

Cambios Climáticos Observados en la atmósfera, la superficie y en el océano y sus proyecciones futuras

- **Definición de clima y variabilidad climática natural**
- **El clima pasado**
- **El clima actual**
- **Proyecciones futuras del clima**

El **clima** se refiere al promedio de todos los estados del tiempo.

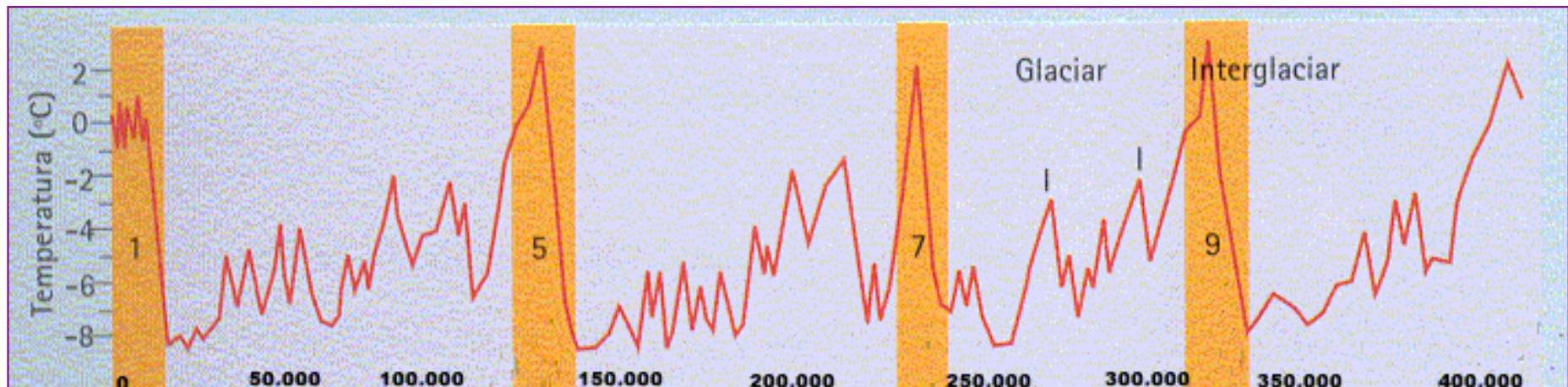
El clima varía:

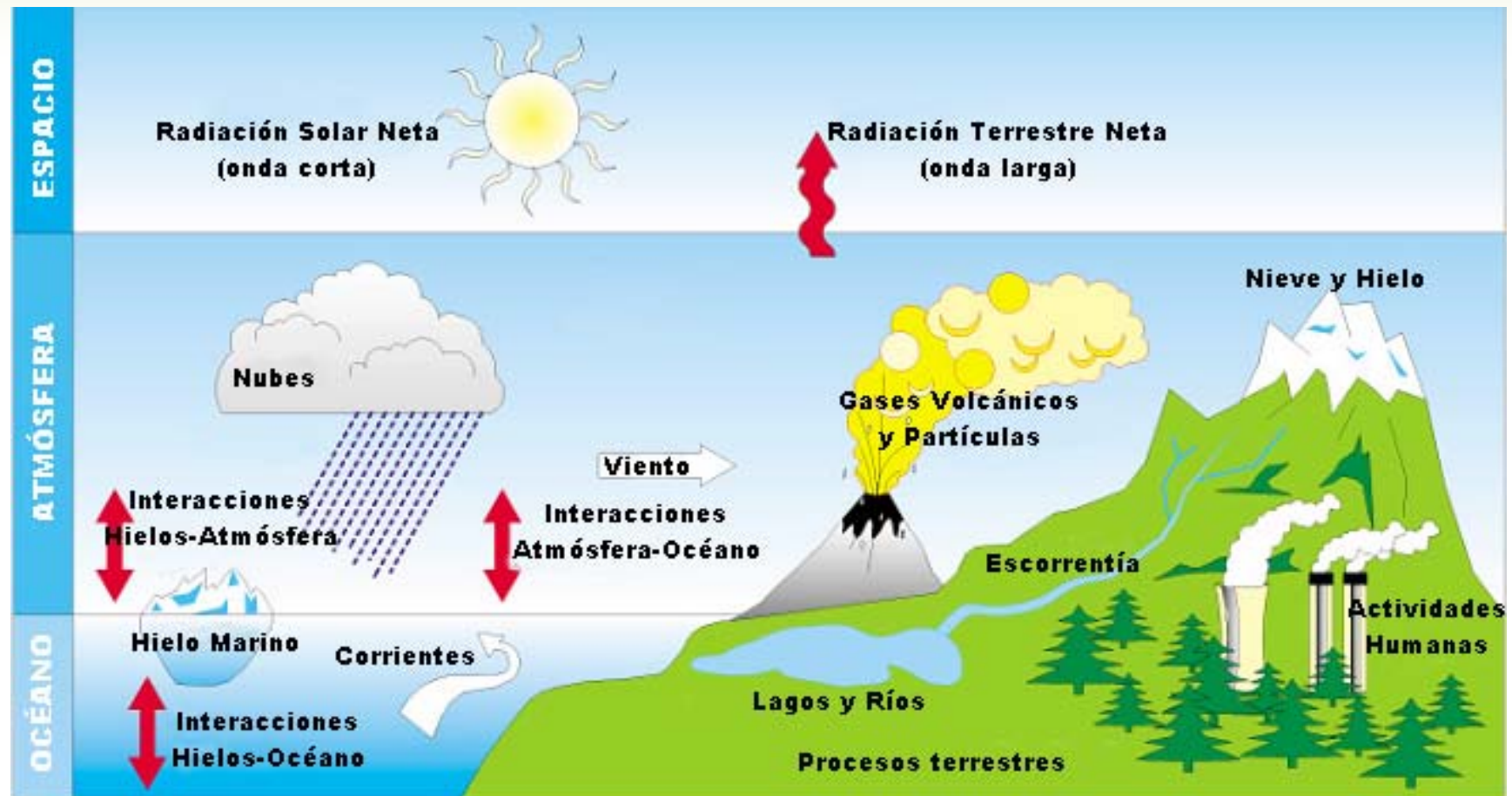
Espacialmente: Diferencias de latitud, distancia al mar, presencia de montañas, vegetación.

Temporalmente: Diferencias estacionales, interanuales, decadales o en escalas milenarias (ej. Períodos glaciares e interglaciares).

Reconstrucción Del Clima:

- Datos históricos: Hemerotecas, cuadernos bitácora, registros agricultura, registros eclesiales, diarios, etc.
- Anillos de árboles; polen fósil.
- Testigos hielo.
- Corales; sedimentos lacustres y oceánicos.



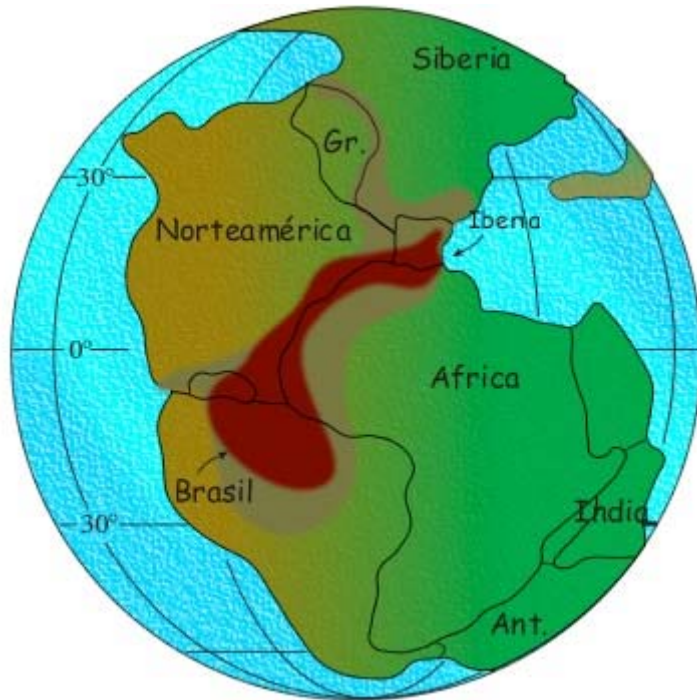


El clima es un sistema interactivo. Tiene 5 componentes principales: **Atmósfera, hidrosfera, críosfera, superficie terrestre y biosfera.**



VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

- Deriva de los continentes



Pangea.

Entre hace 300 y 200 millones de años

Jurásico y Cretácico:

El clima de los dinosaurios (desde hace 208 m a hasta hace 146 m a)



VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

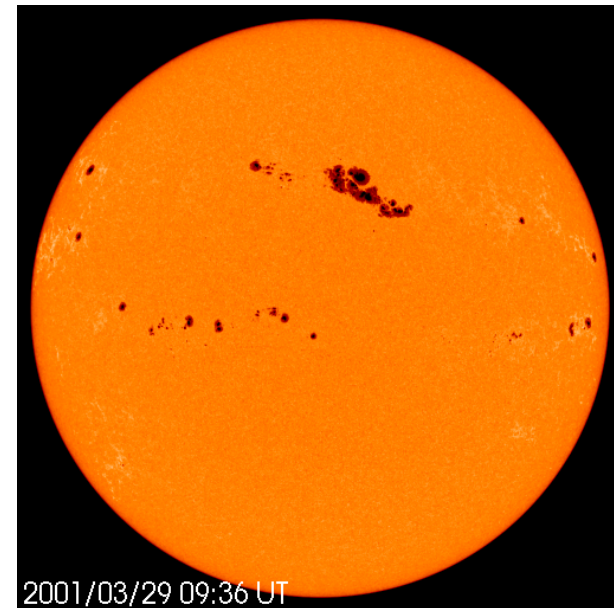
•Actividad Solar

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

Manchas solares: zonas oscuras y relativamente más frías de la fotosfera solar. Se encuentran a temperaturas varios cientos de grados más frías que el conjunto de su superficie. Se pueden ver fácilmente con cualquier telescopio o, incluso, a simple vista con métodos más rudimentarios.

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

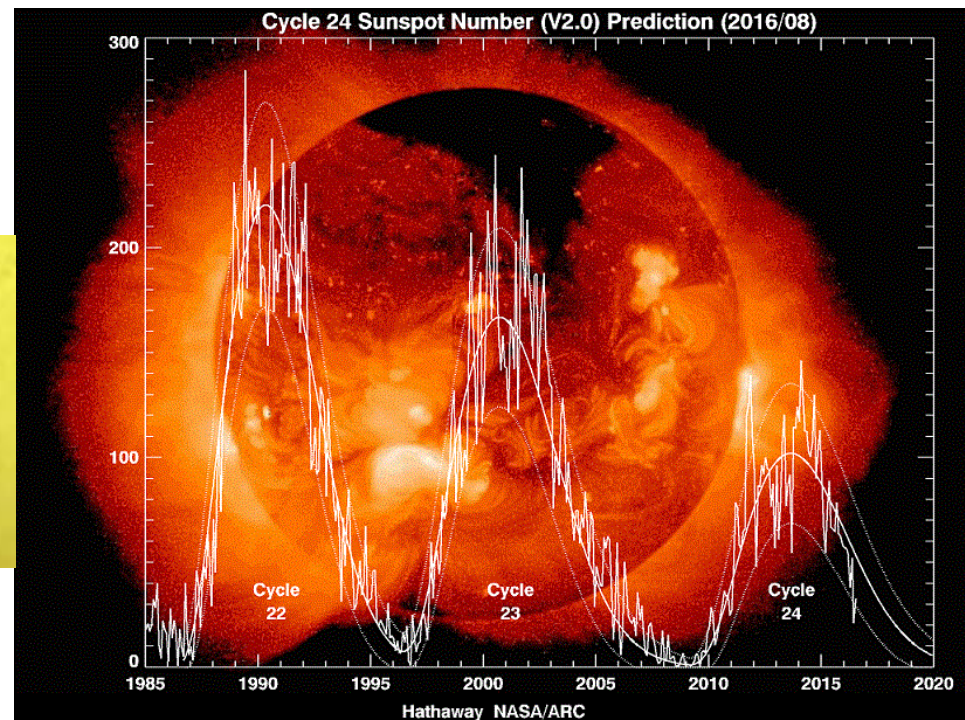
http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos_space2001.html

VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

•Actividad Solar

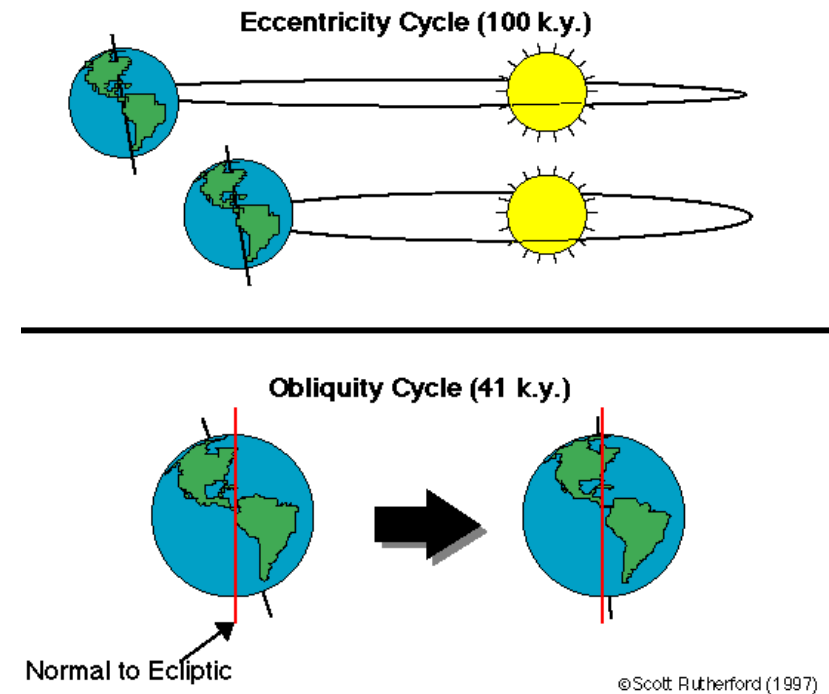
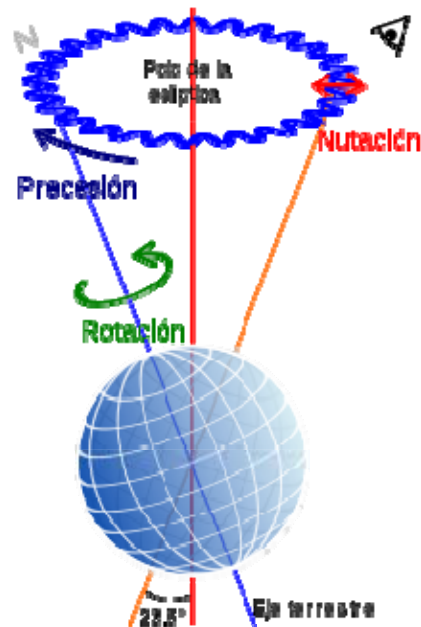
El número variable de manchas solares está relacionado con la “*insolación solar total*”, o “*constante solar*”. Desde mediados del siglo XIX se sabe que el número anual varía en ciclos de 11 años. En la actualidad este flujo, cercano a los 1.370 W/m^2 oscila aproximadamente en $1,2 \text{ W/m}^2$ entre el máximo y el mínimo del ciclo.

Aparte de las variaciones cíclicas de 11 años, la radiación solar incidente en la Tierra ha ido cambiando a lo largo de los últimos siglos en ciclos de más larga duración y que se deben a cambios internos en el Sol. Existen los ciclos de Gleissberg, de 87 años de duración, uno de cuyos mínimos se alcanzará hacia el año 2030.

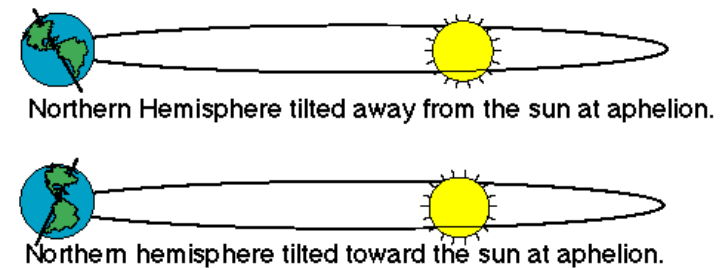


VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

- Variaciones en la órbita terrestre (ciclos de Milankovitch)

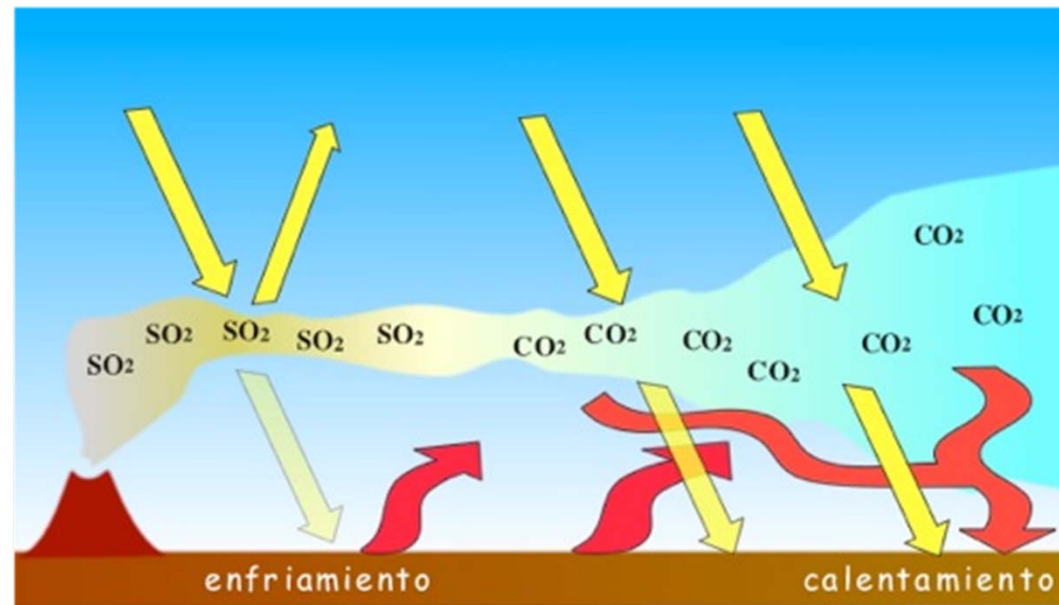
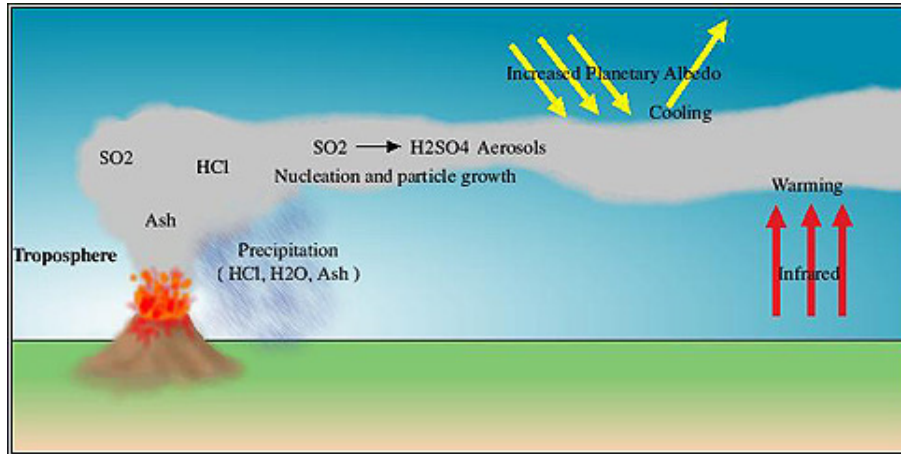


Precession of the Equinoxes (19 and 23 k.y.)



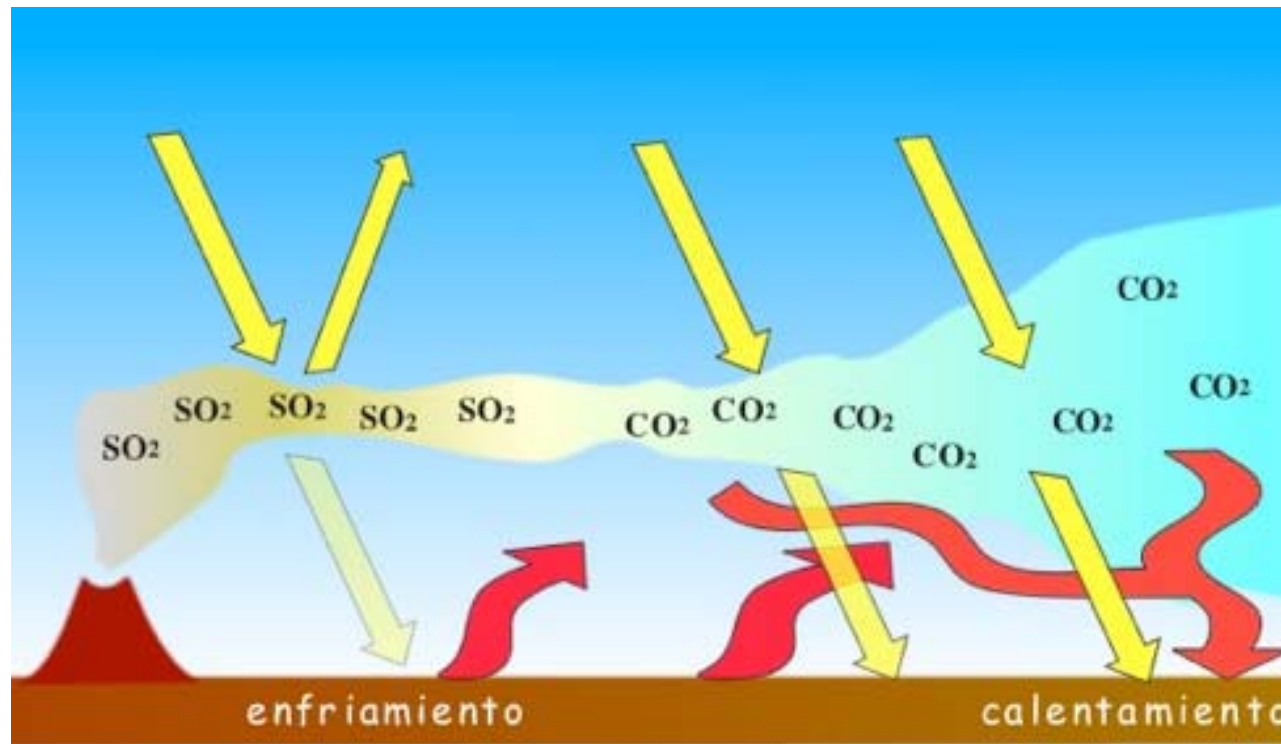
VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

- Actividad volcánica

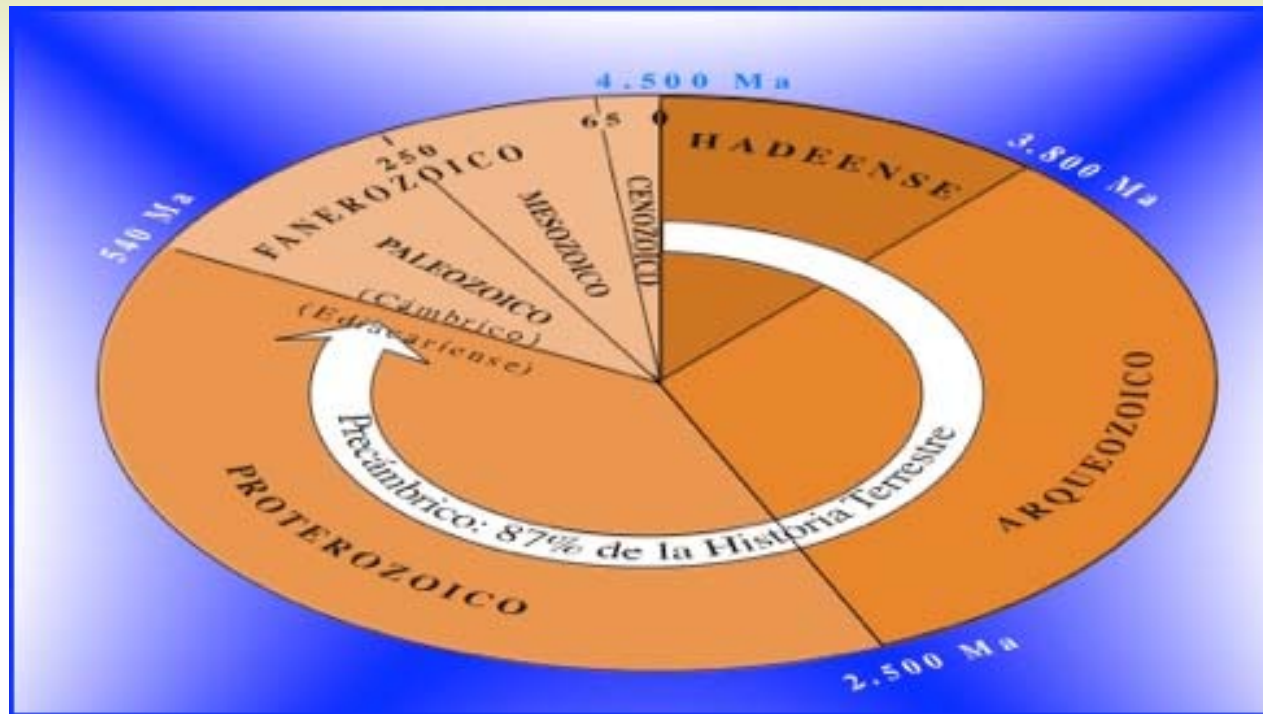


Efecto climático de las erupciones volcánicas.

- Las erupciones volcánicas arrojan SO_2 y CO_2 a la atmósfera.
- 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.
- Por el contrario, 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.



CLIMA PASADO



División geológica de la Tierra, desde sus orígenes (hace 4.500 m. a.) hasta la actualidad.

Cuatro eones: Hadeense, Arqueozoico, Proterozoico y Fanerozoico.

El último eón, que es el que mejor conocemos gracias a la existencia de fósiles, se divide en:

Tres eras: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

Las eras, a su vez, se dividen en :

Períodos, no representados en el diagrama, a excepción del **Cámbrico**, primer período del Paleozoico (se denomina **Precámbrico** a todo el tiempo anterior a él en la historia de la Tierra).

HADEENSE: Comenzó con el origen de La Tierra.

- El planeta giraba más deprisa: los días y las noches eran más cortos.
- La superficie, entre sólida y viscosa, estaba plagada de cráteres y de chimeneas volcánicas de las que emanaban sustancias volátiles. Los gases más pesados, fueron formando la atmósfera primitiva.
- Atmósfera bastante diferente a la actual. Cargada de electricidad y afectada por continuas tormentas. Muy húmeda y con un cielo permanentemente sucio. Oscurecida por las nubes sulfurosas de los volcanes y por el polvo de las colisiones de meteoritos.
- Temperaturas muy altas en las capas bajas del aire, debido a la abundancia de gases de efecto invernadero.

ARQUEOZOICO: Aparición de los seres vivos. Duró 2.500 m. a.

- El aire apenas contenía unas trazas de oxígeno. El poco oxígeno de los volcanes, o de la disociación del vapor de agua en la alta atmósfera, era consumido por gases reductores como el monóxido de carbono (CO), el hidrógeno (H) y el metano (CH₄). El resultado de las reacciones de oxidación era la formación de dióxido de carbono y de agua.
- Las rocas continentales que contenían óxido ferroso (FeO), absorbían más oxígeno de la atmósfera y lo convertían en óxido férrico (Fe₂O₃).
- Aparición y desarrollo de organismos que practicaban la fotosíntesis cambiando el equilibrio geoquímico del aire, que hasta entonces había mantenido al oxígeno atmosférico en una concentración muy baja.
- En la actualidad el oxígeno constituye el 21% de los gases de la atmósfera y la Tierra es el único planeta del Sistema Solar con una atmósfera oxigenada.

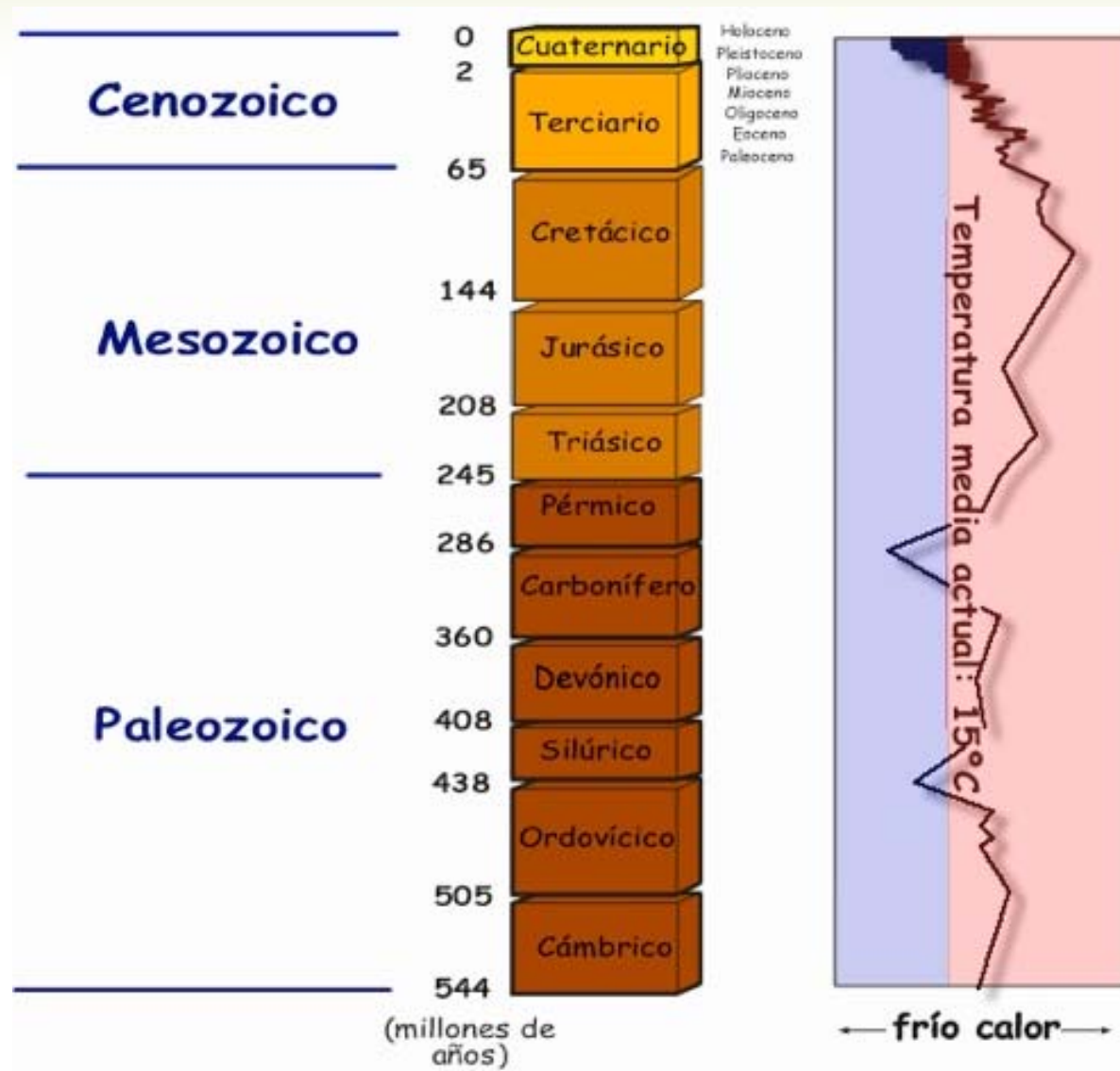
PROTEROZOICO: Desde hace 2.500 m.a. hasta hace 570 m.a.

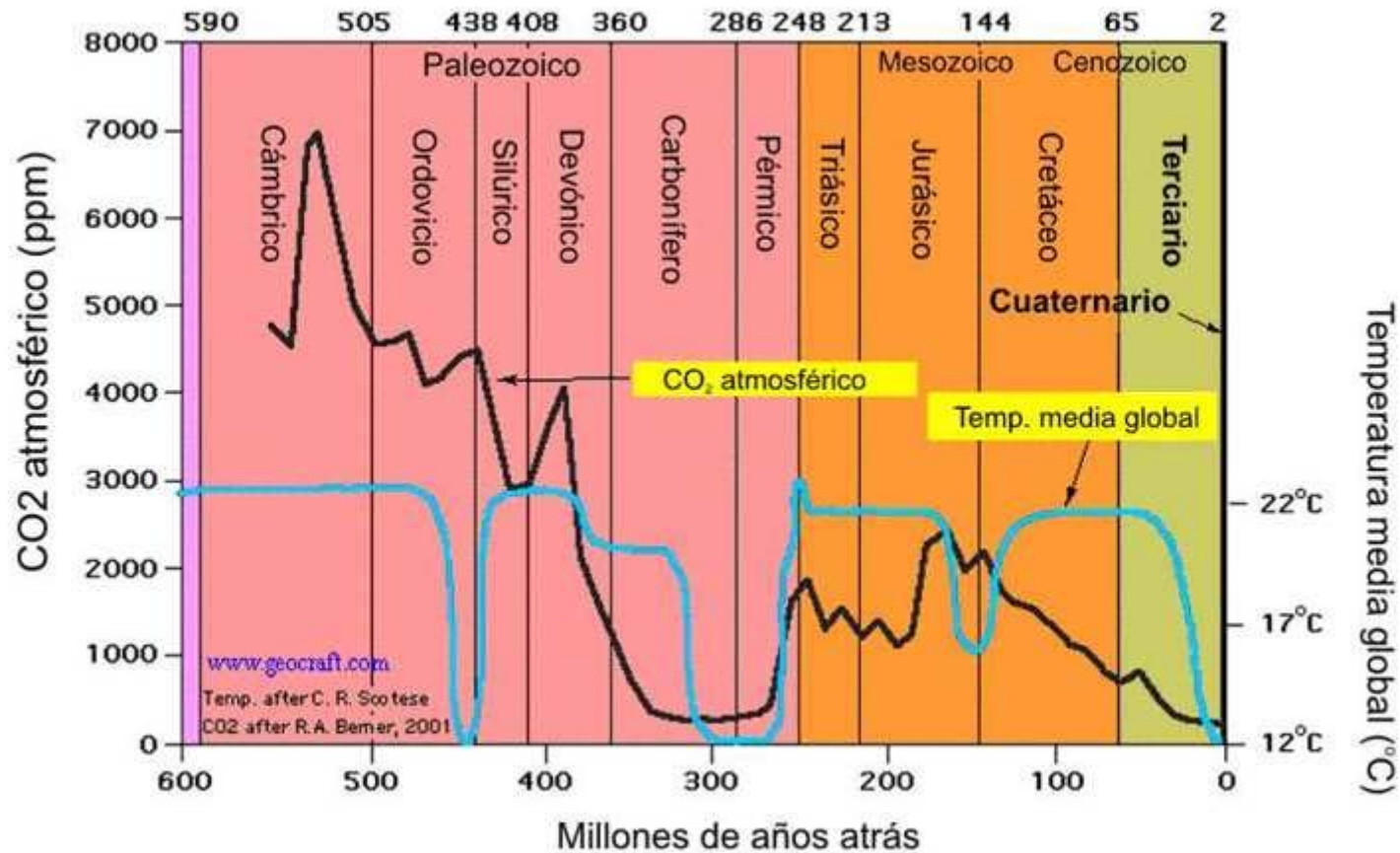
- Su origen está marcado por la acumulación de oxígeno en la atmósfera provocando un cambio en la composición de la misma.
- Hacia finales de este eón tiene lugar el período más frío de la historia del planeta ("Tierra blanca"). En todos los continentes se pueden reconocer grandes espesores de morrenas glaciares de esta edad.

FANEROZOICO: Hace unos 540 m. a. la evolución de la vida se aceleró en los océanos.

- Se multiplicó el número de especies y se modificaron los tamaños y las formas corporales de los animales marinos. Nuevas especies que desarrollaron caparazones y esqueletos calcáreos (fósiles). Los cadáveres de los animales anteriores a este eón eran pequeños y de cuerpos blandos.
- La abundancia de estos fósiles aporta muchas claves sobre los cambios ocurridos desde entonces en la geología y en el clima. Por eso al último eón se le ha dado el nombre de Fanerozoico, del griego "phanero" (visible o evidente) y "zoe" (vida).

FANEROZOICO: eras y periodos





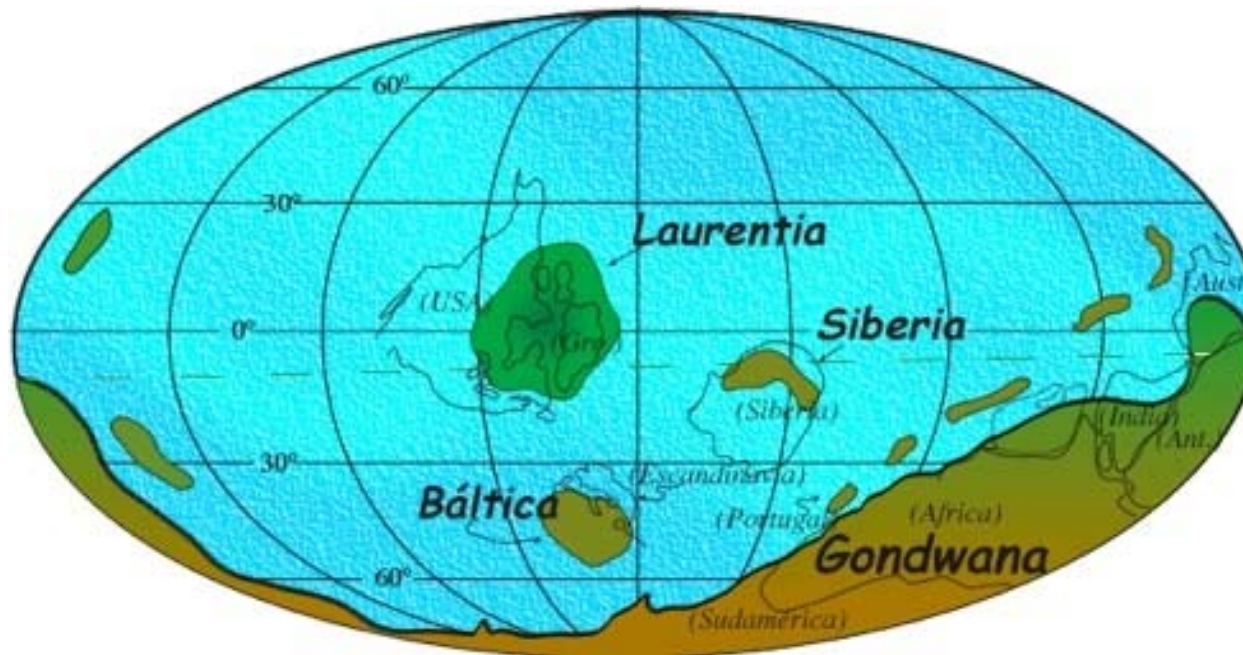
NOTA: Solo se muestra hasta principios del cuaternario (hace 2 m. a.)

La temperatura del periodo pre-industrial fue 15°C

La temperatura de 2016 fue 16.25° C

Primera parte del Paleozoico —primeros 100 m.a: **el Cámbrico y casi todo el Ordovícico.**

- No hay registro fósil continental de vida vegetal o animal terrestre.
- Las tierras emergidas estaban pobladas por cianobacterias y algas, pero todavía no por plantas.
- Mares más extensos que los actuales se adentraban en el interior de los continentes y favorecían el rápido desarrollo de la diversidad animal, ya que sus aguas eran someras y ricas en nutrientes creando las condiciones biotópicas ideales para la proliferación de la vida.
- Clima en general más oceánico y templado, con menos oscilaciones estacionales.



La Tierra en el período Cámbrico, hace unos 500 millones de años.(fuente: Scotese, C.R., 2002, <http://www.scotese.com>, PALEOMAP website).

Finales del **Ordovícico y principios del Silúrico**, entre hace unos 450 y 430 m.a.

- Tuvo lugar una glaciación en las latitudes australes de Gondwana, y la diversidad animal oceánica se vio muy afectada. Se produjo entonces la primera gran extinción biológica del Fanerozoico.
- Hay constancia geológica de que el desierto del Sáhara estuvo cubierto por un espeso manto de hielo de más de 8 millones de km².
- La mayor paradoja de la glaciación del Ordovícico es que la concentración de CO₂ durante aquel período era muy superior a la actual, hasta 16 veces mayor. Los factores geográficos, y no la composición química del aire, son los que tuvieron más importancia.

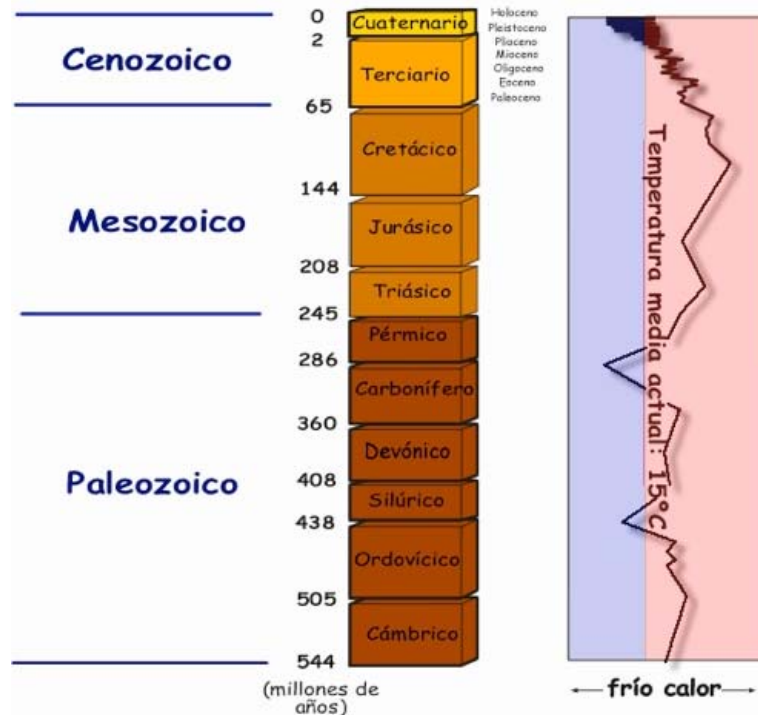
Durante el **Silúrico, el Devónico y casi todo el Carbonífero**, hasta hace unos 300 m.a.

- Las temperaturas se elevaron de nuevo y se mantuvieron cálidas.
- El calor, la humedad y una atmósfera rica en dióxido de carbono facilitaron el desarrollo evolutivo y la colonización de los continentes por parte de la vegetación.



La Tierra en el **Devónico**, hace 400 millones de años. Gondwana seguía siendo el continente mayor. Euramérica era el resultado de la fusión de Laurentia (Norteamérica) y Báltica (Escandinavia).(fuente: Scotese, C.R., 2002, <http://www.scotese.com>, PALEOMAP website).

Glaciación de final del Carbonífero y principios del Pérmico (hace ~300 m.a.)



- Los niveles de CO_2 atmosférico en el aire disminuyeron hasta un nivel muy bajo y similar al actual. Enormes cantidades de carbono orgánico quedó secuestrado en los sedimentos tras ser absorbido por la vegetación.
- La concentración de oxígeno probablemente alcanzó su nivel máximo: un 35%.
- El clima se enfrió y se entró en un nuevo período glacial, en el que un manto de hielo en las latitudes australes de Gondwana, en lo que es hoy Sudáfrica, creció y se encogió en diversas fases sucesivas.
- Por ese motivo el nivel del mar bajó y subió repetidamente, provocando gigantescas transgresiones y regresiones marinas durante toda esa **época final del Paleozoico**.

La catástrofe del Permo-Trías (P/T) (hace unos 250 m.a).

Transición del Paleozoico al Mesozoico,.

- Fue uno de los desastres ecológicos más duros que ha sufrido el planeta, la catástrofe P/T (entre el Pérmico, último período del Paleozoico, y el Triásico, primer período del Mesozoico).
- Desaparecieron en unos pocos miles de años el 85% de las especies marinas, entre ellas los trilobites (artrópodo marino extinto), y el 70% de los vertebrados terrestres. Hasta los insectos se extinguieron casi por completo.
- Las teorías sobre las causas de la catástrofe son variadas, pero las más tenidas en cuenta son dos:
 - el choque de un asteroide
 - las erupciones volcánicas masivas.

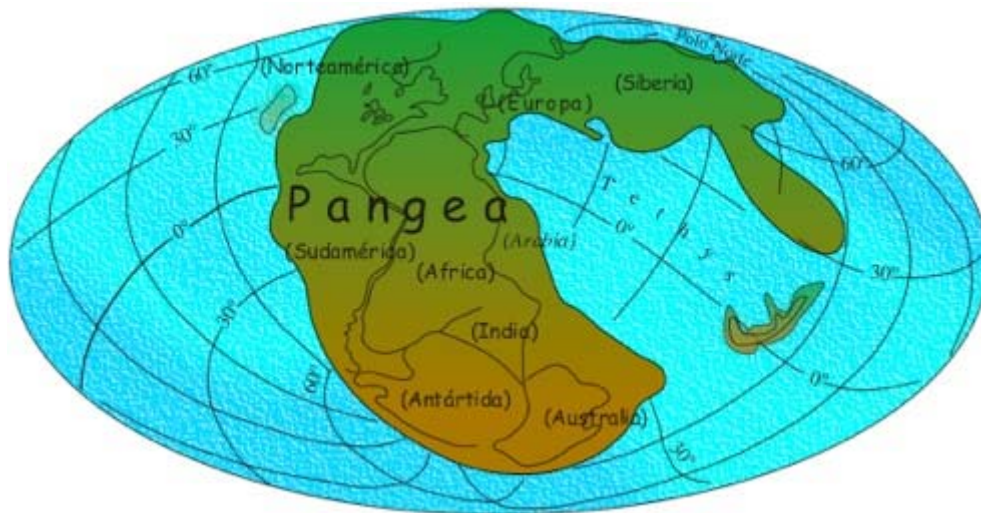
A ellas se añade la de la posible disminución de oxígeno.

Aridez y calor en Pangea

El **Mesozoico** comienza hace 245 m. a. y finaliza hace 65 m.a.

Durante el **Triásico**, desde hace 245 hasta hace 208 m.a.

- Existe un continente único y compacto, Pangea, rodeado de un único océano, Panthalasa.
- Clima árido en vastas extensiones del interior de los continentes. La lejanía del mar creaba condiciones de extrema aridez y las oscilaciones térmicas estacionales eran muy fuertes. La probable ausencia de grandes cordilleras y un relieve erosionado y plano no favorecía tampoco la lluvia.
- Los modelos que simulan el clima de Pangea indican una oscilación térmica extrema en el sur y en el interior del continente, con veranos muy cálidos e inviernos muy rigurosos. Algunas zonas tropicales y medias más próximas al mar debieron estar sometidas a un clima de tipo monzónico, con lluvias estivales. Pero la ausencia de relieves importantes restaba fuerza al monzón y no facilitaba la formación de nubes. Por eso, en Pangea, fueron más extensas las regiones ocupadas por desiertos tropicales que por vegetación monzónica.



Mapa de Pangea. Triásico, principios de la Era Secundaria, hace 250 millones de años. Casi todas las tierras emergidas se reúnen en un sólo continente, Pangea.

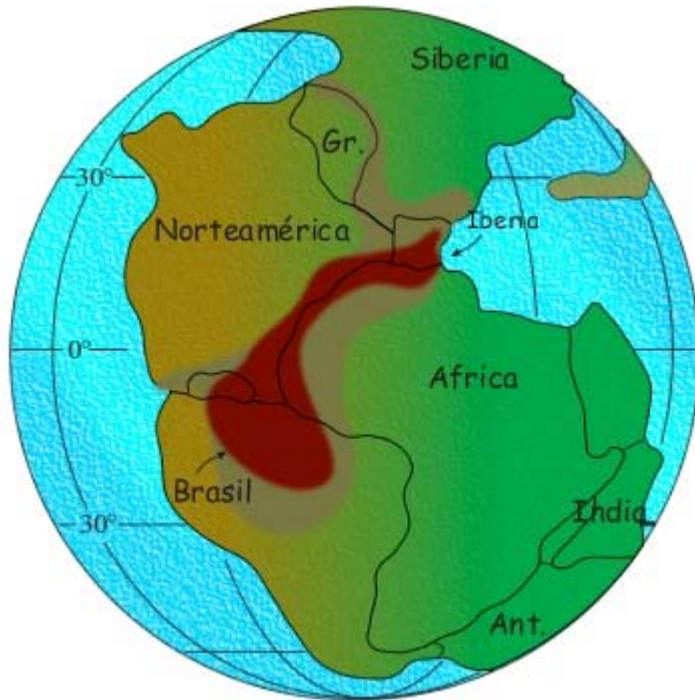
Aridez y calor en Pangea

Final del **Triásico** y comienzo del **Jurásico**, hace 200 m.a.

- Pangea comienza a dividirse entre África y América.
- Se denomina CAMP (Central Atlantic Magmatic Province) a la región de volcanes y de extrusión de coladas basálticas que llegaba desde Brasil hasta España.

La aridez y calor de esta época puede tener varios orígenes:

- Una brusca fase muy cálida provocada por el aumento del CO₂ arrojado por los volcanes.



- Los gases expulsados provocaron de nuevo intensos cambios químicos en la composición atmosférica y en el clima. Los episodios de fuerte vulcanismo afectaron al 80% de las especies planetarias, y probablemente facilitaron el advenimiento de los dinosaurios, que iban a dominar la Tierra durante los siguientes 100 m.a.
- Crecidas rápidas en el nivel de los mares.
- Choque de algún asteroide, ya que se han encontrado en rocas sedimentarias de aquella época con concentraciones altas de iridio, de probable procedencia extraterrestre.

Jurásico y Cretácico: el clima de los dinosaurios (desde hace 208 hasta hace 146 m. a.)

La progresiva ruptura de Pangea, al final del **Triásico**, provocó un clima global más húmedo durante todo el **Jurásico**.

- El nivel del mar comenzó a ascender y el agua oceánica al adentrarse en tierra inundaba grandes regiones continentales, creando nuevos mares.
- La mayor extensión de las tierras inundadas hizo disminuir el albedo planetario, aumentando la absorción de la energía solar. La mayor humedad del aire, por su efecto invernadero, hizo que el clima global fuese también más cálido.

El Cretácico, (hace 145 m. a. y duró hasta la extinción de los dinosaurios, hace 65 m. a.)

Tuvo también en su mayor parte un clima húmedo y cálido. El clima en las latitudes altas era mucho más templado que el actual. La circulación oceánica era también muy diferente.

El Cretácico Medio, hace unos 100 m. a. Norteamérica quedaba cortada en dos por un mar de aguas someras que unía el Ártico con el Atlántico, y Europa era un archipiélago más que un continente.

(fuente: Scotese, C.R., 2002, PALEOMAP website <http://www.scotese.com>).



El Cretácico Medio (hace unos 100 m. a.)

- La temperatura media de la superficie del planeta era entre 6°C y 12°C mayor que la de hoy.
- El clima se caracterizaba por el calor, la humedad y la alta concentración de CO₂.
- Las aguas tenían una temperatura media de entre 15°C y 20°C.
- Plantas y animales, que hoy son típicos de climas cálidos llegaron también a vivir en latitudes muy altas, casi polares.
- Los dinosaurios, más afines a climas cálidos, poblaban casi todas las regiones emergidas de la Tierra y se acercaban hasta los círculos polares.
- No obstante en el sudeste de Australia, situado entonces a 60°S, existen evidencias de que podían existir pequeños casquetes glaciales en latitudes altas.
- El clima de aquella época era a nivel global más cálido y uniforme.

¿Y cuáles fueron las **CAUSAS** de este clima cálido y húmedo?

- 1) Una alta concentración de CO₂ y vapor de agua.
- 2) Un clima más oceánico, con una distribución de mares y continentes que favorecería la exportación marina de calor de los Trópicos hacia los Polos y, por lo tanto unas temperaturas más uniformes.
- 3) Un mayor transporte meridiano de humedad desde los Trópicos a las latitudes altas, lo que provocaría en éstas más calor y unas precipitaciones más intensas.

Abundante CO₂ y vapor de agua

- La concentración de CO₂ en la atmósfera, producida por la intensa desgasificación volcánica, era probablemente varias veces superior a la actual, entre 900 ppm y 3.300 ppm (hoy es de unas 380 ppm).
- El aumento del efecto invernadero no residía sólo en el CO₂, sino sobre todo en el incremento del contenido de vapor de agua en la atmósfera.

NOTA

Hoy, el efecto invernadero del vapor de agua está casi confinado a las latitudes tropicales y medias, y apenas tiene incidencia en las latitudes altas, ya que allí la humedad absoluta del aire, debido al frío, es muy baja.

El vapor de agua alcanza una concentración de hasta el 4% del aire en algunas regiones húmedas ecuatoriales, pero tan sólo del 0,00001% en el Polo Sur en invierno.

Sin embargo, durante el Cretácico, al tener las masas de aire de latitudes polares temperaturas muy superiores, su concentración sería también mayor y su efecto invernadero considerable.

Un clima más oceánico

- En el Cretácico es probable que el agua profunda de los océanos se formase en áreas tropicales.
- Allí el agua se hundía por la fuerte salinidad que adquiría debido a la evaporación (algo semejante a lo que ocurre hoy, a pequeña escala, en el Mediterráneo).



La catástrofe K/T (última parte del Cretácico)

- La concentración de CO₂ atmosférico disminuyó de nuevo considerablemente
- El mar se retiraba de los continentes.

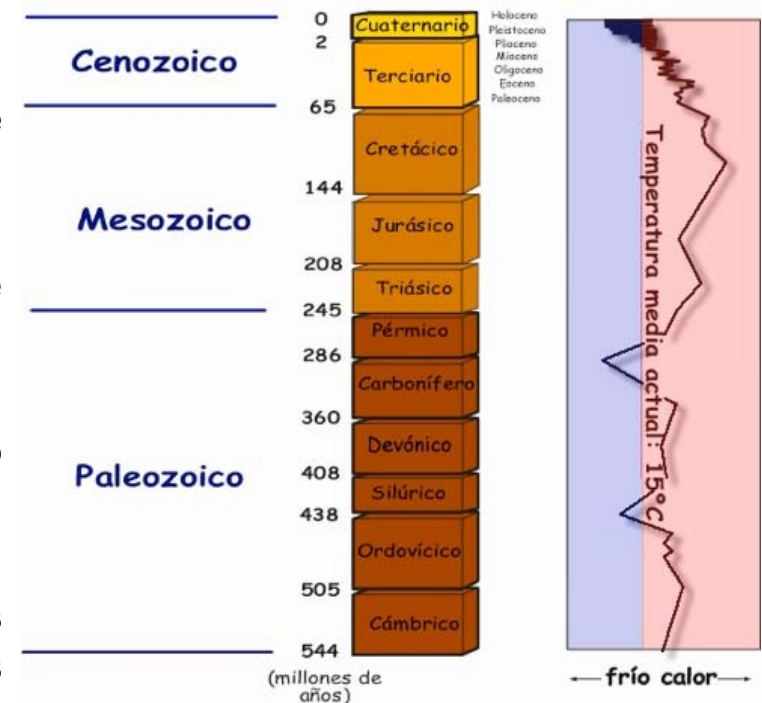
- El clima se enfrió bastante, pero siguió siendo relativamente cálido.

- El Océano Ártico siguió estando, al menos en verano, libre de hielos

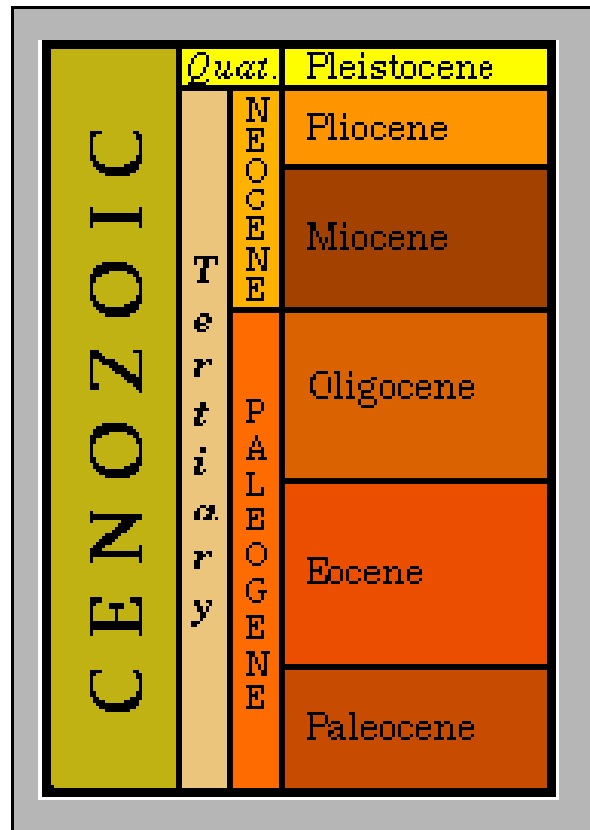
Al final del Cretácico, en el episodio K/T (Kreide/Tertiär), hace 65 m. a.

- Se produjo la extinción de diferentes especies, en el mar los ammonites y una gran cantidad de plancton, y en los continentes los dinosaurios.

- La vegetación, especialmente en Norteamérica, sufrió un cambio drástico.



El clima cálido del Paleoceno y Eoceno

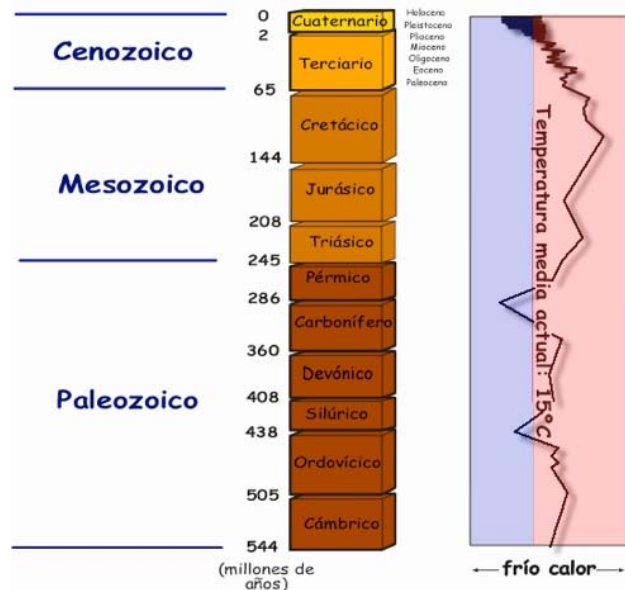


- Cenozoico, última era del último eón, que comenzó hace 65 m. a.
- Contiene el periodo Terciario y Cuaternario.
- La evolución climática del Cenozoico es compleja.

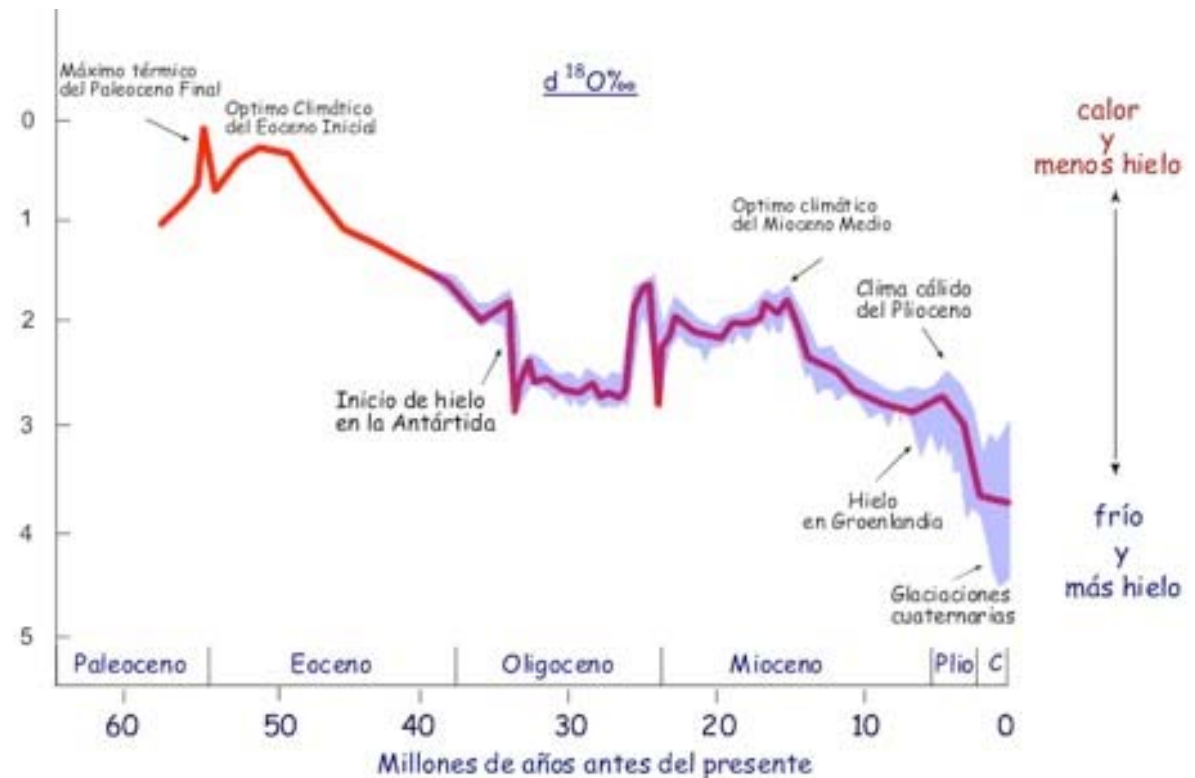
El clima cálido del Paleoceno y Eoceno

Se pasa de un clima cálido inicial, sin hielo en la Antártida ni en Groenlandia, a un clima frío final, con glaciaciones que recubrieron de hielo extensas zonas continentales cíclicamente durante los 2 últimos m. a.

El enfriamiento vino acompañado por una pérdida casi continua de CO₂ atmosférico, que pasó de una concentración de quizás 2000 ppm al principio del Cenozoico a una concentración por debajo de las 300 ppm durante el último millón de años .

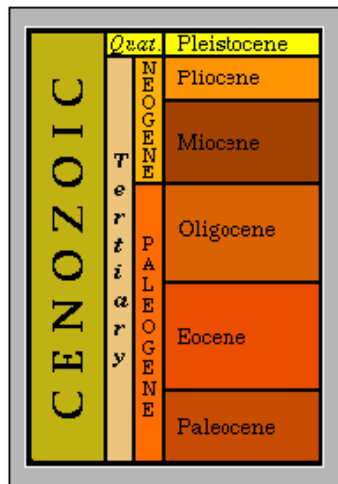


El enfriamiento general del Cenozoico (Terciario y Cuaternario).



Factores de este clima cálido de comienzos del Terciario

- Una circulación atmosférica más zonal (vientos del oeste más intensos alrededor del Ártico).
- Alta concentración de dióxido de carbono y de metano.
- Más nubes estratosféricas



Mapa del Paleoceno y comienzos del Eoceno, hace unos 55 millones de años (Brinkhuis, 2006).

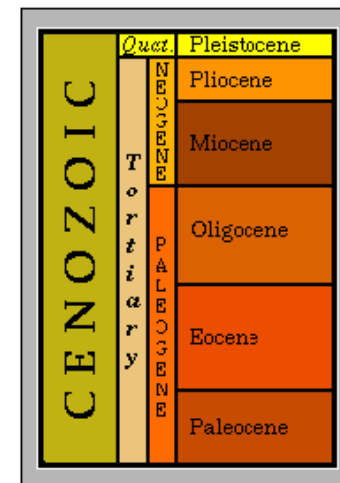


Máximo Térmico del Final del Paleoceno (PETM) (frontera con el Eoceno, hace 55 m. a.)

- Se produjo un abrupto evento de calentamiento, que apenas duró unos 80.000 años.
- Las temperaturas continentales subieron entre 5°C y 7°C sobre unos niveles anteriores ya altos.
- El agua superficial costera en la Antártida pasó de tener una temperatura de 13°C a 20°C, y en el Ártico se llegaron a alcanzar los 24°C.
- Las temperaturas del fondo oceánico llegaron a ser unos 12°C superiores a las actuales. Probablemente debido a un cambio del lugar principal de formación de las aguas profundas, que pasó de estar ubicado en mares fríos del hemisferio sur a estarlo en mares más cálidos del hemisferio norte.
- Influyó enormemente en la evolución de la vida animal. El episodio coincidió con una importante extinción de fauna, tanto en los continentes como en los océanos, y con la aparición de numerosos órdenes de mamíferos nuevos, que dominan el reino animal desde entonces.
- La flora se adaptó respondiendo con cambios en la fisonomía de sus hojas y con migraciones hacia latitudes más altas.
- **Posibles causas del PETM:** aumento brusco de metano o de dióxido de carbono.

Optimo Climático del Eoceno Inicial (IETM)

- Tras el pico de calor del final del Paleoceno, la temperatura disminuye pero se mantiene alta durante toda la primera parte del Eoceno, hasta hace unos 50 m. a.
- El Ártico está libre de hielo, con inviernos mucho menos fríos que los actuales.



Comienzo del enfriamiento (hace 50 m. a.)

- La tendencia térmica se invierte y las temperaturas comienzan a bajar. Durante todo lo que resta del Eoceno, en casi toda Europa y Asia, el clima pasa a ser más frío y seco.
- La temperatura del fondo del mar, pasa de unos 12°C hace 50 m. a. a solamente 6°C al final del Eoceno, hace unos 35 m. a. En la actualidad apenas supera los 2°C.

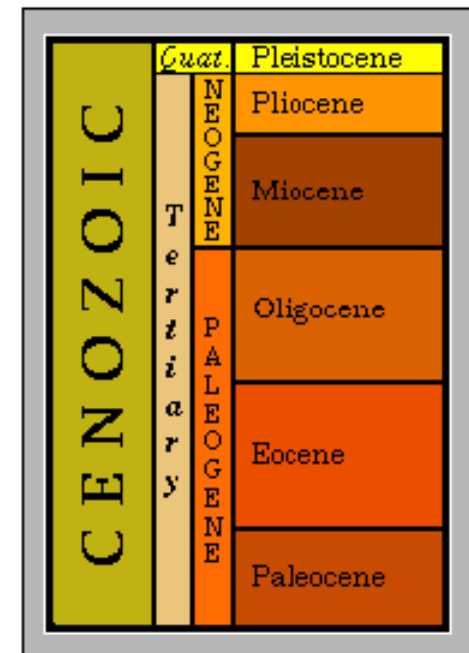
Posible causa inicial del enfriamiento:

- La reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Un gran incremento del plancton oceánico acabó absorbiendo gran parte del CO₂ atmosférico.
- Disminución del vapor de agua
- Aumento del albedo debido sobre todo a la formación de banquisas de hielo marino.
- Algunos oceanógrafos creen que los cambios en la circulación oceánica ocasionados por movimientos geológicos de gran envergadura fueron más importantes que la pérdida de CO₂.
- Cambios en la circulación oceánica provocaron cambios en la circulación atmosférica. Una de estas modificaciones importantes en la circulación oceánica contribuyó a la formación del manto de hielo de la Antártida, que hizo aumentar el albedo planetario y contribuyó al enfriamiento global.

Oligoceno: el hielo recubre la Antártida (hace 34 m. a.)

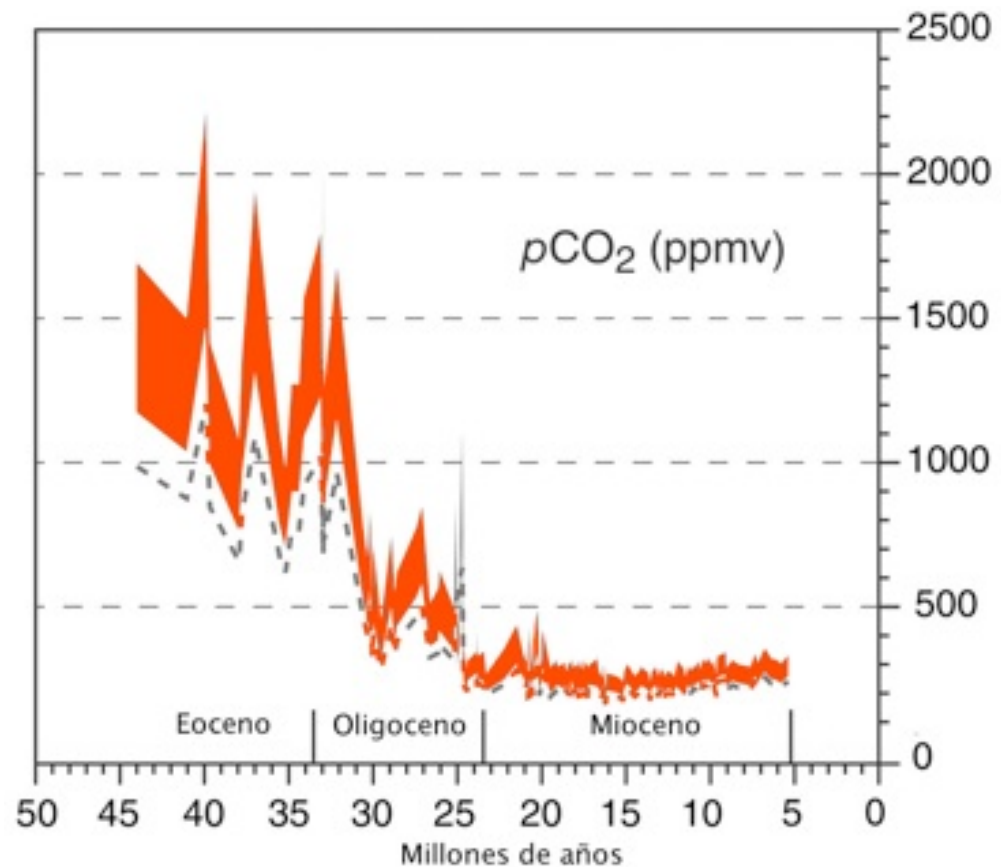
- Se produjo un bajón de las temperaturas. La temperatura del fondo del mar descendió por debajo de los 3°C.
- En los continentes, muchas zonas de bosque boreal se transformaron en áreas de tundra, y más al sur, paisajes boscosos pasaron a ser paisajes esteparios.
- El enfriamiento global estuvo ligado a la primera gran acumulación de hielo en la Antártida, que ocurrió inicialmente en su mitad oriental, ya que su mitad occidental estaba todavía en gran parte sumergida.

Albedos	% de luz reflejada
Nieve reciente	86
Nubes brillantes	78
Nubes (promedio)	50
Desiertos terrestres	21
Suelo terrestre sin vegetación	18
Bosques (promedio)	8
Ceniza volcánica	7
Océanos	5 a 10



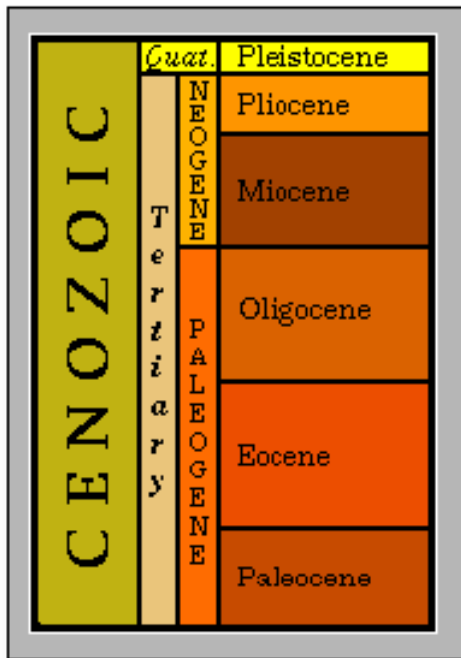
Otras causas:

- Movimiento de las placas .
- Disminución del CO_2 que fue ocurriendo a lo largo del Cenozoico por causas poco claras quizás debidas a la emersión de cadenas montañosas con el consiguiente incremento de la absorción de CO_2 por meteorización de los silicatos y enterramiento en los deltas de materia orgánica.
- Cambios en las corrientes marinas.
- La actividad volcánica.



Mioceno: primera fase de glaciación

- El clima era más fresco que el de la época precedente.
- En el hemisferio norte, grandes áreas boscosas se convirtieron en grandes praderas.
- En el hemisferio sur se estableció un sistema circumplanetario de corrientes oceánicas, que aislaba a la Antártida de las corrientes más cálidas del resto del mundo favoreciendo la aparición de un gran casquete de hielo antártico.
- El continente antártico se vio sometido a una **primera fase de glaciación**.



La primera fase de glaciación produjo un descenso inmediato y generalizado del nivel de los océanos.

Como consecuencia, el océano Atlántico dejó de estar comunicado con el mar Mediterráneo.

Mioceno: primera fase de glaciación (hace 6 m. a.)



La región mediterránea en el Mioceno Final, hace 6 m. a.

- Cuando se cortó la comunicación entre el océano Atlántico y el Mediterráneo. El Mediterráneo quedó reducido a unos pocos lagos salinos.
- Las Baleares, Córcega y Cerdeña eran extraordinarias cordilleras en medio de un desierto salino.
- Se crearon nuevos puentes de comunicación entre las faunas terrestres de Europa, África y Asia.

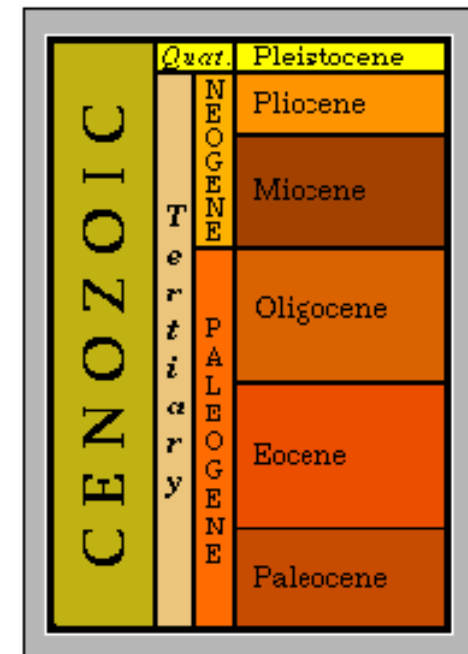
Inicio del Plioceno: óptimo climático

Temperaturas medias anuales entre 3 y 10 °C superiores a las actuales.

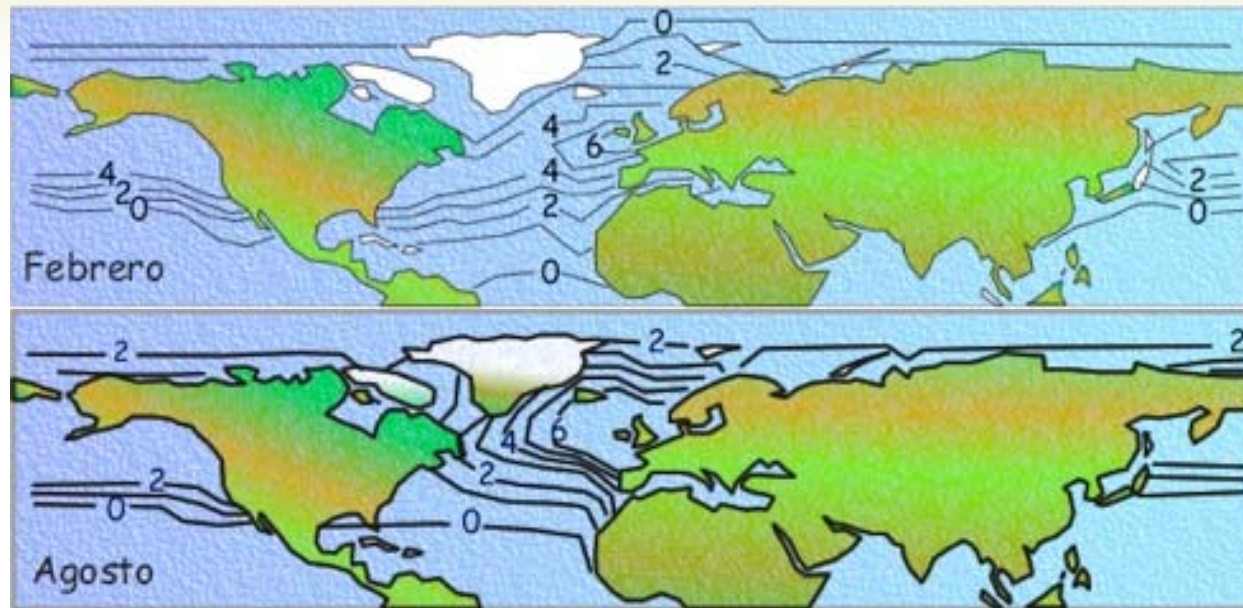
Por última vez en su historia, la Antártida se vio de nuevo libre de hielo, desarrollando una vegetación de tipo templado-subtropical.

El nivel general de los océanos subió cerca de 60 m, cubriendo áreas que hasta entonces habían estado por encima del nivel del mar. Los antiguos golfos y cañones se vieron inundados, formando fiordos y estuarios.

Posible causa: existencia de una robusta circulación oceánica profunda y superficial en el Pacífico y en el Atlántico.



Mediados y Finales del Plioceno: (entre 3 y 2.5 m. a.)

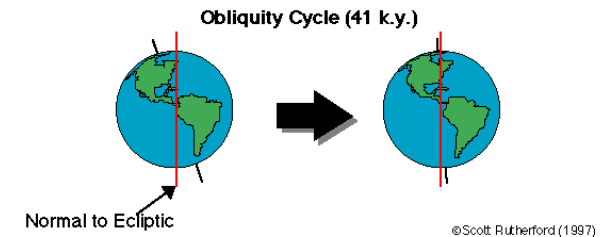
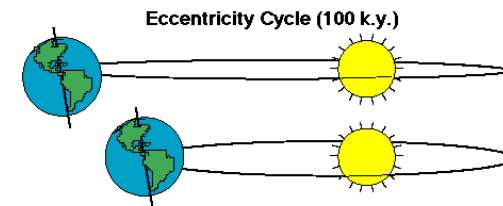
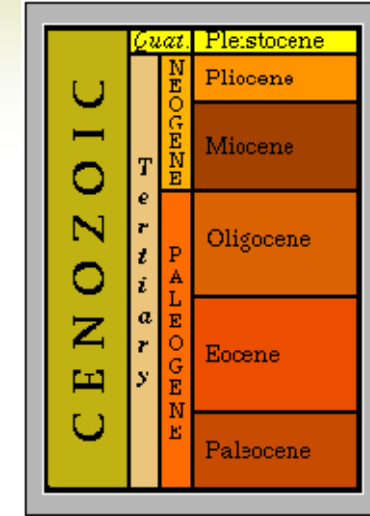


Plioceno Medio, hace 3 m. a. Probables diferencias de temperatura de la superficie marina respecto al presente (°C) en los meses de Febrero y Agosto (fuente Dowsett, 1999).

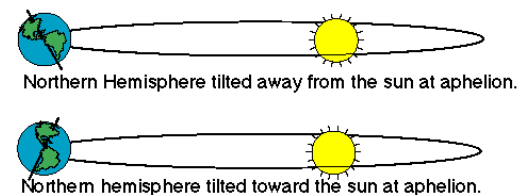
- Hace unos 2.5 m. a. se produjo un nuevo enfriamiento a nivel global, que produjo la aparición del primer casquete de hielo en el Ártico.
- Este cambio climático fue mucho más importante que los anteriores, ya que con él se inició el ciclo de períodos alternantes glacial-interglacial que ha caracterizado a nuestro planeta desde entonces.

La transición al Cuaternario

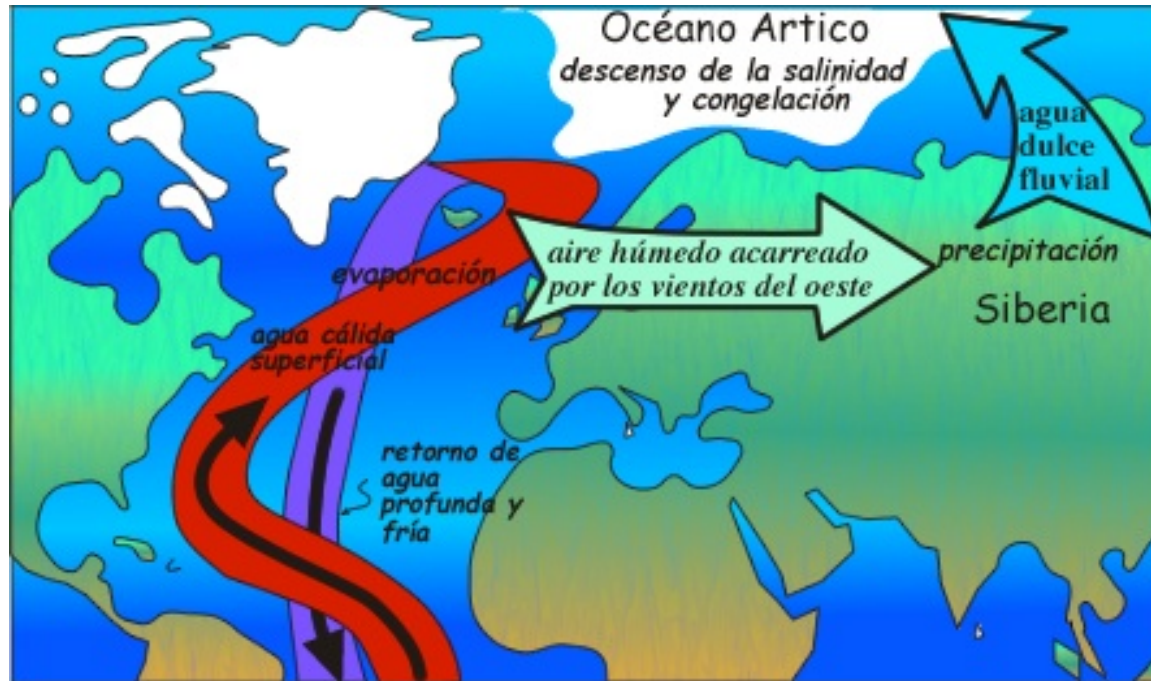
- El cierre del istmo de Panamá y la congelación del Ártico.
- Aridificación de África Oriental.
- Durante cortos y sucesivos períodos fríos empezó a acumularse hielo en el norte de América y de Europa, y los icebergs hacían acto de presencia en el Atlántico Norte .
- La variabilidad del clima se agudizó, propiciada por los ciclos astronómicos de Milankovitch, y en especial por el ciclo de variación de la oblicuidad del eje, de 41.000 años de duración.



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



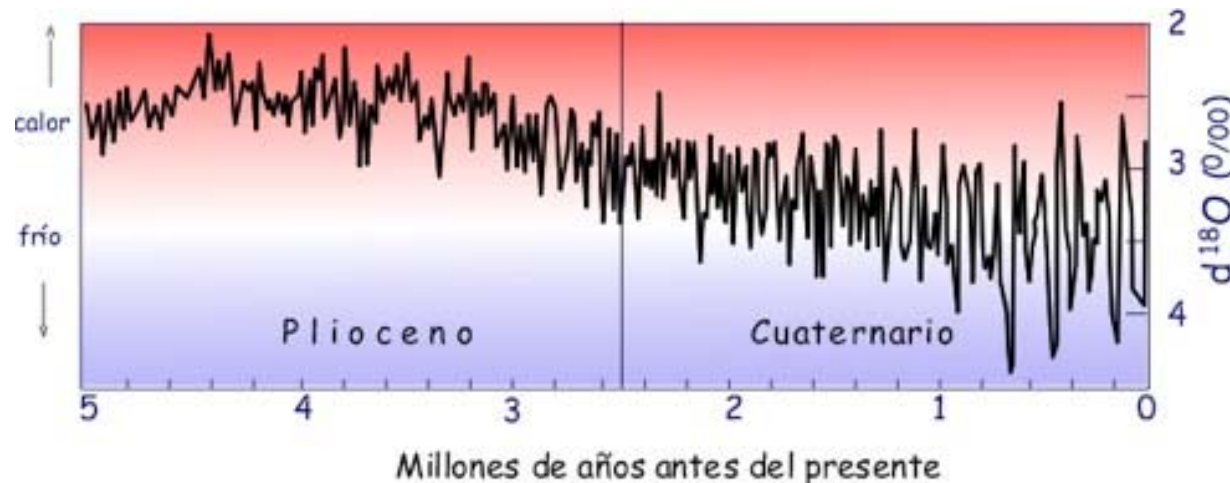
La transición al Cuaternario



Proceso de congelación del Ártico influenciado por la Corriente del Golfo.

Glaciaciones cuaternarias. Características generales

- El **Cuaternario** abarca dos períodos de duración muy desigual:
- El **Pleistoceno**, desde hace 2.5 m. a. hasta hace 11.500 años.
- El **Holoceno**, desde hace 11.500 años hasta hoy.
- Suficiente frío como para que las precipitaciones de nieve comenzasen a ser abundantes en latitudes altas acumulándose en el norte de América y de Europa espesos mantos de hielo.
- Sucesión de glaciaciones y periodos interglaciares.

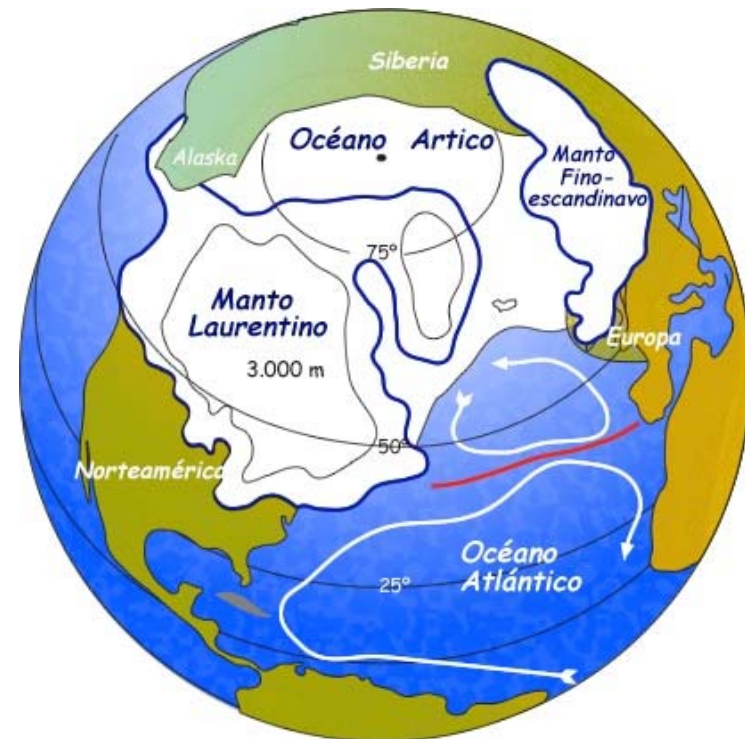


Evolución de la concentración de $d^{18}O$ en las conchas de los foraminíferos béticos (de aguas profundas) durante los últimos 5 m. a.

- 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 glaciares durante el Cuaternario, especialmente en el último millón de años.

Características de las glaciaciones del Cuaternario:

- Formación de dos enormes mantos de hielo en las tierras continentales del norte de América (Laurentino) y de Europa (Finoescandinavo), que se añaden a los que ya existían, de forma más o menos permanente, sobre la Antártida y Groenlandia.
- Estos nuevos mantos de hielo septentrionales crecían y avanzaban hacia el sur y cuando llegaban a un máximo de volumen acumulado invertían la tendencia, se licuaban y retrocedían, hasta que desaparecían por completo durante unos períodos cortos —de unos cuantos miles de años de duración— denominados interglaciares.
- Sucesión de glaciaciones y periodos interglaciares.



Glaciaciones cuaternarias. Las causas

1. Que el clima general se enfriase para que las precipitaciones invernales en el hemisferio norte fuesen más de nieve que de lluvia.

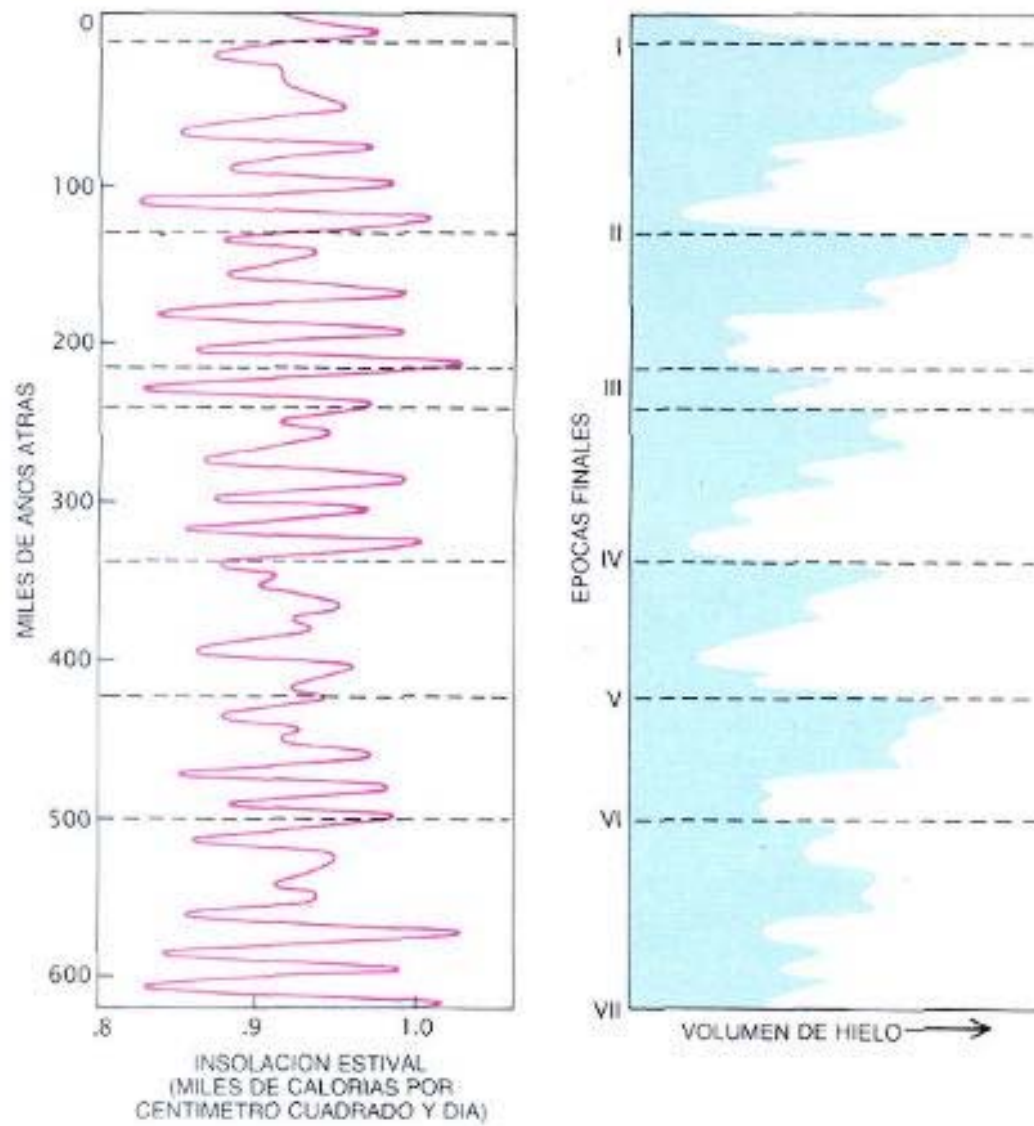
2. Veranos en las latitudes altas del hemisferio norte frescos, con una baja insolación que favorecían la entrada en una glaciación. Se producían debido a:

- valores bajos de inclinación del eje terrestre
- alta excentricidad de la órbita
- máxima lejanía del Sol durante el solsticio de verano del hemisferio norte

La periodicidad del ritmo de las glaciaciones cuaternarias no es fácil de constatar, pero parece claro que está influenciada por los ciclos de Milankovitch.

3. Nevadas invernales suficientemente importantes. Gracias a que los mares de donde provenía la humedad estaban relativamente calientes. Una corriente del Golfo suficientemente activa y un Atlántico Norte relativamente cálido podrían explicar las fuertes nevadas. El cierre del istmo de Panamá habría facilitado este funcionamiento.

4. Los cambios en el color de los paisajes tuvieron un importante efecto de retroalimentación positiva. Una vez que se iniciaron las glaciaciones por causas astronómicas, el aumento del albedo las intensificaba.

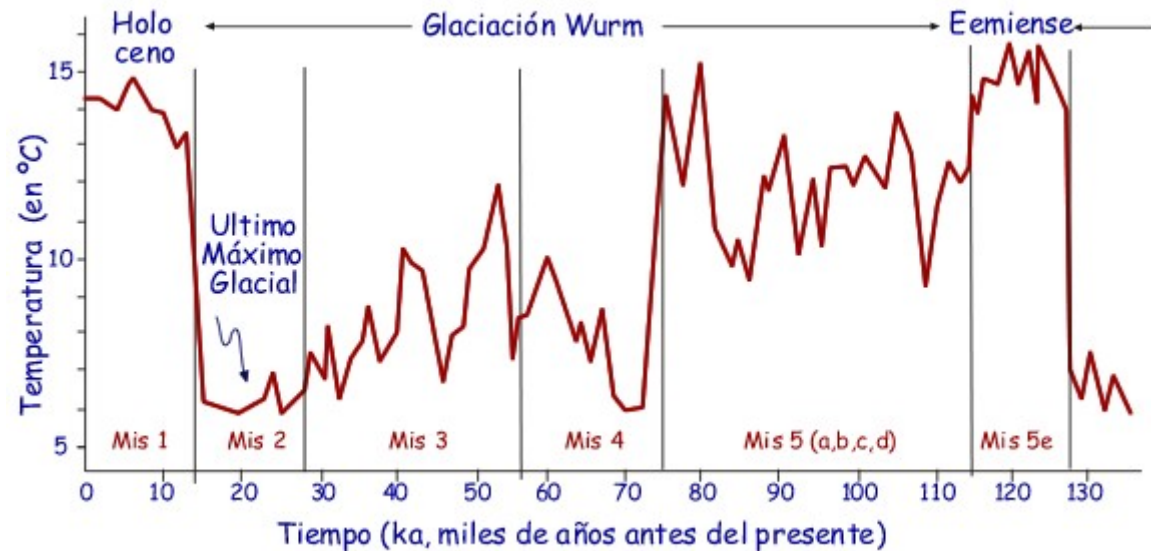


Relación entre el volumen de hielo global y la insolación en los últimos 500.000 años.

Último ciclo glacial según la **temperatura del agua superficial** en el Pacífico Ecuatorial Occidental estimada a partir del análisis de Mg/Ca de los foraminíferos plantónicos.



Último ciclo glacial según la **temperatura de verano** del agua superficial en el Atlántico a 53 °N, estimada a partir de los foraminíferos planctónicos. Se señalan los estadios isotópicos marinos (MIS) y el último máximo glacial.



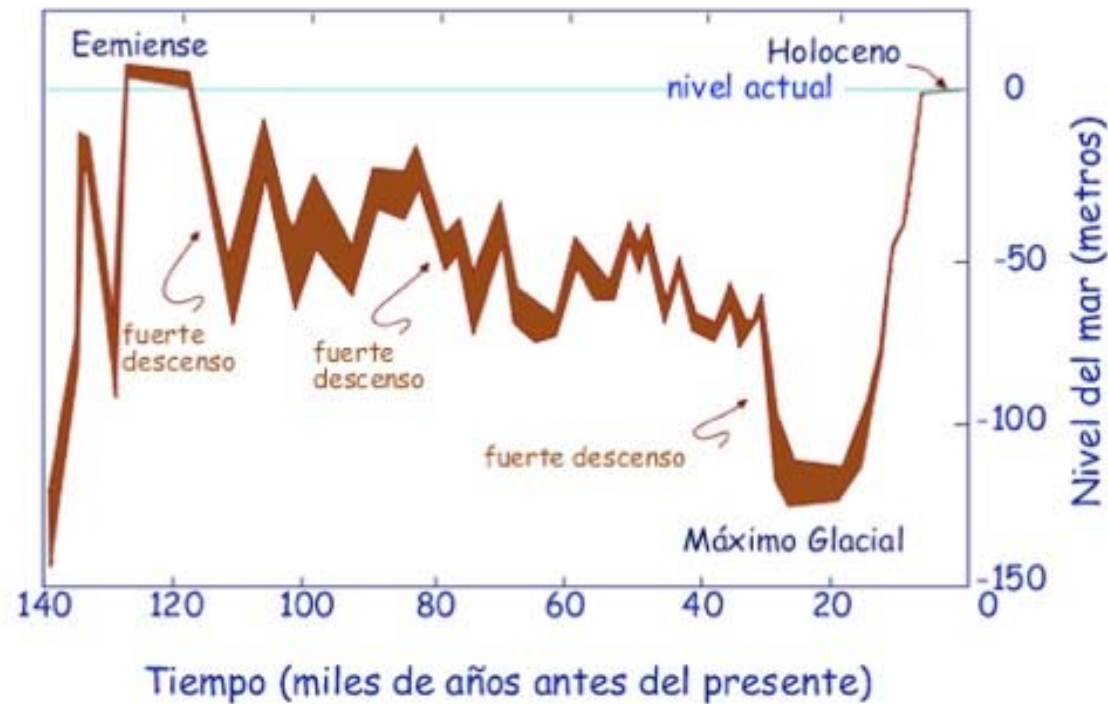
NOTA:

- Los **estadios isotópicos marinos** o **MIS** son periodos alternativos de frío y calor en el **paleoclima** de la Tierra.
- Sirven para deducir la temperatura y el clima del mundo en un determinado periodo del pasado, utilizando para ello los datos de los isótopos de oxígeno tomados de muestras de fondo marino, suficientemente profundas y grandes como para ver los estratos.

El interglacial Eemiense. Penúltimo periodo de calor del Cuaternario (hace 127.000 años).

- El interglacial Eemiense fue el penúltimo período cálido que la Tierra conoció durante el Cuaternario (el último es el actual: el Holoceno) duró varios milenios (hasta el 118 .000 ~106.000 antes del presente).
- En los momentos álgidos las temperaturas a escala global eran entre 1°C y 2°C superiores a las actuales.
- Algunos modelos indican que en partes de Asia las temperaturas de Julio podrían haber sido hasta 4°C superiores a las actuales.
- En Inglaterra, son abundantes los fósiles de hipopótamos y de otros animales de regiones tropicales y subtropicales.
- En Groenlandia, los sondeos en el hielo indican unas temperaturas unos 5°C superiores a las actuales.
- En el Ártico disminuía la extensión del hielo invernal. Las temperaturas superficiales de los océanos eran entre 2°C o 3°C más calientes que hoy.
- El nivel del mar alcanzó su cota más alta y los hielos continentales su volumen mínimo.

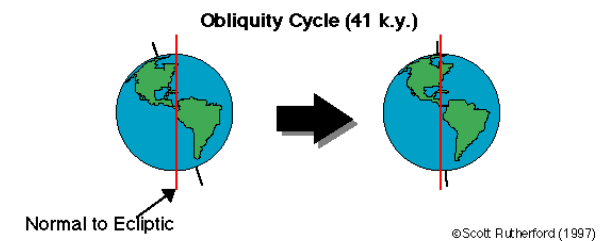
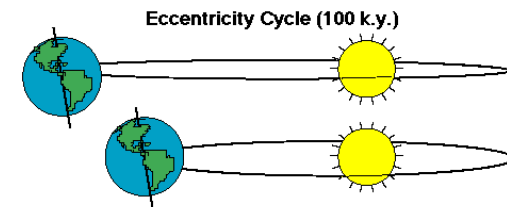
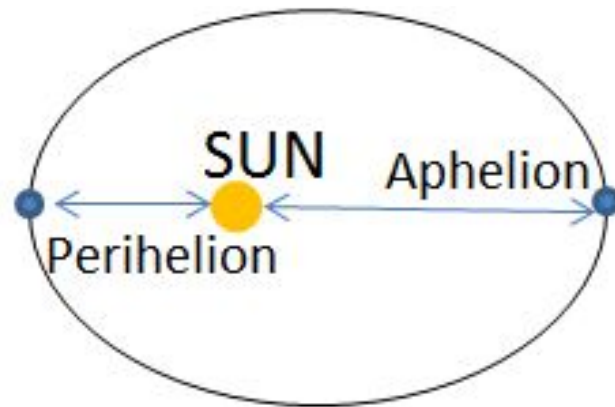
El interglacial Eemiense. Penúltimo periodo de calor del Cuaternario (hace 127.000 años).



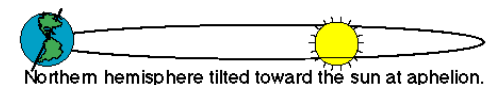
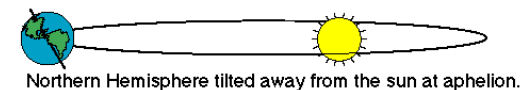
Nivel del mar según las terrazas de corales en el **último Ciclo Glacial**. El nivel del mar quedaba entonces entre 4 y 6 m por encima de la cota actual.

El interglacial Eemiense. Penúltimo periodo de calor del Cuaternario (hace 127.000 años).

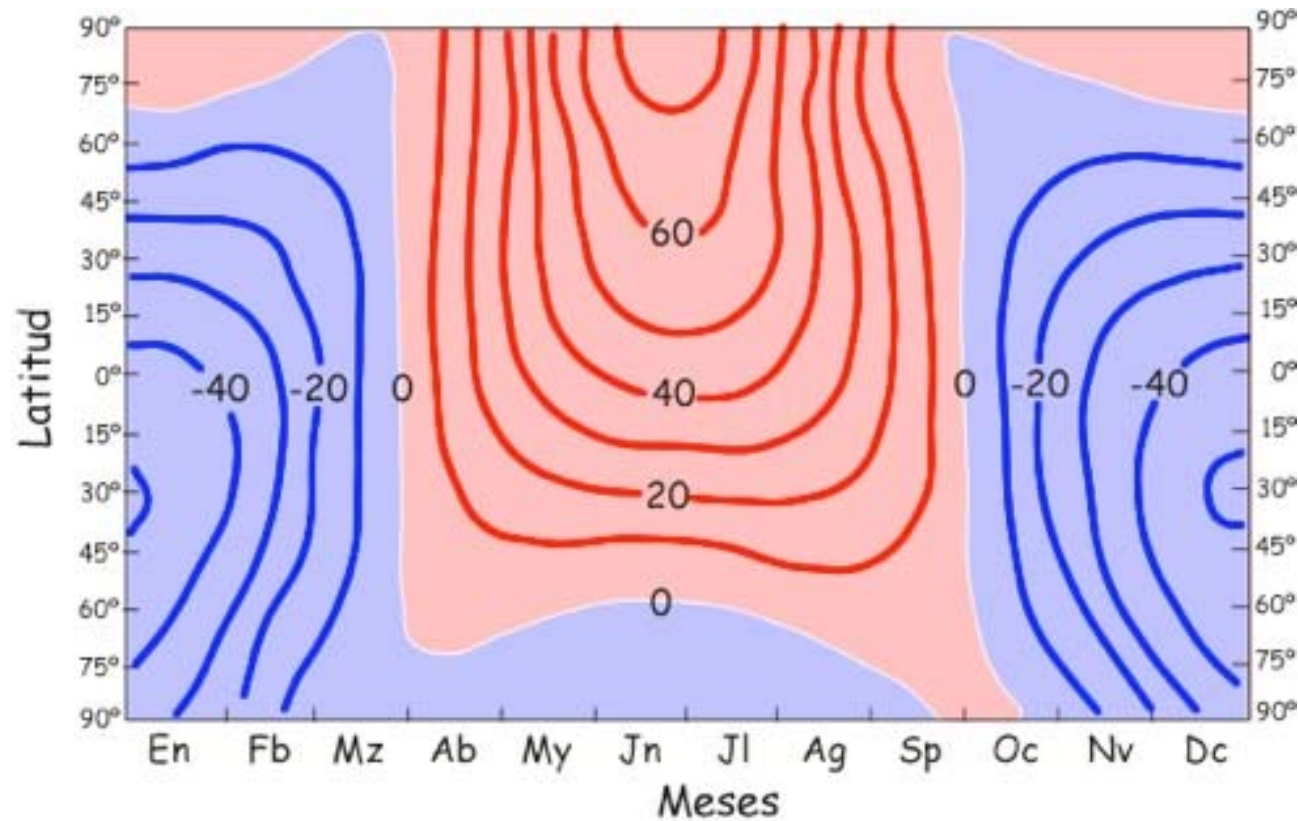
- La insolación en verano era mucho mayor en el HN que en la actualidad y en invierno mucho menor, con lo que los contrastes estacionales eran más agudos.
- Las características que hicieron que la estacionalidad fuera mucho mayor durante el interglacial fueron:
 - la excentricidad de la órbita de la Tierra era mucho mayor que la actual
 - el perihelio ocurría durante el verano del HN.
 - La inclinación del eje terrestre era también ligeramente mayor que la actual.



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



El interglacial Eemiense. Penúltimo periodo de calor del Cuaternario (hace 127.000 años).

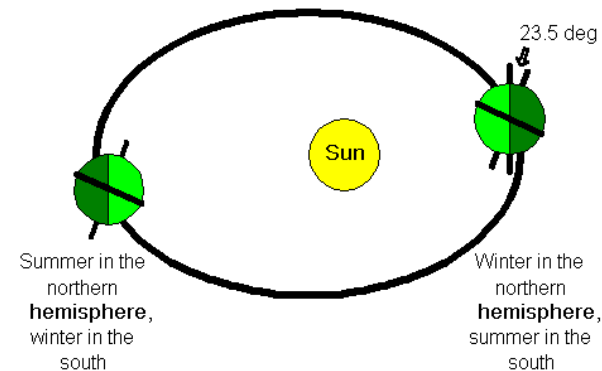
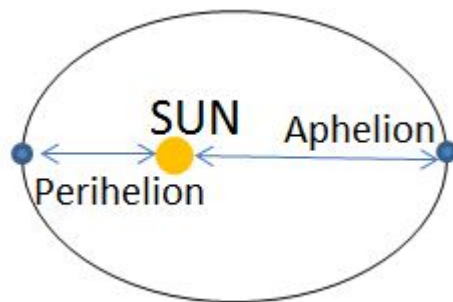


Diferencias de insolación (en W/m^2) con respecto al presente en el tope de la atmósfera según la latitud y el mes del año hace 127.000 años.

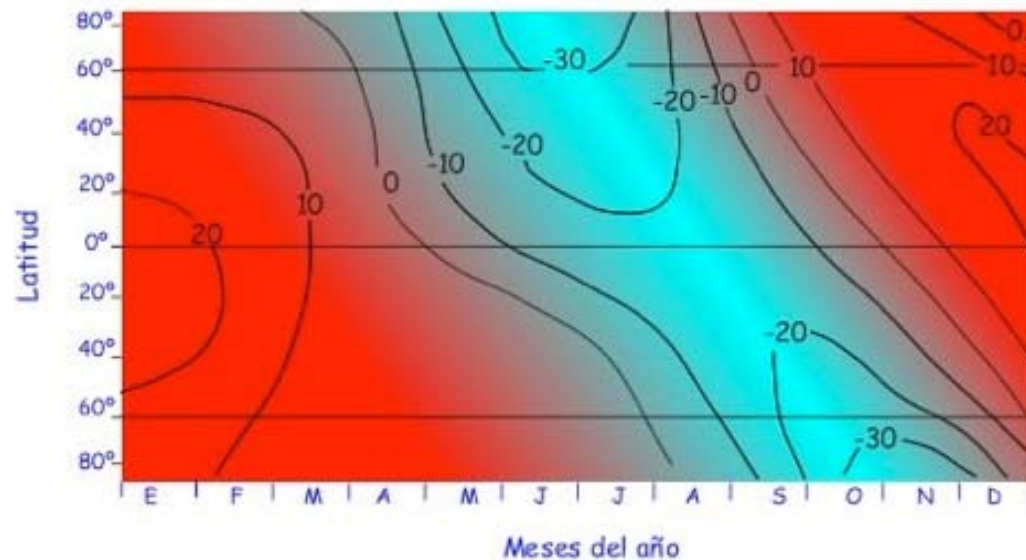
Ultima glaciación: El comienzo en el HN (hace 115.000 años)

Posibles causas:

- El perihelio ocurría en el invierno del HN y el afelio en verano, igual que en la actualidad.
- La excentricidad de la órbita era mayor y la inclinación del eje menor que los actuales.
- Esto producía un menor contraste estacional que el actual, es decir, una insolación invernal más alta y, lo que es más importante, una insolación veraniega más baja.



La Ultima glaciación: El comienzo en el Hemisferio Norte (hace 115,000 años)



Diferencias de insolación hace 115 mil años con respecto al presente (en W/m^2) según el mes y la latitud. Los valores negativos son los de la zona azul. Se observa que en el hemisferio norte la insolación era menor que ahora durante los meses de verano (Jn-Jl-Ag). En el hemisferio sur, sin embargo, los más desfavorecidos eran los meses de la primavera austral (Sp-Oc-Nv).

La Última glaciación: El comienzo en el HN (hace 115.000 años)

Proceso:

- Una vez que la nieve resistía la fusión del verano, las primeras nieves del siguiente otoño, a diferencia de lo que ocurre hoy, encontraban un terreno favorable sobre el que poder cuajar y acumularse.
- El color blanco de la nieve aumentaba el albedo, disminuía la insolación absorbida y, por un mecanismo de *feedback* positivo, facilitaba la progresiva acumulación de más nieve.
- Además, en los bordes meridionales de las regiones árticas cubiertas de nieve, los bosques de taiga se degradaban y daban paso a un paisaje de tundra mucho más claro. La blancura de la nieve caída en la tundra hizo aumentar el albedo. De esta forma se producía una agudización del frío y quedaba anulado el aumento de la insolación invernal.
- En el Océano Ártico, se produce una frenada bastante brusca de la circulación termohalina, que coincide con el aumento de la extensión de la banquisa helada, lo que favorece aún más el aumento del albedo y el enfriamiento.
- En el sur de Europa el clima se mantuvo relativamente cálido durante varios milenios más, hasta que un gran pulso de agua fría polar con icebergs procedentes de los mantos septentrionales ya formados, alcanzó la latitud de Portugal hacia el 106.000 antes del presente, comenzando la Última Glaciación.

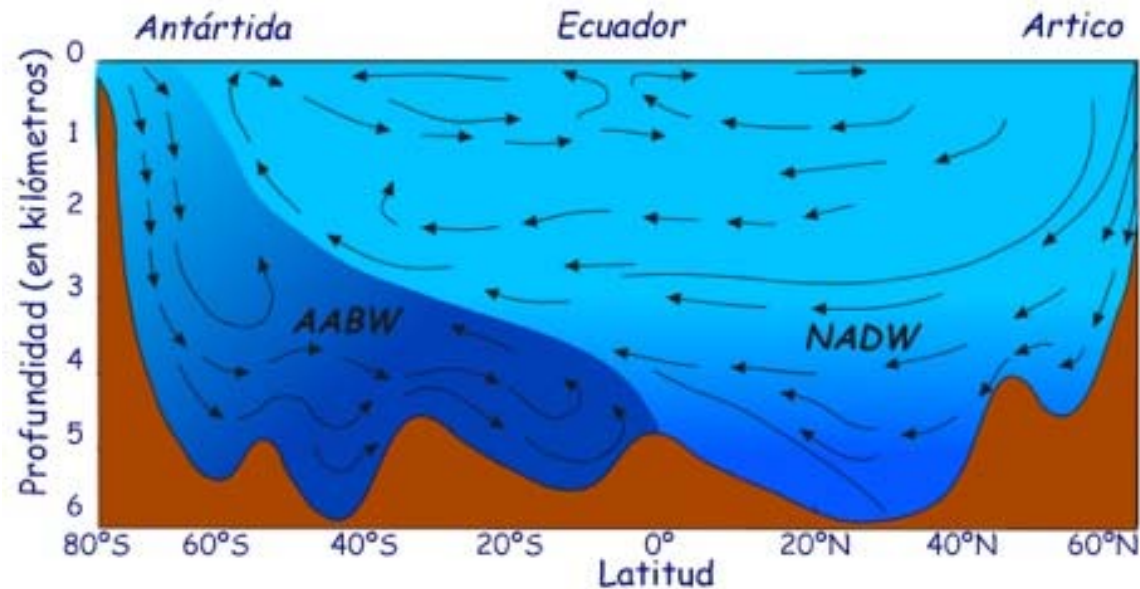
La Última glaciación: El comienzo en el HS (hace 115.000 años)

- Según la teoría clásica de Milankovitch, la glaciación debió haber comenzado en el HN. Sin embargo los yacimientos paleoclimáticos del HS indican que allí también se produjo, casi simultáneamente, un recrudecimiento del frío, con avances de los glaciares del sur de los Andes, de la Patagonia y de la banquisa de hielo que circunda la Antártida.
- El mecanismo de transmisión de la glaciación de un hemisferio a otro no está todavía muy claro.

Posibles causas:

- En el caso de que la glaciación comenzara en las latitudes altas del HN, es posible que una disminución en la circulación termohalina oceánica provocara el enfriamiento de la Antártida.
- Un posible mecanismo de agudización de la glaciación y de transmisión del frío al hemisferio austral fue la disminución a escala global de los gases invernadero: dióxido de carbono, metano y vapor de agua.

La Ultima glaciación: El comienzo en el HS (hace 115.000 años)

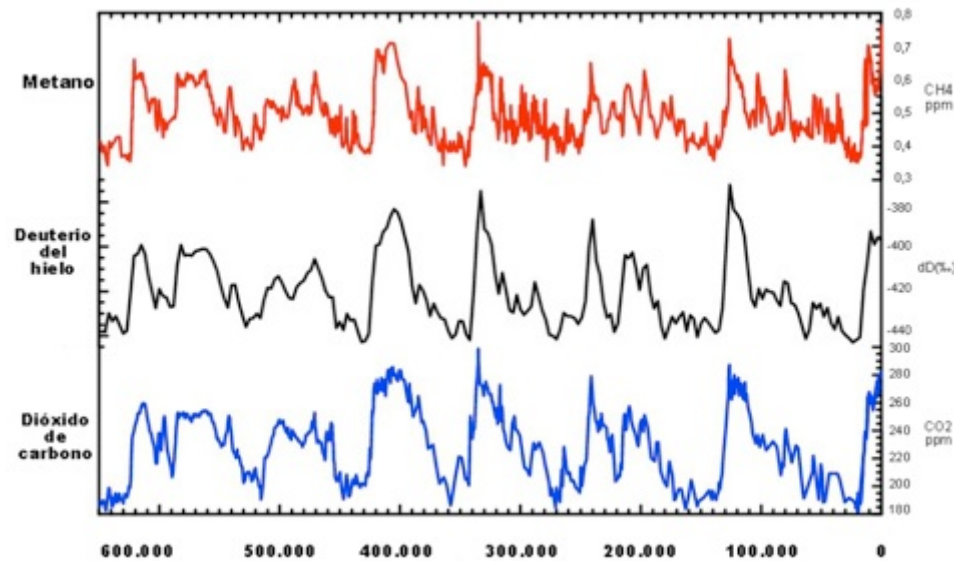


Circulación termohalina más débil:

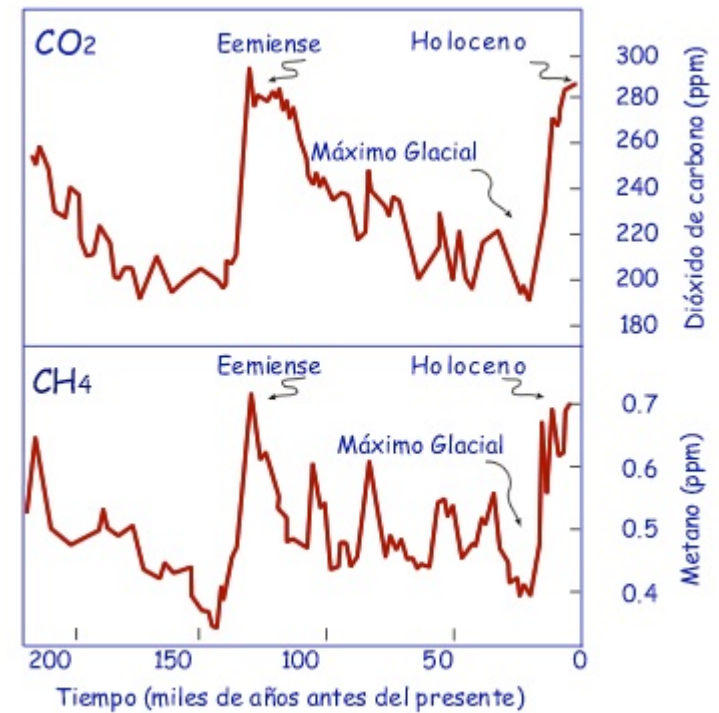
- En las épocas interglaciales, parte del agua profunda que se forma en el Atlántico Norte (NADW) aflora en los Mares del Sur tras recorrer todo el Atlántico por niveles profundos e intermedios.
- Esta masa de agua, no es tan fría como la que se forma en la costa antártica (AABW), por lo que modera el intenso frío del aire que rodea la costa del continente austral.
- Comenzada la glaciación en el HN, la circulación termohalina atlántica se debilita y disminuye ese afloramiento, por lo que las capas de agua de los Mares del Sur quedan más estratificadas y se enfrían. Consecuentemente la Antártida también se enfría.

La Última glaciación: El comienzo en el HS (hace 115.000 años)

Disminución de los gases invernadero.



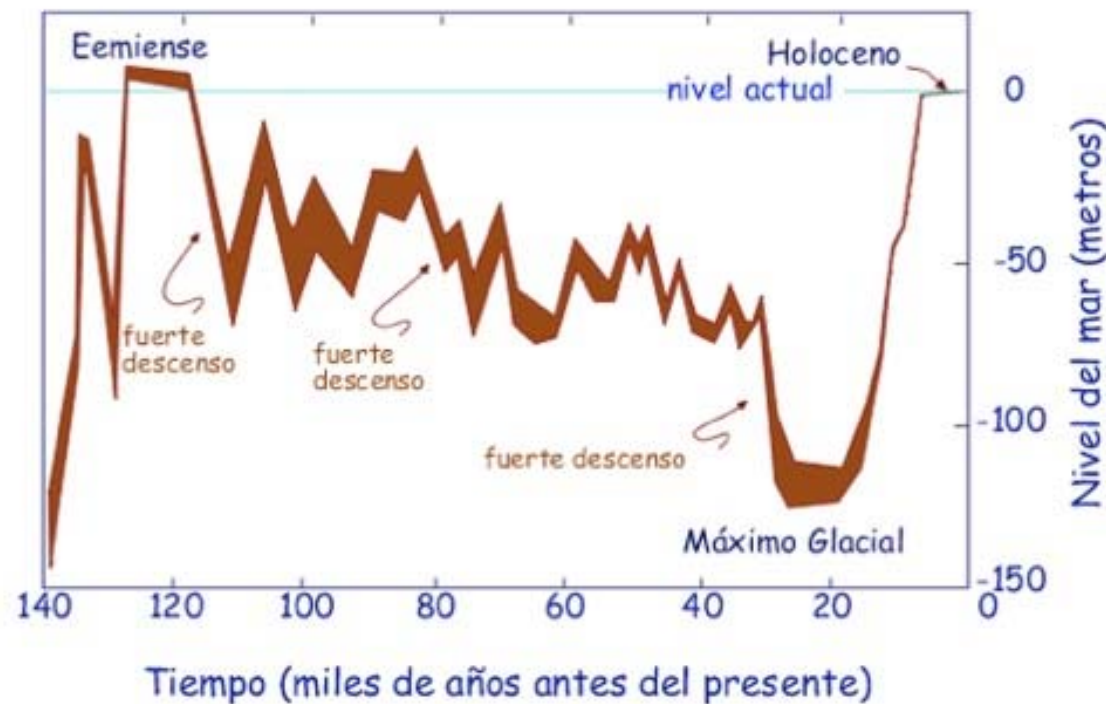
Variación de las concentraciones de metano y dióxido de carbono, y variación del deuterio del hielo (que depende de la temperatura), en los últimos 600.000 años (sondeo EPICA, Antártida).



Evolución de las concentraciones de CO₂ y CH₄ en la glaciación.

Fases en la Última Glaciación

Podemos subdividir la última glaciación en función de los tres descensos más bruscos del nivel del mar, que tuvieron lugar aproximadamente hacia el 115.000, el 85.000 y el 30.000 antes del presente.



Nivel del mar durante los últimos 140.000 años según las terrazas de coral de Huon (Nueva Guinea). Se señalan tres fases de descenso fuerte hacia el 115.000, 85.000 y 30.000 años antes del presente aproximadamente. La anchura de la línea de variación indica la incertidumbre en el análisis

Fases en la Ultima Glaciación

1. Fase Würm (115.000 – 85/75.000 antes del presente, hace 115.000 años)

- Comenzó con una primera transición al frío que en muchas partes ocurrió rápidamente.
- Se produce una disminución del volumen de agua en los océanos, por acumulación rápida de hielo continental. Esto supuso una bajada del nivel del mar en unos 50 m en pocos milenios
- Se produce un descenso de las temperaturas de las aguas abisales superior a 1.5 °C.
- Se pasó de una vegetación templada a otra mucho más fría.
- Durante los primeros treinta milenios de la glaciación, del 115.000 al 85.000 antes del presente, el tiempo se enfrió en el norte de Europa, pero no lo suficiente como para acabar con la vegetación arbórea. En el Mediterráneo central el clima se mantiene cálido casi hasta el 75.000 antes del presente, cuando se entra definitivamente en la glaciación.

2. Segunda fase (85/75.000 - 30.000 antes del presente)

- Gran acumulación de hielo en los continentes con una bajada del nivel del mar de otros 20 m, que lo situó unos 70 m por debajo del actual.
- En la Grande Pile los árboles fueron substituidos por una vegetación de tundra, con hierbas y arbustos exclusivamente.
- En el suroeste de Francia, en Villars, se detecta un enfriamiento medio superior a los 10°C durante aproximadamente esos milenios. Esta segunda fase tuvo períodos fríos mucho más largos y agudos.

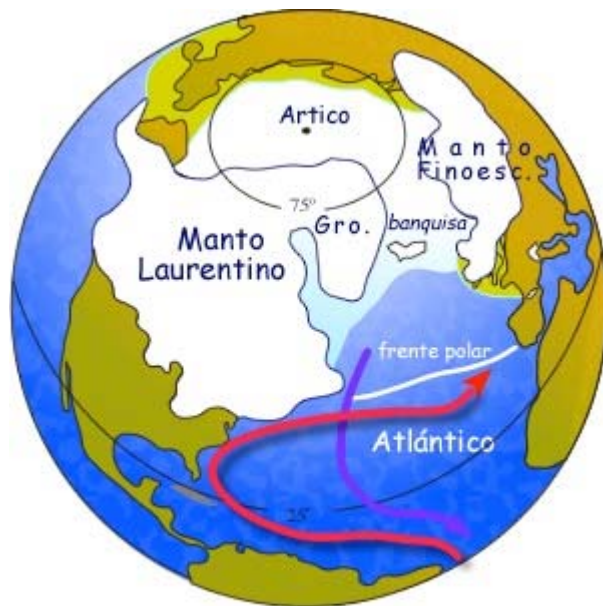
Fases en la Última Glaciación

3. Tercera fase (30.000 – 19.000 antes del presente)

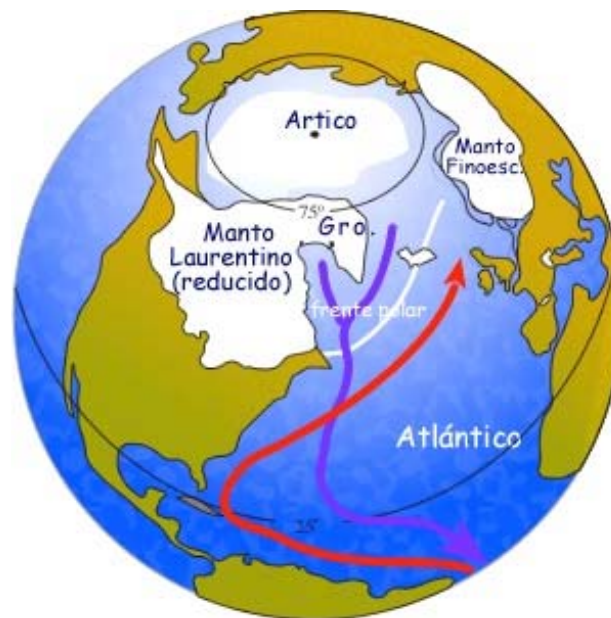
- Hacia el 30.000 comenzó a nivel global la fase más fría de la glaciación, con su fase más aguda en el llamado **Último Máximo Glacial**, entre el 23.000 y el 19.000 antes del presente.
- El nivel del mar bajó hasta una cota situada unos 120 m por debajo del actual.
- Hacia el 19.000 antes del presente el nivel del mar comienza a ascender y comienza la desglaciación que termina en el 11.500 antes del presente con la definitiva entrada en el actual interglacial Holoceno.

Inestabilidad climática durante la Última Glaciación.

- A lo largo de la glaciación, el enfriamiento no se produjo de forma uniforme, existieron episodios milenarios de agudización del frío, denominados **estadiales**.
- El frío de los estadiales se interrumpía por períodos de brusco calentamiento, llamados **interestadiales**, o, eventos de calentamiento **Dansgaard-Oeschger**. Al final de los estadiales se producían a veces en el Atlántico Norte grandes derrumbes de icebergs hacia el mar procedentes de los mantos continentales, llamados **eventos Heinrich**.
- En estos interestadiales las temperaturas continentales y marinas eran muy superiores a las de los estadiales.
- Estas variaciones eran globales.



estadiales fríos

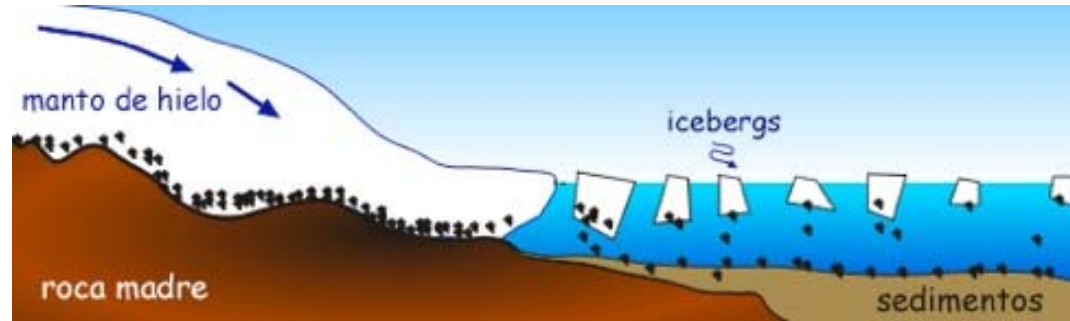


interestadiales cálidos

Diferencias en la circulación termohalina en el Atlántico durante los estadiales (izqda) y durante los interestadiales o episodios Dansgaard-Oeschger (dcha). Trazo rojo: circulación superficial; trazo morado: circulación profunda; trazo blanco: frente polar oceánico).

Ultima Glaciación: Eventos Heinrich

A lo largo de la Última Glaciación hubo 6 eventos Heinrich, en los que se depositaron en los fondos del Atlántico, en una zona comprendida entre los 40°N y los 55°N, cantidades anormalmente grandes de detritos rocosos transportados por icebergs.



Las lenguas y mantos glaciares arrancan trozos de la roca madre que acarrearán hasta el mar. Los icebergs los transportan a largas distancias hasta que el hielo se descongela y los derrubios caen al fondo del océano. Los episodios Heinrich son momentos de la última glaciación que corresponden a deposiciones intensas de estos sedimentos en el Atlántico.

Trayectoria de los icebergs en el Atlántico durante las épocas más frías de la glaciación. Se señala con una línea blanca la latitud hasta donde llegaban antes de descongelarse por completo y depositar los derrubios rocosos que acarrearán consigo.



Ultima Glaciación: Eventos Heinrich

Influencia de los eventos Heinrich en el clima global.

1. Al derretirse los icebergs disminuía la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico Norte. Disminuía la densidad del agua y se debilitaba el movimiento convectivo de hundimiento en los Mares Nórdicos. La menor producción de agua profunda en el Atlántico, se compensaba con una mayor producción de agua profunda en la Antártida.
2. Con una circulación termohalina muy debilitada en el Atlántico, la Corriente del Golfo no llegaba a las latitudes altas y se producía en superficie un avance hacia el sur de las masas de agua polares, que llegaba hasta la costas del sur de Portugal. De esta forma, durante los eventos Heinrich, aumentaba el gradiente térmico latitudinal entre las zonas tropicales y las latitudes medias y altas, provocando cambios en los transportes atmosféricos de humedad (zonales y meridianos).
3. Cuando acababan, los eventos Heinrich daban paso a una salinización de las aguas del Atlántico Norte, que era clave en la reanudación de la circulación termohalina. Se intensificaba la Corriente del Golfo subiendo de manera brusca las temperaturas de las latitudes medias-altas entrando en un periodo cálido interestadial.

Ultima Glaciación: Eventos Heinrich

Influencia de los eventos Heinrich en el clima global.

4. Salinización de las aguas del Atlántico Norte después de un evento Heinrich debido a la modificación de la circulación atmosférica, al reducirse la altura del manto Laurentino tras el colapso de hielo.

La reducción de la altura del manto Laurentino provoca un retorno a condiciones más parecidas a las actuales, es decir, a vientos del oeste no tan fríos. El mayor efecto de evaporación de estos vientos del oeste ayuda a la salinización de las aguas superficiales del Atlántico Norte, a su densificación y a la reinstalación más o menos intensa de la corriente termohalina y de la Corriente del Golfo.

Ultima Glaciación: Oscilaciones cálidas Dansgaard-Oeschger

- Eventos Dansgaard-Oeschger: fueron una veintena de picos de calor durante la Ultima Glaciación en los cuales se producían fuertes subidas de temperatura (de entre 5°C y 8°C) en espacios de tiempo muy cortos, de tan sólo una decena de años.

Posible causa:

Efecto invernadero provocado por los escapes de metano a la atmósfera provenientes:

- del subsuelo marino y costero o
- debido al aumento de humedad y biomasa en los continentes (consecuencia a su vez del calentamiento).

Ultima Glaciación: El último máximo glacial (hace 23.000- 19.000 años)

- Durante el Último Máximo Glacial el total de los hielos acumulados en los glaciares y en los mantos continentales alcanzó su mayor valor.
- Descenso del nivel de los mares. 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.
- Vastas extensiones de las plataformas continentales, hoy sumergidas, quedaron al descubierto, con lo que los cursos bajos de muchos ríos seguían entonces una trayectoria muy diferente y podían tener una desembocadura muy alejada de la que tienen hoy día.

El descenso del nivel del mar hizo que la región de Beringia, entre Asia (Siberia) y América (Alaska), quedase emergida durante la Ultima Glaciación, uniéndose los continentes de América y de Asia.



Ultima Glaciación: El último máximo glacial (hace 23.000- 19.000 años)



Europa en el Último Máximo Glacial. El norte quedaba cubierto por los mantos de hielo Finoescandinavo y Británico. Las tierras emergidas en el Mar del Norte y en el canal de la Mancha unían Francia con Inglaterra (en amarillo).



La bajada del nivel del mar en el Último Máximo Glacial permitió que se uniesen con el continente asiático las islas de Java, Sumatra y Borneo. Las islas del archipiélago de Filipinas quedaron también reunidas por las tierras emergidas. Nueva Guinea y Tasmania se unieron con Australia.

Ultima Glaciación: El último máximo glacial (hace 23.000- 19.000 años)



A medida que masas de aire muy frío superficial (en punteado blanco) son expulsadas hacia el sur desde el manto Laurentino y desde la región ártica, se crean flujos de retorno por sus bordes orientales (líneas rojas), que llevan hacia el norte aire cálido y húmedo, el cual suministra abundante nieve a los mantos de hielo. En la costa norteamericana del Pacífico, el relieve de las Rocosas (en marrón) facilita este retorno.

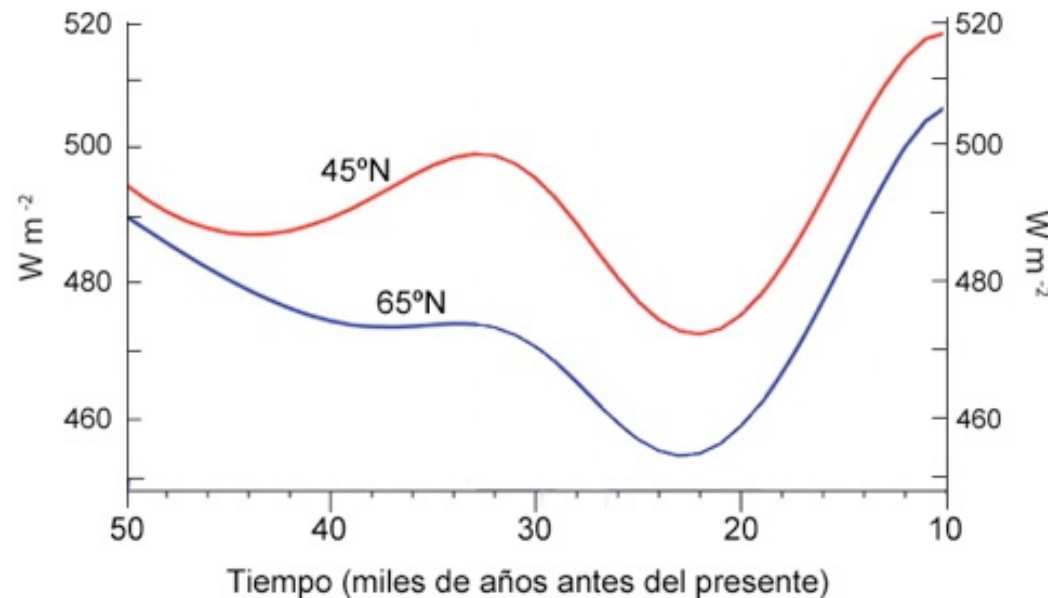
El viento y la erosión eólica fueron durante la glaciación más intensos en las latitudes medias y altas. El viento aumentó debido al contraste térmico latitudinal entre las masas de aire originadas en las latitudes altas, recubiertas de hielo, y las masas de aire originadas en zonas de latitudes más bajas, libres de hielo.

El aumento de polvo en el aire, a su vez, pudo repercutir en el enfriamiento del clima glacial de dos maneras: 1) hacía más opaca la atmósfera a la penetración de los rayos solares; 2) contribuía a la fertilización de las aguas marinas, pues, al aportar hierro, incrementaba la productividad del fitoplancton y hacía disminuir el CO₂ atmosférico.

La Desglaciación: Causas (hace entre 20.000- 8.000 años)

La fusión de la mayor parte de los casquetes de hielo en el hemisferio norte se inició entre hace 20.000 años y 19.000 años y finalizó por completo hace 8.000 años, cuando se alcanzó un volumen y extensión bastante semejante al actual.

1. La causa astronómica. El factor que disparó el proceso, según la teoría clásica, fue de índole astronómica. Veranos más cálidos.



Radiación solar media entre el 21 de junio y 20 de julio en las latitudes 45°N y 65°N en el tope de la atmósfera entre el 50.000 y el 10.000

La Desglaciación: Causas (hace entre 20.000- 8.000 años)

2. Disminución del albedo.

Una vez iniciado el retroceso de los hielos: en las altas latitudes de Norteamérica y de Eurasia, el bosque boreal, recuperaba terreno a la tundra e hizo disminuir el albedo del paisaje aumentando la temperatura.

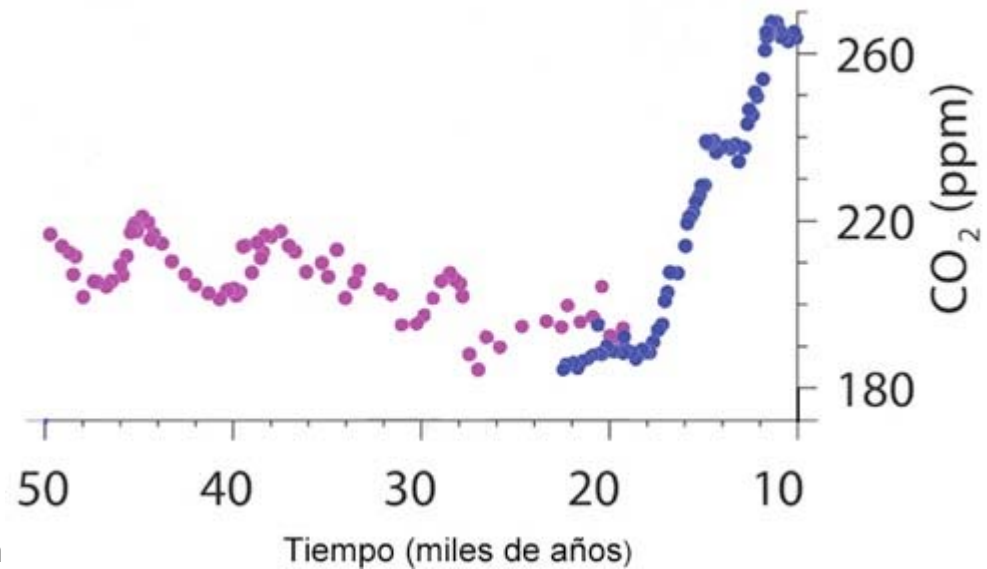
El aumento de calor estival en las regiones subárticas hizo que disminuyese la extensión de la banquisa ártica, disminuyendo el albedo allí donde desaparecía el hielo.

3. Aumento de los Gases de efecto invernadero

El incremento de los gases invernadero aceleró la descongelación y contribuyó a que fuese global y no solamente en el HN.

El dióxido de carbono.

La concentración del dióxido de carbono en la atmósfera aumentó en casi 100 ppm y contribuyó al calentamiento. En el transcurso de la desglaciación pasó de unas 180 ppm a más de 260 ppm.



Incremento del CO₂ durante la desglaciación

La Desglaciación: Causas (hace entre 20.000- 8.000 años)

El metano.

Se duplicó pasando de 0.4 ppm a 0.7 ppm.

Esto produjo un aumento radiativo directo de unos 0.3 W/m².

La subida térmica atribuible en sí a este aumento, sin otros efectos indirectos, sería tan sólo de alguna décima de grado.

El óxido nitroso (N₂O).

El incremento de su concentración atmosférica fue de 0,19 ppm a 0,27 ppm en el transcurso de la desglaciación.

Supuso un forzamiento radiativo directo de unos 0,3 W/m², semejante al del metano.

Al igual que el metano, sus variaciones durante la desglaciación siguieron la evolución de las temperaturas.

El vapor de agua.

El aumento del vapor de agua contenido en la atmósfera fue posible gracias al aumento de la temperatura del aire, lo cual reforzó decisivamente el efecto invernadero y el calentamiento.

El Younger Dryas (hace 12.900 años)

- Tras el calentamiento, el clima europeo recayó en un período de nuevo muy frío, el Younger Dryas. Empezó y acabó súbitamente hacia el 11.600 antes del presente.
- En las tierras meridionales de Europa desaparecieron los árboles y fueron substituidos otra vez por una vegetación muy pobre la tundra.
- Las temperaturas de invierno en Europa volvieron a ser muy bajas.

Posibles Causas:

- El sistema de corrientes del Atlántico se debilitó abruptamente y adoptó un modo parecido al que tenía durante los períodos más fríos de la glaciación.
- En el Atlántico, las aguas superficiales polares avanzaron otra vez hacia el sur, hasta la latitud de la Península Ibérica.
- Las aguas templadas que transportan la corriente del Golfo y la Deriva Noratlántica apenas lograban llegar hasta la latitud de la Península.

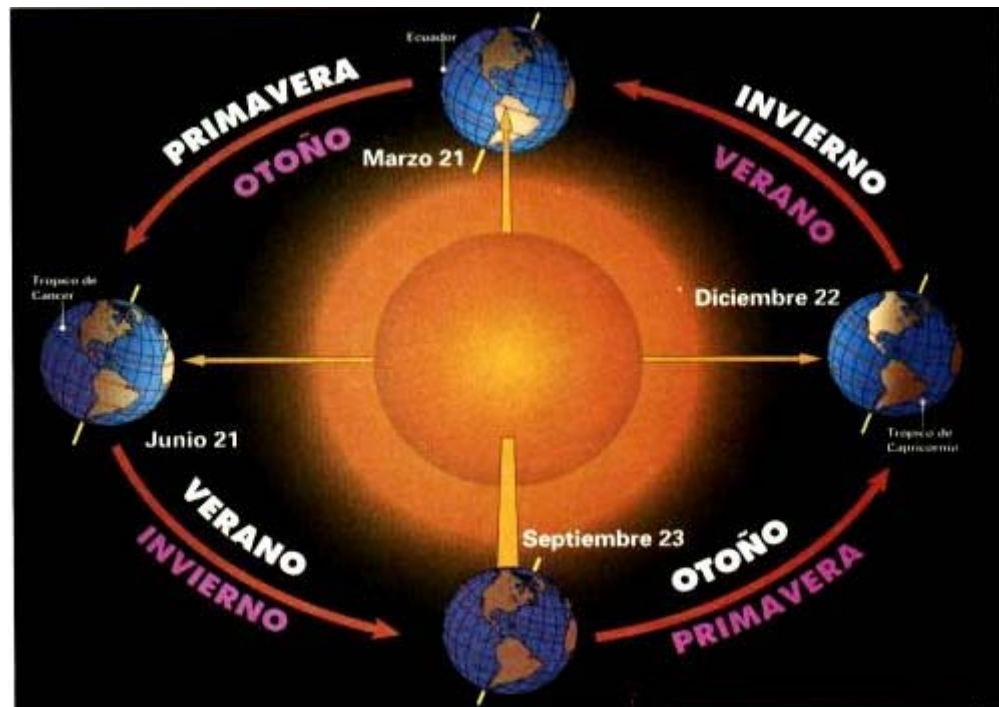
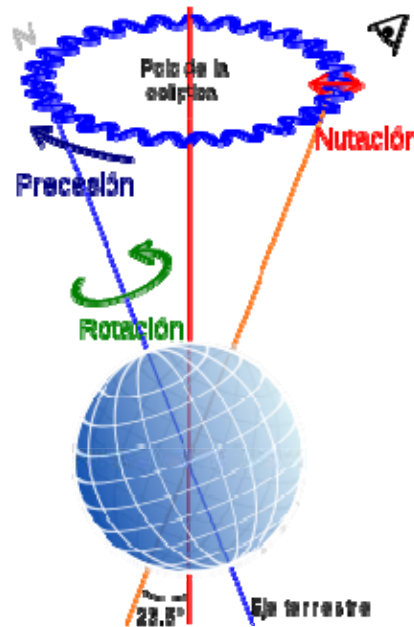
El Younger Dryas (hace 12.900 años)



Norteamérica y el Atlántico Norte en el Younger Dryas.

El Holoceno: Ultimo periodo interglacial (hace 12.900 años)

- Este periodo se caracteriza por una importante variación térmica debida a la paulatina disminución de la insolación veraniega en el hemisferio norte.
- La insolación veraniega en el hemisferio norte en el inicio del Holoceno era un 8% superior a la actual, mientras que la de invierno era menor debido a la precesión de los equinoccios que alcanzaron un máximo hace 11.000 años. Por lo tanto, en la primera mitad del Holoceno, la diferencia estacional de insolación en el hemisferio norte era bastante mayor que la diferencia que existe en la actualidad.
- Los cambios de este reparto estacional de la radiación solar repercutieron en la evolución de algunas características importantes de la circulación atmosférica y, sobre todo, en la humedad continental.



El Holoceno: Primera mitad (entre hace 6.000 y 4000 años)

- África, Asia y América eran más húmedas
- El Sahara, la Sabana y Oriente Medio más áridos

Posibles causas: (hace 6000 años)

Existían diferencias orbitales importantes con respecto al presente:

- a) mayor excentricidad de la órbita (0.0187 frente a 0.0167)
- b) mayor inclinación del eje terrestre (24.1° frente a 23.4°)
- c) diferente fecha del perihelio (a mediados de Septiembre en vez de a principios de Enero, como ahora).

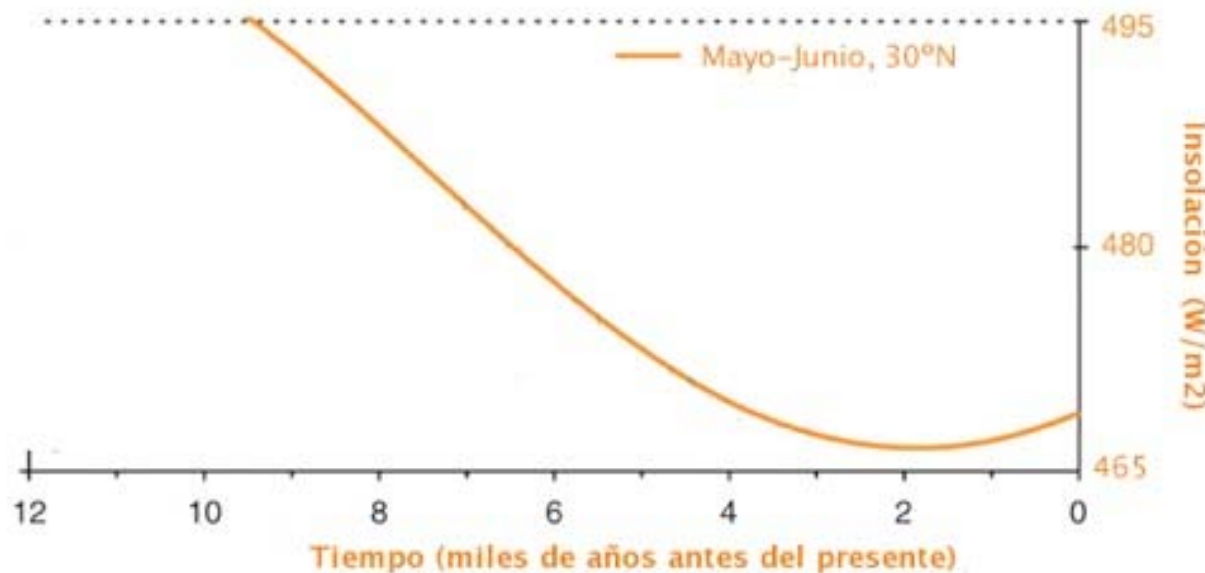


Paisajes de Africa hace 6.000 años



El Holoceno: Primera mitad (entre hace 3.500 y 4000 años)

Con la reducción de la insolación veraniega, las bajas presiones del continente, producidas por el calentamiento estival, se fueron haciendo menos profundas, con lo que disminuyó la succión de humedad desde el Atlántico. Las lluvias que traían desde el sur los monzones de verano se debilitaron.



Disminución de la insolación veraniega en 30°N

El Holoceno en Europa: Holoceno Medio

El fenómeno más importante fue la brusca inundación del Mar Negro (hace 5.500 años).

La teoría es que antes del 5.500 se produjo un período de enfriamiento y de aridificación en el sur de Europa, de tal forma que el nivel de las aguas del Mar Negro bajó, y además perdió el contacto con el Mar Mediterráneo, convirtiéndose en un gran lago hundido de agua dulce.

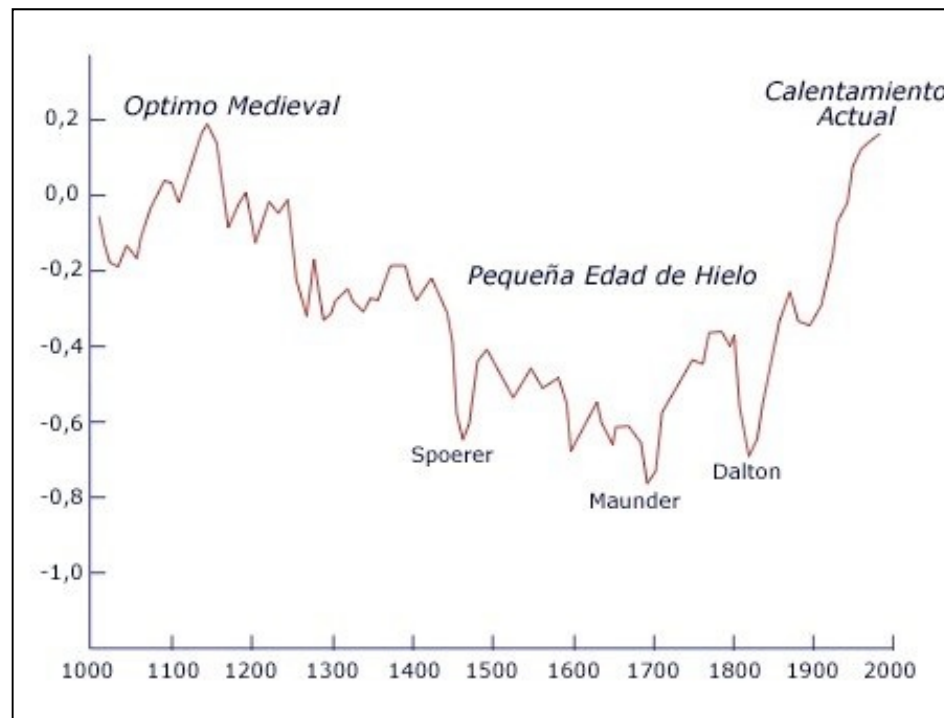
Después, una ligera subida del nivel del Mediterráneo hizo que de nuevo se abriese por el Bósforo una grieta de contacto entre los dos mares. Al estar la superficie del Mediterráneo muy por encima del nivel del Mar Negro, la erosión hizo que la grieta se convirtiese pronto en una enorme cascada de agua salada. Esto explicaría la aparición súbita de moluscos en los sedimentos del Mar Negro correspondientes a esa fecha. Un torrente de agua, semejante a 200 veces las cataratas del Niágara, se vertió durante 1.000 días sobre aquel lago, haciendo que su nivel se elevase 150 metros.

Mar Negro. En azul claro zonas emergidas y posteriormente inundadas.



El clima del último milenio

Es muy probable que en el último milenio, hayan existido dos períodos con diferencias térmicas apreciables: un **Período Cálido Medieval** y una **Pequeña Edad de Hielo** posterior, a los que ha seguido un **calentamiento reciente**. Existen, sin embargo, bastantes incertidumbres sobre la duración y el alcance espacial de estos períodos.



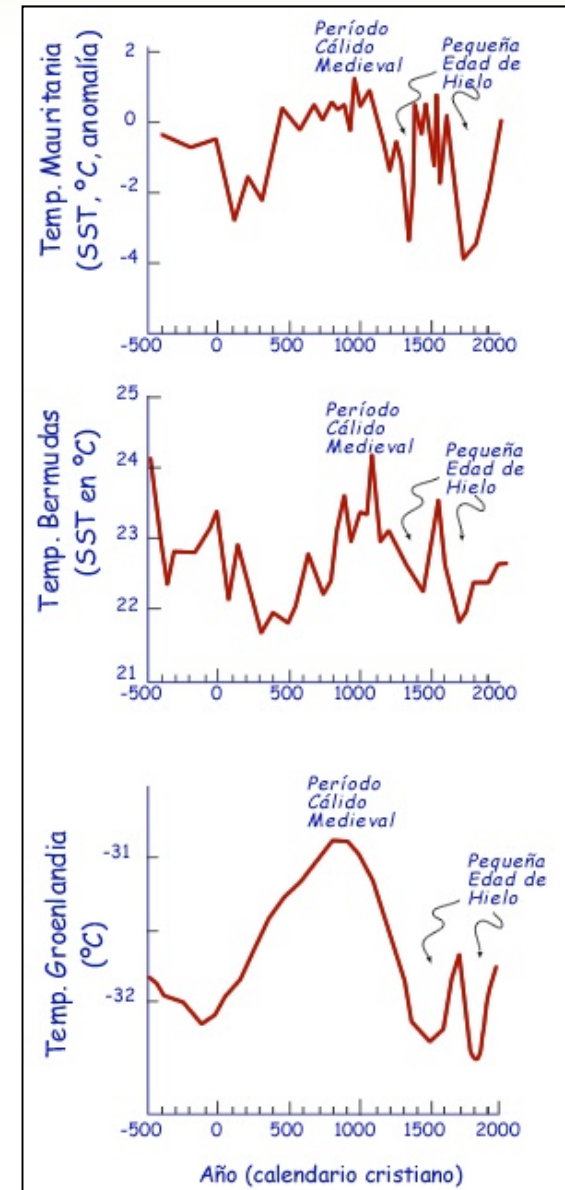
Evolución de la temperatura del hemisferio norte en el último milenio, según una simulación basada en la temperatura del subsuelo (boreholes) (fuente: González-Rouco, 2003)

El Clima del último milenio: Período cálido medieval (1000-1300)

Posibles causas:

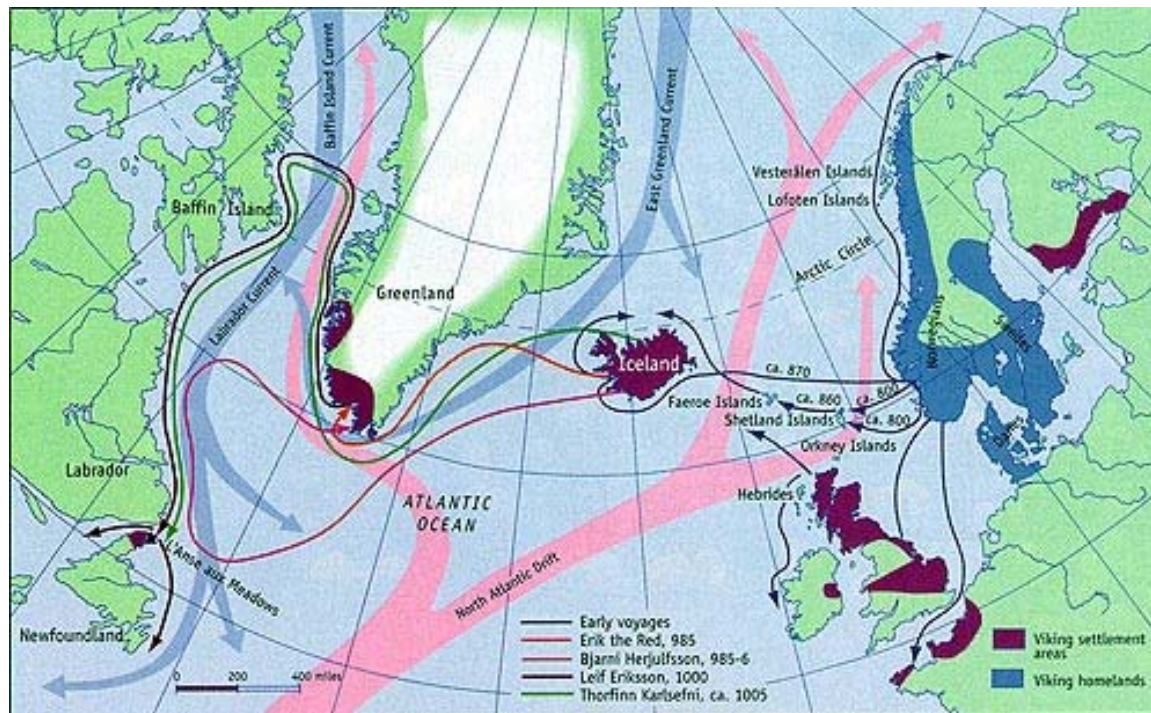
- Coincide con un período de mayor actividad solar.
- Cambios en la intensidad de la circulación termohalina.

Evolución de las temperaturas de la superficie del mar en los últimos 2.500 años en la costa de Mauritania, en las Bermudas y en Summit, Groenlandia (de Menocal , 2000).



El Clima del último milenio: Período cálido medieval (1000-1300)

- El clima en Europa fue por lo general más cálido que el actual. El apogeo del período debió alcanzarse hacia el año 1100.
- El cultivo de la vid se extendió por el sur de Inglaterra.
- El Mediterráneo debió sufrir sequías más agudas.
- El nivel del Mar Caspio descendió.
- Los glaciares suizos se retiraron a cotas más altas.
- Historiadores medievales creen que la población de Europa se multiplicó por tres o cuatro coincidiendo con un clima óptimo que favoreció la actividad agrícola.



- Producción de vino en buena parte de Europa y el sur de Inglaterra. Hoy en día persisten topónimos como Vine Street o Vineyard en Londres.
- Los vikingos colonizaron Groenlandia.
- Disminución de los hielos Árticos.
- Crecimiento de especies arbóreas en zonas altas de los Alpes.

El 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 en especial dos pulsos de frío separados en el tiempo:
 - uno al principio, en el nefasto siglo XIV,
 - al final del período, en la primera mitad del siglo XIX.

Posibles causas:

- Menor actividad solar. Mayor actividad volcánica. Mayor albedo.

Consecuencias:

- Gran hambruna 1315-1317. Murió entre 10-20% de la población.
- Río Támesis y los canales de Holanda congelados 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 se inundó al menos 13 veces por el Níger.
- Madera de los árboles más densa debido al frío. Violines de Antonio Stradivari.

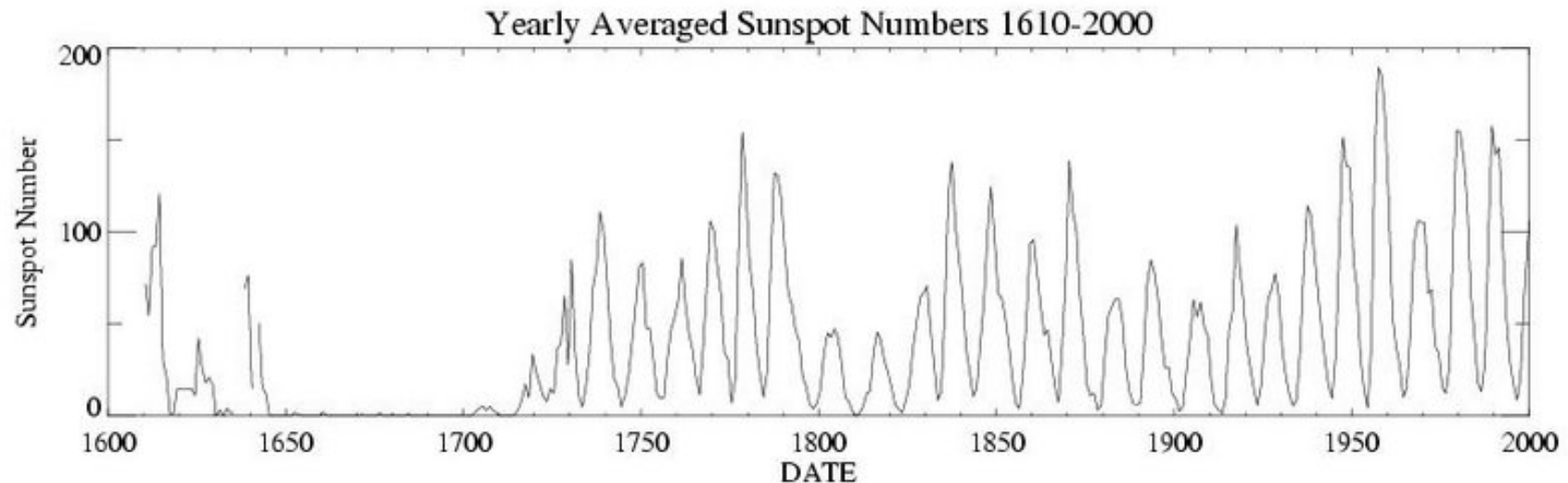
El Clima del último milenio: Pequeña Edad de Hielo (1300-1850)



Celebración de ferias sobre el támesis.



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



- Han existido diversos períodos de excepcional debilidad solar durante el último milenio. Son los períodos de Wolf (hacia el año 1300), Spoerer (hacia el año 1500), **Maunder** (entre 1645 y 1715) y Dalton (1800-1830).
- Probablemente fueron precedidos por un período de máxima actividad solar, el Máximo Solar Medieval (entre el 1000 y el 1300)

El **IPCC** define la pequeña edad del hielo como un enfriamiento '*modesto*' del hemisferio norte (menos de 1°C). Las evidencias actuales no confirman períodos globales de enfriamiento y fenómenos tales como el *período cálido medieval* o *la pequeña edad del hielo* parecen tener solamente una utilidad limitada para describir cambios globales.

El Clima del último milenio: Mínimo de Maunder (1645- 1715)

- De los períodos de debilidad solar, el más anómalo y mejor conocido es el Mínimo de Maunder.
- Las manchas casi desaparecieron por completo.
- En Europa se vivieron inviernos muy crudos, como el de 1694-1695
- El Támesis permaneció helado durante varias semanas.
- Picard, del Observatorio de París, escribía un día de 1671 que le hacía feliz haber descubierto una mancha ya que llevaba diez años auscultando el Sol cuidadosamente sin haber visto ninguna.
- La “constante solar” durante el Mínimo de Maunder fue unos 3.5 W/m^2 menor que la actual, es decir, un 0.24 % más baja. El enfriamiento global provocado por esta disminución de insolación, en la superficie terrestre fue de entre 0.2 y 0.6 °C, pero en algunas regiones como el norte de América y el norte de Europa el enfriamiento parece que fue mayor: entre 1°C y 2°C.

CAUSAS

Las variaciones de radiación son cuantitativamente demasiado pequeñas como para explicar por sí solas los cambios térmicos ocurridos desde el año 1645.

Pero tengamos en cuenta que el frío invernal se pudo ver amplificado por:

- Una circulación de los vientos del oeste menos intensa y menos zonal
- Un jet polar más lento y divagante
- Aumento de los anticiclones de bloqueo
- Una menor influencia suavizadora del Atlántico en el continente

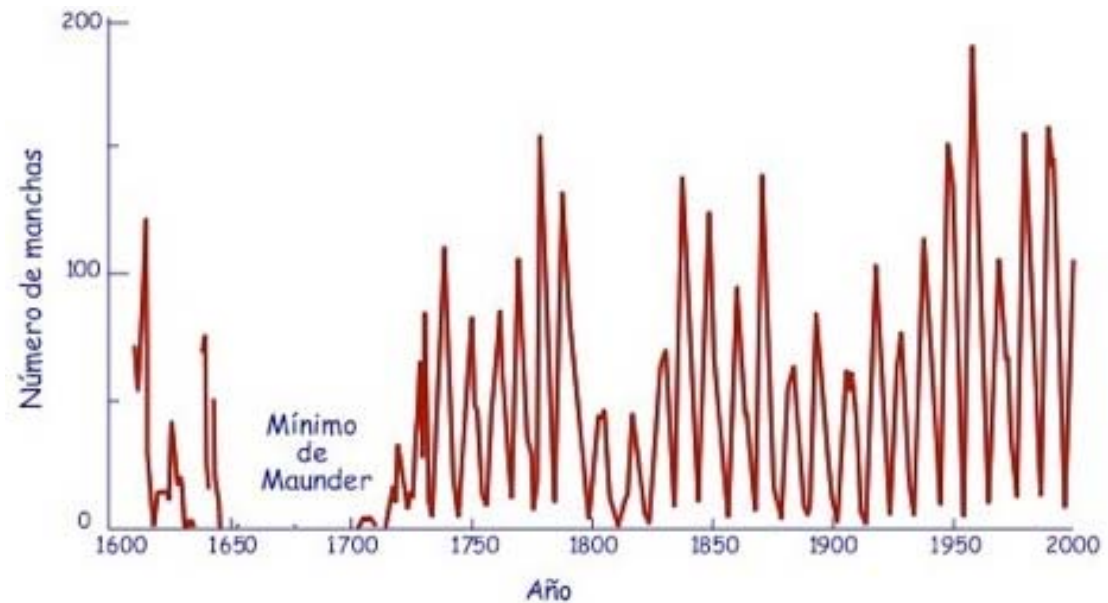
El Clima del último milenio: Mínimo de Maunder (1645- 1715)

CAUSAS

Las variaciones del flujo energético solar repercuten más en la parte del espectro radiativo de las radiaciones ultravioletas, las responsables de la creación de ozono.

La disminución de ozono durante el Mínimo de Maunder, debido a la baja intensidad de las radiaciones ultravioletas, sería lo suficientemente importante como para enfriar la baja estratosfera y modificar directamente la circulación estratosférica e, indirectamente, la circulación troposférica.

Otros investigadores, sin embargo, creen que el modelo de evolución de la radiación solar de Lean es demasiado especulativo y no ven que haya correlación entre los cambios en la energía ultravioleta incidente y la temperatura media global.



Erupciones volcánicas

- Las erupciones volcánicas han ocasionado a escala global enfriamientos modestos y de corta duración.
- Es importante la intensidad de las erupciones, la altura alcanzada por las eyecciones y su localización geográfica.
- Si se producen en las latitudes tropicales, los aerosoles sulfatados, en el caso de alcanzar la estratosfera, se reparten por todo el globo, llevados por los flujos generales de vientos que circulan a esa altura desde la zona tropical hacia los polos.
- Si por el contrario se producen en latitudes altas, difícilmente pueden tener una repercusión global, ya que las eyecciones se sedimentan sin llegar al Trópico.

Erupciones del último milenio:

Volcán Huaynaputina (Perú, 1600).

Volcán Laki (Islandia, 1783).

Volcán Tambora (Isla de Sumbawa, al este de Java, 1815).

Volcán Krakatoa (oeste de Java, 1883) .

Volcán Katmai (Alaska, 1912).