

EL CAMBIO CLIMÁTICO.

M. de Castro
M. Gómez Gesteira

EPhysLab (UVIGO)

El cambio climático.

Sección 1. El clima y la variabilidad natural del clima.

Sección 2. El clima en el pasado.

Sección 3. El clima actual.

Sección 4. El clima en el futuro.

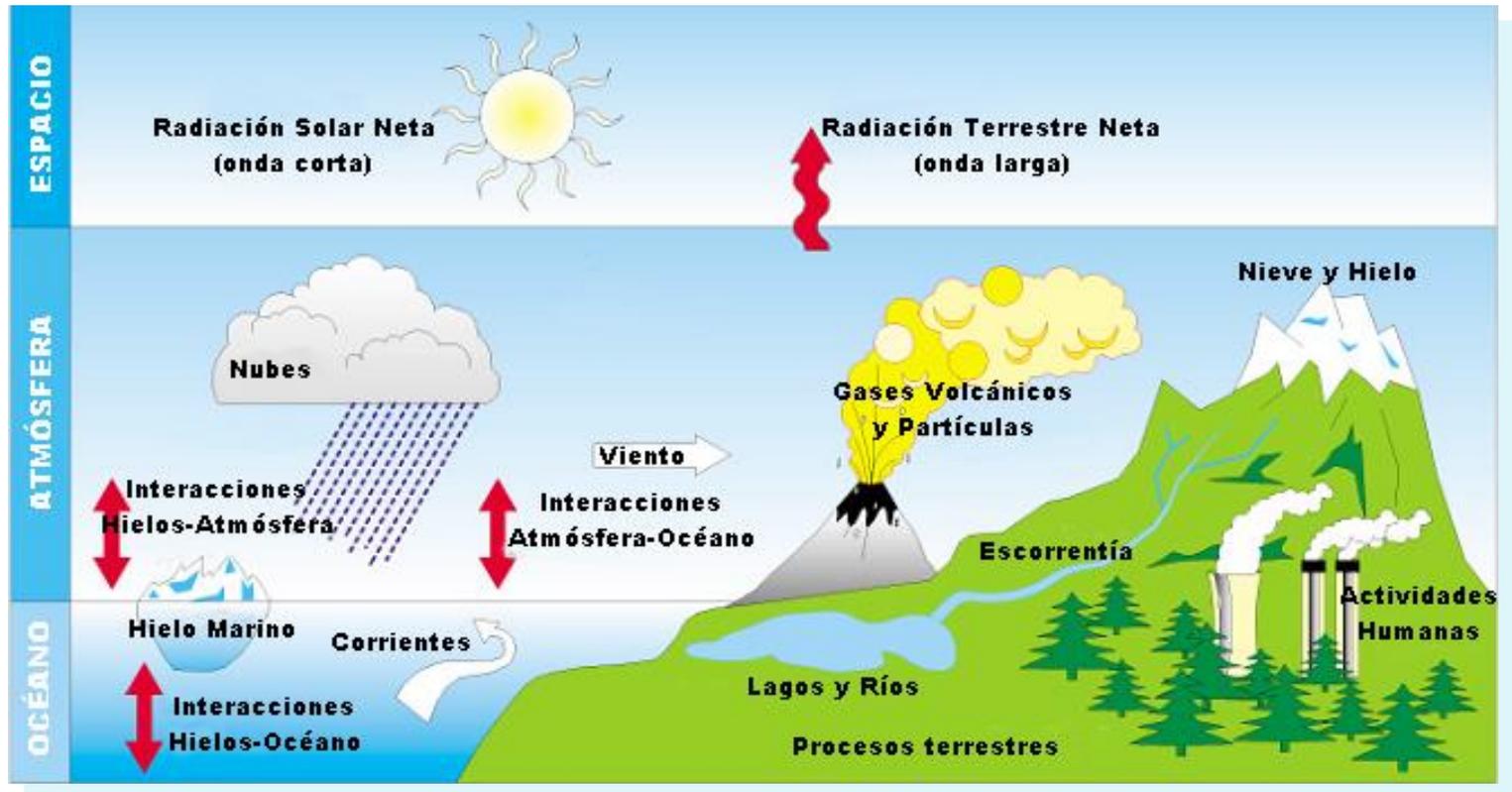
Sección 5. Incidencia sobre diferentes sectores.

Sección 1.

El clima y la variabilidad natural del clima.



El Clima.



El clima es el promedio de todos los estados de tiempo y varía espacial y temporalmente.

El clima es un sistema interactivo. Tiene 5 componentes principales: **Atmósfera, hidrosfera, críosfera, superficie terrestre y biosfera.**

¿Está cambiando el clima?

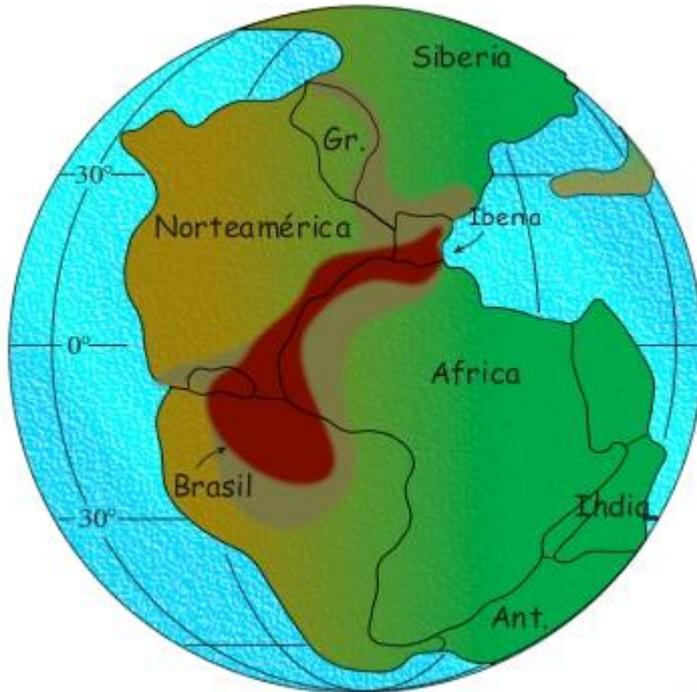
Sí

¿Cómo siempre?



Variabilidad natural del clima

Deriva de los continentes.

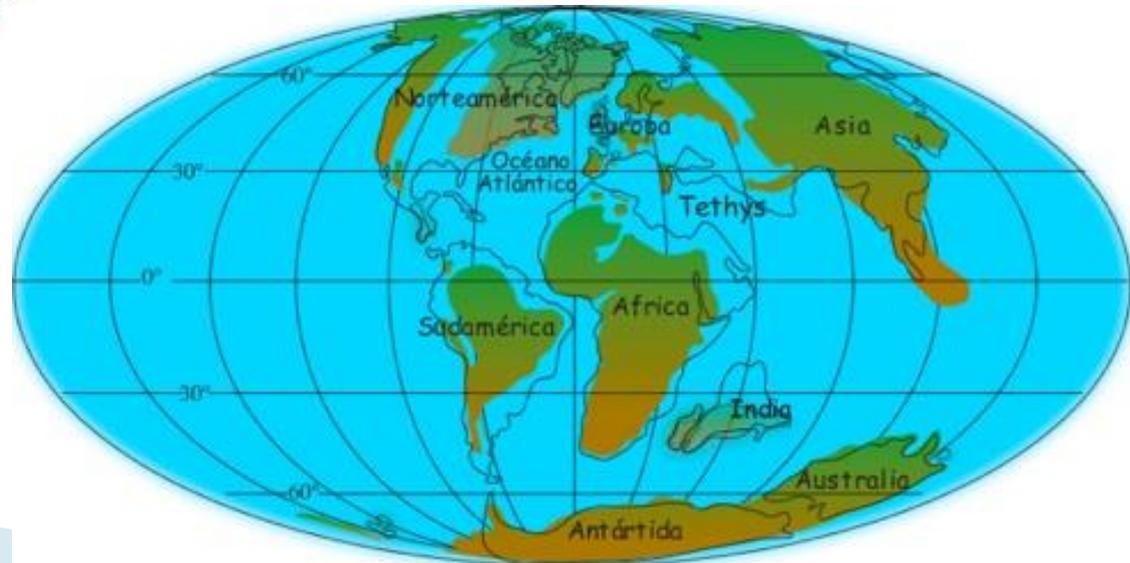


Pangea (300- 200 millones de años).

Clima muy árido con poca lluvia.

Jurásico y Cretácico (208- 146 ma).

Clima cálido y muy húmedo.



Variabilidad natural del clima

Variación de la actividad solar

Fotosfera: superficie visible del Sol. Está a una temperatura media de 5.800 K.

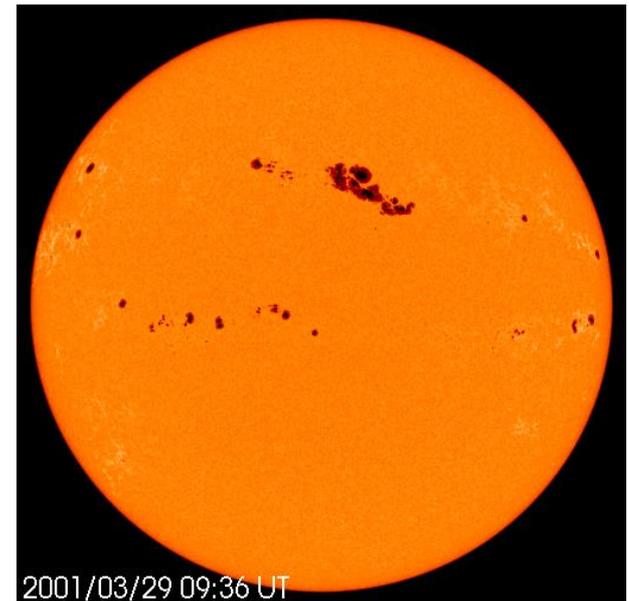
Manchas solares: zonas oscuras y relativamente más frías de la fotosfera solar. Están a temperaturas varios cientos de grados más frías que el conjunto de su superficie.

Fáculas solares: áreas más brillantes que rodean a las manchas solares.

El Sol emite más energía cuantas más manchas solares haya en un momento determinado.

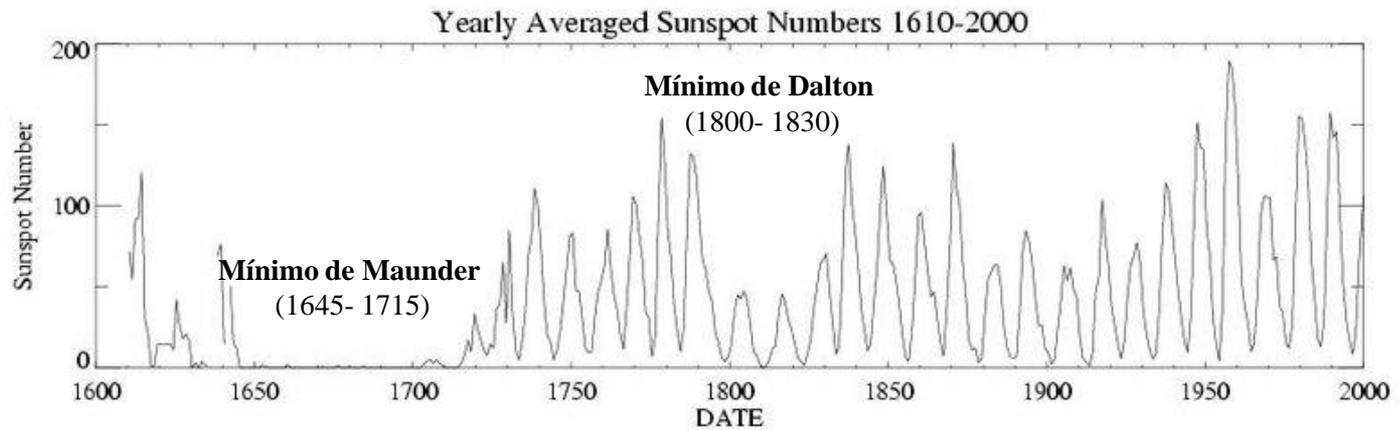
Manchas solares

http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos_space2001.html



Variabilidad natural del clima

Variación de la actividad solar

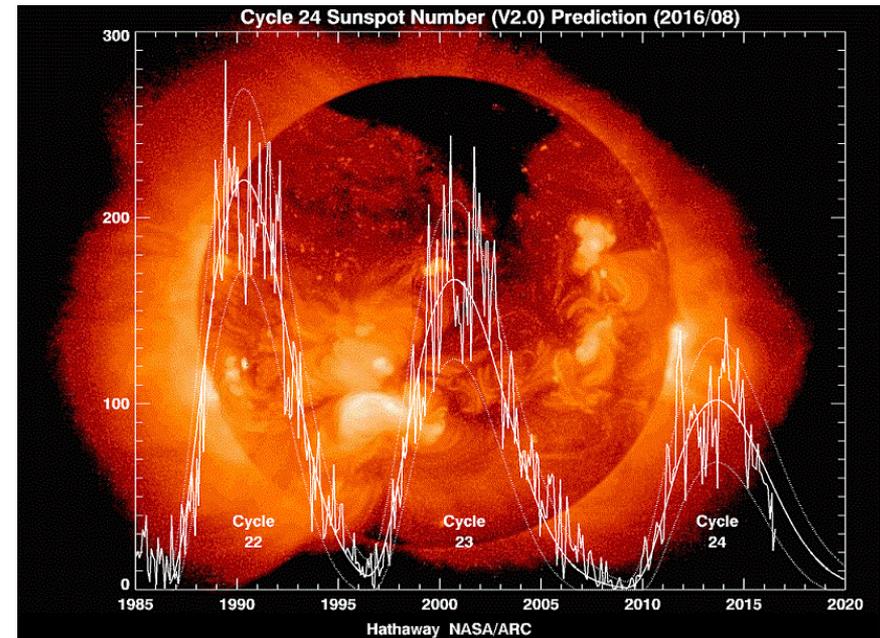
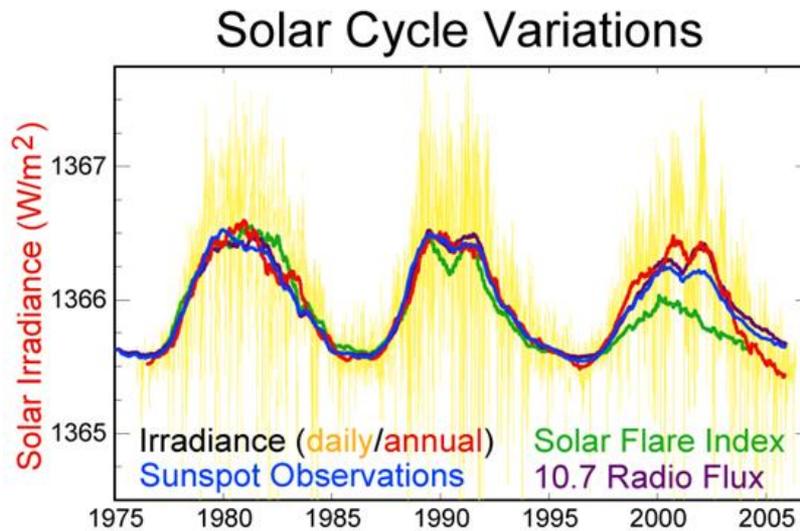


Variabilidad natural del clima

Variación de la actividad solar

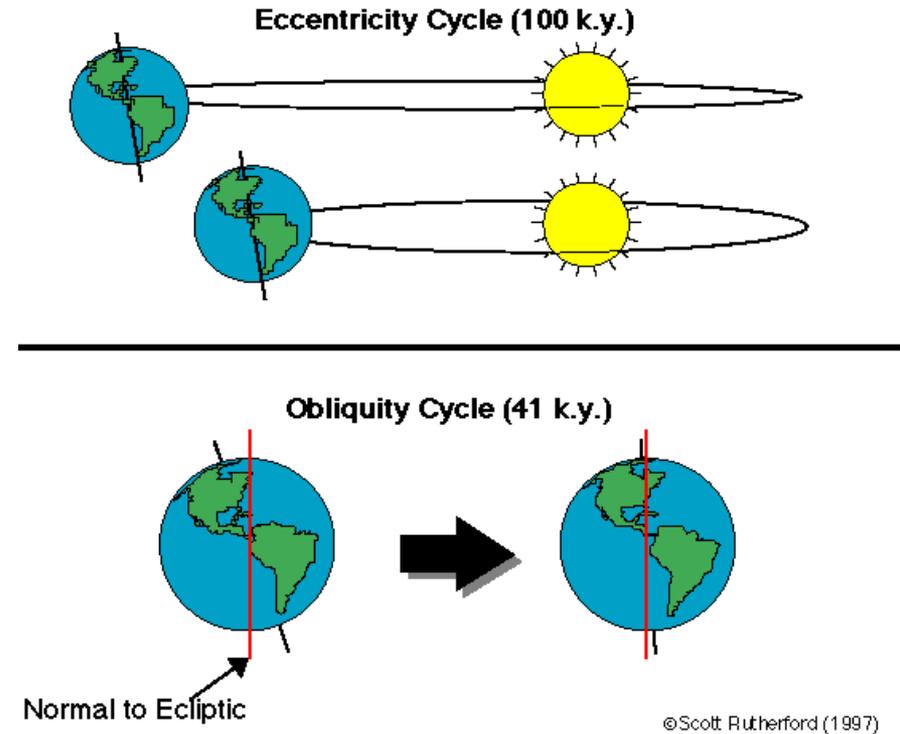
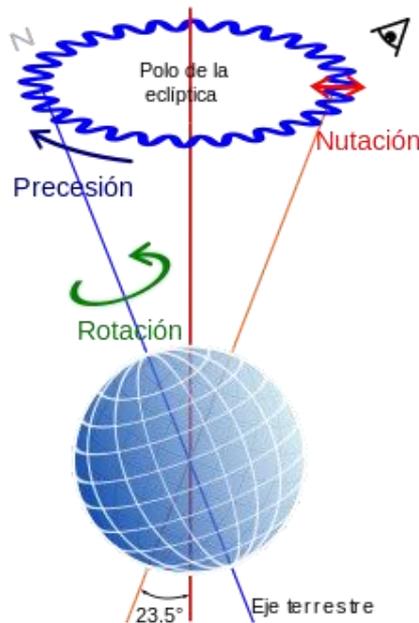
El número de manchas solares está relacionado con la “*insolación solar total*” o “*constante solar*”.

Desde mediados del siglo XIX se sabe que el número anual varía en ciclos de 11 años. En la actualidad este flujo, cercano a los 1.370 W/m^2 , oscila aproximadamente en $1,2 \text{ W/m}^2$ entre el máximo y el mínimo del ciclo.

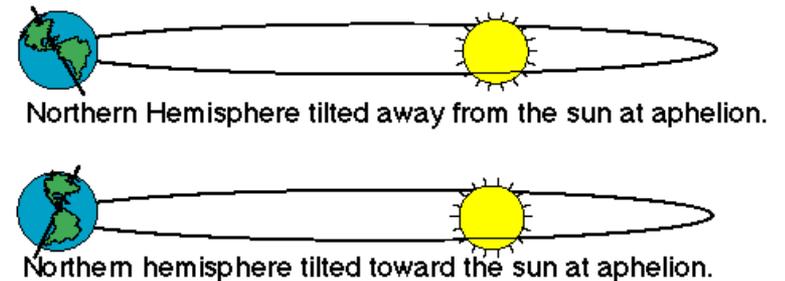


Variabilidad natural del clima

Variación de la órbita terrestre (ciclos de Milankovitch)



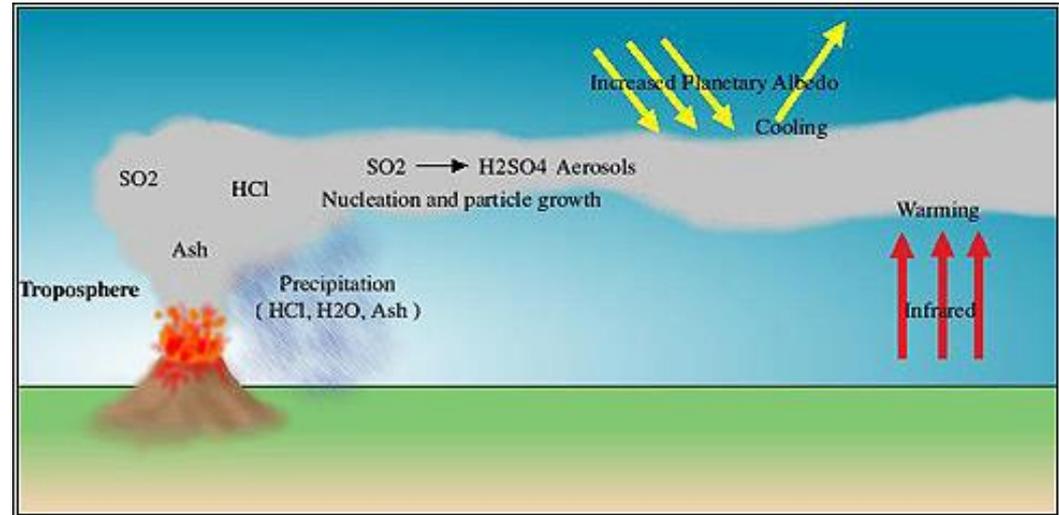
Precession of the Equinoxes (19 and 23 k.y.)



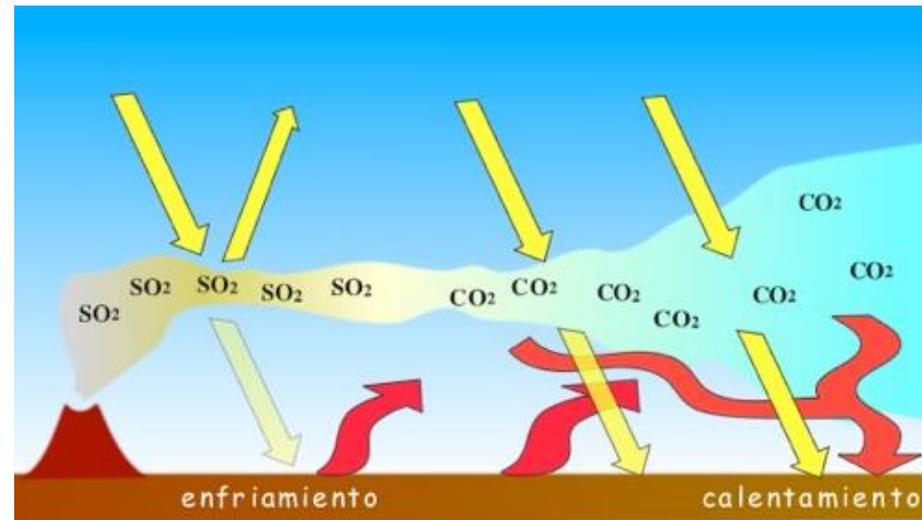
Variabilidad natural del clima

Actividad volcánica

El dióxido de azufre (SO_2) se oxida a SO_3 y acaba formando gotitas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) que amarillean y oscurecen el cielo, haciendo sombra y enfriando la superficie.



El dióxido de carbono (CO_2) es transparente a la luz solar (flechas amarillas) y opaco a la radiación infrarroja terrestre (flechas rojas), por lo que calienta el aire y la superficie.

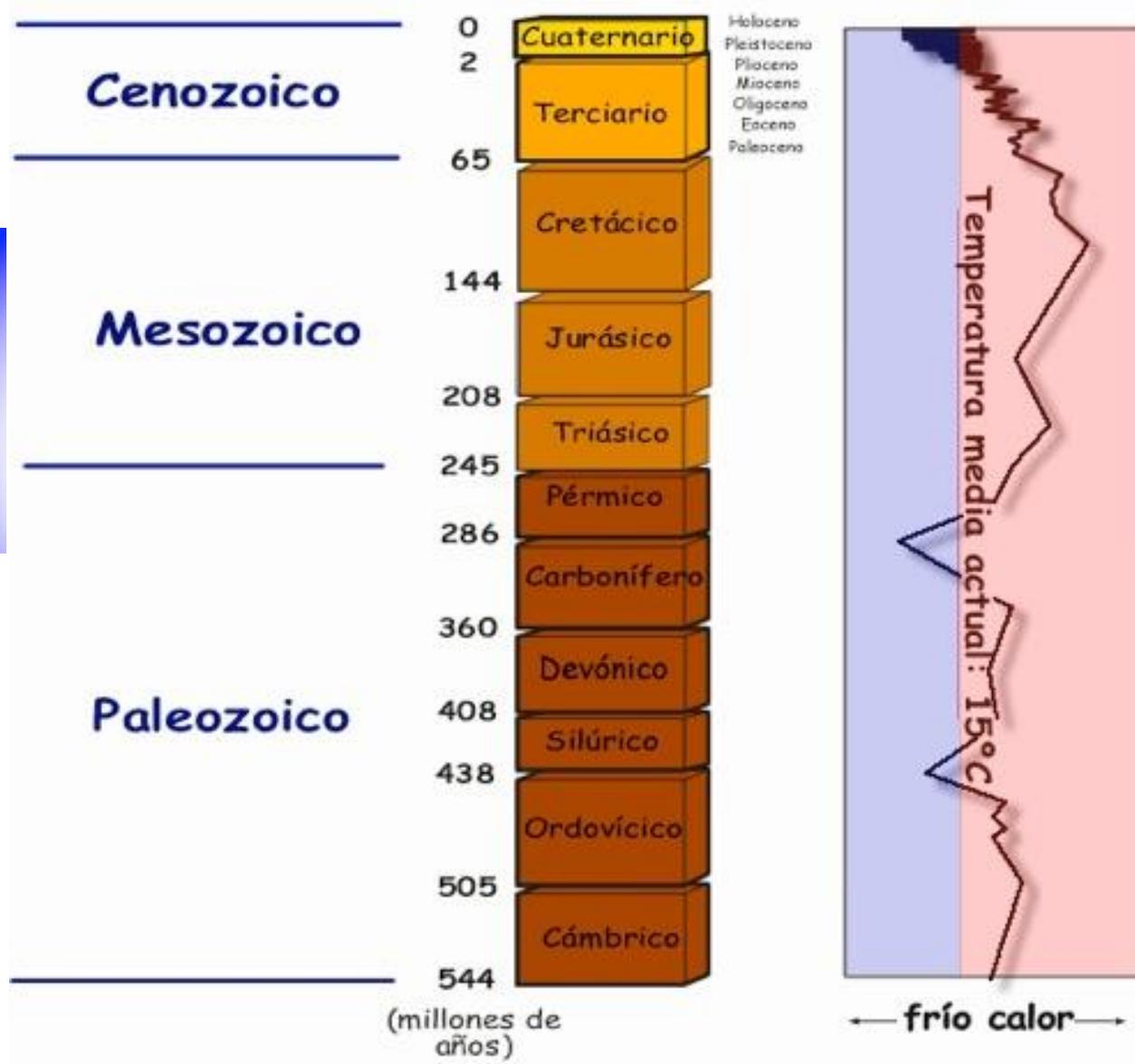


Sección 2.

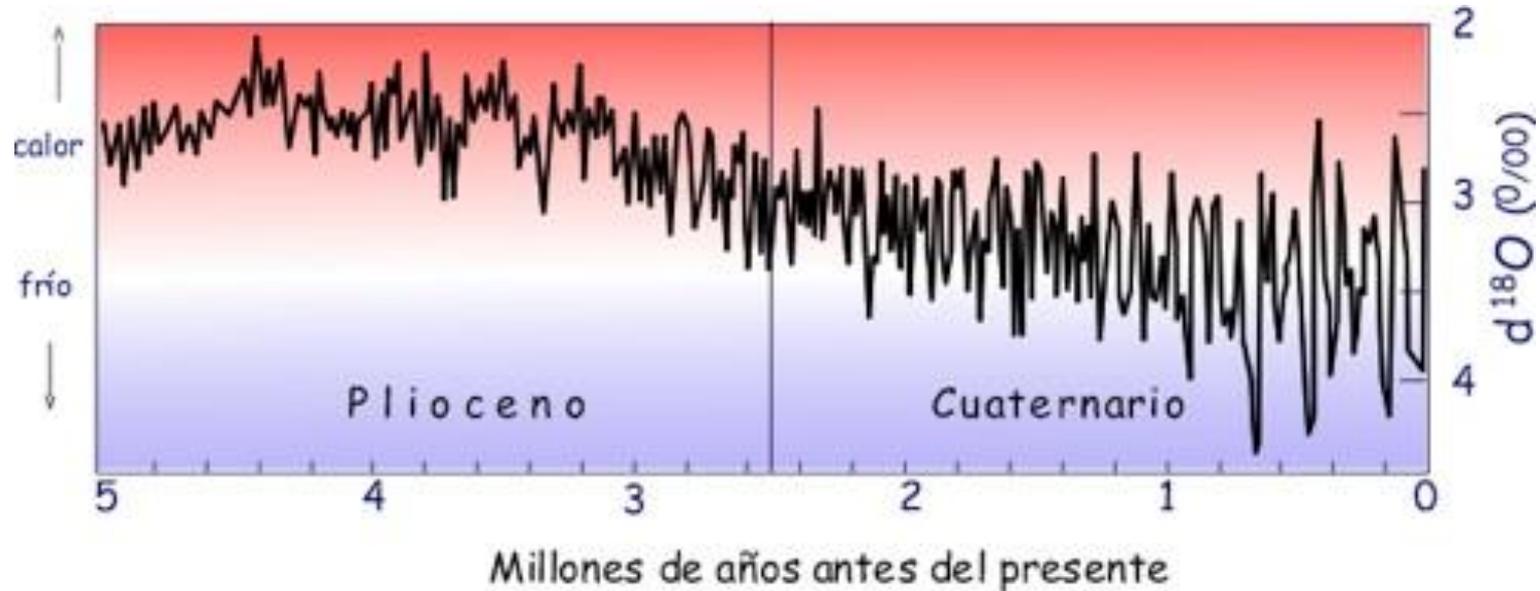
El clima en el pasado.



El Clima en el pasado. Fanerozoico: eras y periodos.



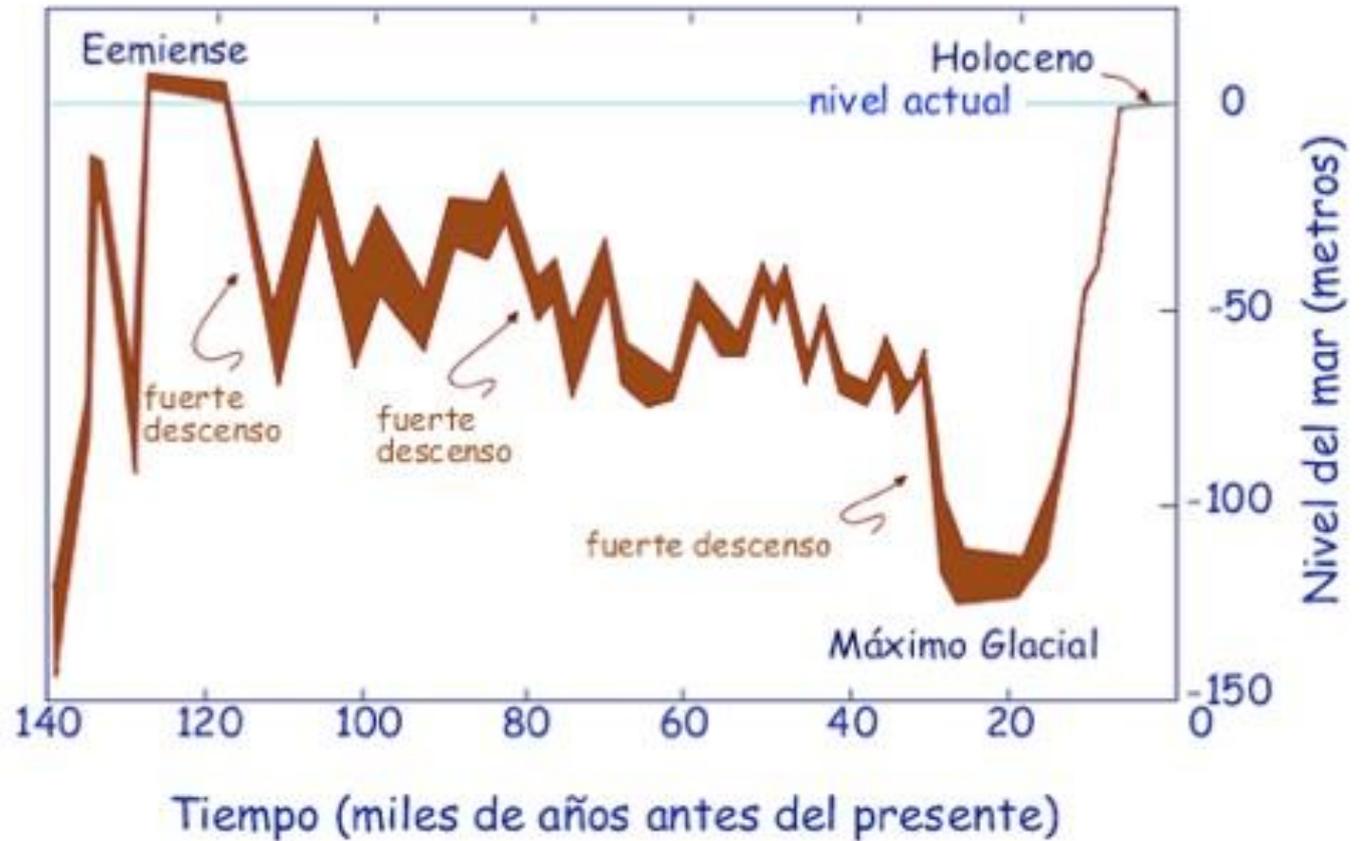
El Clima en el pasado. Fanerozoico: eras y periodos.



- Tendencia a un aumento de $d^{18}O$ (la escala está invertida) implica una tendencia general al frío y a una mayor acumulación de hielo en los continentes.
- Obsérvese el aumento de la oscilación térmica de los ciclos glaciales durante el Cuaternario, especialmente en el último millón de años.
- El **Cuaternario** abarca dos períodos
 - El **Pleistoceno**, desde hace 2,5 millones de años hasta hace 11.500 años.
 - El **Holoceno**, desde hace 11.500 años hasta hoy.
- Sucesión de glaciaciones y periodos interglaciares.

El Clima en el pasado.

Nivel del mar durante la última glaciación.



El Clima en el pasado.

El último máximo glacial (hace 23.000- 19.000 años).

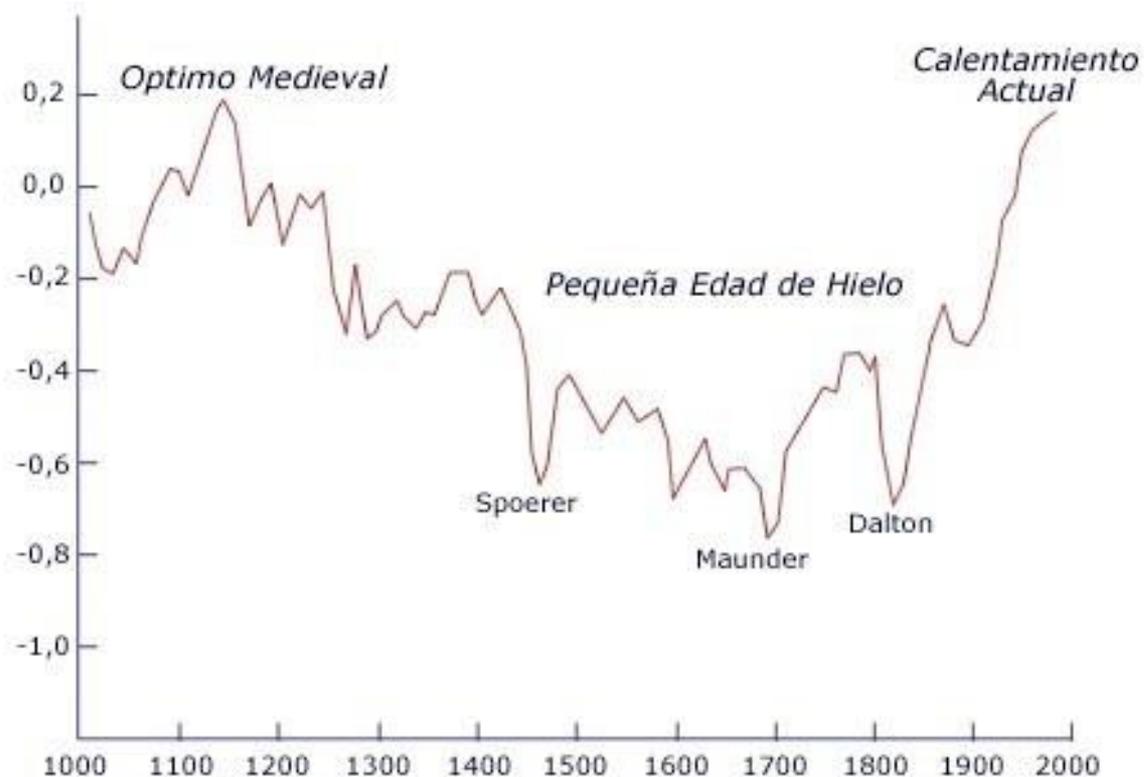


Cuando la acumulación de hielo continental fue máxima, el nivel de los mares quedó entre 120 y 140 m por debajo de la cota actual.



El Clima en el pasado.

Clima del último milenio.



Evolución de la temperatura del hemisferio norte en el último milenio, según una simulación basada en la temperatura del subsuelo (boreholes) (fuente: González-Rouco, 2003).



El Clima en el pasado.

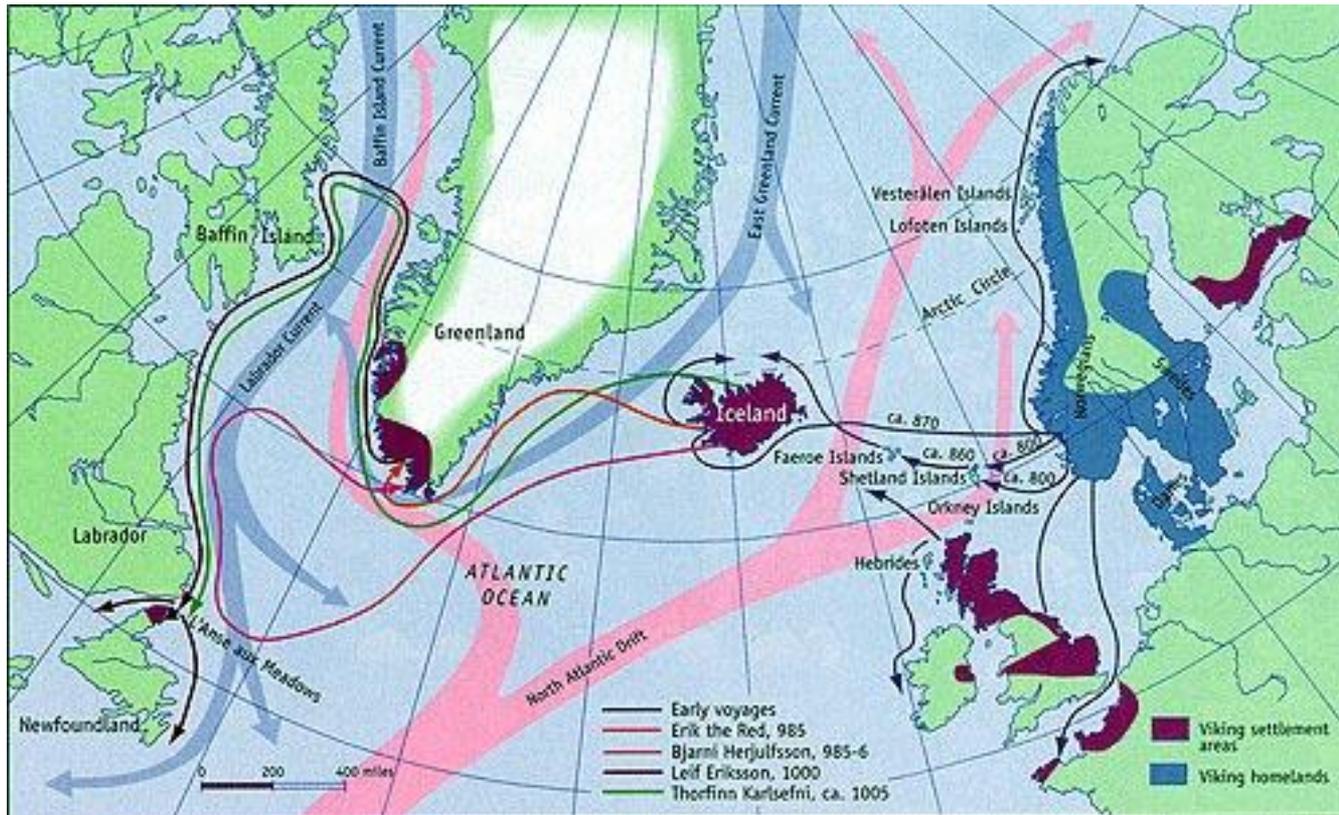
Clima del último milenio. Periodo cálido medieval (1000- 1300).

- El clima en Europa fue, por lo general, más cálido que el actual.
- El cultivo de la vid se extendió por el sur de Inglaterra. Hoy en día persisten topónimos como Vine Street o Vineyard en Londres.
- El Mediterráneo sufría sequías más agudas.
- Los glaciares suizos se retiraron a cotas más altas.
- Los vikingos colonizaron Groenlandia.
- Disminución de los hielos Árticos.
- Crecimiento de especies arbóreas en zonas altas de los Alpes.
- Entre el año 1000 y el 1300 la población de Europa se multiplicó por tres o cuatro. Coincidió con un clima óptimo que favoreció la actividad agrícola.



El Clima en el pasado.

Clima del último milenio. Periodo cálido medieval (1000- 1300).



Viajes y nuevos asentamientos Vikingos.



El Clima en el pasado.

Clima del último milenio. Pequeña Edad de Hielo (1300- 1850).

- Hacia el año 1350 el clima de Europa se deterioró y se entró en la llamada Pequeña Edad de Hielo, de la cual no se salió hasta la segunda mitad del siglo XIX.
- Durante este período de cinco siglos las bajas temperaturas no fueron constantes. Hubo varios pulsos de frío:
 - uno al principio del siglo XIV,
 - al final del período, en la primera mitad del siglo XIX.



El Clima en el pasado.

Clima del último milenio. Pequeña Edad de Hielo (1300- 1850).

Consecuencias:

- Gran hambruna 1315-1317. Murió entre 10-20% de la población.
- Rio Támesis y los canales de Holanda se congelaron durante el invierno.
- Los hielos Árticos se extendieron hasta Escocia.
- Crecimiento generalizado de todos los glaciares.
- Aumento de las lluvias en la zona del Sahel. Tumbuctu resultó inundada al menos 13 veces por el Níger.
- Madera de los árboles más densa debido al frío. Violines de Antonio Stradivari.



El Clima en el pasado.

Clima del último milenio. Pequeña Edad de Hielo (1300- 1850).

Celebración de ferias sobre el Támesis helado (1683)

Patinaje en los canales de Amsterdam (1625)



Sección 3.

El clima actual.



Environmental Physics Laboratory
EPhysLab

Universidade de Vigo

ipcc

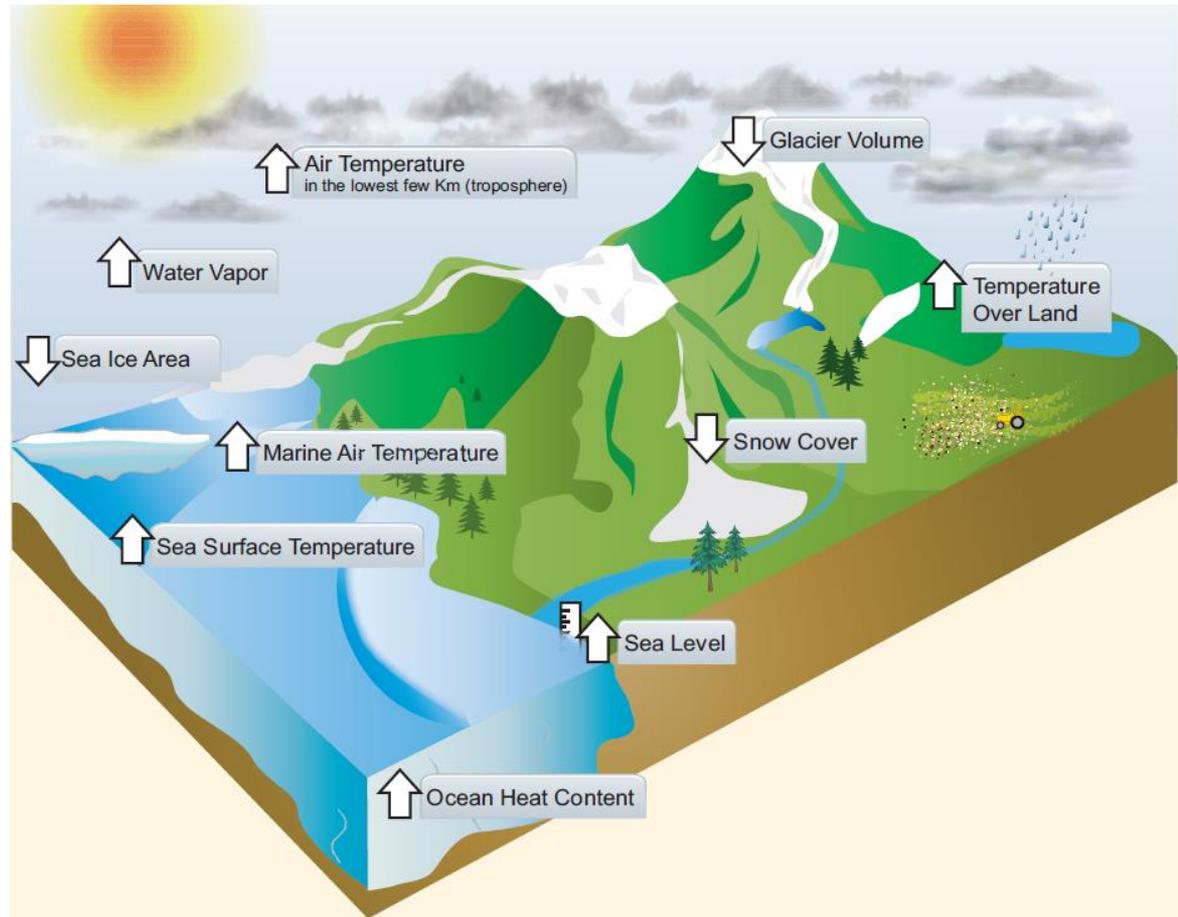
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON
climate change



¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?

•Las evidencias sobre un calentamiento global provienen de múltiples e independientes indicadores desde la parte alta de la atmósfera hasta el océano profundo. Estas evidencias incluyen cambios en:

- las temperaturas de la superficie, atmosféricas y oceánicas,
- los glaciares,
- la cubierta de hielo,
- el hielo oceánico,
- el nivel del mar y
- el vapor de agua atmosférico.



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?



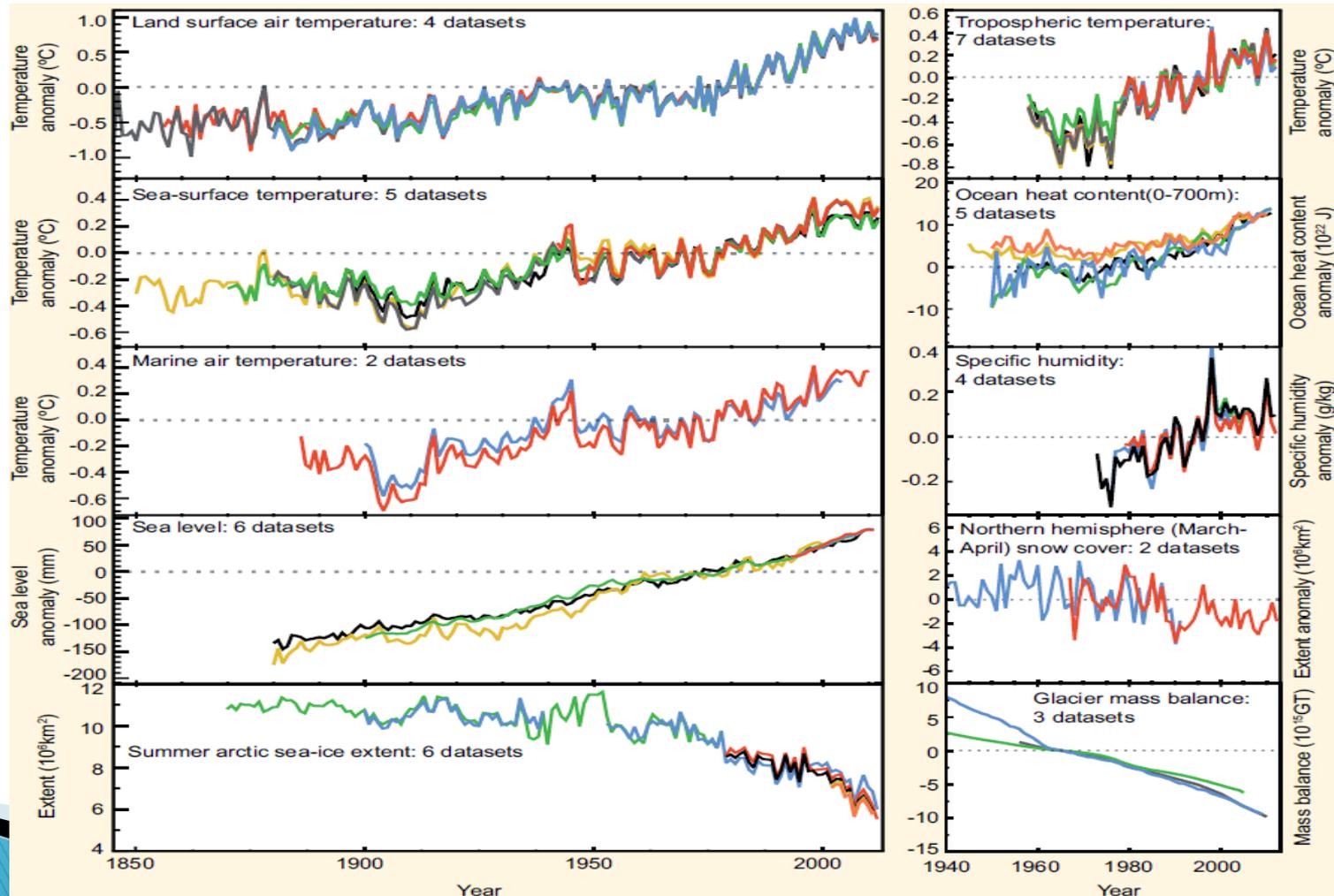
Variabilidad interanual



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentado?

- Desde el fondo de los océanos a la parte superior de la troposfera, **la evidencia de aire y océanos más cálidos, de fusión del hielo y elevación del mar en todos los puntos nos lleva unívocamente a una cosa: el planeta se ha calentado desde el siglo XIX.**



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?

- **Aumento de las temperaturas superficiales** medias globales. Es el indicador más conocido del cambio climático.
- El calentamiento de las temperaturas terrestres se corresponde con la tendencia **al calentamiento** observado en los **océanos**.
- Más del 90% del exceso de energía absorbida por el sistema climático, desde al menos la década 1970, la absorbió el océano produciendo un **aumento del contenido de calor del océano**.
- A medida que los océanos se calientan, el agua se expande. Esta expansión es uno de los principales impulsores del **aumento del nivel del mar** durante el siglo pasado. El derretimiento de los glaciares y capas de hielo también contribuyen.



Clima actual

¿Cómo sabemos que el planeta se está calentando?

- Un mundo más cálido y también más húmedo. El aire más cálido puede contener más vapor de agua. La **humedad específica**, que mide la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, se **ha incrementado** tanto en tierra como en los océanos.
- Las partes congeladas del planeta se ven afectados por los cambios locales de temperatura. La cantidad de **hielo** contenido en los **glaciares ha disminuido**.
- La **capa de nieve** es sensible a los cambios de temperatura, sobre todo durante la primavera, cuando la nieve comienza a derretirse. La cubierta de nieve de primavera **se ha reducido** en todo el HN desde 1950.
- **Pérdidas de hielo marino del Ártico** desde que comenzaron los registros satelitales. **El hielo oceánico Antártico ha aumentado** aunque lentamente.



Clima actual

¿Desde cuándo se está calentando el planeta?

Se considera que la revolución industrial comienza a partir de 1750, que marca el inicio del crecimiento industrial en Gran Bretaña.



La primera revolución industrial se basa en el carbón.

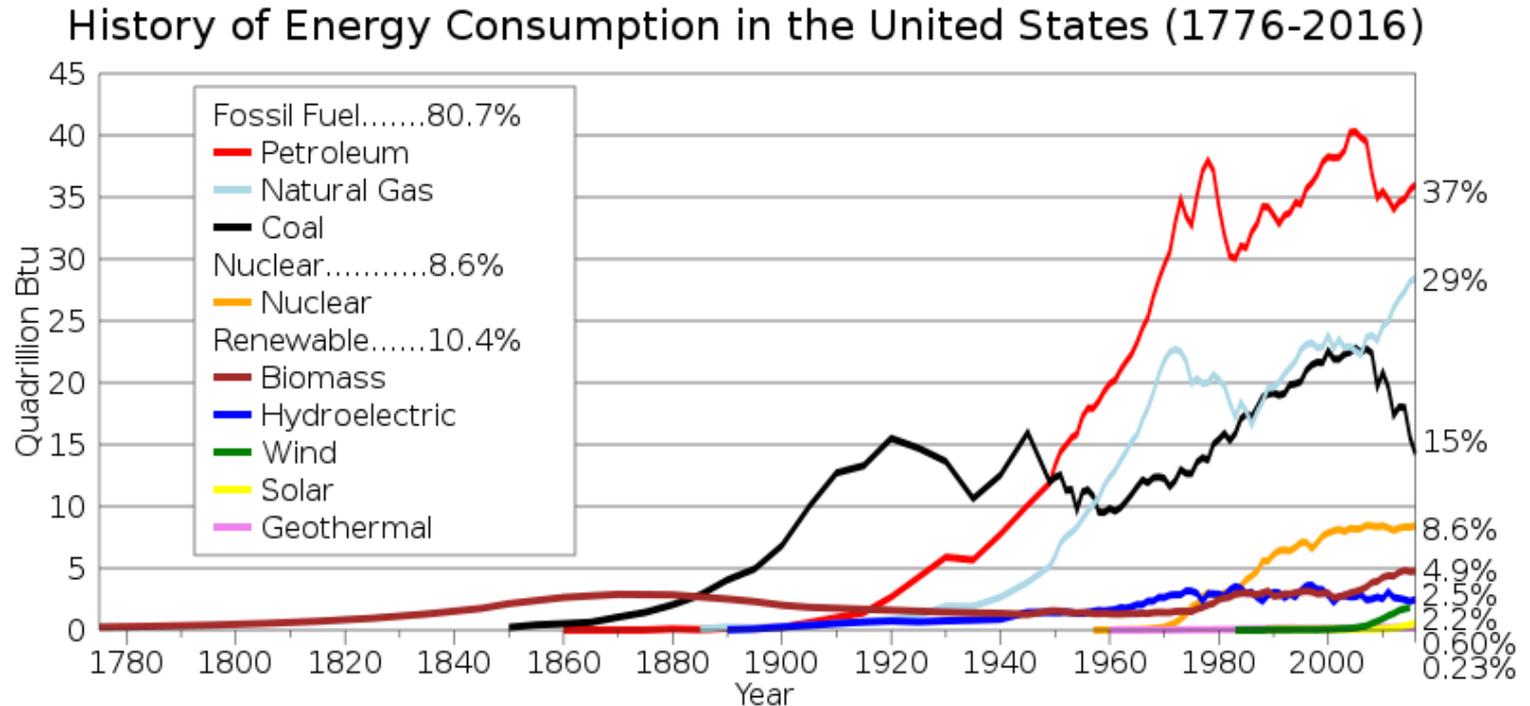
La segunda revolución industrial se basa en el petróleo y el gas.



Clima actual

¿Desde cuándo se está calentando el planeta?

Consumo energético en USA desde su independencia en 1776.



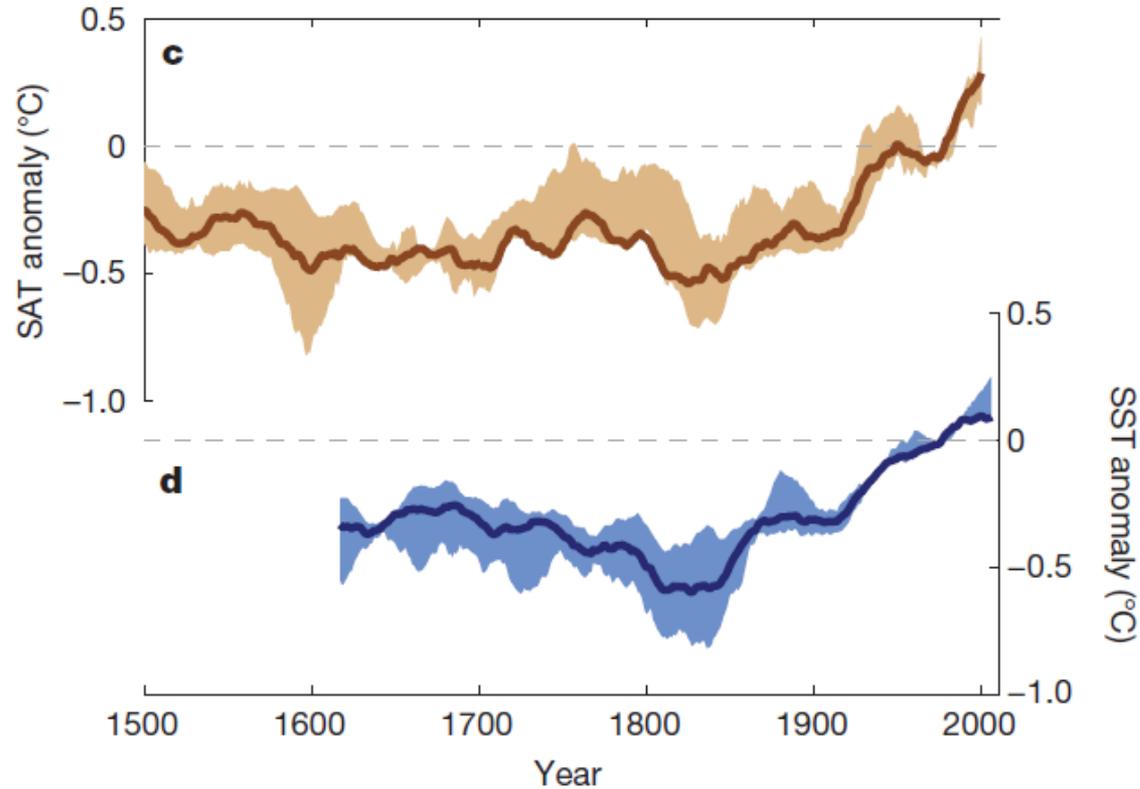
Quadrillion = 10^{15} 1 BTU = 1055 Joules

Ejemplo: 10 Quadrillion BTU = 10^{19} Joules



Clima actual

¿Desde cuándo se está calentando el planeta?



Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents

Nerilie J. Abram^{1,2}, Helen V. McGregor³, Jessica E. Tierney^{4,5}, Michael N. Evans⁶, Nicholas P. McKay⁷, Darrell S. Kaufman⁷ & the PAGES 2k Consortium*

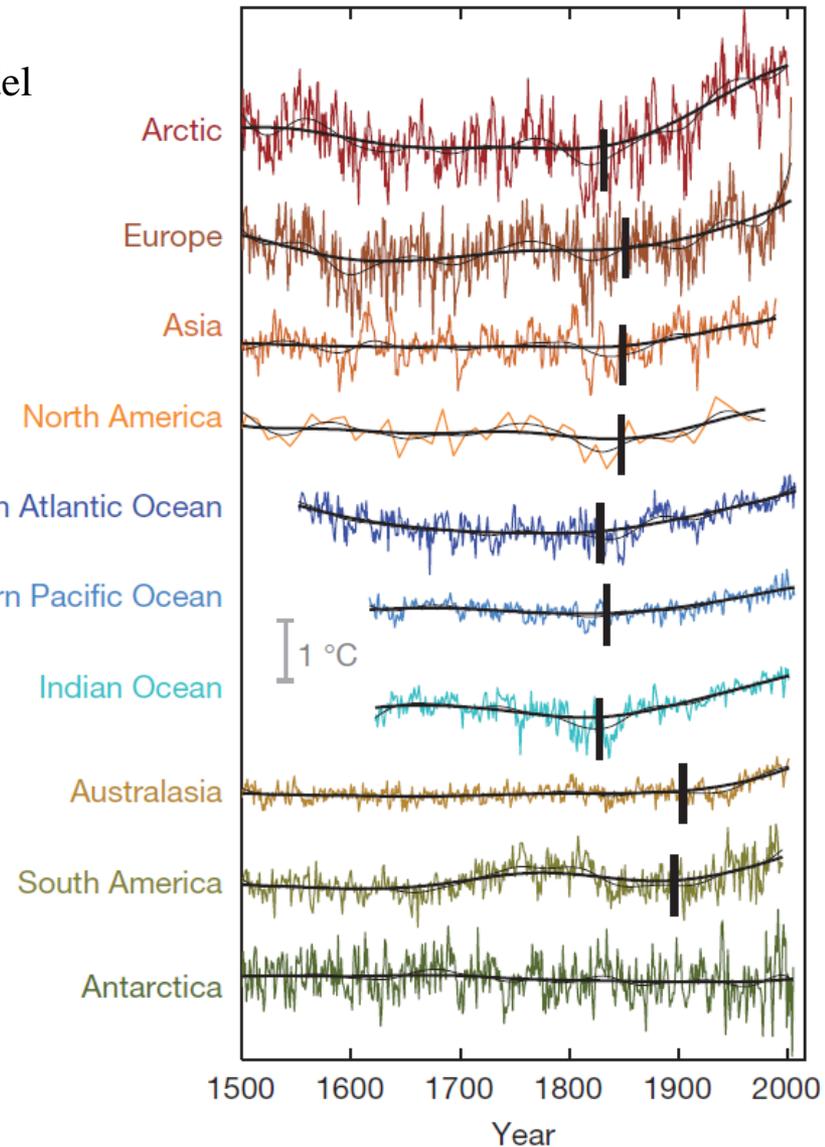
25 AUGUST 2016 | VOL 536 | NATURE | 411

Clima actual

¿Desde cuándo se está calentando el planeta?

La barra vertical marca el inicio del calentamiento de la SAT para diferentes zonas.

Arctic	1831
Europe	1852
Asia	1849
North America	1847
Western Atlantic Ocean	1828
Western Pacific Ocean	1834
Indian Ocean	1827



Clima actual

Cambios en la temperatura del aire

Datos	Tendencia de la temperatura del aire (°C por década)				
	1880- 2012	1901-2012	1901- 1950	1951- 2012	1979- 2012
CRUTEM4.1.1.0	0.086 ± 0.015	0.095 ± 0.020	0.097 ± 0.029	0.175 ± 0.037	0.254 ± 0.050
GHCNv3.2.0	0.094 ± 0.016	0.107 ± 0.020	0.100 ± 0.033	0.197 ± 0.031	0.273 ± 0.047
GISS	0.095 ± 0.015	0.099 ± 0.020	0.098 ± 0.032	0.188 ± 0.032	0.267 ± 0.054
Berkeley	0.094 ± 0.013	0.101 ± 0.017	0.111 ± 0.034	0.175 ± 0.029	0.254 ± 0.049



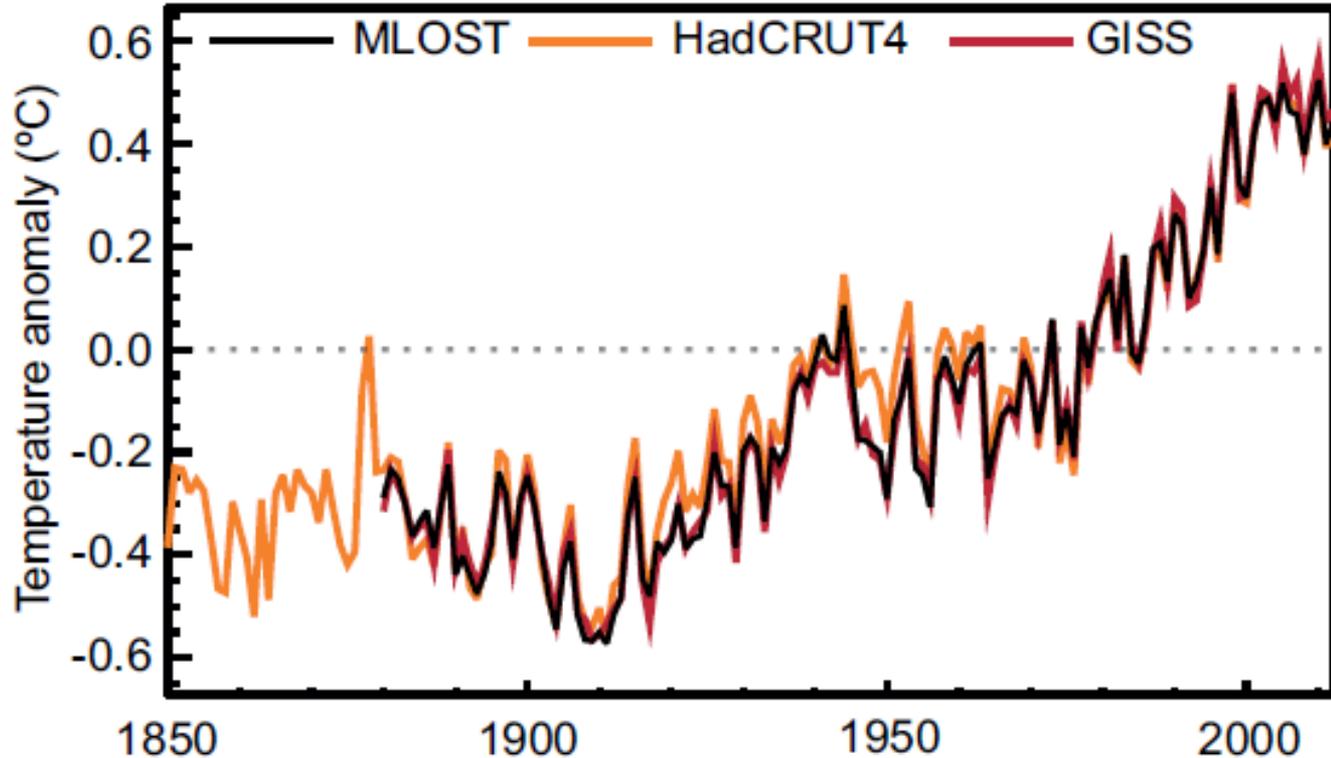
1°C por siglo



2.6°C por siglo

Clima actual

Cambios en la temperatura del aire



Anomalias de la temperatura superficial media global anual (GMST) relativa al periodo 1961–1990.

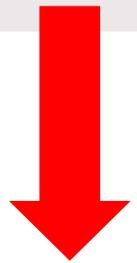
Clima actual

Cambios en la temperatura superficial del mar

Datos	Tendencia de la SST en °C por década				
	1880–2012	1901–2012	1901–1950	1951–2012	1979–2012
HadISST	0.042 ± 0.007	0.052 ± 0.007	0.067 ± 0.024	0.064 ± 0.015	0.072 ± 0.024
COBE-SST	–	0.058 ± 0.007	0.066 ± 0.032	0.071 ± 0.014	0.073 ± 0.020
ERSSTv3b	0.054 ± 0.015	0.071 ± 0.011	0.097 ± 0.050	0.088 ± 0.017	0.105 ± 0.031
HadSST3	0.054 ± 0.012	0.067 ± 0.013	0.117 ± 0.028	0.074 ± 0.027	0.124 ± 0.030



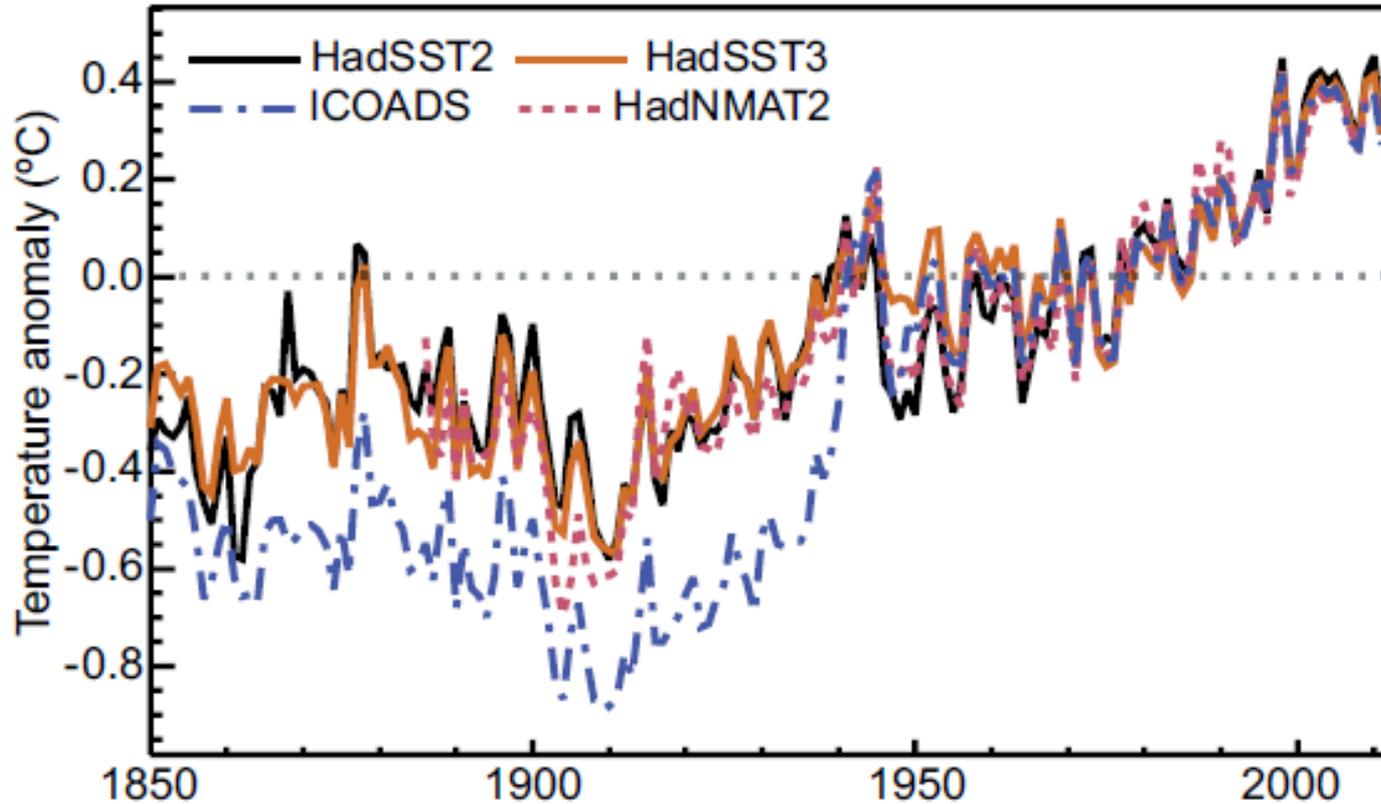
0.65° C por siglo



1° C por siglo

Clima actual

Cambios en la temperatura superficial del mar



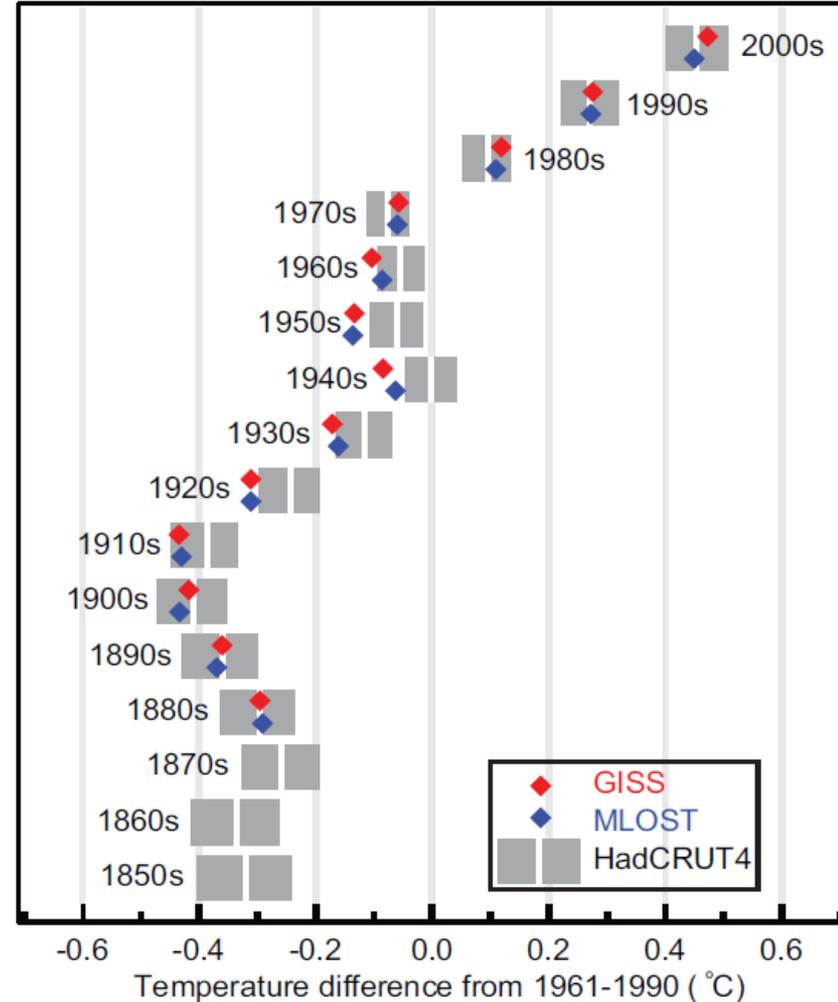
- **Anomalía de temperatura media global medida en la superficie del mar (SST) relativa al periodo 1961–1990.**

Clima actual

Cambios en la temperatura del aire.

Anomalia de la temperatura media global superficial (línea blanca vertical en los bloques grises) y sus incertidumbres (90% confianza intervalos como bloques grises)

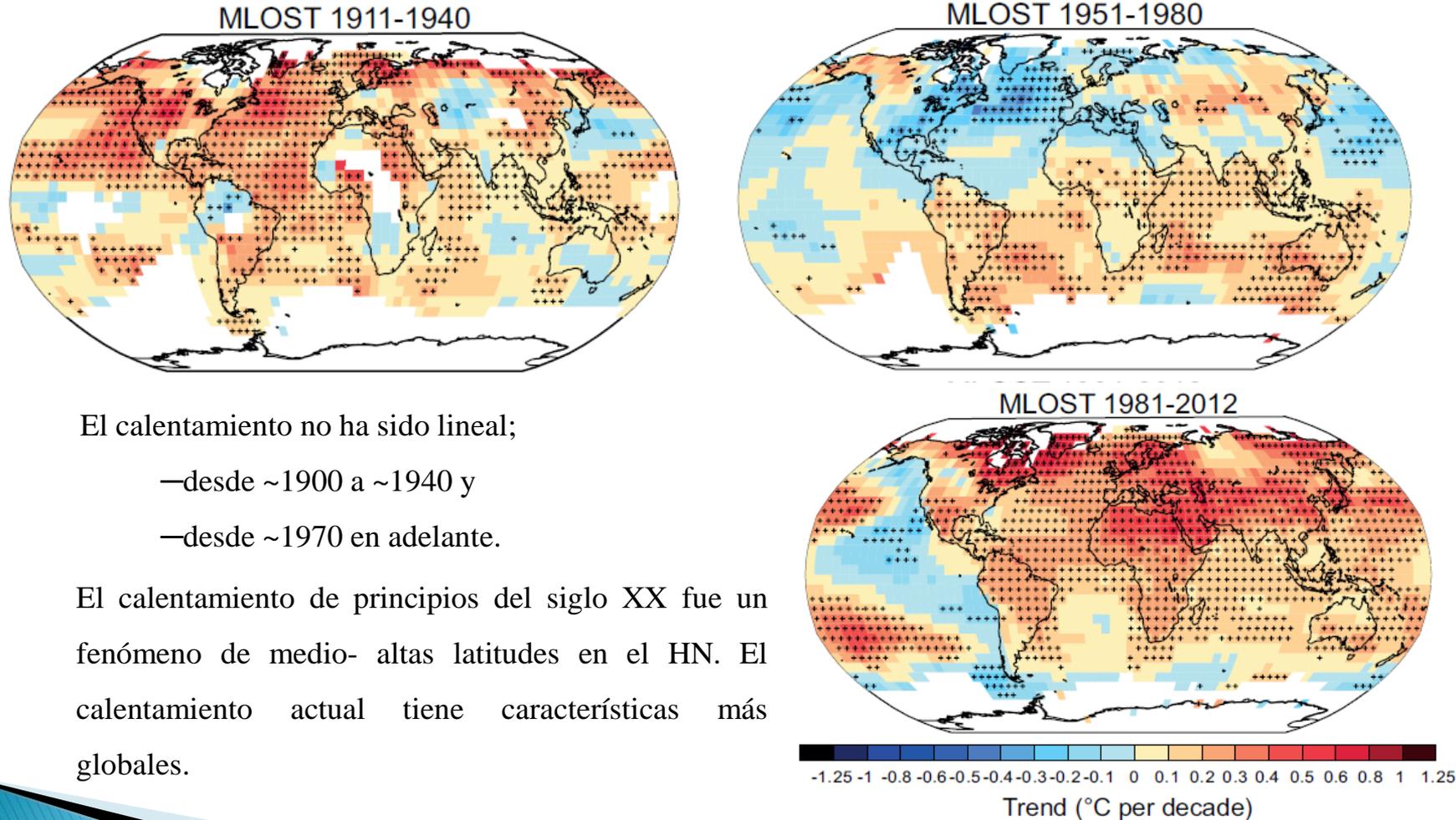
Las anomalías son relativas al periodo 1961–1990. También se muestran las mejores estimaciones de las bases de datos NCDC MLOST y GISS.



Clima actual

Cambios en la temperatura del aire superficial.

Media anual de las anomalías de la temperatura del aire superficial global.



Clima actual

¿ Cómo se está calentando el océano?

El periodo **1971 a 2010** ha sido el de mayor calentamiento.

En los **75 primeros** metros del mar, la tendencia al calentamiento global promedio ha sido de **0.11°C por década**.

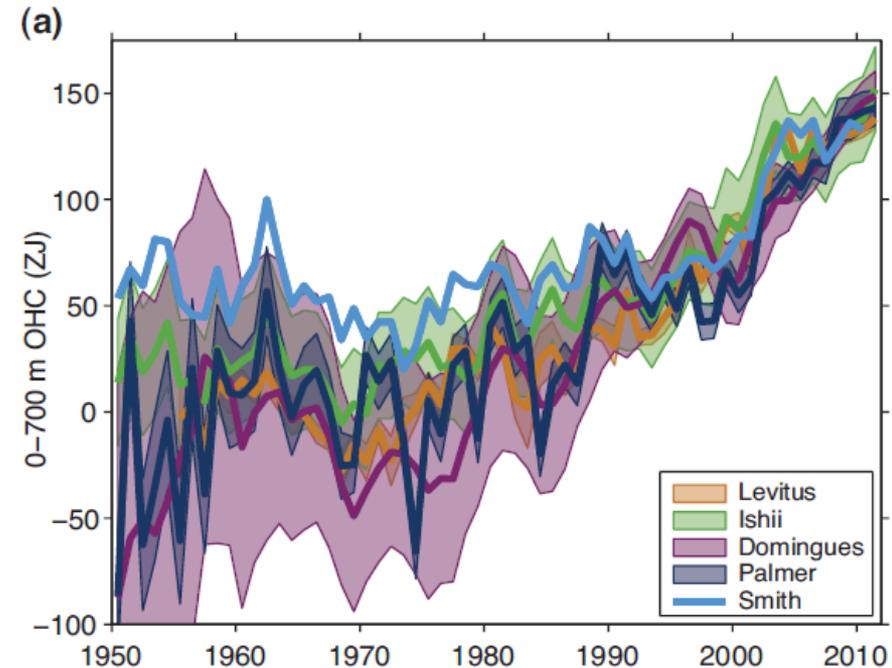
Esa tendencia general disminuye desde la superficie hasta profundidades medias, reduciéndose a alrededor de **0.04 °C por década hasta 200 m**, y a menos de **0.02 °C por década hasta 500 m**.

Las tasas de calentamiento del **océano profundo** son generalmente menos pronunciadas que las de la superficie del océano. Sin embargo estas tasas se producen en un gran volumen, por lo que el calentamiento del océano profundo contribuye significativamente al aumento total de calor del océano.

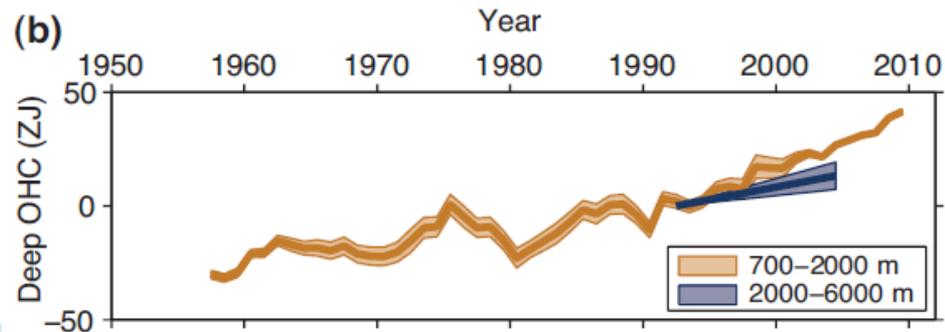


Clima actual. Cambios en contenido de calor del océano.

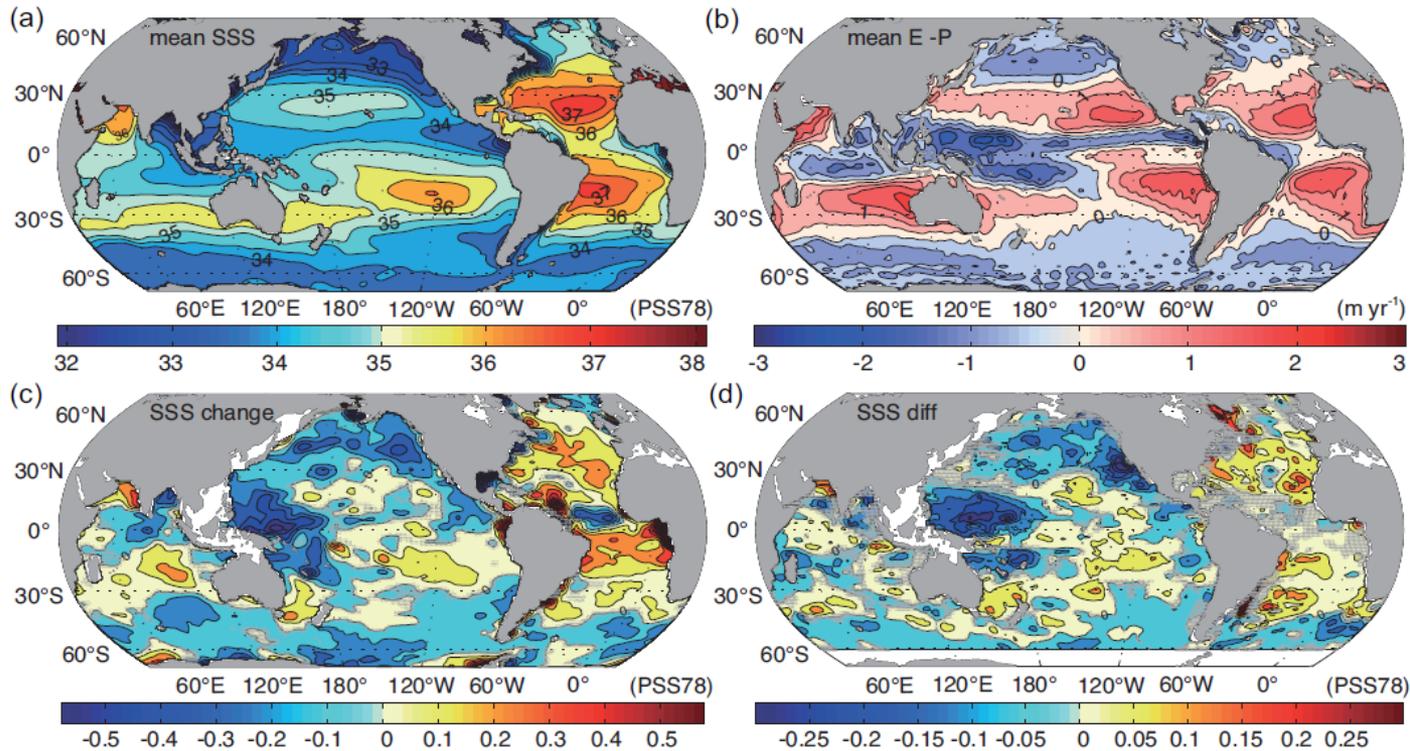
Es **prácticamente seguro** que el **contenido de calor del océano superior** (0-700 m) aumentó durante el período 1971-2010.



1 ZJ = 10^{21} joules



Clima actual. Cambios en la salinidad y el contenido de agua dulce.



- (a) Salinidad superficial del mar promediada al periodo 1955-2005.
- (b) Evaporación-precipitación media anual promediada durante el periodo 1950-2000.
- (c) Cambio en SSS derivado de la tendencia lineal entre 1950 y 2008.
- (d) La diferencia de SSS (calculada restando el periodo 2003-2007, menos la media 1960-1989)

Clima actual. Cambios en la salinidad y el contenido de agua dulce.

- Se ha observado tanto tendencias positivas como negativas en la salinidad del océano y el contenido de agua dulce en gran parte del océano, tanto en la superficie del mar como en el interior del océano.
- Es **muy probable** que las aguas superficiales salinas en las latitudes medias dominadas por la evaporación se hayan vuelto más salinas, mientras que las aguas superficiales relativamente menos salinas en las regiones tropicales y polares dominadas por la lluvia se hayan vuelto menos salinas desde la década de 1950.
- Del mismo modo, es **muy probable** que el contraste entre la cuenca Atlántica salina y las aguas superficiales menos salinas del Pacífico haya aumentado, y es **muy probable** que el contenido de agua dulce en el Océano Antártico haya aumentado.



Clima actual. Cambios en el nivel del mar.

El nivel medio del mar global (GMSL) **ha aumentado** en **0.19 m** desde 1901 hasta 2010, calculado utilizando los registros de mareógrafos y desde 1993, datos de satélite.

Es **muy probable** que la tasa media fuese de **1.7 mm año⁻¹** entre 1901 y 2010 y que aumentase a **3.2 mm año⁻¹** entre 1993 y 2010.

Se debe principalmente a:

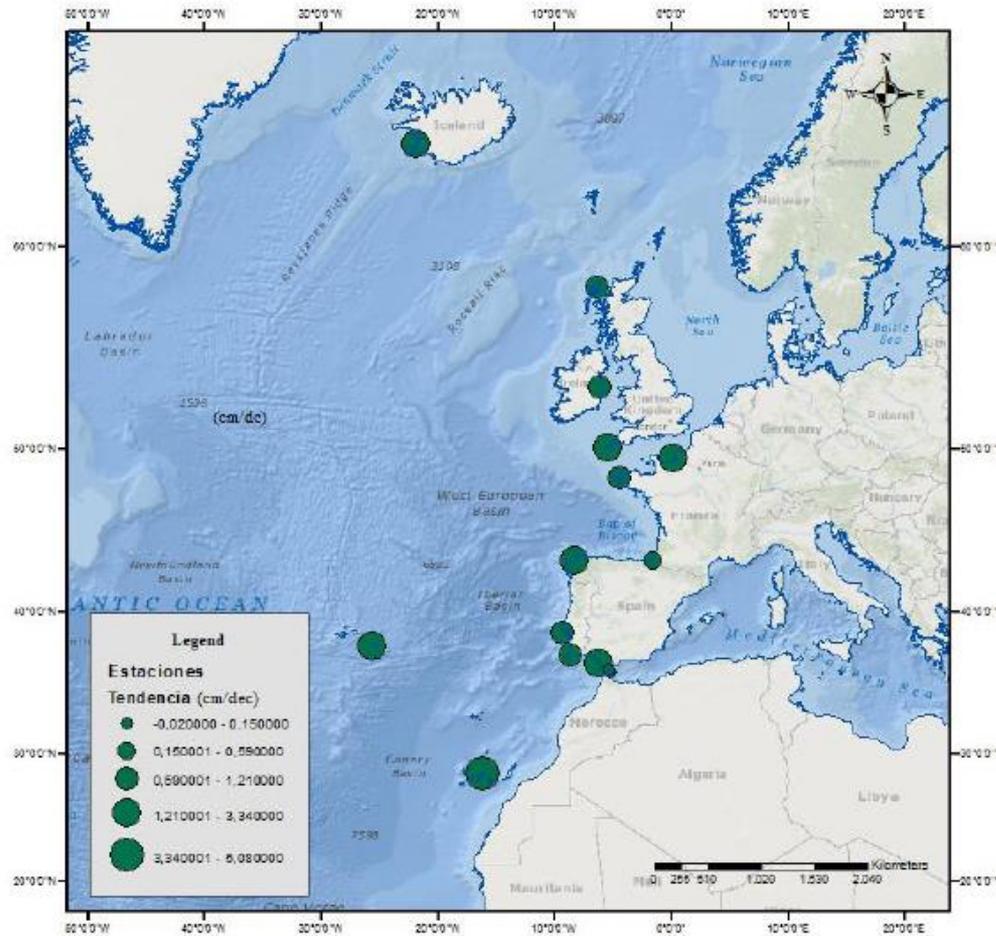
- Efecto termoestérico (el agua dilata con la temperatura)
- Fusión del hielo y nieve que se encuentra sobre os continentes.

NO se debe a:

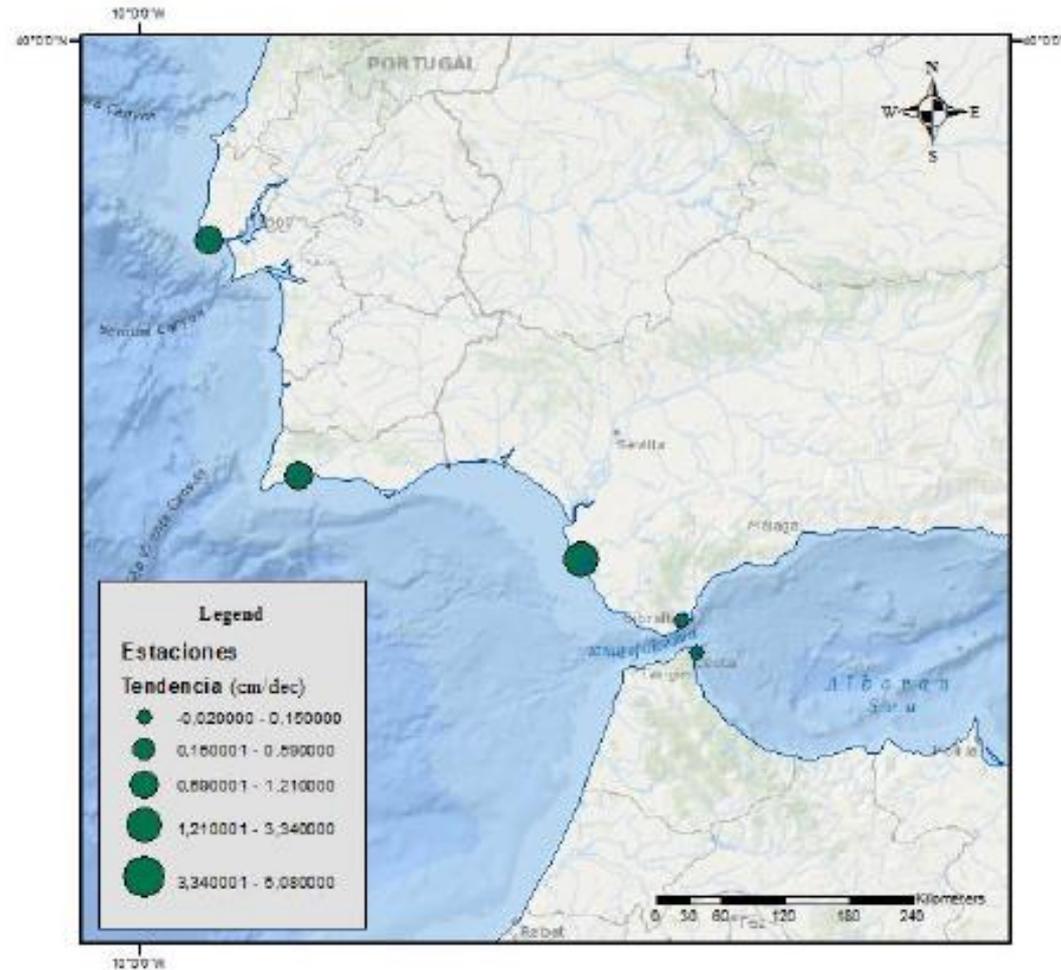
- Fusión del hielo flotante del polo Norte.



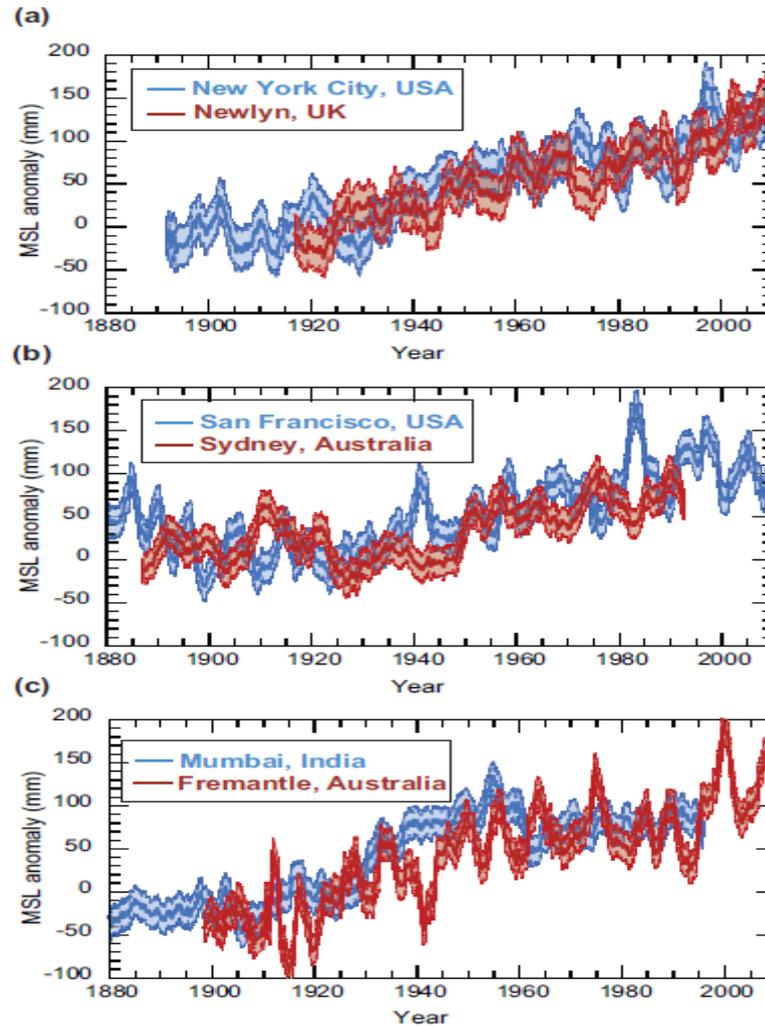
Clima actual. Cambios en el nivel del mar.



Clima actual. Cambios en el nivel del mar.



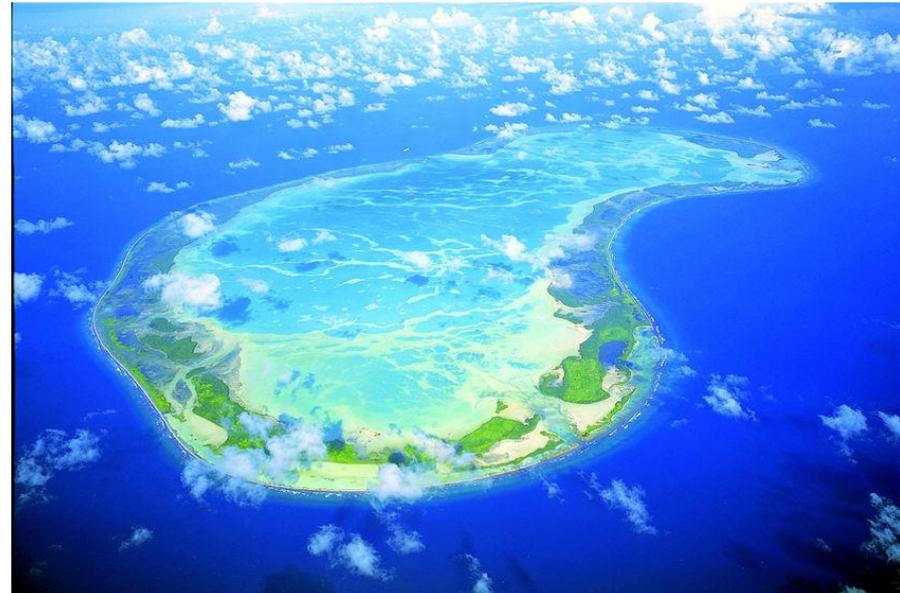
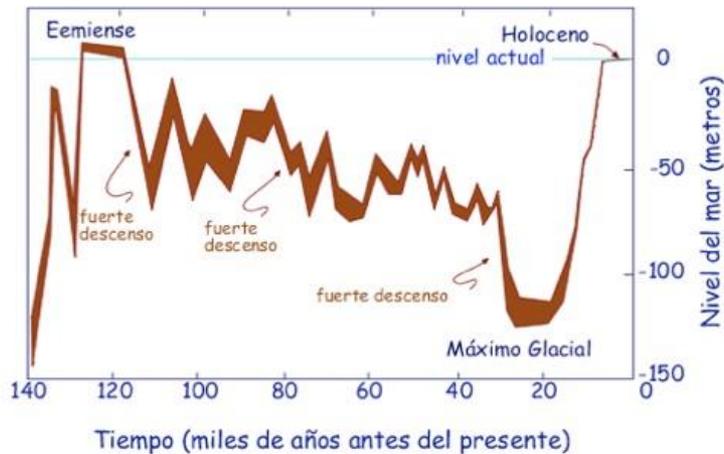
Clima actual. Cambios en el nivel del mar.



Clima actual. Cambios en el nivel del mar.

En resumen **3.2 mm año⁻¹** entre 1993 y 2010.

A un ritmo similar podría crecer sobre **0.3 m** durante el siglo XXI.



Clima actual. Cambios en la altura de ola.

Las olas superficiales se generan por el forzamiento del viento y tienen dos componentes:

- olas generadas por el viento local y están bajo su acción (se propagan más lentas que el viento superficial) oleaje “swell” (resulta de la acción del viento sobre el mar durante un cierto tiempo y se propaga más rápidamente que el viento superficial).

La altura significativa (H_s) de ola representa el campo de olas de viento constituido por ambas componentes y es aproximadamente la media aritmética del tercio de olas más alto durante un periodo de tiempo.

Confianza media en que *la altura de ola significativa ha aumentado* desde la década de 1950 en gran parte del Atlántico Norte al norte de 45°N , con las tendencias de la temporada de invierno típicas de hasta 20 cm dec^{-1} .



Clima actual. Cambios en la Circulación.

Es **muy probable** que los giros subtropicales en el Pacífico Norte y Pacífico Sur se hayan ampliado y fortalecido desde 1993.

No hay evidencia de una tendencia a largo plazo en las mediciones de la circulación termohalina del Atlántico y sus componentes individuales en diversas latitudes y diferentes períodos de tiempo.

Tampoco hay evidencia de tendencias en los transportes en el flujo de agua Indonésio, la corriente circumpolar antártica (ACC), o entre el Océano Atlántico y mares nórdicos.

Hay **confianza media** en que la corriente circumpolar antártica (ACC) se haya desplazado al sur, entre 1950 y 2010, a una velocidad equivalente a alrededor de 1° de latitud en 40 años.

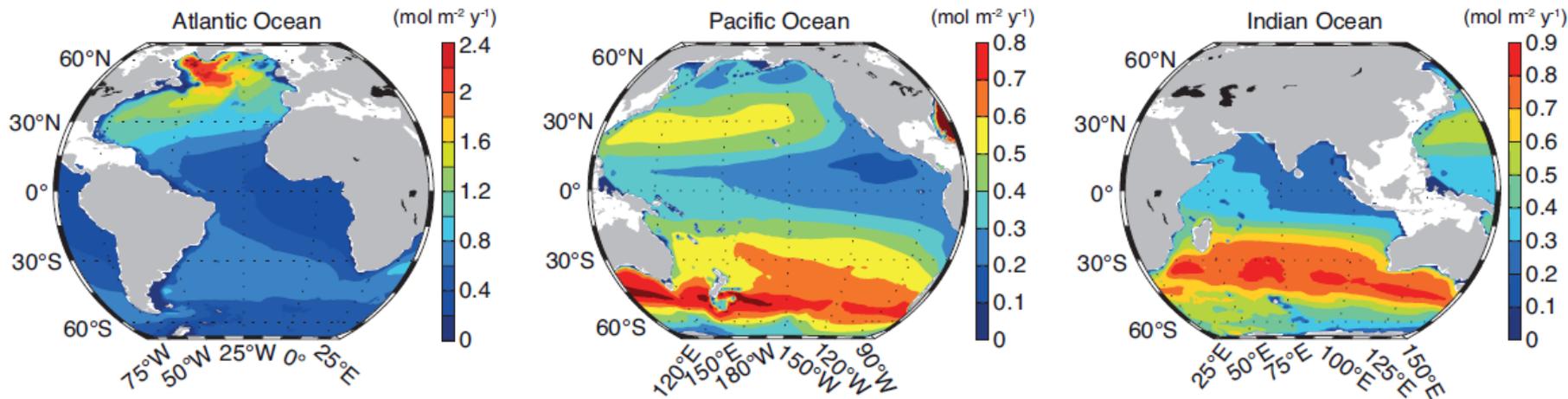
Clima Actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

CO₂

Los océanos pueden almacenar grandes cantidades de CO₂. La capacidad de almacenamiento de carbono en el océano es aproximadamente 50 veces mayor que el de la atmósfera.

El océano también proporciona un importante sumidero de dióxido de carbono liberado por las actividades humanas, el CO₂ antropogénico. En la actualidad, aproximadamente un 30% del CO₂ antropogénico emitido a la atmósfera se está acumulando en el océano.

Es muy probable que el almacenamiento mundial de **carbono antropogénico** en los océanos **haya aumentado** de 1994 a 2010.



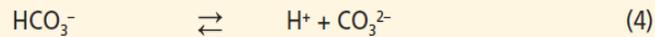
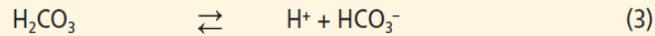
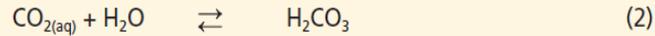
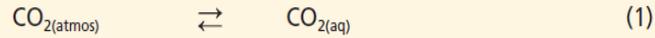
Tasa de almacenamiento promedio de carbono antropogénico (mol m⁻² año⁻¹) para Atlántico, Pacífico e Índico de 1980 a 2005.



Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

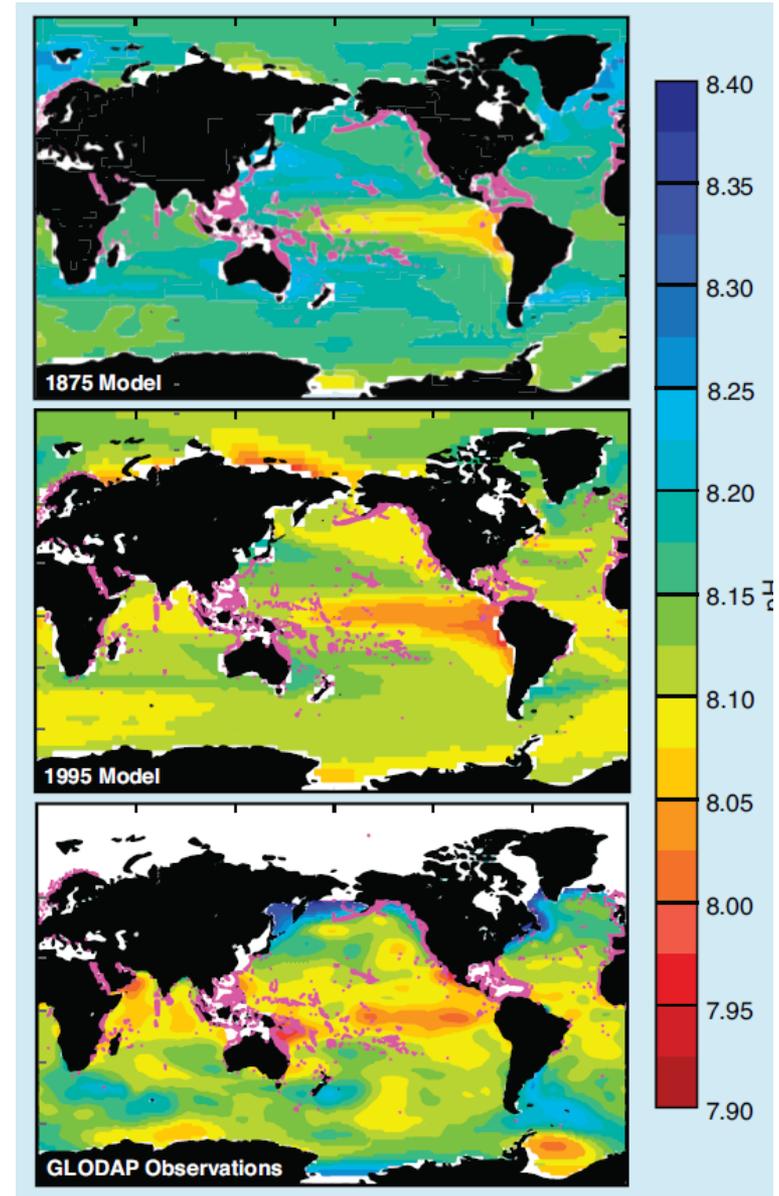
Acidificación Oceánica (PH).

Proceso químico.



Cuando la concentración de iones H^+ crece, el pH decrece, haciéndose el medio más ácido.

Acidificación Oceánica (PH).
Comparación entre 1750 y 1950.



Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

Acidificación Oceánica (PH)

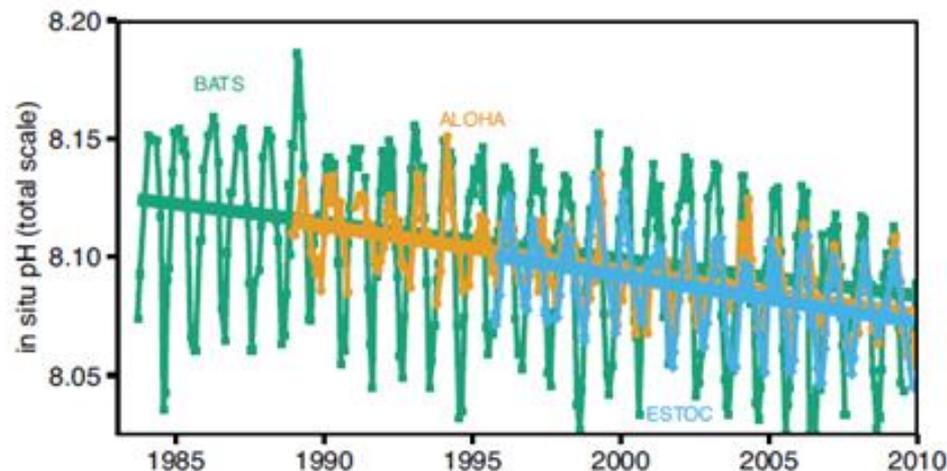
La captación de CO₂ antropogénico resulta en la acidificación progresiva de los océanos.

El pH del agua de mar superficial **ha disminuido en 0.1** desde el comienzo de la era industrial, debido a un aumento del 26% en la concentración de iones de hidrógeno (**confianza alta**).

Las tendencias observadas de pH oscilan entre **-0.0014** y **-0.0024** año⁻¹ en las aguas superficiales.

Nota: El agua del mar es básica con pH entre 7.5 y 8.4

El pH del agua de lluvia (limpia) es 5.5.



Tendencias a largo plazo del pH de tres series temporales oceánicas subtropicales en el Atlántico Norte y el Pacífico Norte.

Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

O₂

En promedio la concentración de O₂ en el océano es 162 μmol kg⁻¹ pero puede variar entre los 500 μmol kg⁻¹ de las aguas antárticas hasta virtualmente cero en aguas profundas de mares interiores como el Mar Negro.

Llamamos:

- Hipoxia a concentraciones de O₂ menores de 60 μmol kg⁻¹
- Anoxia a la ausencia de oxígeno. Las condiciones anóxicas ocurren cuando la tasa de oxidación de la materia orgánica por bacterias es mayor que el suministro de oxígeno disuelto.

Hay 2 procesos que llevan a una menor disolución de O₂ en agua.

- Al aumentar la temperatura disminuye la solubilidad.
- Debido al calentamiento aumenta la estratificación, lo que hace que disminuya la capacidad de transporte de O₂ desde la superficie hasta aguas subsuperficiales.



Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

O₂

Existe una **confianza media** en que la concentración de **oxígeno ha disminuido** en la termoclina de océano abierto en muchas regiones oceánicas desde los años 1960 pero con fuertes variaciones regionales.

A diferentes profundidades

- ❑ Entre 1970-1990, la pérdida mundial anual media de oxígeno entre 100 m y 1000 m se calculó en $0.55 \pm 0.13 \times 10^{14} \text{ mol año}^{-1}$.
- ❑ Entre 1960 y 2010 la concentración de O₂ a 300 dbar **disminuyó entre 50°S y 50°N** a una velocidad media de $0.63 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ dec}^{-1}$.

El descenso general es consistente con los factores mencionados anteriormente (solubilidad y estratificación).



Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

Nutrientes

Las concentraciones de **nutrientes** en la superficie del océano están influenciadas por los impactos humanos sobre la escorrentía costera y en la deposición atmosférica, y por el cambio en el suministro de nutrientes desde el interior del océano a la capa de mezcla (por ejemplo, debido a un aumento de la estratificación). El cambio de las distribuciones de nutrientes podría influir en la magnitud y la variabilidad del bombeo de carbono biológico del océano.

A nivel mundial, **la producción de fertilizantes nitrogenados ha seguido aumentando** acompañado por el **aumento de la eutrofización** (abundancia de nutrientes) de las aguas costeras. Además, la deposición atmosférica de nitrógeno fijado antropogénico puede dar cuenta ahora de hasta un 3% de la nueva producción oceánica, y esta fuente de nutrientes se prevé que aumente.



Clima actual. Cambios en la biogeoquímica del océano.

Nutrientes

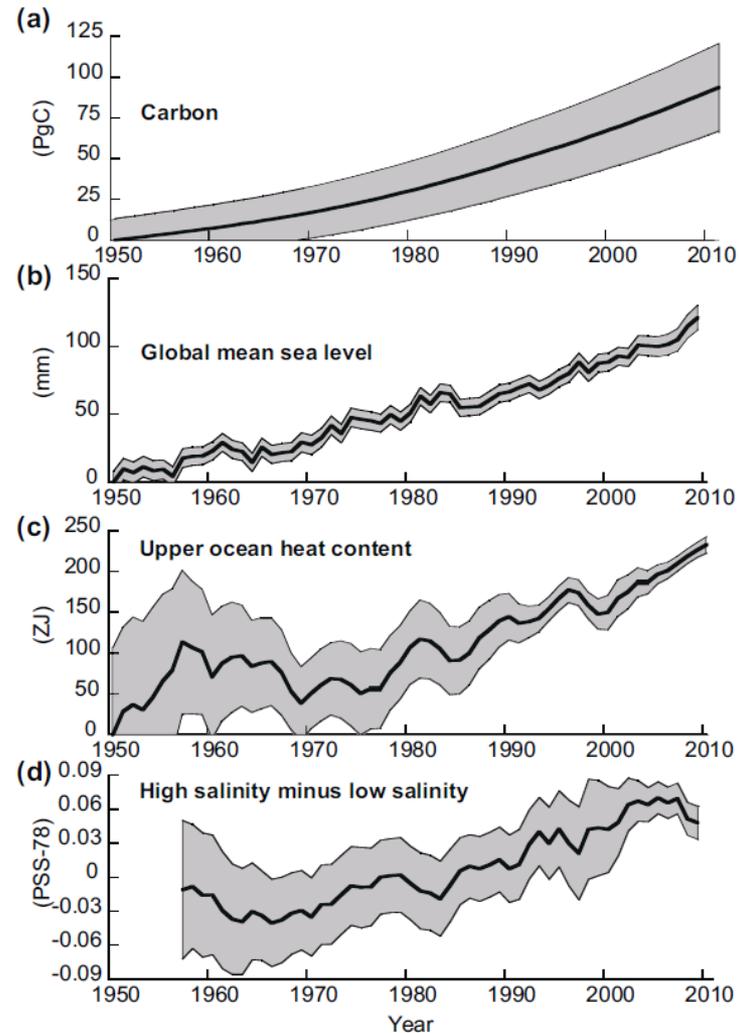
Las observaciones satelitales de clorofila revelan que las **provincias oligotróficas** (bajo contenido en nutrientes, baja productividad primaria) en cuatro de los principales océanos del mundo **han crecido** a tasas promedio de 0.8 a 4.3% año⁻¹ de 1998 a 2006, en consonancia con una reducción en la disponibilidad de nutrientes, debido a los aumentos en la estratificación.

Sin embargo, no hay estudios publicados que cuantifiquen las tendencias a largo plazo en las concentraciones de nutrientes del mar.



Clima actual. El océano.

Resumen de los cambios observados en el océano



Clima actual. El océano.

¿Por qué el océano es tan importante y peligroso?

La gran masa de los océanos y su alta capacidad de calor permiten almacenar grandes cantidades de energía-más de hasta 1000 veces mayor que en la atmósfera para un aumento equivalente de la temperatura.

El océano tiene una gran inercia térmica. Si las concentraciones de gases de efecto invernadero se mantuviesen constantes a partir de ahora:

- la temperatura superficial del mar seguiría aumentando durante aproximadamente una década.
- la temperatura del océano profundo se continuaría calentando y el nivel del mar seguiría aumentando durante siglos.



Clima actual. El océano.

« Si todo el calor que se ha ido acumulando en los 2.000 metros superiores del océano desde los años 50 se liberase inmediatamente a los 10 primeros kilómetros de la atmósfera, generaría un calentamiento atmosférico de más de 36 grados ».

Levitus



Clima actual. El océano.

¿Por qué el océano es tan importante?

El 50% del O_2 que usamos en la respiración o para realizar quemar combustibles fósiles proviene del océano.

Los océanos proporcionan un 17% de las proteínas animales que consumimos.

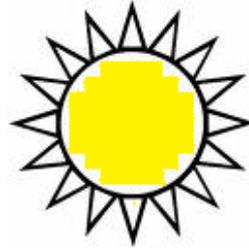
Los océanos proporcionan un 20% de las proteínas totales que consumimos.

Los océanos absorben un 25% de todo el CO_2 que generamos al quemar combustibles fósiles.

Los océanos absorben un 93% del calor en exceso.

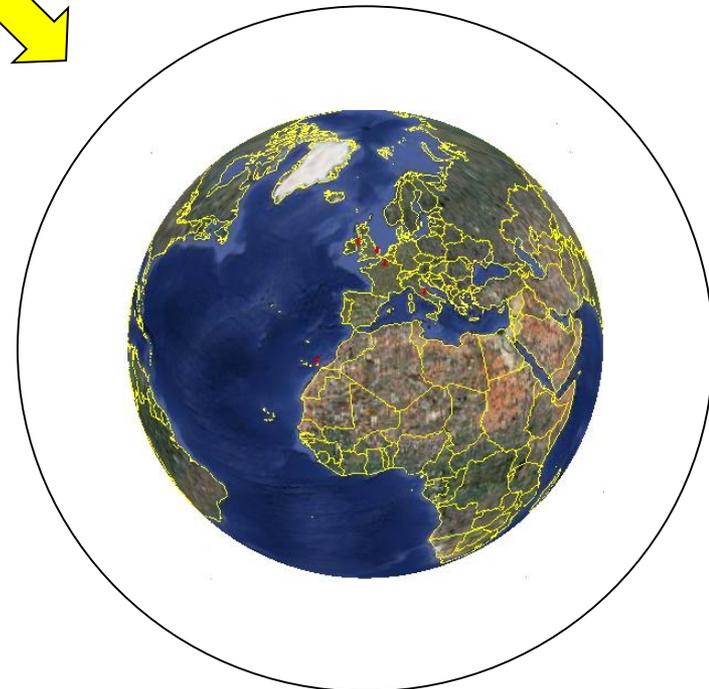
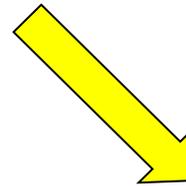


Clima actual. Efecto invernadero.



Sólo una parte de la Tierra intercepta la energía del Sol $1368/4 = 342 \text{ Wm}^{-2}$ pero un 30% es reflejada por el albedo por lo que la energía neta absorbida es **240 Wm^{-2}** lo que implicaría una temperatura terrestre media de **$-18 \text{ }^\circ\text{C}$** .

1368 W/m^2



Clima actual. Efecto invernadero.

La Tierra emite radiación: $T_{\text{Tierra}} \ll T_{\text{sol}} \rightarrow \lambda_{\text{emitida}}(\text{IR}) \gg \lambda_{\text{recibida}}$

- Los gases de invernadero absorben los fotones (IR) emitidos por el suelo.
- La energía de esos fotones no basta para romper enlaces, pero aumenta la energía de rotación y de vibración de las moléculas.
- Sólo las moléculas con momento dipolar participan en este fenómeno.

El vapor de agua, CO_2 , CH_4 . **SI**

El O_2 , N_2 ... **NO**

En el balance hay 390Wm^{-2} extra \rightarrow T superficial de la Tierra es de $\sim 15^\circ\text{C}$

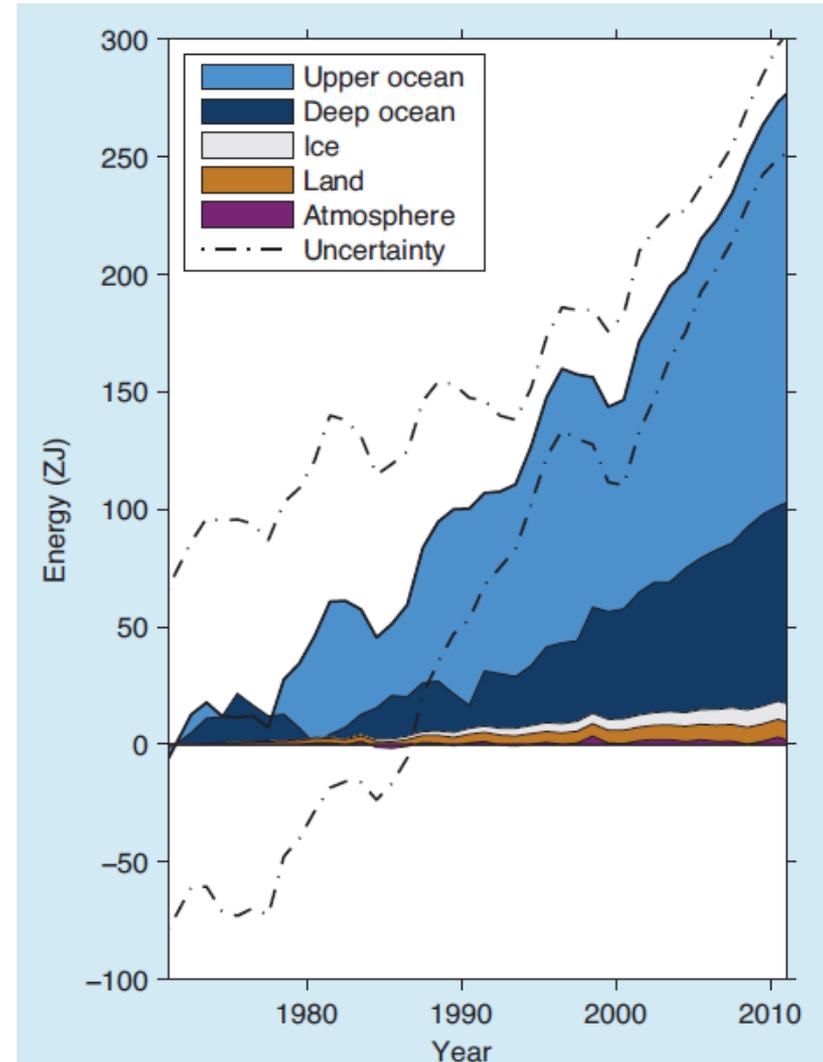
Clima actual. Balance energético.

La Tierra **no** está en equilibrio radiativo desde al menos 1970.

La Tierra está absorbiendo más energía del que emite hacia el espacio.

Casi todo ese exceso de energía se está almacenando en el océano ya que tiene:

- una gran cantidad de masa
- una gran capacidad calorífica
- Una gran inercia térmica
- un albedo bajo.



Clima actual. Balance energético.

¿Por qué la Tierra no está en equilibrio radiativo?

- AR5 concluyó que el aumento de los Gases de Efecto Invernadero dio lugar a un **aumento del 9% en el RF (Radiative Forcing) desde 1998 hasta 2005.**

- Basado en observaciones *in situ* actualizadas, se concluye que los gases de efecto invernadero **han aumentado en un 7.5% el RF de 2005 a 2011**, con una contribución del dióxido de carbono (CO₂) del 80%.

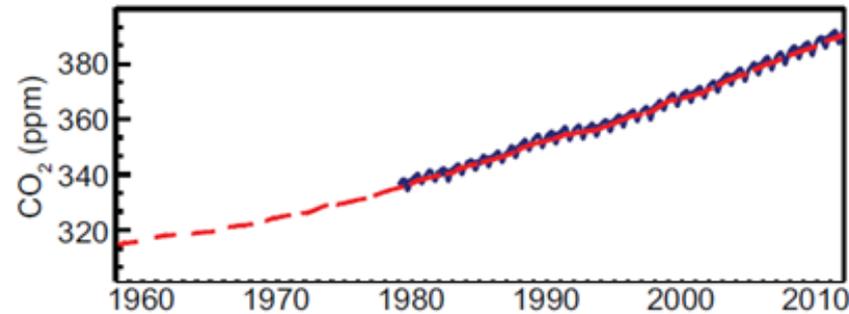


Clima actual. Cambios en la composición de la atmósfera.

Evolución de los gases de efecto invernadero

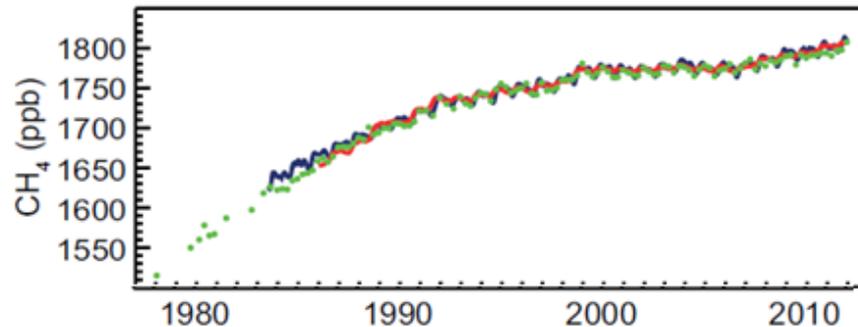
Dióxido de Carbono (CO_2)

La abundancia era de 390.5 ppm en el año 2011; un 40% mayor que en 1750.



Metano (CH_4)

La abundancia era de 1803.2 ppb en 2011; un 150% mayor que en 1750



Clima actual. Cambios en la composición de la atmósfera.

Evolución de los gases de efecto invernadero.

Dióxido de Nitrógeno (N_2O)

La abundancia era de 324,2 ppb en 2011; un 20% mayor que en 1750

