EL CLIMA DE LA TIERRA[1]

El clima de la Tierra es el resultado de una compleja interacción entre factores astronómicos, geológicos y atmosféricos.

Resumen

Cuando la Tierra era joven, su atmósfera estaba compuesta principalmente de gases volcánicos como dióxido de carbono, vapor de agua, metano y amoníaco. No había oxígeno libre en la atmósfera y la temperatura era extremadamente alta.

Con el tiempo, el planeta se enfrió lo suficiente para que el vapor de agua en la atmósfera se condensara, formando los primeros océanos. Estas grandes masas de agua comenzaron a regular el clima, absorbiendo y distribuyendo el calor.

Período Geológico	Temperatura Media Global	Concentración de CO_2	Organismos Predominantes
Formación de la Tierra (~4.5 mil millones de años)	~4000°C	Altamente variable	No había vida, solo procesos químicos intensos
Arcaico (~3.8-2.5 mil millones de años)	Descenso gradual	CO_2 dominante	Primeras bacterias anaerobias y cianobacterias
Proterozoico (~2.5-0.54 mil millones de años)	Variaciones extremas	Disminución progresiva	Primeros organismos multicelulares, algas
Paleozoico (~541-252 millones de años)	Fluctuaciones	Miles de ppm, reduciéndose	Trilobites, peces primitivos, primeros anfibios
Mesozoico (~252-66 millones de años)	Más cálido que hoy	~1000-2000 ppm	Dinosaurios, primeros mamíferos y aves
Cenozoico (~66 millones de años-presente)	Descenso gradual hasta el Holoceno	~400 ppm	Mamíferos dominantes, evolución humana

La evolución de las primeras formas de vida, como las cianobacterias, contribuyó a un cambio fundamental en el clima al liberar oxígeno en la atmósfera a través de la fotosíntesis. Esto permitió la formación de una capa de ozono, que protegió la Tierra de la radiación ultravioleta y permitió el desarrollo de climas más estables.

Hoy en día se entiende que el clima de la Tierra depende de varios factores, como la radiación solar, la circulación atmosférica, las corrientes oceánicas y la influencia humana. Los cambios climáticos han ocurrido de manera natural a lo largo de la historia, pero en la actualidad, el calentamiento global causado por la actividad humana está alterando de manera significativa el equilibrio climático del planeta.

Nacimiento del planeta

Hace aproximadamente 4.500 millones de años, la Tierra se formó a partir de la acumulación de material en el disco protoplanetario que rodeaba al joven Sol. A medida que partículas de polvo y gas chocaban y se fusionaban, se fueron creando cuerpos más grandes hasta que la Tierra tomó forma como un planeta rocoso.

Durante sus primeros cientos de millones de años, la Tierra fue golpeada constantemente por asteroides y cometas. Estos impactos generaban calor extremo, manteniendo el planeta en un

[1] Articulo desarrollado por Maximiliano Campos Ortiz, Secretario Ejecutivo del CRRH-SICA, a través de Inteligencia Artificial con fuentes y referencias verificables.

estado semi-fundido. Además, su núcleo comenzó a diferenciarse, formando una estructura interna con un núcleo metálico y un manto de roca fundida.

Los volcanes liberaban enormes cantidades de gases, creando la **primera atmósfera** (la atmósfera primitiva, hace 4.500- 3.800 millones de años) la cual estaba compuesta principalmente de:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Vapor de agua (H_2O)
- Nitrógeno (N_2)
- Metano (CH_4)
- Amoníaco (NH_3)

Esta atmósfera primitiva no contenía oxígeno libre, por lo que el planeta era inhóspito para formas de vida como las que conocemos hoy.

A medida que la Tierra se enfrió, el vapor de agua comenzó a condensarse, dando origen a los **océanos**. Se cree que parte del agua también provino de los impactos de cometas ricos en hielo. Estos océanos desempeñaron un papel clave en el desarrollo del clima, regulando la temperatura y comenzando procesos químicos que eventualmente llevaron a la evolución de la vida. Los océanos desempeñaron un papel crucial, ya que comenzaron a absorber dióxido de carbono, reduciendo la concentración de este gas en la atmósfera y ayudando a estabilizar la temperatura del planeta.

Primeros cambios climáticos

Sin la protección de una capa de ozono y sin oxígeno en la atmósfera, la Tierra experimentaba fuertes radiaciones solares y condiciones extremas. Sin embargo, con el paso de los milenios, la actividad geológica y los océanos contribuyeron a estabilizar el ambiente, preparando el escenario para la aparición de las primeras formas de vida.

<u>La revolución del oxígeno (Hace 2.500 - 2.300 millones de años)</u>

La fotosíntesis de las cianobacterias (absorbían dióxido de carbono y agua, y liberaban oxígeno como subproducto) liberó oxígeno en la atmósfera, lo que llevó a, ¨La Gran Oxidación¨.

Este aumento de oxígeno tuvo efectos profundos en el planeta:

- Transformación de los océanos: en los océanos, el oxígeno reaccionó con el hierro disuelto, formando grandes depósitos de óxidos de hierro que hoy conocemos como "formaciones de hierro bandeado".
- Cambio en la atmósfera: el oxígeno libre comenzó a acumularse, lo que eventualmente llevó a la formación de la capa de ozono (O_3), que protege contra la radiación ultravioleta.
- Extinción masiva de organismos anaerobios: muchos microorganismos que vivían sin oxígeno fueron exterminados, ya que para ellos el oxígeno era tóxico. Fue una de las primeras extinciones masivas en la historia de la Tierra.
- Aparición de vida más compleja: con oxígeno disponible comenzaron a surgir formas de vida más sofisticadas, capaces de respirar oxígeno para obtener energía (respiración aeróbica).

La Revolución del Oxígeno cambió el curso de la vida en la Tierra, preparando el escenario para la aparición de organismos multicelulares y, millones de años después, la evolución de los animales y los humanos.

El dióxido de carbono (CO_2) desempeñó un papel fundamental en la atmósfera primitiva de la Tierra, influyendo en la temperatura, la química atmosférica y la evolución de la vida. En los primeros mil millones de años de la Tierra, la atmósfera estaba dominada por gases volcánicos, con altas concentraciones de CO_2. Este gas se liberaba constantemente a través de erupciones volcánicas, ya que la actividad geológica era extremadamente intensa en aquel período.

El CO_2 fue clave en el efecto invernadero, atrapando calor y evitando que la superficie terrestre se enfriara demasiado. Sin este fenómeno, la temperatura habría sido mucho más baja, lo que podría haber dificultado la formación de los primeros océanos.

A medida que la Tierra se enfrió y el vapor de agua se condensó, formando los primeros océanos, gran parte del CO_2 comenzó a disolverse en el agua, reaccionando químicamente con minerales y formando carbonatos que quedaron atrapados en las rocas marinas, reduciendo progresivamente su concentración en la atmósfera.

El CO_2 también jugó un papel crucial en el desarrollo de las primeras formas de vida. Las primeras bacterias anaeróbicas dependían de reacciones químicas relacionadas con el carbono para su metabolismo. Más tarde, con la aparición de las cianobacterias, el CO_2 se convirtió en la materia prima esencial para la fotosíntesis, el proceso que liberó oxígeno y transformó la atmósfera terrestre.

Con el tiempo, el crecimiento de los organismos fotosintéticos provocó una reducción significativa del CO_2 y un aumento del oxígeno, lo que llevó a la transformación de la atmósfera en una composición más parecida a la actual.

El dióxido de carbono sigue siendo un gas fundamental en el equilibrio climático de la Tierra, aunque su concentración actual ha aumentado debido a la actividad humana.

Períodos glaciales y fluctuaciones del CO_2 (Hace 800 - 500 millones de años)

En distintos momentos de la historia, las fluctuaciones del CO_2 afectaron el clima de la Tierra. Por ejemplo, en las eras glaciales, la reducción del CO_2 provocó un descenso en la temperatura global. Cuando las emisiones volcánicas aumentaban nuevamente el CO_2, la Tierra se calentaba y salía de la glaciación. El CO_2 ha sido clave en la evolución de la Tierra y la vida, pero su equilibrio es delicado. En el pasado, variaciones naturales en el CO_2 provocaban cambios climáticos graduales, pero el aumento actual está ocurriendo a una velocidad sin precedentes.

Desde la revolución industrial (siglo XVIII en adelante), la quema de combustibles fósiles ha incrementado drásticamente la concentración de CO_2 en la atmósfera. Esto está generando el cambio climático, con impactos como:

- Aumento de la temperatura global debido al efecto invernadero.
- Derretimiento de glaciares y aumento del nivel del mar.
- Eventos climáticos extremos como huracanes, sequías e incendios forestales.

Períodos geológicos marcados por el CO_2		
Período Cámbrico	Hace 541 - 485 millones de años.	Alta concentración de CO_2, temperaturas cálidas y expansión de la vida marina.
Período Carbonífero	Hace 359 - 299 millones de años**.**	Gran reducción del CO_2 debido a la acumulación de materia vegetal enterrada (que luego se convirtió en carbón). Este descenso contribuyó a una era glacial.
Período Cretácico	Hace 145 - 66 millones de años.	Aumento del CO_2 por actividad volcánica, dando lugar a un clima cálido con altos niveles del mar.
Eventos extremos y el CO_2		
Extinción del Pérmico-Triásico	Hace 252 millones de años.	Erupciones masivas liberaron enormes cantidades de CO_2, elevando las temperaturas y provocando una extinción masiva
Extinción del Cretácico-Paleógeno	Hace 66 millones de años.	El impacto del asteroide que acabó con los dinosaurios generó incendios y liberación de CO_2, afectando el clima y contribuyendo a la crisis ecológica

Figura: La evolución del dióxido de carbono - Fuente NASA

Cambios más importantes en la temperatura de la tierra

La relación entre las concentraciones de CO_2 y la temperatura de la Tierra está directamente vinculada al efecto invernadero. Cuando los niveles de CO_2 aumentan, más calor queda atrapado en la atmósfera, lo que provoca un incremento en la temperatura global.

La temperatura de la Tierra ha variado significativamente a lo largo de las eras geológicas, influenciada por factores como la composición atmosférica, la actividad volcánica, la posición de los continentes y la radiación solar.

El estudio del clima del pasado es de interés para los científicos, pues mejora la comprensión de la variabilidad climática actual y proporciona una mejor base para las proyecciones futuras del clima. En particular, si la naturaleza y la magnitud de la variabilidad natural del clima se puede establecer, los científicos serán capaces de detectar en mejor manera las contribuciones antropogénicas al calentamiento global. Cabe aclarar que, no obstante, a pesar de que la reconstrucción de las temperaturas obtenidas desde los datos que brindan los proxies nos ayudan a entender las características de la variación del clima natural, esto se basa en una amplia variedad de metodologías en las que las reconstrucciones de proxy son solo una pequeña parte.

De acuerdo con todas las reconstrucciones de temperatura, el incremento en la temperatura en el siglo XX y la temperatura durante este siglo es la más alta en los registros.

Los **paleoclimas** son los climas que existieron en la Tierra en el pasado, antes de que tuviéramos tecnología para medirlos directamente. Su estudio, llamado **paleoclimatología**, se basa en registros naturales como núcleos de hielo, anillos de árboles, fósiles y sedimentos oceánicos para reconstruir las condiciones climáticas de épocas antiguas. Comprender los paleoclimas es clave para analizar los patrones naturales del cambio climático y compararlos con los efectos actuales de la actividad humana.

Las variaciones en el clima[2] pueden ocurrir por múltiples factores, tanto naturales como antropogénicos, por ejemplo:

- **Actividad solar**: Cambios en la radiación solar pueden afectar la temperatura global.
  La actividad solar influye en el clima terrestre, pero su impacto es relativamente pequeño en comparación con otros factores como los gases de efecto invernadero. El Sol sigue ciclos de aproximadamente 11 años, en los cuales su radiación varía ligeramente. Sin embargo, estudios han demostrado que estos cambios no son suficientes para explicar el calentamiento global reciente. Algunos efectos de la actividad solar incluyen:

  - <u>Ciclos solares</u>**:** Durante los períodos de alta actividad, hay más manchas solares y erupciones, lo que puede afectar la atmósfera terrestre.
  - <u>Variaciones en la radiación</u>: Aunque la energía solar fluctúa, los cambios han sido menores al 0.1% en los últimos 40 años.
  - <u>Eventos extremos</u>: En el pasado, períodos de baja actividad solar, como el Mínimo de Maunder (1645-1715), coincidieron con enfriamientos globales, como la Pequeña Edad de Hielo en Europa.

[2] *https://estudyando.com/que-son-las-variaciones-climaticas-naturales/*
¿Qué son las Variaciones Climáticas Naturales?, Rodrigo Ricardo, 2024.

- **Variaciones en la órbita terrestre**.
  - La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es completamente estable. La forma de la órbita, la inclinación de su eje y la dirección de su inclinación experimentan pequeñas variaciones conocidas como ciclos de Milankovitch. Estos ciclos ocurren a lo largo de miles de años afectan la cantidad de radiación solar que recibe la Tierra y pueden ser responsables de cambios climáticos a largo plazo, como las glaciaciones y los períodos interglaciares, estos ciclos incluyen:
    - Excentricidad: Cambios en la forma de la órbita, que varía de circular a elíptica.
    - Oblicuidad: Variaciones en la inclinación del eje terrestre, lo que afecta la estacionalidad.
    - Precesión: Cambio en la dirección del eje de la Tierra, que puede alterar la estación en la que ocurren los solsticios y equinoccios.
- **Erupciones volcánicas.**
  - Las erupciones volcánicas pueden tener un impacto considerable en el clima de la Tierra. Cuando un volcán entra en erupción, libera grandes cantidades de gases y partículas en la atmósfera. Uno de los efectos más significativos es la liberación de dióxido de azufre (SO_2), que se combina con el vapor de agua para formar aerosoles de ácido sulfúrico. Estos aerosoles pueden reflejar la radiación solar, lo que provoca un enfriamiento temporal en la superficie terrestre, un fenómeno conocido como "invierno volcánico". Las erupciones volcánicas pueden alterar el clima durante meses o incluso años. Un ejemplo notable de este efecto fue la erupción del Monte Tambora en 1815, que condujo al "año sin verano" en 1816, causando una disminución significativa de las temperaturas globales.
- **Corrientes oceánicas**.
  - El océano juega un papel fundamental en la distribución del calor en la atmósfera, ya que actúa como un regulador térmico natural. Variaciones en las corrientes oceánicas, como durante el fenómeno El Niño y La Niña, pueden afectar significativamente el clima mundial.
- **Impactos de meteoritos.**
  - Aunque son extremadamente raros, los impactos de meteoritos también pueden generar variaciones climáticas significativas. Un impacto de gran magnitud puede liberar una enorme cantidad de energía, creando incendios forestales masivos, liberando gases y polvo en la atmósfera que oscurecen el cielo y disminuyen la cantidad de luz solar que llega a la Tierra. Esto puede causar un enfriamiento global temporal, fenómeno conocido como "invierno de impacto". Se cree que un evento como el impacto de un meteorito hace unos 66 millones de años contribuyó a la extinción masiva de los dinosaurios y a un cambio climático abrupto.
- **Cambio climático inducido por el ser humano**: La quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura han acelerado el calentamiento global.

Las variaciones climáticas naturales son un componente fundamental del sistema climático de la Tierra, y han influido en el clima del planeta a lo largo de millones de años. Factores como la actividad solar, las variaciones en la órbita terrestre, el vulcanismo, las corrientes oceánicas y los

impactos de meteoritos han alterado las condiciones climáticas en escalas de tiempo geológicas. Si bien estos fenómenos son naturales, la aceleración del cambio climático debido a la actividad humana ha intensificado los efectos sobre el clima de manera alarmante. Comprender las variaciones climáticas naturales es crucial para diferenciar entre los cambios climáticos que ocurren de manera natural y aquellos que son impulsados por las actividades humanas, permitiendo así tomar decisiones informadas sobre cómo mitigar los impactos del cambio climático en el futuro.

Sobre este articulo

Articulo desarrollado por el CRRH a través de Inteligencia Artificial con fuentes y referencias verificables.

- https://www.climaterra.org/inicio/categories/ipcc
- El Mínimo de Maunder y la Pequeña Edad de Hielo. ASTROBITACORA. Publicado por Alex Riveiro, enero 2018.
  - https://www.astrobitacora.com/minimo-de-maunder-pequena-edad-hielo/
- WIKIPEDIA
  - https://es.wikipedia.org/wiki/Registro_de_temperaturas
- ¿Qué son las Variaciones Climáticas Naturales?, Rodrigo Ricardo, 2024.
  - https://estudyando.com/que-son-las-variaciones-climaticas-naturales/

ANEXO

La historia geológica de la Tierra se organiza en una jerarquía de unidades de tiempo que ayudan a clasificar los eventos y cambios ocurridos a lo largo de millones de años. Aquí está la estructura principal:

1. **Eón**: La división más grande del tiempo geológico. Ejemplos:
    - **Hádico** (4.6 - 4.0 mil millones de años)
    - **Arcaico** (4.0 - 2.5 mil millones de años)
    - **Proterozoico** (2.5 - 541 millones de años)
    - **Fanerozoico** (541 millones de años - presente)
2. **Era**: Subdivisión de los eones, marcadas por grandes cambios en la vida y el clima.
    - **Paleozoico** (541 - 252 millones de años) – "Era de los peces"
    - **Mesozoico** (252 - 66 millones de años) – "Era de los reptiles"
    - **Cenozoico** (66 millones de años - presente) – "Era de los mamíferos"
3. **Período**: Subdivisión de las eras, con eventos geológicos y biológicos más específicos.
    - Ejemplo en el Mesozoico: **Triásico**, **Jurásico**, **Cretácico**.
4. **Época**: Subdivisión de los períodos, con cambios más detallados en el clima y la vida.
    - Ejemplo en el Cenozoico: **Pleistoceno**, **Holoceno**.
5. **Edad**: La unidad más pequeña, usada para definir eventos geológicos específicos.

Supereón	Eón	Era	Periodo	Inicio, en millones de años
	Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	2,59
			Neógeno	23,04
			Paleógeno	66,0
		Mesozoico	Cretácico	143,1
			Jurásico	201,4±0.2
			Triásico	251,902±0,024
		Paleozoico	Pérmico	298,9±0,15
			Carbonífero	358,86±0,19
			Devónico	419,62±1,36
			Silúrico	443,1±0,9
			Ordovícico	486,8 ±1,5
			Cámbrico	538,8±0,6
Precámbrico	Proterozoico	Neoproterozoico	Ediacárico	~635
			Criogénico	~720
			Tónico	1000
		Mesoproterozoico	Esténico	1200
			Ectásico	1400
			Calímico	1600
		Paleoproterozoico	Estatérico	1800
			Orosírico	2050
			Riácico	2300
			Sidérico	2500
	Arcaico	Neoarcaico		2800
		Mesoarcaico		3200
		Paleoarcaico		3600
		Eoarcaico		4031±3
	Hádico			4567

Era *Eratema*	Periodo *Sistema*	Época *Serie*	Subépoca *Subserie*	Edad *Piso*	Inicio, en millones de años[1]
Cenozoico[2]	Cuaternario[2]	**Holoceno**	Tardío / Superior	Megalayense *Megalayiano*	0,0042
			Medio	Norgripiense *Norgripiano*	0,0082
			Temprano / Inferior	Groenlandiense *Groenlandiano*	0,0117
		Pleistoceno	Tardío / Superior	Superior / Tardío (Tarantiense *Tarantiano*)[3]	0,129
			Medio	Chibaniense *Chibaniano*	0,774
			Temprano / Inferior	Calabriense *Calabriano*	1,80
				Gelasiense *Gelasiano*	2,58
	Neógeno				23,03
	Paleógeno				66