

Tema 4. El efecto invernadero y el calentamiento global.

4.1 El mecanismo del efecto invernadero.

4.2 Los principales gases invernadero

4.3 Otras sustancias que afectan al calentamiento global

4.4 El calentamiento global ocurrido hasta ahora

- "Efecto invernadero" → las temperaturas globales promedio aumentarán varios grados, como consecuencia del aumento del CO₂ y de otros gases "invernadero" presentes en la atmósfera.
- Se cree que el **calentamiento global** ha ido ocurriendo desde hace algún tiempo → aumento de temperatura de alrededor 0.66 °C desde 1860.
- En la actualidad, no existe certeza sobre la extensión, ni de la sucesión temporal de los futuros aumentos de temperatura, ni de predicciones fidedignas de los eventos previstos para regiones concretas.
- Los modelos actuales de la atmósfera → ocurrirá un calentamiento global significativo en las décadas próximas.
- En este Tema se explica el mecanismo por el cual podría tener lugar el calentamiento global, así como se analizan la naturaleza y las fuentes de los compuestos químicos que son responsables de dicho efecto.

4.1 El mecanismo del efecto invernadero

El balance energético de la Tierra

- La superficie y la atmósfera de la Tierra se mantienen calientes gracias a la energía del Sol.
- De la energía recibida del Sol, un poco más de la mitad es IR y la mayor parte del resto es luz visible.
- Mucha luz ultravioleta ($\lambda < 400$ nm) procedente del Sol se filtra en la estratosfera, calentando el aire en esta zona, en lugar de calentar la superficie terrestre.
- Del total de la luz que entra, cerca de un 50% alcanza la superficie terrestre y es absorbida por ella:

- Un 20% de la luz que entra es absorbida por gases y gotas de agua en el aire: el UV por el O_3 y O_2 estratosféricos
- Un 30%, se refleja en las nubes, hielo, nieve, arena y otros cuerpos reflectantes, sin ser absorbida y regresa al espacio.
- La Tierra emite energía → radiación **infrarroja térmica** ($\lambda = 4$ a $50 \mu\text{m}$).

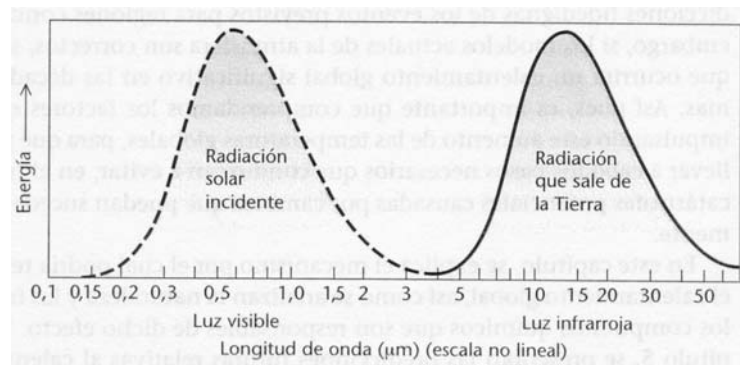


Figura 4.1. Distribución de longitudes de onda de la luz emitida por el Sol (---) y por la Tierra (—).

- Algunos gases en el aire pueden absorber luz infrarroja térmica → no toda la luz IR emitida escapa directamente al espacio.
- Las moléculas atmosféricas, vgr. CO_2 , reemiten la luz infrarroja en todas las direcciones, al azar → la luz IR térmica es redirigida de regreso hacia la superficie de la Tierra → calentamiento la superficie y el aire → **Efecto invernadero**

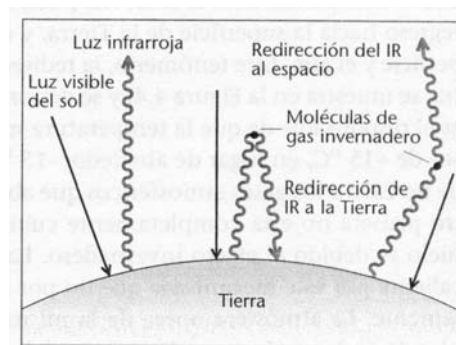


Figura 4.2. Mecanismo efecto invernadero en la troposfera terrestre

- Según este mecanismo, la temperatura media en la superficie de la Tierra es de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$, en lugar de alrededor $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, que es la que correspondería de no existir los gases atmosféricos que absorben IR.

- Problema ambiental → la concentración de gases traza en el aire que absorben luz IR térmica podría redireccionar más energía IR térmica hacia la superficie y, por tanto, aumentar la temperatura media más allá de 15 °C → **efecto invernadero intensificado**

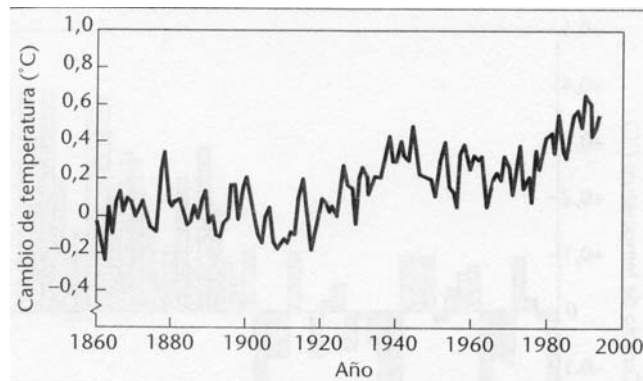


Figura 4.3. Temperaturas globales promedio desde 1860, relativas al periodo 1880-1920.

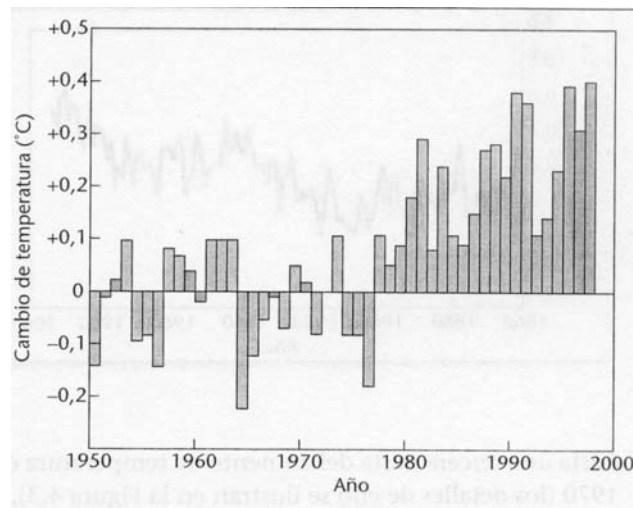


Figura 4.4. Cambios de la temperatura superficial media global, relativos a 14 °C (valor medio del periodo 1951-1980)

- Los principales constituyentes de la atmósfera, N₂, O₂ y Ar, no son capaces de absorber luz infrarroja.
- Los gases atmosféricos que produjeron la mayor parte del calentamiento invernadero, son el agua (2/3 del efecto) y el CO₂ (1/4 del efecto).

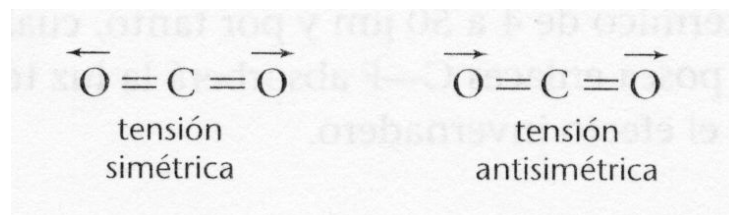
Vibraciones moleculares: absorción de energía por los gases invernaderos.

- Una molécula absorbe luz cuando encuentra y cuando la frecuencia de la misma prácticamente coincide con la frecuencia de algún movimiento interno de la molécula.
- Para que las moléculas absorban radiación IR, que induzcan vibración en los enlaces, debe existir un cambio en el momento dipolar de la molécula.

- El cambio se puede referir bien al tamaño o bien en la localización.
- Las vibraciones en el IR son más fuertes cuanto mayor sea el cambio en el momento dipolar (C-O mas fuerte que C-C).
- La frecuencia de las vibraciones se obtiene mediante la *ley de Hooke*:

$$\nu = (1 / 2\pi c) \sqrt{(k/\mu)}$$

- Para muchos tipos de enlace, por ejemplo, para el enlace C-H en el metano y para el enlace O-H en el agua, la frecuencia de tensión no se encuentra en la región del infrarrojo térmico.
- La frecuencia de tensión de los enlaces C-F corresponde a la longitud de onda en el rango del infrarrojo térmico de 4 a 50 μm → los enlaces C-F absorberá la luz térmica IR que escapa, se intensifica el efecto invernadero
- Para que se absorba luz IR, la molécula debe tener un momento dipolar durante alguna etapa de su vibración.
- El Ar, N₂ y O₂, no absorben luz IR.
- En el caso del CO₂, presentan dos tipos de vibraciones de tensión de enlace:



- Durante su vibración de **tensión antisimétrica**, la molécula puede absorber luz IR.
- La vibración de flexión de la molécula de CO₂ puede absorber luz IR.

4.2 Los principales gases invernadero

El dióxido de carbono: emisiones y tendencias.

- Las moléculas absorben luz infrarroja en un rango corto de frecuencias, en lugar de absorber justamente una única frecuencia.
- Cuando se absorbe un fotón IR existe también un cambio en la energía asociada con la rotación de la molécula alrededor de su eje interno.
- Cuando se absorbe luz IR, la **energía rotacional** de una molécula puede incrementar o disminuir ligeramente y aumentar su **energía vibracional**.

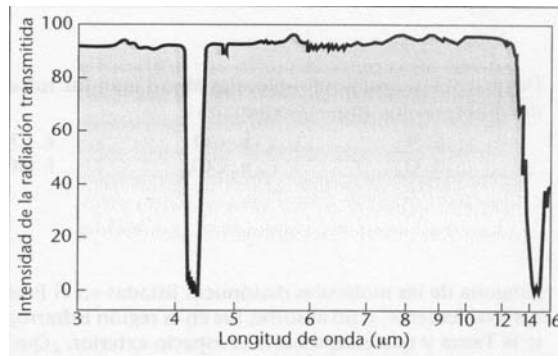


Figura 4.5. Espectro de absorción IR del CO₂.

- Las moléculas de CO₂ presentes en la actualidad en el aire absorben la mitad de la luz IR que escapa con longitudes de onda comprendidas entre 14 y 16 μm , y una importante parte del rango 12-14 μm y 16-18 μm .
- Esta absorción se debe a las variaciones en la energía absorbida por los movimientos rotacionales del CO₂ cuando cambia la energía vibracional.)

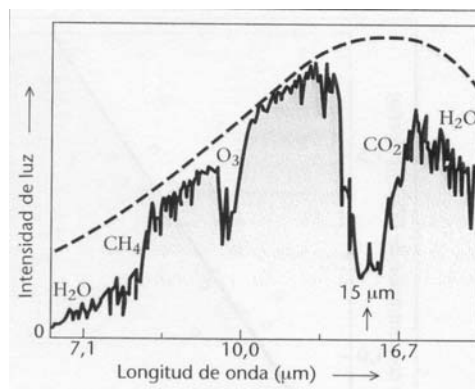


Figura 4.6. Intensidad medida experimentalmente de luz IR térmica que escapa de la superficie terrestre (-), comparada con la intensidad teórica que debería esperarse sin la absorción por los gases invernadero (---).

- Las medidas de aire atrapado en muestras de hielo de la Antártida o de Groenlandia indican que la concentración atmosférica de CO₂ en la era preindustrial (antes de 1750), era de unos 280 ppm
- La concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado en un 30%, pasando a ser de 365 ppm en 1998.

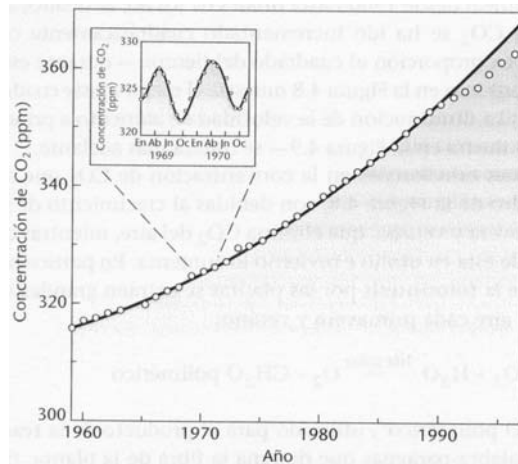


Figura 4.7. Tendencia anual de la concentración de CO₂ de años recientes.

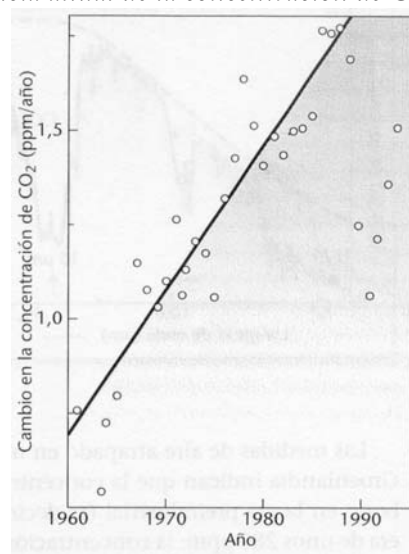


Figura 4.8. Incrementos anuales de la concentración de CO₂ atmosférico, basados en promedios sobre cuatro años.

- Las fluctuaciones estacionales en la concentración de CO₂ son debidas al crecimiento y descomposición.



- Buena parte del aumento en las contribuciones antropogénicas al CO₂ en el aire es debida a la quema de combustibles fósiles → 5 toneladas métricas de CO₂ por cada persona en los países industrializados.
- La *emisión* anual per cápita de CO₂ en países no desarrollados es la centésima parte de la correspondiente a los países desarrollados.
- Una aportación significativa de CO₂ a la atmósfera proviene del clareado de bosques para proveer tierra de uso agrícola.

- El ritmo anual de deforestación es: sudeste de Asia (1,6%), América Central (1,5%), América del Sur (0,6%).
- Globalmente, la deforestación es la causa de la cuarta parte de la liberación anual de CO_2 antropogénico.

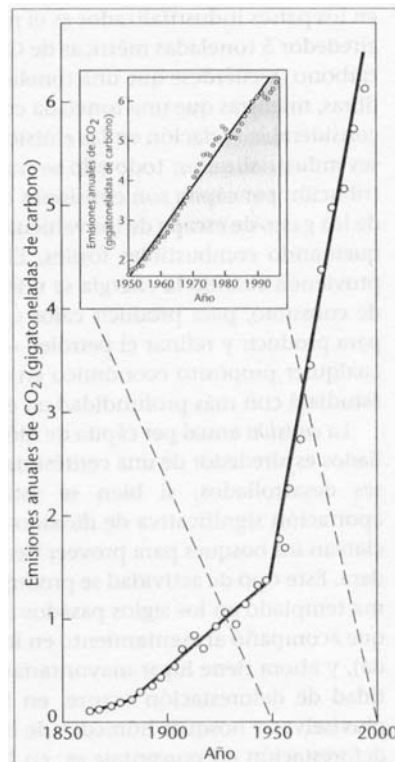


Figura 4.9. Emisión de CO_2 antropogénico, expresado en masa de carbono, procedente de la quema de combustible fósil y de la fabricación de cemento

- La vida media de una molécula de CO_2 emitida a la atmósfera es difícil de predecir.
- En promedio, a los cinco años de su emisión al aire, una molécula de CO_2 se disolverá en la superficie del agua de mar o será absorbida por una planta que esté creciendo → sumideros temporales
- Sumideros permanentes → la deposición en las aguas profundas del océano y/o precipitación como carbonato de calcio insoluble.
- Deben pasar entre 50 a 200 años para que el nivel de dióxido de carbono se ajuste completamente a su nueva concentración de equilibrio si existe una fuente que lo haya aumentado.
- De las emisiones adicionales de CO_2 antropogénico de las recientes décadas, sólo la mitad, se ha eliminado de forma efectiva → el gas continúa acumulándose en la atmósfera.
- Un 56 % de las emisiones en décadas recientes, aún permanecen en el aire.

- A corto plazo, la capacidad de las capas más superficiales del océano de absorber CO_2 debe decrecer si el agua se calienta apreciablemente.
- El aumento de temperatura, también inducirá, probablemente, a una mayor emisión de CO_2 de los suelos.

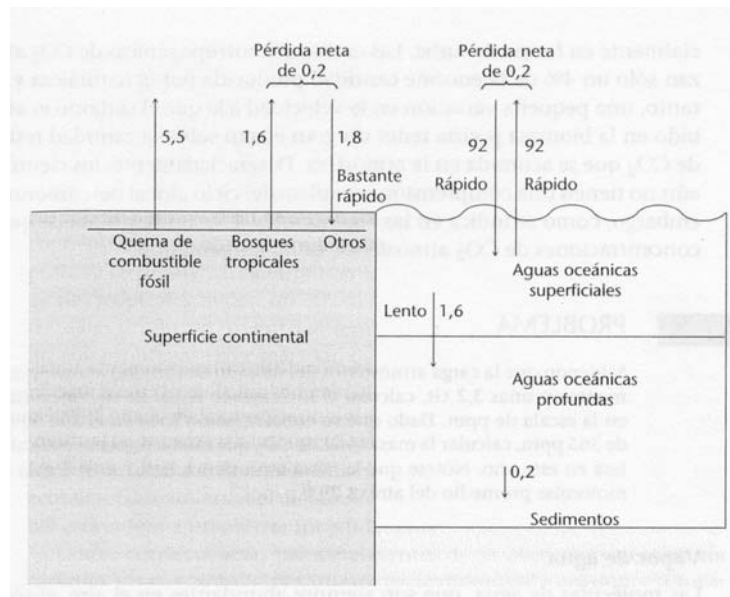


Figura 4.10. Flujos anuales de CO_2 antropogénico hacia y de la atmósfera en valores de los 80, unidades en Gt de carbono.

- Un análisis de las entradas y salidas correspondientes a los años 90, indicó que las emisiones antropogénicas aumentaron (a 6,0 Gt), pero fue contrarrestado por una retirada acelerada de CO_2 por la biosfera.
- “El Niño” u otros factores pueden originar, dos años más tarde, un aumento en la asimilación de CO_2 por parte de la vegetación y del suelo.
- Sin embargo, a mediados de los 90, el aumento anual atmosférico del CO_2 volvió a su valor promedio de mediados de los 80, probablemente debido a la disminución de la asimilación de CO_2 por la biosfera después del aumento debido al calentamiento acaecido alrededor de 1990.
- El aumento en la velocidad de crecimiento de algunos tipos de árboles debido al aumento de la concentración de CO_2 en el aire, se denomina *fertilización por CO_2* .
- La velocidad de fotosíntesis está aumentando debido al incremento del CO_2 y de la temperatura del aire → la formación de grandes cantidades de carbono fijado representa un importante sumidero para el gas.

- Las emisiones antropogénicas de CO_2 alcanzan sólo un 4% de la enorme cantidad producida por la naturaleza → una pequeña variación en la velocidad a la que el carbono es absorbido en la biomasa podría tener un gran efecto sobre la cantidad residual de CO_2 que se acumula en la atmósfera.
- Desgraciadamente, los científicos aún no tienen una comprensión completa del ciclo global del carbono → Las concentraciones de CO_2 atmosférico están aumentando

Vapor de agua

- Las moléculas de agua, absorben luz IR térmica a causa de la vibración de flexión H-O-H.
 - Esta absorción, ocurre a alrededor $6,3 \mu\text{m}$.
 - La pequeña cantidad de IR que escapa en la región $5,5\text{-}7,5 \mu\text{m}$, es interceptada por el vapor de agua.
- La vibración de tensión antisimétrica para el agua, ocurre a $2,7 \mu\text{m}$, ya fuera de la región del IR térmico.
- Los aumentos de la energía rotacional de las moléculas de agua, sin que se produzcan cambios en la energía vibracional, eliminan la luz infrarroja de longitud de onda $18 \mu\text{m}$ y mayores.
- El agua es el gas invernadero más importante de la atmósfera terrestre → produce más calentamiento invernadero que cualquier otro gas, aunque molécula a molécula es menos eficiente en absorber radiación que el CO_2 .
- La presión de vapor de equilibrio del agua líquida, y consecuentemente la concentración máxima de vapor de agua en el aire, aumenta exponencialmente con la temperatura.
- El agua en forma de gotas líquidas en las nubes, también absorbe IR térmico.
 - Las nubes de baja altitud, usualmente reflejan más luz solar de la IR que absorben.
 - Las nubes altas ejercen un efecto de calentamiento global.
 - No está muy claro si la cubierta de nubes adicional producida por el incremento del contenido en agua atmosférica, tiene una contribución neta positiva o negativa al calentamiento global.
- De la absorción de CO_2 y agua, sólo la luz infrarroja comprendida entre 8 y $13 \mu\text{m}$, es esencialmente la que escapa a la atmósfera de forma eficiente → *Ventana del espectro*.

4.3 Otras sustancias que afectan al calentamiento global

- La inyección a la atmósfera, incluso en cantidades traza, de gases que pueden absorber luz IR térmica → efecto invernadero intensificado.
- Particularmente grave son los gases contaminantes que absorben IR térmico en la ventana del espectro.
- La mayoría de los gases que están constituidos por moléculas con tres o más átomos absorben en la región del IR térmico.

Tabla 4.1: Resumen de información relativa a algunos gases invernadero.

Gas	Abundancia actual	Velocidad de incremento	Tiempo de residencia	Eficiencia relativa de calentamiento	
				Instantánea	En 100 años
CO ₂	365 ppm	0,4 %	50-200	1	1
CH ₄	1,72 ppm	0,5 %	12	21	9
N ₂ O	312 ppmm	0,3 %	120	206	320
CFC-11	0,27 ppmm	0 %	50	12400	12500
Halón-1301	0,002 ppmm	7 %	65	16000	19000
HCFC-22	0,11 ppmm	5 %	12	1000	3300
HFC-134a	2 ppb	n/a	15	9400	3000

Gases traza: tiempos de residencia atmosféricos

- El impacto de cualquier sustancia sobre el efecto invernadero intensificado evalúa al conocer su tiempo de permanencia en la atmósfera.
- **Tiempo de residencia** (T_{pro}) de un gas atmosférico en estado estacionario → cantidad de tiempo promedio que una de sus moléculas existe en el aire antes de ser eliminada por cualquier vía.

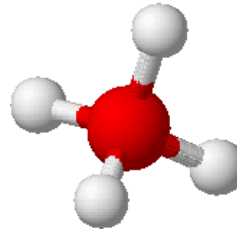
$$T_{pro} = C/V$$

C = cantidad total atmosférica;

V = velocidad promedio de entrada o salida de una sustancia por unidad de tiempo

Metano

- Después del dióxido de carbono y del agua, el metano, CH₄, es el siguiente gas invernadero en importancia.



- Una molécula de CH₄ contiene cuatro enlaces C-H
 - Las vibraciones de tensión C-H ocurren fuera de la región del IR térmico
 - La vibración de flexión H-C-H absorbe a 7,7 μm, cerca del límite de la ventana del IR térmico → absorbe IR en esta región.
- Por molécula, el aumento del CH₄ en el aire origina 21 veces más efecto invernadero que la adición de CO₂ → Las moléculas de CH₄ absorben una mayor fracción de fotones del IR térmico que pasan a través de ellas.
- Hasta la fecha, se estima que el metano ha producido alrededor de una tercera parte del efecto invernadero originado por el CO₂.

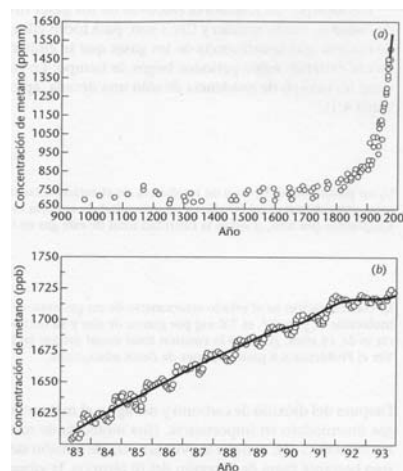


Figura 4.11. Crecimiento de la concentración de metano atmosférico: (a) en los últimos 1000 años, y (b) en años recientes.

- Cerca de un 70% del metano actual es de origen antropogénico → el aumento de la producción de alimentos, la utilización de combustibles fósiles y la deforestación.
- El metano se produce biológicamente por la descomposición anaerobia de residuos de plantas → " gas de los pantanos" o " gas de la ciénagas".

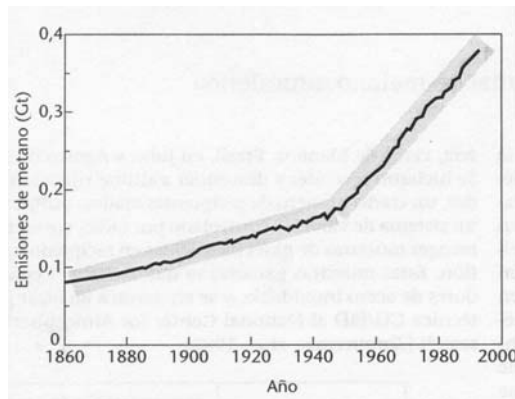


Figura 4.12. Emisiones antropogénicas de metano desde 1860.

- Los animales rumiantes producen en sus estómagos grandes cantidades de metano que luego expulsan al aire.
- La descomposición anaeróbica de la materia orgánica en los residuos en vertederos, es otra fuente importante de metano en el aire.
- La quema de biomasa libera metano en una extensión aproximada de un 1% del carbono consumido (producto de una combustión incompleta).
- La magnitud de cada contribución antropogénica sigue el siguiente orden:

ganado > arroz >> vertederos = minería del carbón > quema de biomasa = quema de gas natural y suministro

- El sumidero dominante del metano atmosférico (90% de su eliminación) es la reacción con el radical libre hidroxilo, OH· :



■ Otros sumideros: la reacción con el suelo y la pérdida a la estratosfera.

■ La vida promedio del CH₄ atmosférico es de 10 a 15 años.

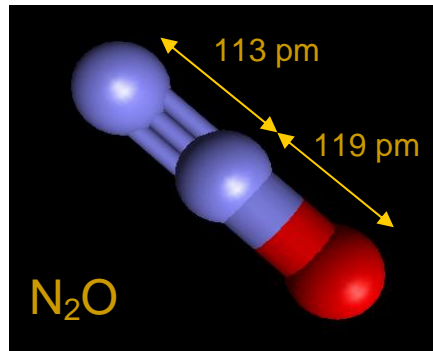
- Un sumidero menor es la reacción con oxígeno excitado:



- El vapor de agua estratosférico actúa como un gas invernadero significativo → calentamiento global indirecto.
- Existen fuentes potenciales de metano:
 - Bolsas de metano retenido en el *permafrost*
 - Metano atrapado en el fondo de los océanos en las plataformas continentales → "hidrato de metano" (CH₄·6H₂O, compuesto clatrato)

El óxido nitroso

- El óxido nitroso (*gas hilarante*), N_2O , es un gas traza invernadero.



- Su vibración de flexión absorbe luz IR en una banda a los 8,6 μm , dentro de la ventana del espectro.
- Una de las vibraciones de tensión de enlace está centrada en 7,8 μm .
- Por molécula, el N_2O es 206 veces más efectiva que el CO_2 en originar un aumento inmediato del calentamiento global.
- El nivel de este gas aumentó desde 275 ppmm (en la era preindustrial) hasta 312 ppmm, en la actualidad.
- Menos de un 40% de las emisiones de N_2O acumuladas en el aire desde la era preindustrial, ha producido cerca de una tercera parte de la magnitud del calentamiento adicional que ha inducido el metano.
- La mayor parte del suministro natural del N_2O proviene de la emisión por los océanos y la mayor parte del resto es debido a procesos que ocurren en los suelos de las regiones tropicales.
- Este gas es un subproducto de los procesos de desnitrificación biológica en ambientes aerobios (ricos en oxígeno), y de los procesos de nitrificación biológica en ambientes anaerobios (deficientes de oxígeno).

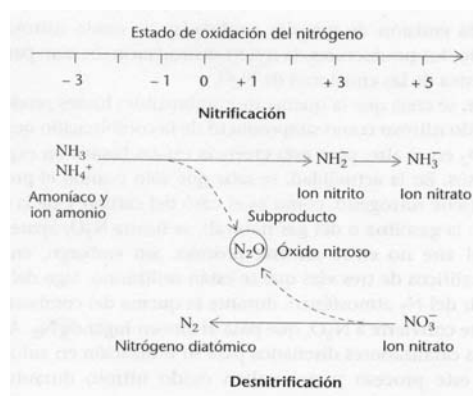


Figura 4.13. Producción de óxido nitroso a lo largo del reciclado biológico de nitrógeno.

- La *nitrificación* es más importante que la *desnitrificación* como fuente global de N_2O .
- Los vertederos son, también, una fuente significativa de óxido nitroso, debido a los procesos de desnitrificación que tienen lugar.
- Algo de los fertilizantes a base de nitrato y amonio usados en la agricultura, en concreto, en áreas tropicales, se convierten a N_2O , que es emitido al aire.
- La utilización de fertilizantes para aplicaciones agrícolas, probablemente, explica la mayoría de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso.
- Este gas asciende hasta la estratosfera, donde cada molécula absorbe luz UV y se descompone a N_2 y O, o bien reacciona con átomos de O.

Los CFCs y sus sustitutos

- Los CFCs tienen el mayor potencial entre todos los gases traza de inducir calentamiento global
 - ➔ son muy persistentes y absorben fuertemente en la ventana 8-13 μm .
- La absorción de la vibración de tensión C-F, está centrada a 9 μm
- La vibración de tensión del C-Cl y las vibraciones de flexión ocurren a frecuencias que se encuentran en la ventana del espectro.
- Cada molécula de CFC tiene un potencial de originar una cantidad de calentamiento global equivalente a como lo hacen miles de moléculas de CO_2 .
- No obstante, el efecto neto de los CFCs sobre la temperatura global es pequeño
 - ➔ El efecto calorífico que producen los CFCs por medio de la redirección del IR térmico queda cancelado parcialmente por el enfriamiento que inducen en la estratosfera debida a la destrucción de O_3 .
- Los sustitutos HCFC y HCF tienen vidas medias atmosféricas cortas y absorben menos eficientemente en el centro de la ventana del espectro.
- Molécula a molécula, manifiestan una menor amenaza con relación al efecto invernadero.
- Futuros niveles de emisión altos podrán tener contribuciones significativas al calentamiento global
 - ➔ Prevenir la liberación crónica a la atmósfera de gases de cualquier tipo, pero de vida larga.

Ozono troposférico

- El ozono troposférico, O_3 , es un gas invernadero "natural", pero que tiene un tiempo de residencia troposférico corto.
- La vibración antisimétrica de tensión ocurre entre 9 y 10 μm , es decir, en la ventana del espectro.
- La vibración de flexión del ozono, ocurre a 14,2 μm , cerca de la correspondiente al CO_2 → no contribuye mucho a la intensificación del efecto invernadero

Los efectos de los aerosoles sobre la modificación del clima

- La materia particulada de mayor importancia en este contexto es la que expelen las poderosas erupciones volcánicas en la alta atmósfera, y la originada en procesos industriales y que se inyecta en la baja troposfera.
- Todos los sólidos y líquidos, y entre ellos las partículas atmosféricas, tienen una cierta habilidad en reflejar la luz → algo de ésta se dirige de regreso hacia el espacio.

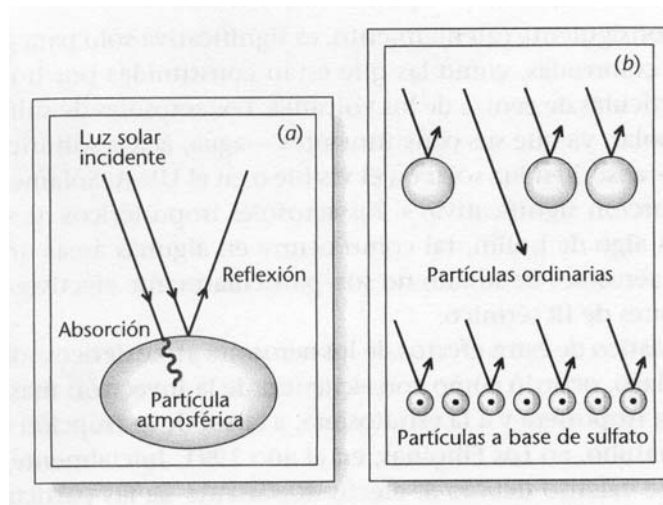


Figura 4.14. Interacción de la luz solar con las partículas en suspensión

- Las partículas pueden reflejar, también, la luz infrarroja saliente, haciendo que algo se dirija otra vez hacia la superficie.
- Algunos tipos de aerosol pueden absorber ciertas longitudes de onda de luz → la energía asociada con la luz es convertida, rápidamente, en calor, que se reparte por las moléculas de aire cercanas.
- La absorción de luz solar es significativa sólo para partículas oscuras o coloreadas → hollín y por partículas de ceniza de los volcanes.

- Los aerosoles de sulfato no absorben luz solar IR, ya que sus constituyentes -agua, ácido sulfúrico y sales de amonio- absorben luz en el visible o en el UV-A → No son particularmente efectivos en retener las emisiones de IR térmico.
- Los aerosoles troposféricos ricos en sulfato, reflejan luz solar de vuelta hacia el espacio de forma más eficiente que la luz que absorben → su existencia significa que hay menos luz solar disponible para ser absorbida → enfrían el aire cerca del nivel del suelo, y por tanto, compensan algo de los efectos del calentamiento global.

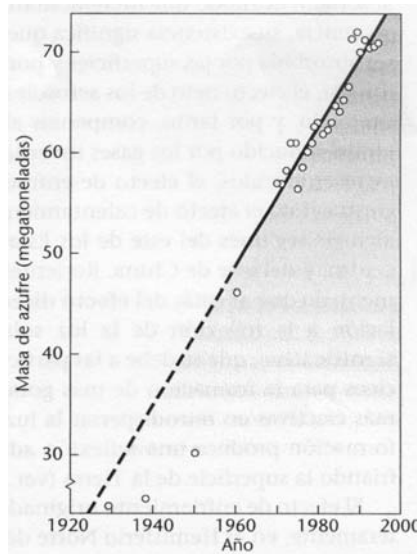


Figura 4.15. Emisiones globales antropogénicas de SO₂.

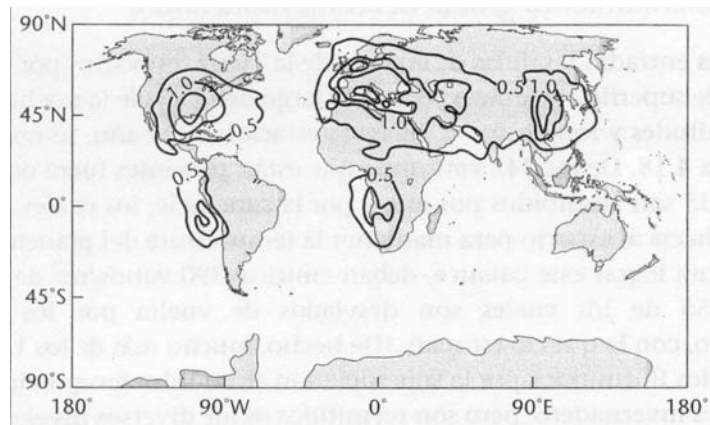


Figura 4.16. Cantidad de luz solar reflejada hacia el espacio por los aerosoles antropogénicos (w/m² de superficie terrestre).

- No está claro como evolucionará en el futuro la magnitud del aerosol troposférico de sulfato.

- Las emisiones de dióxido de azufre procedentes de la producción de energía están más controladas con el fin de combatir la lluvia ácida → la relación de emisiones SO_2/CO_2 en estas áreas declinarán en el futuro.
- Los aerosoles también se producen debido a la oxidación del gas sulfuro de dimetilo, $(CH_3)_2S$, el cual se origina a su vez del fitoplancton marino.
 - Una vez en la troposfera, una parte se oxida a SO_2 , el cual se oxida a ácido sulfúrico, mientras que otra parte produce *ácido metanosulfónico*, CH_3SO_3H .
 - Ambos ácidos forman partículas de aerosol que, a su vez, conducen a la formación de gotas de agua y, por tanto, originan nubes sobre los océanos.
 - Las partículas y gotas, desvían la luz incidente que proviene del Sol.
 - Algunos científicos creen que ocurrirá un aumento de las emisiones de sulfuro de dimetilo generado por los océanos cuando el agua marina se caliente → mitigará el calentamiento global.
- El enfriamiento debido a la reflexión de la luz solar incidente por la "neblina de sulfatos" alcanzó, en promedio global, un tercio del aumento de energía que ocurrió desde la época preindustrial.

[4.4 El calentamiento global ocurrido hasta ahora](#)

- De los 342 vatios/m² que están presentes fuera de la atmósfera, 235 son absorbidos por ésta y por la superficie, los cuales deben reemitirse hacia al espacio para mantener la temperatura del planeta estacionaria.
- Para lograr este balance, deben emitirse 390 vatios/m² de la superficie, 155 de los cuales son desviados de vuelta por los gases invernadero, con lo que no escapan.

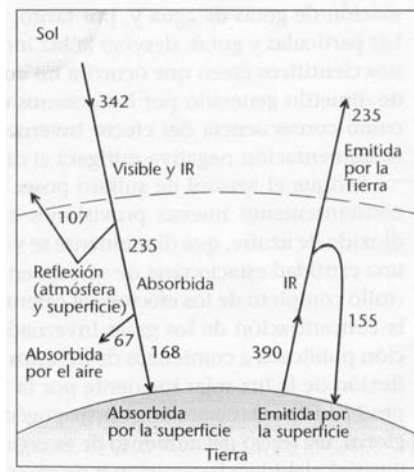


Figura 4.17. Flujos promedio de energías globales y estacionales hacia y desde la Tierra (w/m^2 de superficie terrestre).

- Se ha predicho que el aumento de las concentraciones de gases invernadero podría causar un enfriamiento de la estratosfera.
- Se absorbe más IR térmico saliente a bajas altitudes (la troposfera) →, sobra menos para ser absorbido y calentar los gases en la estratosfera.
- A las temperaturas estratosféricas el CO_2 emite más IR térmico al espacio que los fotones que absorbe -la mayor parte de la absorción a estas altitudes es debida al vapor de agua y al ozono- con lo que aumentando su concentración se enfría la estratosfera.
- De hecho, el enfriamiento observado de la estratosfera se ha tomado como señal de que el efecto invernadero se está intensificando.

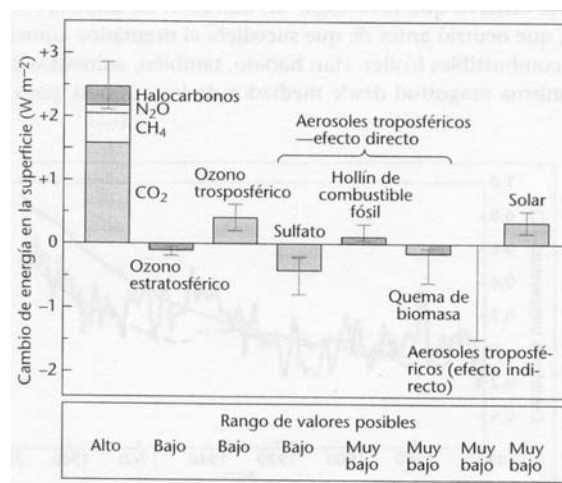


Figura 4.18. Estimaciones del calentamiento global debido a los cambios en las concentraciones de los gases invernadero y a otros factores, desde la época preindustrial hasta mediados de los 90.

● ¿Ha ocurrido ya un calentamiento global debido a la intensificación del efecto invernadero?

- Los ciclos periódicos de calentamiento y enfriamiento han ocurrido de forma natural a través de los siglos.
- De acuerdo a simulaciones computacionales, los aumentos del CO₂ y otros gases que han ocurrido desde la época preindustrial, deberían haber producido un aumento medible de las temperaturas del aire.
- Las variaciones naturales de la temperatura observadas en el pasado son del mismo orden de magnitud que las que han ocurrido recientemente.
- Partiendo de la base de las comparaciones de este tipo, el grupo del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), promovido por la ONU, concluyó en 1995 que "el balance de evidencias, sugiere que existe una influencia humana discernible sobre el clima global".

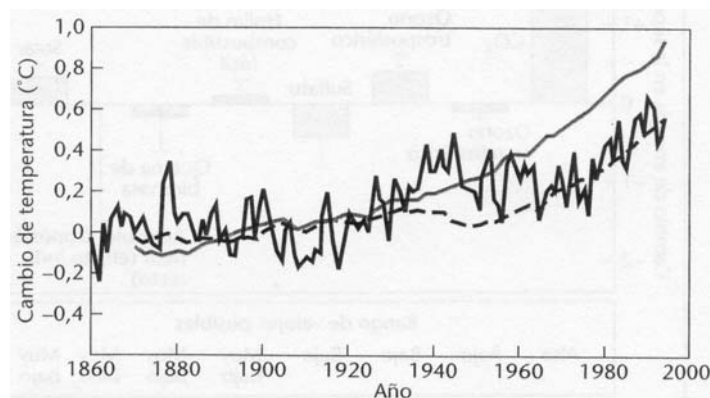


Figura 4.19. Temperaturas superficiales promedio globales. Las líneas clara y punteada corresponden a simulaciones computacionales, sin y con aerosoles de sulfato, respectivamente.

- Debido a que los aerosoles ejercen sus efectos mediante el bloqueo de la luz incidente → su existencia debería ser mucho más importante durante el día que por la noche:
 - Las temperaturas nocturnas han aumentado más que las diurnas en las últimas décadas.
 - Se ha observado un menor calentamiento del aire en el hemisferio norte
- El aumento del enfriamiento del aire debido a los aerosoles de sulfato no cancela permanentemente el calentamiento total debido a los gases invernadero → las vidas medias de los aerosoles son muy distintas comparadas con las correspondientes a los gases.

- Las emisiones de SO_2 sólo cancelan transitoriamente los efectos correspondientes a las emisiones de CO_2 y, en último término, pudieran vencer los efectos acumulativos del CO_2 y de otros gases invernadero.

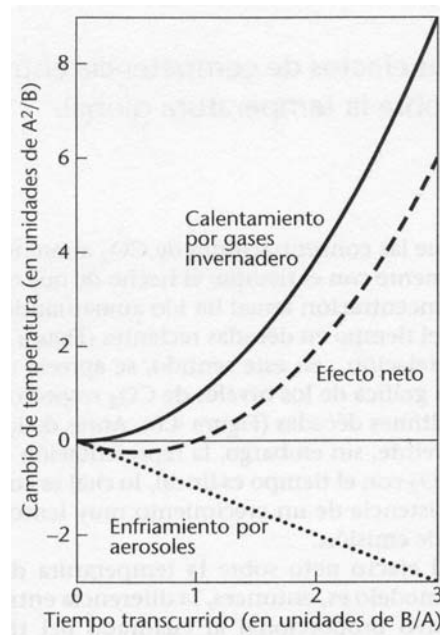


Figura 4.20. Cambios de la temperatura atmosférica calculados según modelo matemático.

- Otra evidencias que apuntan la existencia del calentamiento global:
 - La primavera actualmente empieza en el hemisferio norte una semana antes respecto a los años 70.
 - La década de los 80 fue de las más húmedas en las latitudes más septentrionales a 50° .
 - Se está produciendo, un aumento del nivel del mar, blanqueo de los arrecifes de coral, y retirada de los bloques de hielo y glaciares.