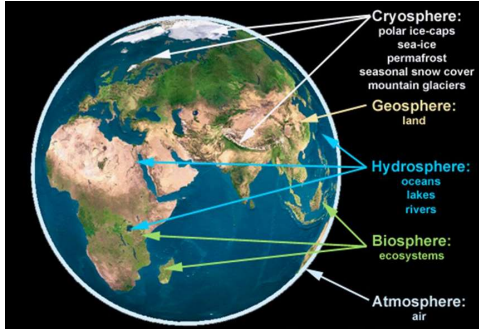
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Observed global mean surface temperature change  
Relative to 1850–1900 using four datasets



Adaptado de Figure 1.12 in IPCC, 2021: Chapter 1 (Chen et al., 2021)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA



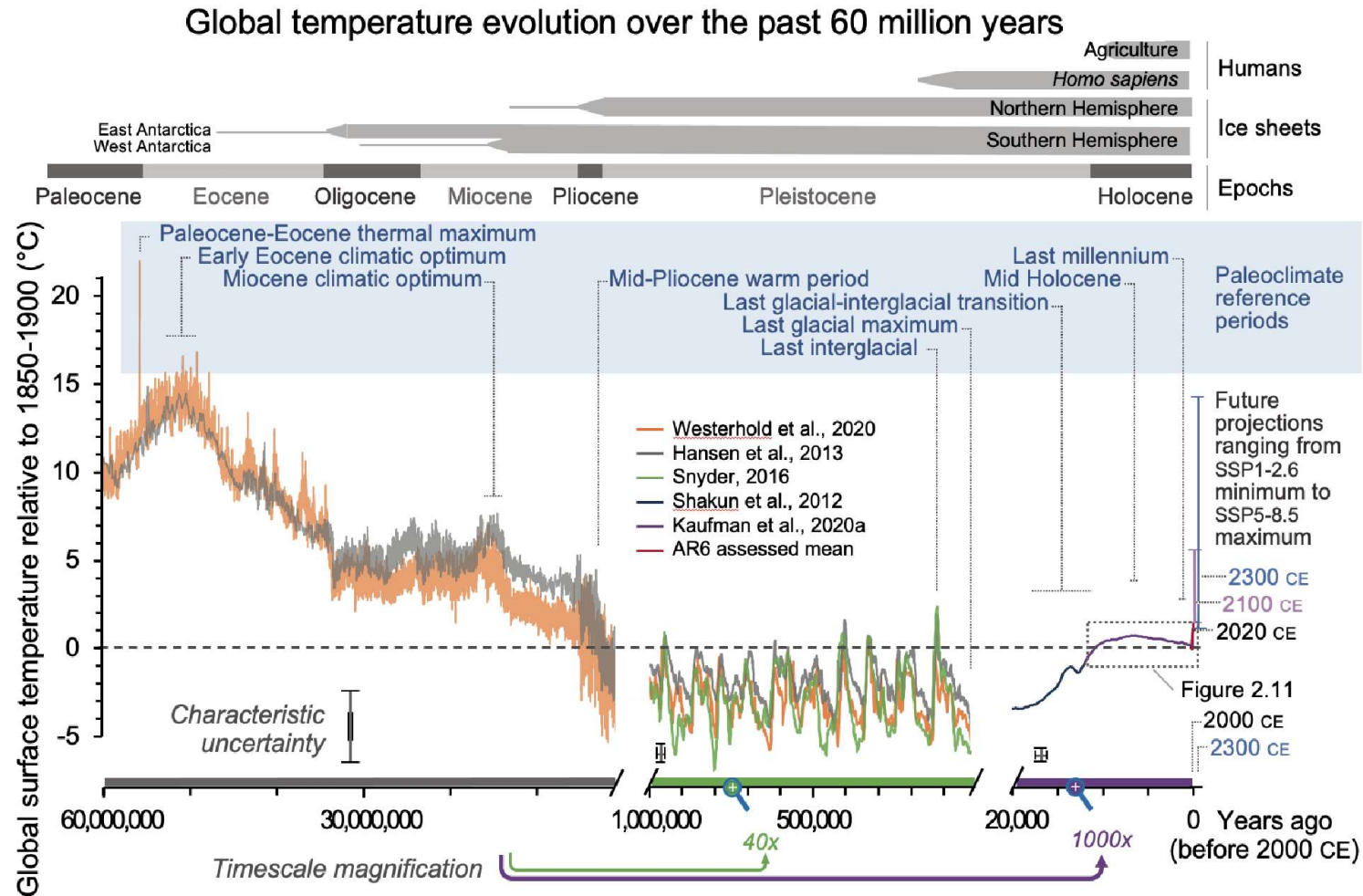
## VARIABILIDAD CLIMÁTICA

*“Denota las **variaciones** del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las **escalas** espaciales y **temporales** más amplias que las de los fenómenos meteorológicos.*

*La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa)”*

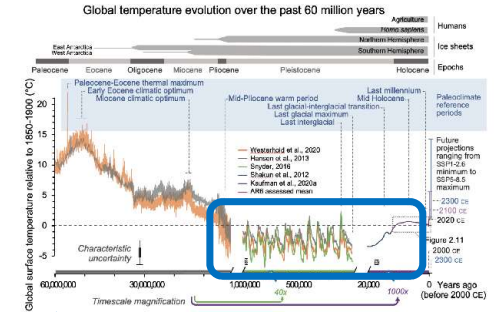
(IPCC AR5 WGI Glosario)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado

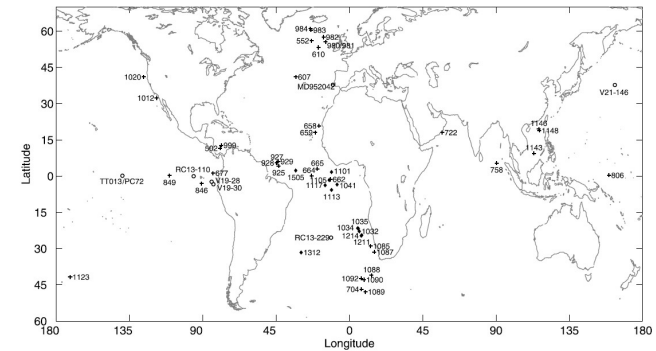
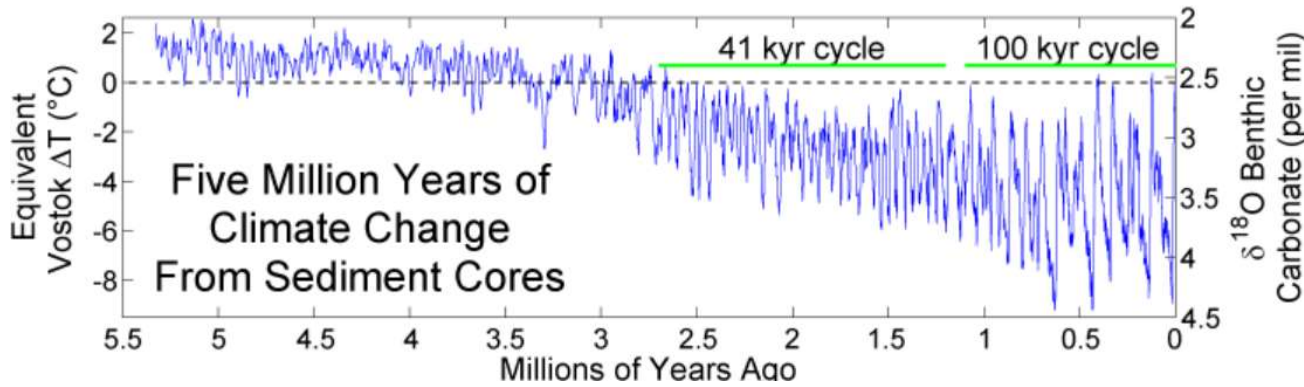


( IPCC AR6, Cross-Chapter Box 2.1, Figure 1 )

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado



Temperaturas 5.500.000y → 0y

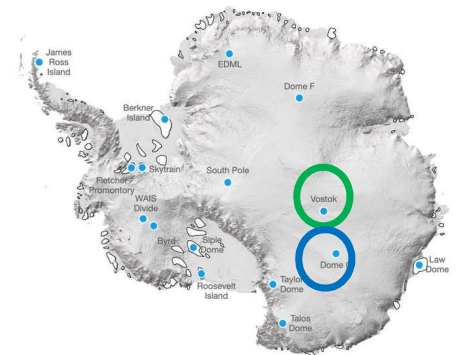
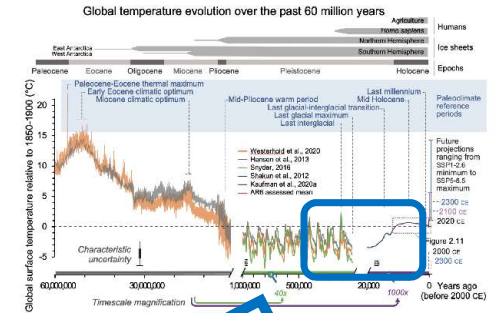
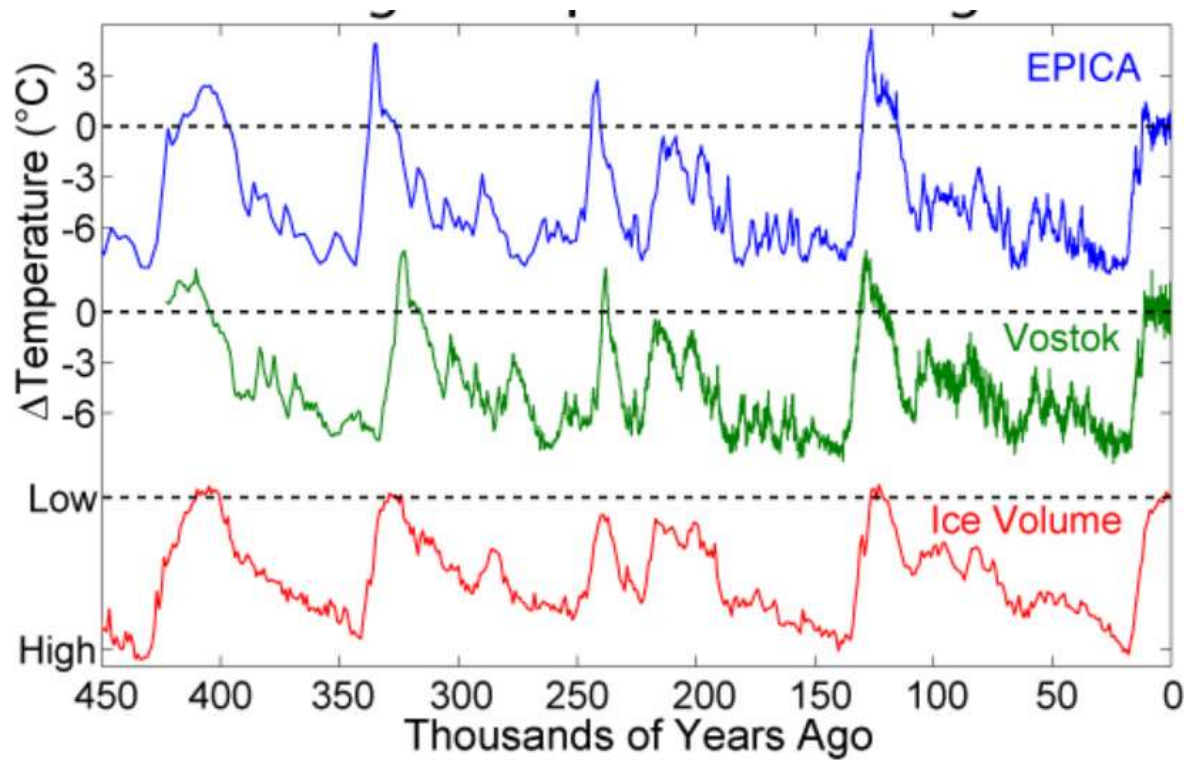


[https://en.wikipedia.org/wiki/Ice\\_age#/media/File:Five\\_Myr\\_Climate\\_Change.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_age#/media/File:Five_Myr_Climate_Change.svg)  
 Data: (Lisiecki & Raymo, 2005)



# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado

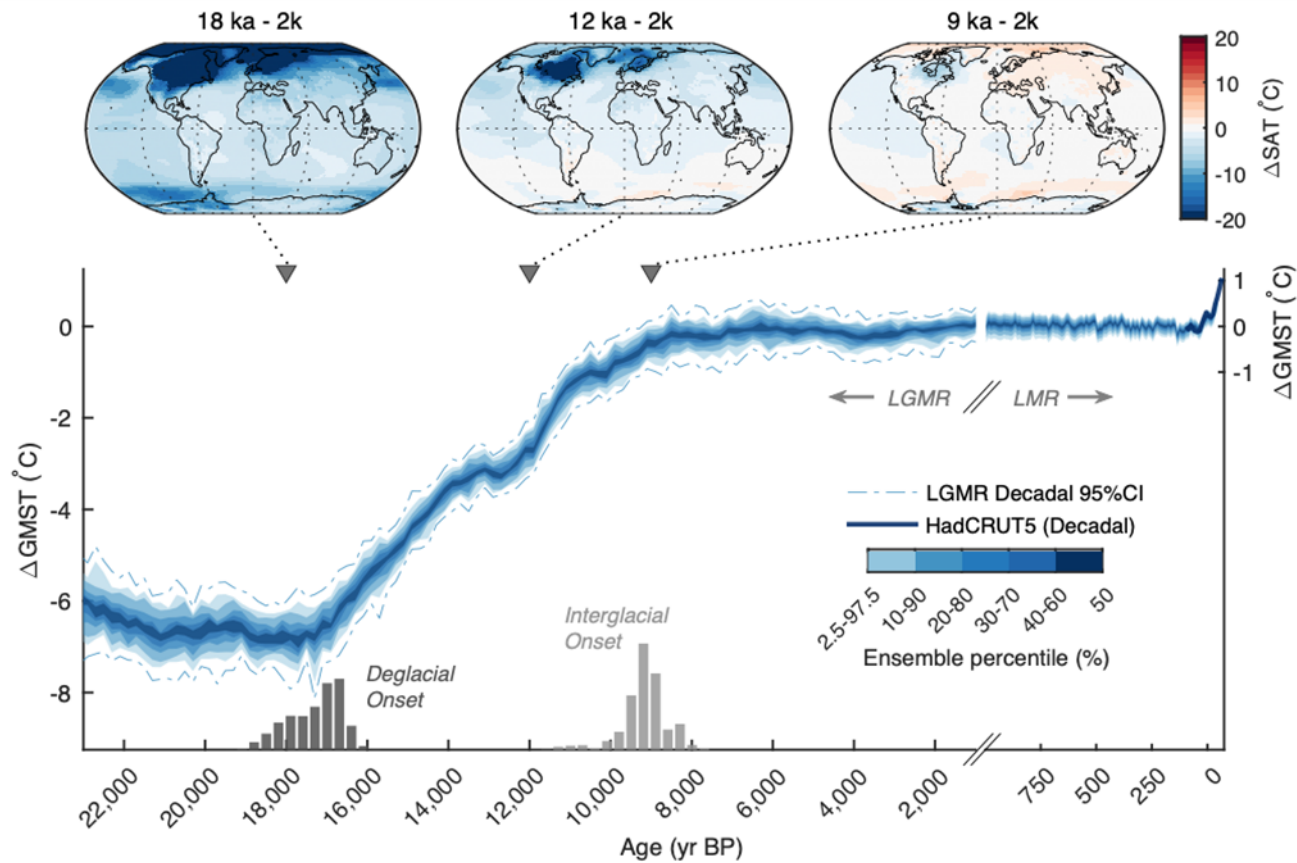
Temperaturas 450.000y → 0y



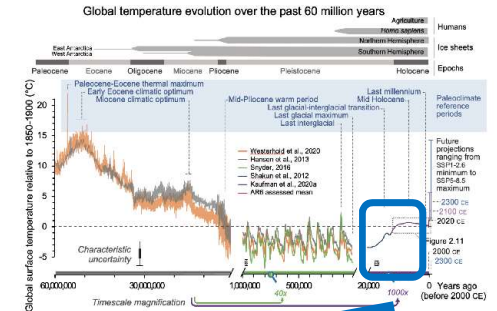
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ice\\_Age\\_Temperature.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ice_Age_Temperature.png)  
(Augustin et al., 2004) EPICA European Project for Ice Coring in Antarctica → Dome C  
(Petit et al., 1999) → Vostok

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado

Temperaturas 22.000y → 0y (LGM, Holoceno)

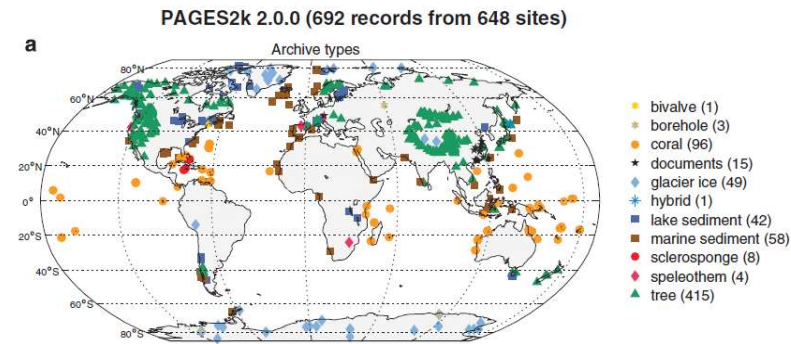
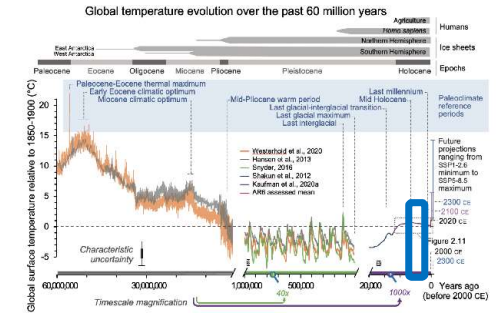
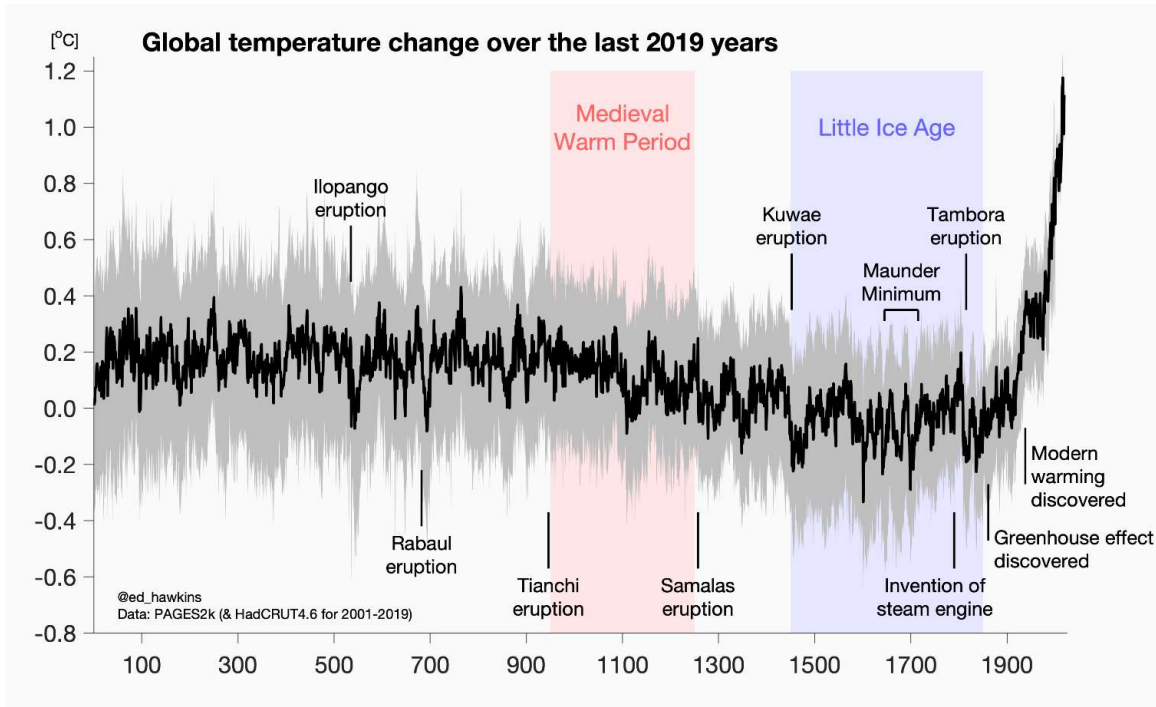


(Osman et al., 2021) Image from: <https://www.osmanclimate.com/projects/temperature/>



# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado

Temperaturas 2000y → 0y



(Ed Hawkins: <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2020/2019-years/>)  
Data: (PAGES2K, 2017)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El clima en el pasado

Temperaturas periodo industrial: 1850 → Hoy

## Observed global mean surface temperature change

Relative to 1850–1900 using four datasets

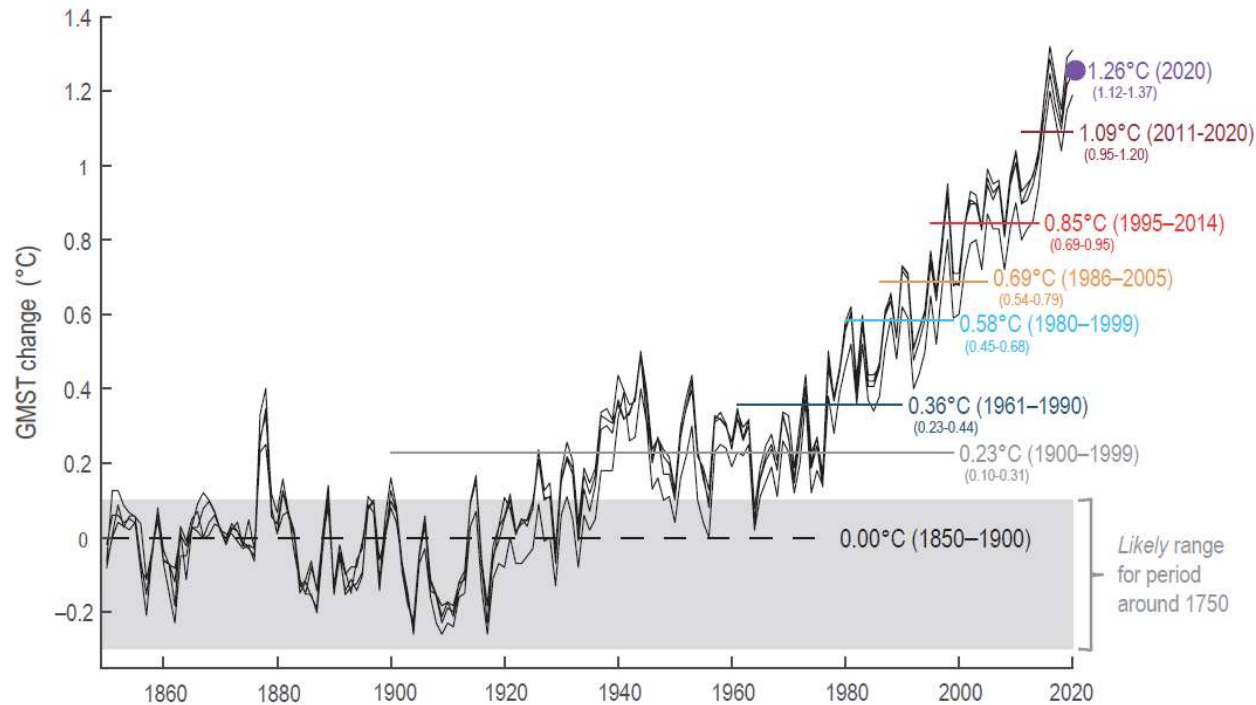
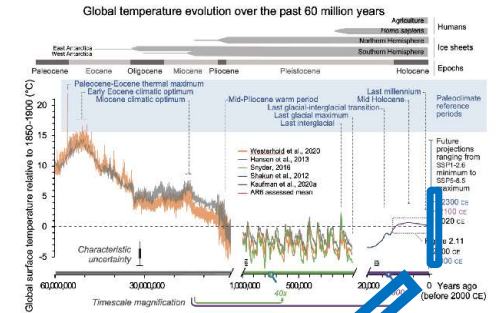
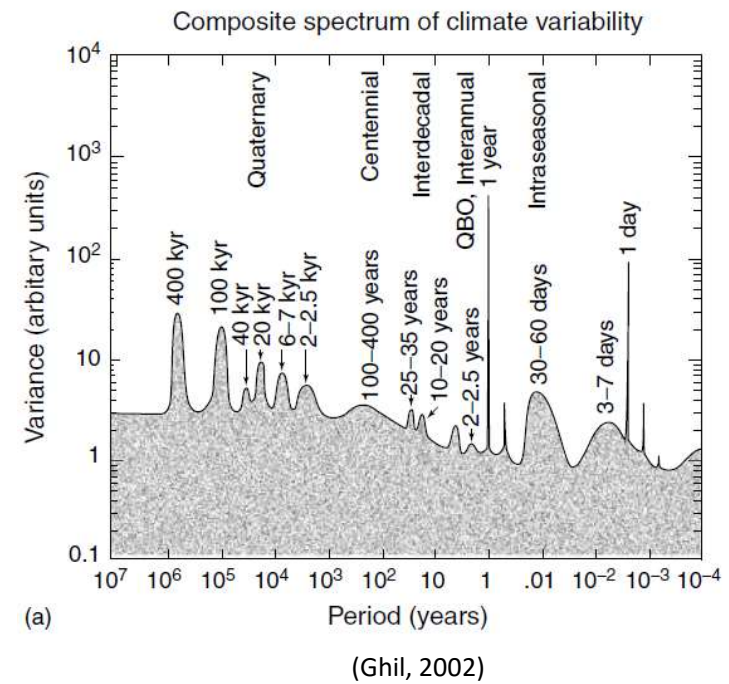
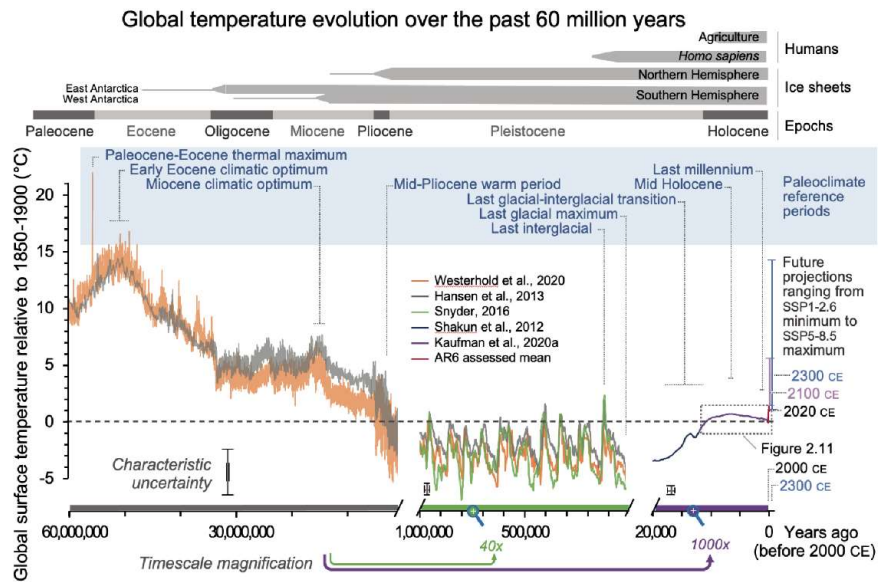


Figure 1.12 in IPCC, 2021: Chapter 1 (Chen et al., 2021)



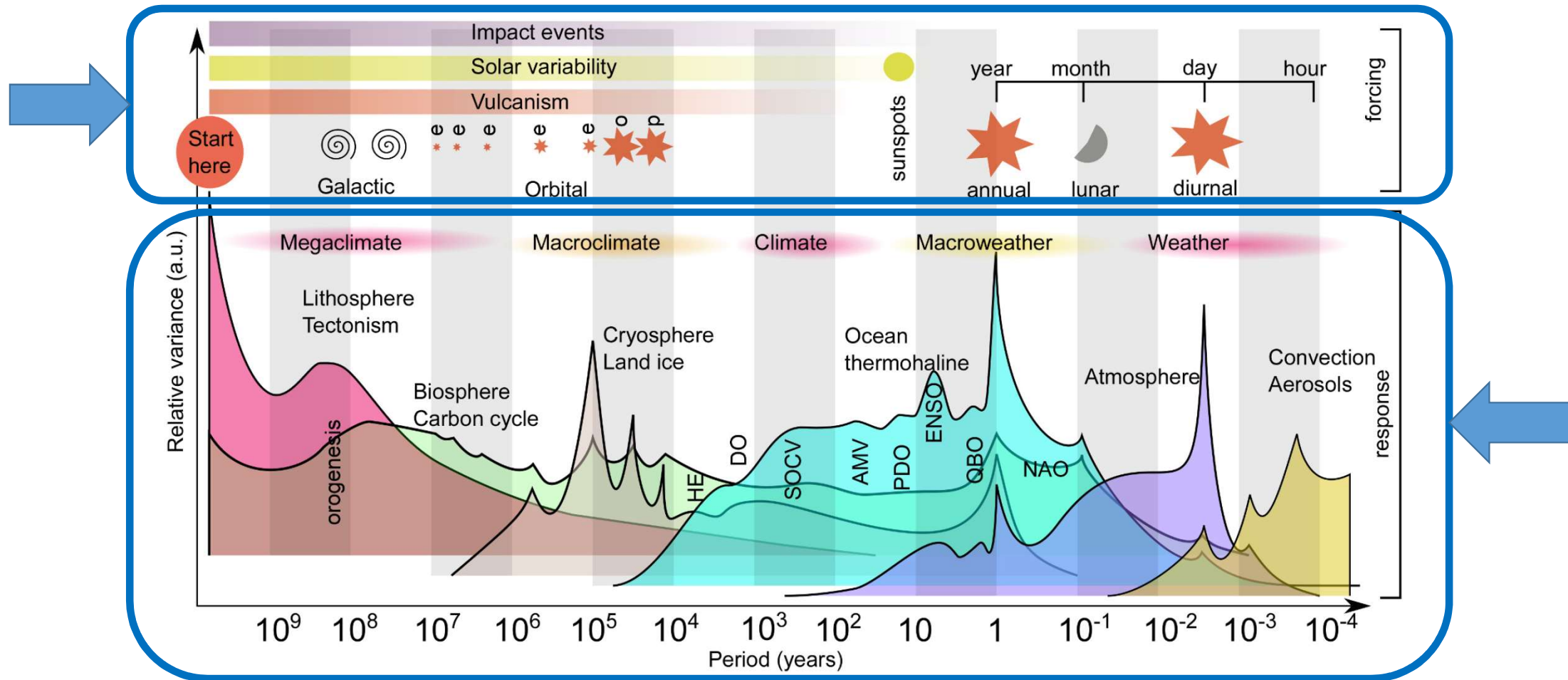


# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El espectro de frecuencias





# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: El espectro de frecuencias



(von der Heydt, A. S., 2021)

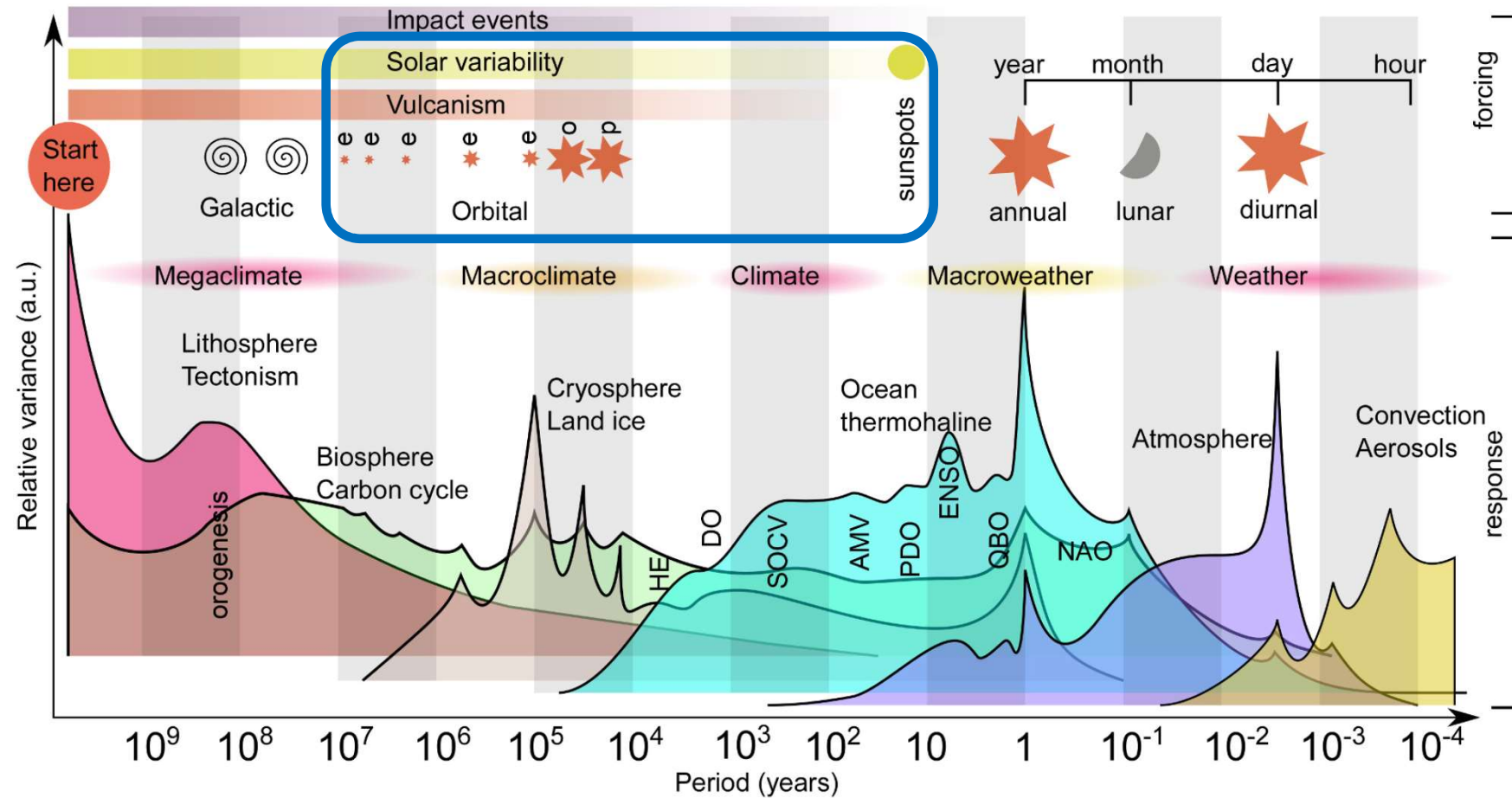
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA. Escalas temporales

<i>Climatic domain</i>	<i>Seconds</i>	<i>Equivalent</i>
Atmosphere		
Free	$10^6$	10 days
Boundary layer	$10^5$	24 hours
Ocean		
Mixed layer	$10^6-10^7$	Months to years
Deep	$10^{10}$	300 years
Sea ice	$10^6-10^{10}$	Days to 100s of years
Continents		
Snow and surface ice layer	$10^5$	24 hours
Lakes and rivers	$10^6$	10 days
Soil/vegetation	$10^6-10^{10}$	10 days to 100s of years
Mountain glaciers	$10^{10}$	300 years
Ice sheets	$10^{11}$	3000 years
Earth's mantle	$10^{15}$	30 million years

Tiempos de respuesta o de equilibrio de algunos subsistemas climáticos

(McGuffie and Henderson, 2005, Table 1.2)

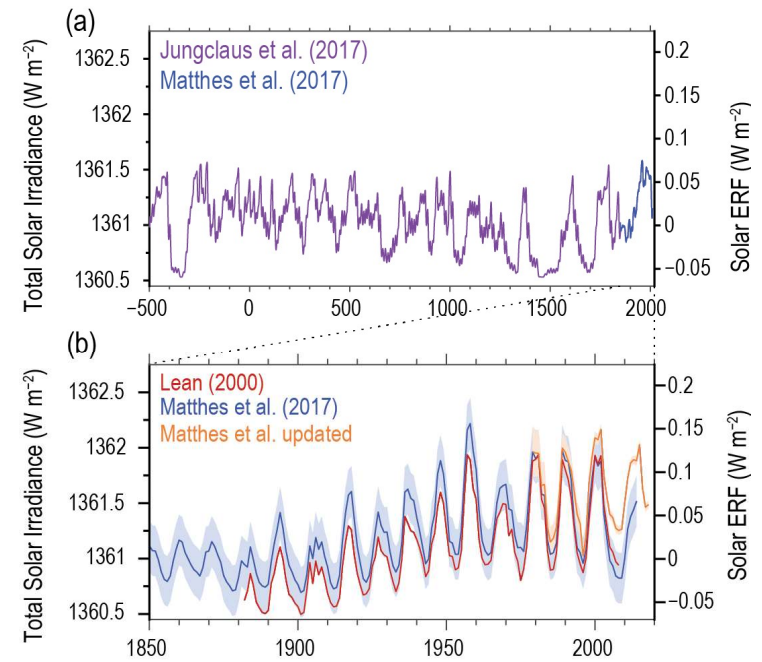
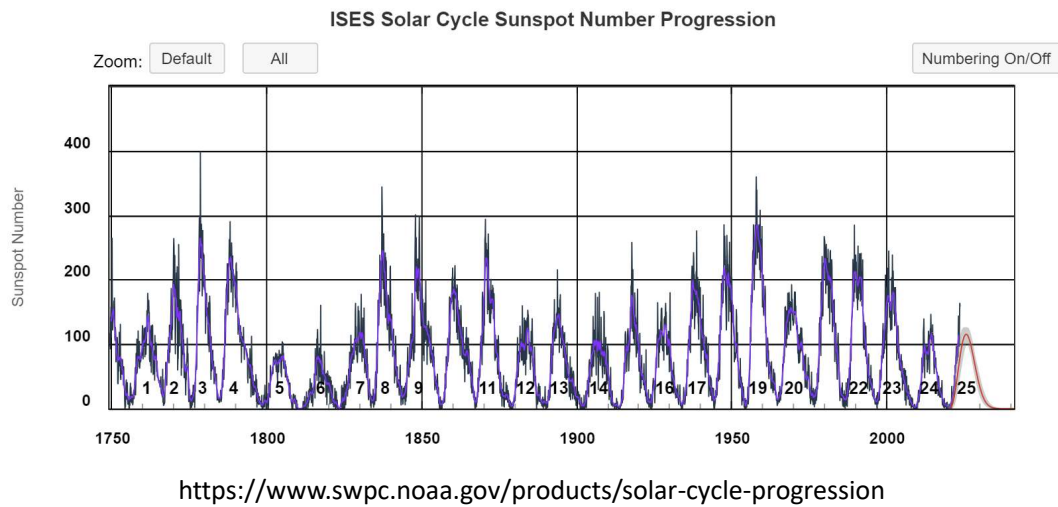
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Forzamientos



(von der Heydt, A. S., 2021)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Forzamientos

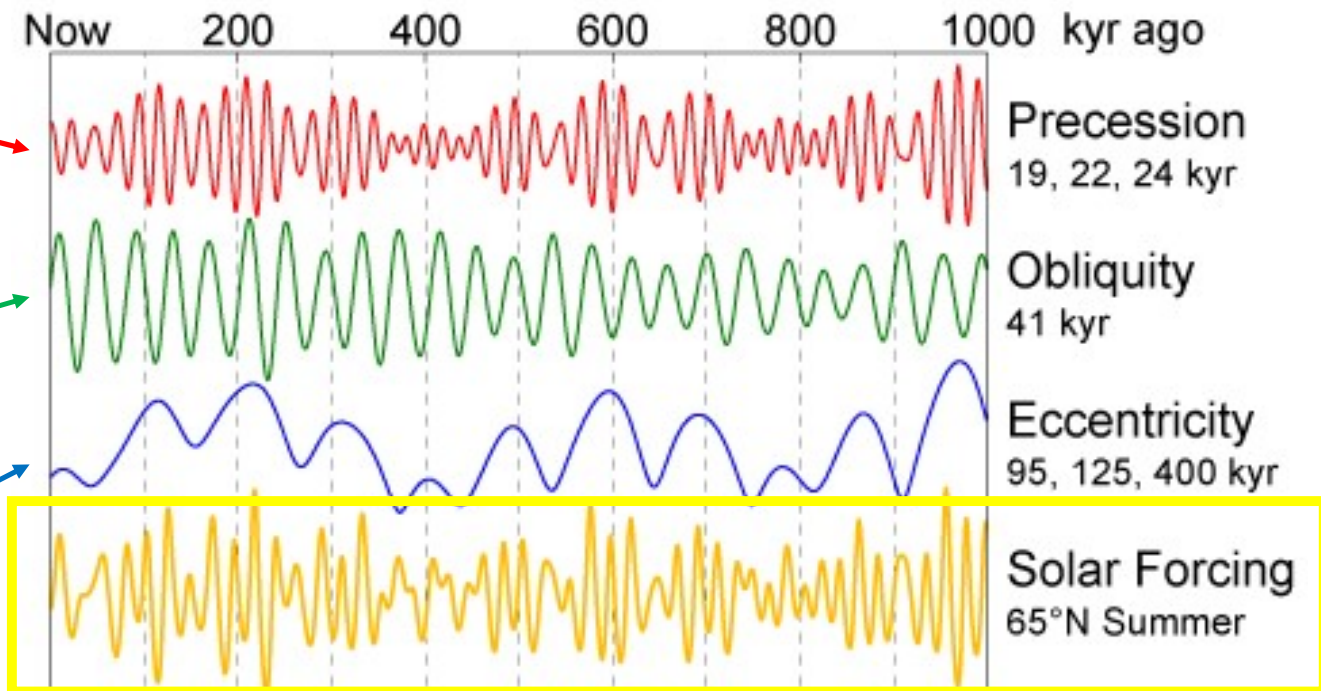
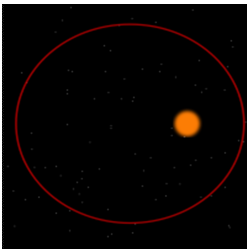
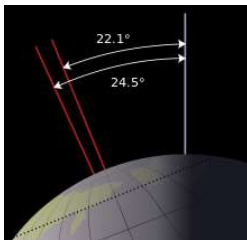
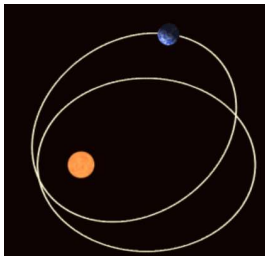
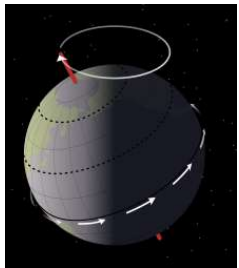
## Ciclos solares - 11 años



(Figure 2.2 in IPCC, 2021: Chapter 2)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Forzamientos

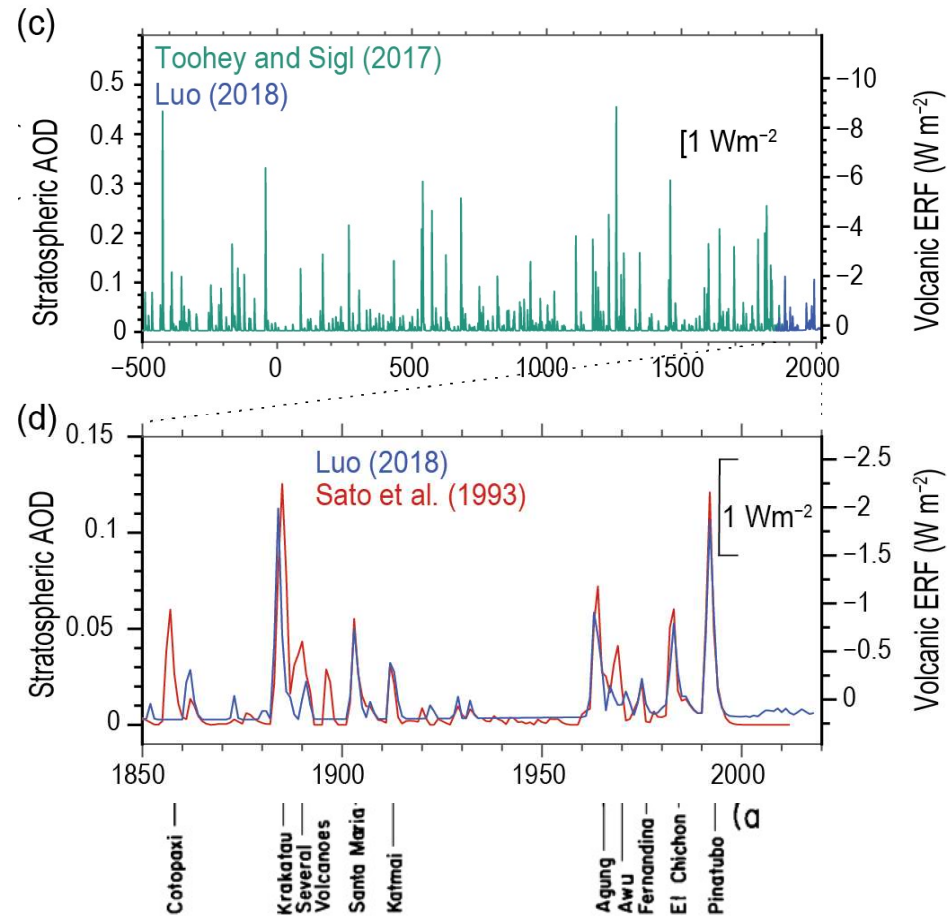
Parámetros orbitales (ciclos Milankovitz)





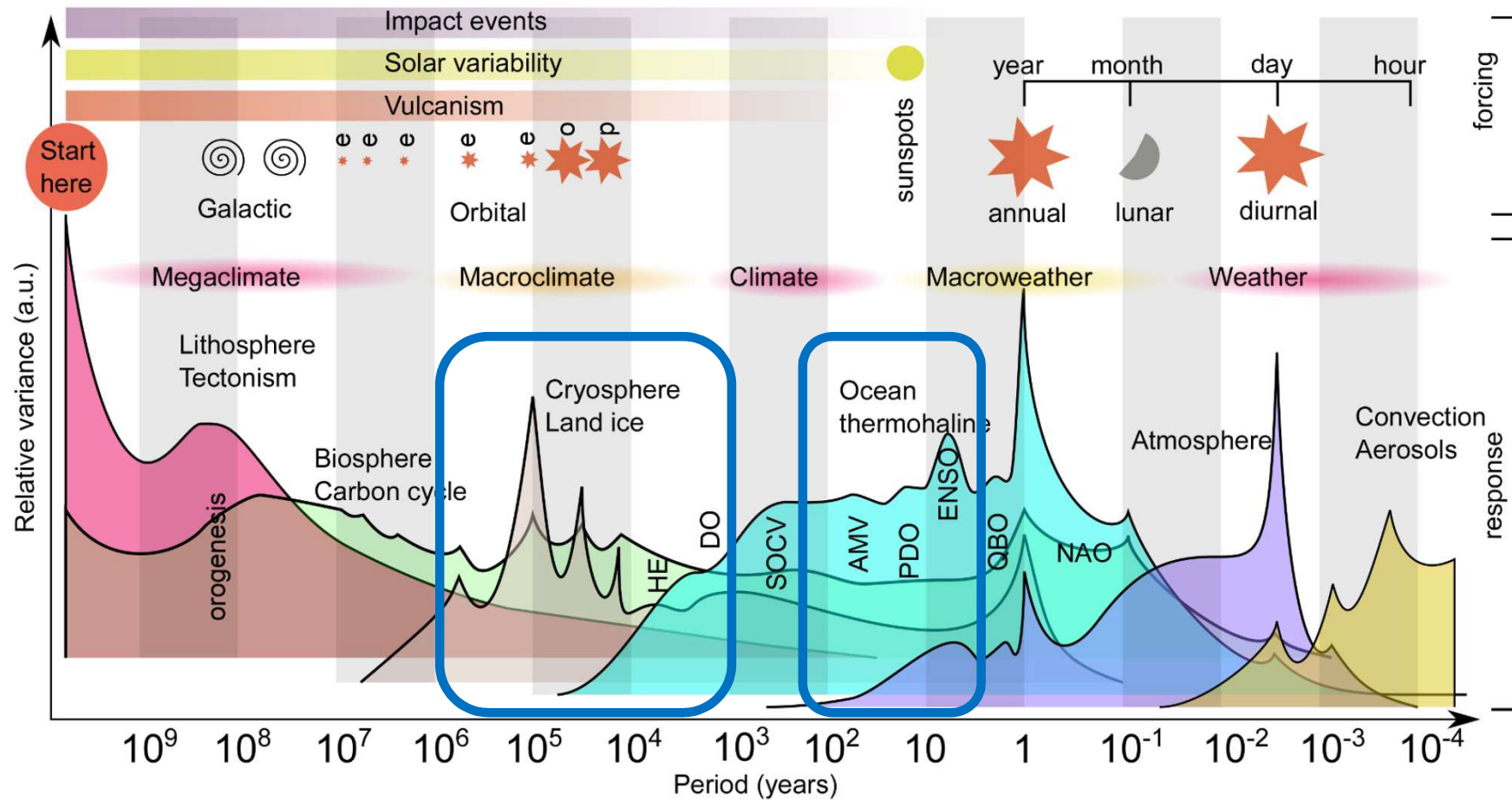
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Forzamientos

## Vulcanismo



(Figure 2.2 in IPCC, 2021: Chapter 2)

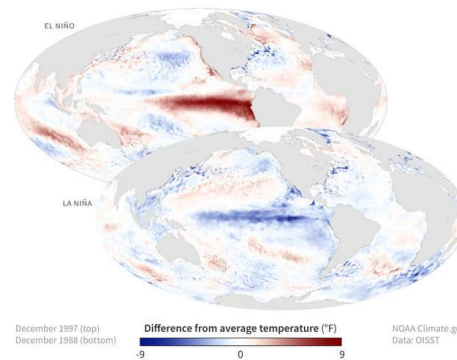
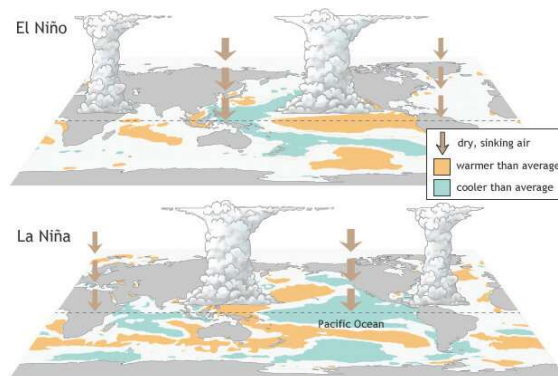
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema



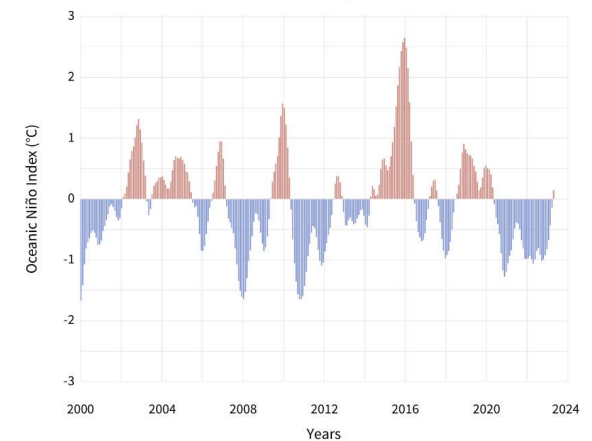
(von der Heydt, A. S., 2021)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

**ENSO** (El Niño- Oscilación del Sur)  
Océano-Atmósfera  
Variabilidad: 3-7años



## OCEANIC NIÑO INDEX (ONI)



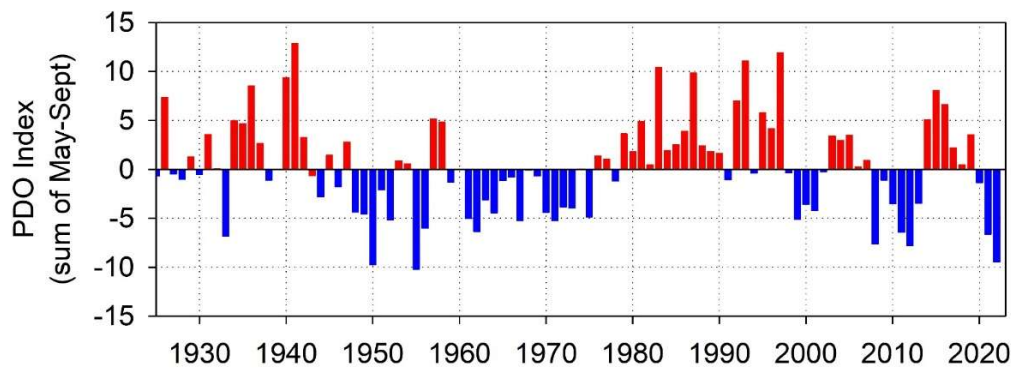
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>  
<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-el-ni%C3%B1o%E2%80%93southern-oscillation-enso-nutshell>

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

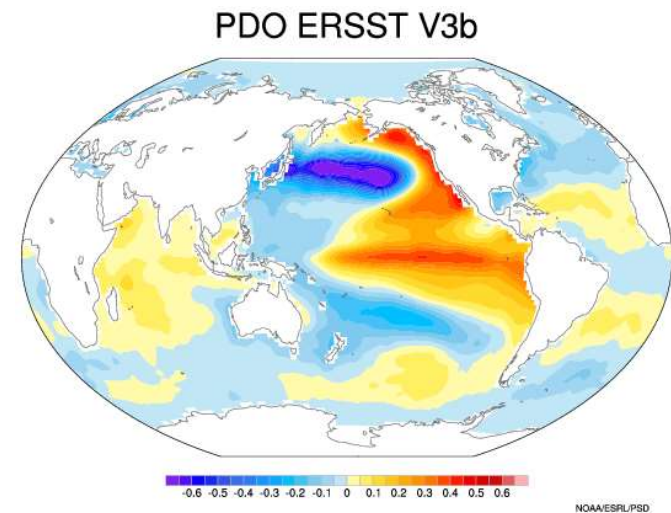
**PDO** (Oscilación Decenal Pacífico). Anomalías temperatura Pacífico Norte (> 20°N).

Océano-Atmósfera

Variabilidad: 20-30 años



<https://www.fisheries.noaa.gov/west-coast/science-data/climate-and-atmospheric-indicators>



PDO (+)

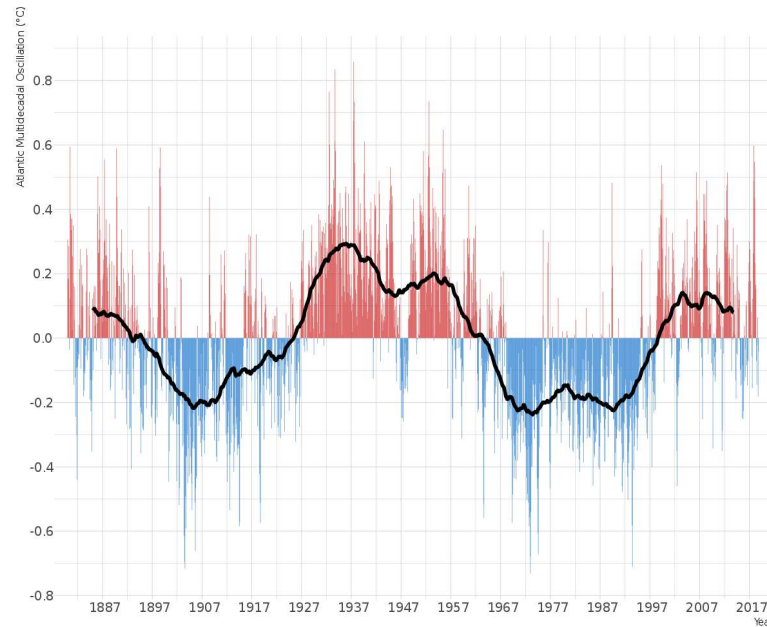
<https://psl.noaa.gov/pdo/>

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

## **AMO/AMV** (Oscilación/Variabilidad Multidecenal del Atlántico)

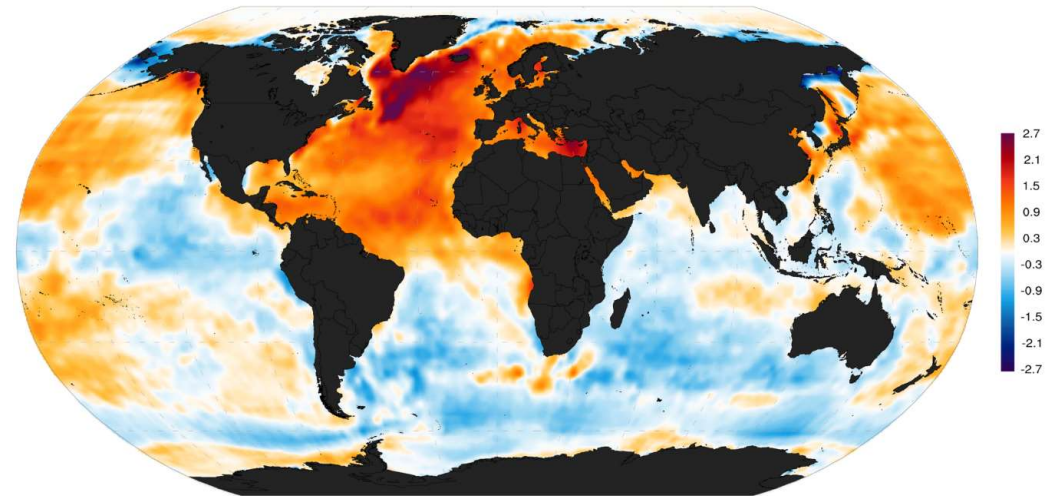
Océano-Atmósfera

Variabilidad: 50-70 años



By Giorgiop2, bender235 - Own work, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18733673>

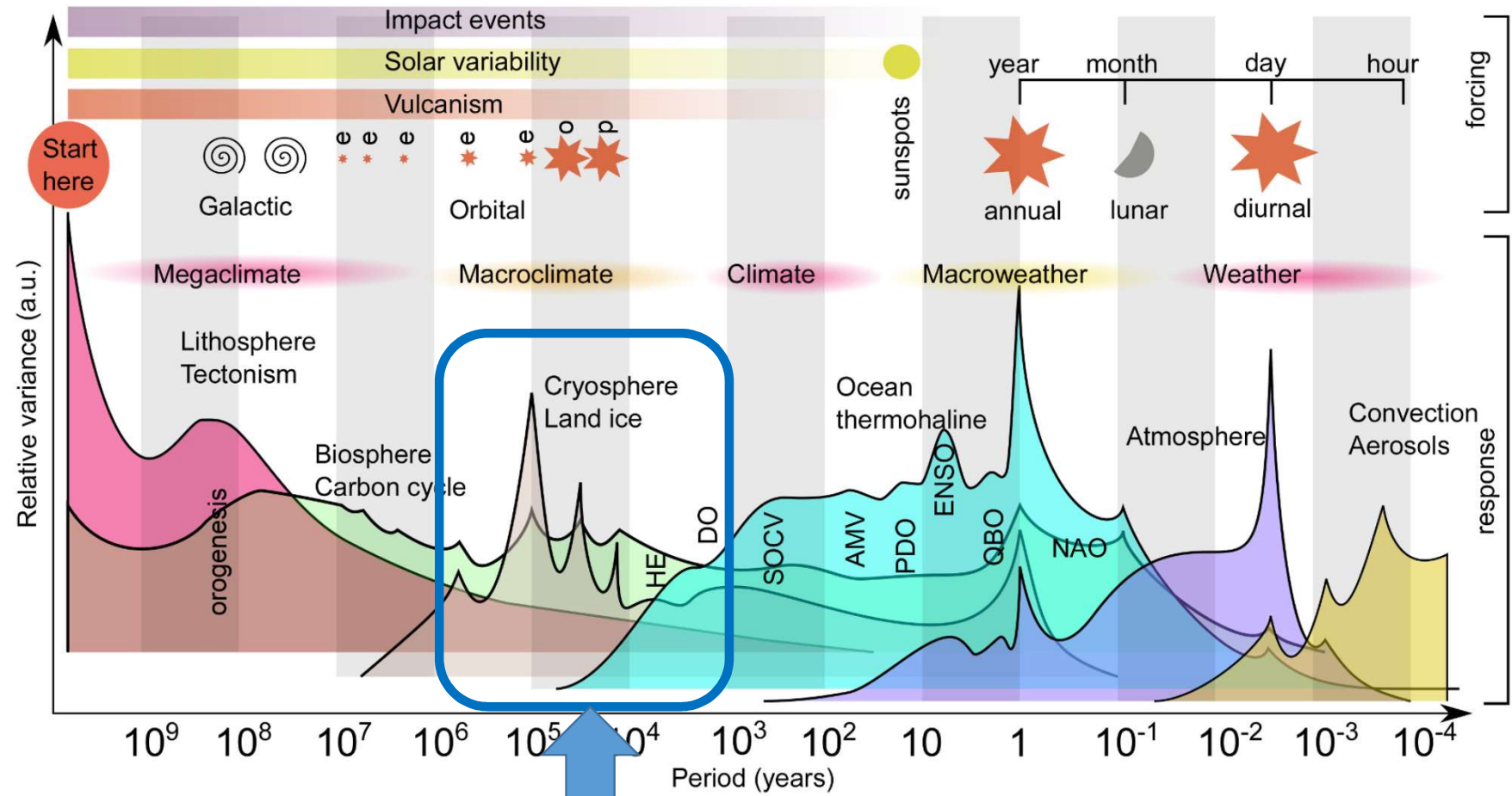
Atlantic Multidecadal Oscillation



By Giorgiop2 - Own work, CC BY-SA 3.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32266213>

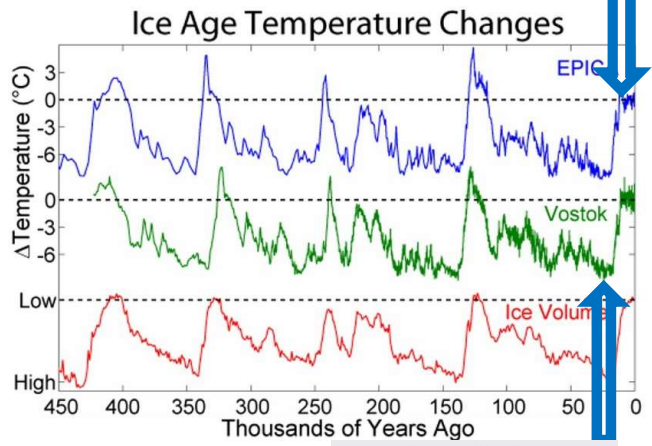


# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

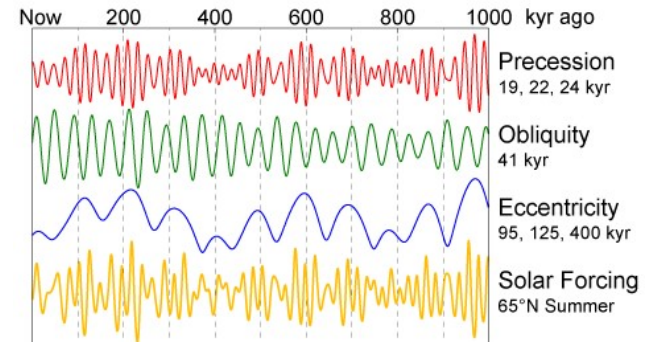


(Peter Heydt, A. S., 2021)

# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

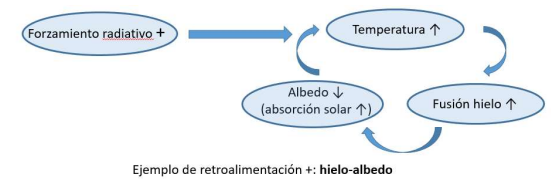
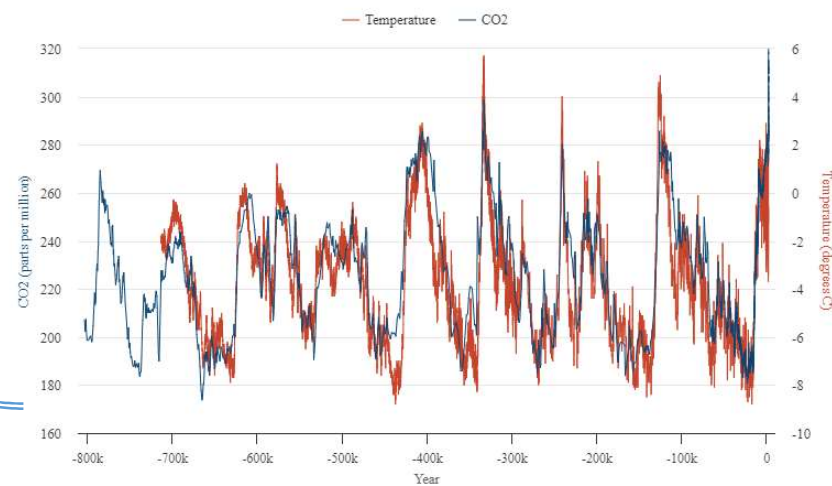


## Forzamiento



## + Realimentaciones: hielo-albedo, CO2,...

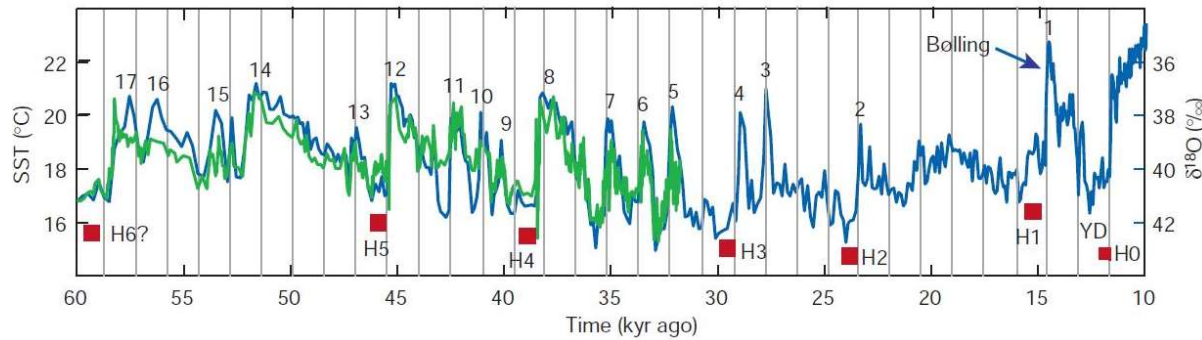
Antarctic Temperature and CO2 over the past 800,000 years



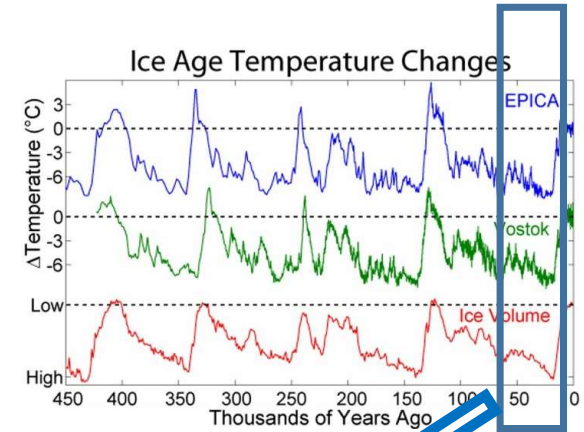
<https://www.carbonbrief.org/explainer-how-the-rise-and-fall-of-co2-levels-influenced-the-ice-ages/>

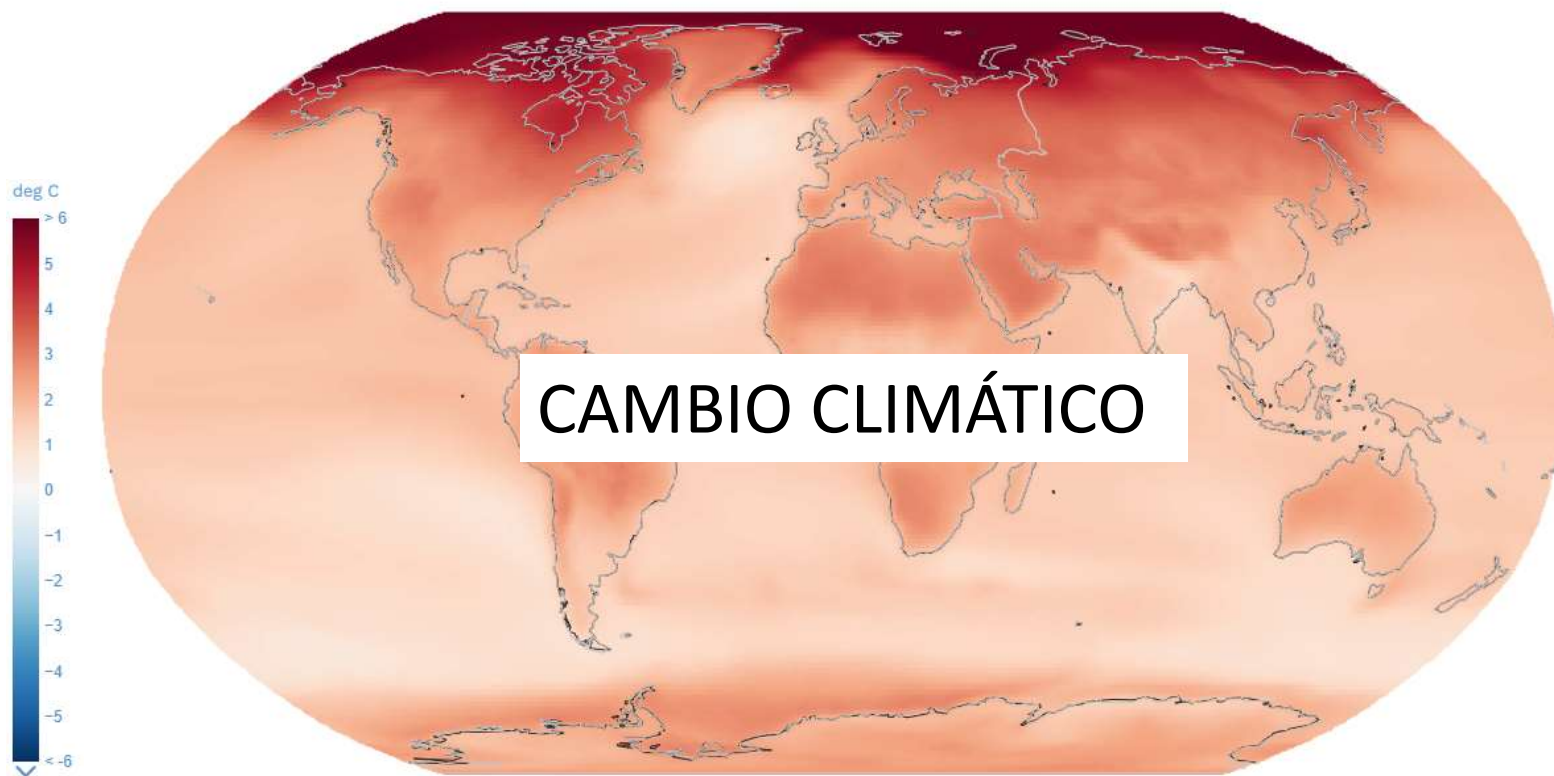
# VARIABILIDAD CLIMÁTICA: Respuesta del sistema

Eventos **Dansgaard-Oeschger** (calentamiento abrupto+enfriamiento lento,  $\approx 1500$  años )  
**Heinrich**  $\approx 7000y-12000y$  (enfriamiento)  
Criosfera-Oceano



(Rahmstorf, 2002)





---

CMIP6 - Mean temperature (T) Change deg C - Warming 2°C SSP5-8.5 (rel. to 1850-1900) - Annual (34 models)

# CAMBIO CLIMÁTICO

*“**Variación** del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del **valor medio y/o en la variabilidad** de sus propiedades, que persiste durante **largos períodos de tiempo**, generalmente decenios o períodos más largos.*

*El cambio climático puede deberse a procesos internos **naturales** o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios **antropógenos** persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.*

*La Convención Marco de las **Naciones Unidas** sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima **atribuido directa o indirectamente a la actividad humana** que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.”*



# CAMBIO CLIMÁTICO. Indicadores

## Ocean

Temperature/ocean heat content	•
Salinity	•
Sea level	•
Circulation	•
pH and deoxygenation	•

## Atmosphere and surface

Surface and upper air temperatures	•	•
Hydrological cycle components (surface humidity, precipitable water vapour, precipitation, runoff, Precipitation–Evaporation)	•	•
Atmospheric circulation (sea level pressure and winds, Hadley/Walker circulation, global monsoons, blocking, storm tracks and jets, sudden stratospheric warmings)	•	•

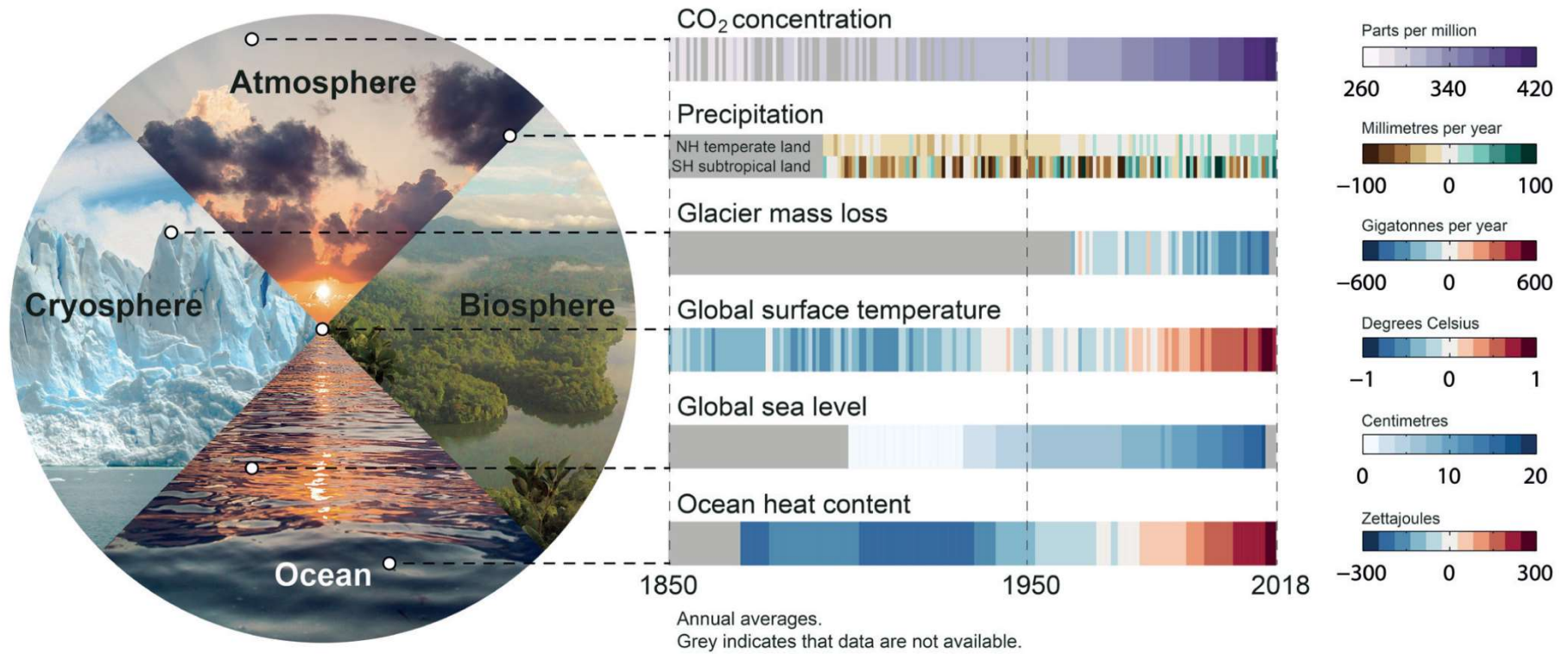
## Biosphere

Seasonal cycle of CO <sub>2</sub>	•
Marine biosphere (distribution of marine biota, primary production, phenology)	•
Terrestrial biosphere (distribution of terrestrial biota, global greening/browning, growing season)	•

## Cryosphere

Sea ice extent/area, seasonality and thickness	•
Terrestrial snow cover	•
Glacier mass and extent	•
Ice-sheet mass and extent	•
Terrestrial permafrost temperature and active layer thickness	•

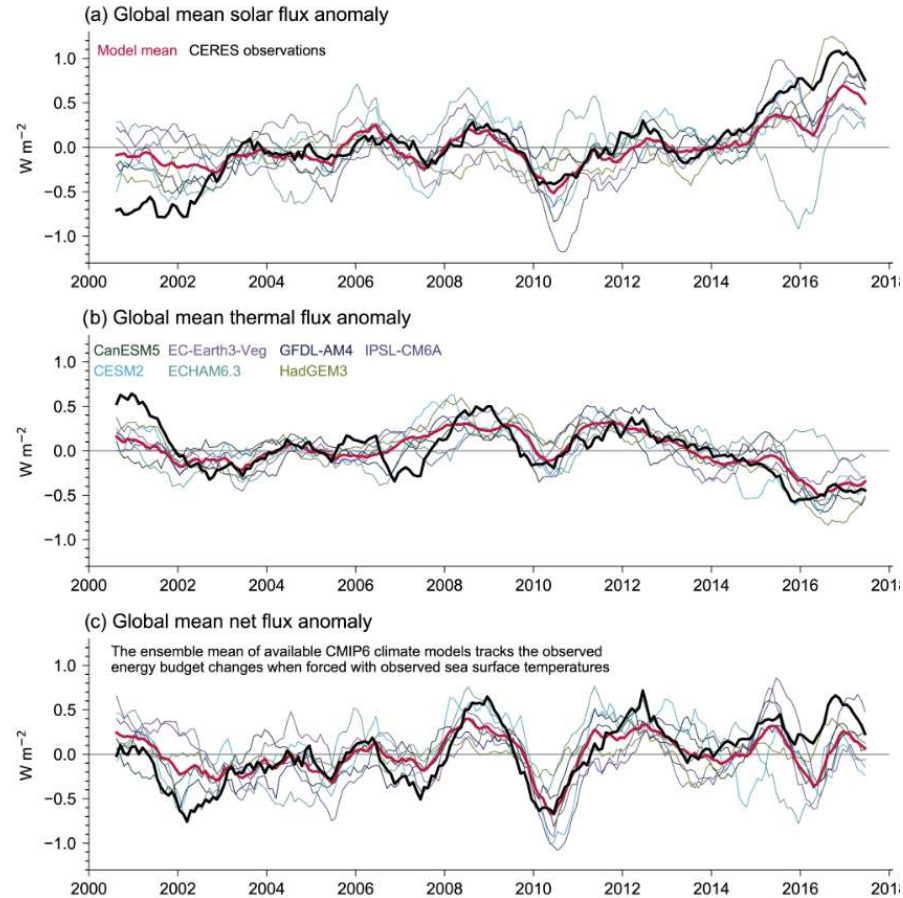
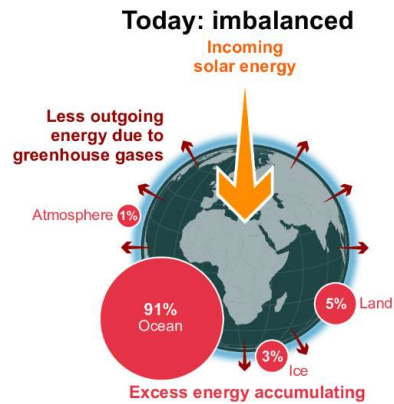
# CAMBIO CLIMÁTICO. Indicadores



(Figure 1.4 in IPCC, 2021: Chapter 1)

# CAMBIO CLIMÁTICO. Balance energía T.O.A.

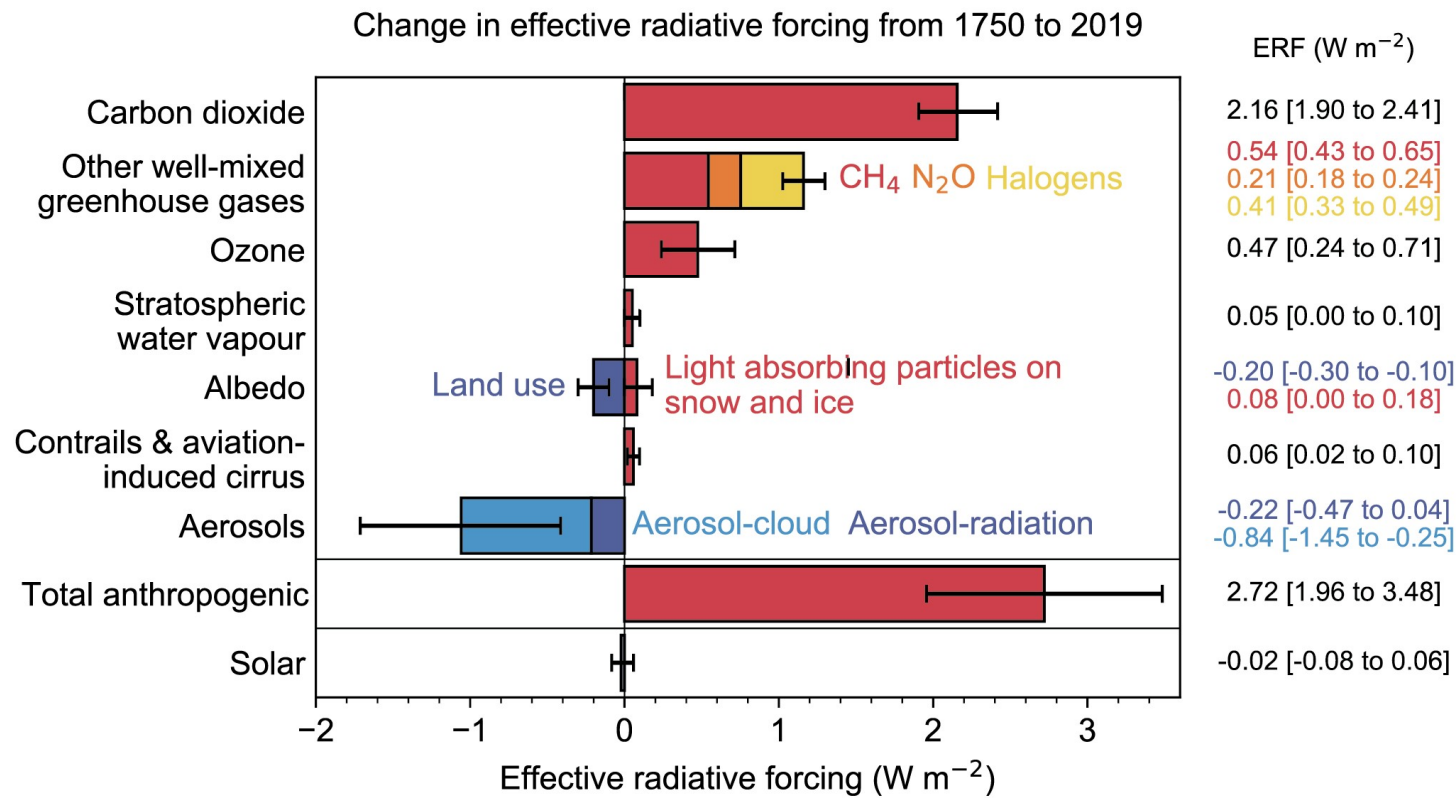
## Desequilibrio en el balance de energía



Anomalies in global mean all-sky top-of-atmosphere (TOA) fluxes from CERES-EBAF Ed4.0 (solid black lines) and various CMIP6 climate models (coloured lines) (positive: downwards)

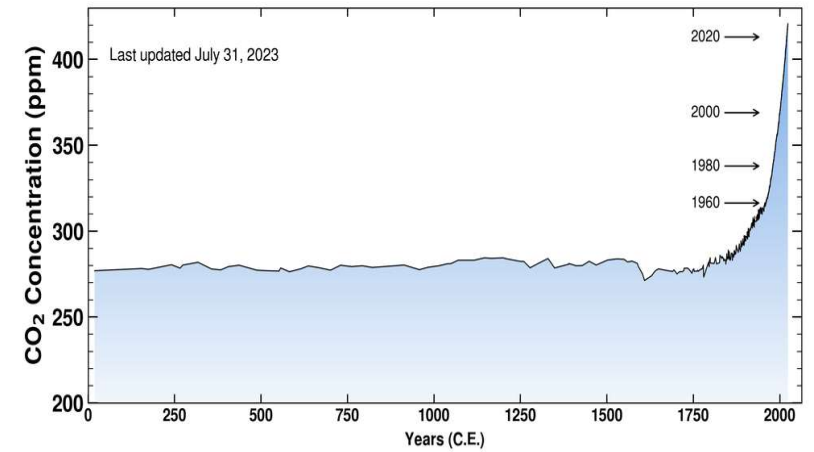
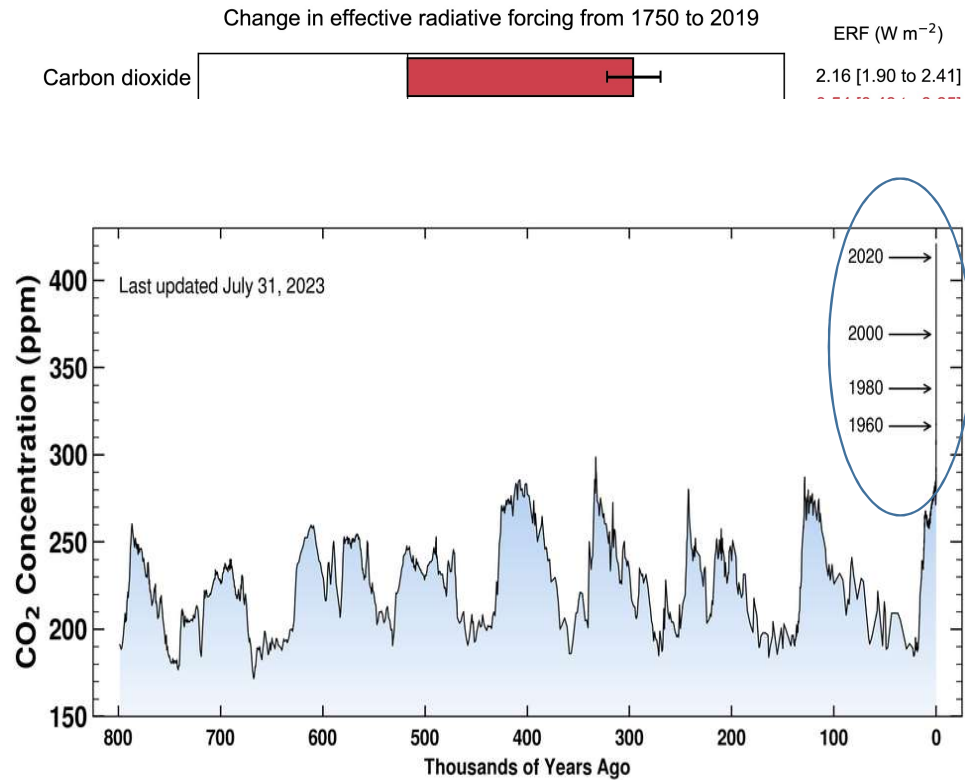
(Figure 7.3 in IPCC, 2021: Chapter 7)

# CAMBIO CLIMÁTICO. Forzamientos



(Figure 7.6 in IPCC, 2021: Chapter 7)

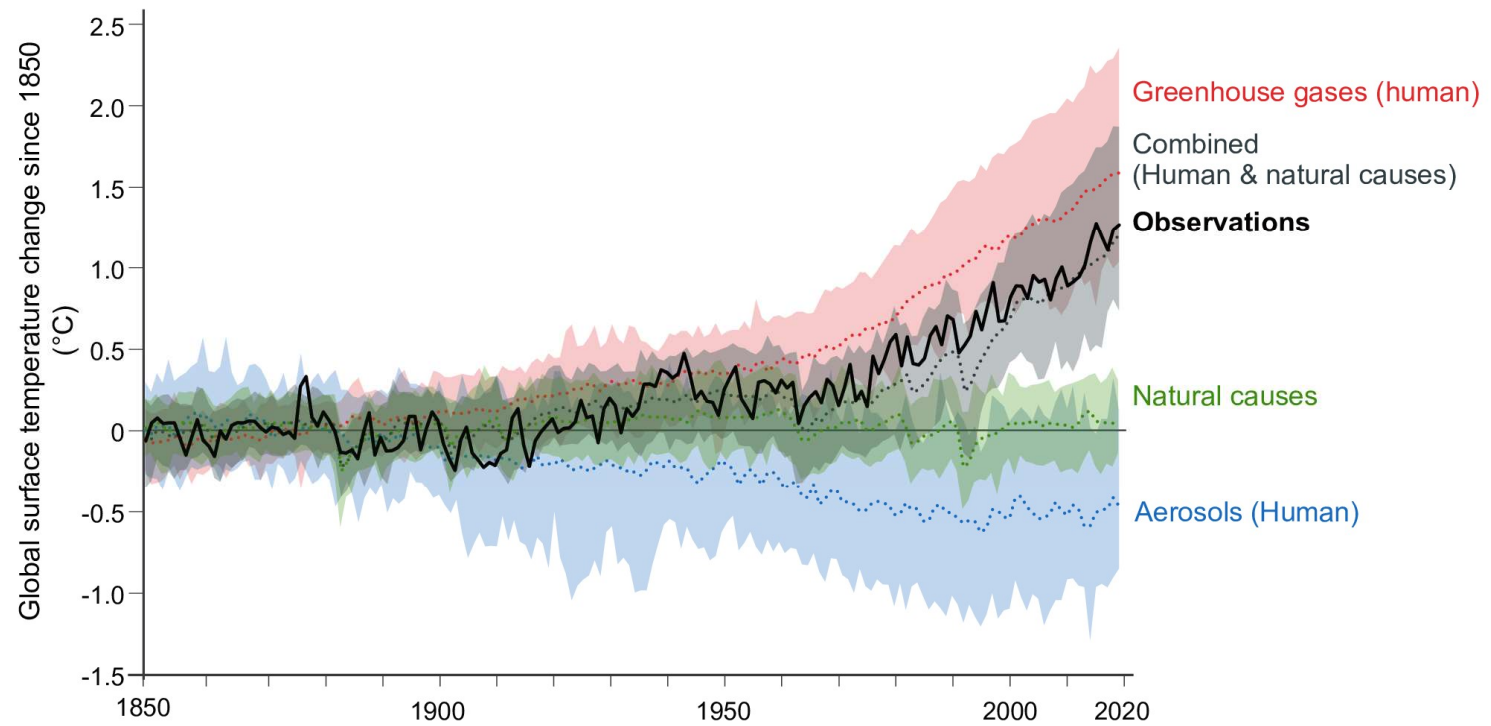
# CAMBIO CLIMÁTICO. Forzamientos



( <https://keelingcurve.ucsd.edu/> )

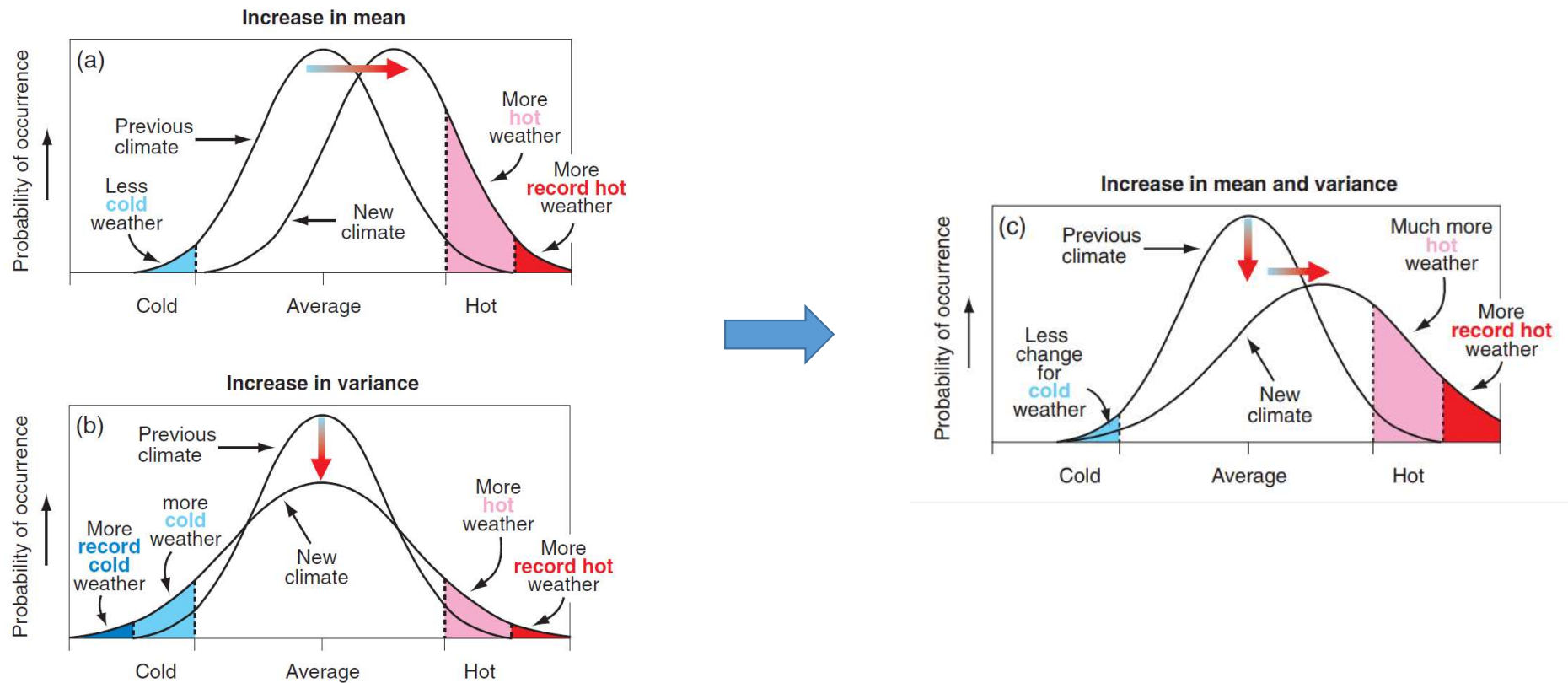


# CAMBIO CLIMÁTICO. Atribución



(FAQ 3.1, Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 3)

# CAMBIO CLIMÁTICO. Extremos



(Fig 2.32, IPCC TAR (Folland et al, 2001))

# CAMBIO CLIMÁTICO. Extremos

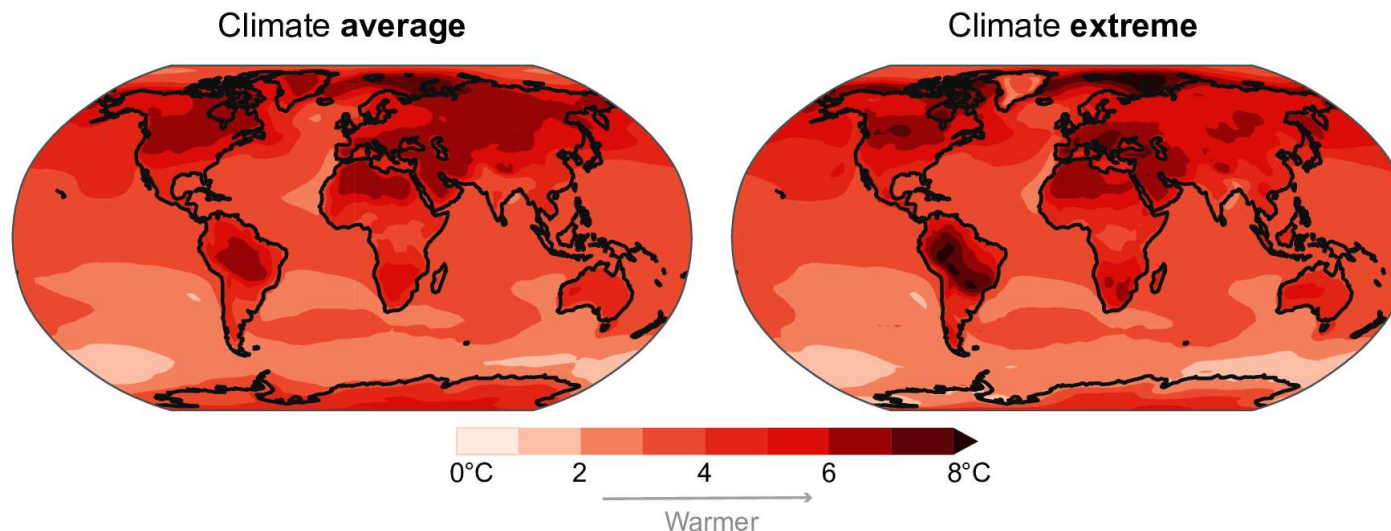
Temperatura **promedio** verano:

*(Desde <3°C -Sur de Asia, sur de Sudamérica,...- hasta 7°C - Norteamérica, norte de Africa, Medio Este,...- )*

Temperatura **extrema**:

Patrones de temperatura **promedio/extrema** son **similares**

*(si bien en algunas zonas los extremos se intensifican -sur de Europa, Cuenca Amazónica- o debilitan -Norte de Asia, Groenlandia-)*



Escenario con un calentamiento global de 4°C referido a las temperaturas de 1850–1900 (mediana del ensemble CMIP6)

(FAQ 11.1 Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 11)

# CAMBIO CLIMÁTICO. Extremos

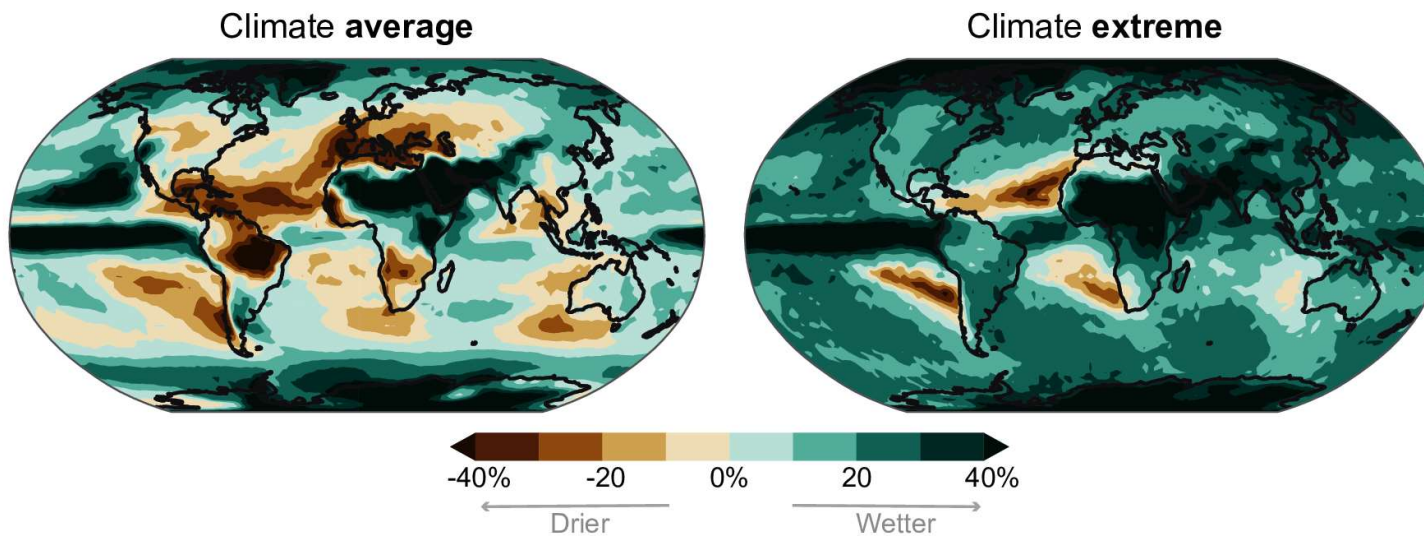
Precipitación **promedio**:

*(Precipitación ↓↓ en el sur de Europa y norte de Sudamérica;  
Precipitación ↑↑ en el Medio Este y el sur de América )*

Precipitación **extrema**

Cambios más uniformes en precipitación extrema

*(incrementos sistemáticos en casi todas las zonas continentales  $\approx 7\%/^{\circ}\text{C}$ )*



Escenario con un calentamiento global de 4°C referido a las temperaturas de 1850–1900 (mediana del ensemble CMIP6)

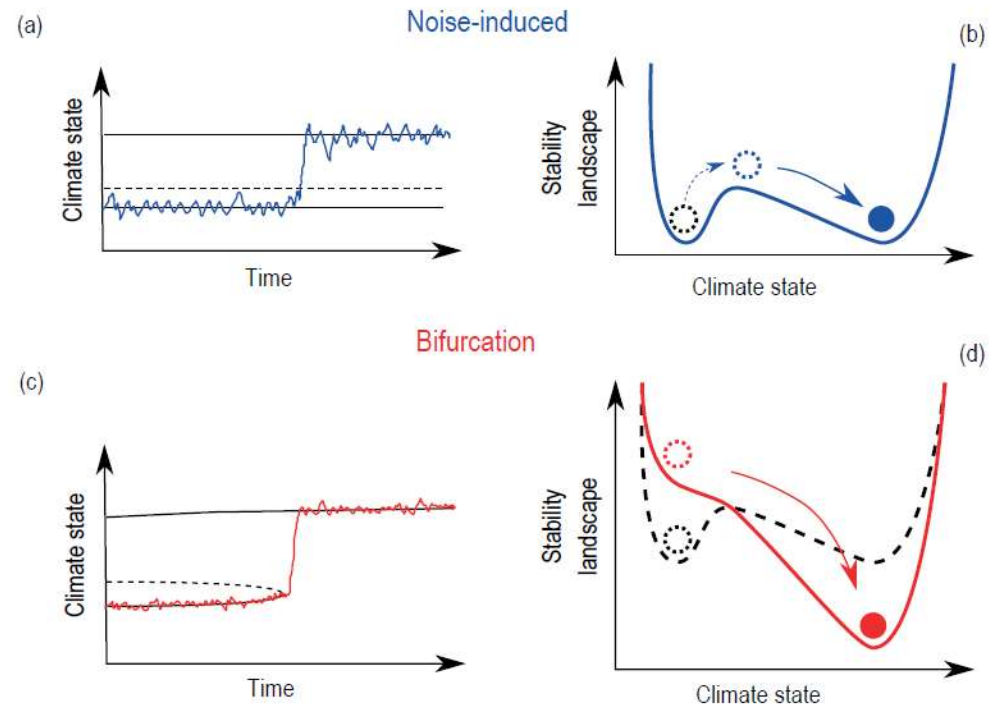
(FAQ 11.1 Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 11)

# CAMBIO CLIMÁTICO. Puntos críticos o “tipping points”

## PUNTO CRÍTICO

*“En el clima, umbral crítico hipotético en el que el clima global o regional cambia de un estado estable a otro estado estable. Los episodios de punto crítico pueden ser irreversibles”*

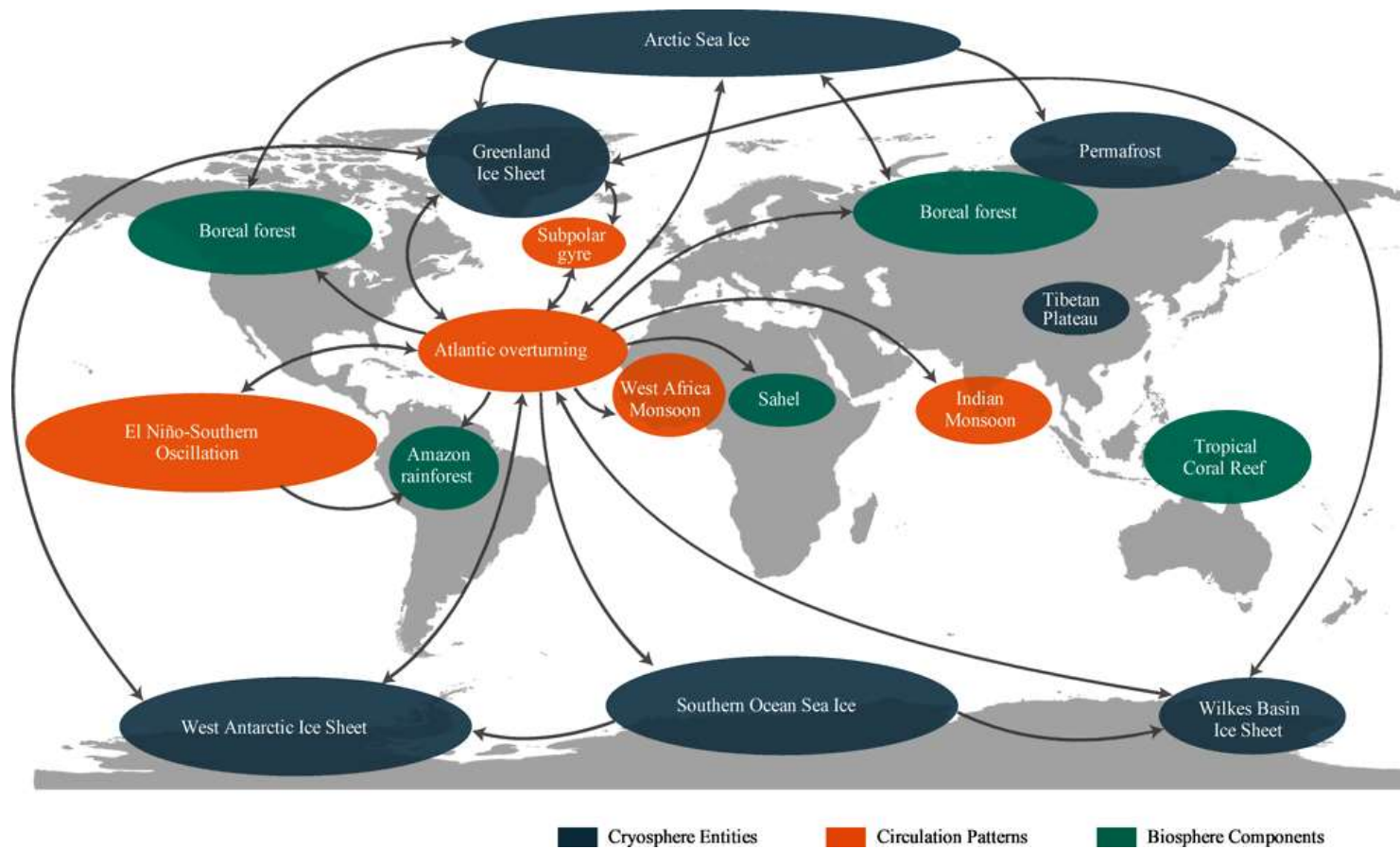
(IPCC AR5 WGI Glosario)



(IPCC AR6, Chen et al., 2021)

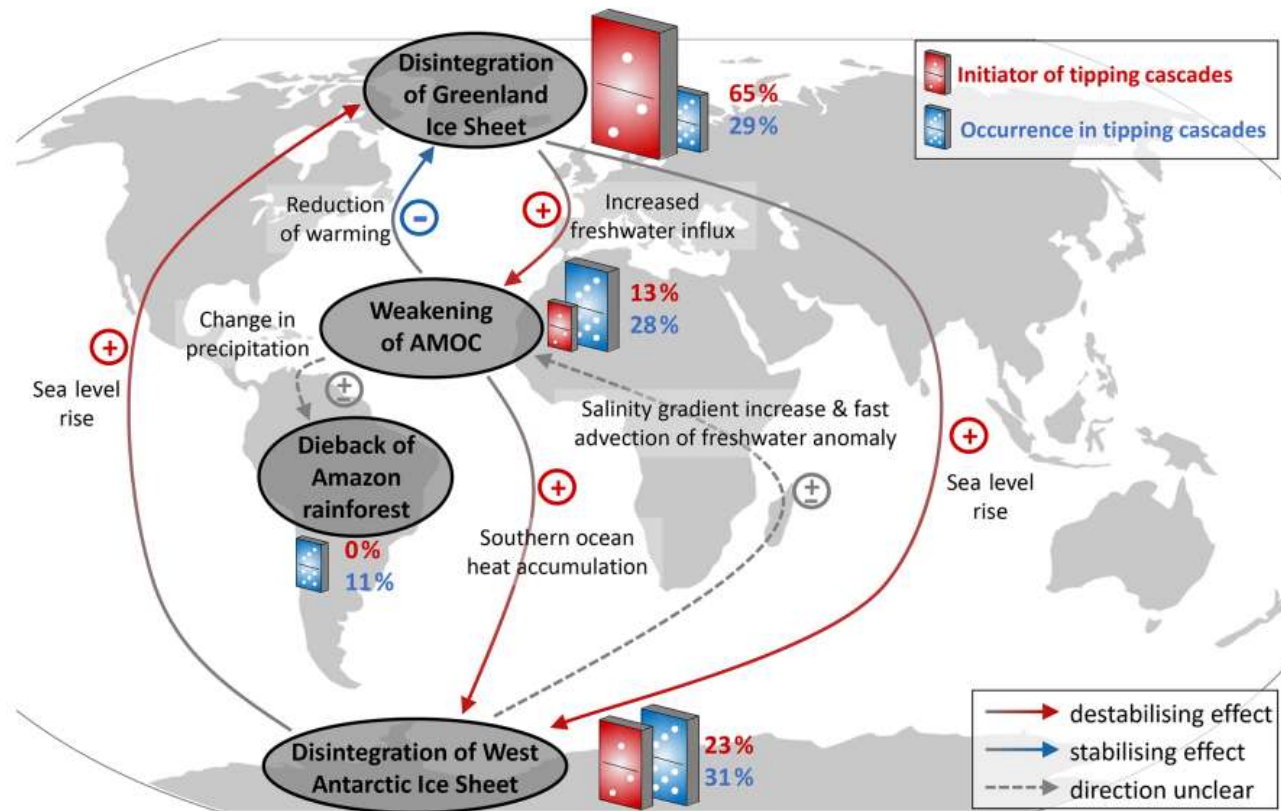


# CAMBIO CLIMÁTICO. Puntos críticos o “tipping points”



( <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/8dd5e292-en/index.html?itemId=/content/component/8dd5e292-en> )

# CAMBIO CLIMÁTICO. Puntos críticos “en cascada”



(Wunderling et al., 2021)

## RESUMEN

-El sistema climático está formado por la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera, la criosfera y la litosfera, subsistemas interrelacionados entre sí no linealmente y con escalas temporales muy diferentes.

-El sistema climático intercambia energía radiativa con el exterior. El clima refleja el resultado del balance energético a nivel planetario.

-El clima viene caracterizado por el promedio de los estados meteorológicos en tiempos lo suficientemente largos. Se expresa en función de valores promedio e intervalos de variabilidad de variables meteorológicas.

- Los forzamientos alteran el equilibrio y modifican el clima y puede causar la transición a otros estados de equilibrio diferentes al actual. Las interacciones no lineales entre los diversos componentes del sistema generan la variabilidad climática.

-Los forzamientos del clima pueden ser naturales o antropógenos. Los forzamientos naturales pueden ser periódicos o cuasi periódicos. El sistema climático “responde” a estos forzamientos con su dinámica interna.

-La variabilidad climática en cada periodo histórico se explica por los forzamientos y retroalimentaciones de escalas relevantes en cada periodo. El cambio climático moderno (periodo industrial) es principalmente producido por forzamientos antropogénicos, especialmente por efecto de los gases de efecto invernadero.



CMIP6 - Mean temperature (T) Change deg C - Warming 2°C SSP5-8.5 (rel. to 1850-1900) - Annual (34 models)

# REFERENCIAS

- Augustin, L., Barbante, C., Barnes, P. R. F., Marc Barnola, J., Bigler, M., Castellano, E., Cattani, O., Chappellaz, J., Dahl-Jensen, D., Delmonte, B., Dreyfus, G., Durand, G., Falourd, S., Fischer, H., Flückiger, J., Hansson, M. E., Huybrechts, P., Jugie, G., Johnsen, S. J., ... EPICA community members (participants are listed alphabetically). (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429(6992), Article 6992. <https://doi.org/10.1038/nature02599>
- Chen, D., Rojas, M., Samset, B. H., Cobb, K., Diongue-Niang, A., Edwards, P., Emori, S., Faria, S. H., Hawkins, E., Hope, P., Huybrechts, P., Meinshausen, M., Mustafa, S. K., Plattner, G.-K., & Tréguier, A. M. (2021). Framing, context, and methods. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 147-286). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records. *Paleoceanography*, 20(1). <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Matthews, J. B. R., Fuglestad, J. S., Masson-Delmotte, V., Möller, V., Méndez, C., van Diemen, R., Reisinger, A., & Semenov, S. (2021). Annex VII: Glossary. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 2215-2256). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- McGuffie and Henderson, 2005. *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470857617.ch1>
- Mitchell, J. M. (1976). An overview of climatic variability and its causal mechanisms. *Quaternary Research*, 6(4), 481-493. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(76\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0033-5894(76)90021-1)
- Ghil M. (2002) Natural Climate Variability, Volume 1, The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change, pp 544–549 Encyclopedia of Global Environmental Change John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2002
- Osman, M.B., Tierney, J.E., Zhu, J. et al. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum (2021). *Nature* 599, 239–244
- PAGES2k Consortium. 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. *Scientific Data*, 4, 170088. doi: 10.1038/sdata.2017.88
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmonte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., & Stievenard, M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), Article 6735. <https://doi.org/10.1038/20859>



# REFERENCIAS

Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 419(6903), Article 6903. <https://doi.org/10.1038/nature01090>

von der Heydt, A. S., Ashwin, P., Camp, C. D., Crucifix, M., Dijkstra, H. A., Ditlevsen, P., & Lenton, T. M. (2021). Quantification and interpretation of the climate variability record. *Global and Planetary Change*, 197, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103399>

Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J., & Winkelmann, R. (2021). Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth System Dynamics*, 12(2), 601-619. <https://doi.org/10.5194/esd-12-601-2021>