

Comprender el calentamiento global – El efecto invernadero y el cambio climático

¿De dónde viene el aumento global de la temperatura?

Es indiscutible que la tendencia al calentamiento en los últimos 50 años, en $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, es casi dos veces mayor que en los últimos 100 años. En 2015, el aumento de la temperatura a nivel mundial alcanzó el valor de $0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del nivel preindustrial.

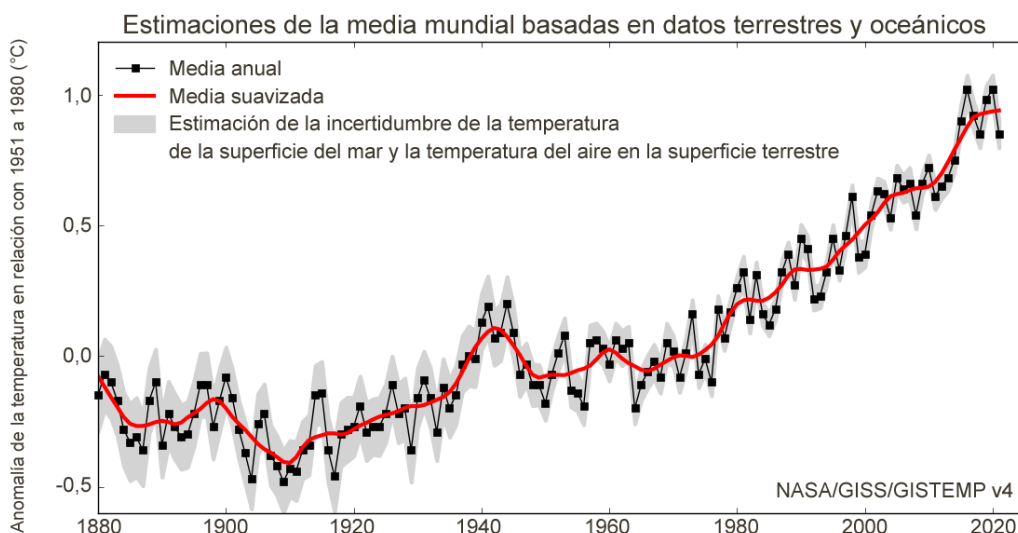


Fig. 1: Índice mundial de temperatura tierra-oceano.

Por: NASA Goddard Institute for Space Studies, licencia: CC 0; traducción: Siemens Stiftung

Los críticos de la tesis del cambio climático antropogénico (hecho por el hombre) sostienen que siempre hubo variaciones de temperatura muy fuertes en la historia del clima de la Tierra. Esto habría ocurrido mucho antes de que la Humanidad fuera capaz de influir sobre el clima; por ejemplo, debido a las variaciones de la actividad solar. Pero mientras tanto, se conoce exactamente la tendencia climática de los últimos 50.000 años en la Tierra.

Con base en la investigación de sedimentos, anillos de crecimiento de los árboles y núcleos de hielo, se puede remontar la tendencia de la temperatura de los últimos 50.000 años a un año en particular. Es cierto que hubo una variedad de cambios bruscos de temperatura sin la intervención humana. Sin embargo, todos estos cambios de temperatura ocurrieron de forma relativamente abrupta en unos cuantos años.

En contraste, en los últimos 150 años se ha visto un calentamiento continuo sin precedentes. Esto sucedió en paralelo a la industrialización y al aumento e intensificación de la agricultura, así como al aumento de la producción asociada de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO_2 , CH_4 , N_2O y otros gases), como lo muestra una comparación entre las Figuras 1 y 2. Por lo tanto, los datos existentes no dejan dudas sobre un cambio climático causado por los seres humanos.

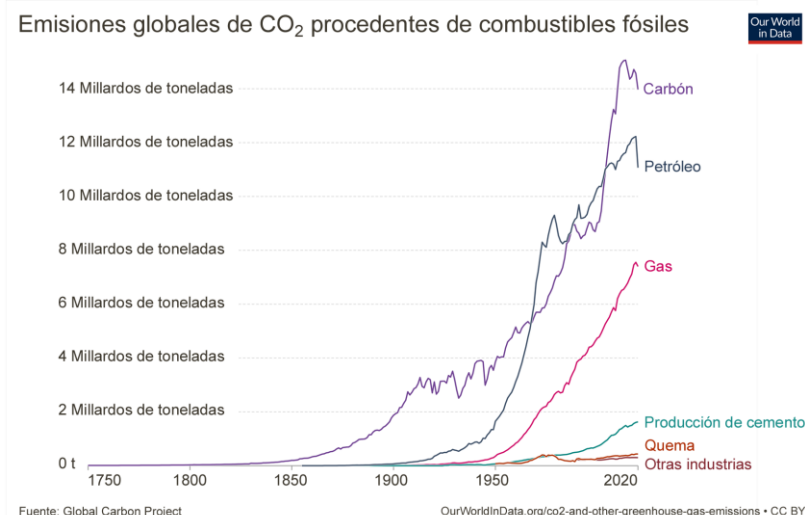


Fig. 2: Emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles entre 1750 y 2020.

Gráfico de: Our World in Data; <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>; licencia: CC BY; traducción: Siemens Stiftung

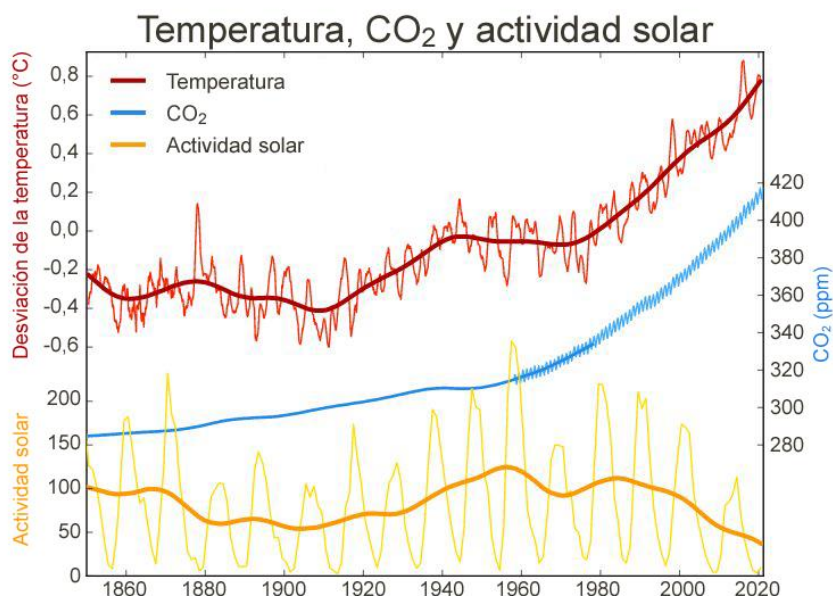


Fig. 3: Temperatura promedio, CO₂ en la atmósfera y actividad solar desde 1850. Las líneas gruesas para la temperatura y la actividad solar muestran un suavizado de los datos en bruto (promedio de 25 años).

Por Leland McInnes de la Wikipedia en inglés, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6696694>; traducción: Siemens Stiftung

La afirmación de que el cambio climático es causado por las fluctuaciones de la actividad solar tampoco tiene sustento, como lo muestra la Figura 3.

¿Qué se entiende por la inercia del clima?

Si fuera posible detener todas nuestras emisiones de gases de efecto invernadero de una sola vez, la temperatura en la Tierra se estabilizaría, pero no disminuiría, ya que el proceso natural de descomposición en la atmósfera dura de siglos a milenios.

El aumento del nivel del mar también continuaría, ya que los océanos se han calentado más lentamente que el resto de la Tierra y, por lo tanto, el agua continúa expandiéndose hasta que las temperaturas se hayan nivelado.

Esto significa que sólo es posible reducir la temperatura global a los niveles preindustriales eliminando activamente el CO₂ de la atmósfera (por ejemplo, mediante la reforestación o la filtración del CO₂ del aire).

¿Cuál es el significado del llamado objetivo de 1,5 grados?

En la Conferencia sobre el Clima de París de 2015, 195 países se comprometieron en un acuerdo sobre el clima a limitar el calentamiento global a 1,5 °C o muy por debajo de 2 °C, en la medida de lo posible. Aunque todavía es posible limitarlo a 1,5 °C, es necesario actuar con rapidez y decisión.

El objetivo de 1,5 grados solo puede cumplirse si en las próximas décadas se realizan grandes esfuerzos para reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo y en todos los sectores de la economía.

¿Qué influye sobre el clima local, aparte del clima global?

Gracias a las diferencias locales de temperatura en la Tierra existen corrientes constantes en el aire y los océanos entre regiones más cálidas y más frías. Es así que el clima de Europa Central, por ejemplo, debido a la Corriente cálida del Golfo resulta más caliente que lo que corresponde a la ubicación geográfica. Pero podría hacer más frío en Europa si la Corriente del Golfo se vuelve más lenta como resultado del calentamiento de Europa. La llamada Corriente del Golfo es termohalina, es decir, se mantiene mediante diferencias en la temperatura y el contenido de sal.

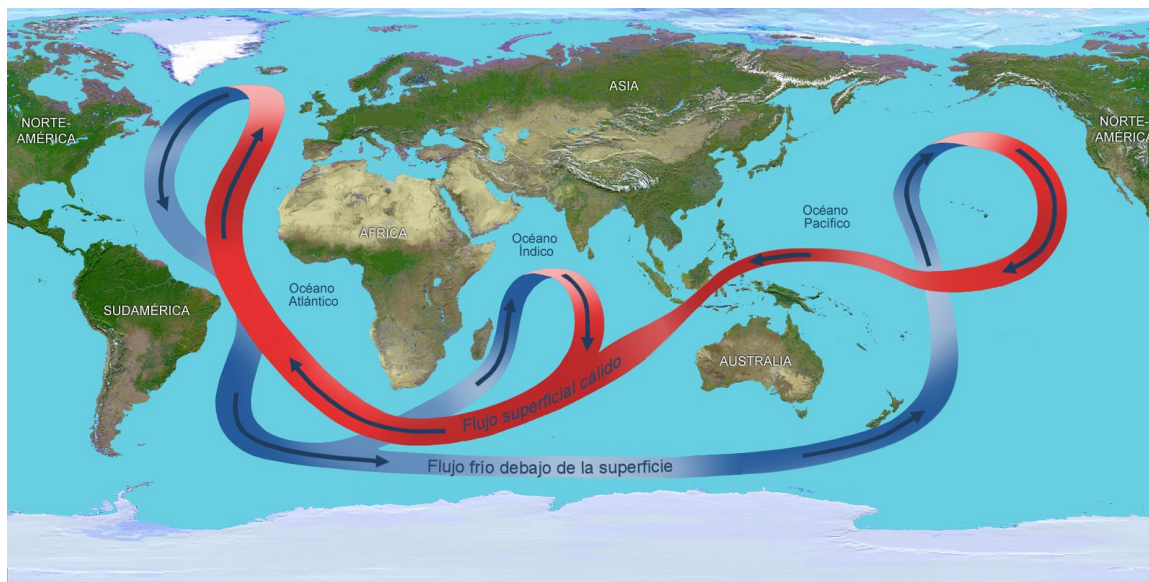


Fig. 4: La "cinta transportadora termohalina global".

Por NASA - NASA, dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84677622>; traducción: Siemens Stiftung

Glaciares en crecimiento - ¿no contradice esto el cambio climático?

Los glaciares se están derritiendo en los Alpes, en América del Sur y en el Himalaya, pero en Nueva Zelanda crecen. Sin embargo, esto no representa una contradicción con el calentamiento global. Porque debido al aumento de las temperaturas del mar alrededor de Nueva Zelanda,

aumenta la formación de vapor de agua y, por tanto, la de nubes. Estas nubes son llevadas lejos debido a las corrientes de aire. Por lo tanto, nieva más que en el pasado en las altas montañas (más de 3.000 m) de Nueva Zelanda, que está rodeada de mar cálido, y los glaciares crecen allí. Por el contrario, los glaciares se derriten en Groenlandia y la capa de hielo del Ártico se vuelve más delgada y más pequeña. La capa de hielo en el borde de la Antártida en la actualidad se está derritiendo, pero en el interior de la Antártida está creciendo debido al aumento de las nevadas.

El efecto invernadero y sus causas

El efecto invernadero debería ser la causa del cambio climático global. Pero, ¿qué exactamente es este efecto invernadero? El efecto invernadero está erróneamente representado como algo que es negativo de por sí. En primer lugar, es necesario corregir esto al señalar que sin el efecto invernadero natural, la vida no sería posible en la Tierra en absoluto. Sin el efecto invernadero, es decir, sin atmósfera, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería de tan sólo -18 °C en vez de 15 °C . Por lo tanto, hacemos una distinción entre el efecto invernadero natural y el efecto invernadero causado por el hombre (el efecto invernadero intensificado antropogénicamente).

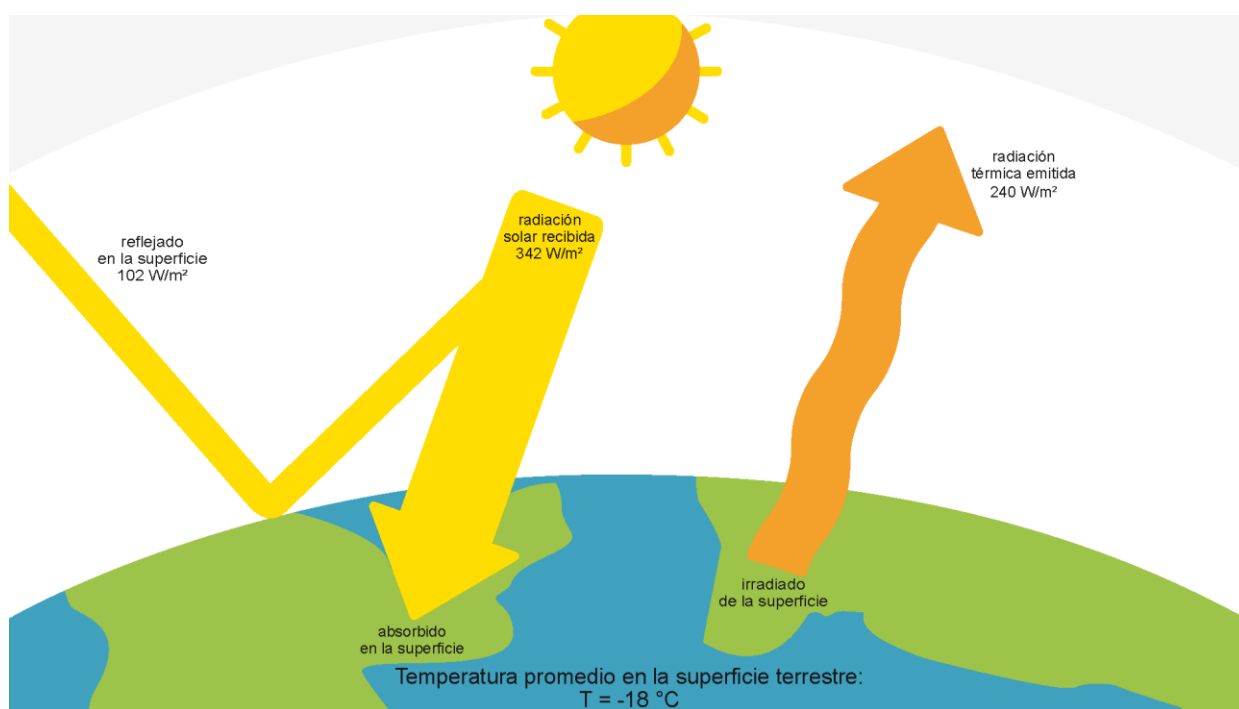


Fig. 5: Sin el efecto invernadero, la superficie de la Tierra estaría a unos fríos -18 °C .

Primero imaginemos la Tierra sin sus capas de gases, nubes y polvo. La Tierra es por lo tanto una esfera “desnuda” sobre la cual inciden los rayos del Sol, lo cual propiciaría el calentamiento hasta llegar a una temperatura específica. Que esta temperatura no siga aumentando constantemente, se debe al llamado “equilibrio de radiación”: al llegar a una determinada temperatura, la esfera terrestre irradia la misma cantidad de energía por unidad de tiempo que la que absorbe por unidad de tiempo; la energía de irradiación es entonces la misma que la energía de radiación. Vemos en el gráfico que la suma de la radiación reflejada directamente de la superficie terrestre (102 W / m^2) y la energía radiada de la superficie terrestre calentada (240 W / m^2) es igual a la energía solar radiada (342 W / m^2).

¿Cómo es que la superficie de la Tierra tiene una temperatura de 15 °C?

Como se mencionó anteriormente, el 100 % de la energía incidente del Sol también debe ser irradiada de vuelta desde la Tierra de acuerdo a la ley del equilibrio de radiación. ¿Por qué, entonces, se presenta un aumento en la temperatura de la Tierra?

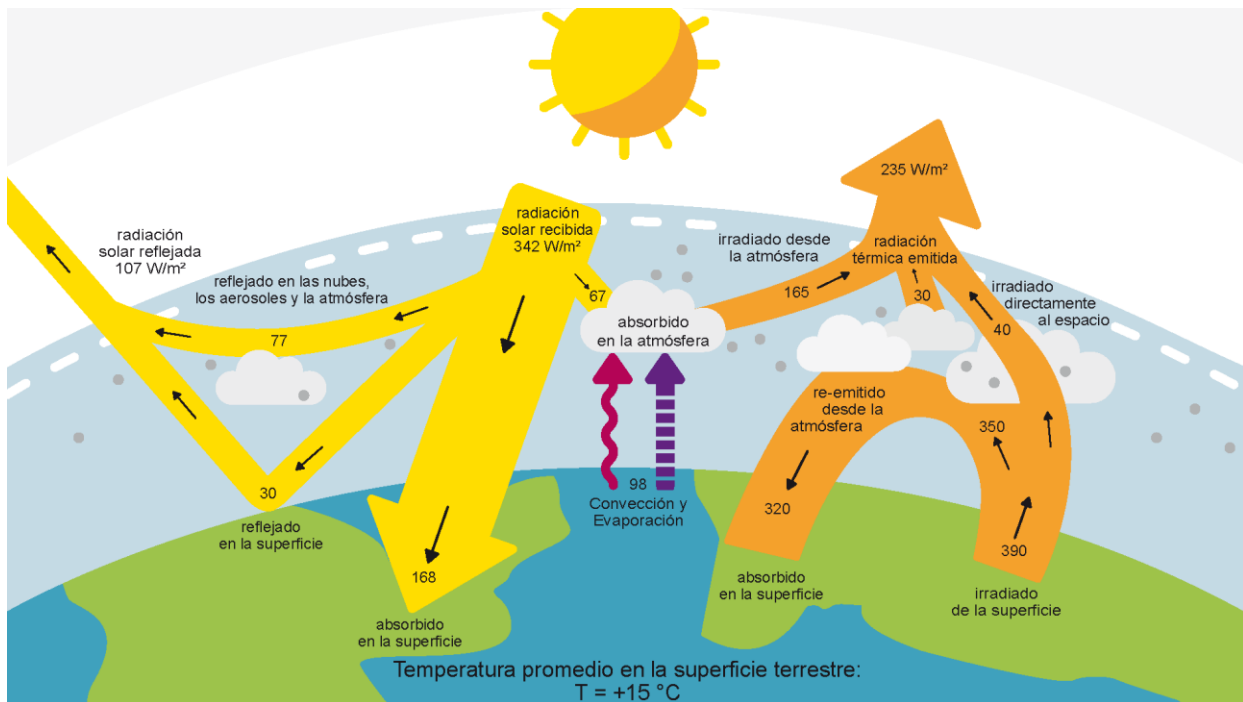


Fig. 6: Equilibrio de radiación global de la Tierra.

En forma simplificada, esto se puede explicar de la siguiente manera:

Radiación solar

- Debido a la elevada temperatura de la superficie solar de aproximadamente 6000 °C, la luz solar que cae sobre la Tierra es relativamente de onda corta (con el principal foco en UV hasta cerca de IR).
- Cuando la luz solar llega a la atmósfera terrestre, alrededor del 22 % de la luz solar se refleja de nuevo directamente al espacio. La parte principal de la luz (70 %) penetra a través de la atmósfera, porque no tiene lugar prácticamente ninguna absorción a estas cortas longitudes de onda (CO_2 , CH_4 , N_2O , y otros gases no absorben longitudes de onda cortas). Sólo ciertos aerosoles, el ozono y las partículas de hollín y de cenizas también absorben en este rango de onda corta (casi 20 %).
- En la superficie terrestre se refleja aproximadamente el 9 % y vuelve desde allí hacia el espacio. El 50 % restante es absorbido mediante la conversión de la energía de radiación de la luz en energía térmica (= movimiento de las partículas más pequeñas de la materia).

Convección y evaporación

- Vía capas ascendentes de aire calentado (convección) y agua evaporada (evaporación) es transportada de nuevo a la atmósfera alrededor del 58 % de la energía térmica almacenada en la superficie de la Tierra.

- Estas capas de aire y nubes calentadas vuelven a lanzar radiación de onda larga, con una parte relativamente grande de ella hacia la superficie terrestre (emisión).

Re-radiación de la superficie terrestre

- 42 % de la energía térmica acumulada se irradia directamente de nuevo desde la superficie de la Tierra. Sin embargo, en comparación con el Sol, la temperatura de la superficie de la Tierra es muy baja, por lo que la radiación terrestre es extremadamente de onda larga (IR lejano).
- Una buena parte de esta radiación de onda larga es absorbida por muchos gases en la atmósfera (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , etc.).

Emisión de la atmósfera

- Las moléculas de gas calentadas* ahora irradian de nuevo, una buena parte de vuelta hacia la superficie terrestre (= "emisión").
* El calor es almacenado como energía cinética, tal como la vibración y rotación.

Aumento de temperatura de la Tierra mediante la formación de capas cálidas próximas a la superficie

- Consecuencia: La superficie de la Tierra se mantiene caliente mediante la formación de capas calentadas por encima de la misma. Y esto a pesar de que (debido a la conservación de la energía y al equilibrio de radiación) a excepción de la energía consumida para la fotosíntesis, más del 99,99 % de la energía es irradiada de vuelta al espacio.

¡La reflexión no explica el efecto invernadero!

A menudo se leen declaraciones erróneas que explican el efecto invernadero con base en la reflexión. Pero como ya hemos visto, el efecto invernadero se debe principalmente a la absorción de la radiación de onda larga emitida por la Tierra por parte de las moléculas de gas de efecto invernadero. La re-radiación (¡que no es igual a la reflexión!) de estas moléculas junto con las moléculas calientes transportadas mediante convección y evaporación, causan una emisión sobre la Tierra y la formación de capas calentadas cerca de la misma.

Así que la atmósfera no refleja la radiación emitida por radiación de la superficie terrestre, sino que la absorbe y la irradia de nuevo.

En la física de las ondas electromagnéticas la reflexión (del latín reflectere = flexión hacia atrás) se refiere a la devolución/reflexión de las ondas en una superficie de frontera. En contraste, en la absorción se realiza una conversión de la forma de energía. Si un cuerpo calentado por la absorción irradia de nuevo la energía de radiación, se habla de re-radiación y no de reflexión.

El efecto invernadero causado por el hombre

Aumento de la temperatura de la Tierra por el aumento de los gases de efecto invernadero

Sin embargo, los gases de efecto invernadero no producen energía. En cambio, ellos ayudan a mantener un equilibrio a un nivel en el cual la capa atmosférica más cerca de la Tierra, en la cual vivimos, es lo suficientemente cálida como para sustentar vida. Si la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera aumenta como resultado de las actividades humanas,

aumenta la absorción y, por tanto, la emisión, lo que a su vez provoca un aumento de la temperatura en las capas cercanas a la Tierra.

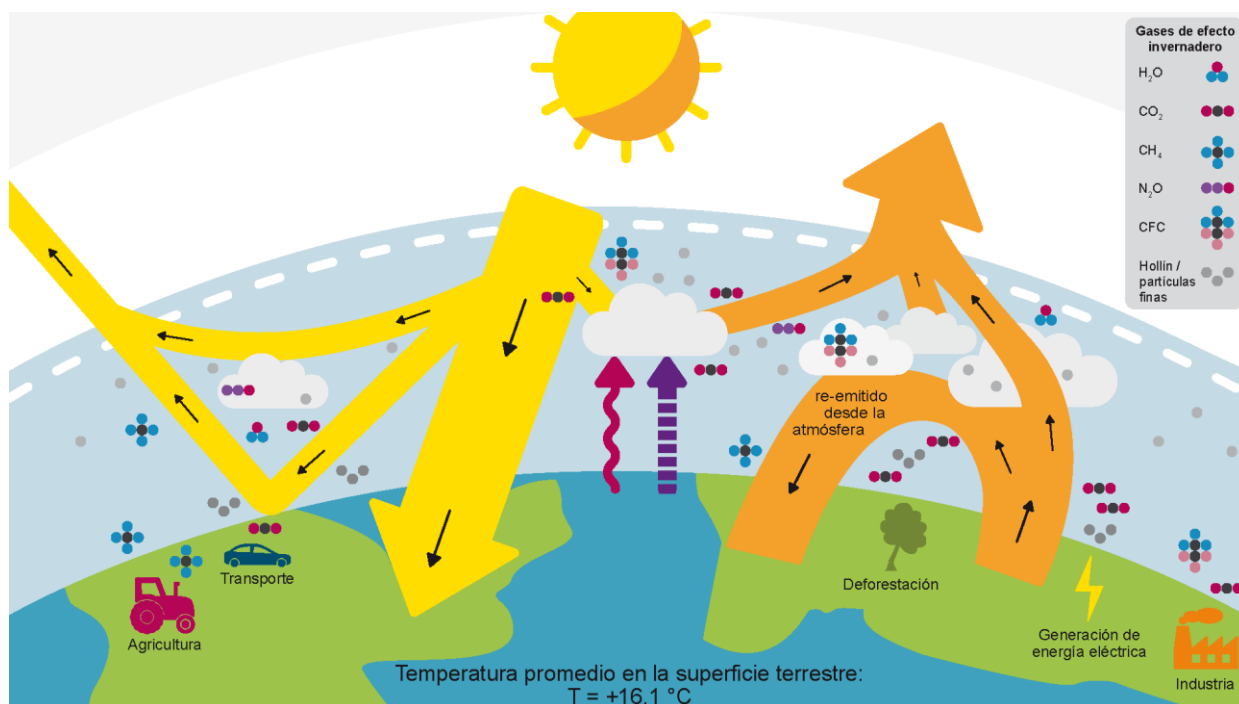


Fig. 7: Aumento de las temperatura global debido a los gases de efecto invernadero causados por los seres humanos.

¿Qué gases contribuyen al efecto invernadero?

Los gases de origen natural tales como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) absorben la radiación térmica desde la superficie de la Tierra y fortalecen la contrarradiación que se lanza de vuelta a la Tierra. Con gases, en particular, la capacidad de emisión y absorción depende en gran medida de la longitud de onda. Esto es particularmente cierto en el caso de los tres principales gases de efecto invernadero: vapor de agua, CO_2 y CH_4 . El oxígeno (O_2) y el nitrógeno (N_2) son los dos gases principales que constituyen aproximadamente el 99 % de la atmósfera. No tienen ninguna capacidad de emisión ni de absorción en el intervalo de radiación térmica de onda larga que es importante en términos de la energía de la Tierra.

En términos de cantidad, el vapor de agua es, por mucho, el mayor contribuyente natural (aproximadamente dos tercios) al efecto invernadero. El CO_2 ocupa el segundo lugar con una proporción de aproximadamente el 15 %; O_3 se encuentra en tercer lugar con una proporción aproximada del 10 % y finalmente el óxido nítrico (N_2O) y CH_4 , cada uno con alrededor de un 3 %. Para un cálculo preciso de las proporciones, también sería necesario conocer la influencia de las nubes y partículas flotantes tales como polvo y aerosoles en la radiación solar y térmica.

Las partículas de cenizas liberadas durante una gran erupción volcánica y la concentración de SO_2 en la atmósfera debido al blindaje de la superficie terrestre contra la luz solar pueden provocar, por ejemplo, una reducción de la temperatura de la Tierra durante varios años. Este ha sido frecuentemente el caso en la historia geológica.

Propiedades físicas del efecto invernadero en detalle

La potencia de radiación entrante

El equilibrio de radiación explicado anteriormente tiene como resultado la temperatura de la superficie de la Tierra, que a su vez se puede calcular con la ley de Stefan-Boltzmann:

$$S_E = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S_E}{\sigma}}$$

Aquí, S_E es la densidad de radiación en W / m^2 . La densidad de la radiación solar sobre la órbita de la Tierra alrededor del Sol es 1.370 W/m^2 . Debido a que esta radiación cósmica no actúa sobre la superficie esférica ($4 \cdot \pi \cdot r^2$) de la Tierra sino en la sección transversal ($\pi \cdot r^2$), la densidad de radiación recibida, en relación con la superficie esférica de la Tierra, se calcula como:

$$1.370 \cdot (\pi \cdot r^2) / (4 \cdot \pi \cdot r^2) = 342 \text{ W/m}^2.$$

Según la ley de Stefan Boltzmann, una temperatura superficial de -18°C es el resultado para una Tierra sin atmósfera. Sin un efecto de calentamiento adicional, la Tierra no sería habitable para los humanos a una temperatura tan baja.

La física de los gases de efecto invernadero

En moléculas, la intensidad de las fuerzas de enlace entre los átomos y su cambio durante la vibración determina el intervalo de longitud de onda en el cual la energía es absorbida. La radiación térmica de onda larga solo puede ser absorbida por aquellas moléculas que consistan de varios tipos de átomo y que cambien su momento dipolar durante la vibración. Los gases unipolares biatómicos, tales como el O_2 y el N_2 , solo pueden efectuar vibraciones simétricas sin cambiar el momento bipolar. El dióxido de carbono triatómico efectúa ambas vibraciones, simétricas y asimétricas. Estas son estimuladas por el calor de radiación en el intervalo de $4,3 \mu\text{m}$ hasta $15,3 \mu\text{m}$, un intervalo que traslapa adecuadamente con el espectro de radiación de la superficie calentada de la Tierra, el cual va de $3 \mu\text{m}$ hasta $60 \mu\text{m}$. Contra este contexto, la concentración de CO_2 en la atmósfera resulta particularmente significativa.

El paquete de medios didácticos “Experimento blended 10+: Ciencias desde Latinoamérica”, que está disponible en el portal CREA, contiene un video con el experimento “Construcción de un invernadero casero”, que permite experimentar el efecto invernadero como un modelo.

Otras aplicaciones del efecto invernadero en la tecnología y la vida cotidiana: Las aplicaciones prácticas del efecto invernadero incluyen invernaderos y casas de ahorro energético. Otro fenómeno es que un automóvil puede calentarse fuertemente en el interior en invierno cuando está soleado, o que hace más frío en las noches claras de invierno que en las noches nubladas.