

Semana 5: Los Últimos 100 Ma

La semana pasada, habíamos conversado acerca de la estabilidad del promedio global de temperatura a largo plazo, específicamente, a través de cientos de millones de años. Discutimos los factores que quizás regulan la temperatura, como el ciclo hidrológico y el ciclo del carbono. A su vez, discutimos acerca de las fluctuaciones de la temperatura promedio, especialmente el registro de las edades de hielo, y factores generalmente asociados con la tectónica de placas, que pueden controlar estas fluctuaciones, probablemente a través del ciclo del carbono.

Hoy nos enfocaremos en el paleoclima de los últimos 100 Ma (Fig 1.1 Kump climate figure), o del Cretácico y Terciario. Los registros geológicos son mucho más completos para esta etapa, y exploraré estos paleoclimas un poco más en detalle. Por ejemplo, hablaré sobre los patrones en el cambio de la temperatura que se refieren, no solo a su promedio global, sino también a los cambios abruptos en la temperatura. Con estos detalles podemos aprender más sobre el comportamiento del sistema climático, y cuales serían los factores que provocan los cambios climáticos.

Empezaré con el invernadero del Cretácico, un periodo frecuentemente utilizado como modelo del mundo invernadero del futuro. Después de este periodo, la temperatura disminuyó hasta las edades de hielo actuales. Hablaré acerca de este deterioro del clima, y sobre algunas teorías que explican porque el clima se enfrió después de los periodos cálidos.

Después hablaré brevemente sobre el ciclo del carbono en el corto plazo, porque me parece que algunos de ustedes no han estudiado este tema.

I. El Invernadero-El Cretácico medio y Eoceno Temprano

A. Paleogeografía

En el Cretácico, la paleogeografía era distinta que la de hoy (Fig. 1.2 Paleogeography). Recuerden que Pangea empezó a fragmentarse en el Jurásico, en torno a los 175 millones de años, y esta fragmentación continúa hasta el presente. 100 millones de años atrás, la tasa de expansión era rápida con un nivel del mar elevado, unos 100 a 200 m más que el actual. En ese entonces existían océanos poco profundos que cubrían grandes extensiones de los continentes. El Atlántico estaba recién apareciendo, y no existían las grandes cadenas montañosas de hoy, como los Andes y los Himalaya. Además, la Cordillera de Norteamérica, las Rocallosas, eran mucho más angostas que hoy. Sudamérica estaba un poco más al sur que hoy, y estaba completamente asilada.

B. Paleoclima

En general, el paleoclima del Cretácico era cálido y húmedo, un invernadero. Hay tres observaciones muy importantes acerca de este paleoclima.

1. La temperatura promedio era elevada

El periodo entre 90 y 100 Ma posiblemente fue el periodo más cálido en la historia de la Tierra. Los científicos estiman que el promedio de la temperatura global fue de 6 - 9 °C más que la de hoy.

¿Como sabemos esto? En el fondo del mar, existe una lluvia constante de foraminíferos muertos, y sus conchas forman parte de los sedimentos del suelo oceánico. Si se saca un testigo de estos sedimentos, y se mide la proporción de oxígeno 18 y oxígeno 16 en los foraminíferos, se puede estimar la paleotemperatura de formación de la concha. El método funciona así: cuando el carbonato de calcio (CaCO_3) cristaliza de manera lenta en el agua para formar la concha del foraminífero, el Oxígeno 18 está más concentrado en el carbonato de calcio en comparación con la que esta en el agua. Este proceso es dependiente de la temperatura del agua. El efecto de concentración de Oxígeno 18 en el carbonato de calcio disminuye a medida que sube la temperaturas. Por lo tanto, los valores ^{18}O en carbonato de calcio son más altos, o pesados, en agua frías que en agua cálidas.

Pero esta relación entre la temperatura y el ^{18}O no es perfecta, porque influye la evaporación. En los periodos glaciales, las aguas isotópicamente ligeras (enriquecidas en Oxígeno 16) son evaporada de los océanos y guardada en las capas de hielo. Entonces, cuando existen glaciares, los océanos son enriquecidos en Oxígeno 18. Entonces, cuando se ve un cambio a través del tiempo de la composición isotópica de los foraminíferos, se necesita determinar si el cambio es a causa de un cambio en la temperatura del océano, o a un cambio del volumen en las capas de hielo. Anita hablará más sobre este método, que probablemente sea el método más importante para reconstruir las paleoclimas de los últimos 100 Ma

A su vez, se puede usar la distribución, composición, y morfología de los ensamblajes de plantas e animales. Eugenia y Fernanda presentarán algunos de estos indicadores, y también existe un informe en la Web sobre la morfología de hojas.

2. Hubo una gradiente reducida de temperatura entre el ecuador y los polos

Basado en datos de isótopos de oxígeno y de los métodos biológicos, el calentamiento fue mucho más fuerte en los polos que en el ecuador (Fig 1.3 gradient). Las temperaturas en el ecuador eran similares a las de hoy, al menos entre los errores del método ($\pm 2^\circ\text{C}$). El zona tropical fue más ancha; con arrecifes de coral y otros organismos cuyos hábitats actuales son los trópicos, que crecían 5 a 15° de latitud más cerca de los polos que en el presente.

Los polos fueron mucho más cálidos que hoy, alrededor de 20 a 60 grados más cálidos. Los polos tenían los PATs entre $6 - 10^\circ\text{C}$ y los promedios mensuales del mes más frío eran por encima de los 0°C . Entonces parece que no hubo hielo. En los polos, habían cocodrilos, que no pueden soportar climas muy fríos, y floras diversas que crecían en latitudes muy altas. Estas selvas eran muy extrañas, porque había calor, pero para la mitad del año, no había luz. No hay vegetación moderna análoga de estas floras porque los arboles no crecen tan cerca al polo; la línea de los arboles se encuentra en su punto mas al norte a latitudes hasta 72° . Esta vegetacion estaba dominada por arboles caducos con hojas anchas, y coníferas caducas como Metasequoia. Los arboles tuvieron hojas grandes, probablemente porque con la altitud solar baja, las hojas grandes pueden captar mas luz.

3. Los interiores de los continentes eran cálidos

Basado en floras fósiles, parece que no habían escarchas duras en los interiores de los continentes de Norteamérica, Asia, y Australia. Entonces se dice que el clima Cretácico fue “equable” o casi invariable, sin extremos de estacionalidad.

C. Datos vs. Modelos

Estas observaciones acerca del mundo invernadero del Cretácico son muy interesantes, porque en este periodo es un modelo posible del futuro, pero no hay ningún modelo climático que puede reproducir la combinación de la baja gradiente latitudinal e interiores continentales cálidos. Algunos llaman el problema de los “equable climates”, o los climas casi invariables. La gran pregunta es: el problema es con los datos paleoclimáticos, o con los modelos?

Como he dicho antes, sospecho más sobre los modelos, pero hay posibilidades de que existan problemas con los datos. Lo más importante puede ser que hubo alguna alteración de los foraminíferos después de su deposición (*diagénesis*). Si las conchas recrystalizaron, reflejan la temperatura del fondo marino y no la superficie. Esto no es un gran problema en los polos, ya que se usan foraminíferos bentónicos, y no existe mucha diferencia en la temperatura del agua. Pero para estimar la paleotemperatura de la superficie en los trópicos, se usan foraminíferos planktónicos de la superficie, y hay una gran diferencia en la temperatura de la superficie y el fondo. Crowley y Zachos han estimado que las temperaturas de los trópicos pueden estar sobrestimados en 1.5°C o subestimados en 3°C . Si son demasiado fríos, estamos subestimando la gradiente latitudinal. Yo sospecho que esto no es un gran problema, porque Crowley y Zachos han mostrado que una gradiente muy baja es una característica de muchos periodos cálidos, y es un poco difícil creer que siempre existe este problema.

A su vez, puede ser que estamos subestimando el volumen del hielo, entonces los cálculos de temperatura están en error. Esto es posible, por que hay evidencia de fluctuaciones muy rápidas en el nivel del mar, y generalmente se necesita hielo para crear fluctuaciones tan rápidas. Pero es un poco difícil reconciliar glaciares con las pruebas del calor de los polos y las interiores de los continentes.

También hay posibilidades que los problemas están en los modelos. Por ejemplo, los modelos no simulan la circulación oceánica de manera sofisticada, o como he discutido antes, pueden ser problemas con los bucles de retroalimentación de los modelos. Por ejemplo, es probable que no simulan bien la formación de nubes.

D. Porque la Tierra estaba caliente?

Ahora, voy a hablar un poco sobre los factores que quizás causaron el inviérnadero. Hay cinco factores principales propuestos para explicar el calor: la paleogeografía, el albedo, los gases invernaderos, el transporte oceánico, y el transporte atmosférico.

1. Paleogeografía

Los modelos climáticos sugieren que la paleogeografía Cretácica, con el nivel del mar alta y los continentes más al sur, solo explica una pequeña parte de la temperatura promedio alta.

Eso es porque las posiciones de los continentes en latitudes bajas y medias tienden a tener más efecto en la estacionalidad y menos sobre el promedio de la temperatura. Pero para los continentes cerca a los polos, sus posiciones pueden tener un efecto importante a través de otro factor climático, por ejemplo, si las temperaturas en veranos son críticas para el crecimiento de hielo (climate system)

Usando paleogeografía realista en los modelos climáticos puede ayudarnos con el problema de los interiores de los continentes cálidos. Sloan descubrió si incluyó los lagos grandes y los océanos epicontinentales en sus modelos, moderaron las temperaturas de los interiores, especialmente las temperaturas de los inviernos. Recuerden que agua tiene más capacidad de almacenar calor que tierra (Lake Titicaca example). Pero todavía, no podemos reconstruir las temperaturas cálidas de los interiores.

2. Albedo

Una explicación por el calor impresionante de los polos es el albedo. La vegetación tiende a calentar el clima, porque tiene un albedo bajo. Por ejemplo, cuando se pone la vegetación en latitudes altas en los modelos climáticos, calientan la temperatura global alrededor de 2 °C (Fig 2.1-temp change). La vegetación calienta la tierra, que calienta el océano adyacente.

Entonces con vegetación en los polos en lugar de hielo y un mar alta, el albedo es mucho más bajo. Entonces los polos absorben más calor, y los polos se calientan. También la altura de los polos es mucho menos sin las capas de hielo, que recuerden, ahora pueden alcanzar 4000 m. Entonces la vegetación puede ayudarnos explicar los polos cálidos, y quizás también los interiores de los continentes cálidos. Pero no pueden explicar todo el calor de los polos.

Puede ser que había un cubierto de nubes diferente. Por ejemplo más nubes altas en los polos tendrían a calentar los polos.

3. Gases invernaderos - CO₂

Siempre sospechamos CO₂ cuando el clima global es más caliente. El modelo del ciclo de carbono de BLAG estima que la cantidad de CO₂ en el Cretácico era elevada, porque había mucho vulcanismo y un nivel del mar alto (Fig 2.2 BLAG curve). También, los registros de CO₂ sugieren que la cantidad de CO₂ era alta, alrededor de quizás 2000 ppm. Pero recuerden que estos registros tienen grandes incertidumbres.

CO₂ es un gas invernadero bien mezclada en la atmósfera. Entonces, una característica importante es que un incremento de CO₂ calienta el mundo entero por el mismo monto, no unas latitudes más que otras.

Los modelos climáticos pueden explicar las temperaturas de los polos con la falta de hielo y una cantidad de CO₂ 4 a 8 veces mas que la de hoy. Pero los modelos predicen que veríamos también un calentamiento significativo en el ecuador (Fig 2.3 – lat gradients). Y no vemos este calentamiento en los datos. Entonces se necesita otro procesos para calentar los polos – quizás vapor de agua o las nubes que varían por latitud.

4. Circulación Oceanica

Para explicar el calor de los polos, los modelos climáticos frecuentemente invocan un incremento en el flujo de energía del ecuador hacia los polos que hoy día. Hoy día, el océano produce la mitad del transporte de calor a los polos, entonces muchos modelos especifican un incremento en el transporte de calor del océano. Pero noten algo importante sobre la circulación oceánica – la circulación solo redistribuye calor, no puede crear calor. Solo el sol, o albedo, o el efecto invernadero pueden cambiar el monto de calor (draw climate system). Entonces solo cambios en el transporte de calor no pueden cambiar la temperatura global, los cambios deben cambiar uno de estos factores. Por ejemplo, si un cambio en la circulación oceánica reduce el tamaño de las glaciaciones, esto puede cambiar la temperatura global.

Pero hay una paradoja con un incremento del transporte de calor en un mundo invernadero; en las ecuaciones en los modelos climáticos, el transporte de calor generalmente es proporcional a la gradiente latitudinal. Entonces si hay una gradiente reducida, hay menos transporte. Pero si hubo menos transporte de calor, porque los polos eran calidos?

Una explicación es que la circulación del océano Cretácico era muy diferente que la de hoy. Si recuerden la charla de Victor Marín, la circulación oceánica moderna está manejando por la formación de agua profunda en Antártica y en el Nor-Atlántico (Fig 3.1 Conveyor Belt). Entonces, ahora el agua profunda es frío. Pero, también agua caliente puede ser agua profunda si está muy salina; por ejemplo ahora hay agua salina y caliente que forma en el mediterráneo y desciende. Entonces, puede ser que en el Cretácico medio, el agua de los subtropicos bajo del brazo descendiendo de Hadley era más denso del agua de los polos, que no era muy frío. Entonces el agua profunda era caliente y muy salina, como el agua del Mediterráneo hoy día, y tendríamos una circulación oceánica muy diferente (Fig 3.2 Cross sections).

Esta teoría es muy interesante, pero hay problemas. Primero, no hay prueba en el registro geológico para una circulación diferente. Otro problema es para transportar bastante calor, probablemente se necesita un flujo de alrededor de 80 Mediterráneos! También, recuerden que la circulación oceánica solo puede ayudarnos explicar el calor de los polos, no puede ayudarnos explicar el calor de los interiores de los continentes.

5. Circulación atmosférica

Otros paleoclimatólogos sugieren que hubo un incremento en el transporte de calor de la atmósfera. Lo bueno sobre un incremento en la circulación atmosférica es que ayuda a explicar el calor de los polos y de los interiores de continentes. Pero hay la misma paradoja: Modelos climáticos muestran que cuando la gradiente latitudinal es baja, hay una circulación atmosférica más débil. Hay menos precipitación tropical y más precipitación subtropical. Entonces la célula de Hadley es más débil, porque la liberación de calor latente ayuda a manejar esta circulación, y también las olas de Rossby son más débiles.

Otros han sugerido que quizás la célula Hadley extendió más hasta los polos. Esta célula es muy eficiente en transportar calor. Pero según los modelos, un cambio en la gradiente latitudinal no cambia el tamaño de la célula, pero un incremento en la temperatura global puede (draw table). El problema con esta teoría es que el registro de evaporitas no muestran un cambio en las latitudes secas. Las evaporitas son rocas formadas por la evaporación de agua, entonces son indicadores de áreas secas.

Gradient	Global Mean T
Hadley cell intensity	Hadley cell extent
Eddy transport	Cloud cover

Rainfall distribution	Total rainfall
-----------------------	----------------

E. Conclusiones

En sumario, parece que no hay un factor que puede explicar todo el calor de Cretacico, necesitamos una combinacion de factores. En mi opinion, no podemos modelar el clima del Cretacico con exito por que existen problemas con los modelos climaticos. Hay algunos problemas con los datos, pero yo sospecho que hay mas problemas con los modelos climaticos. Por ejemplo, puede ser que no entendemos bien la bucles de retroalimentacion de vapor de agua y nubes.

Esta falta de comprension de periodos de invernadero tiene implicaciones para el debate sobre el calentamiento global. Si no podemos simular el clima de Cretacico, estan realísticos nuestros estimaciones del calentamiento global? Esto es por que es importante entender el Cretacico.

II. La Deteriorización Cenozoica

A. Temperatura

Ahora, voy a hablar sobre el paleoclima del Terciario, o los ultimos 65 millones de años. Despues del calor del Cretacico, hubo un descenso en la temperatura hasta el presente, que culminó en las edades de hielo. Se pueden ver este descenso en los registros de isotopos de oxigeno y tambien en la flora y fauna.

Aqui esta una curva de la temperatura de la superficie del mar en latitudes polares para el Terciario, basado en los isótopos de oxígeno de foraminiferos benticos (Fig 4.1 Old climate curve). Recuerden que los foraminiferos benticos viven en agua profunda, entonces son indicadores de la temperatura de la superficie del mar en las latitudes polares, donde el agua fria y densa descende al fondo del océano para formar las aguas profundas. La otra curva es de la temperatura de la superficie del mar en el ecuador basado en forams planktonicos. En este grafico puede ver que el enfriamiento era mucho mas fuerte en los polos que en el ecuador. Entonces el gradiente entre el ecuador y los polos ha incrementado hasta el presente (Fig 4.2 Lat gradient).

Aqui esta una curva de la temperatura de la superficie del mar en latitudes polares mas preciso. Primero voy a describir las tendencias sobre el largo plazo, y despues, voy a hablar sobre algunos eventos breves y un poco anómalos (Fig 4.3 Záchos fig).

Despues del maximo del Cretacico medio, los climas todavia estaban calidos, con un máximo en el optimo del Eoceno temprano entre 50-52 Ma. Este periodo era el periodo mas caliente en el Cenozoico. El promedio de la temperatura global era 4-6 grados mas caliente que hoy, y todavia la gradiente latitudinal era muy baja. Entonces era un mundo invernadero, como el Cretacico, pero con un poco menos calor.

(Wolfe Figure). Este mapa muestra la distribucion de la vegetacion en el Eoceno. Pueden ver que la mayoria de Sudamerica y Africa estaba cubiertos por selvas tropicales, y hubo selvas de arboles caducos muy cerca al polo como en el Cretacico. Se encuentran palmas y cocodrilos hasta la latitud de 75 grados norte. Recuerden que estos organismos no pueden soportar temperaturas bajas. Despues, con el enfriamiento, se pueden ver las zonas de vegetacion emigrando hasta el ecuador.

Despues del calor del Eoceno, hubo un largo descenso de temperatura y un crecimiento de hielo repentino en el borde Eoceno/Oligoceno, alrededor de 34 Ma. La temperatura en latitudes altas descendió aproximadamente 5 °C a traves de menos de 100,000 yr. Probablemente este descenso coincida con el desarrollo de la capa de hielo de la Antartica. Hubo una capa significativo entre 33 y 26 Ma, quizas con un volumen alrededor de la mitad de hoy dia.

Despues, hubo climas mas calidas, sin mucho hielo, con un cumbre entre 20 y 16 Ma que llama el Mid-Miocene Climatic Optimum. En este tiempo, hay evidencia de climas subtropicales por la costa de Chile.

Entre 15-12.5 Ma hubo otro descenso repentino del clima, cuando creció la capa de hielo de Antártica otra vez. Las aguas profundas se enfrió y incrementó el corriente Humbolt, y la producción de NADW.

Este periodo, del Mioceno tardío, es interesante, porque hubo una capa de hielo significativo en el polo sur, pero no en el norte. Esta glaciación unipolar probablemente tuvo un efecto en la circulación atmosférica; probablemente el aire frío del polo sur alcanzó latitudes más al norte. Hay datos geológicos que sugieren que la zona de convergencia tropical era más al norte en el Mioceno y Plioceno, y que se movió a su posición actual alrededor de 4 Ma.

Alrededor de 7 Ma hubo otro incremento en la cantidad de hielo, y las pruebas más viejas de glaciares en los Andes, y en Groenlandia. Hubo un fase más cálida antes de 3.2 Ma, y algunos creen que hubo una desglaciación de Antártica, pero la evidencia geológica sugiere que la capa de hielo ha estado estable desde 14 Ma.

Alrededor de 3.2 Ma, creció significativamente las glaciares continentales en Asia y Norteamérica, a un tamaño 1/4 o 1/2 el tamaño del después. Hubo otro enfriamiento en 2.6-2.8 Ma, y después un enfriamiento muy significativo y abrupto en 2.4 Ma, y la Tierra entró a lo que llamamos las edades del hielo.

(Slide Marine vs. leaves). Este gráfico muestra el registro de temperatura en el hemisferio norte basada en la morfología de hojas. Pueden ver que más o menos esta en acuerdo con los datos de isótopos estables.

B. Anomalías

En esta historia, hay algunos eventos breves y anómalos que son interesantes. Los más grandes ocurrieron a 65, 55, 34, y 23 Ma. Noten que estas son cerca de los bordes entre épocas, que generalmente marca extinciones, que implica que estos eventos tenían efectos importantes en la biota.

1. El borde Cretácico/Terciario

El borde entre el Cretácico y Terciario marca unos de las extinciones más. El 75 por ciento de las especies fueron eliminadas, probablemente por impacto de un asteroide de 10 km en la península de Yucatán, en México.

Se encuentran los niveles altos del carbono al borde; Parece que la mayoría de la vegetación se quemó, probablemente a causa del calentamiento de la atmósfera de la ola de choque, o del calentamiento del material de impacto. Los modelos del impacto sugieren que una gran nube de polvo bloqueó el sol sobre una gran región de la Tierra por varias semanas o meses, disminuyendo la temperatura superficial, y alterando el ciclo hidrológico.

Las pruebas de morfología de hojas angiospermas sugieren que al mes, o a los dos meses después del impacto hubo frío. Después, el promedio anual de temperatura incrementó 10 °C y se quedó muy caliente entre los 0.5 - 1 Ma después del impacto, quizás a causa de CO₂ liberado por la vaporización de rocas carbonatadas por el impacto. Después, regresó a la temperatura original. Los isótopos de Oxígeno de las profundidades del mar sugieren solamente un pequeño calentamiento después del impacto, y después, regresó a su estado original.

Entonces, este gran cambio ambiental no forzó a la Tierra a un estado de clima nuevo. La Tierra absorbió el cambio, y regresó más o menos a su estado original.

Es interesante que un poco antes del enfriamiento del borde entre el Eoceno y Oligoceno, entre 36 y 35.5 Ma, hubo dos impactos de meteoritos, uno en Siberia y el otro en la costa este de los Estados Unidos. Estos impactos probablemente eran grandes, casi el tamaño del impacto del borde de Cretácico y Terciario, pero no causaron extinciones significativas. Algunos han sugerido que quizás el evento del Cretácico-Terciario era más duro porque el asteroide chocó con calizas y cambió el monto de CO₂ en la atmósfera.

2. Late Paleocene Thermal Maximum

Alrededor de 55 Ma, la temperatura de aguas profundas incrementó entre 5-6 °C en menos de 10,000 yr, y la temperatura de la superficie incrementó alrededor de 8 °C en

latitudes altas. El clima regresó a su estado anterior después de alrededor de 200 mil años.

Este evento probablemente era causado por una liberación de metano de hidratos de gas natural. Hay grandes almacenes oceánicos de hidratos de gas natural. Estos pueden ocasionalmente liberar grandes cantidades de metano, que está oxidado a CO₂. Estos eventos pueden explicar cambios rápidos en el paleoclima.

Algo muy interesante sobre el máximo del Paleoceno tardío es la observación que las temperaturas tropicales no cambiaron mucho, pero este evento era por debido a un incremento en CO₂, que recuerden debe cambiar la temperatura en el mismo monto en todas las latitudes. Probablemente este hecho está diciéndonos que hay algunos bucles de retroalimentación que no estamos incorporando en los modelos climáticos.

3. Oligoceno and Mioceno glaciaciones & orbital variations

También hubo anomalías alrededor de 34 y 23 Ma. El primero era una mini edad de hielo, de solo 400 mil años de duración. Los geólogos ven cambios en la sedimentación en los océanos, entonces quizás ocurrió una reorganización de la circulación en el océano. El segundo, alrededor de 23 Ma, era otra breve glaciación que dura 200 mil años. Este evento probablemente era causado por una confluencia orbital rara.

Entonces voy a explicar las variaciones en la órbita de la Tierra muy brevemente. Patricio probablemente va a regresar a este tema en sus charlas, porque estas variaciones son de alta importancia en las Edades de Hielo.

En un año, la Tierra cumple una revolución completa alrededor del sol. La órbita de la Tierra no es un círculo perfecto, casi es, pero no perfecto. Es un elipso con el sol ubicado en un foco. La Tierra es más cerca del Sol el 3 de Enero, y es más lejos el 4 de Julio (Fig 6.1 eccentric orbit). Esta variación pequeña no causa las estaciones. Las estaciones son causadas por la inclinación de 23°27' del eje de la Tierra al plano orbital. El hemisferio del Sur se inclina hacia el sol en verano (Fig. 6.2 Tilt of earth). En verano, el altitud solar es más arriba, los días son más largos, entonces hay más radiación solar.

Los solsticios son cuando el eje de la Tierra está inclinado directamente hacia o en el sentido opuesto del Sol. Durante el solsticio de verano (21 diciembre), el sol, al mediodía, es directamente arriba de la latitud 23°27'S y hay sol por todo el día en Antártica. Durante el solsticio de invierno (21 Junio), los rayos del sol son verticales en 23°27'N, y hay sol por todo el día en el Polo Norte. Los equinoccios son cuando el sol, al mediodía, es directamente arriba del ecuador y el día y la noche tienen la misma duración por toda la Tierra. El solsticio de verano es cerca al perihelion, o el punto más cerca del sol en la órbita de la Tierra, entonces el verano austral es un poco más caluroso que el verano boreal.

Efectos gravitacionales de cuerpos planetarios causan perturbaciones orbitales en la Tierra. Estas perturbaciones varían la distribución geográfica de radiación solar. Hay tres tipos de variaciones, se las llama ciclos de Milankovich (Fig 6.3 Milankovich):

a) La forma de la órbita de la Tierra puede variar de casi circular a un poco elíptica. A esta variación se llama la excentricidad, y tiene un periodo de 100 y 400 ka.

b) la inclinación del eje terrestre varía entre 22.2 ° y 24.5 ° con un periodo de 41 ka. Esta variación tiene un efecto grande en los polos, porque cambia la cantidad de radiación solar. Cuando la inclinación es menor, el área de la Tierra que no tiene 6 meses con sol es menor. Los inviernos son más cálidos, y los veranos son menos cálidos en ambos hemisferios. Entonces cuando la inclinación es menor, hay menos estacionalidad.

c) También, la dirección en que el eje inclina cambia, y también la dirección en que la órbita apunta cambia. Es por esta razón que las fechas de los equinoccios cambian con el tiempo, con un periodo de 19-23 mil años (ka). Se llama esto la precesión axial. El efecto climático de esta variación es más fuerte en el ecuador. El efecto calienta los inviernos y se enfría los veranos en un hemisferio, y hace lo opuesto en el otro hemisferio.

En el Oligoceno tardío, Antártica tenía glaciares, al menos en algunos periodos, pero no estaba cubierta con hielo. Para formar hielo, la órbita ideal es cuando la estacionalidad está reducida, y los veranos australes son templados. La glaciación al borde está asociada con una excentricidad baja y un periodo largo de inclinaciones en el eje bajas (Fig 7.1 Zachos figure).

Entonces lo que es interesante sobre este evento es que muestra que los cambios orbitales pueden controlar la ocurrencia de glaciaciones, si las condiciones climáticas son cerca de un umbral. Pero estos cambios orbitales causan cambios en la energía solar recibida muy sutiles. Entonces se necesitan otros factores para amplificar estos cambios. Patricio va a hablar más sobre este tema en las charlas sobre las edades de hielo.

C. Variabilidad sobre el corto plazo

Un pensamiento más sobre las variaciones orbitales: es importante recordar que este gráfico solo muestra el promedio de la temperatura. Sobre el corto plazo hay bastante variación periódica en el clima alrededor de este promedio manejada por estas variaciones orbitales. Por ejemplo, aquí está un gráfico de la temperatura por los últimos 25 millones de años del sitio en el Atlántico. Pueden ver que hay variaciones por todo este periodo, y cuando hay más hielo, hay una amplitud mayor de variación. Entonces parece que los glaciares son inestables, o al menos tiene mucha sensibilidad a los otros componentes en el sistema climático (Fig 7.2 detailed curve).

D. Precipitación

En mis dos charlas, he concentrado en el registro de paleotemperatura. Pero precipitación es otro variable paleoclimático muy importante. Pueden ver en esta curva que el nivel de precipitación global era muy baja en el Cretácico. Después, hubo un periodo muy húmedo en el Eoceno, y después era más o menos como hoy día, con un secamiento global asociada con el evento de enfriamiento entre 15-12 Ma.

Para mí, es un poco extraño, si la fuerza del ciclo hidrológico y el monto de vapor de agua en la atmósfera depende en el promedio global de temperatura, que el invernadero del Cretácico era seco, pero el invernadero del Eoceno era húmedo. Al menos, está diciéndonos que todos los invernaderos no son iguales.

Esto es la tendencia global, pero para entender la historia de precipitación en un región, por ejemplo en Sudamérica, necesitamos saber la historia de topografía, porque las Cordilleras tienen un gran efecto en la circulación atmosférica y oceánica. Voy a hablar sobre este tema un poco más tarde.

E. Estacionalidad

Sabemos menos sobre la historia de estacionalidad, pero en general, probablemente era menos en el Cretácico e Eoceno y ha incrementado hasta el presente.

III. Porque Enfrió el Clima?

Porque enfrió el clima en el Cenozoico? Probablemente no era solamente un factor, pero una combinación de varios factores. Ahora voy a hablar sobre algunos de estos factores, específicamente albedo, CO₂, y la circulación oceánica y corredores.

A. Albedo

Como he discutido por el Cretácico, los glaciares y también la vegetación tienen un efecto en el albedo. Por ejemplo, una parte del enfriamiento desde los 15 Ma era asociada con la formación de la capa de hielo de la Antártica y el incremento de albedo. Modelos climáticos muestran que el cambio de la vegetación Miocena hasta las praderas y páramos del presente probablemente causó un enfriamiento de alrededor de 2 °C. También, la caída del nivel del mar probablemente incrementó el albedo. Pero no puede explicar todo el enfriamiento.

B. CO₂ y la Tectónica de Placa

Muchos paleoclimatólogos creen que el descenso de la temperatura desde el Cretácico medio era a causa de un descenso en la cantidad de CO₂. El modelo de BLAG muestra un descenso en la cantidad de CO₂ porque la tasa de expansión disminuyó entre

100 a 15 Ma. Pero, desde los 15 Ma, cuando hubo un fuerte enfriamiento, y la tasa incrementó. Entonces no hay una relación perfecta entre el enfriamiento y la tasa de expansión.

En la semana pasada, mencioné que hay otro proceso asociado con la tectónica de placa que puede afectar el ciclo del carbono, y esto es el solevantamiento de las montañas. El mundo moderno tiene una topografía muy alta, probablemente es uno de los tiempos más montañosos en la historia de la tierra, principalmente debido a la meseta Tibetana (slide), pero también a los Andes y la Cordillera de Norteamérica. Entonces, puede ser que el desarrollo de esta topografía tuvo un efecto importante en el clima.

La topografía puede afectar el clima de al menos cinco formas: 1) La topografía puede intensificar el calentamiento solar sobre la tierra. Este efecto incrementa el contraste de la temperatura entre el agua y la tierra, y fomenta el desarrollo de la circulación monzonal, como el monzón Asiático. Y los cambios en la circulación regional afectan la circulación global. 2) La topografía puede incrementar la cantidad de lluvia orográfica y el calentamiento latente. 3) La topografía es una barrera a los vientos, y puede cambiar los patrones de circulación. 4) La topografía permite más acumulación de nieve, que incrementa el albedo, y 5) Sobre una escala de tiempo más amplia, la topografía puede incrementar la tasa de meteorización porque provee más área de superficie e incrementa la cantidad de lluvia. Por ejemplo, la meseta Tibetana, con el 4 por ciento de la área superficial del mundo suministra el 25 por ciento de los iones disueltos en los océanos. Recuerden que en el ciclo del carbono, un incremento en la cantidad de meteorización disminuye la cantidad de CO₂ en la atmósfera.

1. La historia de la Paleoaltitud para las Cordilleras Importantes

a. El Solevantamiento del Himalaya.

Para examinar esta teoría, voy a hablar brevemente sobre la historia de solevantamiento de las cordilleras principales. La meseta Tibetana y el Himalaya es la cordillera más importante de esta teoría, porque es la más alta y extensa en el mundo, de 5-6 km de altura, y una extensión de 9° de latitud por 35° de longitud.

El continente de la India chocó con el continente de Asia hace 50 Ma (old overhead), entonces no pudo solevantarse más antes de los 50 Ma. Hay datos geocronológicos, geoquímicos, y paleobotánicos que sugieren que la meseta alcanzó su altura moderna antes de alrededor de 11 Ma. Entonces la mayoría del solevantamiento ocurrió entre los 50 y 11 Ma, y es posible que pudo contribuir al enfriamiento. Es interesante ver que otros periodos geológicos con mesetas más o menos del tamaño de la meseta Tibetana son el Precámbrico tardío y el Paleozoico tardío, y los dos son periodos con glaciaciones.

Antes, los científicos creyeron que el solevantamiento de la meseta era más joven. Hubo un incremento de erosión y meteorización de la Himalaya, con prueba en los sedimentos del abanico de Bengal, hace 8 Ma. Y creyeron que esto significó un monzón Asiático más intenso. Recuerden que la altura de la meseta es un factor influyente en la intensidad del monzón. Pero los datos de paleoaltura sugieren que ésta intensificación no era a causa del solevantamiento.

Otro cambio importante ocurrió alrededor de los 8 Ma; hubo una expansión de plantas que usan el tipo de fijación del carbono C₄ (Fig 8.1 carbon isotopes). Se puede estimar la proporción entre las plantas de C₃ y C₄ en un paleoambiente mediante la proporción de los isótopos Carbono 13 y Carbono 12 en el suelo, porque las plantas de C₃ y C₄ fraccionan los isótopos en diferentes maneras. También, se puede medir la proporción en los dientes de los animales, porque la proporción significa la proporción de las plantas C₃ y C₄ en la dieta del animal.

Esta expansión era global; ocurrió alrededor de 7-8 Ma en India, 7 Ma en Norteamérica, y 7-8 Ma en Argentina y Bolivia según los datos de Claudio Latorre del laboratorio. Las plantas que utilizan la fotosíntesis de C₄ tienen una adaptación mejor a los ambientes secos y bajos en CO₂, entonces este incremento probablemente era a causa de un descenso en la cantidad de CO₂ en la atmósfera, o un cambio climático, o ambos.

b. El Solevamiento de los Andes

Los Andes se desarrollaron a causa de la compresión producida por la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa del continente de Sudamérica (slide). Probablemente, el solevamiento de los Andes tuvo un efecto sobre el clima menos que el solevamiento del Himalaya. Pero es difícil decir exactamente cuál era su efecto, porque el solevamiento de los Andes son más difícil modelar, porque su ancho es menor que el ancho de una célula en un GCM. Como dice René el solevamiento de los Andes es un proceso sub-grille. Pero sabemos que al menos tuvo un gran efecto en el paleoclima de Sudamérica, especialmente en los patrones de precipitación. Hoy día, los Andes tienen tres efectos principales en el clima regional: 1) Forma una barrera a la circulación de la atmósfera, 2) incrementa la cantidad de precipitación orográfica en una ladera y forma una sombra de lluvia en la otra, y 3) estabiliza el anticiclón sudpacífico y el corriente Humboldt.

Hubo un arco volcánico por la costa desde el Mesozoico. Desarrolló en el región de la cordillera costal y ha trasladado progresivamente al este. Alcanzó su posición moderna en el Oligoceno. Los volcanes no tienen un gran efecto en el patrón de precipitación porque no forman una barrera a la circulación atmosférica; las masas de aire pueden pasar por los lados del cono.

La deformación de la corteza, que ha producido el volumen de los Andes debajo de los volcanes, también ha trasladado del oeste a este. En los Andes centrales, todo estuvo al nivel del mar hasta 60 Ma. Después, empezó a solevar la cordillera occidental y probablemente alcanzó la tercera de su altura moderna alrededor de 18 Ma. Esta historia está basada en datos geológicos (Fig 8.2 Uplift history).

El Altiplano, Puna y Cordillera Oriental alcanzaron más o menos la mitad de su altura alrededor de 10 a 7 Ma. Esta historia está basada en datos geológicos y también en floras. Se puede usar las paleotemperaturas de paleofloras para estimar sus paleoalturas, porque cuando se sube, la temperatura promedio anual se enfría. La tasa de enfriamiento adiabático en una columna de aire es alrededor de seis grados por kilómetro. Entonces se puede comparar la paleotemperatura de una flora en las montañas con una flora coetánea de la costa, y se divide la diferencia por la tasa de enfriamiento para estimar la paleoaltura.

Sobre la historia al sur de 33°, no tenemos muchos datos geológicos. Probablemente empezaron a solevar en el Eoceno, y probablemente hubo solevamiento significativo en el Mioceno y Plioceno.

Los modelos climáticos sugieren que sin los Andes, tendría un desierto entre 40 y 15 grados debido solo a la circulación atmosférica (Fig 8.3 NM precip). Esto es interesante, porque surgieron que al menos desde el Oligoceno, había regiones áridas en Chile y Argentina, más o menos entre 15 y 30 grados, si hubo montañas o no.

(slide ESRI precip) Cuando solevaron los Andes, formaron un máximo de precipitación por la ladera este en Perú y Bolivia debido al efecto orográfico, también en el sur de Chile, y una sombra de lluvia en las pampas de Argentina hasta muy al sur, y por la costa. Este desierto también es debido al corriente Humboldt, pero recuerden que los Andes estabilizan la circulación en el Pacífico que empuja el corriente.

No necesita mucha elevación para formar una sombra de lluvia, solo 1000 o 2000 m. Hay datos geológicos que sugieren que el desierto de Atacama era sub-árido en el Oligoceno y llegó a ser árido alrededor de 15 Ma. Hay datos geológicos que sugieren que también la Puna llegó a ser más árido alrededor de 15 Ma.

Esto secamiento puede ser debido a solevamiento, pero también, probablemente hubo un componente de cambio climático. Recuerden que hubo un secamiento global asociada con el evento de enfriamiento de 15 Ma.

Alrededor de 10 a 8 Ma hubo un incremento en la tasa de deposición en el abanico Amazoico. También, esto puede ser debido a solevamiento, o quizás a cambios globales. Recuerden que el monzón Asiático empezó alrededor de 8 Ma, y la biomasa de plantas C4 expandió.

c. El Solevamiento de la Cordillera de Norteamérica.

(topography slide) La cordillera de Norteamérica es muy similar a los Andes, también es debido a la subducción de una placa oceánica por debajo del continente. Basado en los estudios de floras fósiles, la Cordillera probablemente era alto desde, al menos, el Eoceno medio. Probablemente era como el Altiplano, con quizá 2 - 4 km de altura, y una extensión de más de 25 ° de latitud, y 10 o 15 ° grados de longitud. En el Mioceno, una gran parte colapsó.

d. Summario

En resumen, la hipótesis de solevantamiento es interesante, y quizás este factor contribuyó al enfriamiento. Hay el solavamiento del Norteamérica quizá en el Cretácico o Cenozoico temprano, de la meseta Tibetana después de los 40 Ma, y de los Andes quizá después de los 10 Ma.

Un base de datos que es muy interesante para la evaluación de esta teoría es la proporción de Sr87 y Sr86 del agua marina a través de la historia (Fig 8.4 Sr curve). La proporción se incrementó significativamente desde los 40 Ma, y actualmente alcanza su valor más alto desde el Cámbrico. La corteza oceánica tiene una proporción baja, mientras la corteza continental tiene una proporción alta. Hay una teoría que dice que el incremento es a causa de un incremento de la cantidad de meteorización de los continentes, y entonces el incremento quizá es una prueba de que el solevantamiento desde los 40 Ma incrementó la cantidad de la meteorización, provocando la disminución de la cantidad de CO₂ en la atmósfera. Pero también, puede ser que la colisión de India y Asia produjo muchas rocas ricas en Sr87. Entonces, desgraciadamente, la curva probablemente no es sola una función del monto de meteorización química.

2. El registro de CO₂

El registro de CO₂ sugiere que hubo un descenso en la cantidad de CO₂ en el Cenozoico. En el Cretácico, probablemente había cantidades altas, alrededor de quizá 2000 ppm. Hay un gran desacuerdo sobre las cantidades de CO₂ durante el invernadero del Eoceno; las estimaciones son entre 60 a 2000 ppm. Pero los métodos son en acuerdo que los niveles eran bajas en el Mioceno, alrededor de 300 ppm o menos.

Entonces parece que a través del Cenozoico, una reducción en la cantidad de CO₂ probablemente contribuyó al enfriamiento, pero cuando se ve los detalles de la curva hay problemas – por ejemplo, la cantidad de CO₂ probablemente era más bajo que la de hoy durante el Mioceno medio, pero recuerden que este período era cálido. Y peor, parece que la cantidad incrementó cuando creció la capa de hielo de Antártica. Entonces no se si significa que hay problemas con los datos, o que, en detalle, hay otros factores que están manejando estas fluctuaciones entre modos más cálidos y más fríos en el Cenozoico.

B. Circulación oceánica y gateways

(Fig 9 – modern ocean circ) Otro factor que pudiera contribuir al enfriamiento es la circulación oceánica. Si una circulación oceánica muy diferente es una explicación del calor del Cretácico medio, una explicación del enfriamiento puede ser el cambio de la antigua circulación a la circulación moderna. Algo muy importante en el desarrollo de la circulación es el abrir o cerrar de **gateways**. Gateways son corredores marinos entre las cuencas oceánicas principales. Cambios en la configuración de los gateways pueden modificar el intercambio de calor y sal entre océanos. Hay al menos 4 gateways importantes para la paleoclimatología Cenozoica: 1) Drake Passage, 2) Greenland-Scotland Ridge, 3) Central American Seaway, y el 4) Indonesian seaway.

1. Tasmanian-Drake Passage

Si recuerden la charla de Victor Marin, hoy día, hay una corriente de agua fría alrededor de Antártica, se llama la corriente circumpolar. En el Cenozoico temprano, Sudamérica y Australia estaban conectadas con Antártica, y no había este flujo. En su lugar, había flujos de agua templada desde el ecuador. La separación de Sudamérica y Australia en el Eoceno o Oligoceno permitió el desarrollo de; corriente circumpolar. Basado en reconstrucciones tectónicas y fechas del suelo oceánico, Australia y Antártica se separaron alrededor de 35 Ma, y Sudamérica y Antártica probablemente se separaron entre

32.5 y 30 Ma (Fig 10.1 Olig reconstruction). Muchos paleoclimatologos creen que el inicio del corriente circumpolar contribuyó a la formacion de la capa de hielo de Antartica y a el enfriamiento global, porque reemplazó aguas templadas con aguas mas frias y entonces contribuyó al aislamiento termal de Antartica. Tambien, mas o menos la separacion coincide con el desarrollo de la capa de hielo en Antartica, que recuerden, ocurrió mas o menos hace 33 Ma. Pero se necesita cuidado con esta coordinacion de las fechas, porque las reconstrucciones son complicadas, y puede jugar un poco con las fechas. Otros cientificos dan una fecha entre 20-25 Ma para el cierre, durante un periodo mas calido.

Algunos modelos climaticos muestran que la formacion de este gateway tuvo un efecto significativo en el clima de Antartica. Por ejemplo, un estudio de Toggwieler y Bjornsson sugieren que el abre del Drake Passage enfrió las latitudes altas en el sur alrededor de 3 °C mientras calentó las latitudes altas en el norte, y sugieren que contribuyó a la formacion del conveyor. Pero, otros modelos no muestran grandes efectos.

Una pregunta interesante es si el Drake Passage y la formacion del corriente circumpolar es tan importante a la formacion de la capa de hielo de Antartica, porque disminuyeron la capa entre 26 y 12 Ma? Recuerden que la cantidad de CO₂ era baja durante esta deglaciacion, entonces no puede ayudarnos.

2. Greenland-Scotland Ridge

El Greenland-Scotland ridge esta una area de poco profundidad entre Groenlandia y Gran Bretania debido a una surgencia de astenósfera caliente por debajo de Islandia. Hay tres corredores principales en el ridge (Fig 10.2 Topo map), el Denmark Straits, el Iceland-Faeroe Ridge, and the Shetland-Faeroe Bank Channel. El ridge separa las aguas frias del polo norte del Atlantico. Hoy dia, aguas profundas fluyen sobre el ridge y forman las aguas profundas del nortatlantico. Entonces la historica tectonica de esta region probablemente tuvo un efecto importante en el desarrollo del conveyor. Recuerden que las aguas profundas de noratlantico tienen un efecto importante en el clima, por que hay una liberacion sigificativa del calor durante su formacion, y la surgencia de estas aguas es una fuente de calor en el oceano Antartico.

En el Cenozoico, el ridge impidió este flujo, porque era menos profundo. El flujo probablemente empezó alrededor de 35 Ma a traves de la Cuenca del Faeroe-Shetland. Ha seguido hasta el presente con algunas interrupciones, basado en el registro de isotopos de carbono (Fig 10.3 NADW). Es interesante que los dos periodos sin NADW son despues de 15 Ma y 3 Ma, y estos son periodos cuando creció las glaciares, y el periodo cuando segun este registro, empezó la formacion era un periodo mas calido.

Los climatologos sugieren que los aguas mas templadas de NADW alrededor de Antartica incrementó el flujo de humedad y las glaciares pudieron crecer. Pero a mi, me confunde esta teoria, porque hoy dia, tiende a tener una alta produccion de NADW durante interglaciales, y una baja produccion durante glaciales. Recuerden la charla de Gino Cassasa, que no sabemos si el calentamiento global va a incrementar la capa de hielo de Antartica a traves de el incremento de humedad, o va a derretir a traves de las temperaturas mas altas.

Tambien esto es uno de los problemas de cual viene primero, la gallina o el huevo. Es las glaciares que causan la produccion de NADW, o el flujo de NADW que producen las glaciares. Y no sabemos cual es mas importante, los procesos en el polo sur o en el polo norte. Entonces el efecto de este gateway es menos obvio que el Drake Passage.

3. Central American Seaway

Otro evento importante era el cierre del corredor entre Centro y Sudamerica y la formacion de la puente de tierra. Esto cierre es un poco complicado porque no es solo el istmo de Panama, hay dos regiones mas que probablemente estaban capaces de modificar la circulacion oceanica, el Aves Swell & lesser antilles, y el northern Nicaraguan rise (Fig 11 – Time slices).

En el Cretacico temprano, recuerden que sudamerica estaba completamente asilada, el Oceano caribe separó Norte y Sudamerica. Probablemente había un flujo de agua

calido y salino al Pacifico por debido a los vientos alisios, y un contraflujo de agua mas templada y fresca al Atlantica. Cuando este corredor es abierto, el gulf stream es mas debil, y no hay mucho diferencia en la salinidad entre el pacifico y el atlantico. Entonces el agua calido que fluye hasta el polo en el Atlantico es menos salino, y no tiende a formar NADW.

El cierre de este corredor probablemente ocurri6 en tres etapas, uno alrededor de 30-35 Ma, el proximo alrededor de 12-15 Ma, y la ultima alrededor de 3-4 Ma, los numeros magicos.

El Aves swell es un arco volcanico viejo con una capa de calices. Pruebas geologicas sugieren que esta region era poca profunda entre 50-15 Ma. Hubo un nivel del mar bajo entre 30 y 35 Ma, y probablemente pudiera formar una barrera al menos parcial a la circulacion similar al istmo de Panama. Si el agua calido y salino del Caribe no puede entrar el Pacifico, fluye al norte. Descarga su calor a la atmosfera en el noratlantico, y desciende a formar NADW. Entonces este evento, y tambien la historia del Greenland-Scotland ridge sugiere que quizas el NADW empez6 a formar entre 36-30 Ma.

El northern Nicaraguan rise es un grupo de depositos de calices de poca profundidad (~30 m). Basada en pruebas geologicas, este grupo probablemente desmenuzaron y anegaron parcialmente entre 15-12 o quizas un poco mas temprano (20-15). Al mismo tiempo, alrededor de 12 Ma, el arco de Panama y Costa Rica choc6 con Colombia y empez6 a formar el sur de Centroamerica. En este tiempo hay evidencias de una reduccion en el intercambio de aguas profundas entre el Atlantico y Pacifico a travez de Panama y una intensificacion del Gulf stream. Entonces quizas estos dos eventos tectonicos contribuyeron al intensificacion del Gulf Stream y la formacion de NADW.

Muchos dan una fecha de 3-4 Ma para el cierre final del corredor, porque en este tiempo hubo un intercambio de animales entre norte y sudamerica por el istmo de panama. Es interesante que el intercambio ocurri6 mas o menos al mismo tiempo que la glaciacion de Norteamerica y Asia. Entonces hay una teoria que el cierre caus6 el inicio del las Edades de Hielo. Pero, hay problemas con esta teoria. Con un corredor cerrado, hay mas transporte del calor al norte. Pero puede ser que con mas calor, hubo menos hielo marino y mas humedad para las capas de hielo. Hay modelos climaticos que sugieren que es el transporte de calor que es mas importante a la formacion de las glaciares que la humedad. Y en el registro, hay un descenso en la produccion de NADW.

Otros proponen que con el cierre de este gateway, el ITCZ se movi6 al sur, y esto tambien pudiera afectar el clima.

4. Indonesian Seaway

El ultimo corredor es el gateway de Indonesia. El gateway de Indonesia regula el flujo de agua del Pacifico al Oceano de India. Hace 5 Ma, este gateway estrech6 y se traslad6 al norte debido al movimiento al norte del Nueva Guinea, entonces ha reducido la influencia del Pacifico del Sur y ha incrementado la influencia del Norpacifico, que es mas frio. Hay una teoria que sugiere que la reduccion en el flujo de agua calida favoreci6 la formacion de las glaciares en el hemisferio norte, porque reduci6 el transporte del calor del tropicos a las latitudes altas. Pero, para evaluar esta teoria, se necesitar medir la paleotemperatura del Oceano de India, para ver si las temperaturas disminuyaron.

5. Conclusiones.

En sumario, los gateways son un poco problematicos. Hay estos eventos tectonicos, generalmente mas de uno para cada evento importante climatologico, con fechas no muy precisas. Y con la excepcion del Drake Passage, no sabemos muy bien sus efectos en el paleoclima. Si un evento paleoclimatologico y un evento tectonico ocurrieron al mismo tiempo, no necesariamente significa que hubo una conexcion. Creo que necesitamos mas estudios de paleocirculacion para tratar de entender el significativo de un cierre o abre. Otro problema general con gateways como un factor que maneja el enfriamiento es que cada cierre es un evento discreto, no un proceso continuo. Entonces como se combinaron estos eventos para formar un enfriamiento a traves del Cenozoico?

D. Summario

En summario, en mi opinion, hay muchos factores que pueden explicar el enfriamiento. Hay el descenso en CO₂, y la tasa de expansion, el solevantamiento de las cordilleras, el bucle de retroalimentacion con las capas de hielo y el cambio en la vegetacion, y los gateways. Quizas lo que es mas interesente es por que despues del desarrollo de la capa de hielo, hubo un calantamiento en el Oligoceno tardio y Mioceno temprano, cuando los niveles de CO₂ eran bajas, los Himalayas solevantaba, y habia el corriente circumpolar. No se. Es posible, como he dicho antes, que el vapor de agua y las nubes tienen un papel importante.

Con este pensamiento, dejamos el tiempo geologico, o profundo, y con la proxima charla entramos los Edades de Hielo.

© Kathryn Gregory-Wodzicki 2001

General

[Crowley, 1996 #14][Raymo, 1994 #40]

El invernadero

[Valdes, 1999 #2][Barron, 1995 #267][Sloan, 1995 #270]

Paleogeografía

[Crowley, 1998 #249][Crowley, 1998 #250]

Deterioración Cenozoica

[Zachos, 2001 #246][Sugden, 1996 #79]

Eoceno/Oligoceno

[Elderfield, 2000 #254][Prothero, 2000 #260]

Late Miocene Global Carbon Shift

[MacFadden, 2000 #253][Gaupp, 1999 #259][Cerling, 1993 #262][Filippelli, 1997 #264][Latorre, 1997 #265][MacFadden, 1996 #268][MacFadden, 1994 #269]

Oligoceno/Mioceno

[Kerr, 2001 #196][Zachos, 2001 #195][Flohn, 1983 #261]

Albedo:

[Dutton, 1997 #263][Otto-Bliesner, 1997 #266]

CO₂:

[Flower, 1999 #245][Veizer, 2000 #227]

Uplift

[Zhisheng, 2001 #207]

Gateways:

[Wright, 2001 #244][Cane, 2001 #202][Davies, 2001 #247][Toggwieler, 2000 #248][Droxler, 1998 #251][Lawver, 1998 #252][Wright, 1998 #106][Billups, 1999 #146]

<http://www.washington.edu/burkemuseum/paleo.html>