

Cambio Climático Global

Cambios Climáticos - ¿Por qué nos importa?

- cada vez más evidencia científica muestra que los cambios de temperatura pueden ocurrir en un periodo de tiempo relativamente corto (p.e., calentamiento en Groenlandia de 10°C en un par de décadas). De relaciones de isotopos de oxígeno en núcleos de hielo.
- más evidencia que los cambios más recientes son causados por la actividad humana
- niveles actuales de CO₂ son los más altos desde hace 800,000 años (evidencia de núcleos de hielo)
- cambio climático puede tener efectos negativos en la vida del ser humano (financieramente y en otros campos)

Ejemplos de posibles causas de un cambio climático

- externos: impactos, cambio en cantidad de luz que sale del sol, cambios en la posición relativa del planeta con respecto al sol
- internos: cambios en la química de la atmósfera y los océanos, circulación oceánica, vulcanismo, deriva continental

Mecanismos de Reacción (Feedback Mechanisms)

- un proceso secundario que responde a o puede influenciar algún cambio
- mecanismo de reacción positiva: proceso que realza el cambio
 - durante enfriamiento global, más nieve y hielo caen. Esto aumenta el albedo y realza el enfriamiento.
 - durante calentamiento global, la nieve y el hielo se derriten. Esto disminuye el albedo y realza el calentamiento.
 - Durante calentamiento, el metano que se acumula debajo del mar en lentes de hielo puede derretirse. El metano es liberado a la atmósfera, y como es un gas de efecto invernadero, acelera el calentamiento
 - durante calentamiento global, el aire cálido puede mantener más vapor de agua y como es un gas de invernadero, realza el calentamiento
- mecanismo de reacción negativo: proceso que modera o trabaja en contra del cambio

- durante calentamiento, las capas de hielo se derriten. El agua fresca y fría flota sobre el agua cálida del océano. Las corrientes cálidas son desviadas o frenadas lo cual contraresta el calentamiento.
- durante calentamiento, el clima se vuelve más húmedo. La presencia de más nubes incrementa el albedo y contraresta el calentamiento
- durante enfriamiento, el clima es más seco. Menos nieve cae así que el enfriamiento puede moderarse.

El papel de los Océanos - Un moderador climático

- océanos: guardan más calor que la atmósfera (debido a mayor capacidad calorífica).

Para entender cuánto calor puede absorber el océano sin aumentar su temperatura, es útil comparar la capacidad calorífica de otros materiales:

Table 1: Capacidad calorífica de materiales

Material	Capacidad calorífica en cal/cm ³ /deg C
Aire	0.00031
arena con cuarzo	0.31
Granito	0.51
Aluminio	0.215
Cobre	0.0924
Vidrio	0.2
Cuerpo Humano	0.8
Agua	1.0

- sirve de amortiguador; se calienta y enfría más lento que en tierra
- movimiento de las corrientes marinas es más lento que los vientos atmosféricos. p.e., cambios atmosféricos tienen efectos a corto plazo, mientras que las corrientes oceánicas tienen efectos a largo plazo.
- las corrientes oceánicas pueden ser desviadas por los continentes, patrón de circulación más complicado que corrientes atmosféricas
- los océanos absorben CO₂, así desacelerando el reciente calentamiento global
- conocimiento general: las corrientes oceánicas profundas son muy importantes en el intercambio de calor global impulsado por cambios en la densidad del agua (oceanic conveyor belt)
- impulsado por circulación termo-halina

- agua más fría y salada se hunde
- aguas cálidas y dulces flotan
- sin embargo: todavía es difícil para los científicos observar y medir la circulación en aguas profundas
- investigaciones recientes muestra que:
 - el transporte de calor del ecuador a los polos es mayor en la atmósfera que en los océanos.
 - circulación termo-halina solo es relevante para aguas someras
 - → popular, pero es mito urbano: La corriente del Golfo causa clima templado en Europa

El papel de la Tectónica de Placas

- rifting a vulcanismo extensivo puede influenciar el clima
- variaciones en la velocidad de expansión influencia el nivel del mar global
- la posición de las masas de tierra cambia con el tiempo así que un punto en la tierra puede pasar por varias etapas climáticas
- grandes masas de tierra cerca de los polos lleva a enfriamiento
- supercontinentes que cubran una amplia gama de latitudes inhiben corrientes paralelas a las latitudes; causa mezcla de aguas tropicales y polares.
→ climas mas balanceados

Historia Climática de la Tierra: Escala de tiempo en millones de años

La evidencia sobre los climas pasados viene de varias fuentes, incluyendo:

- perfiles de rocas: p.e., diferentes capas (estratos) en un sitio nos dan información sobre las fluctuaciones del clima local. Comparaciones de muchos perfiles alrededor del globo (corregidos por la deriva continental!) nos dan una idea sobre el clima global histórico.
- cambios del nivel del mar con el clima global: nivel sube en clima cálido a medida que las capas de hielo se derriten, cae en clima frío a medida que el agua es atrapada en capas de hielo
- se buscan indicadores en las capas sedimentarias de rocas; corales, restos de plantas, dunas y suelos fósiles

Indicadores estratigráficos para clima cálido:

- arrecifes tropicales fósiles y micro conchillas (en limolitas)
- menas de aluminio (bauxita) solo se encuentra en suelos tropicales
- kaolinita (porcelana; una arcilla blanca que se forma de la meteorización de feldespato - un mineral que se encuentra en granito - en un ambiente húmedo)
- minerales evaporíticos (halitas y yeso)

Indicadores de clima frío:

- erosión por glaciares que esculpen la geografía (valles con forma de U)
- los glaciares dejan superficies pulidas y con ranuras (estración)
- grandes montones de escombros (morrenas)
- ausencia de fósiles (?)

Glaciación

- Glaciaciones pasadas locales no necesariamente indican que el clima global haya sido frío: p.e., estraciones (marcas dejadas por glaciares) han sido encontradas en el Sahara, pueden significar o que el clima pasado era frío o que el Sahara (Africa) se encontraba más cerca del polo cuando se formaron las estraciones (el segundo caso es el real).
- Glaciación depende de:
 - posición del continente con respecto a los polos
 - precipitación
 - clima global
- Glaciaciones han sido relativamente raras en la historia de la Tierra
- Mas comúnmente la Tierra ha tenido climas libres de hielo
- La interacciones de los diversos factores es no-lineal y muy complicada. Por lo tanto hasta hoy en día no hay una teoría que tenga en cuenta de manera satisfactoria las glaciaciones pasadas y presentes en la Tierra.

Cambios del Nivel del Mar

- Cambios en el nivel del mar locales no necesariamente indican que el clima global esta cambiando
- Cambios locales del nivel del mar dependen de:

- cantidad de sedimentos que entran, compactación y subsidencia (p.e., Delta del Mississippi)
- rebote isostático post-glaciar (p.e., Bahía de Hudson y costa a lo largo del escudo canadiense)
- placas tectónicas (p.e., expansión oceánica rápida causa genera océanos relativamente someros, aumento del nivel del mar)
- clima global

Periodos fríos a largo plazo pasados

- pre-Cambrico (hace 700-550 Millones de años)
- Carbonífero tardío y Permiano temprano (hace 320-270 Millones de años) esta es la "late paleozoic ice age" referenciada en el texto de clase (ver apéndice)
- Pleistoceno (últimos 2.5 Millones de años) esta es la "late cenozoic ice age" referenciada en el texto (tendencia de enfriamiento comenzó hace 40 Millones de años) este periodo ha sido más cálido que los otros dos periodos fríos.

Periodos cálidos a largo plazo pasados

- Triásico medio (hace 240-220 Mill)
- Jurásico tardío hasta el Cretácico (hace 170-65 Mill)
- Eoceno (hace 50 - 35 Mill); clima más cálido en los últimos 3 Ga; esta es la "late paleocene torrid age" usada en el texto de clase (sin embargo debe haber un error ya que los números no cuadran, ver apéndice)

Nota: Ga significa billones de años

Posibles causas de climas fríos de largo plazo

- uno a más (super)continentes cerca de los polos lleva a un albedo más alto (mecanismo de reacción positivo)
- unos pocos grandes continentes no afectan las corrientes marinas sentido este-oeste, así que hay menos intercambio entre latitudes.
- desaparición de aguas someras cálidas durante caída del nivel del mar
- menos evaporación de los océanos lleva a menor vapor de agua (gas de efecto invernadero)
- menor vapor de agua también lleva a una menor precipitación (seco!!!)

Posibles causas de climas cálidos de largo plazo

- continentes pequeños tienen climas menos extremos
- continentes pequeños desvían corrientes oceánicas sentido norte-sur; impulsan el transporte de calor global (sin embargo, el cierre de pasajes (Istmo de Panamá por ejemplo), bloqueando corrientes cálidas, puede tener el efecto contrario)
- derretimiento de las capas de hielo decrece el albedo (mecanismo de reacción positiva)
- vulcanismo extendido de gran tamaño inyecta gases de invernadero a la atmósfera.

Posibles causas de variaciones climáticas de corto plazo

- Cambios en escalas de tiempo de menos de unos cuantos millones de años no puede ser causado por tectónica de placas de largo plazo. Cambios en los parámetros orbitales de la Tierra (ciclos de Milankovitch); controla la cantidad de luz solar que la Tierra recibe; escalas de miles de años.
- cambios en la producción solar; escalas de años a billones de años
- vulcanismo; escalas de años (salida de SO₂ causa enfriamiento) a miles de años (salida de CO₂ durante erupciones muy largas, de gran escala de flood basalts)
- cambios en las corrientes oceánicas (decadas a cientos de años??)
- interacción entre océanos, atmósfera, capas de hielo (años a decadas??)

Indicadores ambientales de climas de corto plazo

- composición del polen
- cambios en el nivel del mar
- núcleos de hielo (cantidad de CO₂ en burbujas); datos disponibles por los últimos 800,000 años.
- anillos coralinos, isótopos de oxígeno en corales, sedimentos marinos y capas de hielo/glaciares.
- proporciones de isótopos: p.e., proporciones de ¹⁶O/¹⁸O; ¹⁸O tiene 2 neutrones más que ¹⁶O haciendolo más pesado; ¹⁸O se evapora más fácilmente en aguas cálidas; evaporación de aguas frías de los océanos remueve ¹⁶O

relativamente más, dejando aguas ricas en ^{18}O que van a formar parte de los corales y sedimentos marinos; así que la proporción de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en los corales es mayor; por otro lado, los glaciares atrapan más ^{16}O así que la proporción de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en los glaciares y capas de hielo es menor en climas fríos. La situación es al contrario en climas cálidos.

- anillos de los arboles

Indicadores climáticos históricos registrados

- registro de impuestos para cultivos
- pinturas
- canciones, historias épicas
- tamaño de hielo en temporada alrededor de Islandia
- nombres (p.e., Greenland, Groenlandia se debe a periodo cálido entre años 800-1000)
- cultivo de viñedos en Inglaterra
- registro de avance o retroceso de glaciares en montañas
- mediciones modernas

Periodos fríos de corto plazo en el pasado

- varias eras de hielo y periodos cálidos interglaciares en la época pleistoceno (últimos 2 millones de años)
- último era de hielo: hace 18,000 - 10,000 años (ver apéndice)
- Mínimo de Maunder (1700) durante la "pequeña era de hielo" (1400 - 1850); avance de glaciares; mar alrededor de Islandia se congeló; ríos y canales en Europa se congelaron

Periodos Cálidos de corto plazo en el pasado

- en últimos 10,000 años, en general periodo interglaciar (calentamiento) después de la pequeña era de hielo
- hace 5000-6000 años (aumento fertilidad en el Cercano Este; temperatura global fue 2°C mayor a la actual; posible causa: variación en energía solar)
- Groenlandia era verde hacia 900 DC, por lo tanto más cálido que hoy en día!!

- actual tendencia muestra calentamiento en escalas pequeñas de tiempo, pero muestra enfriamiento en una escala mayor (millones de años)
- tendencia más reciente: rápido calentamiento a una tasa que no se había observado en los últimos 650,000 años

Siglos XX y XXI

- temperatura global aumentó 0.6°C en último siglo
- aumento más fuerte entre 1910-1945 y desde 1976
- el primero puede deberse a un sol más cálido y falta de vulcanismo global (de acuerdo al texto de clase)
- el segundo se debe a la inyección de gases de efecto invernadero
- tendencia del calentamiento muestra un salto temporal gracias a la erupción del Pinatubo en 1991
- la mayoría de glaciares están retrocediendo, incluyendo capas de hielo y glaciares en zonas ecuatoriales
- Las capas de hielo de la Antártida presenta pérdida o ruptura de grandes masas de hielo
- si las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida se derritieran por completo, el nivel global del mar subiría 65 m
- causas de el derretimiento de las capas de hielo es complejo, p.e., la capa de hielo que está desapareciendo en Kilimanjaro podría deberse al calentamiento global pero también a la reducción local en la precipitación como consecuencia de la deforestación local

Los Ciclos de Milankovitch

- excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del sol (100,000 años)
- inclinación del eje de rotación de la Tierra (41,000 años); de 21.5° a 24.5°; presente es 23.5°)
- precesión del eje de rotación de la Tierra (como un trompo); entre 23,000 y 19,000 años. Nota: la mayoría de libros le dan un periodo de 20,000 años, lo cual es suficientemente preciso para la clase.
- el efecto combinado de estos 3 parámetros es bastante complejo con varios mínimos, pero no todos los mínimos provocan una era de hielo

- con únicamente los ciclos de Milankovitch no se puede explicar las eras de hielo. Los cambios en los parámetros orbitales pueden generar cambios en la temperatura de hasta 4°C. Sin embargo, los cambios que se han observado son mayores (5-7°C en zonas costeras y de 10-13°C tierra adentro). Por lo tanto otros mecanismos (p.e., reacción positiva) tienen que cooperar.
- las diferencias entre las estaciones es incluso MÁS importante que la cantidad de insolación (se necesitan veranos fríos para evitar que el hielo se derrita e inviernos suaves que permita que nieve fuerte).
- volumen de hielo glaciar tiene un patrón de serrucho en el cual el calentamiento ocurre más rápidamente que el enfriamiento; calentamiento extenso puede ocurrir en tan solo unos cuantos años!!
- calentamiento es acelerado por mecanismos de reacción positiva, como el derretimiento de capas de hielo que poseen un albedo muy alto

Cambios en energía solar de corto plazo

- aumento en fertilidad del Cercano Este (hace 5000-6000 años) puede deberse a mayor actividad solar
- Mínimo de Maunder (1700) durante "pequeña era de hielo" puede deberse a un 0.25% menor energía solar
- algunas décadas tienen menor actividad solar (p.e., era menor al comienzo del siglo XX y solo aumentó en los tarde en los 50s)
- ciclo de manchas solares tiene un mínimo cada 11 años

Lecturas Recomendadas

No necesarias para pasar el examen, solo para mentes interesadas: "Earth's Climate, Past and Future" by William F. Ruddiman, 2000. W.H. Freeman and Company, ISBN: 0-7167-3741-8

APENDICE A: Clima en la Tierra Temprana

- La atmósfera terrestre temprana se cree que era similar a la de Venus o Marte actualmente que han cambiado poco a través del tiempo
- La atmósfera terrestre sufrió cambios drásticos de una atmósfera rica en CO₂ a una pobre en CO₂
- gran parte de esto se cree es debida a meteorización química

- la mayoría del CO_2 está almacenada en limolitas por meteorización química, conchas de fósiles, corales, etc., como un carbonato (p.e., carbonato de calcio, CaCO_3).
- la mayoría del CO_2 hoy endía está almacenado en el fondo del océano (ver Ciclo del Carbono; Apéndice C)
- las plantas retiran parte del CO_2 y respiran O_2 El libro del curso enfatiza que el mayor cambio en la atmósfera terrestre ha sido la disminución de el CO_2 , gas de efecto invernadero, haciendo vivible el planeta. Otros textos enfatizan que el cambio importante en la atmósfera terrestre ha sido el aumento en O_2 , que fue generado principalmente por la fotosíntesis temprana. Por lo tanto los seres vivos iniciales también causaron cambios fundamentales en la atmósfera terrestre.

APENDICE B: Efecto de Invernadero desbocado (Run-away Greenhouse)

En un efecto invernadero desbocado (run-away greenhouse), calentamiento continua hasta que se pierde toda el agua

- calentamiento de la atmósfera causa que el agua se evapore
- el vapor de agua atmosférico aumenta el efecto de invernadero, acelerando la evaporación
- sin un mecanismo de reacción negativo que modere, la temperatura de la Tierra aumentaría hasta que todos los océanos fueran evaporados
- esta cadena de eacción se le conoce como run-away greenhouse
- contrario a lo que nos dice el libro, no hay evidencia que la Tierra haya alguna vez sufrido de run-away greenhouse

Nota: La atmósfera de Venus, densa con CO_2 mantiene la temperatura a 480°C es un ejemplo de run-away greenhouse en el cual los mecanismos de reacción positiva aumentan el calentamiento La atmósfera de Marte es muy delgada como para generar un efecto de invernadero significativo

APENDICE C: Ciclo del Carbono

- el camino que toma el carbono es de especial interés ya que el CO_2 es un gas de efecto invernadero
- el ciclo del carbono describe el intercambio de C entre diferentes reservorios
 - RESERVORIOS¹: atmósfera: 720 Gt (gigatonnes)

- * océanos: 38,400 Gt
 - # total inorgánico: 37,400 (capa superficial: 670; capas profundas: 36,730)
 - # total orgánico: 1000
- * biosfera terrestre: 2000 Gt
 - # masa biótica viva: 600-1000
 - # masa biótica muerta: 1200
- * sedimentos y rocas: 75,000,000 Gt
 - # carbonatos sedimentarios: ¿ 60,000,000
 - # kerogenos (etapa geológica temprana para roca fuente de petróleo): 15,000,000
- * biosfera acuática: 1-2
- * combustibles fósiles: 4130
- CAMINOS HACIA ATMÓSFERA² (de acuerdo al libro): intercambio atmósfera-océano: 100-115 Gt
 - * decaimiento material orgánico: 50-60
 - * respiración de plantas: 40-60
 - * quema combustibles fósiles: 6
 - * desmonte o tala de tierras: 1-2.5
 - * vulcanismo: no se sabe
- CAMINOS DE SALIDA DE LA ATMÓSFERA² (de acuerdo al libro): fotosíntesis: 100-120
 - * intercambio atmósfera-océano: 105-120
 - * meteorización de rocas: desconocido, tal vez 0.6; era más importante en la Tierra temprana
- cantidad de CO₂ en la atmósfera es de solo 0.037%; pero si el CO₂ y el agua estuvieran ausentes en la atmósfera, la Tierra estaría 33°C más fría; T promedio actual es de 15 °C.
- la actividad humana, especialmente en USA (produce 25% de la producción mundial de CO₂) está aumentando el contenido de CO₂ atmosférico a una tasa alarmante.

APENDICE D: Episodios Destacados (de acuerdo al libro)

- Era de Hielo del Paleozoico Tardío (hace 360 - 260 millones de años): gran era de hielo; uno a más supercontinentes cerca de los polos aumentando el albedo, menor vapor de agua, menor precipitación, menor cantidad de gases de invernadero

- Edad Tórrida del Paleoceno Tardío (hace 65-55 millones de años): ligeramente mayor cantidad de lluvias en zonas ecuatoriales que hoy en día, pero latitudes más altas mucho más cálidas; océanos del sur a 10-15°C; menor diferencia de temperatura entre océanos someros y profundos lo que lleva a una menor circulación geográfica; posible liberación catastrófica de gases de los hielos (metanos) del suelo marino
- Era de Hielo del Cenozoico Tardío (últimos 40 millones de años): La Tierra sufre una tendencia de enfriamiento de largo plazo; capas de hielo continentales hace 5 - 3 millones de años

APENDICE E: La última era de hielo

- hace 18,000-10,000 años
- capa de hielo se expande por norteamérica y Fennoscandia
- mayores lluvias en latitudes medias
- nivel del mar cae considerablemente (130m)
- puente de tierra en el Estrecho de Bering facilita migración de Eurasia al nuevo mundo
- actualmente en un tendencia de enfriamiento a largo plazo interglaciar, pero un calentamiento a corto plazo
- si las capas de hielo actuales se derritieran, aumento del nivel del mar sería de 65m

APENDICE F: Las Leyes y Registro Fósil

Los geólogos usan perfiles estratigráficos, la estratificación de sedimentos y los fósiles que se encuentran dentro de los sedimentos, para estimar climas y ambientes en el pasado. Esto solo es posible bajo ciertas condiciones que son formuladas en una leyes. Incluidas están:

- uniformitarismo: procesos que ocurren hoy en día son los mismos que ocurrieron en el pasado
- ley de superposición: en una secuencia estratigráfica sin perturbaciones los capas más jóvenes yacen sobre capas más viejas
- ley de fauna assemblage: capas con edades similares pueden ser reconocidas por el ensamblaje similar de los fósiles que contiene

La validez de la última ley era particularmente importante antes de la existencia de métodos físicos de datación (p.e. datación radiométrica).

REFERENCIAS

- 1 Falkowski et a., 2000. "The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System". Science, vol 290 (13 October), 291-296
- 2 Patrick Abbott, 2005. "Natural Disasters". McGraw Hill