

Climatología

Curso 2025

Facultad de Ciencias

Universidad de la República



Departamento de Ciencias de la Atmósfera
y Física de los Océanos

Objetivo del curso

- Presentar al estudiante el funcionamiento general del **Sistema Climático**.
- Usando las **leyes físicas** se describirán :
 - la interacción de la radiación con la atmósfera (que da lugar al efecto invernadero)
 - los movimientos atmosféricos y oceánicos a nivel planetario.

Esto dará lugar a la clasificación de climas en diferentes regiones de la Tierra, y se procederá a mostrar la circulación atmosférica asociada a ciertos climas regionales.
- Por último se realizará una introducción al cambio climático.

Contenido del curso

- El sistema climático de la Tierra.
- La atmósfera terrestre.
- Interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre y la superficie.
- Balance energético global en la Tierra. Las estaciones.
- El ciclo hidrológico.
- Circulación general de la atmósfera.
- Corrientes en chorro y su relación con el tiempo meteorológico.
- Masas de aire y frentes. Clasificación, estructura vertical, campos asociados.
- Ciclones y anticiclones. Desarrollo y estructura. Tormentas y fenómenos de tiempo severo.
- Evolución anual de temperatura y lluvia. Balance hídrico climático.
- Componente geográfica del clima.
- Circulación general de los océanos.
- Variabilidad climática y cambio climático.
- El Clima y los desastres: huracanes, tornados, inundaciones, sequías, olas de calor y olas de frío.

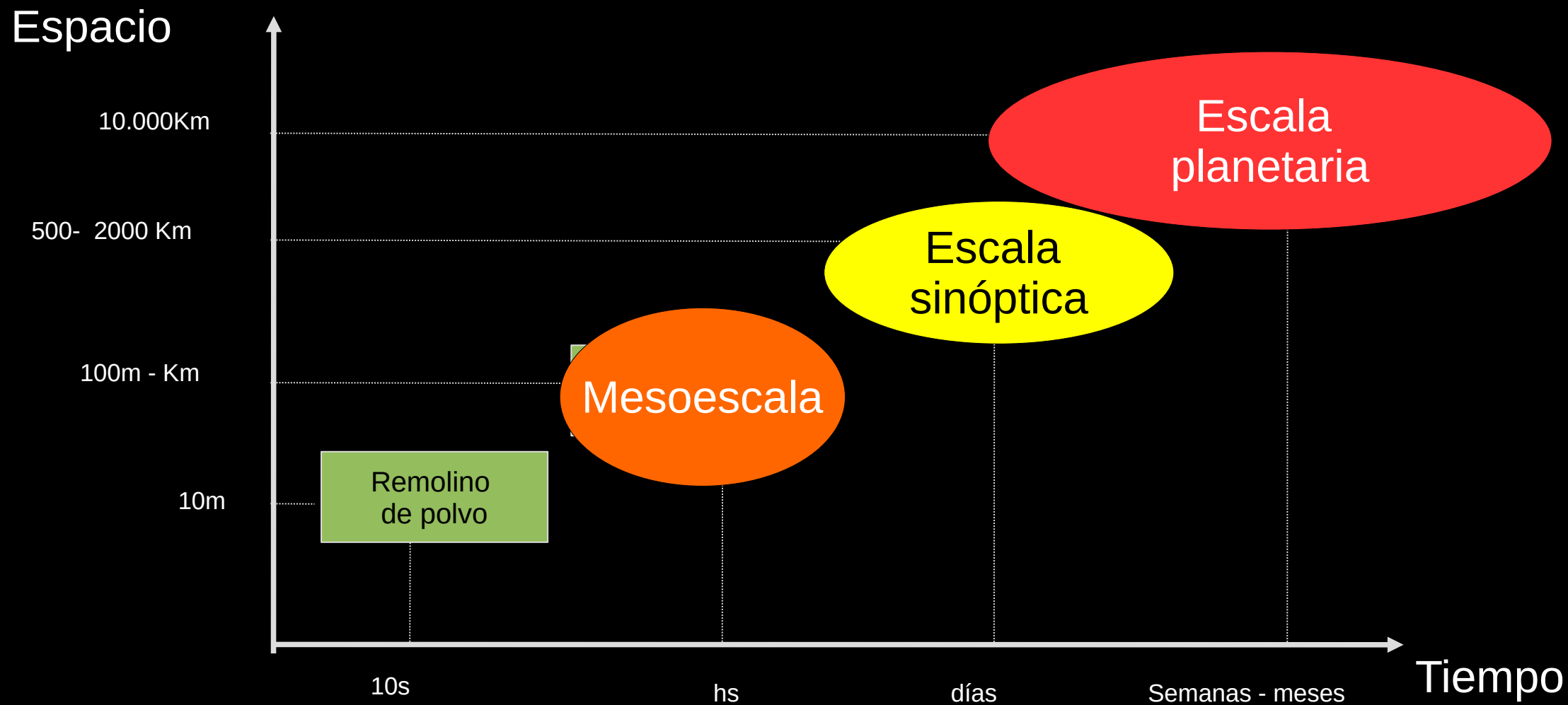
EL SISTEMA CLIMÁTICO DE LA TIERRA



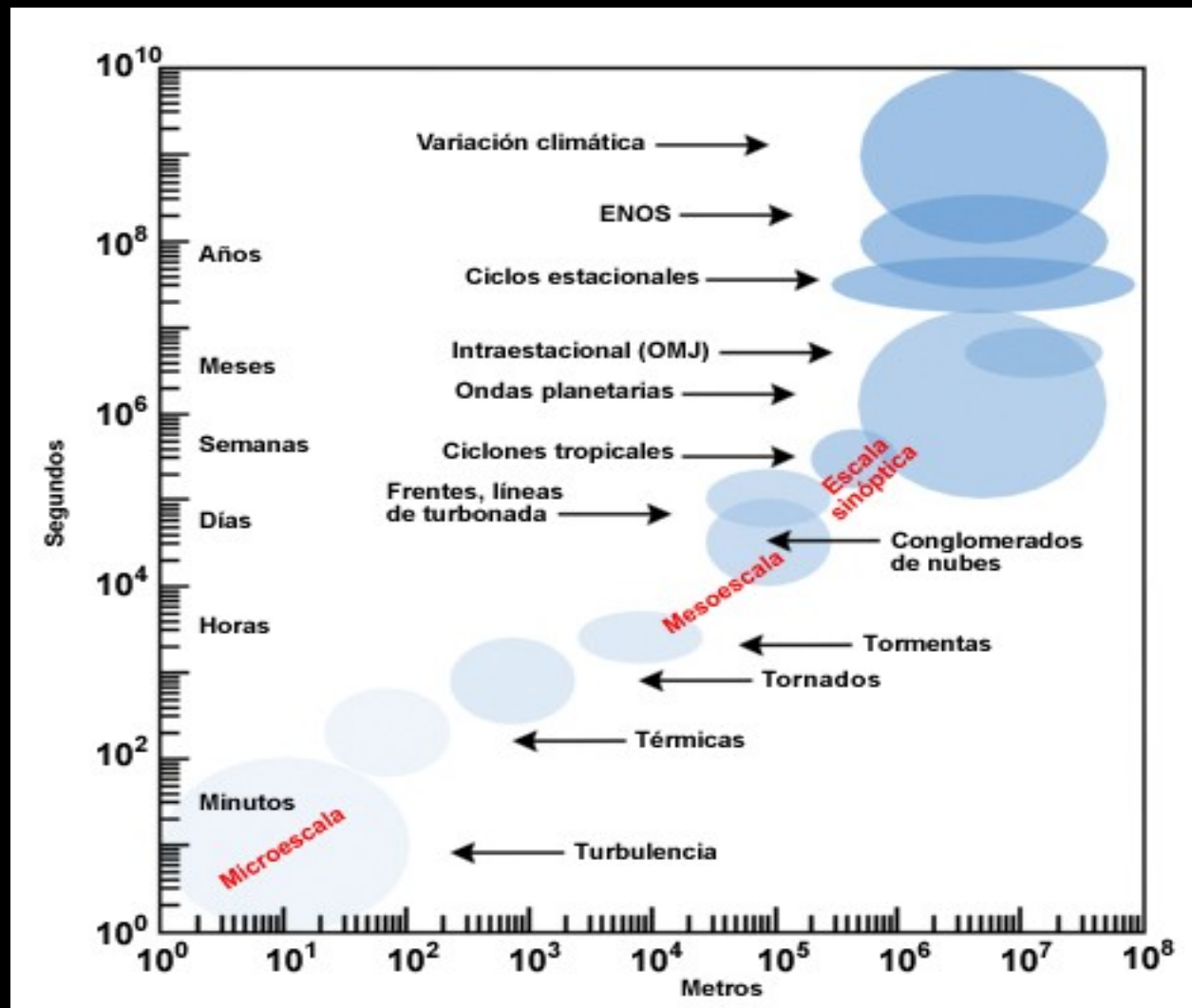
Departamento de Ciencias de la Atmósfera
y Física de los Océanos

Camila de Mello
Climatología 2023

Vinculo: ESPACIO ↔ TIEMPO



Vinculo: ESPACIO ↔ TIEMPO



El sistema climático de la Tierra

Objetivo

Entender qué es el sistema climático, cuáles son sus componentes, cómo interactúan entre ellos y cuáles son las razones por las que el estudio del funcionamiento del sistema climático es un problema complejo.

Introducción al sistema climático

Sistema

Un conjunto de componentes relacionados entre sí y que funcionan en conjunto como un todo.

Estado del sistema: conjunto de atributos físicos que caracterizan al sistema

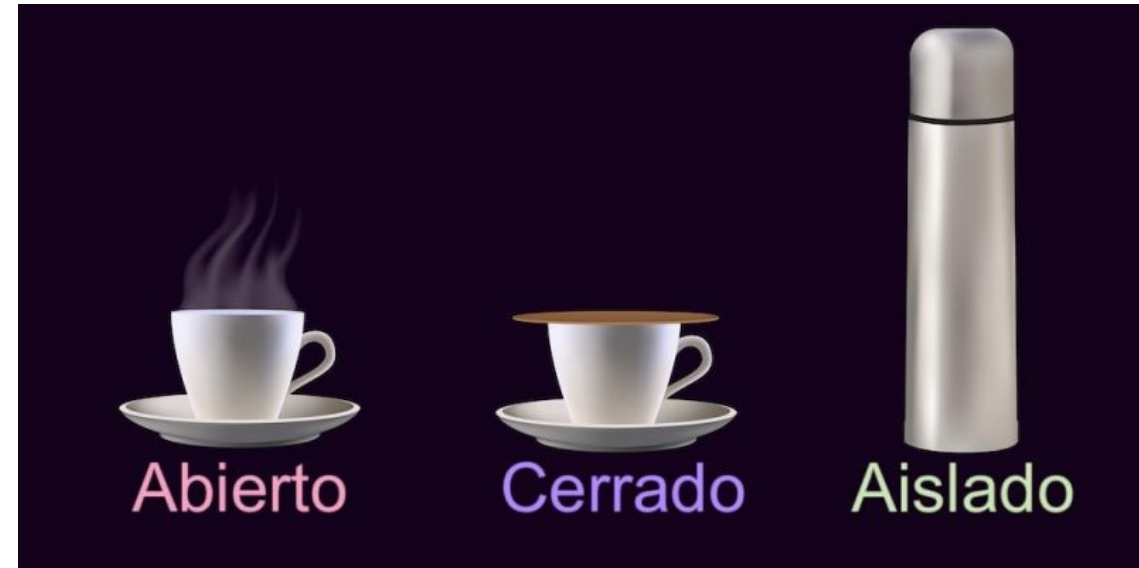
Introducción al sistema climático

Tipos de sistemas:

Sistemas abiertos: permiten intercambio de materia y energía.

Sistemas cerrados: permiten el intercambio de energía pero no de materia.

Sistemas aislados: no permiten ni intercambio de materia ni de energía.

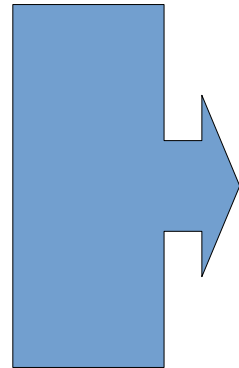


Introducción al sistema climático

¿Qué es el sistema climático?

El sistema climático se define como una entidad compuesta por cinco componentes interactuantes

- **Atmósfera**
- **Hidrosfera**
- **Criósfera**
- **Litósfera**
- **Biósfera**



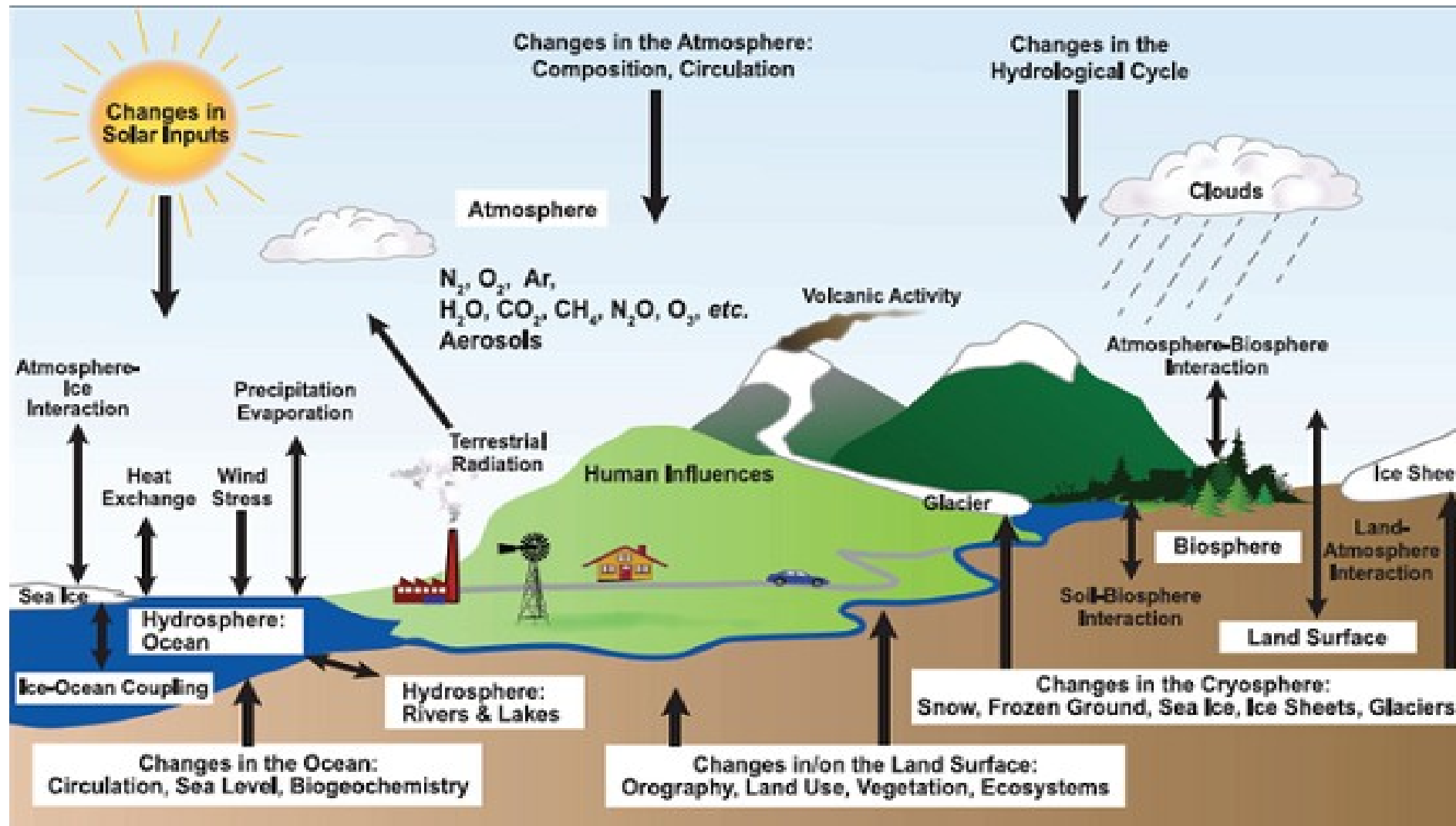
**En conjunto funcionan
complejamente como un
todo**

Se asume como un sistema cerrado, pues en general presenta un flujo de energía con el espacio pero no de materia.

Introducción al sistema climático

Componentes:

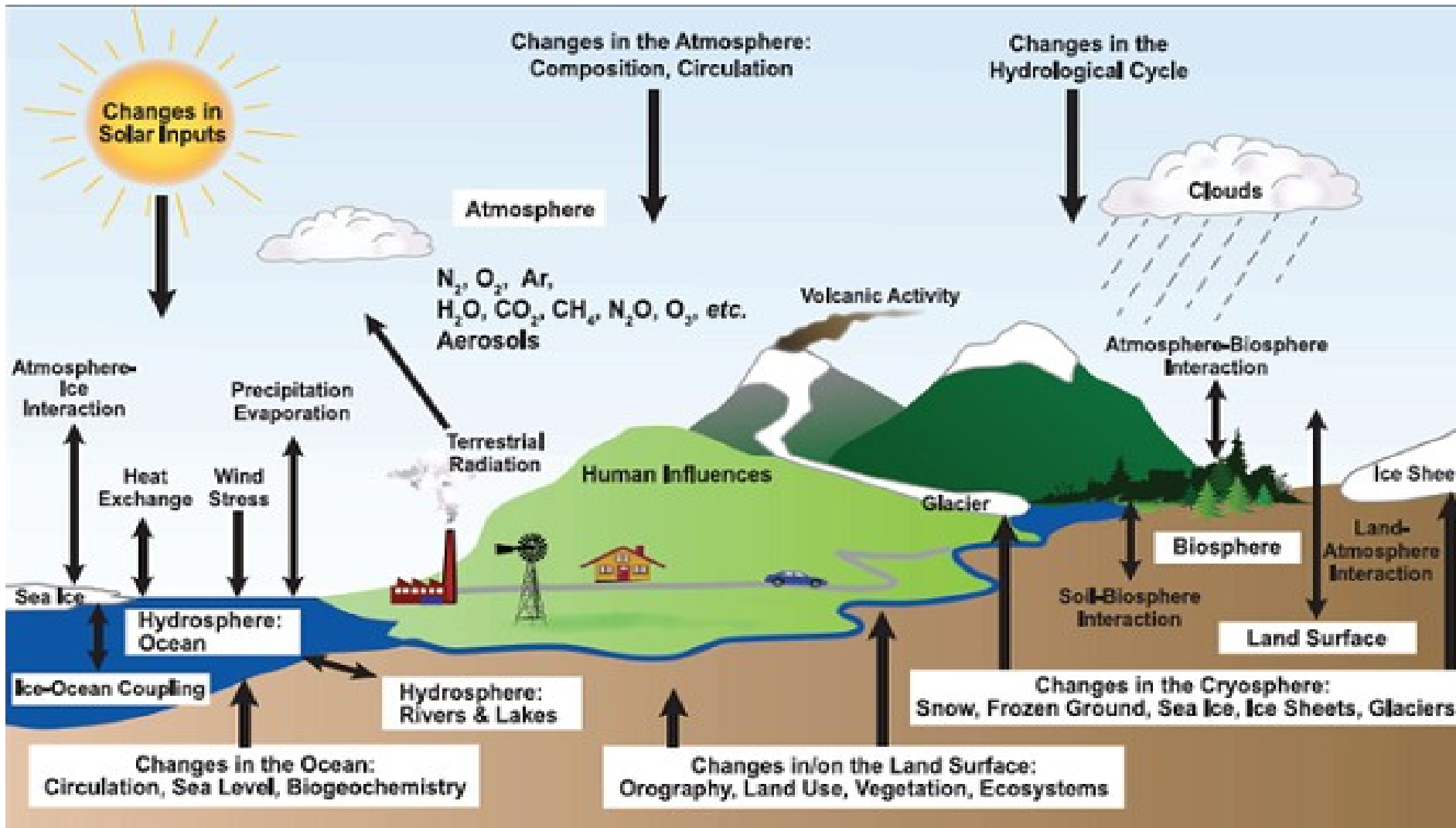
- 1) Atmósfera
- 2) Hidrósfera
- 3) Criósfera
- 4) Litósfera
- 5) Biósfera



Introducción al sistema climático

Componentes:

- 1) Atmósfera
- 2) Hidrósfera
- 3) Criósfera
- 4) Litósfera
- 5) Biósfera



La naturaleza de los componentes del sistema climático es muy diferente, pero interactúan a través de flujos de materia, momento y energía.

Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA

- Fina envoltura gaseosa que rodea la Tierra. Espesor $\ll$ Radio de la Tierra
- Efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra en condiciones habitables
- Transporte de energía
- Absorbe RUV
- Componente del sistema climático con menor tiempo de respuesta

PERMANENT GASES			VARIABLE GASES			
Gas	Symbol	Percent (by Volume) Dry Air	Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Nitrogen	N ₂	78.08	Water vapor	H ₂ O	0 to 4	
Oxygen	O ₂	20.95	Carbon dioxide	CO ₂	0.038	385*
Argon	Ar	0.93	Methane	CH ₄	0.00017	1.7
Neon	Ne	0.0018	Nitrous oxide	N ₂ O	0.00003	0.3
Helium	He	0.0005	Ozone	O ₃	0.000004	0.04†
Hydrogen	H ₂	0.00006	Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Xenon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

*For CO₂, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO₂ molecules.

†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.

Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA

- Fina envoltura gaseosa que rodea la Tierra. Espesor $\ll$ Radio de la Tierra
- Efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra en condiciones habitables
- Transporte de energía
- Absorbe RUV
- Componente del sistema climático con menor tiempo de respuesta

PERMANENT GASES

Gases de concentración variable espacio temporalmente ↔ gases traza.

Contribuyen al efecto invernadero.

¿Cuál es el principal gas efecto invernadero?

VARIABLE GASES

Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Water vapor	H ₂ O	0 to 4	
Carbon dioxide	CO ₂	0.038	385*
Methane	CH ₄	0.00017	1.7
Nitrous oxide	N ₂ O	0.00003	0.3
Ozone	O ₃	0.000004	0.04†
Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

in air molecules, 385 are CO₂ molecules.
are about 5 to 12 ppm.

Componentes del sistema climático

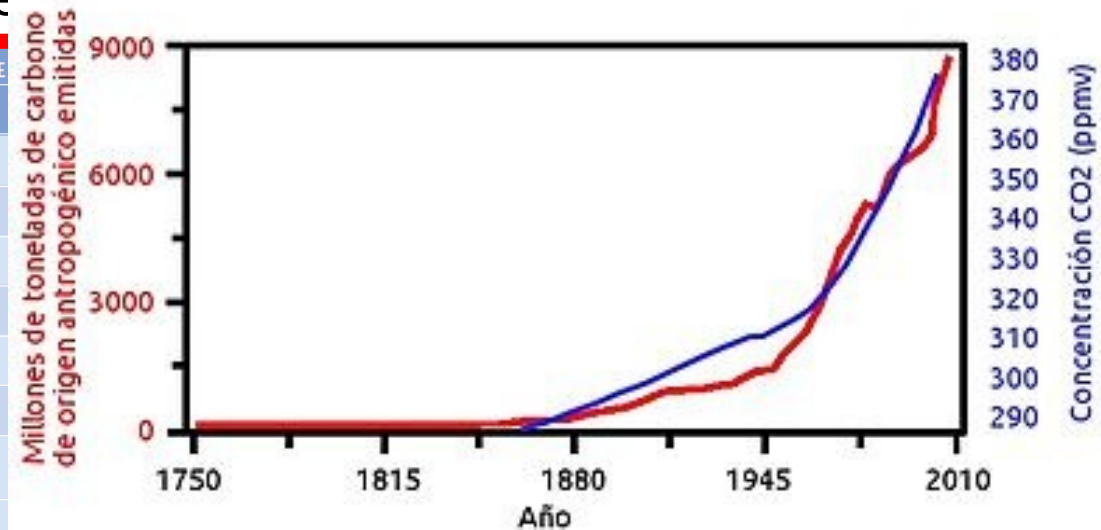
ATMÓSFERA

- Fina envoltura gaseosa que rodea la Tierra. Espesor $\ll$ Radio de la Tierra
- Efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra en condiciones habitables
- Transporte de energía
- Absorbe RUV
- Componente del sistema climático con me

PERMANENT GASES			VARIABLE
Gas	Symbol	Percent (by Volume) Dry Air	Gas (and Particles)
Nitrogen	N ₂	78.08	Water vapor
Oxygen	O ₂	20.95	Carbon dioxide
Argon	Ar	0.93	Methane
Neon	Ne	0.0018	Nitrous oxide
Helium	He	0.0005	Ozone
Hydrogen	H ₂	0.00006	Particles (dust, soot, etc.)
Xenon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbons (CFCs)

*For CO₂, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO₂ molecules.
†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.

*For CO₂, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO₂ molecules.
†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.



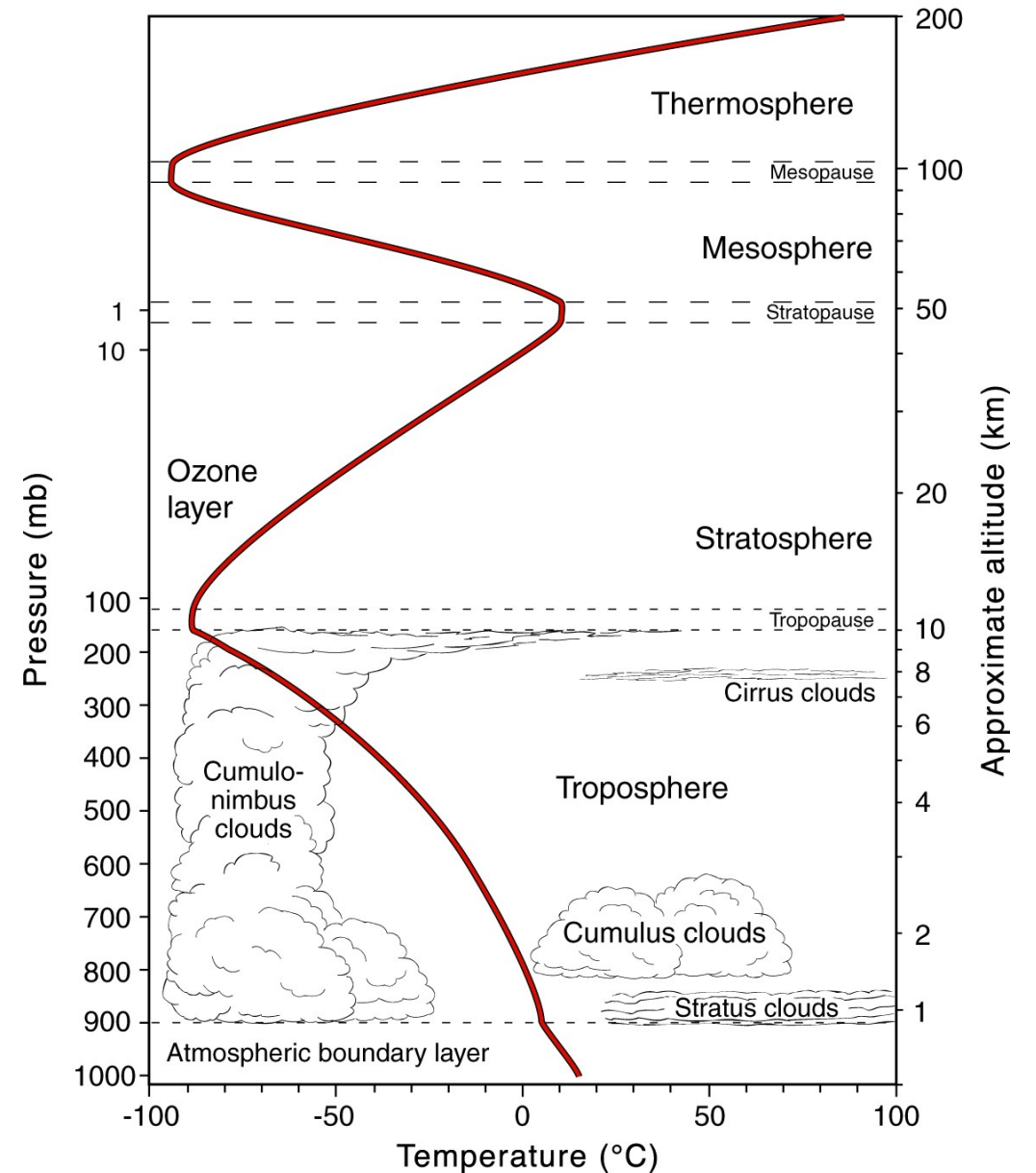
Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA

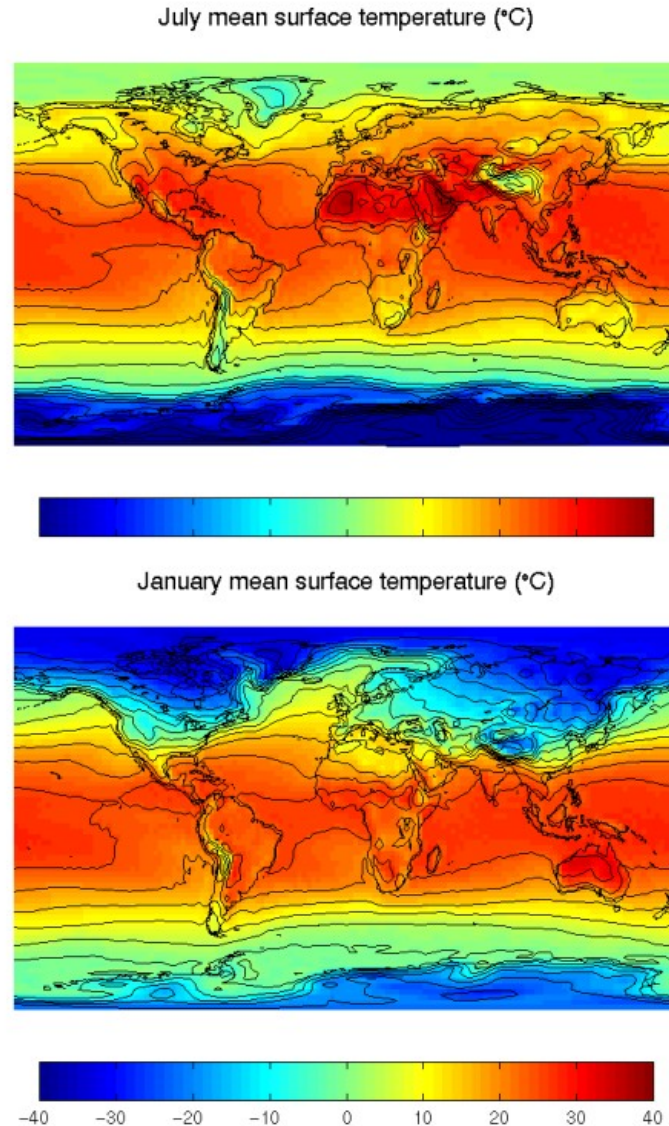
Estructura vertical

- Tropósfera: fenómenos meteorológicos
- Estratósfera: absorbe UV por O_3 (aumento de T Con altura)

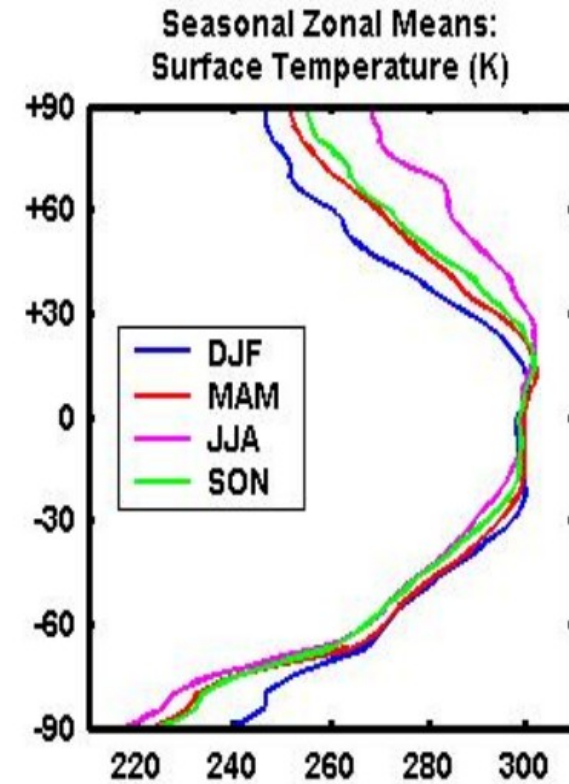
El 99% de su masa se encuentra en los primeros 30 km de altura



ATMÓSFERA Temperatura



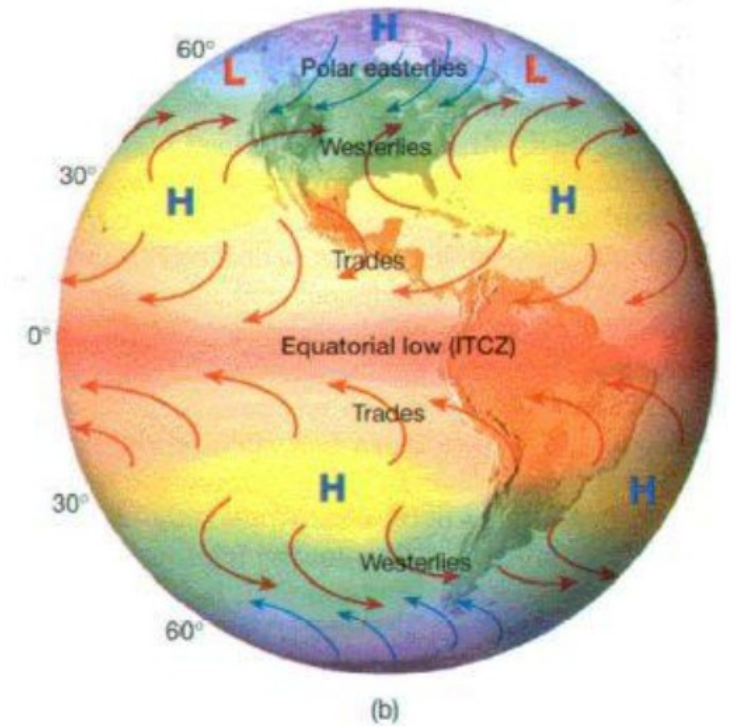
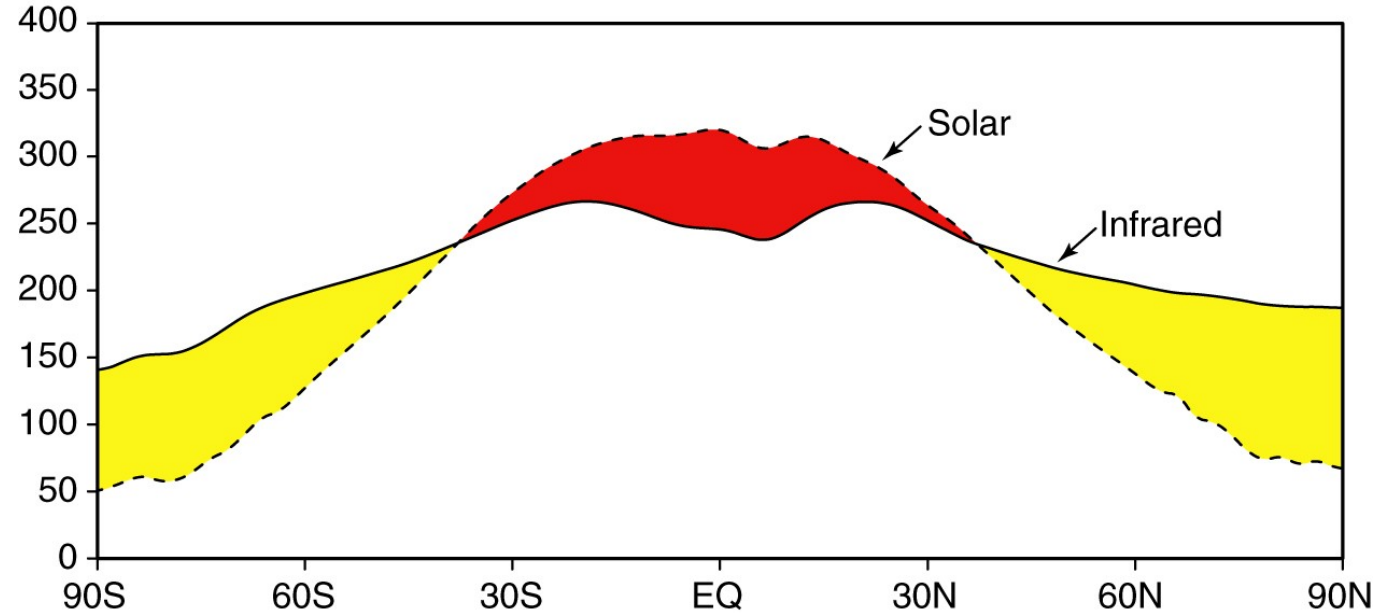
Temperatura



Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA

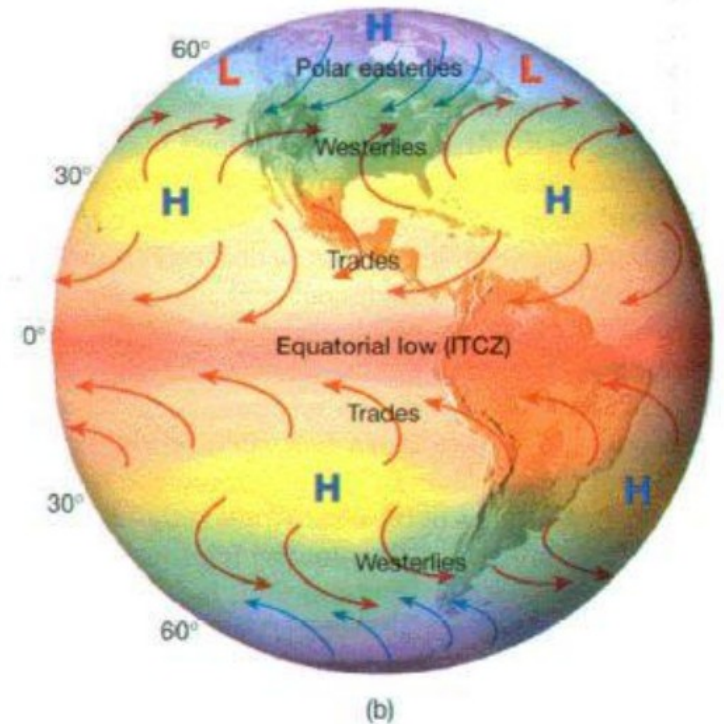
- Transporte de energía



Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA

- Transporte de energía



HIDRÓSFERA

- Toda el agua líquida que se encuentra en la Tierra. Incluye **océanos**, lagos, ríos, mares y aguas subterráneas.
 - 2/3 del planeta cubierto por océanos
 - Alto calor específico (cantidad de calor que absorbe 1 kg de agua para incrementar 1°C su T)

Ambos factores convierten a los océanos en un gran reservorio de energía, actuando como reguladores de la temperatura del planeta

- Son un sumidero de CO₂

.



HIDRÓSFERA

- El océano se mueve:
 - Al tener mayor densidad que atmósfera, sus movimientos son más **lentos** y los tiempos de respuesta ante un forzamiento son mayores
 - Los movimientos en los océanos se generan por:
 - arrastre del viento (capa superficial)
 - diferencia en salinidad y temperatura (circulación del océano profundo o termohalina)
 - Las corrientes oceánicas transportan aguas cálidas (frías) hacia latitudes medias y altas (bajas)
 - Parámetros físicos que caracterizan a los océanos: temperatura, salinidad y densidad.





HIDRÓSFERA

SALINIDAD DE LOS OCÉANOS

- Representa el contenido de sales minerales disueltas en agua.
- El valor promedio de la S es de 35 PSU.
- Para este valor de S, las concentraciones de los principales componentes de agua del mar:

Component	Grams per kilogram
Chloride	19.353
Sodium	10.76
Sulfate	2.712
Magnesium	1.294
Calcium	0.413
Potassium	0.387
Bicarbonate	0.142
Bromide	0.067
Strontium	0.008
Boron	0.004
Fluoride	0.001

Componentes del sistema climático

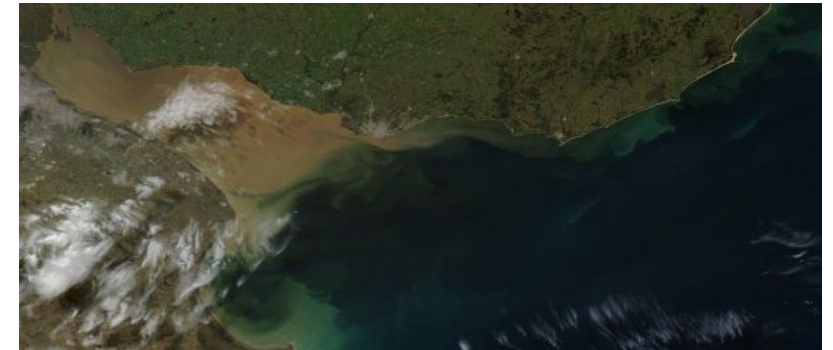
HIDRÓSFERA

SALINIDAD DE LOS OCÉANOS

Factores de los que depende la salinidad:

- Evaporación → aumenta la salinidad
- Precipitación → disminuye la salinidad
- Formación de hielo marino → aumenta la salinidad
- Deshielo → disminuye la salinidad
- Escorrentía de agua dulce → disminuye la salinidad

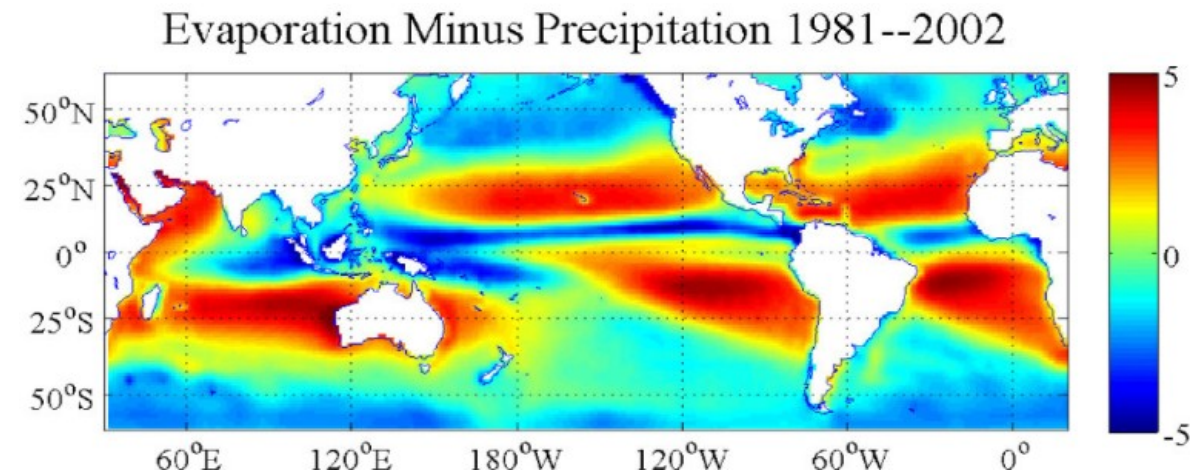
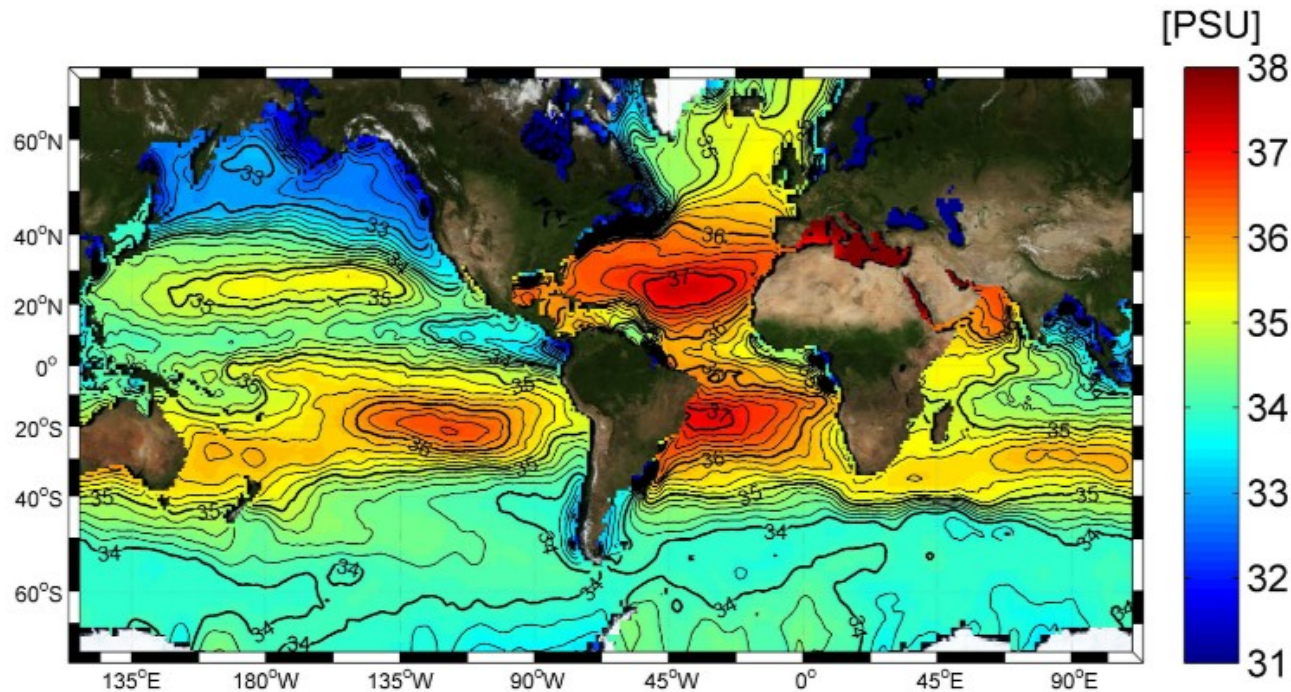
Introducción al sistema climático



Componentes del sistema climático

HIDRÓSFERA

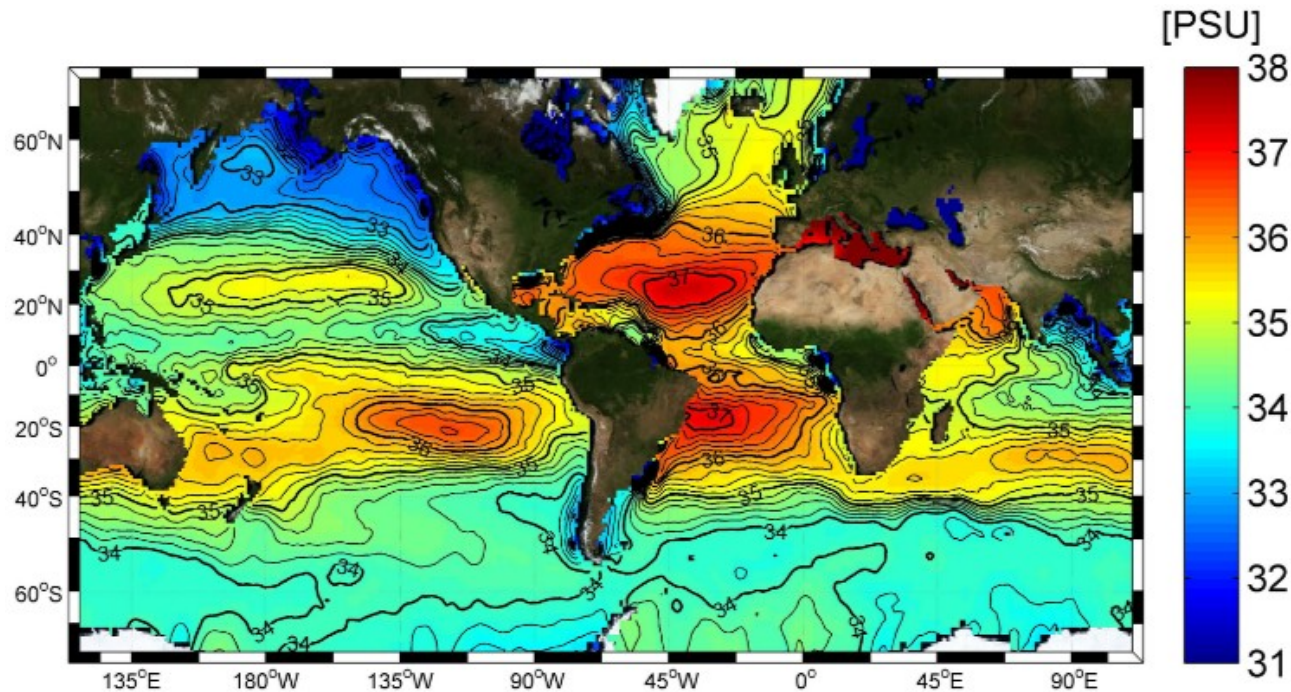
SALINIDAD DE LOS OCÉANOS



Componentes del sistema climático

HIDRÓSFERA

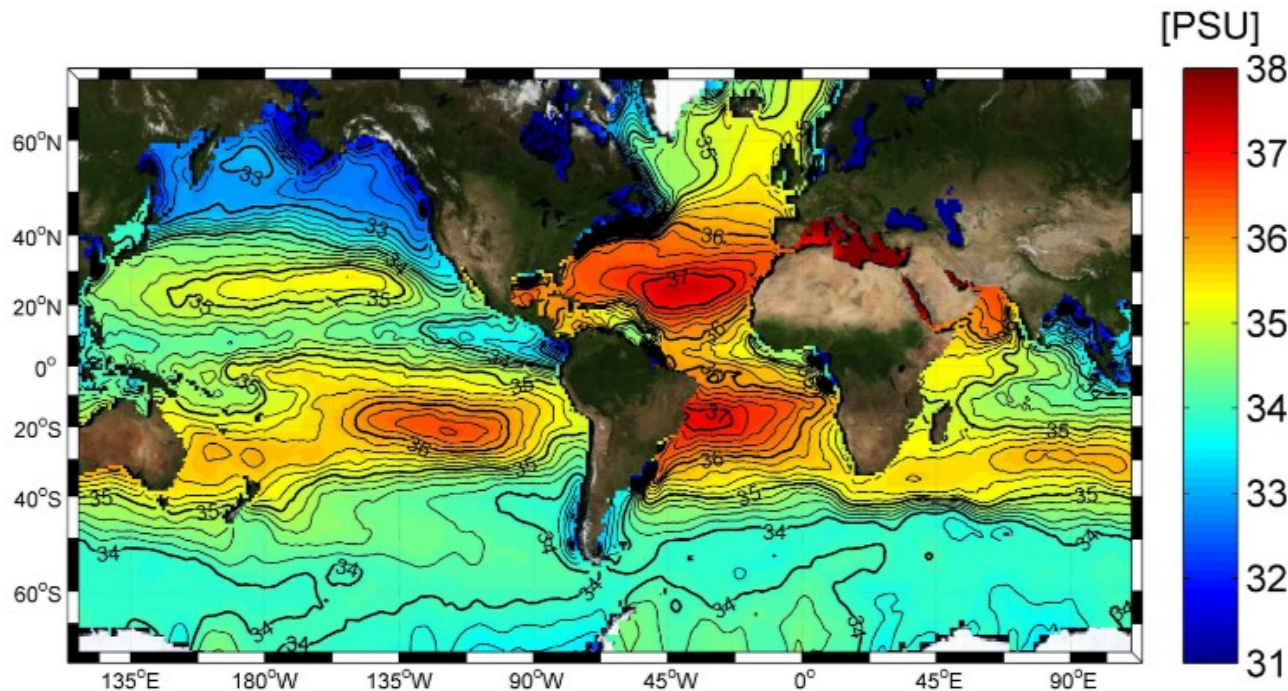
SALINIDAD DE LOS OCÉANOS



- La S en la superficie del océano oscila **entre los (32 - 37) PSU** (aunque pueden existir regiones en las que se alcancen los 42PSU como es el caso del Mar Rojo, u 8 PSU como es el caso del Mar Báltico).
- Mayor S en los trópicos, donde $E > PP$

HIDRÓSFERA

SALINIDAD DE LOS OCÉANOS

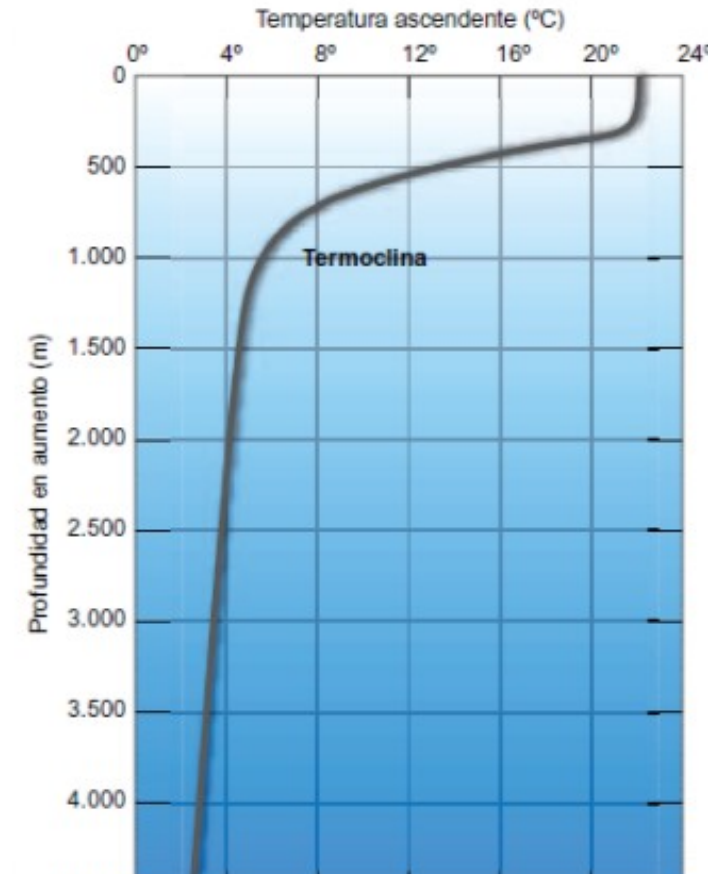
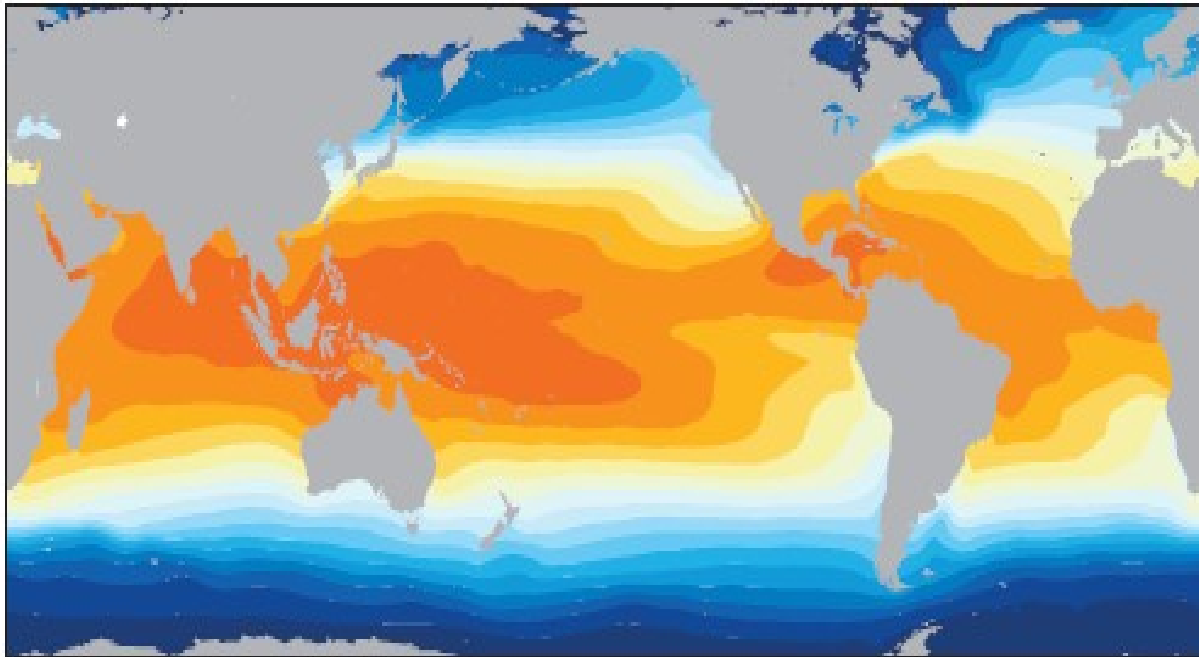


- Menor S sobre el ecuador y en latitudes altas, donde $E < PP$
- La cuenca más salina: Atlántico. En esta cuenca la E es mucho más intensa que la PP. En el caso del Pacífico PP toma valores más intensos en relación a la E, por ello es menos salado.
- Las plumas de los ríos influyen en la S de los océanos, contribuyendo con valores bajos donde se encuentran las desembocaduras.

Componentes del sistema climático

HIDRÓSFERA

TEMPERATURA DE LOS OCÉANOS



Componentes del sistema climático

HIDRÓSFERA

CIRCULACIÓN DE LOS OCÉANOS

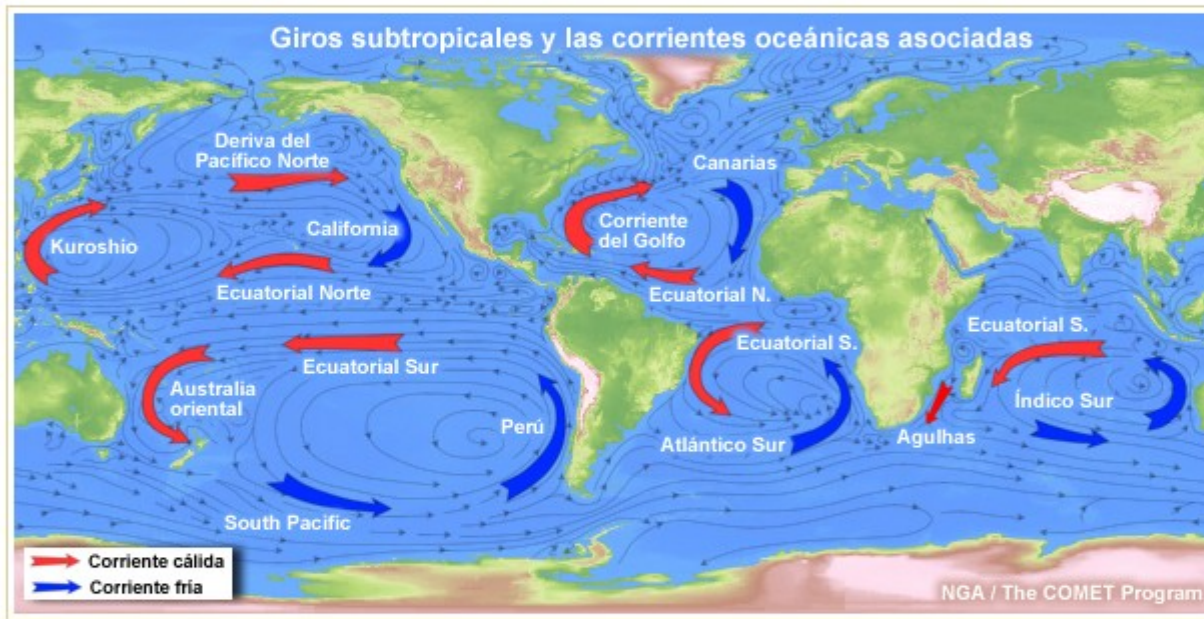
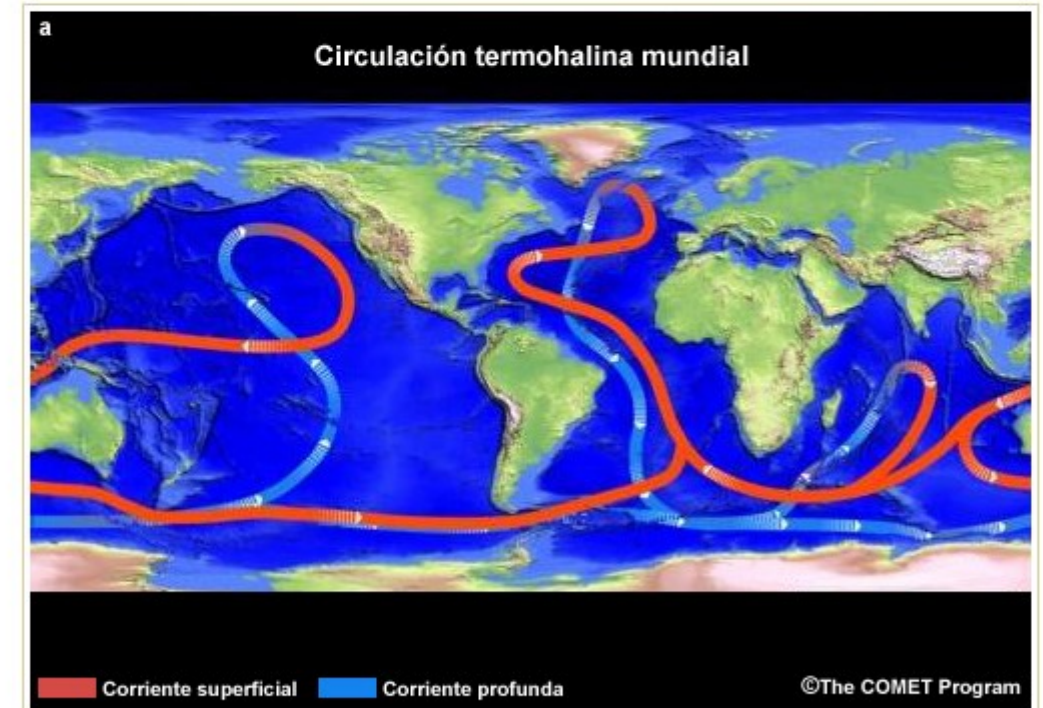


Fig. 3.20. Circulaciones oceánicas globales superficiales y giros subtropicales; las corrientes oceánicas cálidas se indican en rojo y las frías, en azul.



ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

La atmósfera y los océanos están **acoplados**. Interactúan en muchas escalas espaciales y temporales a través de intercambios en la interfaz atmósfera-océano de

- Energía
- Materia
- Momento

- Intercambio de materia:
 - Evaporación del agua del océano → flujo de vapor de agua hacia la atmósfera
 - Precipitaciones → flujo de agua de la atmósfera al océano

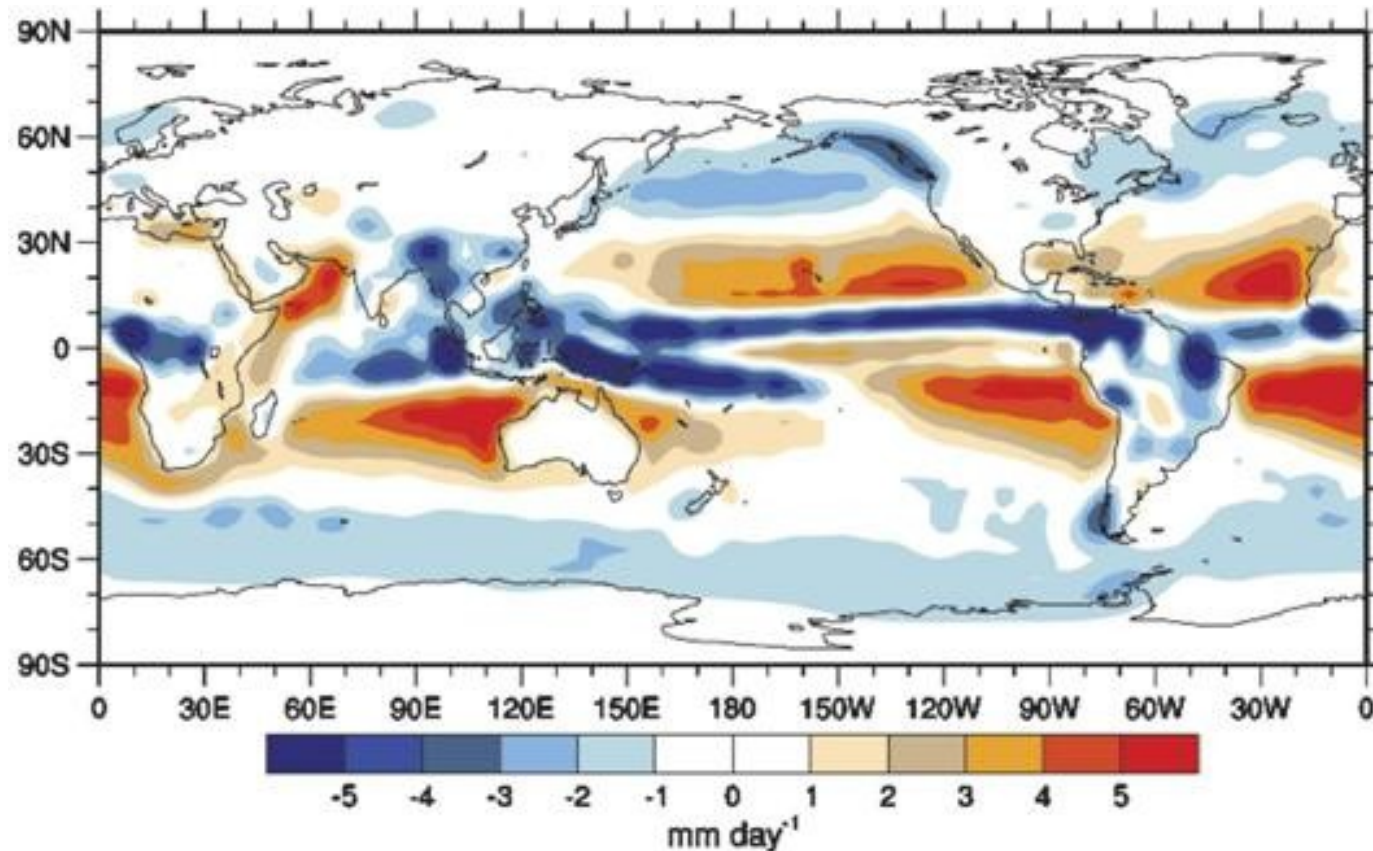
ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de materia:

Evaporación del agua del océano → flujo de vapor de agua hacia la atmósfera

Precipitaciones → flujo de agua de la atmósfera al océano

Evaporación - Precipitación



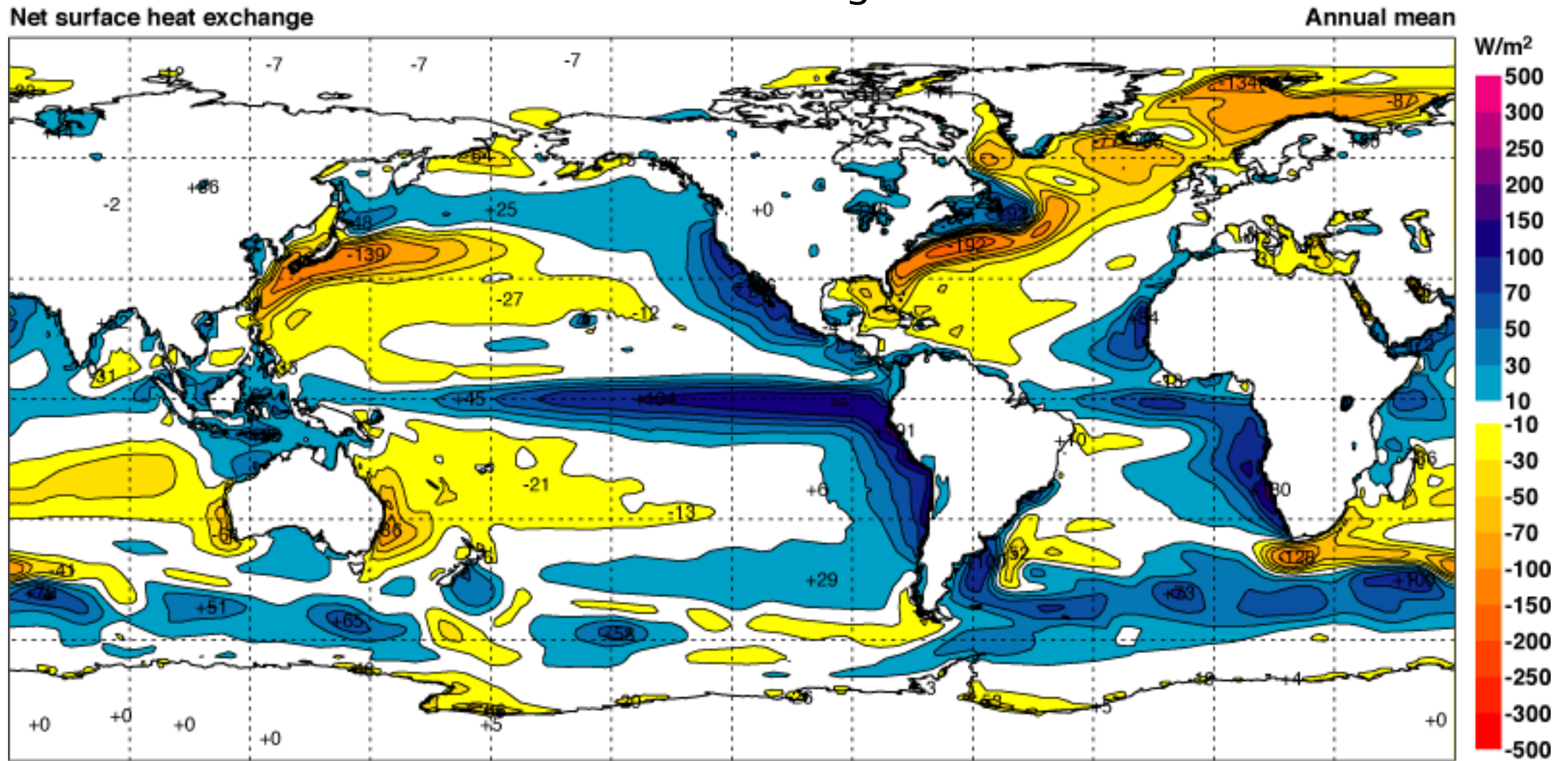
ATMÓSFERA – HIDRÓSFERA

Intercambio de energía:

- Flujo de calor sensible del océano a la atmósfera
- Flujo de calor latente: la condensación del vapor de agua libera calor latente.
 - Este flujo de calor representa parte de la energía utilizada en el ciclo hidrológico.
- Flujo calor latente >> flujo de calor sensible

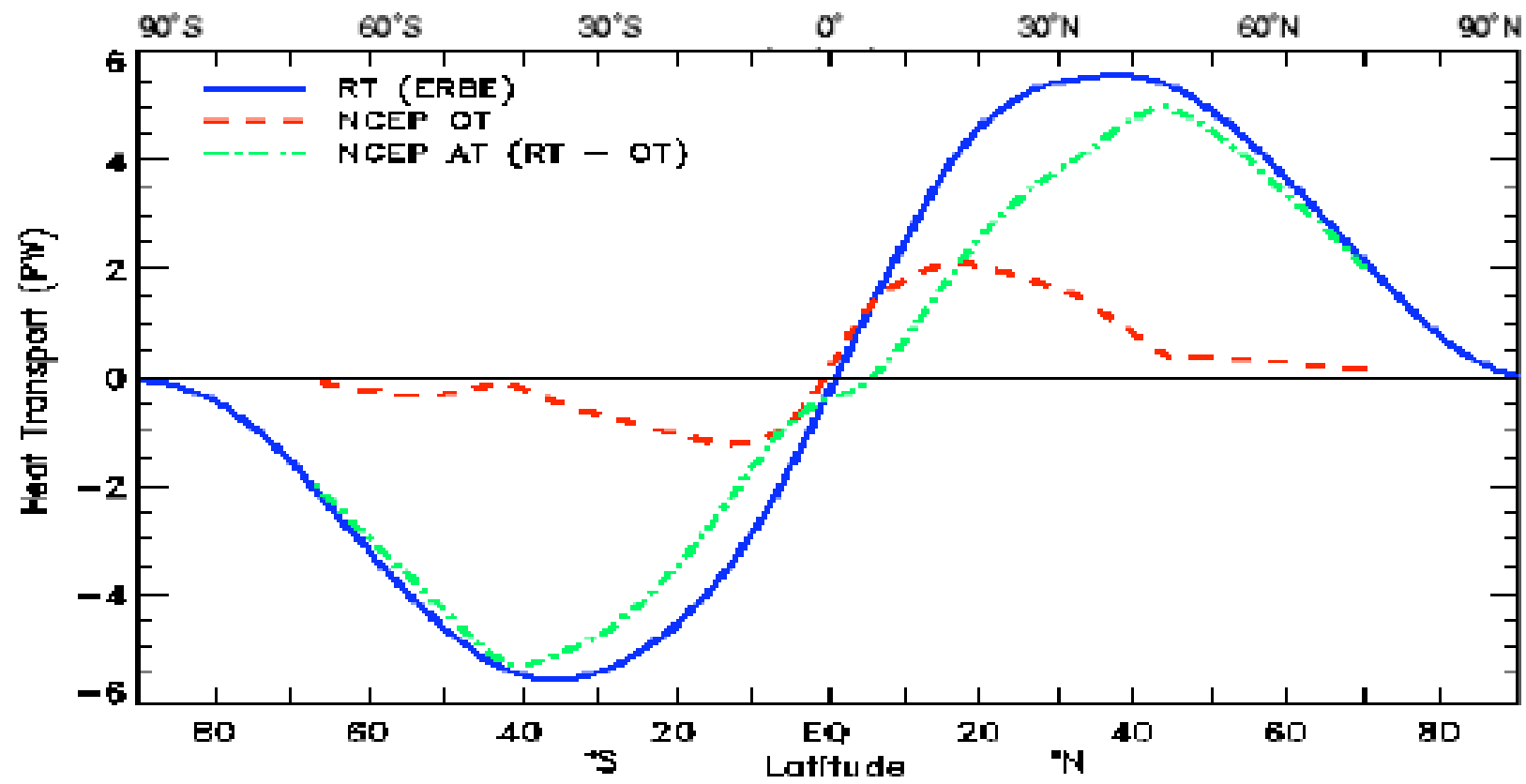
Componentes del sistema climático

Intercambio de energía:



Algunas regiones del océano absorben energía neta (trópicos) y otras la pierden

Componentes del sistema climático



Transporte de energía hacia los polos realizado por el océano consistente con la absorción y liberación de calor en superficie.

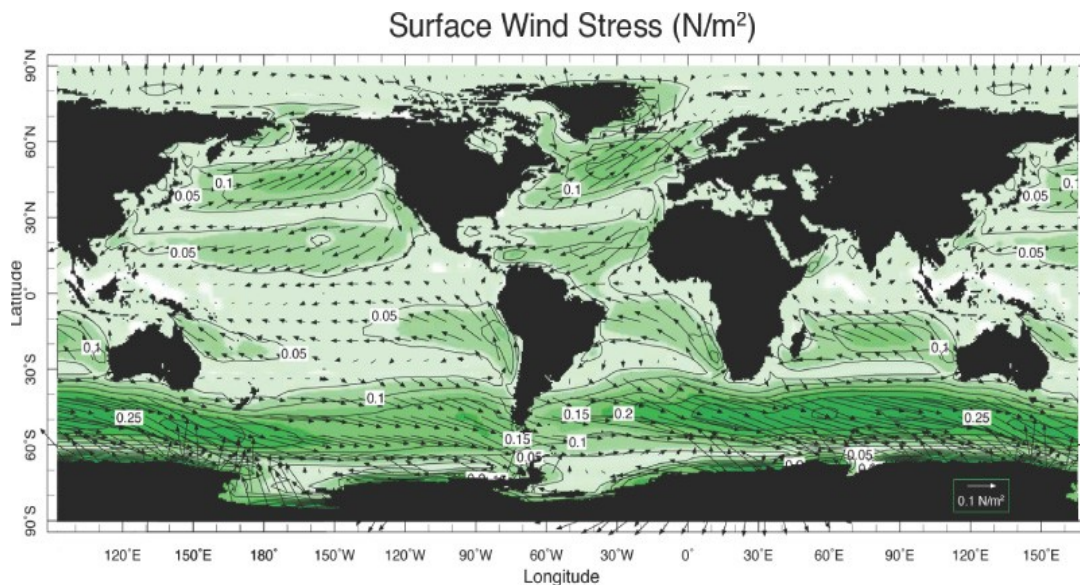
Componentes del sistema climático

ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

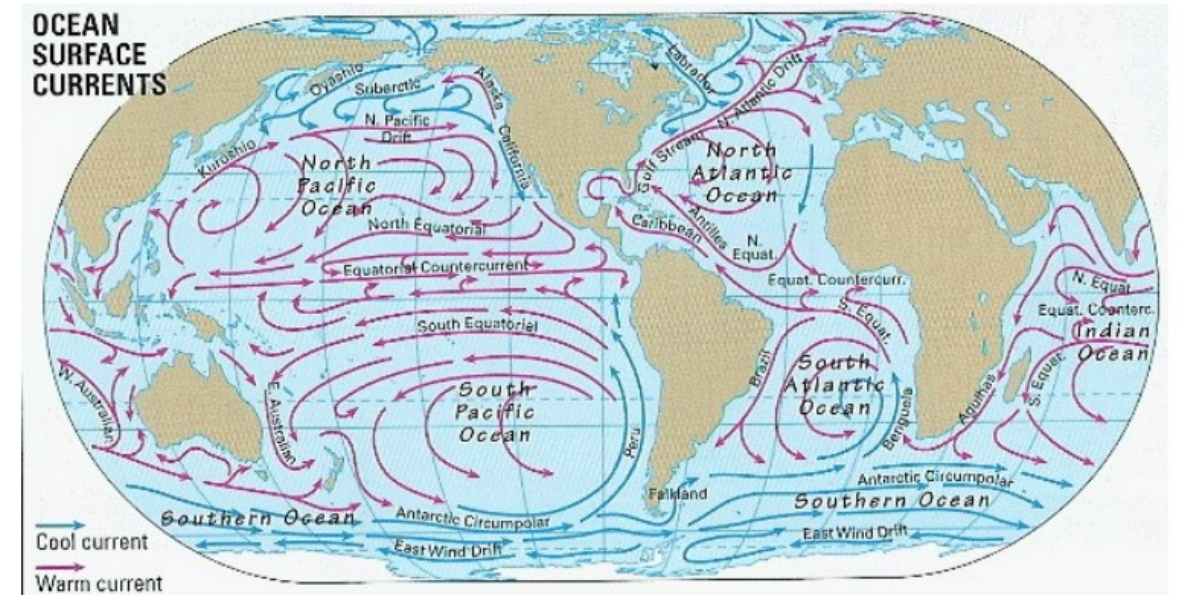
Intercambio de momento:

Los vientos ejercen un esfuerzo (tensión) sobre la superficie del océano.

Este es uno de los factores que genera la aparición de corrientes en el océano.



Copyright © 2008, Elsevier Inc. All rights reserved.



Componentes del sistema climático

LITÓSFERA

- Continentes y fondo marino.
- Importante en el balance energético
- Sus características influyen en
 - Albedo
 - Evaporación
 - Conductividad térmica.



Componentes del sistema climático

LITOSFERA

- Interactúa con la atmósfera mediante la transferencia de
 - Masa
 - Momento angular
 - Energía
 - Calor sensible
 - Disipación de energía cinética.

TRANSFERENCIA	ATMÓSFERA → LITOSFERA	LITOSFERA → ATMÓSFERA
MASA	Precipitación	Erupciones volcánicas
ENERGÍA	Disipación de energía cinética en la capa límite	Flujo de calor sensible
MOMENTO ANGULAR		La rotación de la tierra (litosfera) transfiere un momento angular a la atmósfera

CRIÓSFERA

- Masas de hielo y nieve de la Tierra.
- Representa el reservorio de agua dulce más grande del planeta
- Su importancia dentro del sistema climático radica en su alto albedo a la radiación solar y su baja conductividad.



CRIÓSFERA

- El hielo y la nieve son aislantes de superficies continentales y acuosas por debajo de ellas, previniéndolas de la pérdida de calor hacia la atmósfera.
- La variación de la extensión continental de hielo no es lo suficientemente rápida como para influenciar el clima en escalas de tiempo estacionales o interanuales.
- Juega un rol muy importante en los cambios climáticos a escalas de decenas de miles de años (glaciaciones - periodos interglaciales durante el Pleistoceno)



Componentes del sistema climático

Introducción al sistema climático

CRIÓSFERA

Glaciares



Suelo congelado (permafrost)



Hielo oceánico



Capas de hielo continental

Nieve

Hielo en ríos y lagos

Componentes del sistema climático

- **CRIÓSFERA**

- contribuye al albedo terrestre
- Influye la circulación termohalina a través de cambios en el contenido de sal
- Es un reservorio de agua que puede influenciar el nivel del mar

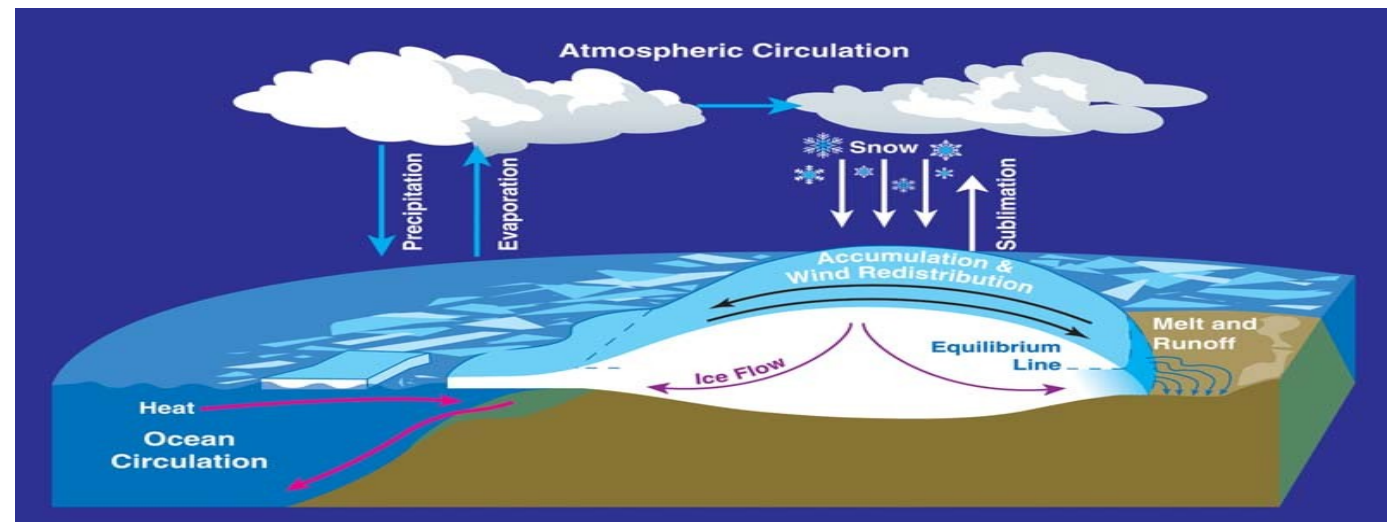
Component	Area (10^6 km ²)	Ice volume (10^6 km ³)	Sea level equivalent (m)
Continuous permafrost	10.69	0.0097-0.0250	0.024-0.063
Discontinuous permafrost	12.10	0.0017-0.0115	0.004-0.028
East Antarctica	10.1	22.7	56.8
West Antarctica and Antarctic Peninsula	2.3	3.0	7.5
Greenland	1.8	2.6	6.6
Small ice caps and mountain glaciers	0.68	0.18	0.5
Ice shelves	1.5	0.66	-

CRIÓSFERA

- **Hielos continentales**

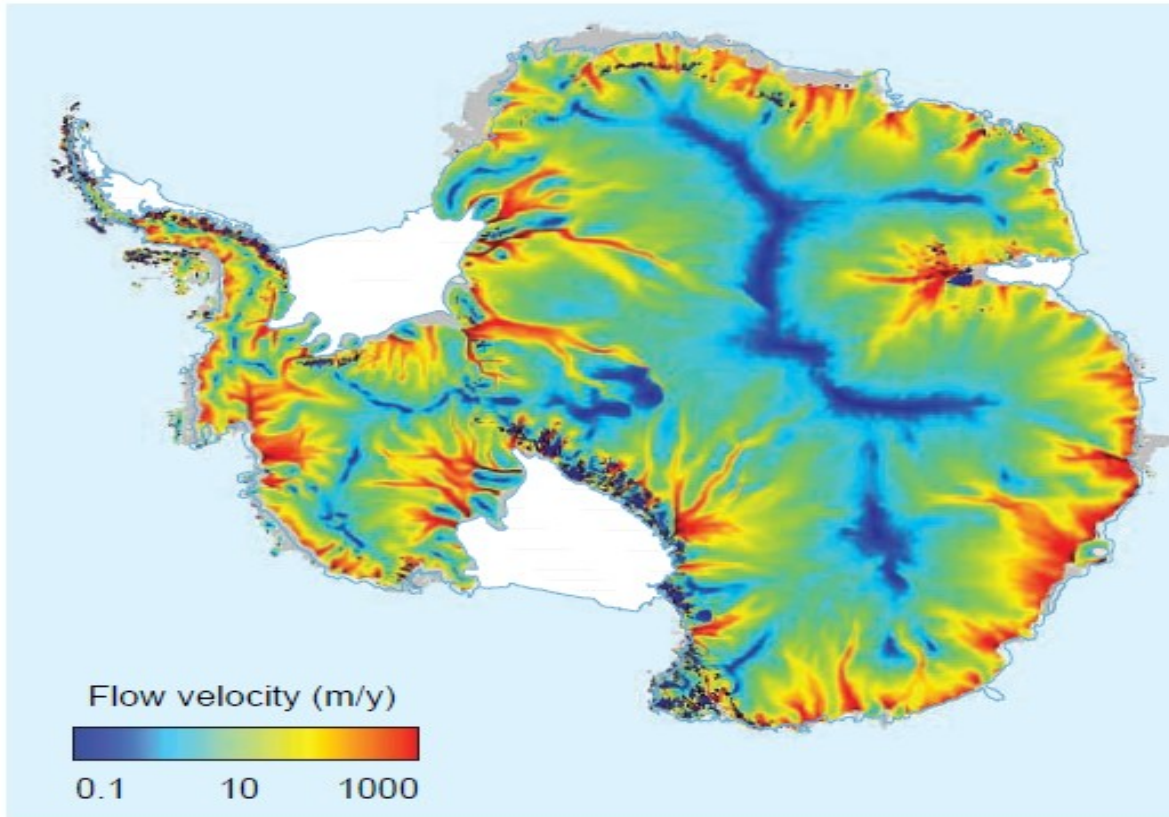
GLACIARES

- Los mayores están en Groenlandia y la Antártida
- Crecen por nieve y pierden masa por sublimación, por generación de icebergs, y en verano por el descongelamiento. El balance neto de masa indica si crecen o decrecen.
- La región de acumulación está en el interior del continente y las de ablación en zonas periféricas.

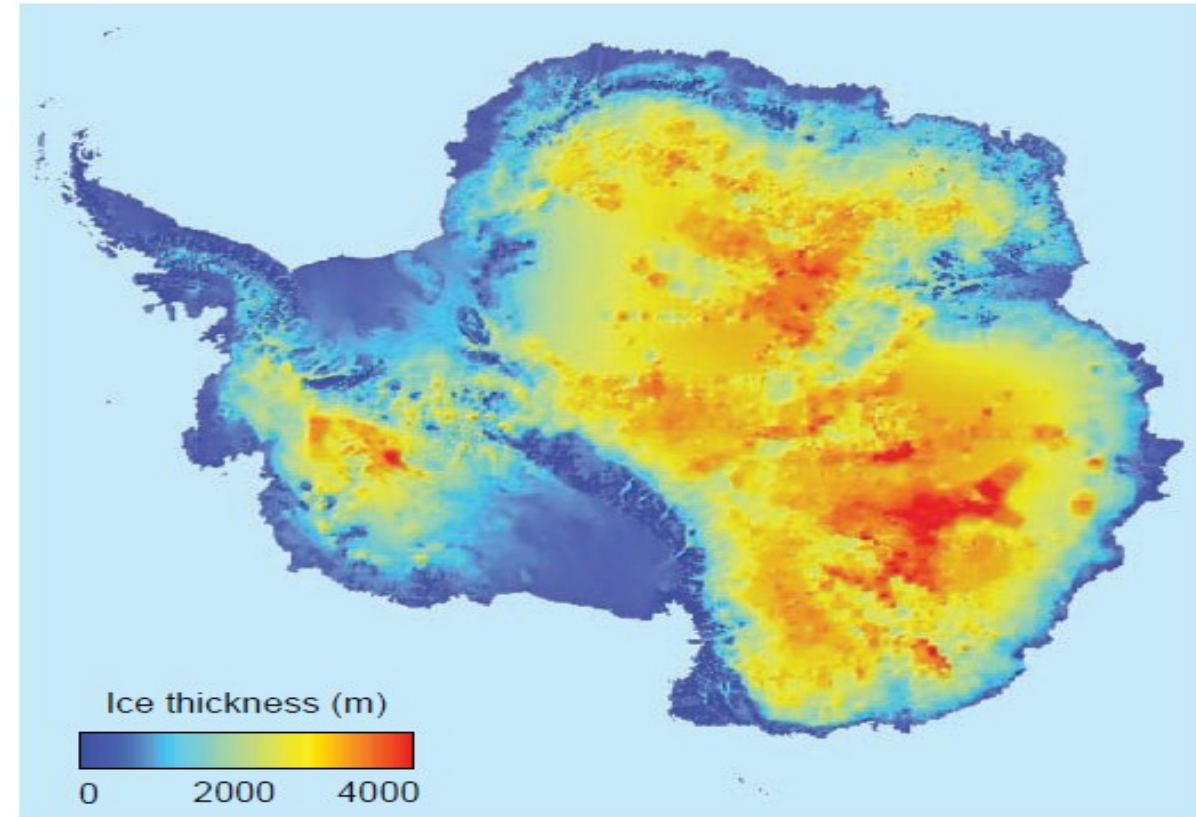


CRIÓSFERA

Glaciares continentales



(C) The ice moves as much as several hundred meters per year as shown in this computer model. “Drainage basins” are bounded by slow ice. Fast streams of ice are concentrated on the margins but extend deep into the interior. (Roland Warner, Antarctic CRC and Australian Antarctic Division)

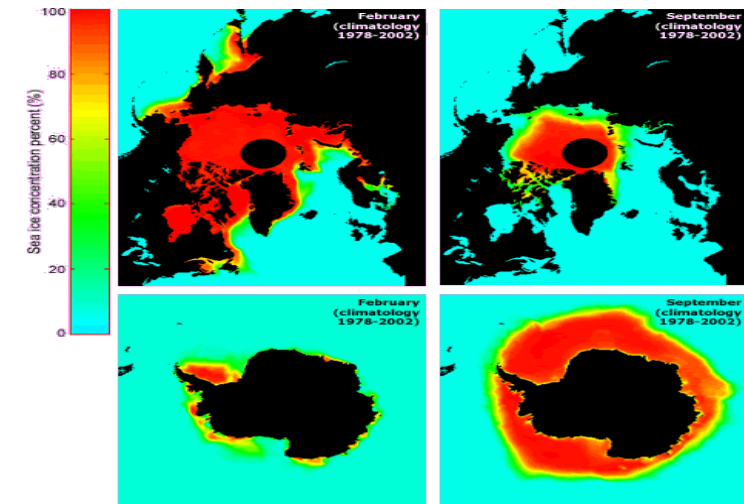


(D) The Antarctic ice sheet is as much as 3000 m thick but tapers toward the margins of the continent. (Data from the BEDMAP Project)

CRIÓSFERA

- **Hielos oceánicos**

- Cubren una superficie mayor que los hielos continentales pero su espesor es de solo 1-3 m.

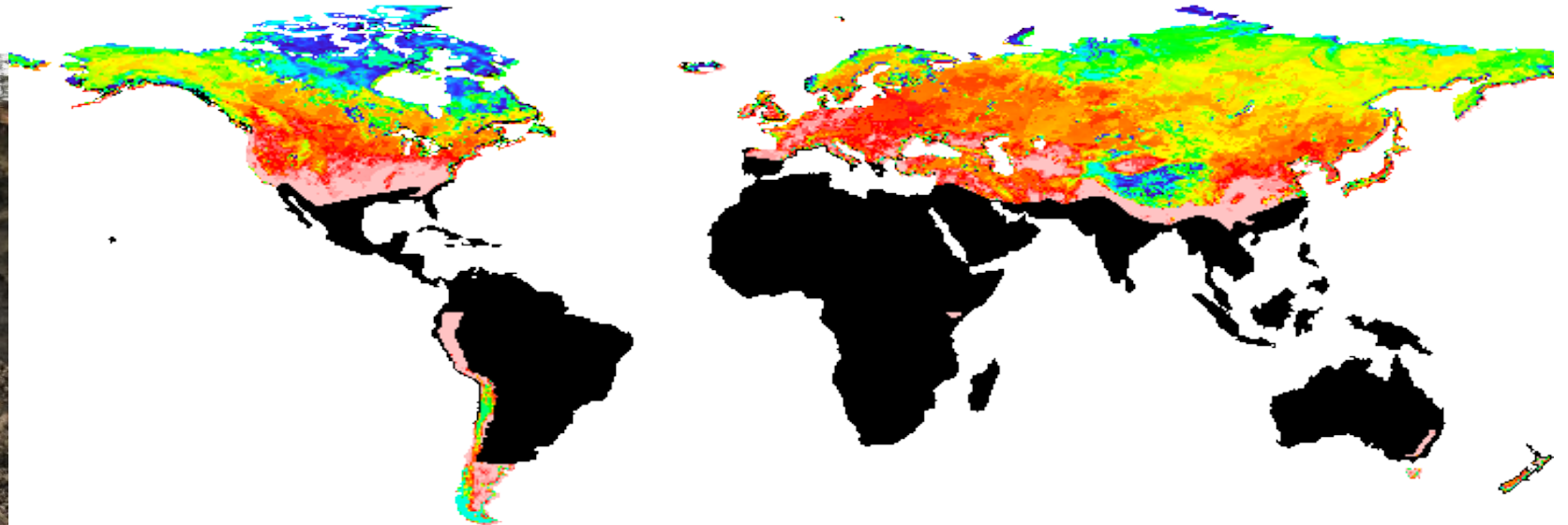
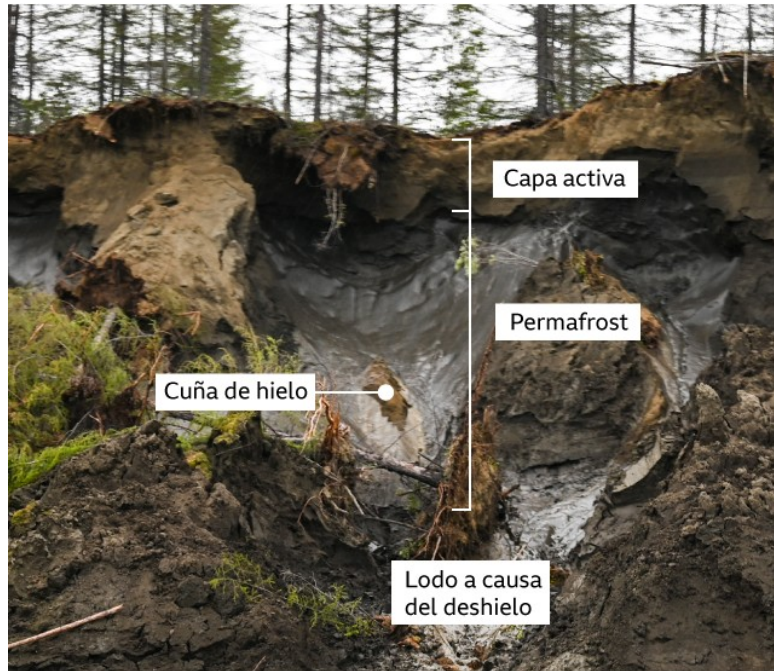


No forman una superficie continua sino que está en general quebrada con pedazos de diferente tamaño que se mueven por el viento.

CRIÓSFERA

- **Cobertura de nieve**

en el continente ocupa una extensión aún mayor que la cobertura de hielo marino y tiene una variabilidad muy grande. Desaparece en la primavera.

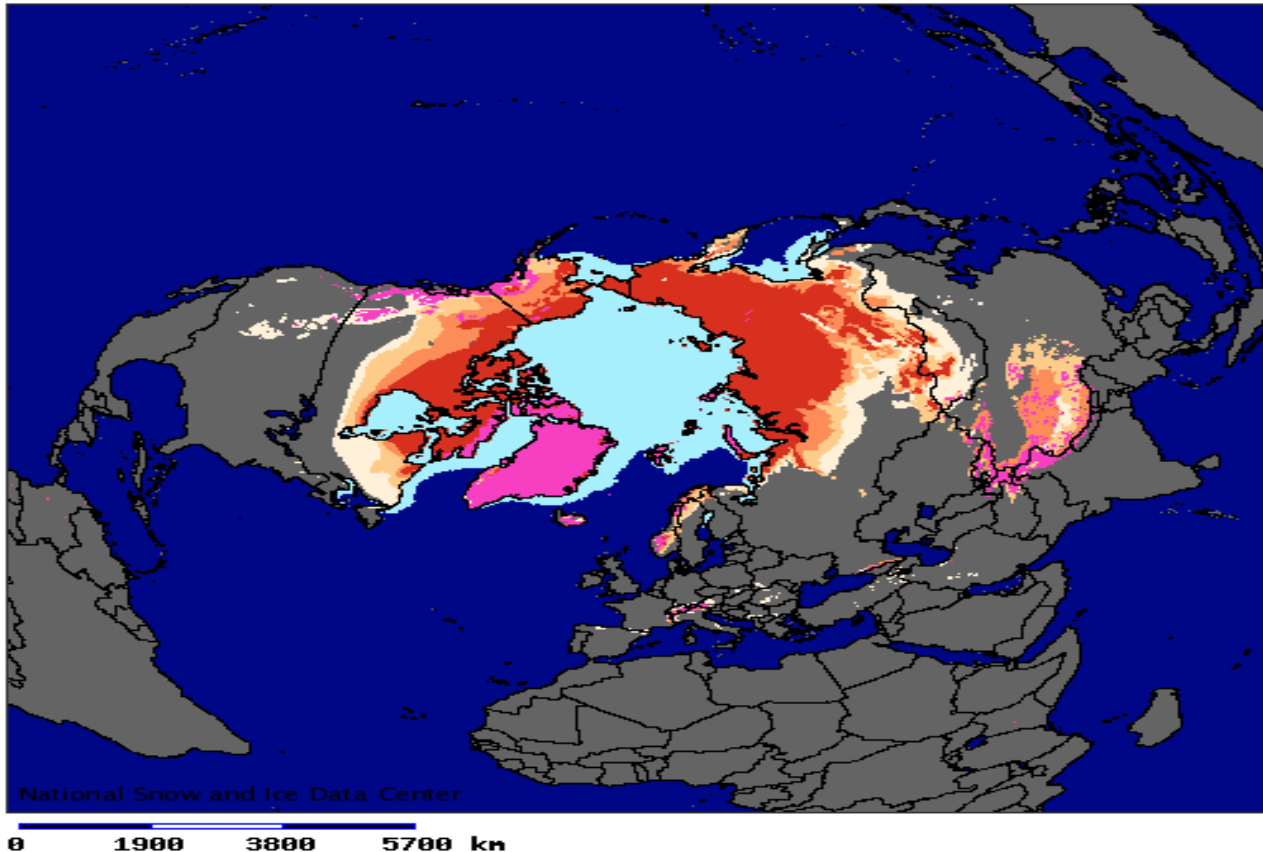


Componentes del sistema climático

CRIÓSFERA

- **Permafrost:**

suelo a menor temperatura que la del congelamiento del agua (0 C).



BIÓSFERA

- flora y la fauna existente en la Tierra.
- Impacta en el balance energético global:
 - **Vegetación**
 - altera la rugosidad del suelo, el albedo superficial, la evaporación, escorrentía.
 - Sumidero CO₂ y fuente de O₂



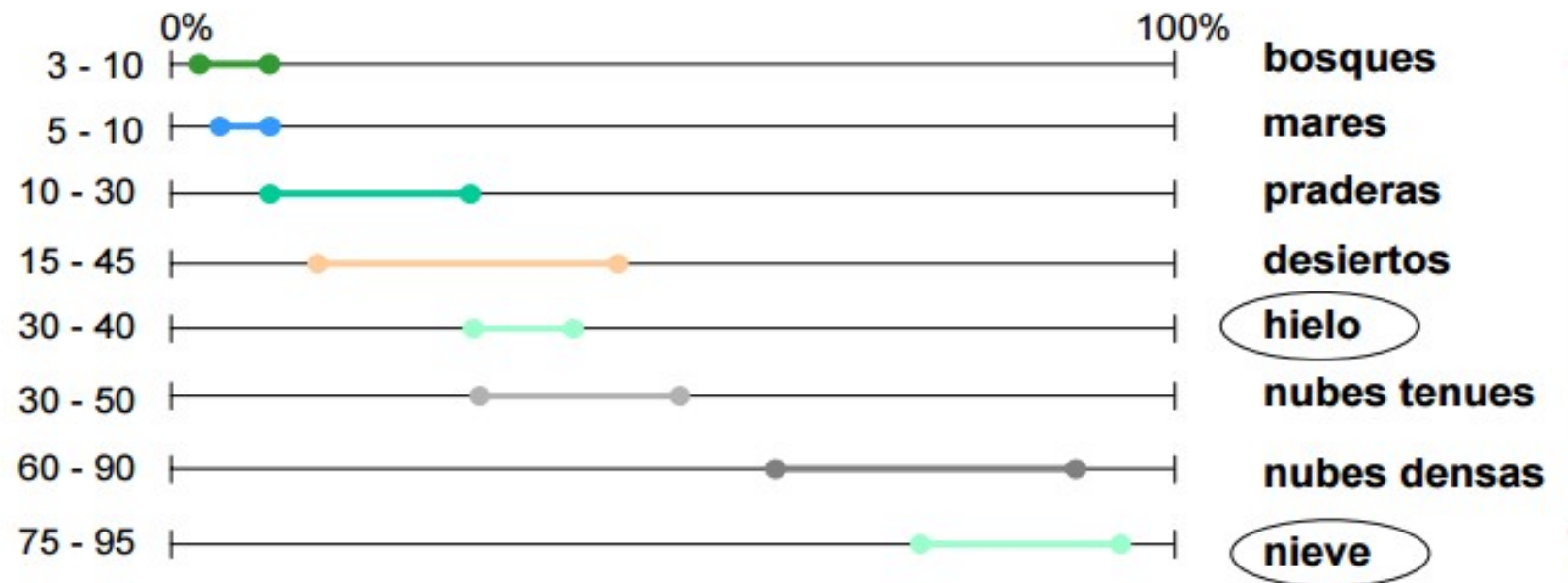
BIÓSFERA

- flora y la fauna existente en la Tierra.
- Impacta en el balance energético global:
 - **Fauna**
 - Emisión de gases efecto invernadero
 - Cambios en el uso de suelos → cambios en el albedo
 - Sumidero de O₂



Albedo

Porcentaje de radiación solar reflejada directamente al espacio con respecto a la radiación total incidente.



Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



Existe un flujo continuo de momento, energía y masa entre los componentes del Sistema Climático.

El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del Sol (240 W/m^2)

Componentes del sistema climático

- De todos los componentes del sistema climático, **los procesos atmosféricos son el de más rápida respuesta y tienen el rol principal en las propiedades fundamentales del clima**

- • Redistribución de energía a nivel global
- • Distribución de temperaturas en la superficie
- • Distribución de agua en superficie



Componentes del sistema climático

- **Pero**, los otros componentes del sistema son importantes, a distintas escalas:
 - Si no fuera por el gran almacenamiento de calor por parte del océano durante el verano, la variación estacional de la temperatura sobre los continentes en latitudes medias y altas sería mucho mayor que la observada.
 - La existencia de vegetación afecta a la temperatura diaria máxima que alcanza la superficie.
 - El afloramiento de aguas profundas en la zona del Pacífico ecuatorial est permite que la temperatura de la superficie del mar sea lo suficiente fría y rica en nutrientes soportando grandes pesquerías.



Introducción al sistema climático

Tiempo Vs. Clima

El tiempo: ...

Introducción al sistema climático

Tiempo Vs. Clima

El **tiempo**: se refiere al estado de la atmósfera en un cierto instante y lugar dado

- precipitación, nubosidad, vientos, temperatura, humedad
- El tiempo se encuentra en continuo cambio presentando una evolución diaria, asociada al pasaje de sistemas sinópticos.

Tiempo Vs Clima

El **clima** es el comportamiento promedio de la atmósfera en un lugar dado durante un periodo de tiempo prolongado

(es el promedio del tiempo).

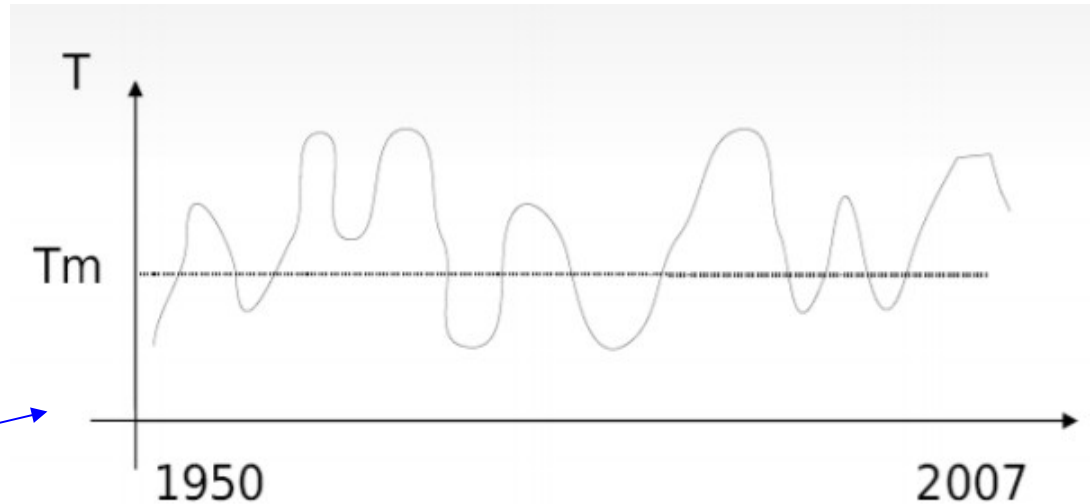
Resulta de la interacción de los diferentes componentes del sistema climático.



Clima

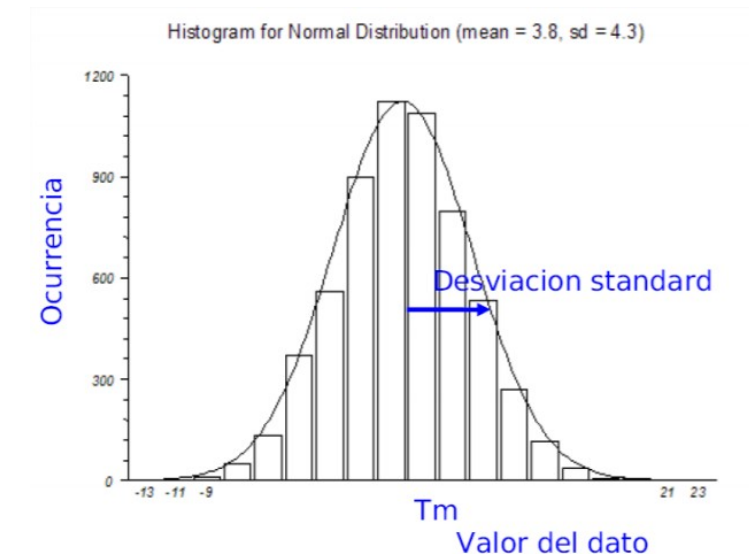
Se describe en términos de valores medios y de variabilidad de temperatura, precipitación y viento. El periodo de promedio habitual es de 30 años.

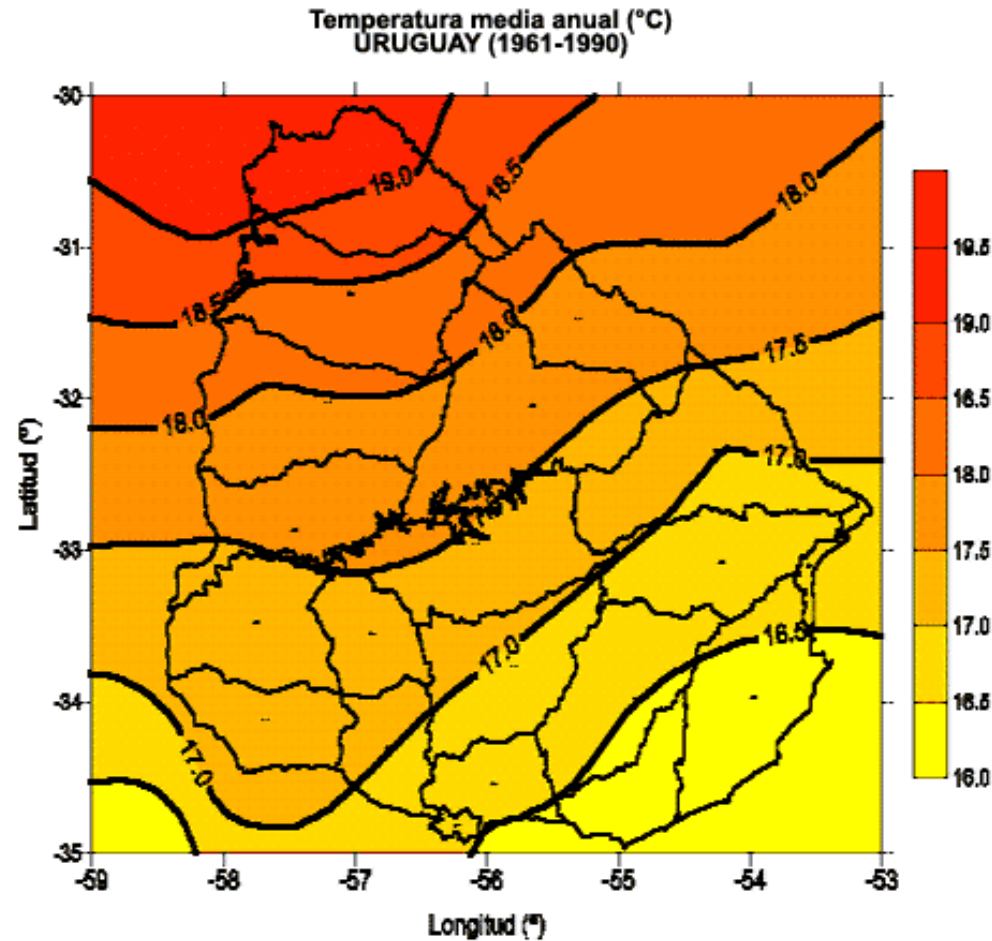
- Suponemos tenemos una serie de T media mensual en alguna localidad
- Las T son usualmente distintas entre sí:



Temperatura
Media (T_m)

- Si graficamos cada valor en función de su frecuencia

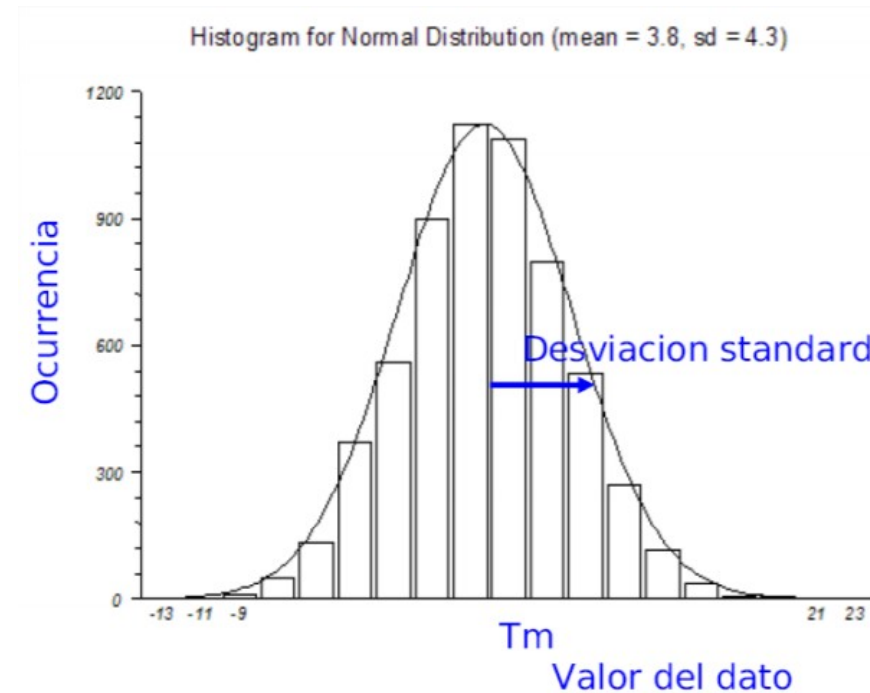


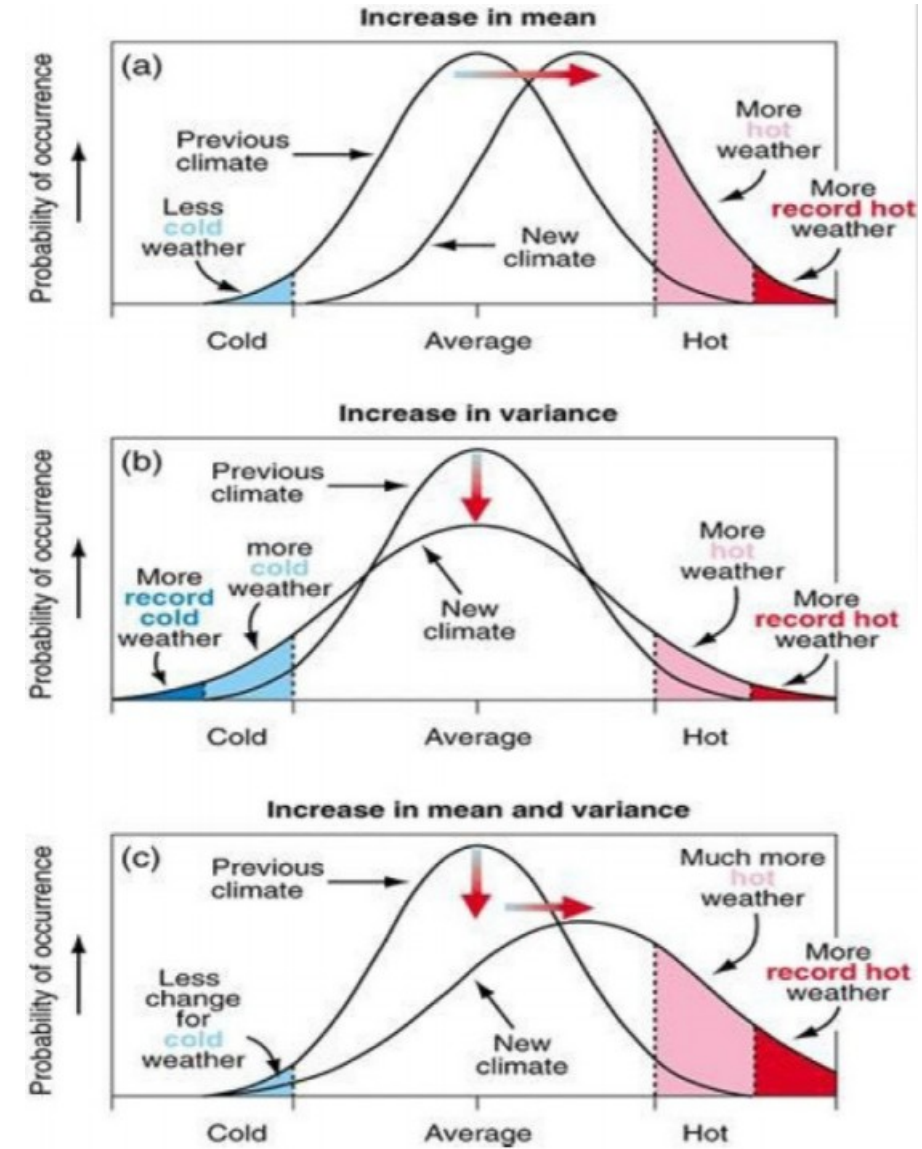
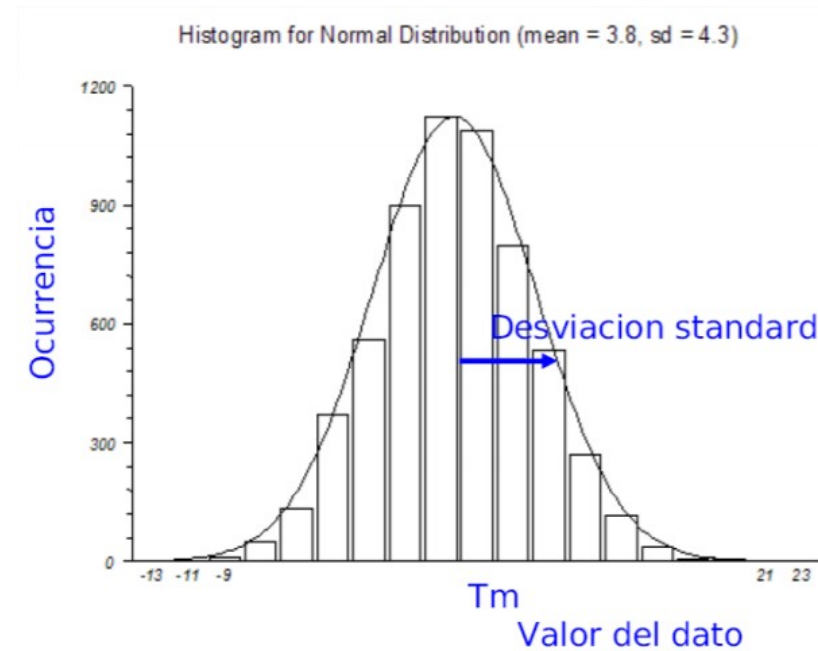
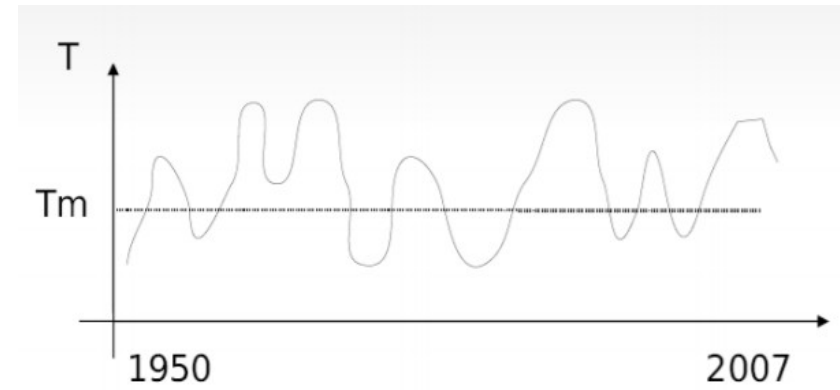


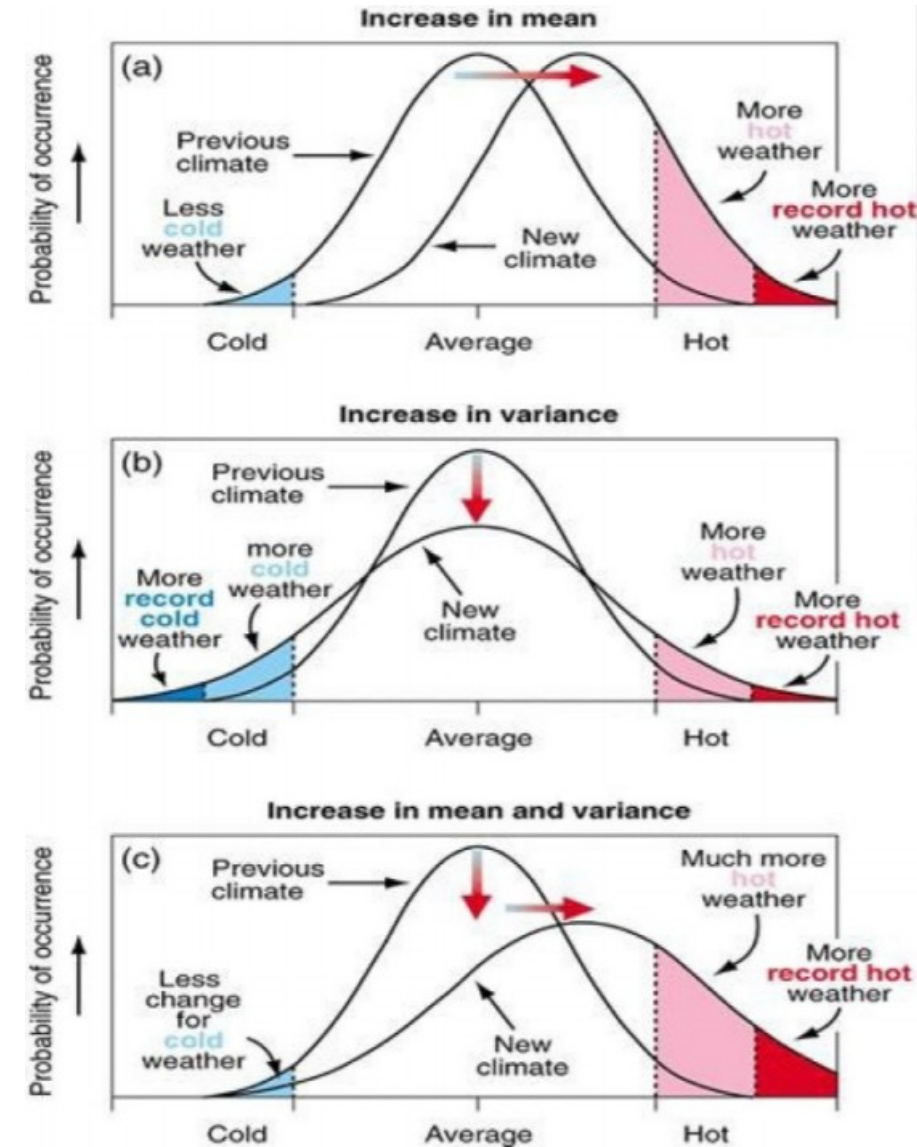
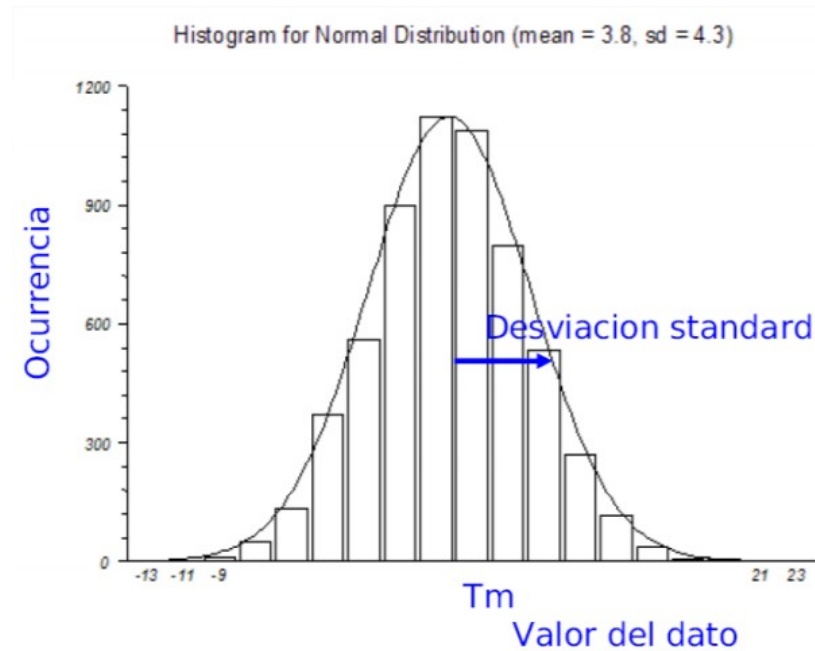
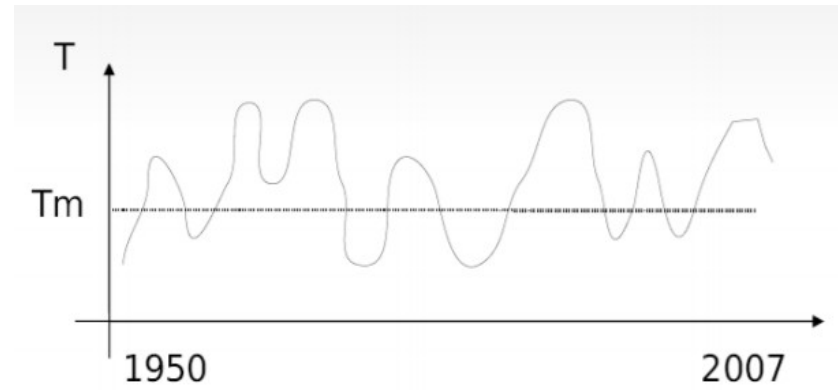
Fuente de datos: Dir. Nal. Meteorología

Clima:

- Temperatura media 17.5°C







El sistema climático de la Tierra 17/08

Objetivo

Entender qué es el sistema climático, cuáles son sus componentes, cómo interactúan entre ellos y cuáles son las razones por las que el estudio del funcionamiento del sistema climático es un problema complejo.

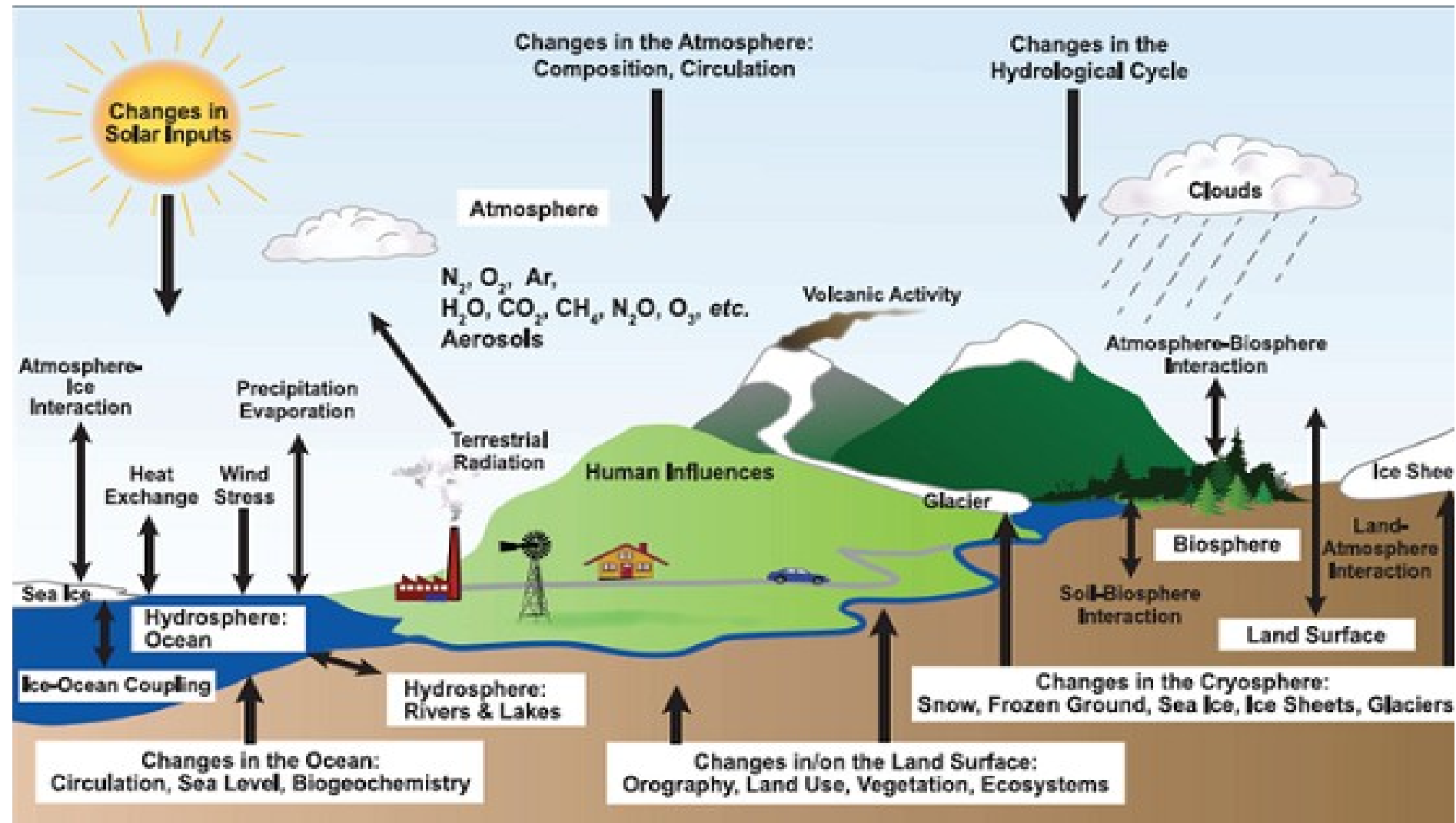
Contenidos

Introducción al sistema climático. Conceptos de tiempo y clima.

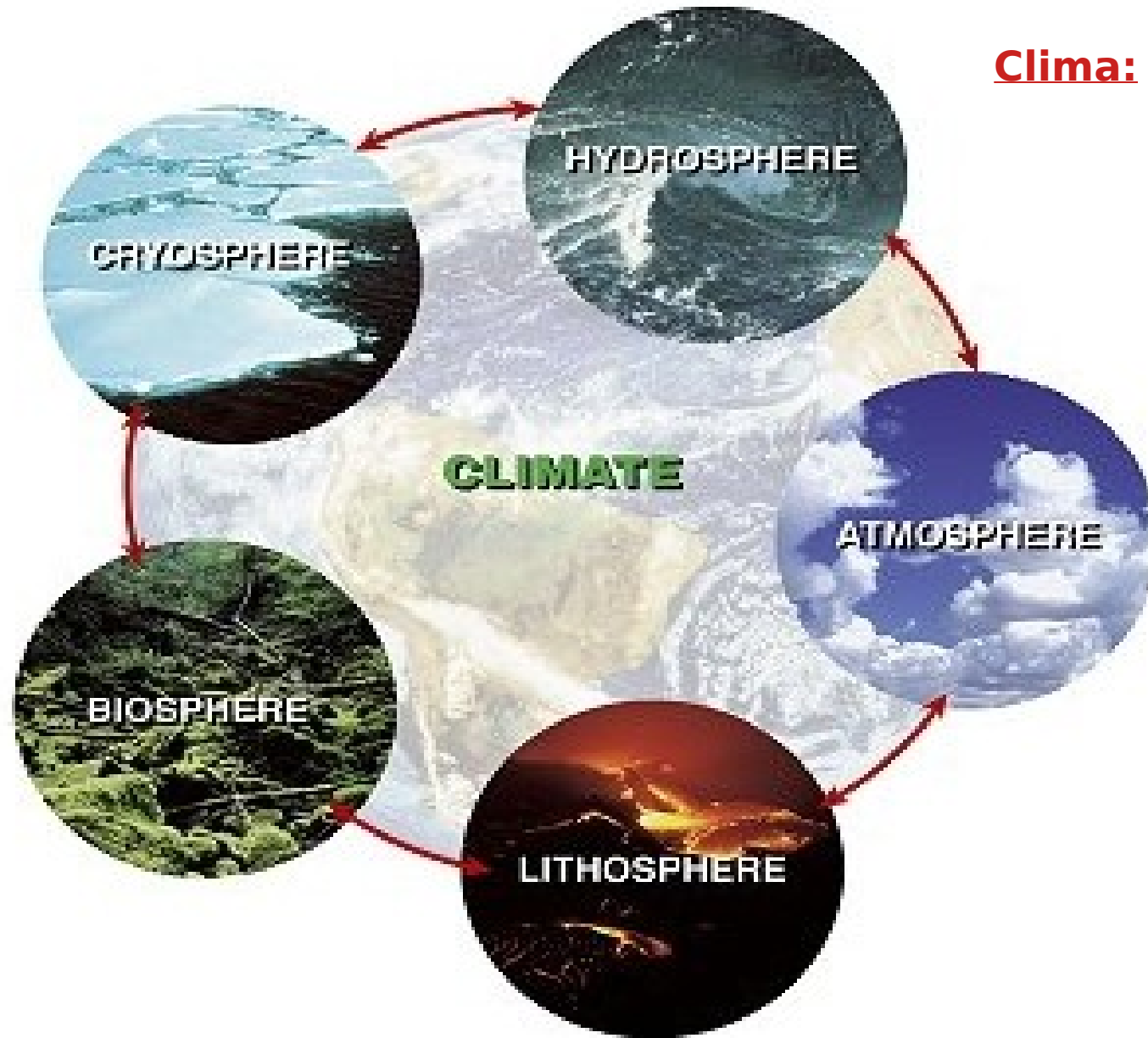
Componentes del sistema climático.

¿Por qué se dice que el estudio del funcionamiento del sistema climático es un problema complejo? Retroalimentaciones. Ejemplos.

Componentes del sistema climático.



Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



Existe un flujo continuo de momento, energía y masa entre los componentes del Sistema Climático.

El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del Sol (240 W/m^2)

Componentes del sistema climático

- De todos los componentes del sistema climático, **los procesos atmosféricos son el de más rápida respuesta y tienen el rol principal en las propiedades fundamentales del clima**

- • Redistribución de energía a nivel global
- • Distribución de temperaturas en la superficie
- • Distribución de agua en superficie



Componentes del sistema climático

- **Pero**, los otros componentes del sistema son importantes, a distintas escalas:
 - Si no fuera por el gran almacenamiento de calor por parte del océano durante el verano, la variación estacional de la temperatura sobre los continentes en latitudes medias y altas sería mucho mayor que la observada.
 - La existencia de vegetación afecta a la temperatura diaria máxima que alcanza la superficie.
 - El afloramiento de aguas profundas en la zona del Pacífico ecuatorial este permite que la temperatura de la superficie del mar sea lo suficiente fría y rica en nutrientes soportando grandes pesquerías.

Clima

- Su evolución está influida por dos tipos de factores:

1) Externos

A) Astronómicos: variaciones de la irradiancia solar, parámetros orbitales

B) Terrestres

I) Naturales: cambios en la composición de la atm asociados erupciones volcánicas, cambios a largo plazo asociado a factores tectónicos ...

II) Antropogénicos: cambios en la composición de la atm y en el uso de suelos asociado a actividades humanas

Clima

- Su evolución está influida por dos tipos de factores:

1) Externos

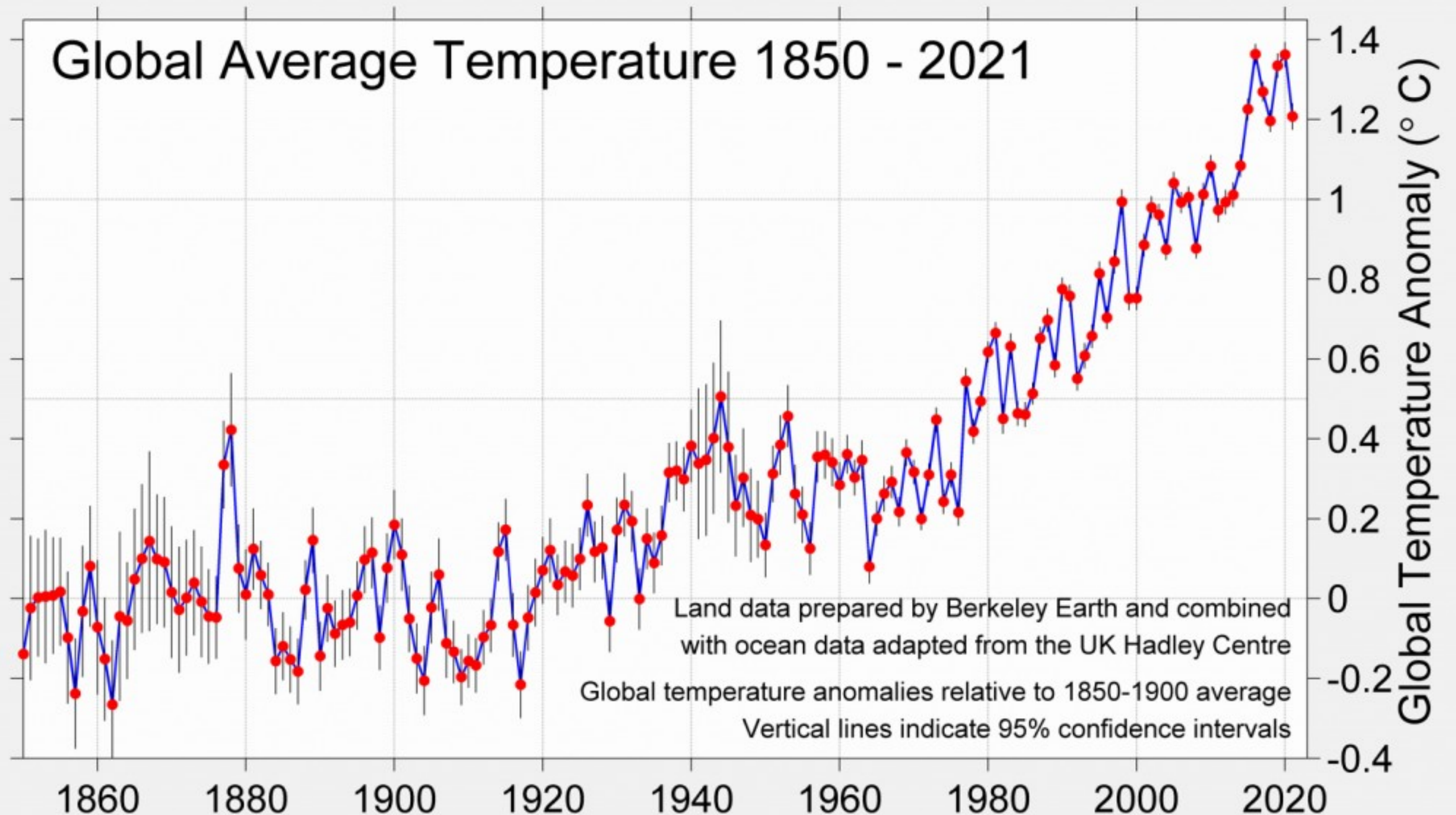
A) Astronómicos: variaciones de la irradiancia solar, los parámetros orbitales

B) Terrestres

I) Naturales: cambios en la composición de la atm asociados erupciones volcánicas, cambios a largo plazo asociado a factores tectónicos ...

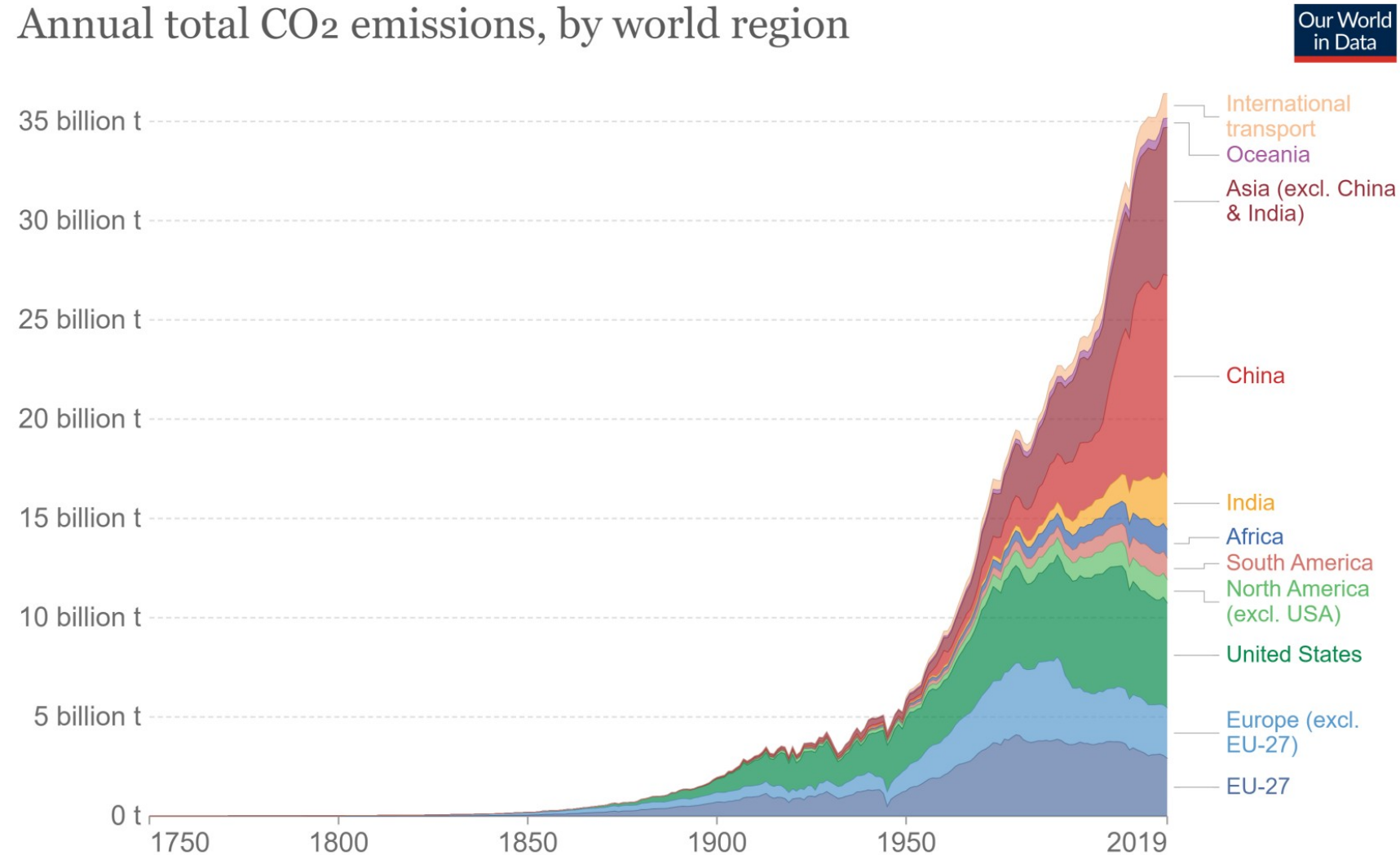
II) Antropogénicos: cambios en la composición atmosférica y uso de suelos asociado a actividades humanas

2) Internos: asociados inestabilidades internas y mecanismos de retroalimentación que conducen a la aparición de interacciones no lineales entre varios componentes del sistema climático.



Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO₂, CH₄, NO₂)

Annual total CO₂ emissions, by world region

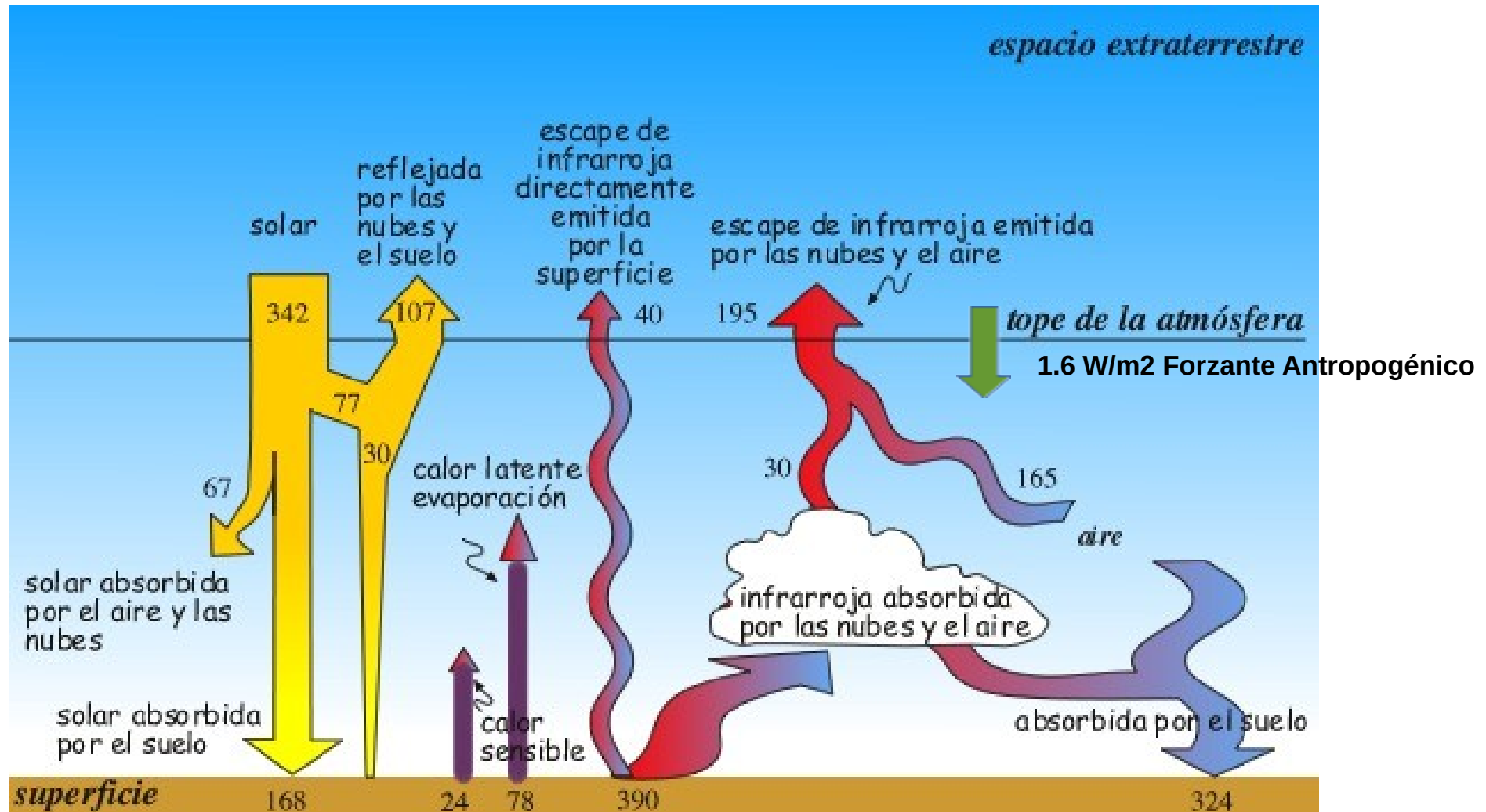


Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project

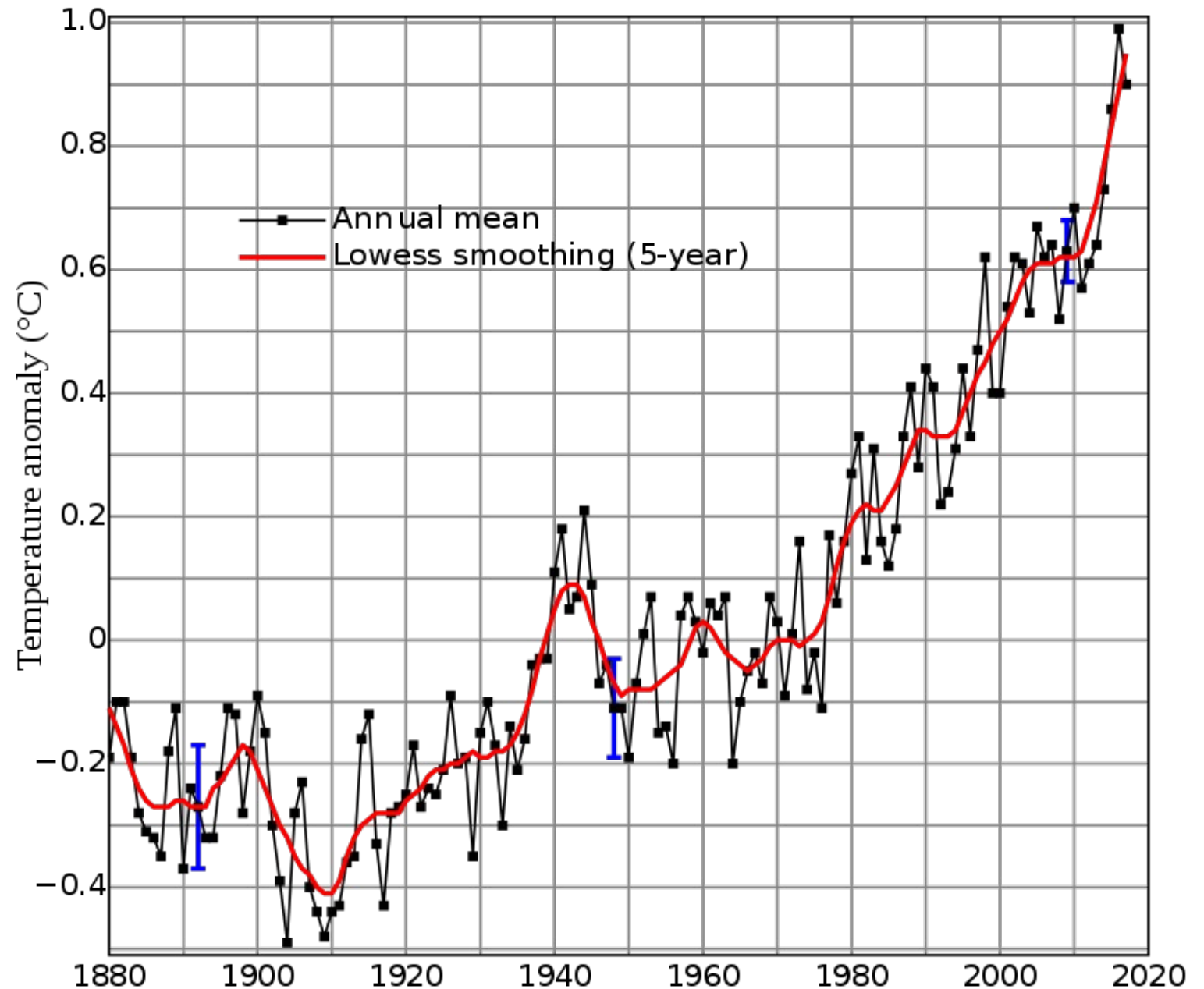
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Note: This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included. 'Statistical differences' (included in the GCP dataset) are not included here.

Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO_2 , CH_4 , NO_2), lo cual generó un aumento en la energía emitida hacia la superficie.

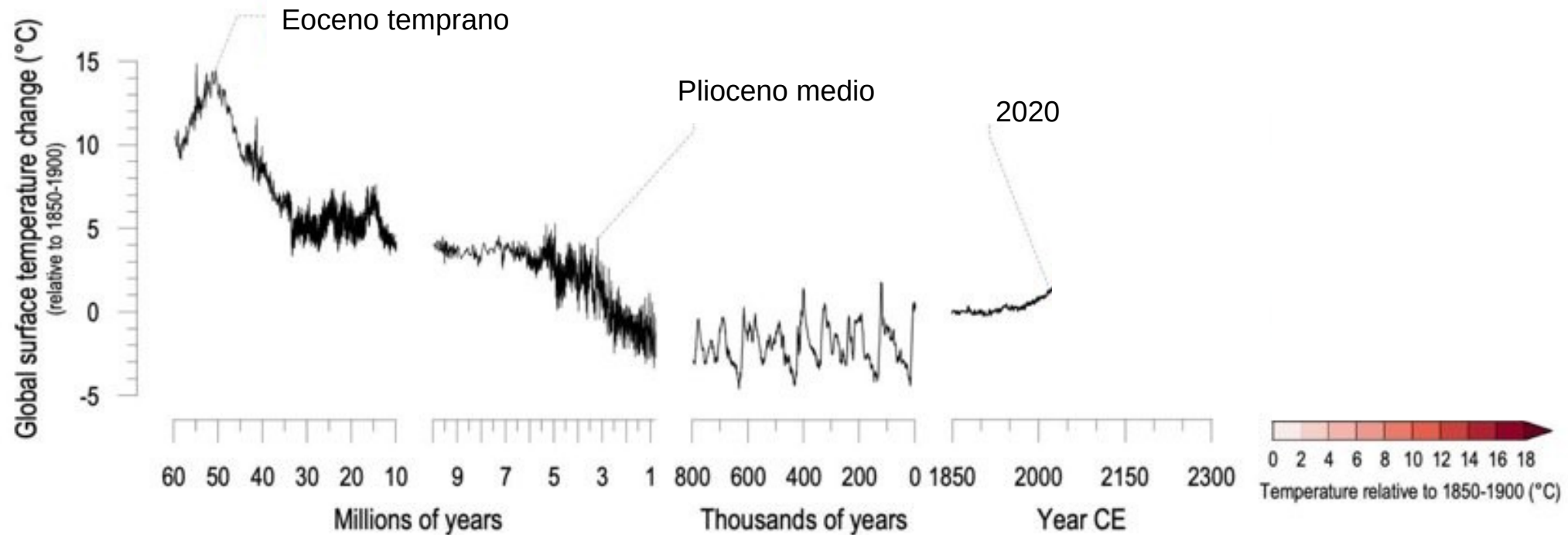


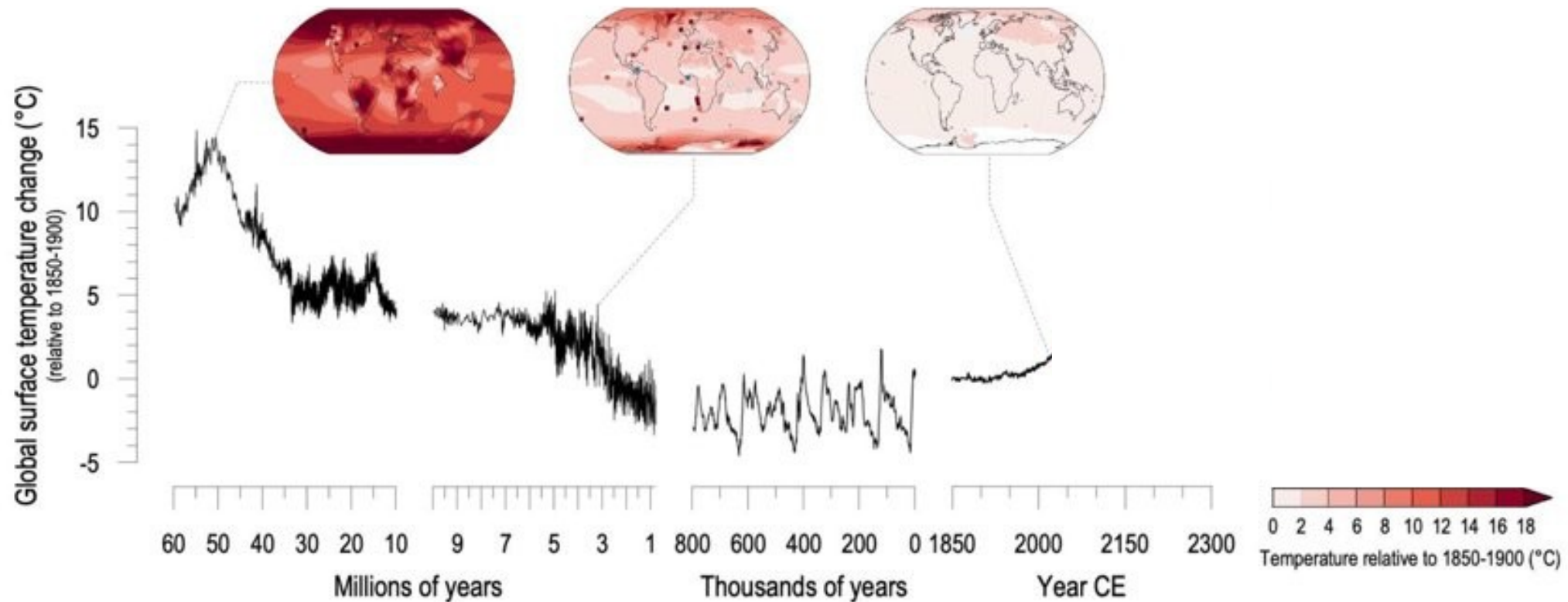
Global land-ocean temperature index



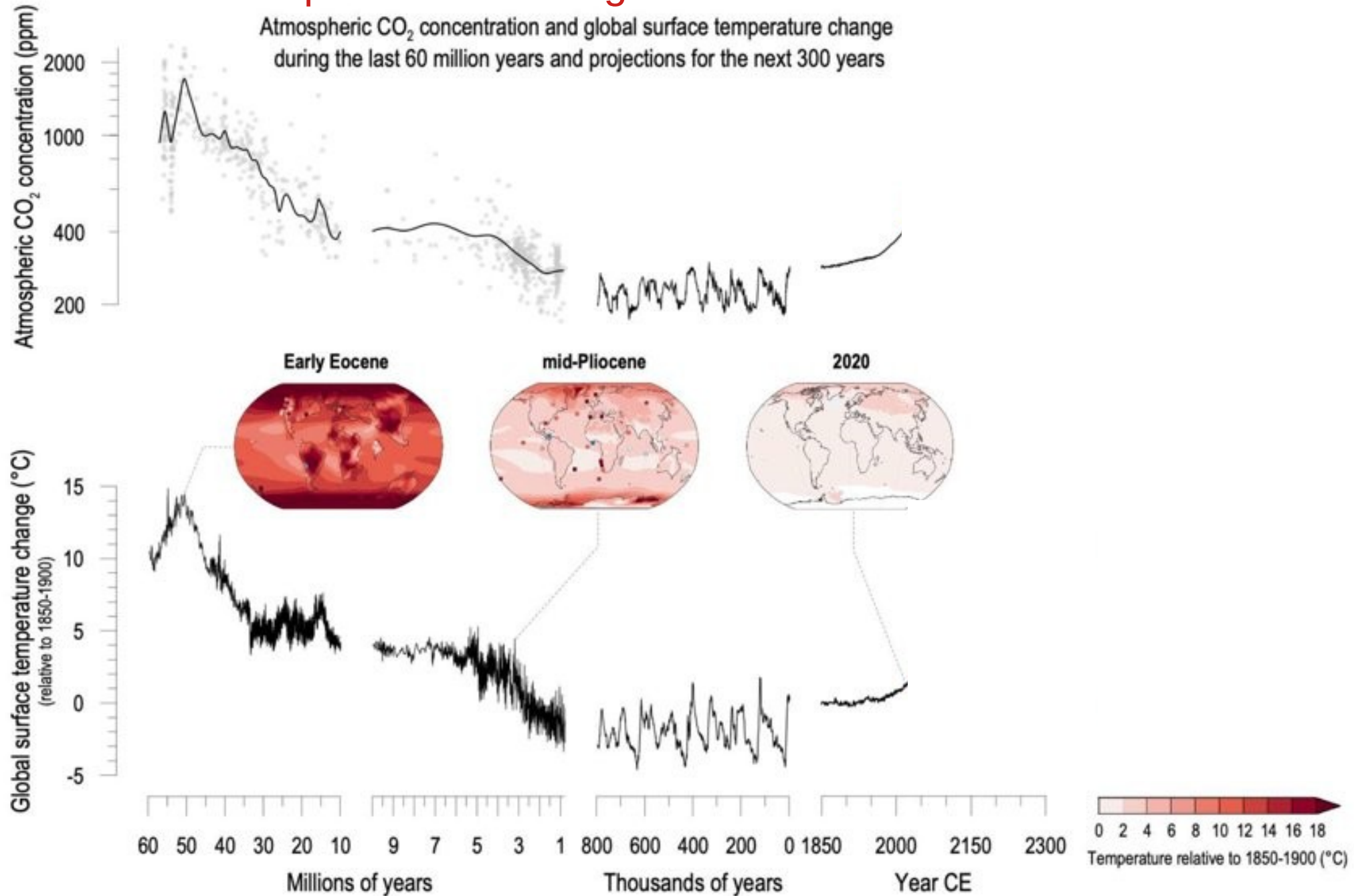
Este incremento se usa en el sistema climático para aumentar el contenido de calor de todos sus componentes y ha resultado en un aumento de la temperatura de superficie cercano a 1°C desde comienzos del siglo XX.

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



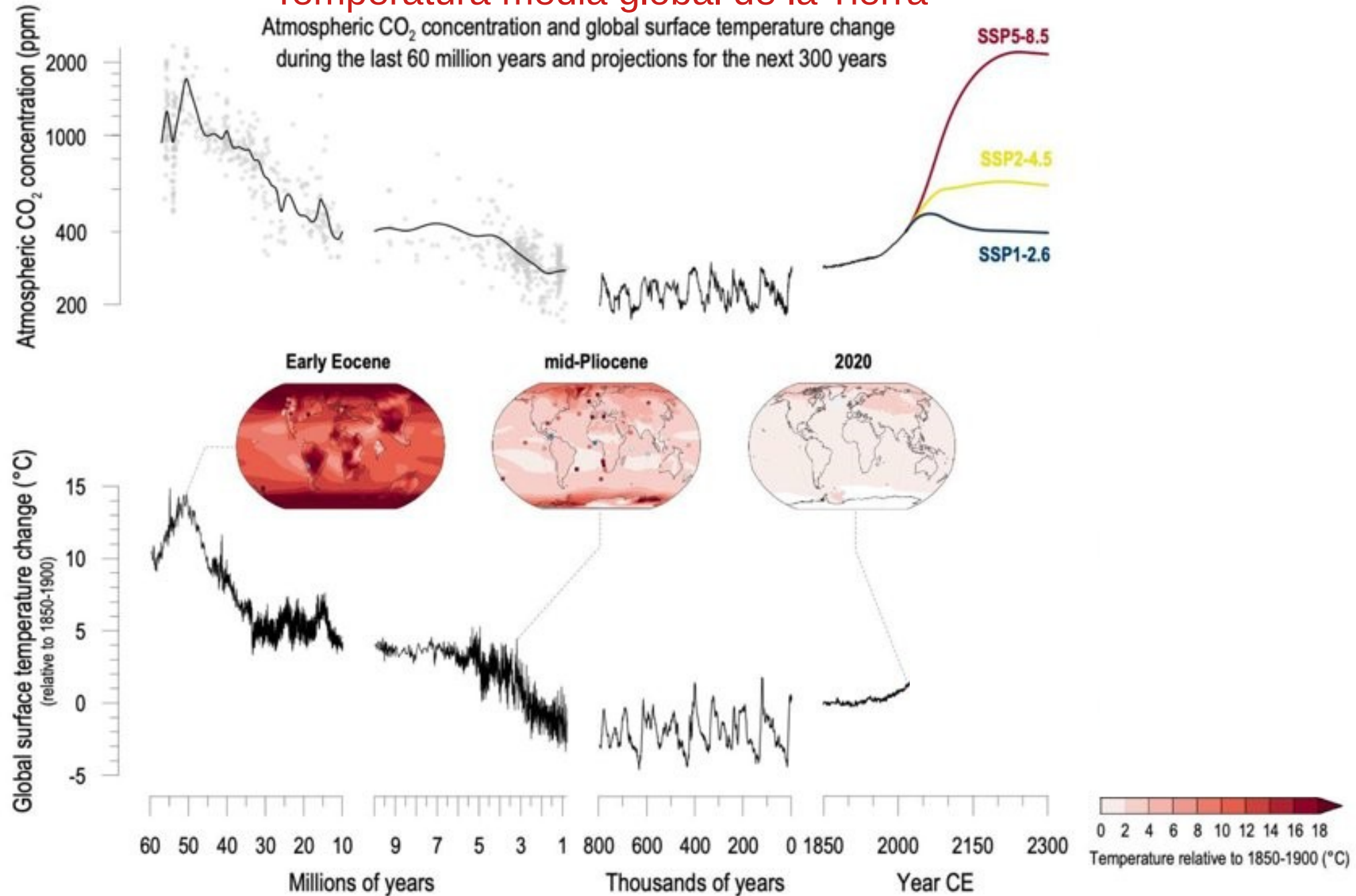


Temperatura media global de la Tierra



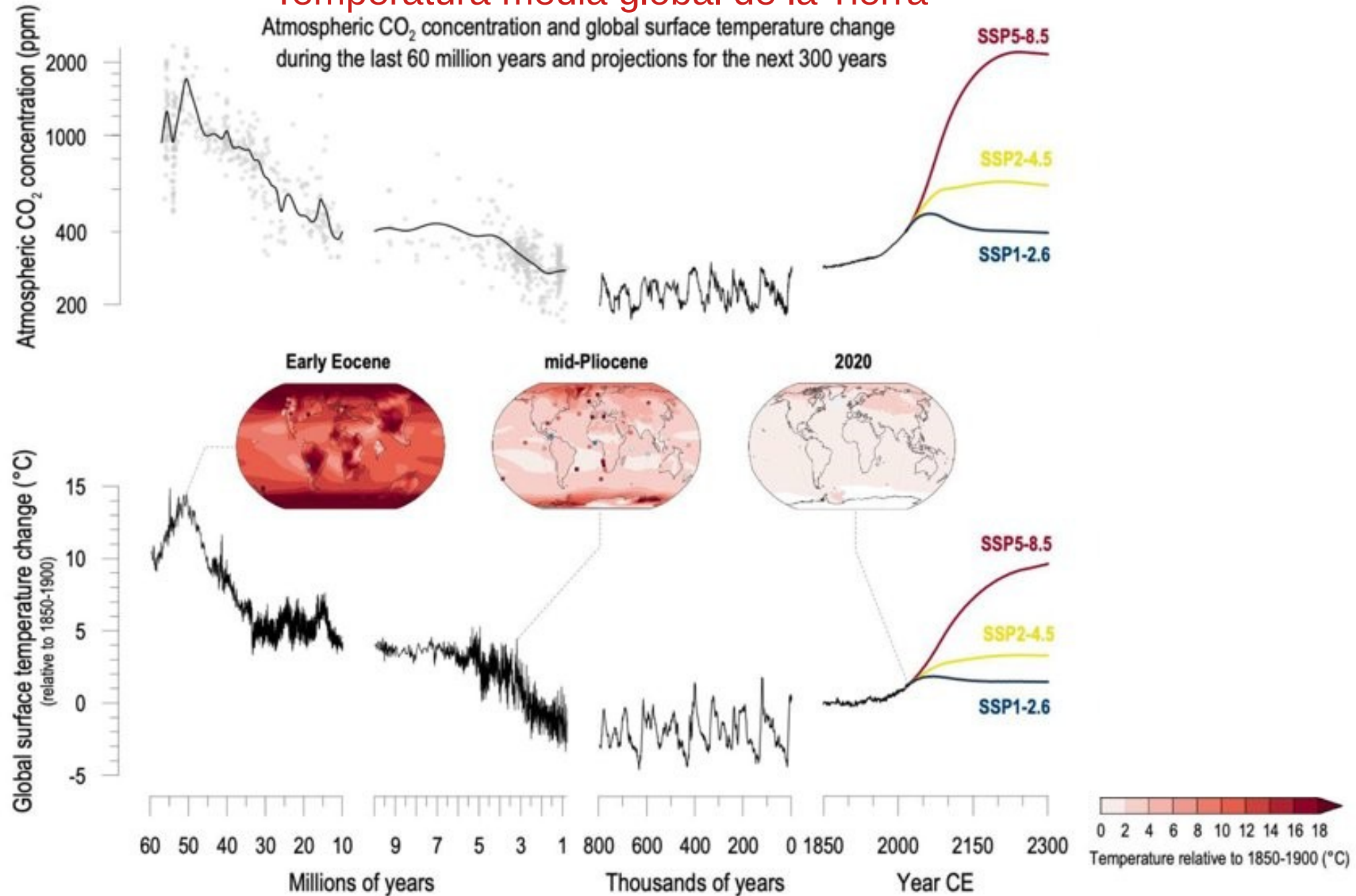
Temperatura media global de la Tierra

Introducción al sistema climático



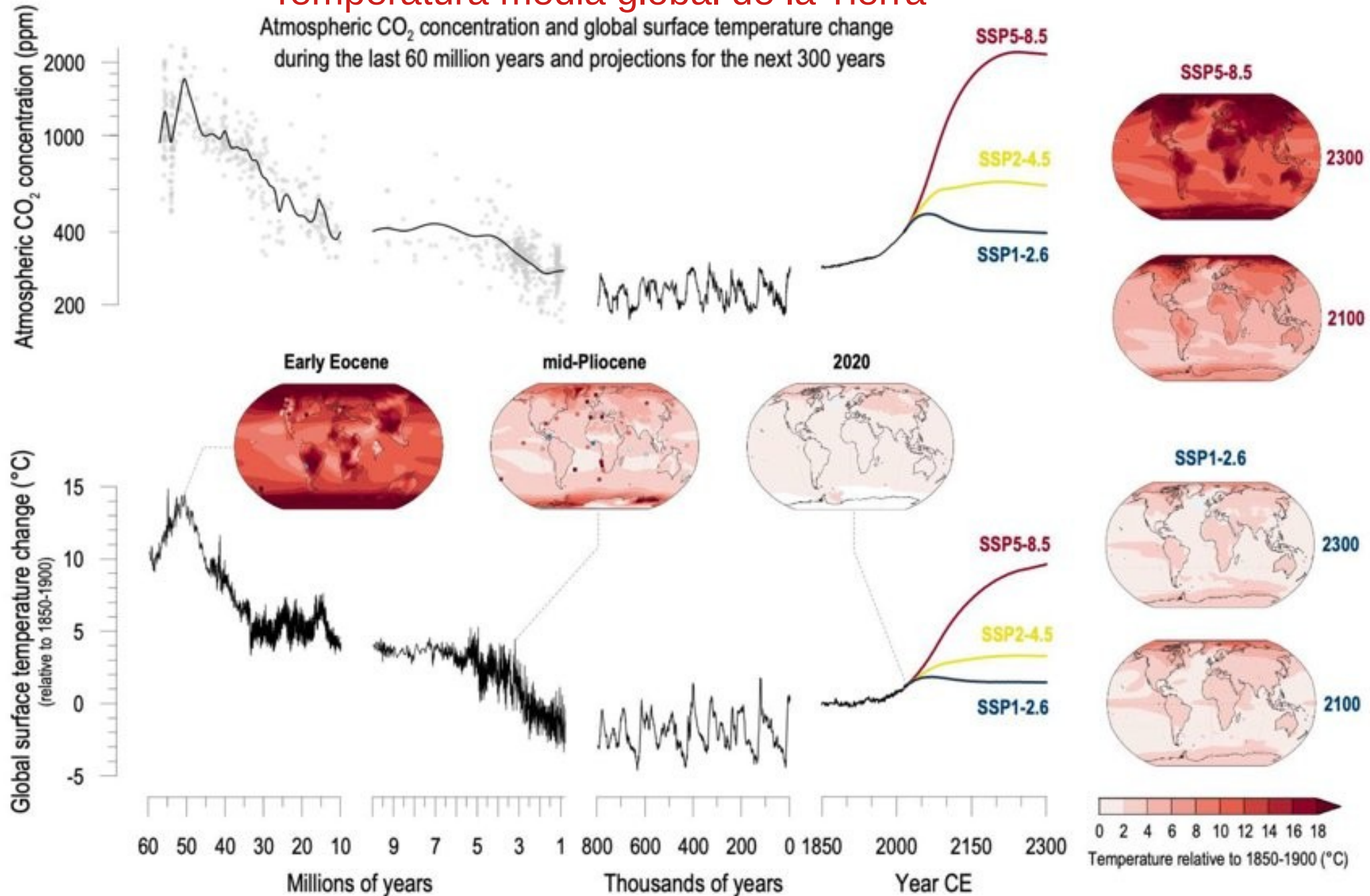
Temperatura media global de la Tierra

Introducción al sistema climático



Temperatura media global de la Tierra

Introducción al sistema climático



¿Por qué se dice que el estudio del funcionamiento del sistema climático es un problema complejo? Retroalimentaciones. Ejemplos

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

- “el sistema climático es una entidad compuesta por cinco componentes interactuantes (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) que en conjunto funcionan complejamente como un todo”

Hasta ahora nos hemos centrado en describir las cinco componentes del sistema climático y hemos puesto algunos ejemplos de cómo pueden interactuar entre sí.

¿a qué nos referimos cuando decimos que el sistema climático “en conjunto funciona **complejamente** como un todo”?

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

¿A qué nos referimos cuando decimos que el sistema climático “en conjunto funciona **complejamente** como un todo”?

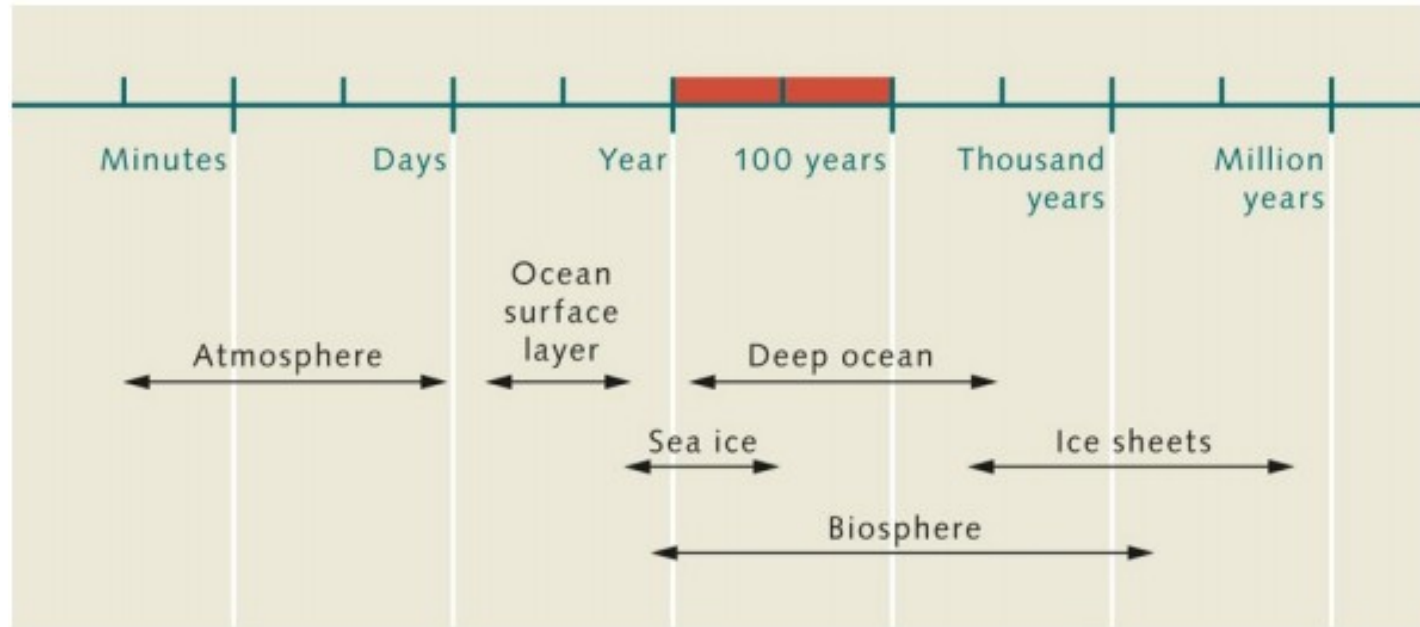
La complejidad del estudio del sistema climático se debe a tres factores:

- 1) Las interacciones entre los componentes son no lineales, dando lugar a la aparición de mecanismos de retroalimentación que complejizan el poder establecer la relación causa – efecto.
- 2) Los tiempos de respuesta de los componentes del sistema climático son diferentes → hace que las interacciones no lineales entre los mismos tengan lugar en diversas escalas temporales.
- 3) La existencia de inestabilidades internas

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

Los componentes evolucionan a diferentes velocidades (escalas de tiempo características), pero cualquier perturbación en uno de ellos repercute en los demás que responden a su propio ritmo.

Así, el sistema climático tiene variabilidad en todas las escalas de tiempo (segundos a millones de años).



Según los tiempos de respuesta es conveniente considerar una jerarquía de componentes, tomando primero aquellos con menor tiempo de respuesta considerando los otros componentes parte del sistema externo

e.g. para la escala de horas - días la atmósfera puede considerarse como el único componente interno del sistema climático, con los océanos, hielos, continente y biósfera considerados como forzantes externos o condiciones de borde.

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

¿Qué es una interacción no lineal?

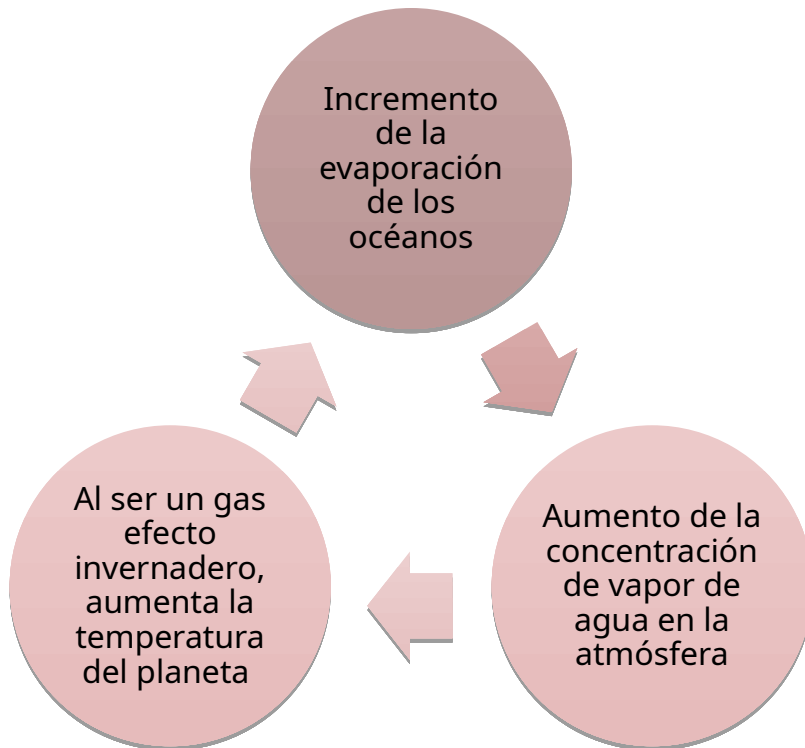
Si perturbo un sistema → una interacción es no lineal cuando su resultado retroalimenta a la propia perturbación, amplificándola o inhibiéndola.

Las retroalimentaciones (feedbacks) pueden ser:

- **Positivas:** El resultado de la interacción amplifica los efectos de la perturbación.
- **Negativas:** El resultado de la interacción disminuye los efectos de la perturbación.

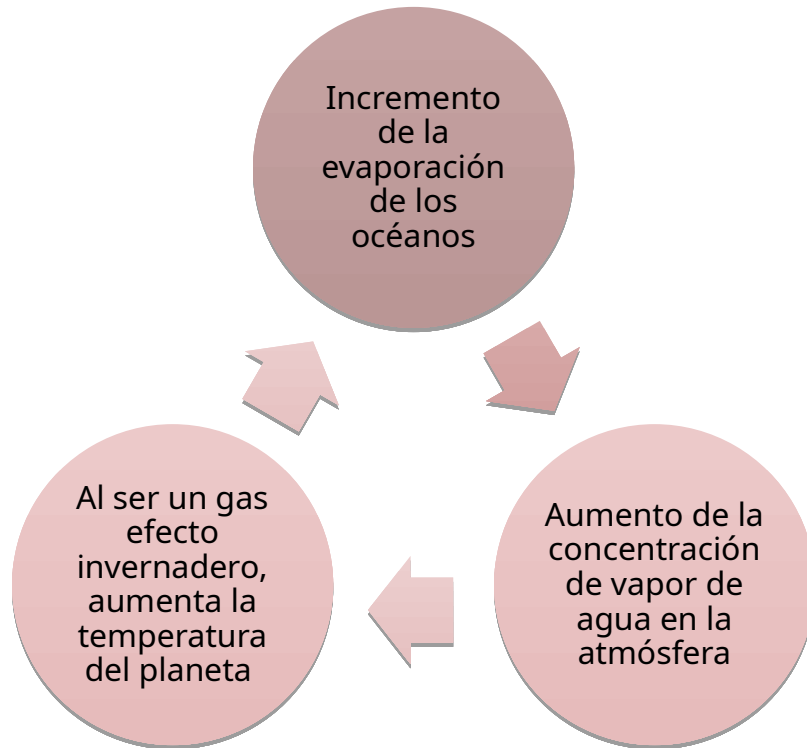
¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ Retroalimentación positiva

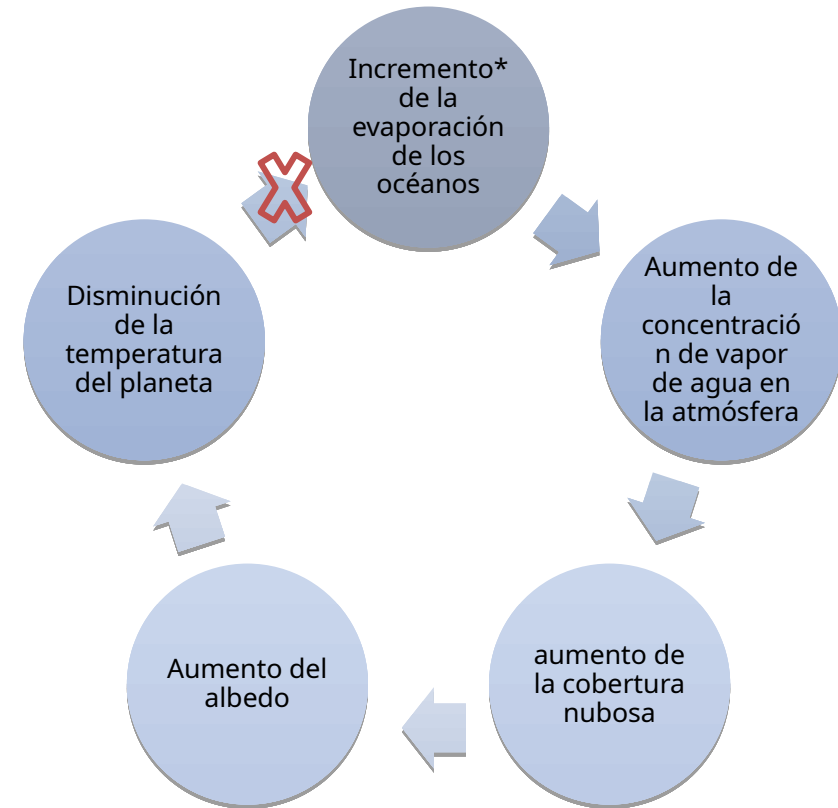


¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ Retroalimentación positiva



▪ Retroalimentación negativa



¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

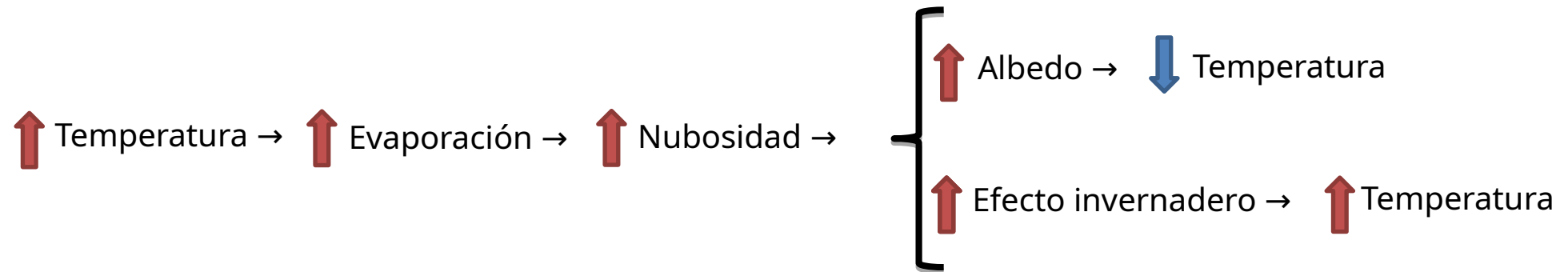
1.3) ¿Por qué se dice que es sistema climático es un problema complejo?

- Caso particular del forzamiento de la nubosidad

↑ Temperatura → ↑ Evaporación → ↑ Nubosidad → ????

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ Caso particular del forzamiento de la nubosidad



- Estas dos retroalimentaciones posibles están presentes en todo momento compitiendo entre sí.
- Dependiendo de cuál de las dos retroalimentaciones sea la de mayor peso, la presencia de nubosidad contribuirá o al calentamiento o al enfriamiento del planeta.
- La importancia relativa de uno de los efectos sobre el otro va a depender de la altura de la nube y del espesor de la misma.

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ **Caso particular del forzamiento de la nubosidad**



TIPOS DE NUBES:

1) **Nubes Altas (cirrus):**

- Son nubes delgadas (poco espesor) que se encuentran por encima de los 6000m
- El efecto de la absorción de radiación terrestre es mayor que el del albedo → calentamiento global

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ Caso particular del forzamiento de la nubosidad

TIPOS DE NUBES:

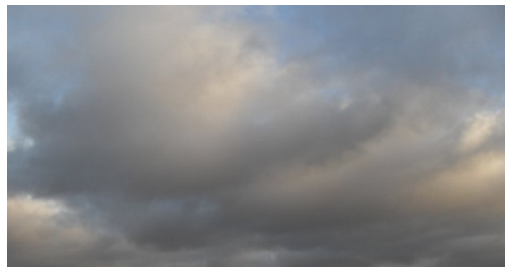
1) Nubes Altas (cirrus):

- Son nubes delgadas (poco espesor) que se encuentran por encima de los 6000m
- El efecto de la absorción de radiación terrestre es mayor que el del albedo → calentamiento global



2) Nubes Bajas (estratos y estratocúmulos):

- Su contribución al albedo es mayor que al efecto invernadero
- Son nubes bajas (aproximadamente 2000m de altura)
- Tienden a ocurrir en regiones donde existe una estratificación estable en la atmósfera que impide el desarrollo vertical de la nube.



¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

▪ **Caso particular del forzamiento de la nubosidad**

TIPOS DE NUBES:

3) Sistemas convectivos (cumulonimbos):



- Son nubes de gran desarrollo vertical (gran espesor óptico) asociadas a la convección en los trópicos → espesor óptico grande (bastante albedo y atenuación del rayo solar); bastante absorción de radiación terrestre.
- En este caso los dos efectos tienden a cancelarse haciendo que el forzamiento radiativo neto debido a estas nubes sea pequeño.

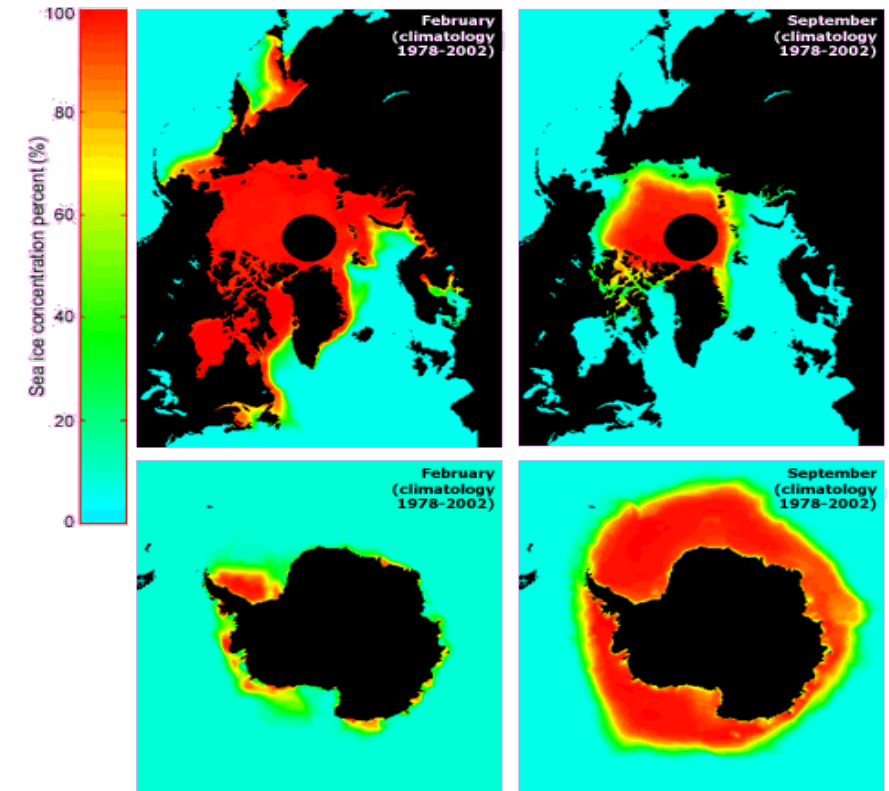
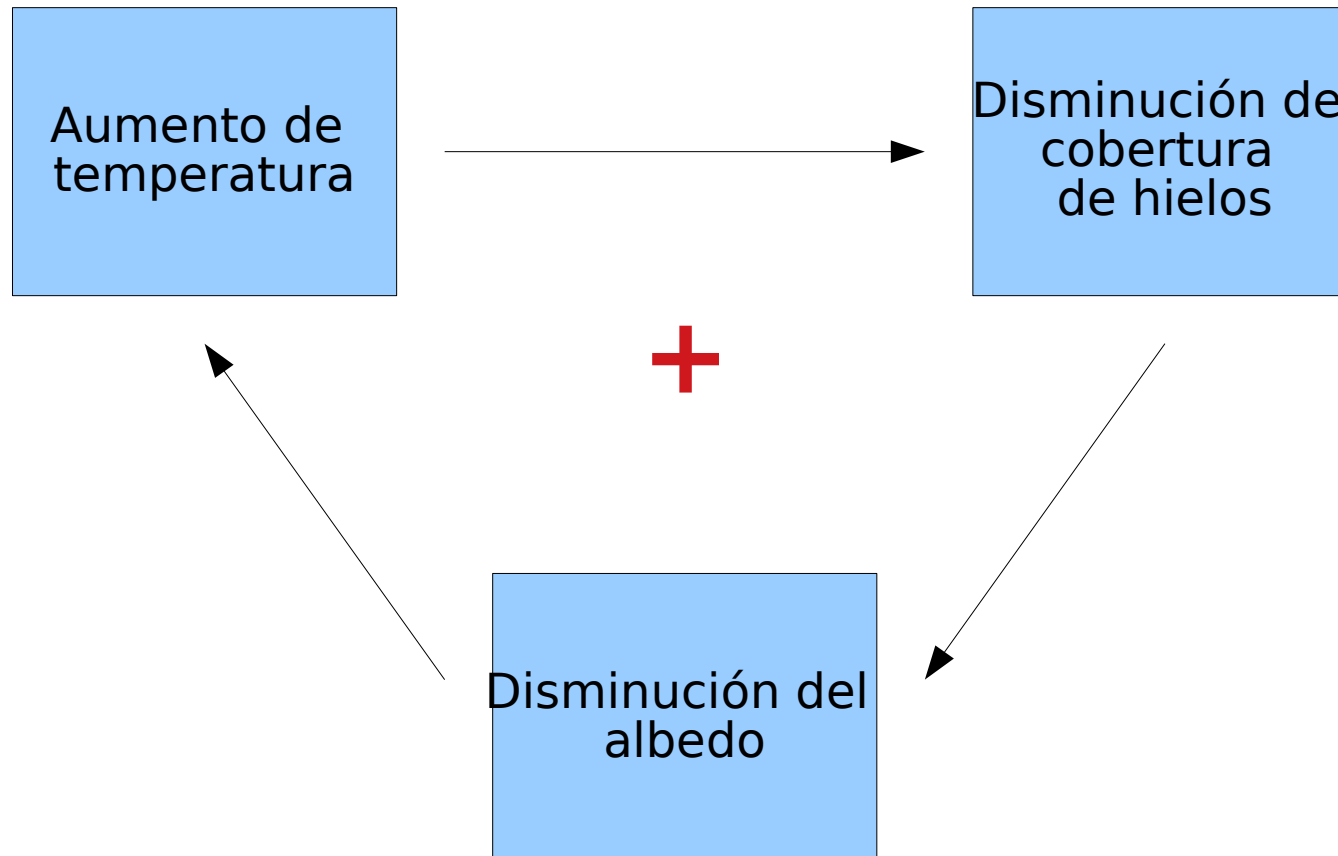
¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

- **RETROALIMENTACIONES CON HIELO**

- **Hielo-albedo** (opera en verano en altas latitudes)

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

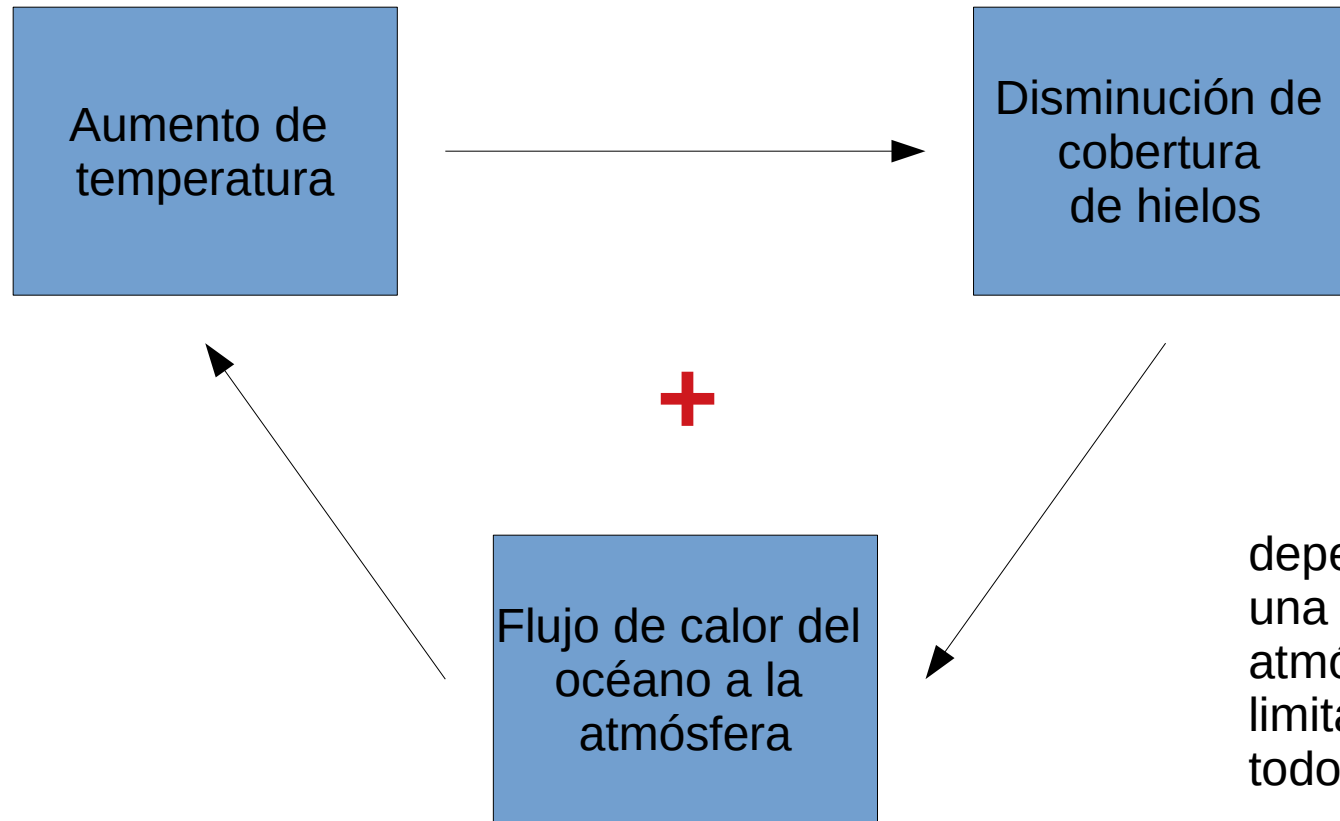
▪ RETROALIMENTACIONES CON HIELO - En verano en latitudes altas



¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

1.3) ¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

RETROALIMENTACIONES CON HIELO - Hielos flujos de calor



depende de que el océano es una fuente de calor para la atmósfera polar y que está limitado por el hielo (opera todo el año)

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

- Las retroalimentaciones mostradas son algunos ejemplos sencillos.
- En el sistema climático existen más mecanismos de retroalimentación ocurriendo al mismo tiempo y en diferentes escalas espacio – temporales.

¿Por qué se dice que el sistema climático es un problema complejo?

- La presencia de esas realimentaciones junto con la existencia de inestabilidades internas complejiza el funcionamiento del sistema climático, haciendo difícil la tarea de establecer una relación causa – efecto.

En Síntesis

- El sistema climático es una entidad compuesta de 5 subsistemas que interactúan entre sí a través de procesos físicos que involucran flujos de energía, materia y momento.
- Esos cinco subsistemas son: la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera, la criosfera y la biosfera.
 - De todos ellos el más importante es la atmósfera, la cual presenta el tiempo de respuesta más corto y se encarga de redistribuir la energía por todo el planeta.
- El hecho de que cada subsistema tenga diferentes tiempos de respuesta, implica una continua evolución hacia el equilibrio, con unos subsistemas liderando (los de menor tiempo de respuesta) y otros actuando con un retraso temporal (los de mayor tiempo de respuesta).
- El estudio del sistema climático es un problema complejo porque: (1) las interacciones entre los componentes del sistema climático son no lineales, (2) existen inestabilidades internas y (3) los tiempos de respuesta de los componentes del sistema, haciendo que las interacciones no lineales tengan lugar en diversas escalas temporales.