

Energía y Ambiente

Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otros forzantes del clima

Gases de efecto invernadero

El ciclo de carbono

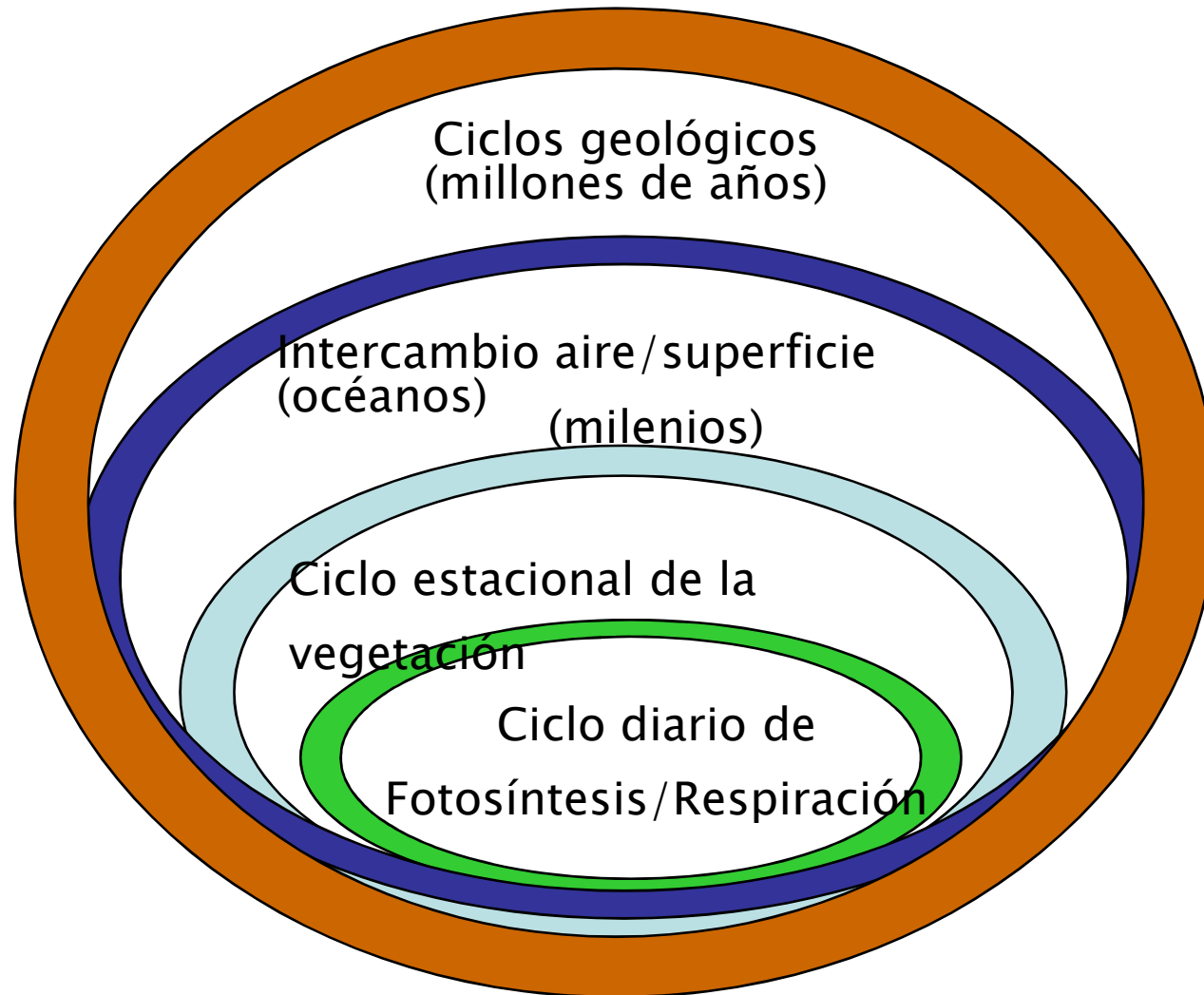
Forzado radiativo

Gases de efecto invernadero

- N_2 , O_2 , Ar: no absorben IR, NO SON GEI
- H_2O
- CO_2
- CH_4
- N_2O
- Halocarburos
- Otros gases sintéticos
- O_3

Dióxido de carbono (CO₂)

El Ciclo del Carbono



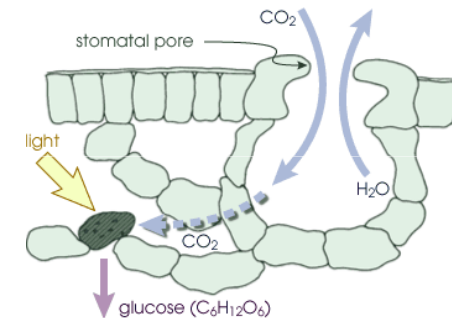
Dióxido de carbono (CO₂)

- La biología juega un rol importante en el movimiento del carbono desde y hacia la tierra y los océanos a través de los procesos de fotosíntesis y respiración.

- Fotosíntesis: producción de azúcares a partir de la energía solar y el CO₂.

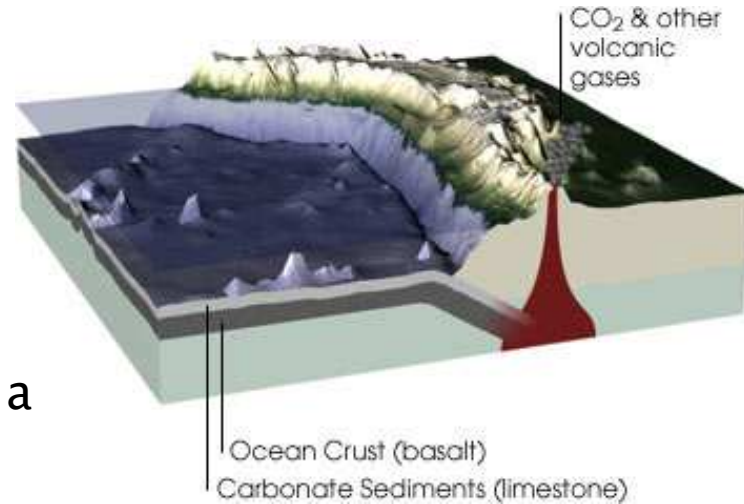


- Respiración: es el metabolismo de los azúcares para producir energía química para el crecimiento y la reproducción



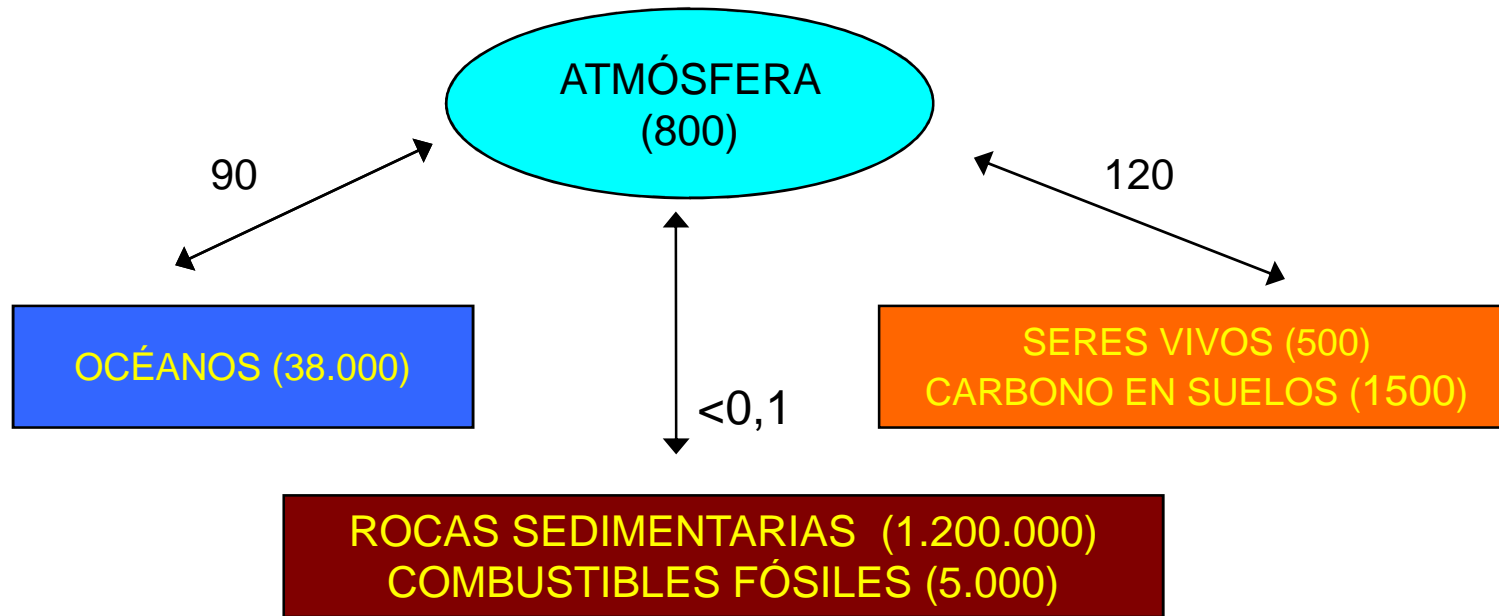
Ciclo geológico del carbono

- Los procesos geológicos llevan el C desde el interior de la Tierra a la atmósfera y viceversa.
 - Los volcanes emiten CO_2 , CO y CH_4 a la atmósfera.
 - Los gases son lavados por la lluvia y se depositan como carbonatos o son capturados por la materia orgánica.
 - Una parte de los sedimentos se deposita en los continentes y participa en la formación de montañas, otra parte se deposita en el fondo de los océanos y participa en procesos de subducción, incorporándose a la litosfera o el manto.
- El C se encuentra:
- En el fondo de los océanos en los carbonatos sedimentarios y como hidrato de metano
 - En la corteza terrestre en las rocas y como petróleo, gas y carbón



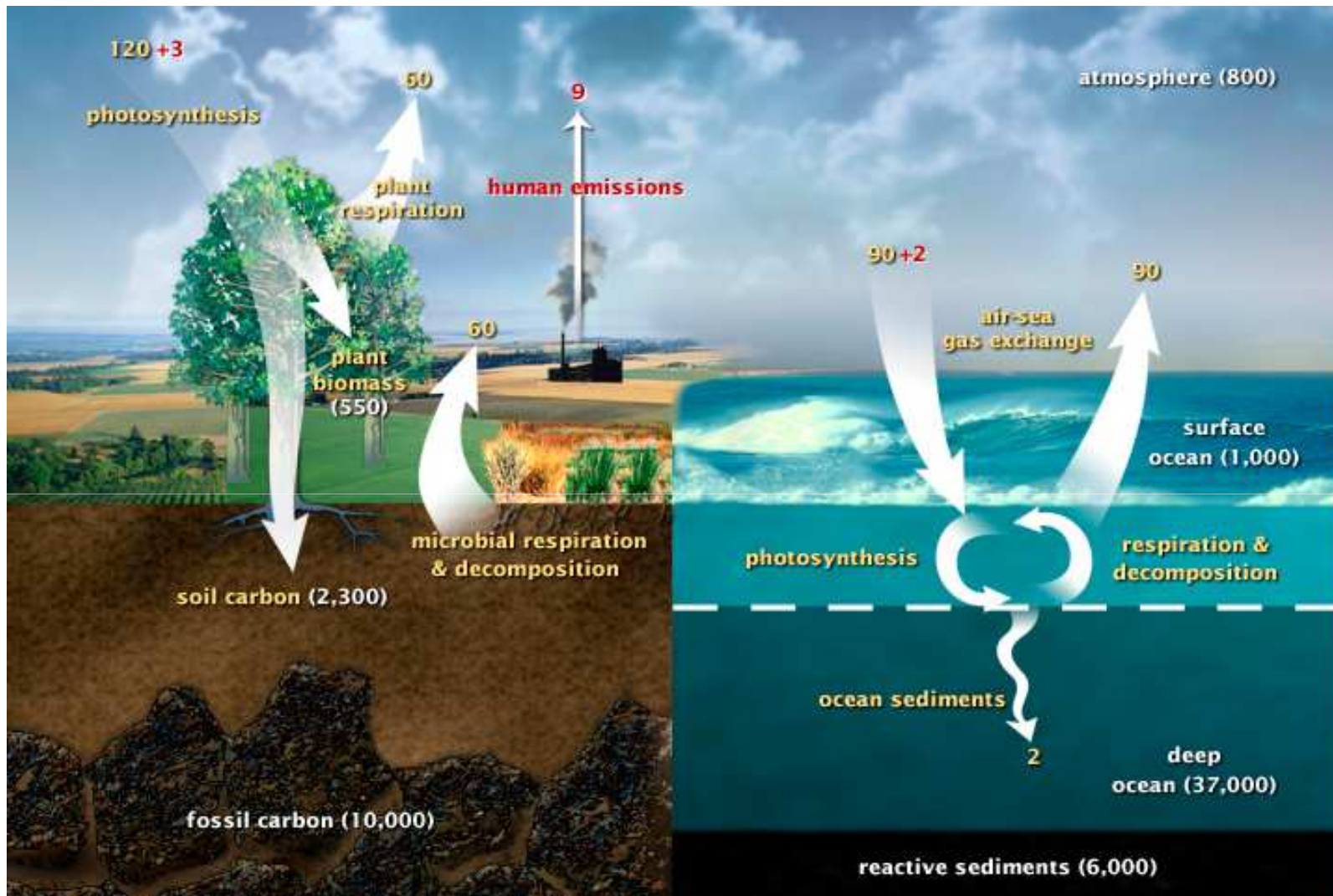
Formación de los combustibles fósiles

- Petróleo y gas: por descomposición anaeróbica de organismos como fito y zooplancton en el fondo de mares o lagos, enterrados bajo capas de sedimentos en condiciones de presión y altas temperaturas. Hace 650M de años y el proceso lleva M de años
- Carbón y metano: formado principalmente por plantas terrestres del período carbonífero (300-350 M años)



.Reservorios de carbono en la Tierra (Gton C) y los flujos de carbono anuales entre ellos (Gton C/año). 1Gton= 10^{15} g. Adaptado de Archer, 2012.

Reservorios de carbono activos y flujos



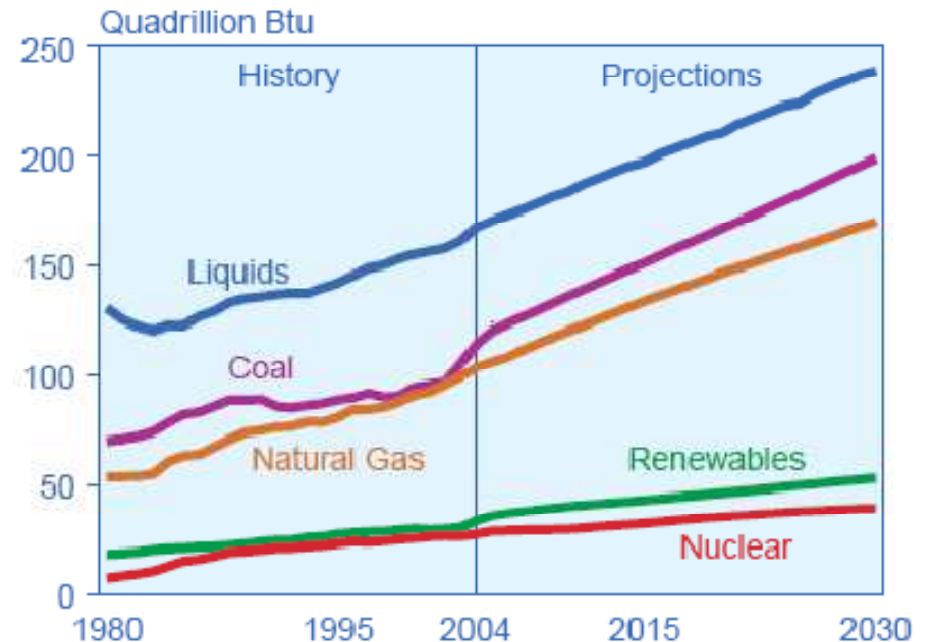
Cantidades de carbono que se almacenan en los sectores activos (Pg de C)
 y los flujos entre sectores (Pg de C por año)
 1Pg = 10^{15} g = mil millones de toneladas (un billón USA)

Dióxido de carbono (CO₂)

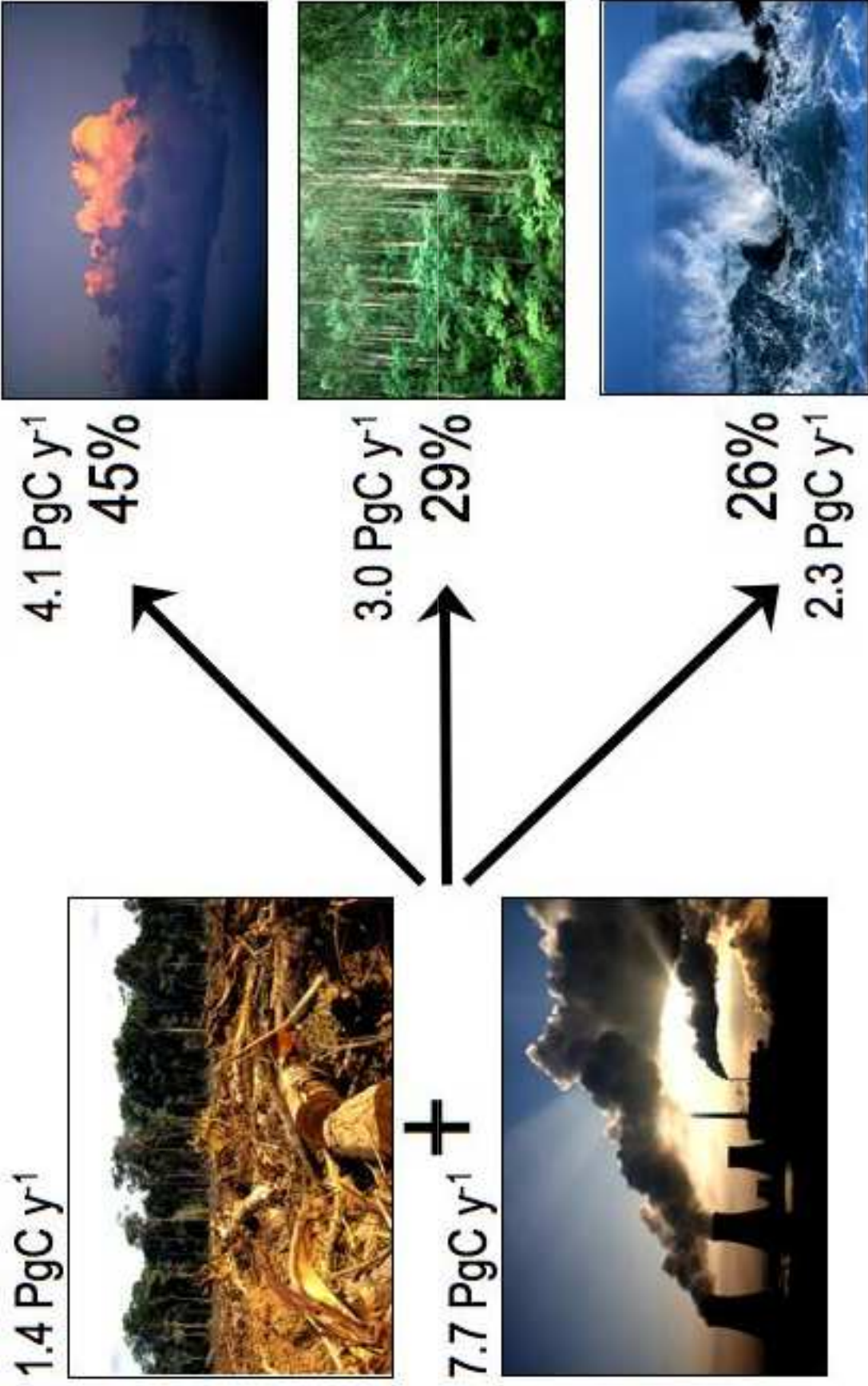
El rol humano:

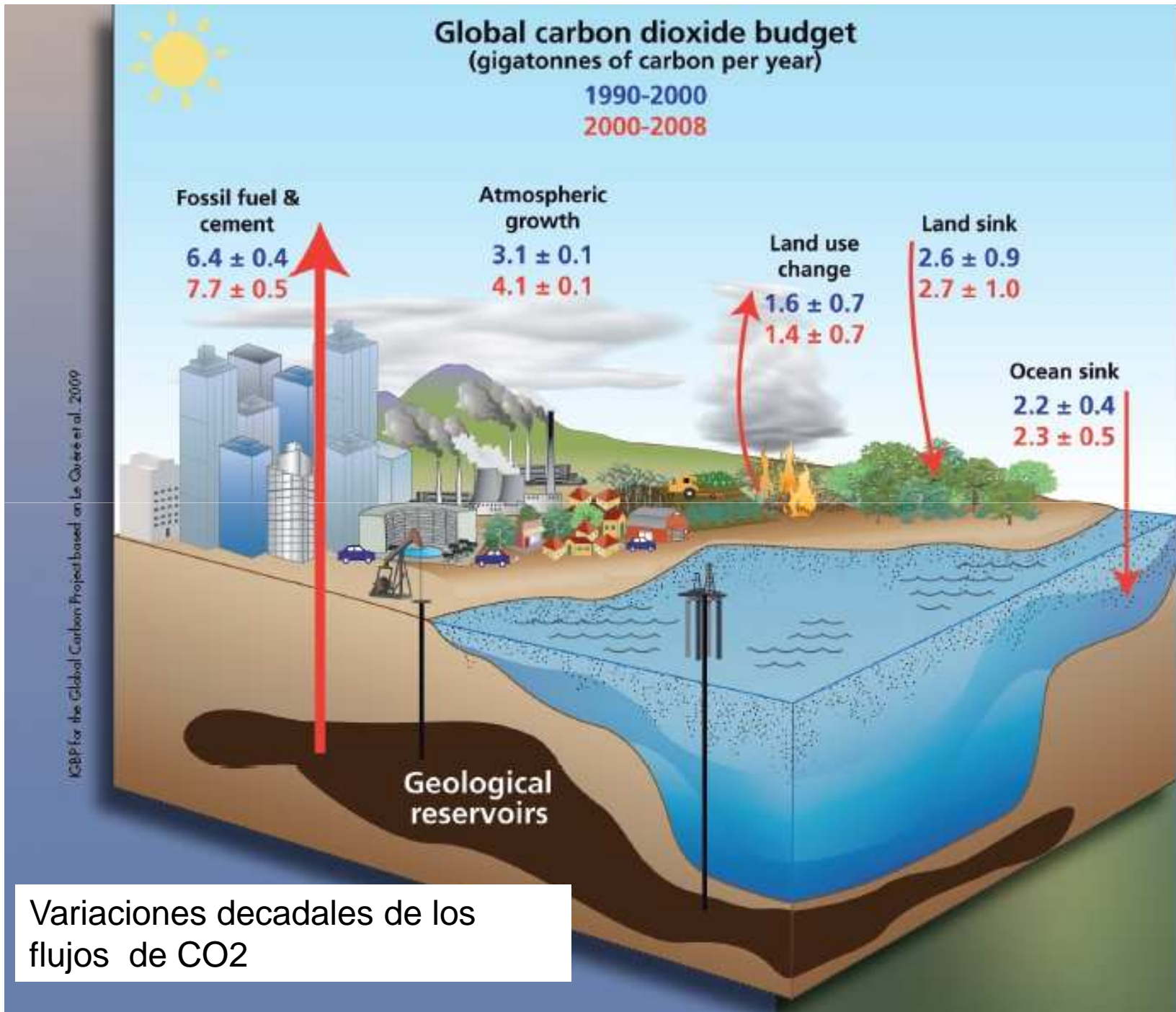
- Quema de combustibles fósiles
 - transporte
 - calefacción
 - generación de electricidad
 - actividad industrial
- Fabricación de cemento
- Deforestación

Figure 4. World Marketed Energy Use by Fuel Type, 1980-2030

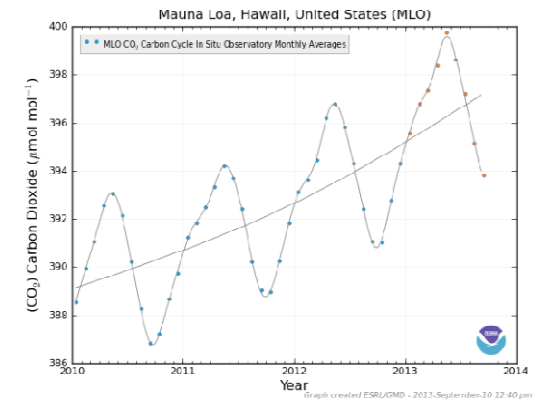
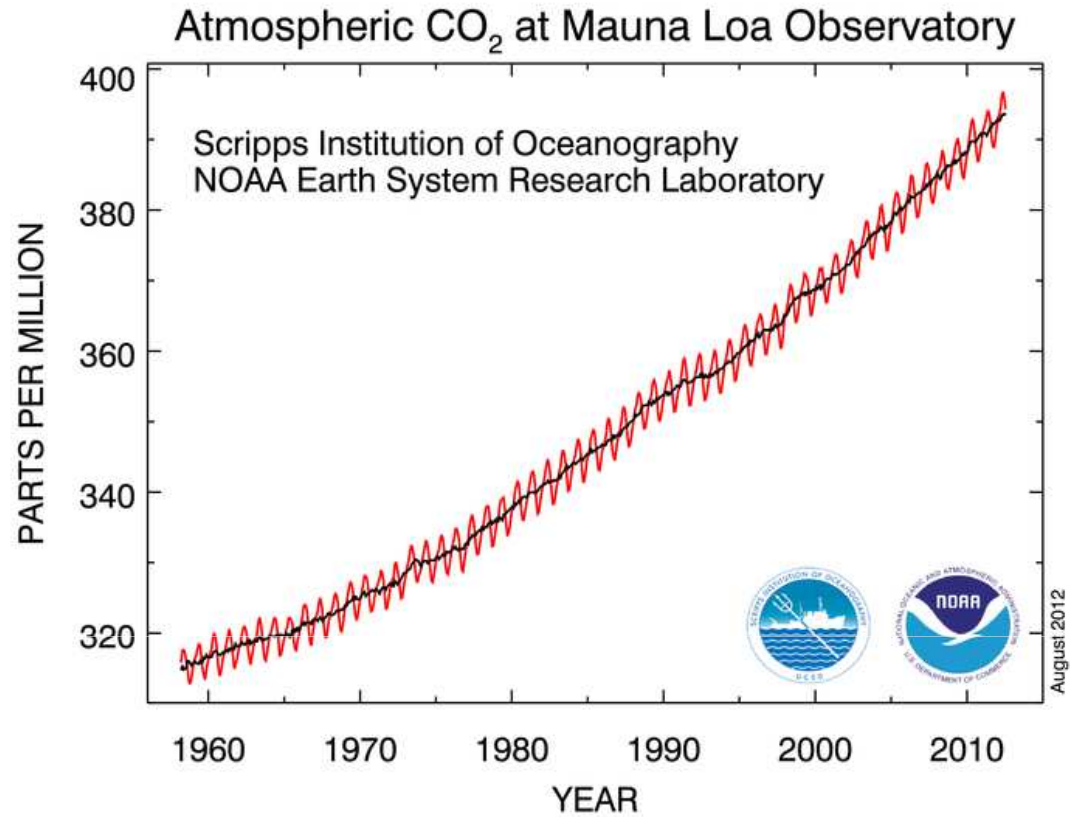


Fate of Anthropogenic CO₂ Emissions (2000-2008)



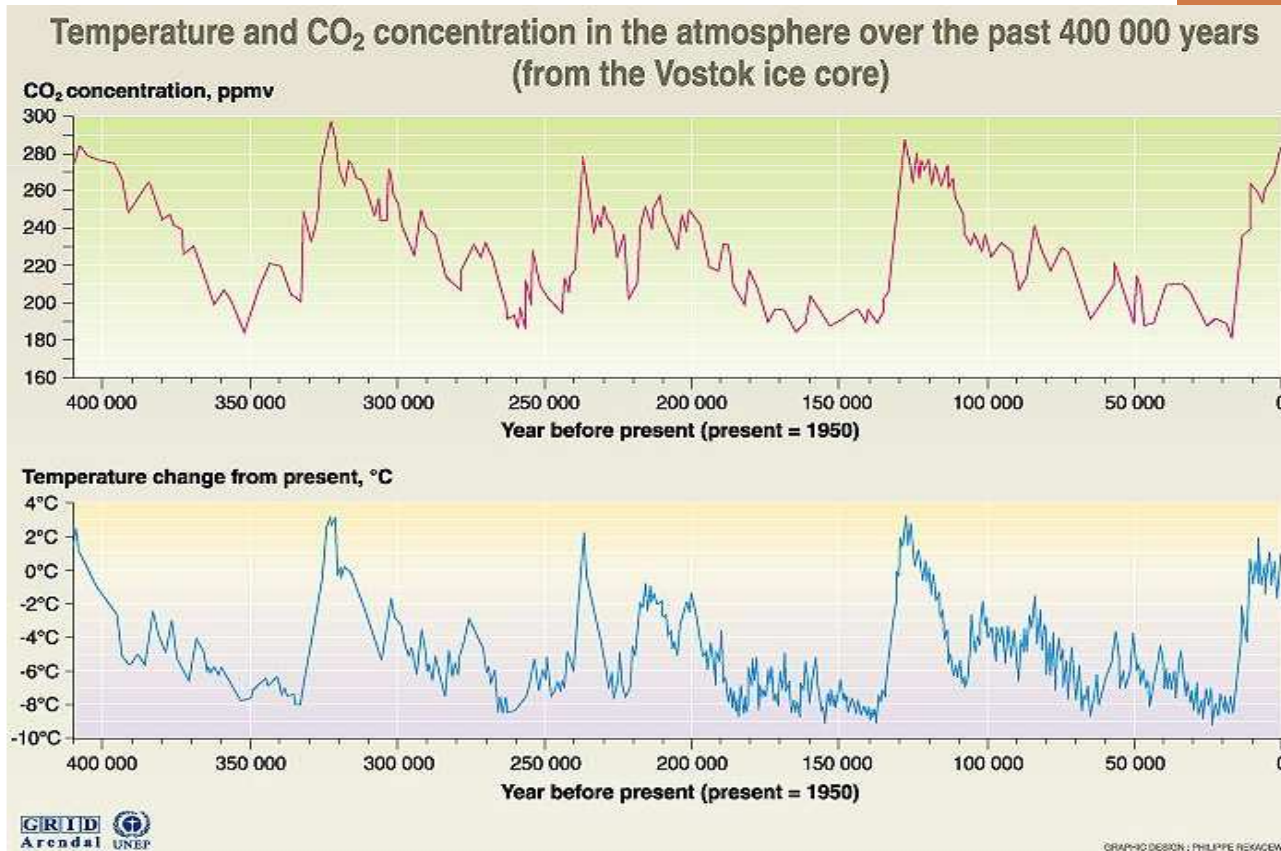
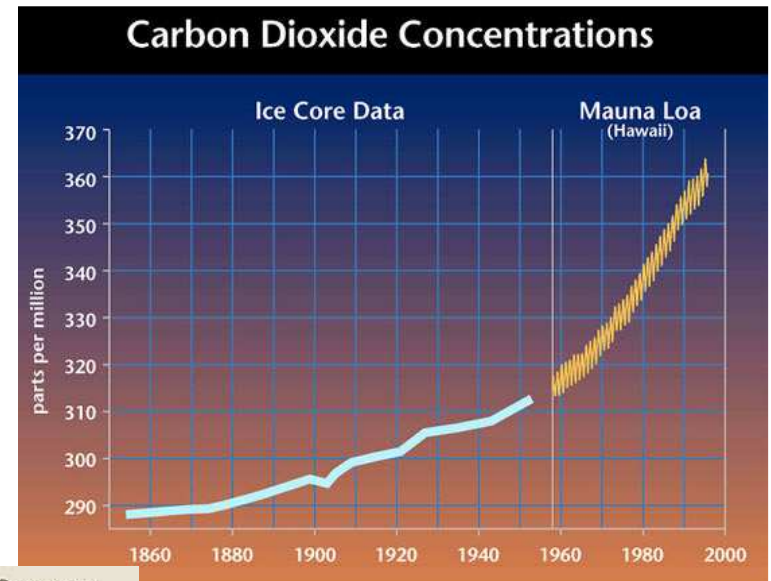


Variaciones decadales de los flujos de CO2



Concentraciones de CO₂ (Mauna Loa)

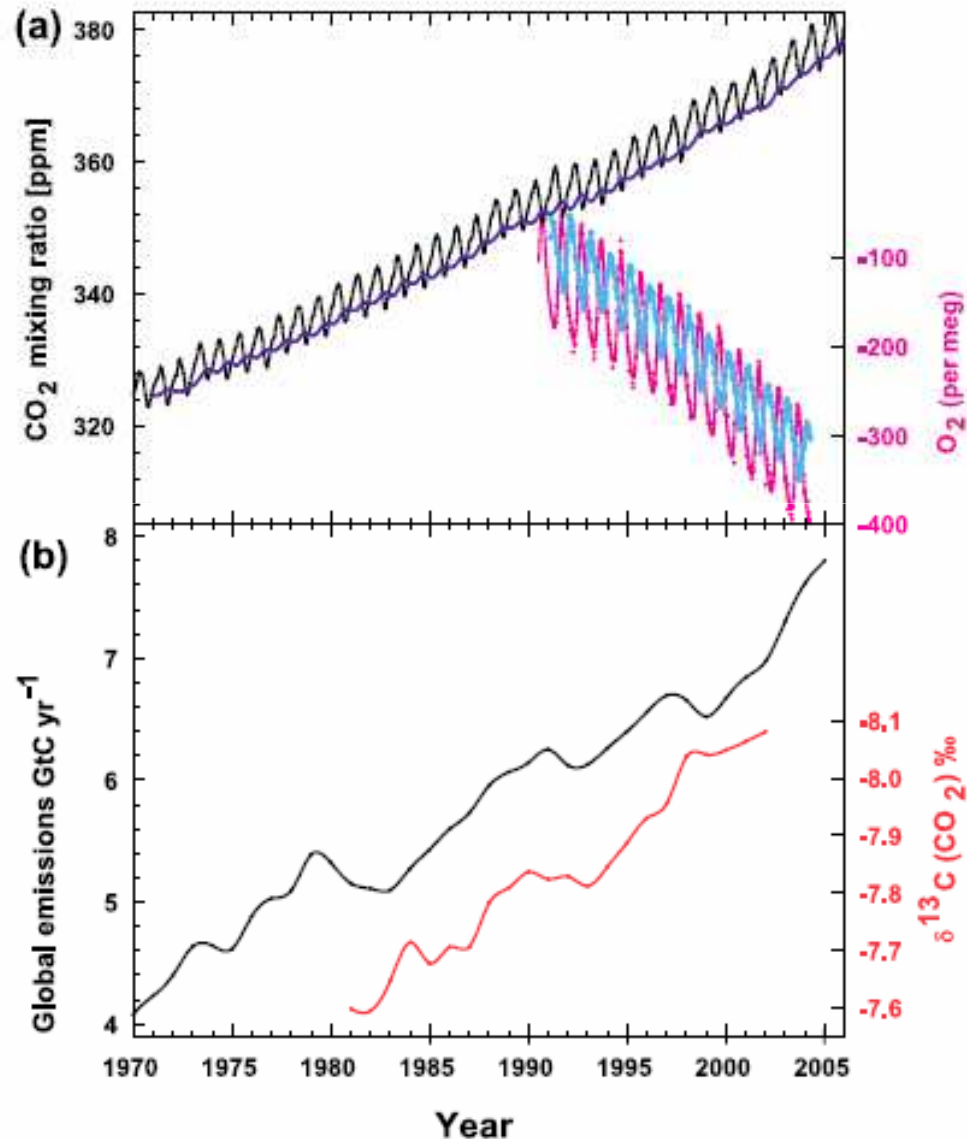
- Ver película CO2



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3June), pp 429-436, 1999.

GRAPHIC DESIGN: PHILIPPE REKAJCWICZ

¿Cómo sabemos que el CO₂ proviene de combustibles fósiles?



O₂: cambios de ppm sobre un fondo de 209.000 ppm

Isótopos

¹²C: es el más abundante-99%

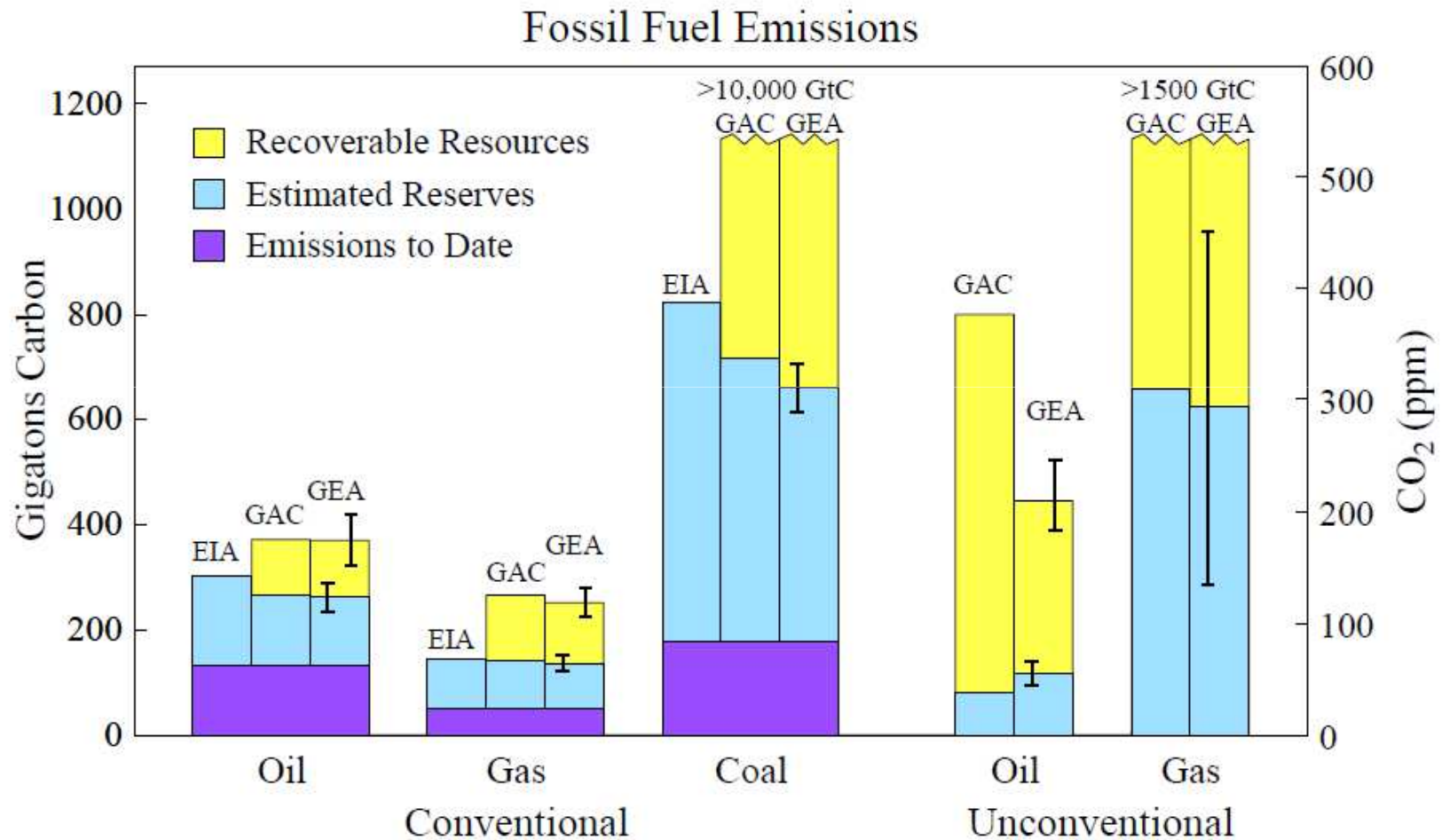
¹³C: aprox. 1%

Negro: emisiones por combustibles fósiles y cemento

Rojo: relación ¹³C/¹²C

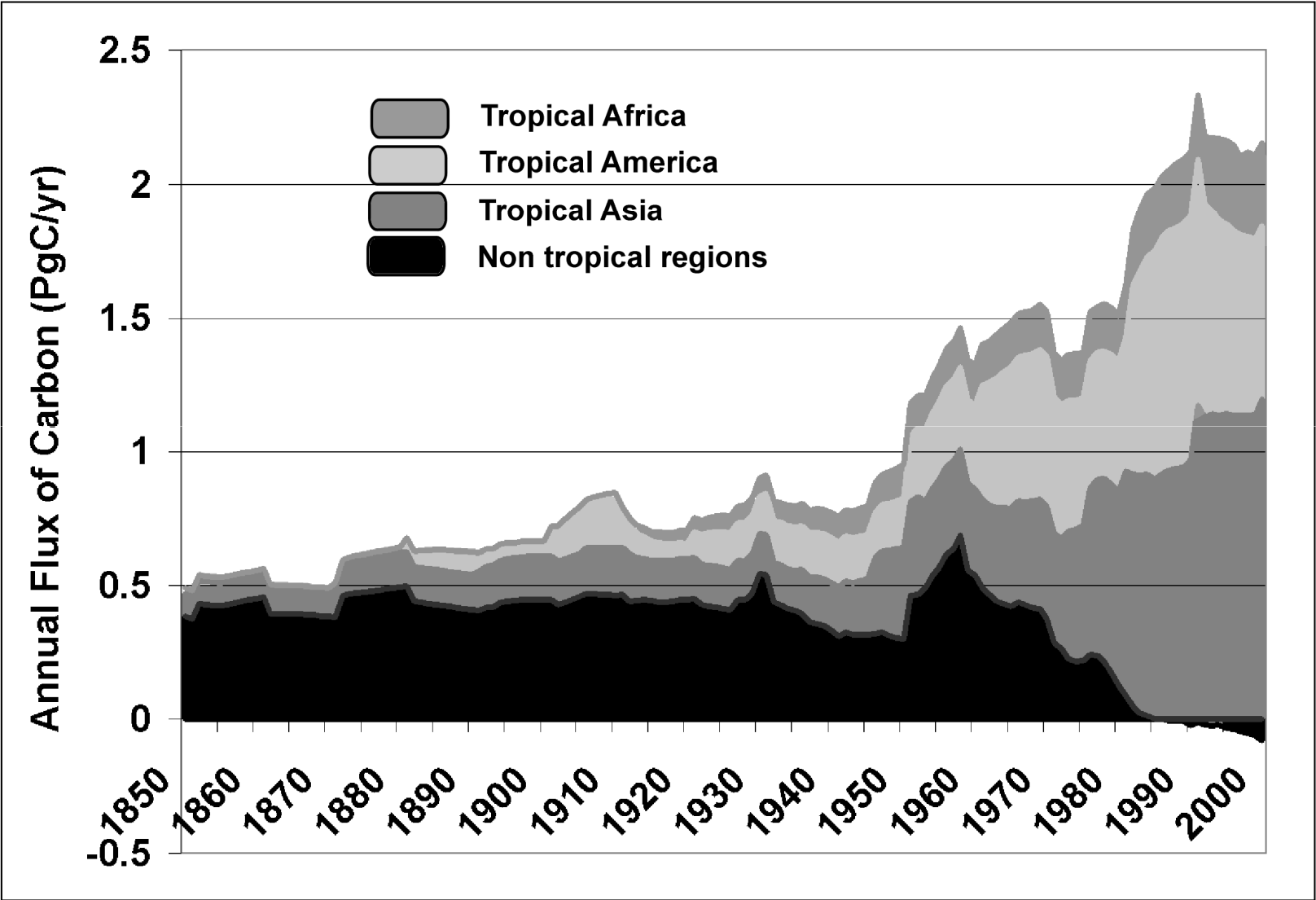
Las emisiones por quema de carbón, gas, petróleo y deforestación tiene una relación menor ¹³C/¹²C menor que el CO₂ atmosférico

Reservorios de combustibles fósiles

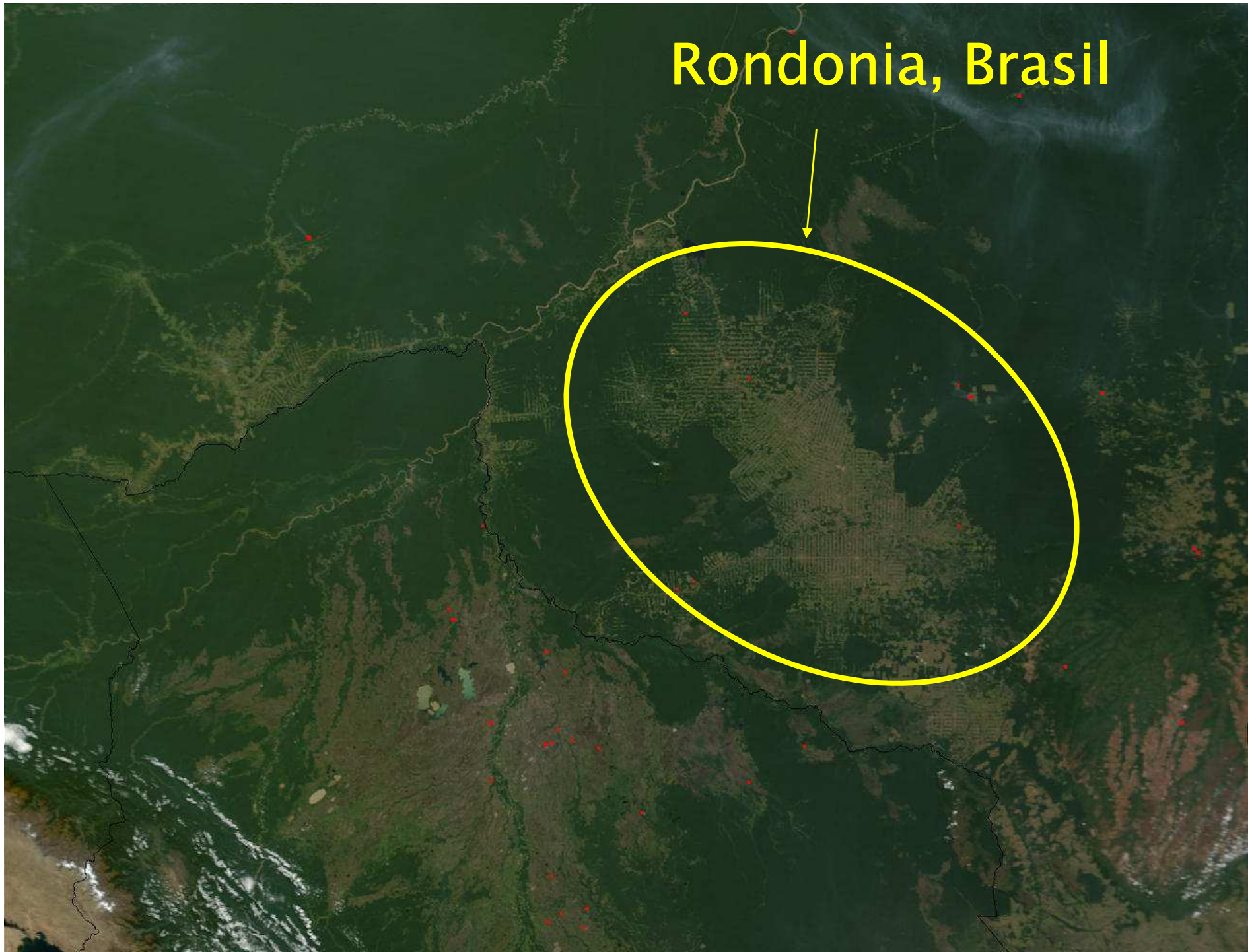


. CO₂ emissions by fossil fuels (1 ppm CO₂ ~ 2.12 GtC).

Emisiones por deforestación



Rondonia, Brasil



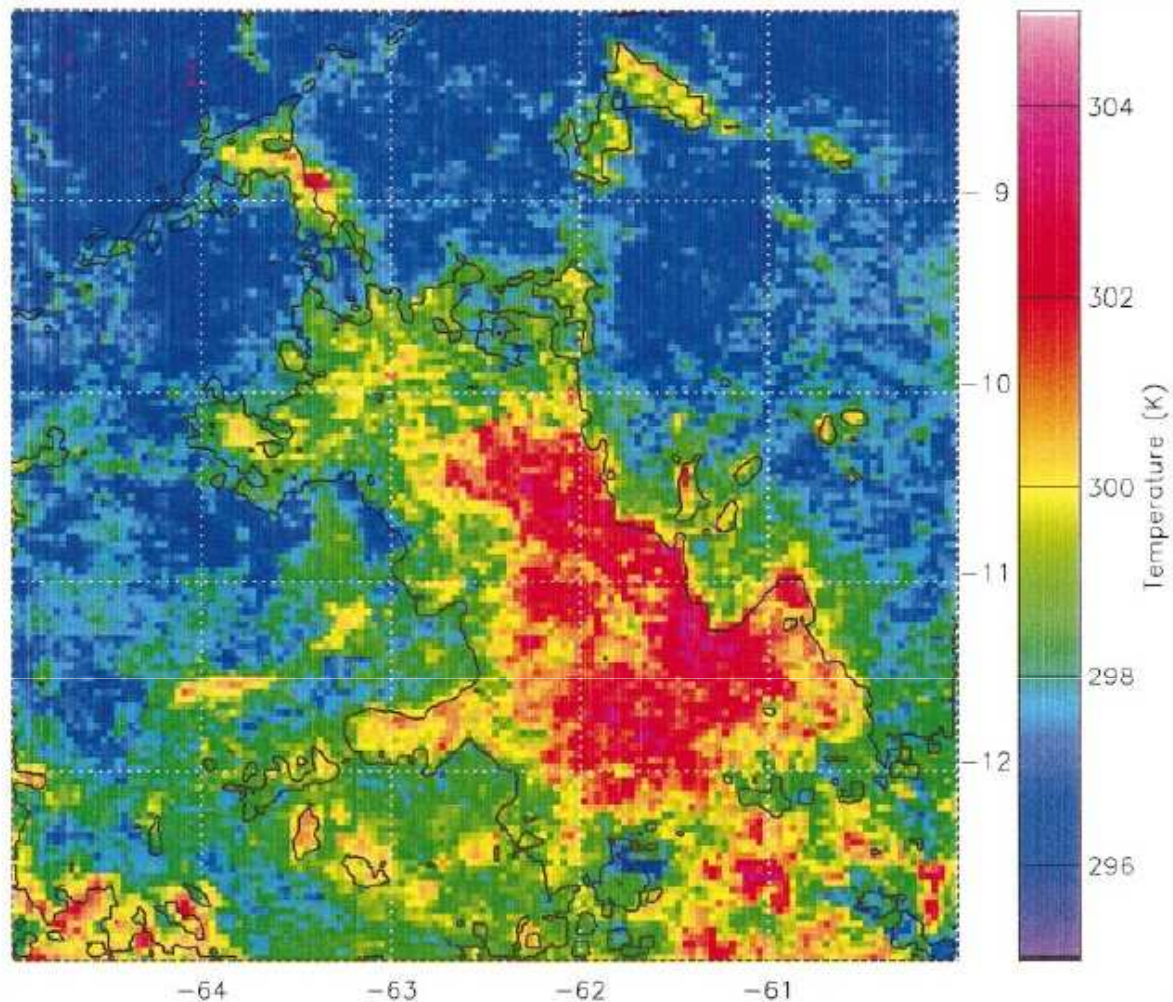


FIG. 4. GOES 4-km infrared composite mean (clear sky) temperatures at 1230 LT for Aug 2000. The outline of the deforestation is superimposed.

Rondonia, Brasil: diferencia de temperatura entre la selva y la zona deforestada: 8 °C !!!

Gases de larga vida

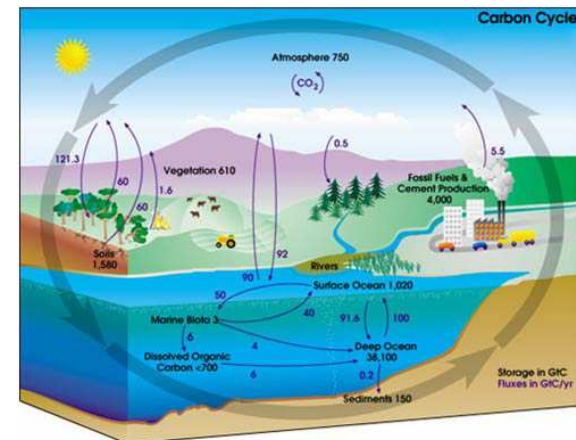
Los gases de vida larga alcanzan concentraciones homogéneas (muy poca variación espacial) en la atmósfera

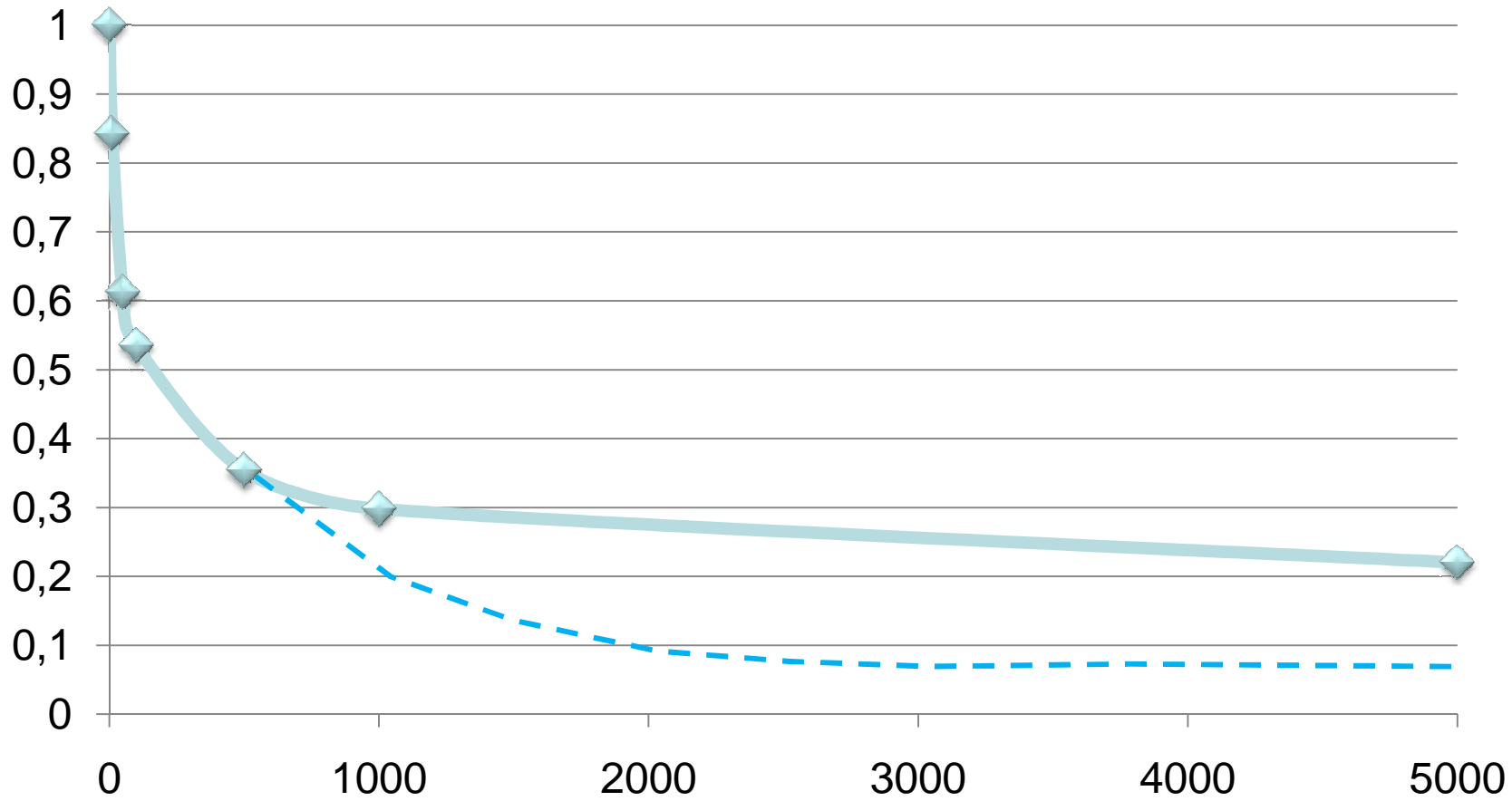
Tiempo de residencia y tiempo de vida (lifetime) del CO₂

<http://www.youtube.com/watch?v=m7IEtfQkozM&feature=related>

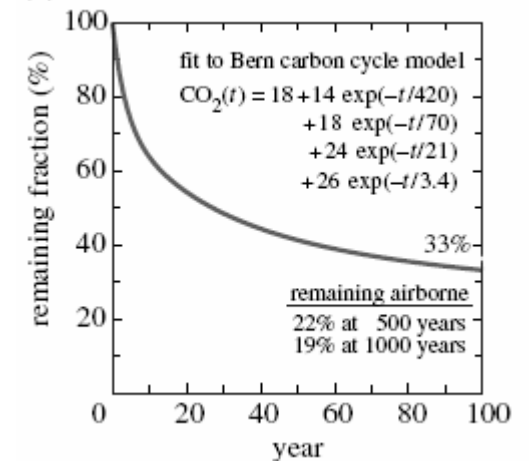
Tiempo de residencia: tiempo que una dada molécula de CO₂ permanece en la atmósfera antes de pasar a otro reservorio (plantas, océano, etc.). Promedio: 5 años.

Tiempo de vida: Tiempo en que un pulso de emisión se remueve en forma permanente de la atmósfera. (ver siguiente)





Tiempo de vida del CO₂ en la atmósfera (años)



Metano (CH₄)

Fuentes de metano

Naturales

- Pantanos
- Termitas
- Océanos
- Hidratos



Antropogénicas

- Generación de energía
- Arrozales
- Rumiantes
- Rellenos de tierras
- Quema de biomasa
- Tratamiento de residuos

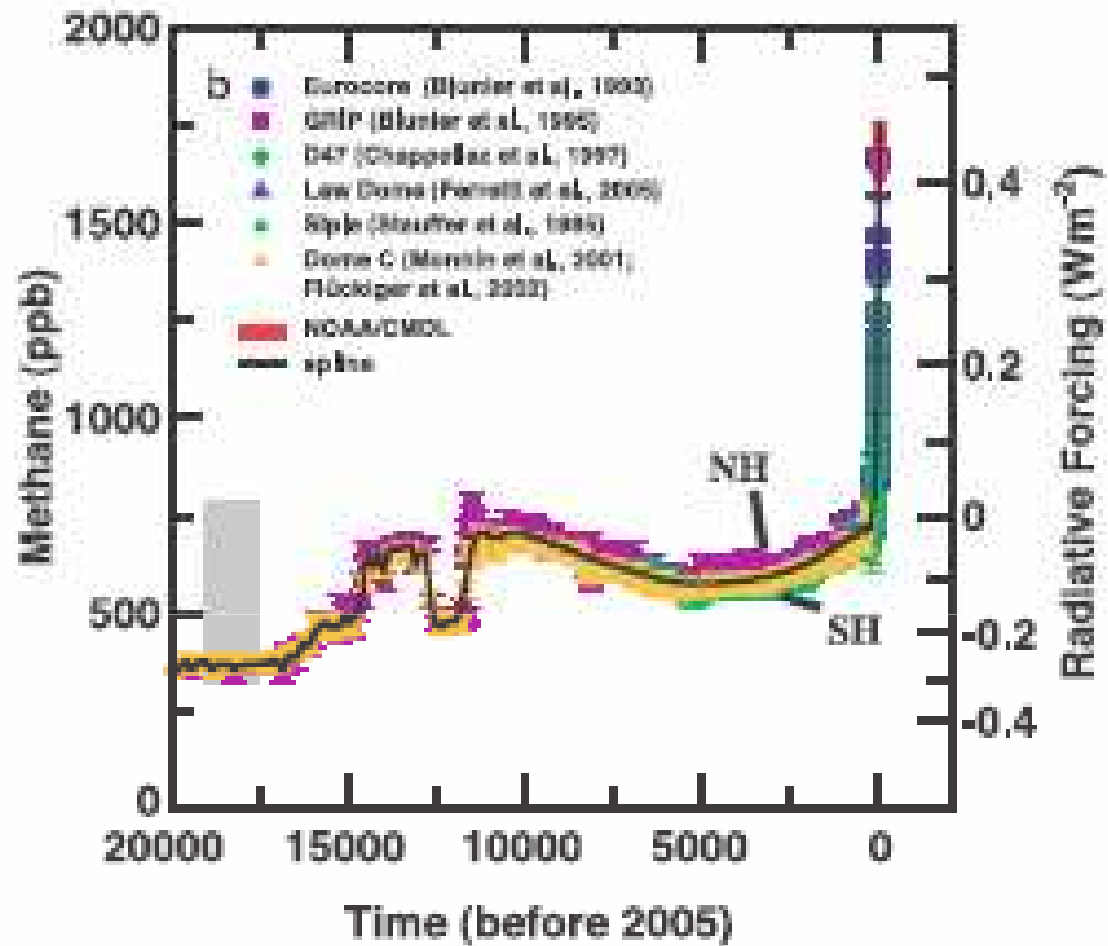
Impuesto a las emisiones de metano: en 2003 quisieron imponerlo en Nueva Zelanda

FLATULENCE TAX



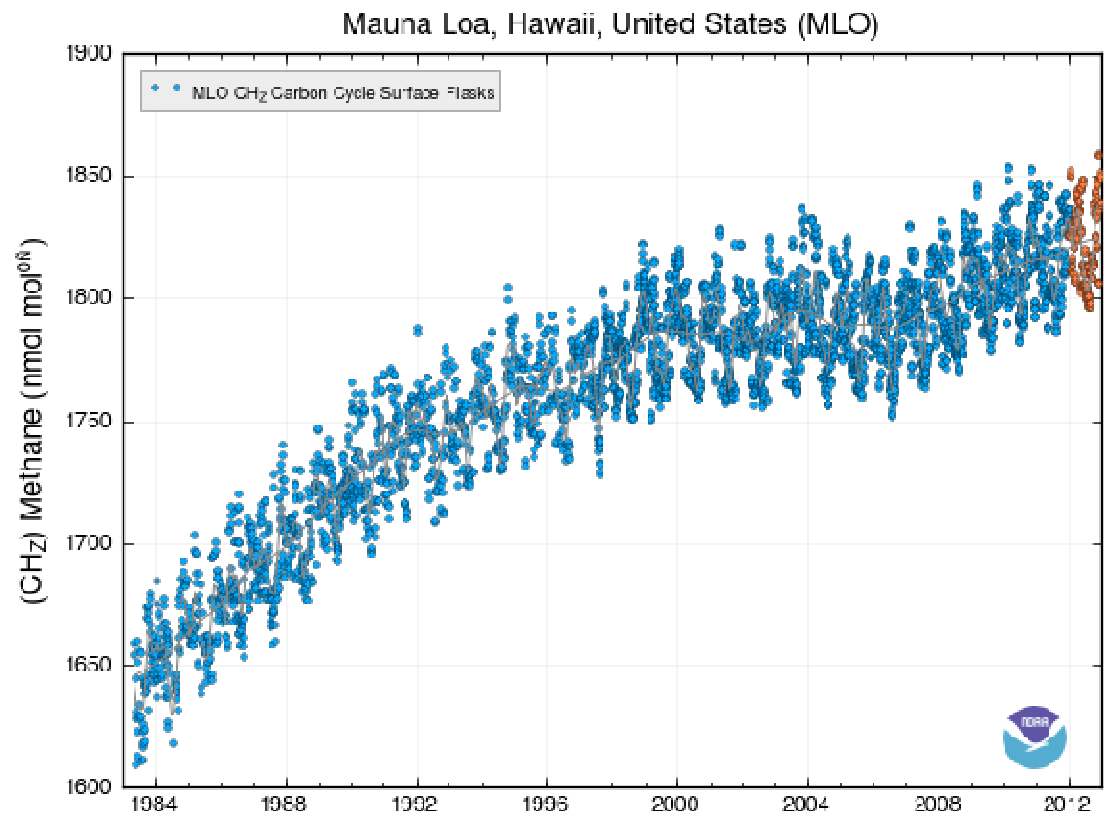
	COW	SHEEP
Example herd size	500	3,000
Methane produced*	63,875,000	21,900,000
CO ₂ produced*	273,750,000	82,125,000
Tax per litre	\$0.046	\$0.0003
Tax per farmer	\$300	\$300

*- Litres per year

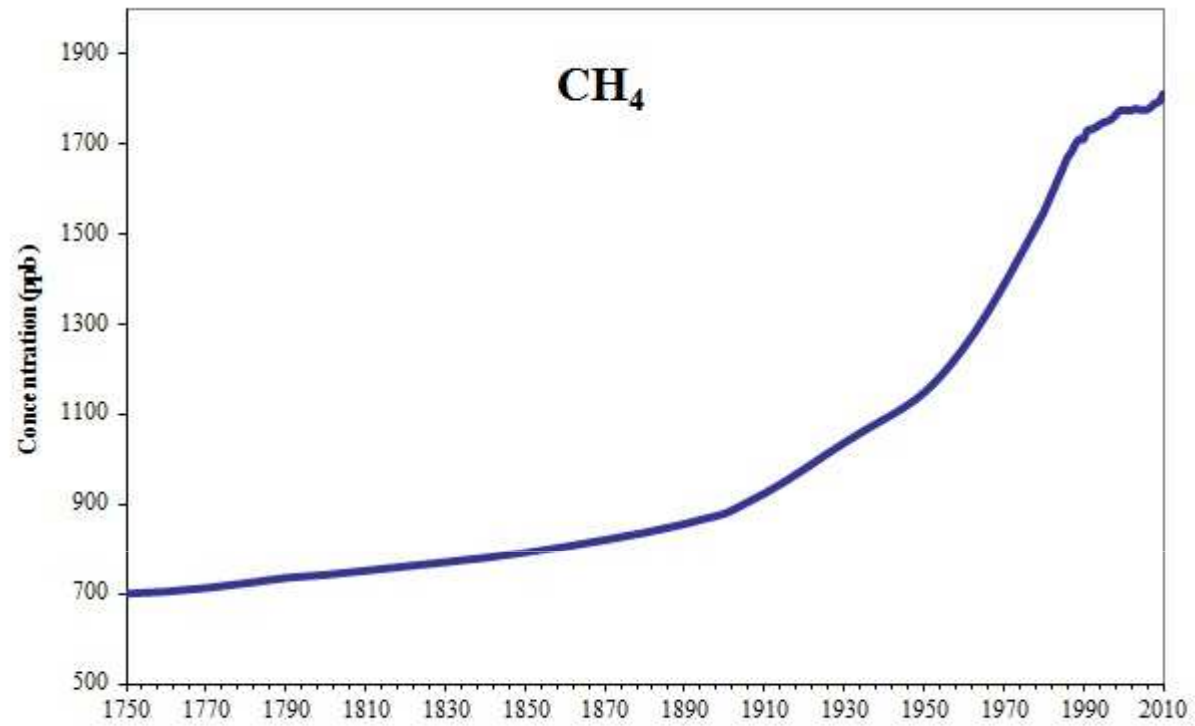


Banda gris: rango de variación en los últimos 65.000 años

Metano (CH₄)



- El tiempo de vida de CH₄ en la atmósfera es de 8-12 años.
- GWP a 20 años : 72, a 100 años: 25



<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/atmospheric-concentration-of-ch4-ppb-1>

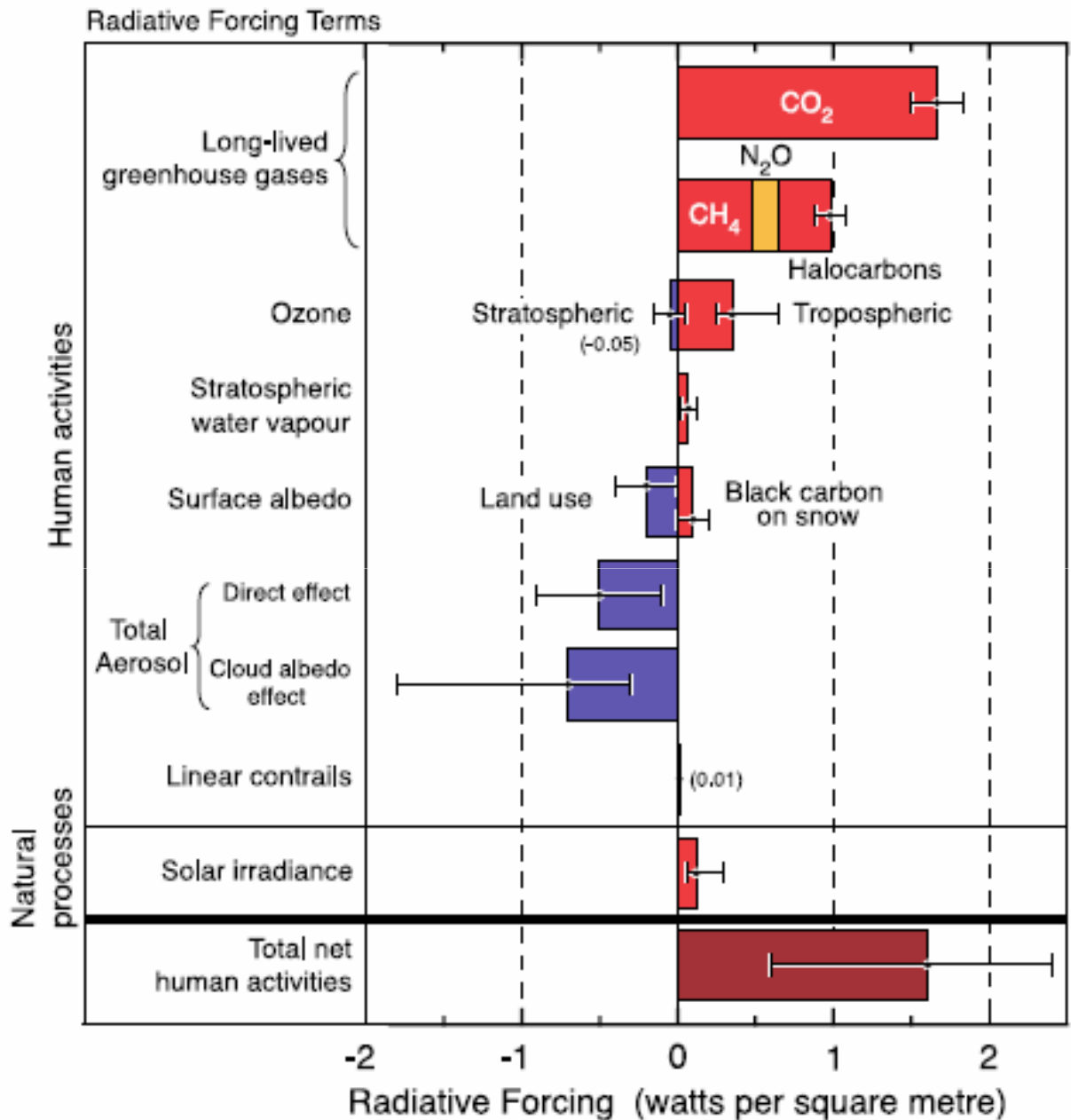
Forzante radiativo

- Es una forma de evaluar la influencia de un factor (como los GEI) sobre el clima.
- Es una medida de cómo se afecta el balance de energía del sistema Tierra-atmósfera
- Radiativo: porque estos factores cambian el balance entre la radiación solar entrante y la radiación IR saliente, cambiando la temperatura de la superficie terrestre.
- Forzante: indica que el hay un desplazamiento del equilibrio de radiación
- Unidades: w/m^2 de la superficie del globo en el tope de la atmósfera

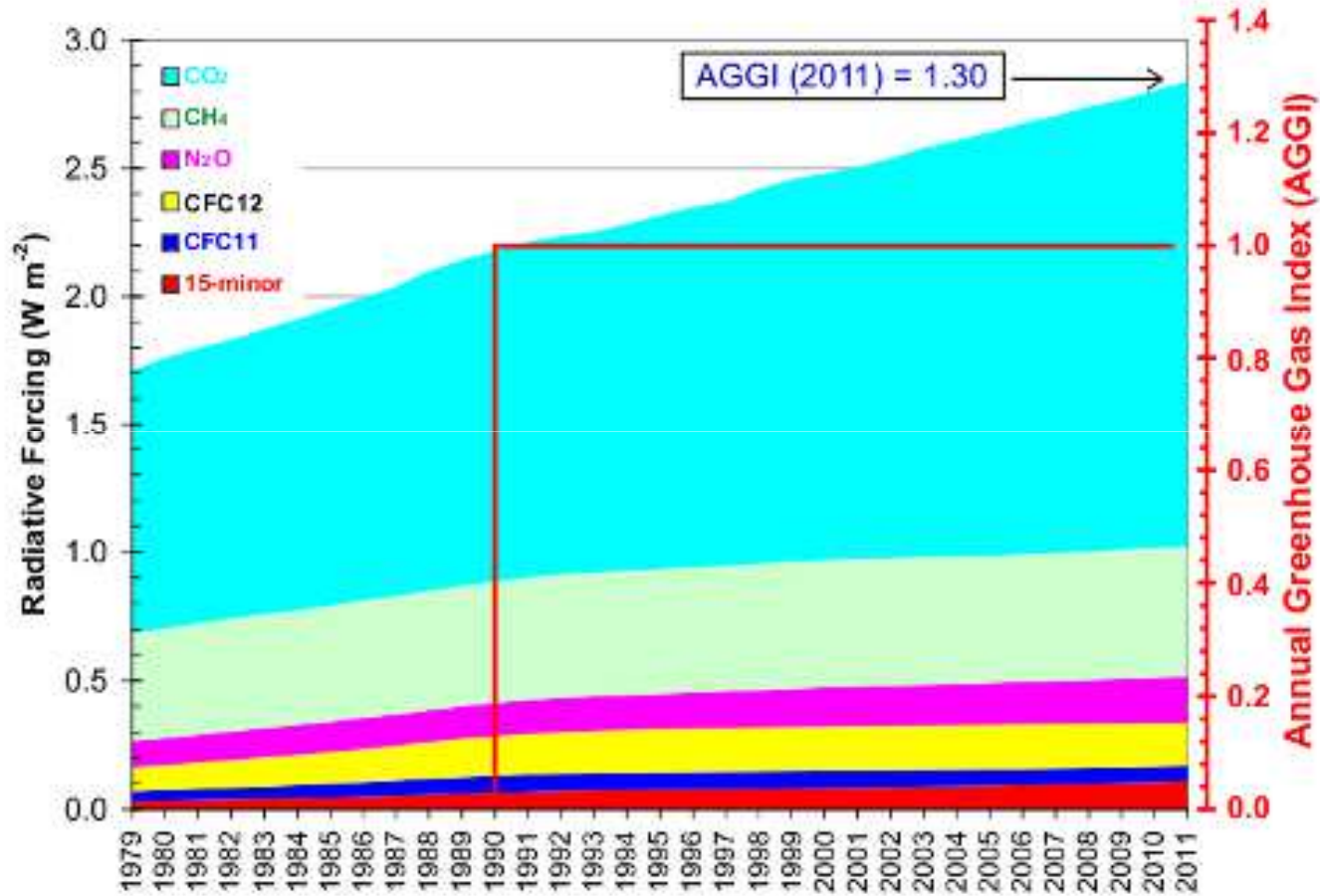
+ calentamiento

- enfriamiento

Radiative forcing of climate between 1750 and 2005



Gases de efecto invernadero principales

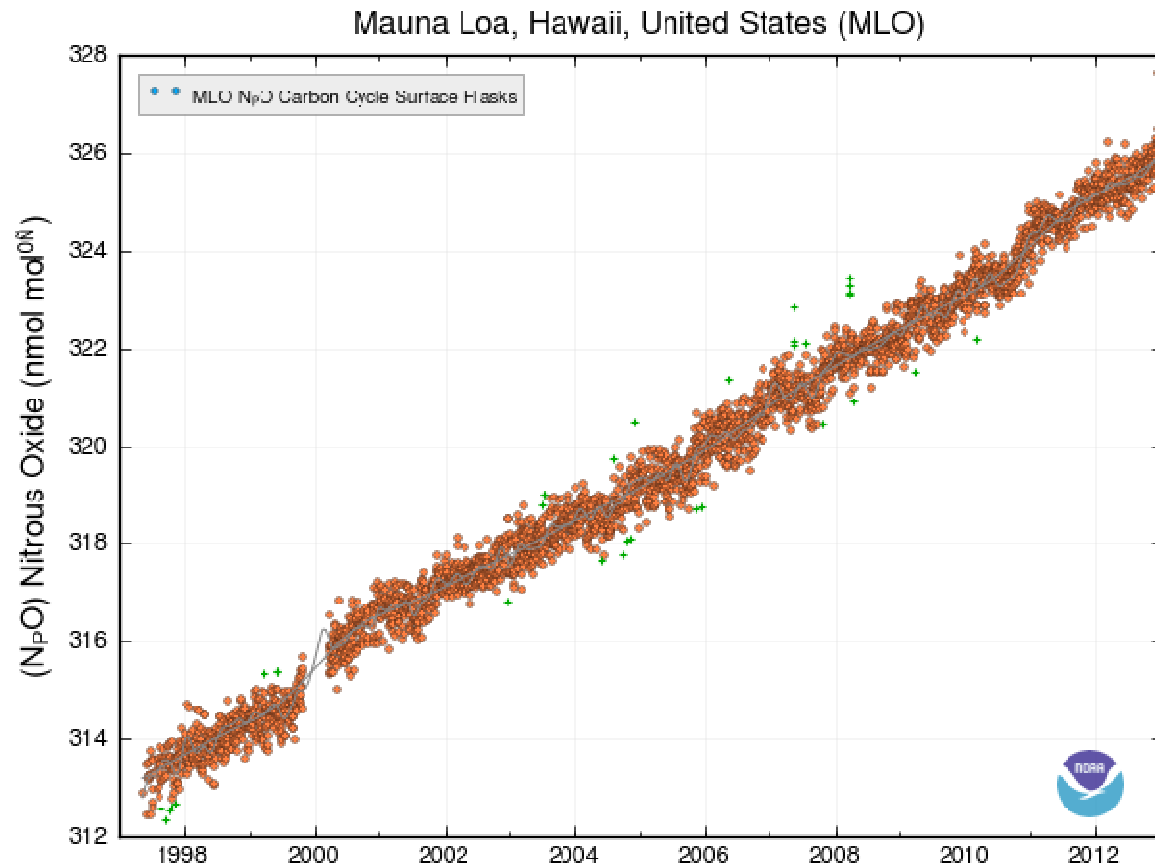


Óxido nitroso (N_2O)

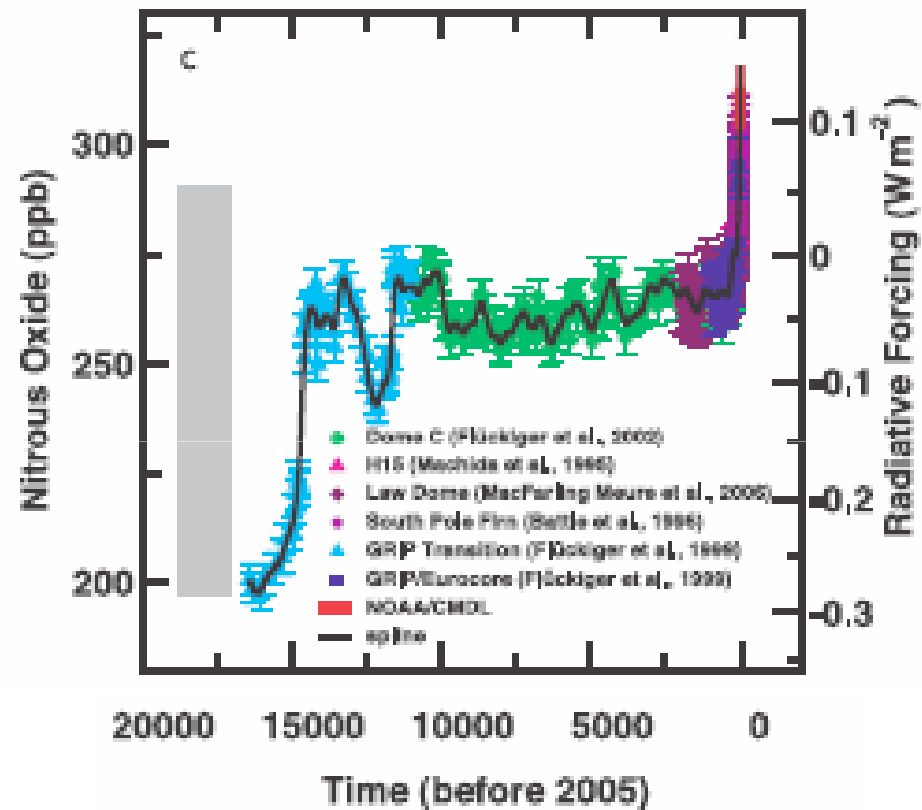
- Las fuentes naturales son difíciles de cuantificar porque el N_2O es producido por bacterias (nitrificadoras y denitrificadoras) en distinta proporción según el tipo de suelo, vegetación, clima, etc.
- Los sistemas naturales incrementaron su emisión debido al uso de fertilizantes y fijación de nitrógeno por la agricultura.
- Fuentes industriales: producción de nylon, producción de ácido nítrico, quema de combustibles fósiles, emisiones vehiculares.
- La causa principal del aumento de N_2O en la era industrial es el aumento de la producción microbiana en las zonas de agricultura en expansión y zonas fertilizadas

El tiempo de vida de N_2O en la atmósfera es de 114 años

Óxido nítrico (N_2O)



Graph created ESRL/GMD - 2010-July-10 04:31 am



Banda gris: rango de variación en los últimos 650.000 años

Gases invernadero incluidos en el Protocolo de Kyoto

- dióxido de carbono CO_2
- metano CH_4
- óxido nitroso N_2O
- hidrofluorocarbonos HFCs
Refrigerantes
- perfluorocarbonos PFCs
- hexafluoruro de azufre SF_6
Dieléctrico gaseoso en equipos
Industriales, aplicaciones médicas.

CFC y HCFC: regulados por el Protocolo de Montreal

- Los CFCs y los halones son compuestos muy estables que se utilizan como refrigerantes, en la fabricación de materiales de espuma, como solventes, propelentes de aerosoles y extinguidores de incendios. Estos compuestos se desarrollaron a partir de 1930 y comenzaron a producirse masivamente a partir de 1950.
- En general son no corrosivos, no inflamables, no tóxicos: pero debido a su larga vida alcanzan la estratósfera, donde liberan Cl y Br que afectan a la capa de ozono.
- Son gases de efecto invernadero.

Vapor de agua troposférico

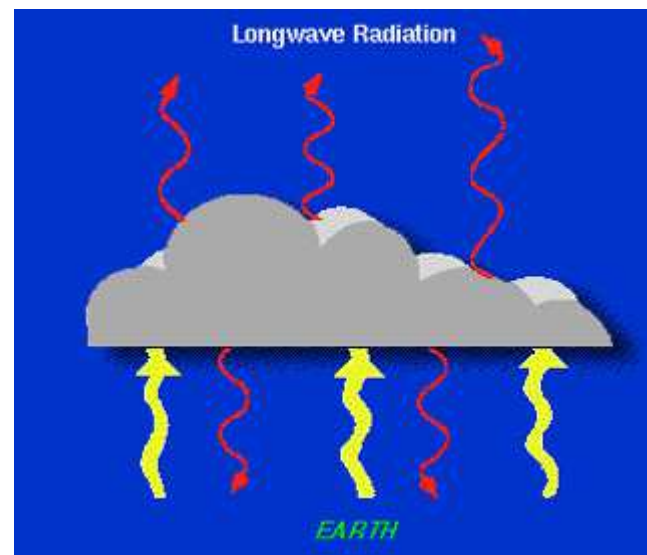
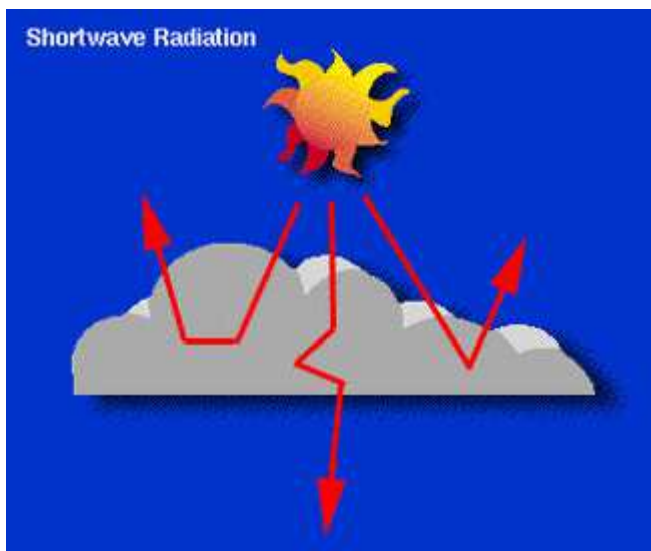
- 0,3% de la masa atmosférica vs. 0,06% para el CO₂
- 80% de la masa de gases de efecto invernadero
- Vapor de agua + nubes: 66-85% (revisar) del efecto invernadero

Forzante o respuesta?

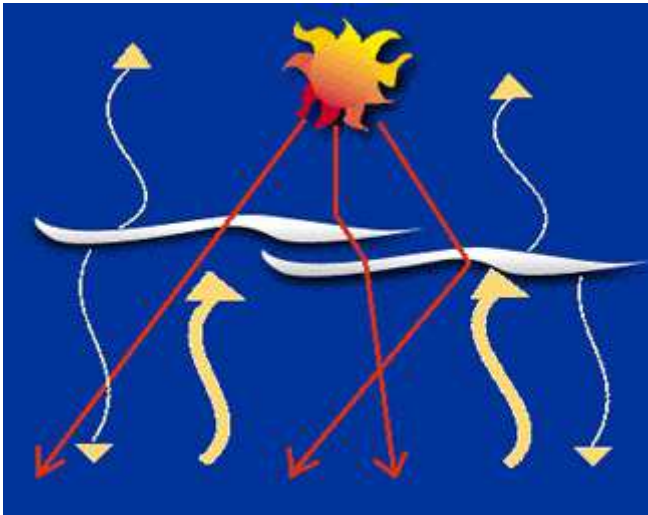
- Tiempo de residencia del vapor en la atmósfera: aprox. 10 días
- Luego de una erupción volcánica, que produce enfriamiento en superficie, disminuye el vapor de agua en la atmósfera.

- A mayor temperatura, mayor capacidad del aire de retener humedad.
- El vapor de agua puede producir un efecto de retroalimentación positiva:
 - el vapor es un gas de efecto invernadero
 - aumenta la temperatura
 - aumenta el vapor de agua
- Pero también puede aumentar la nubosidad y

Efectos de las nubes



- La nube refleja radiación solar: efecto de enfriamiento.
- La nube absorbe radiación de onda larga y luego la emite en todas las direcciones: efecto de calentamiento.



Nubes altas (cirrus): transparentes a la radiación solar, absorben la radiación terrestre y la reemiten. Por su baja temperatura (debido a la altura) emiten poco hacia el espacio.

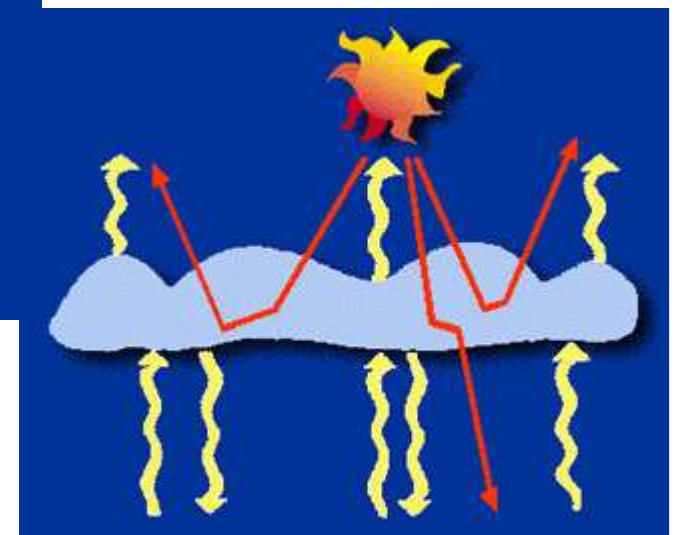
Efecto: calentamiento

Nubes convectivas, de gran desarrollo vertical: reflejan la radiación solar y están en equilibrio con la terrestre.

Efecto: neutro



Nubes bajas: reflejan la radiación solar (depende del espesor) y emiten poco hacia superficie (están casi a la misma temperatura). Efecto: enfriamiento



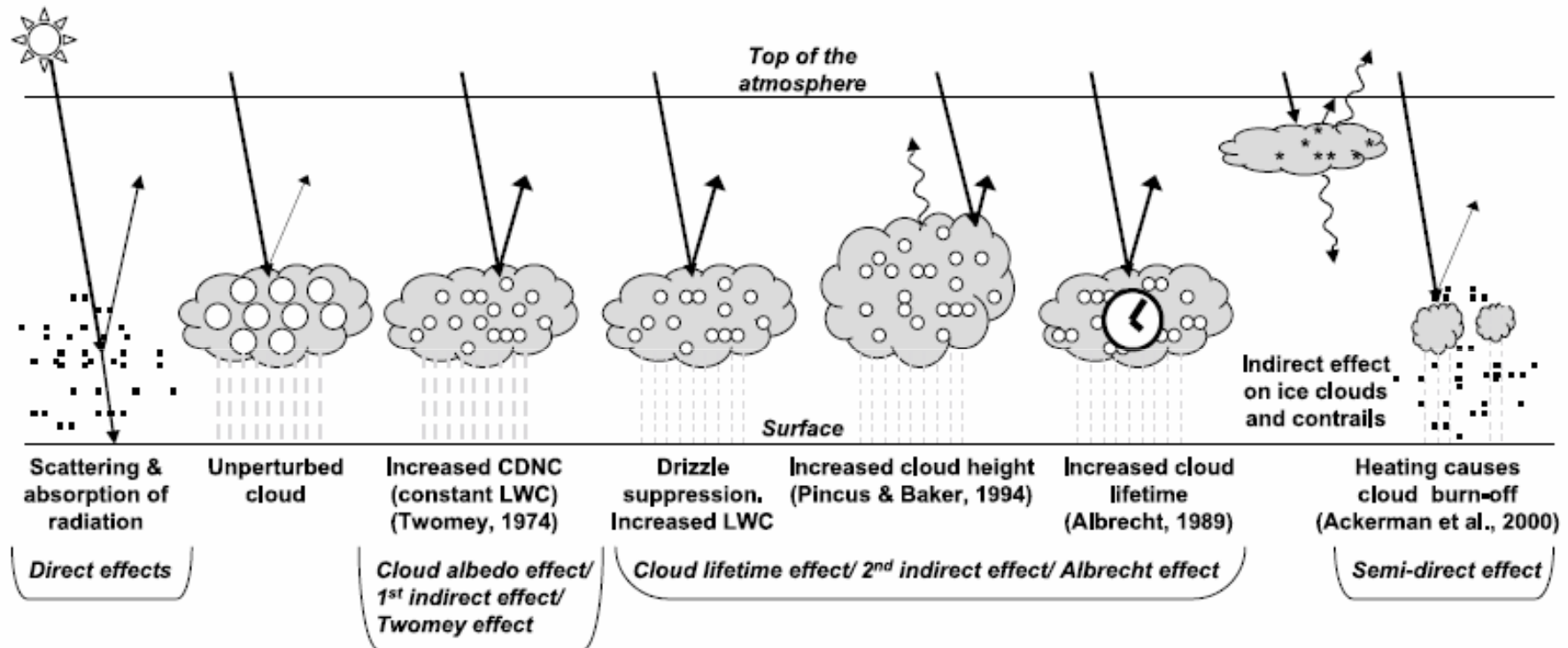
Forzantes antropogénicos: aerosoles

- Un aerosol es una suspensión de un sólido o un líquido en un gas.
- Tamaño: desde nanómetros a décimas de mm (10^{-9} a 10^{-4} m).
- Primarios: cuando son emitidos como partículas
Secundarios: cuando se producen a partir de gases en la atmósfera (por condensación o reacción química).
- **Fuentes naturales**: sales marinas, partículas de los suelos y cenizas volcánicas.
Fuentes antropogénicas: quema de combustibles fósiles y quema de biomasa, actividades industriales (transporte, fabricación de cemento, metalurgia, incineración de residuos).

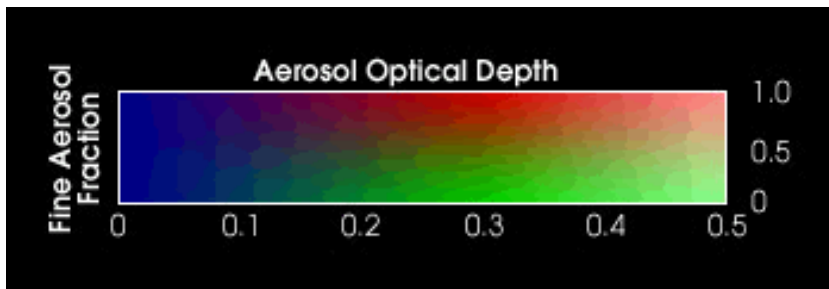
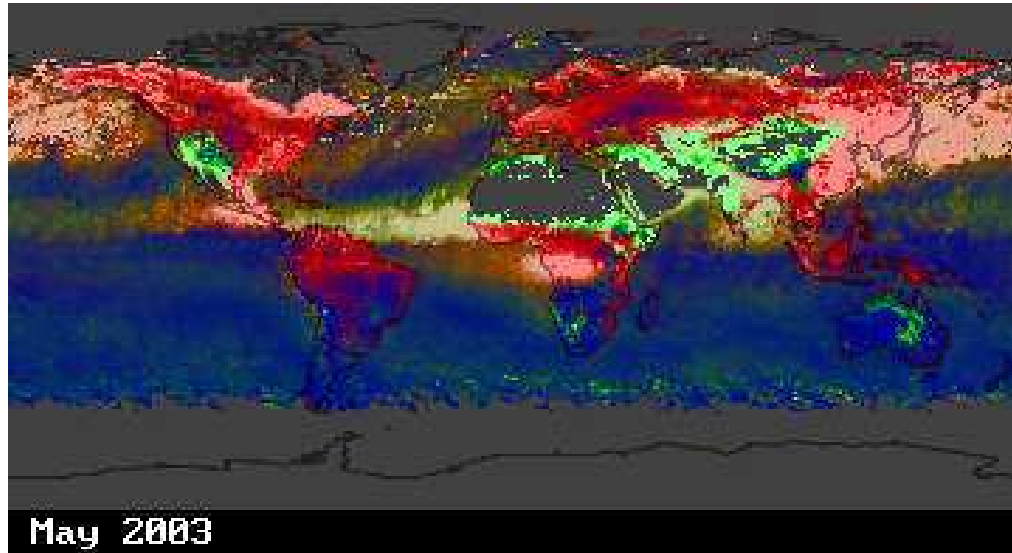
Aerosoles

- **Tiempo de vida:**
 - depende del tamaño (las más pequeñas tardan más en depositarse)
 - y de la posición en la atmósfera (días cerca de la superficie a meses en la troposfera superior)
 - en general son lavados de la atmósfera por las lluvias
- *La distribución espacial y temporal es notablemente inhomogénea.*

Aerosoles: efectos directos y sobre las nubes



Aerosoles



Rojo: aerosoles antropogénicos

Verde: aerosoles naturales (partículas de suelos)

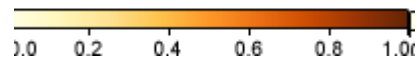
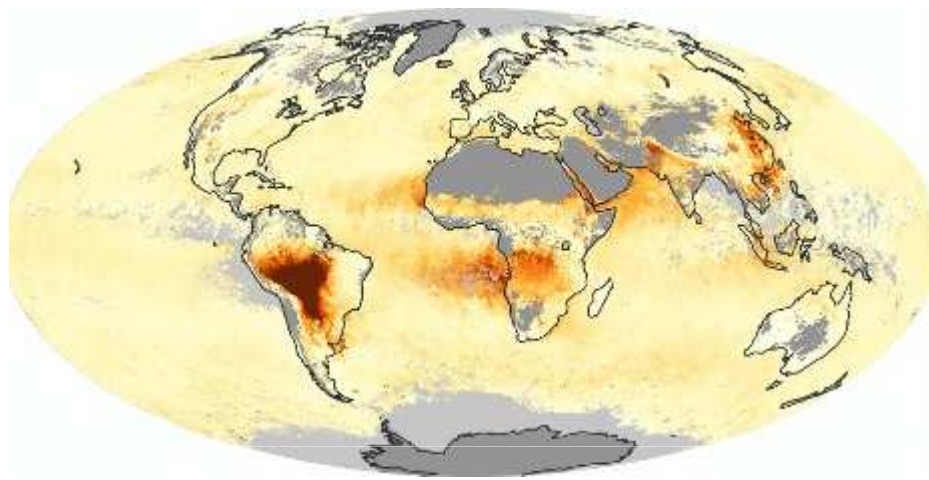
Marrón: ambos

Azul: aerosoles marinos

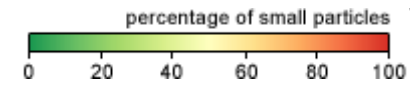
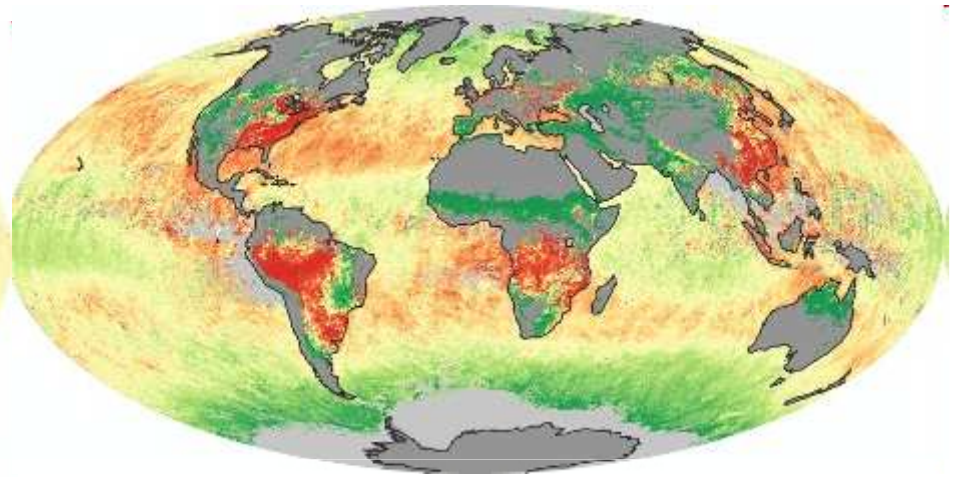
AOD (o AOT)= 0.1 , cielo limpio

AOD= 4, sin visibilidad al mediodía

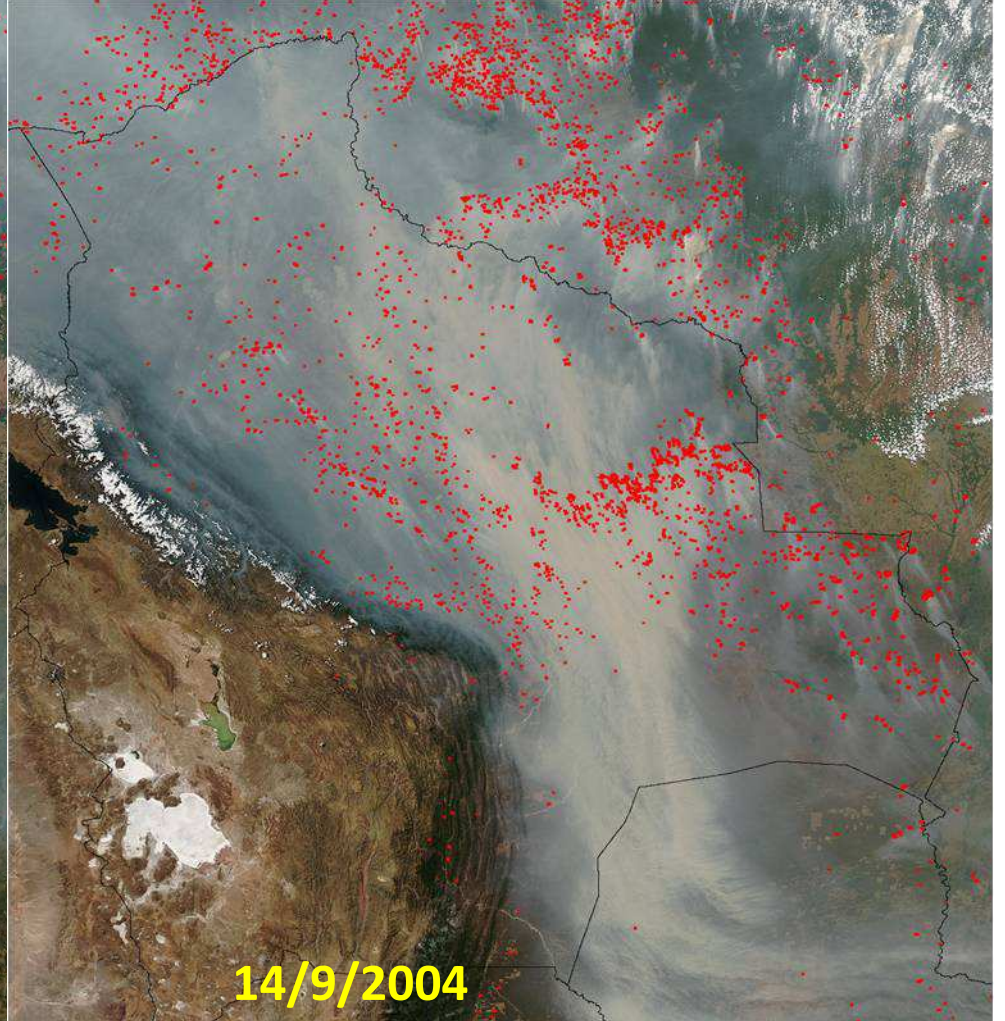
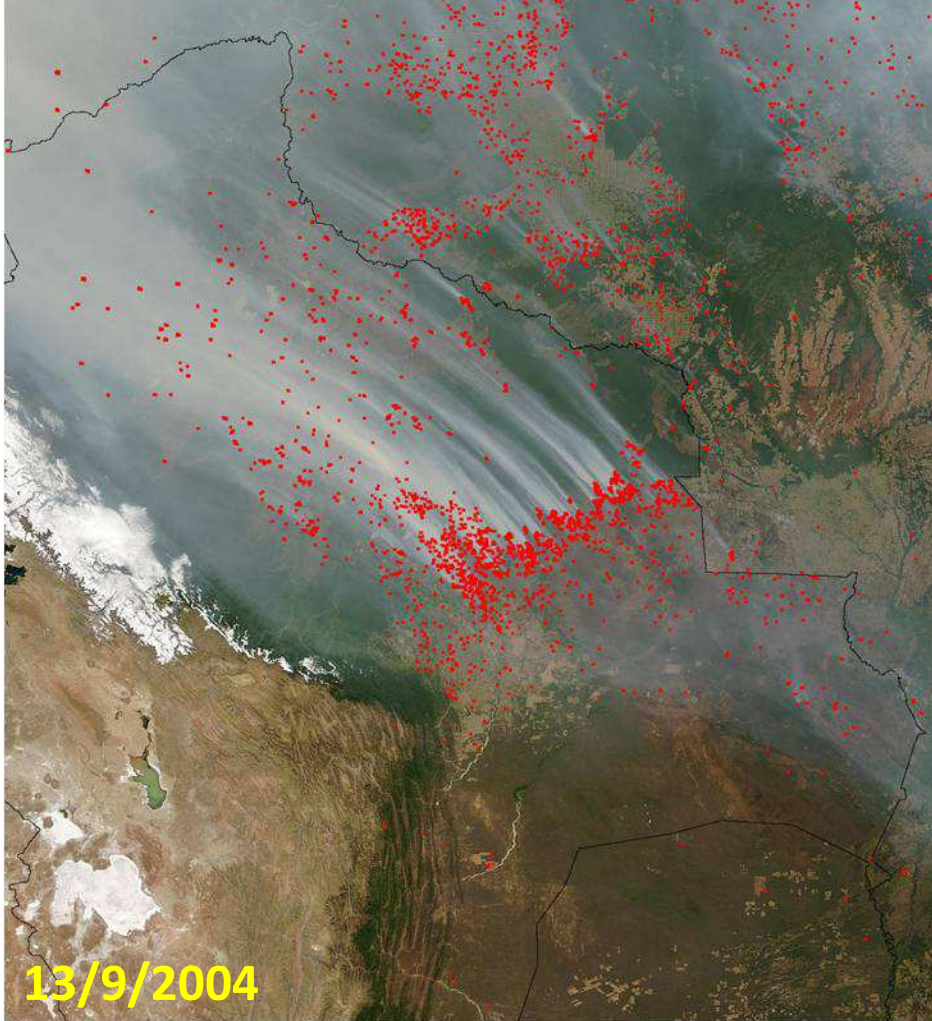
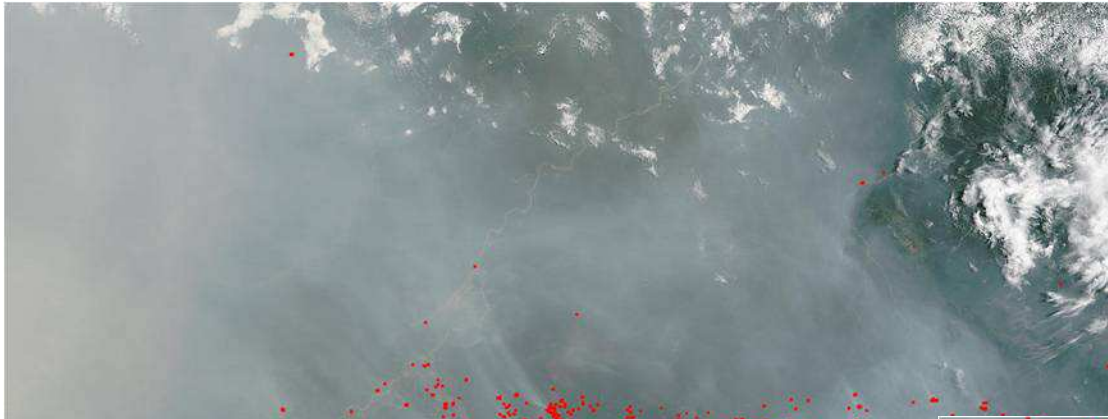
Aerosoles

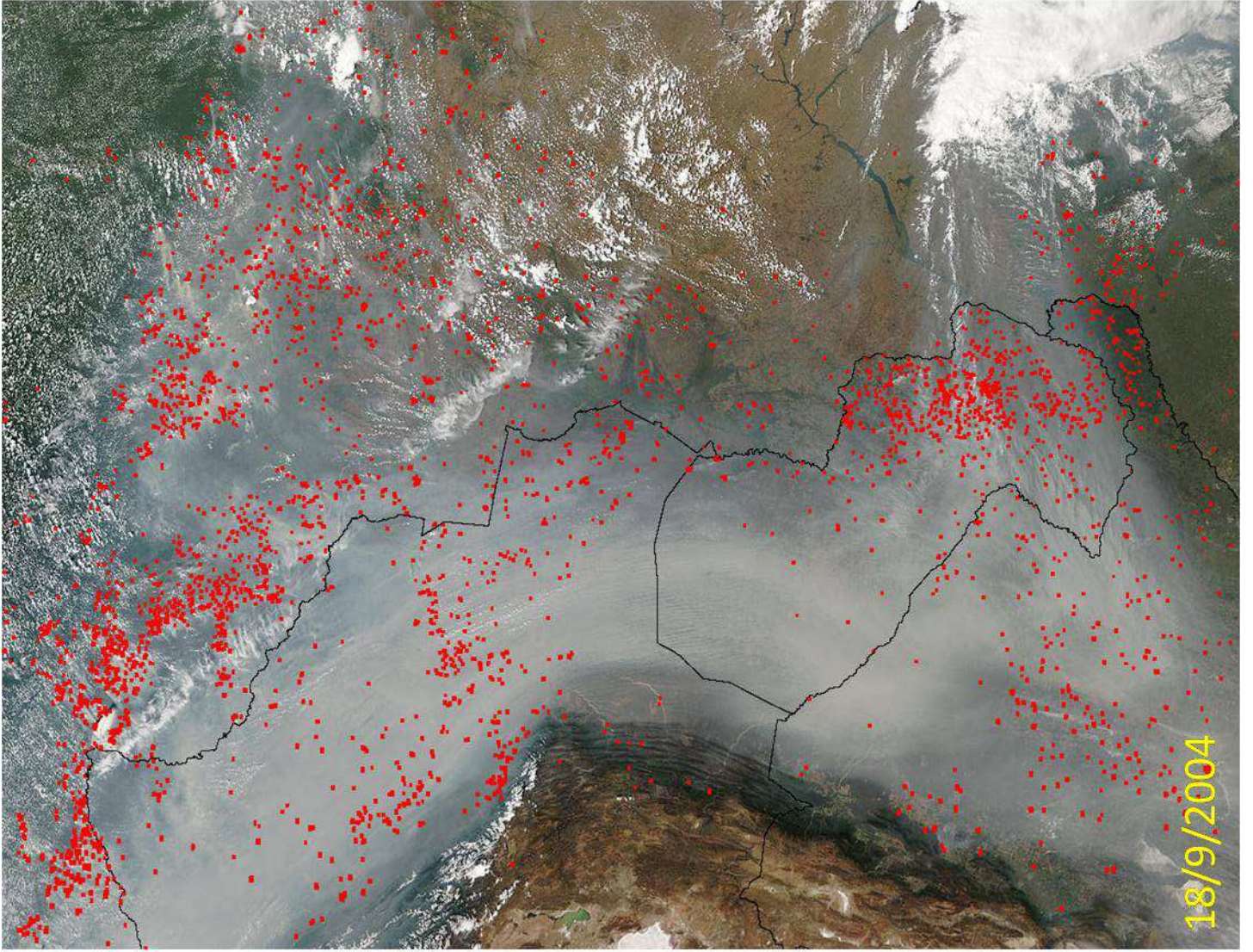


Espesor óptico de aerosoles (set 2007)



Fracción fina (set 2007)





18/9/2004

¿Por qué cambia el clima?

Forzantes naturales

- Sol
- Volcanes
- Astronómicos, orogenia (formación de montañas, elevación de continentes), epirogenia (cambios en la disposición de los continentes).

Antropogénicos

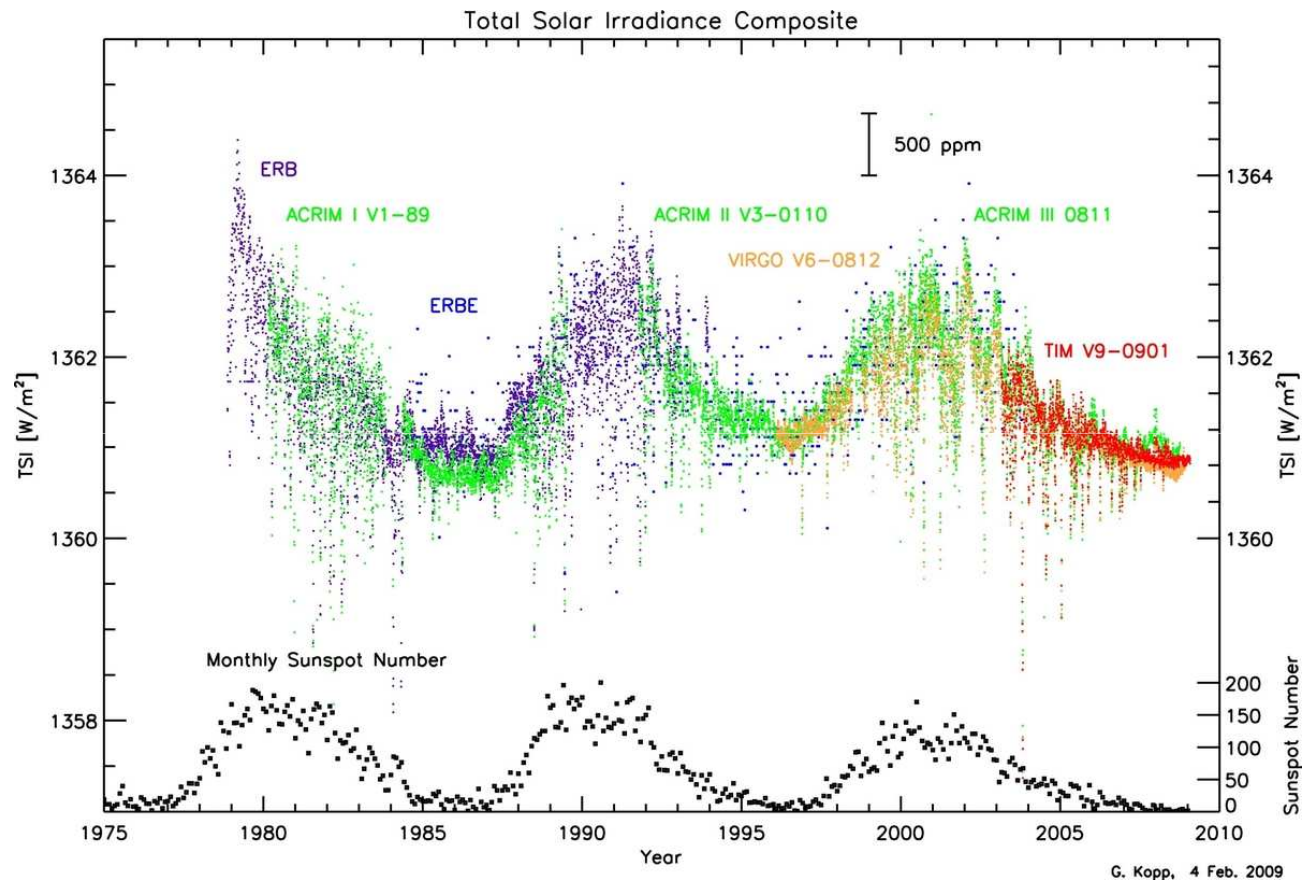
- Gases de vida larga
 - CO₂
 - CH₄
 - N₂O
 - Gases artificiales: CFC, HCFC, PFC, S₆F, etc.
- Aerosoles y su efecto sobre las nubes
- **Vapor de agua: ¿forzante o feedback?**

Forzantes naturales: la radiación solar

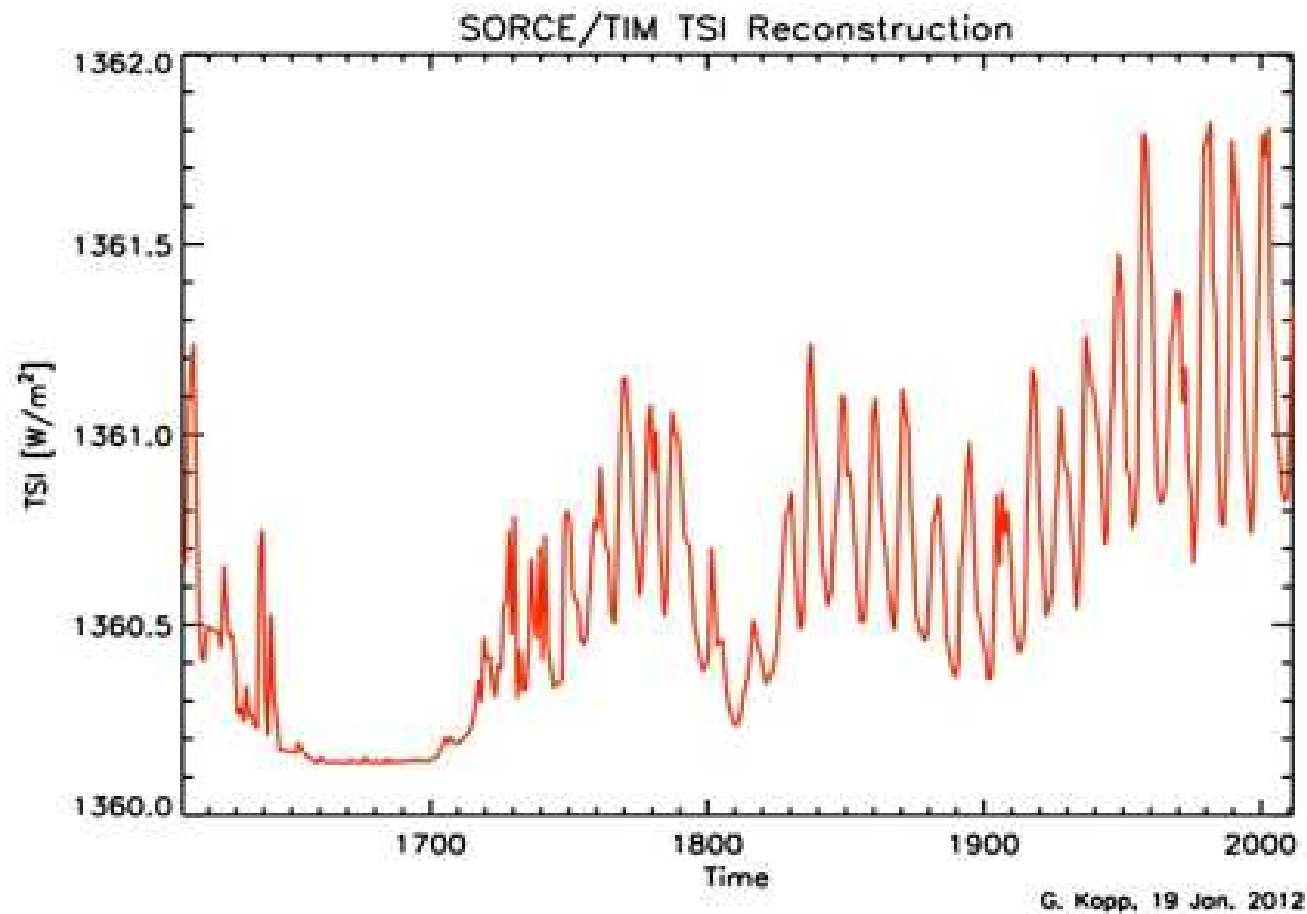
Mecanismos posibles

- Cambios en la irradiancia solar total
- Efectos indirectos de la radiación UV en la estratósfera
- Efectos inducidos por los rayos galácticos cósmicos

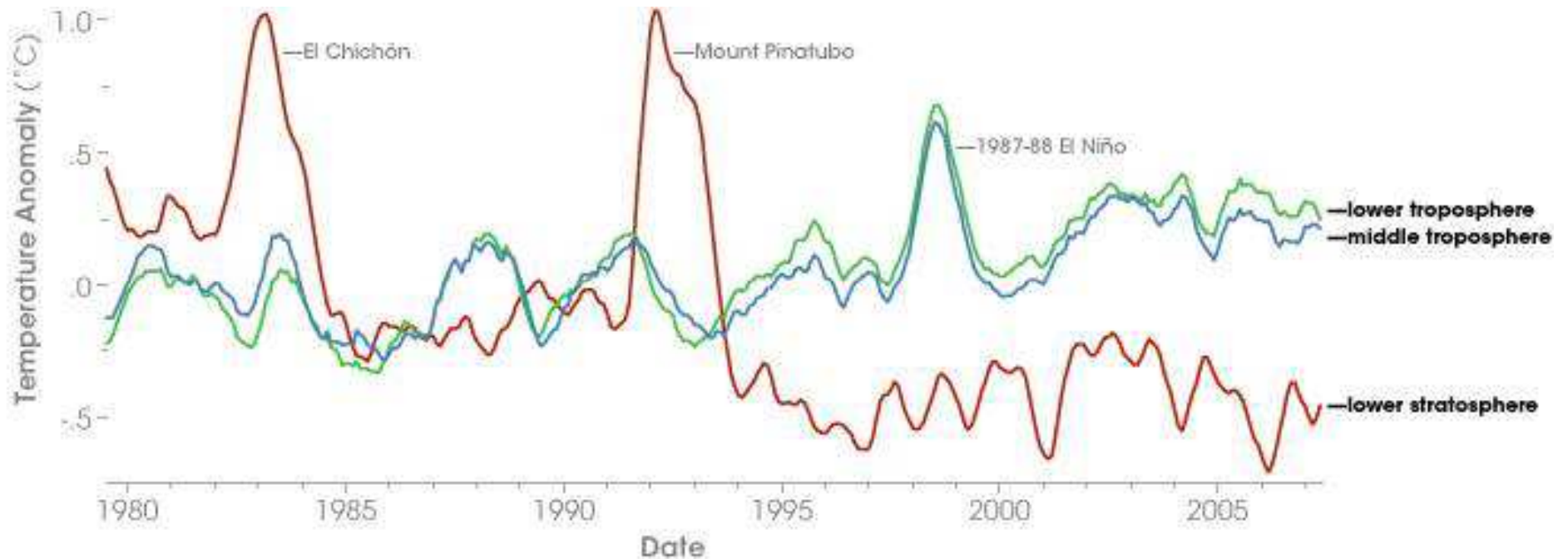
Radiación solar: mediciones satelitales



Reconstrucciones de la radiación solar en los últimos 400 años: variaciones del **0,2%** en la cantidad de radiación solar



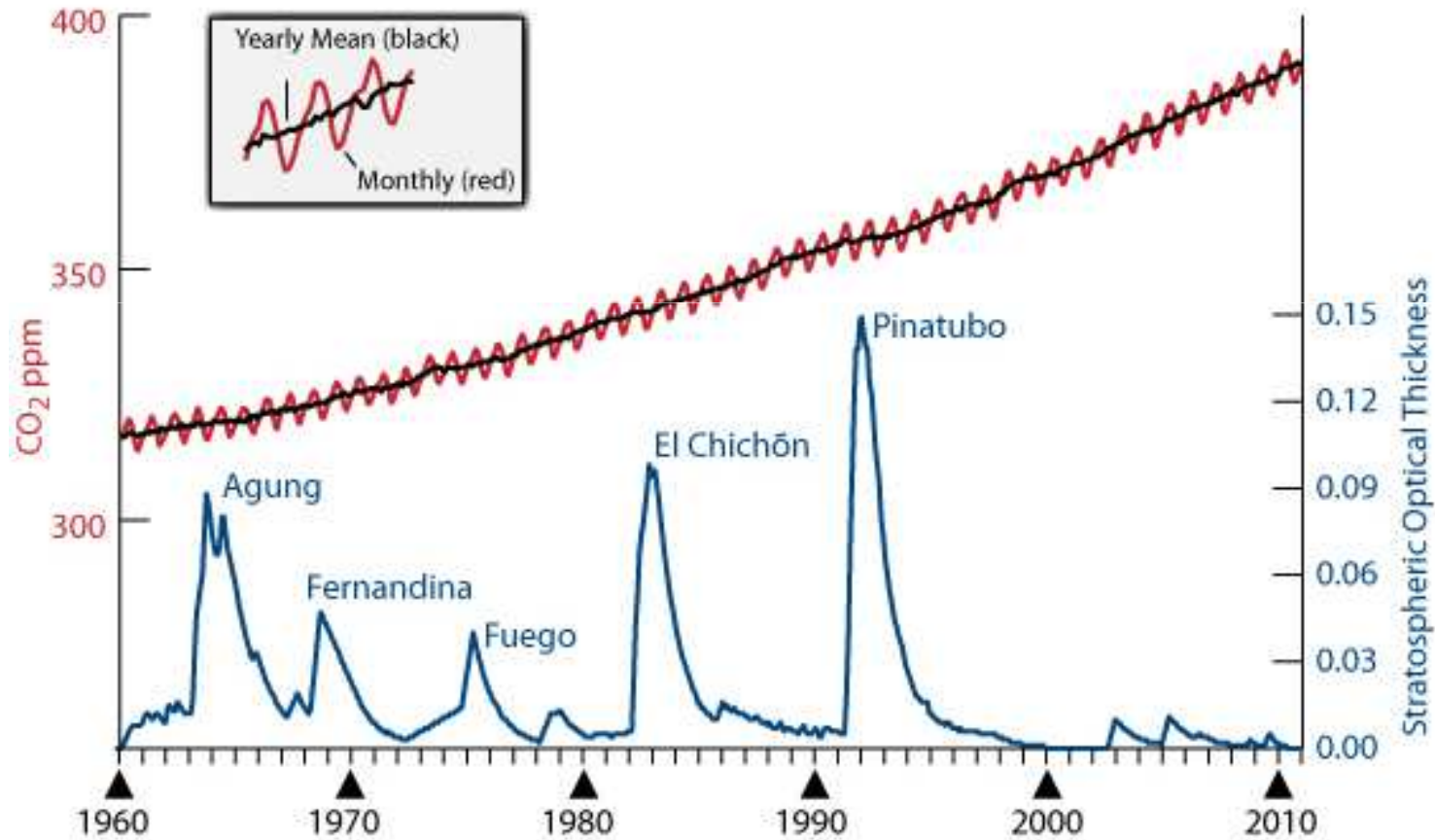
Efectos de los volcanes en la temperatura de la troposfera y la estratosfera



Calentamiento en la estratosfera y enfriamiento es superficie, que dura unos 2 años después de la erupción (<http://earthobservatory.nasa.gov/>)

Volcanes y emisiones de CO₂

What effect has volcanic eruptions had on CO₂ levels in the past?

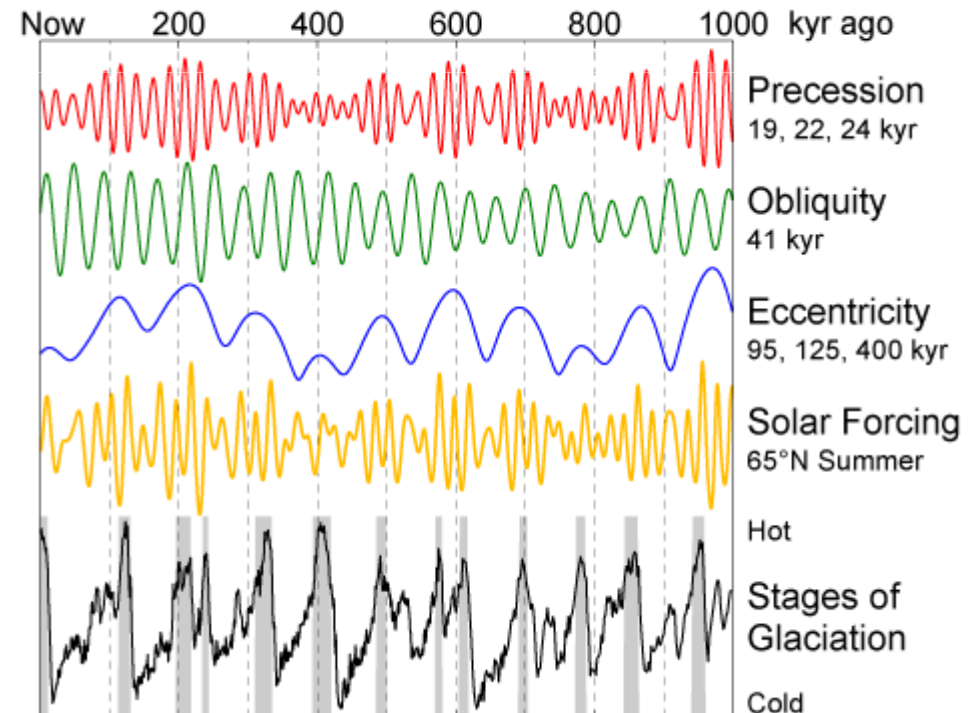
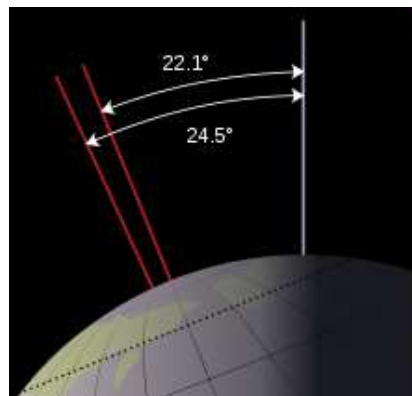
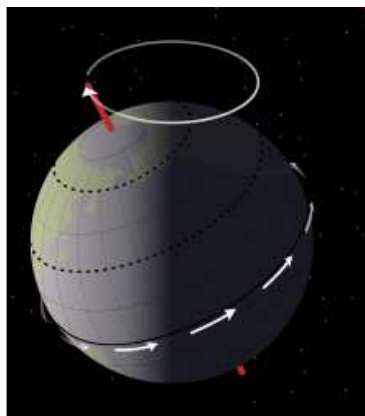
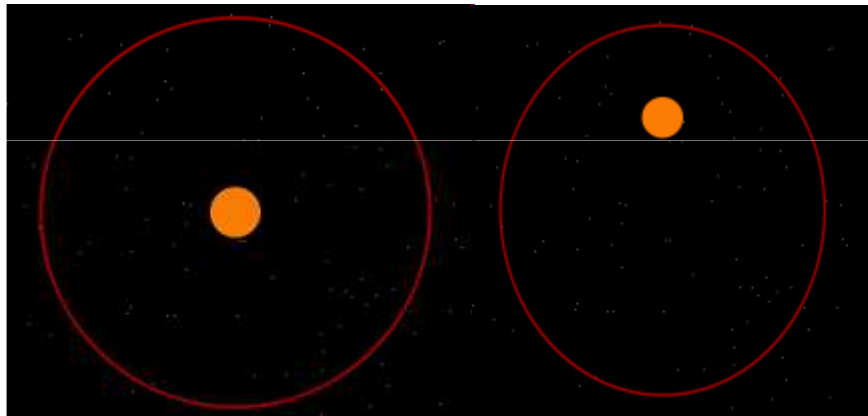


CO₂ Data: NOAA ESRL; www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends

Optical Thickness: NASA GISS; <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer>

Forzantes naturales: factores astronómicos (ciclos de *Milankovitch*)

- Cambios en el clima en tiempos geológicos por variaciones en la insolación por cambios en la posición Tierra – Sol.



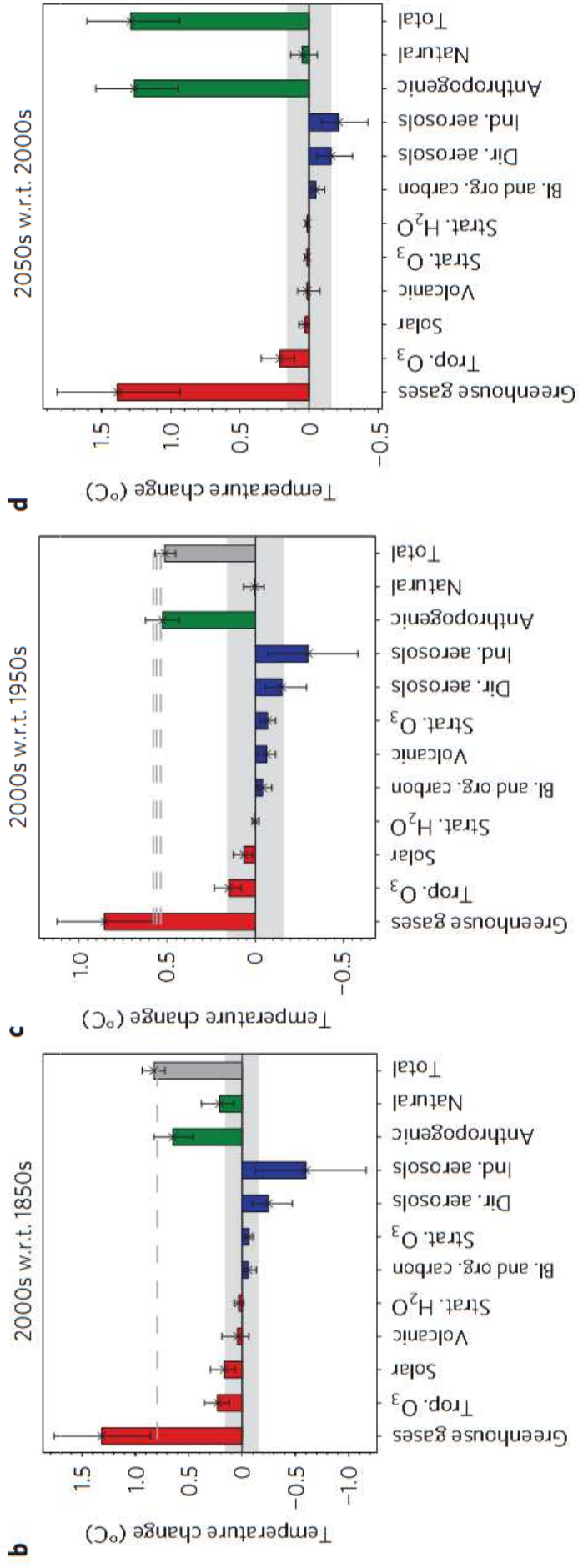
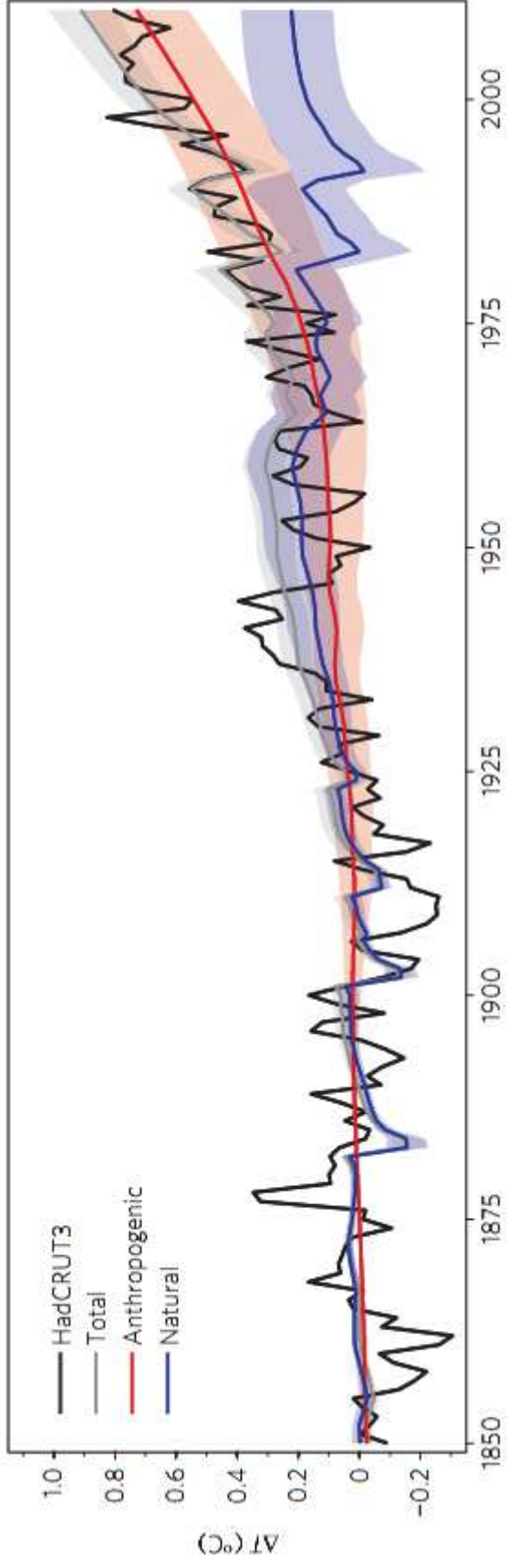
Forzantes naturales: procesos geológicos

Movimiento de placas tectónicas

Formación de montañas

Operan en escalas de tiempo geológicas.

Global mean temperature anomaly w.r.t. 1850–1900



EMISIONES

What if we stop increasing emissions?

Even at the current emissions rate, CO₂ is released into the atmosphere nearly twice as fast as it is removed—so the bathtub will continue to fill.

How do we cause CO₂ emissions?

Four-fifths is from burning fossil fuels. Nearly all the rest is from deforestation and other changes in land use.

How does CO₂ cause warming?

It absorbs some of the heat radiation coming off Earth's sunbaked surface and reradiates it back downward.

Where does our CO₂ go?

Plants and soil absorb about a third each year, and ocean surface waters about a quarter. The rest stays airborne for a long time.

How much is too much?

No one is sure. Some scientists think we need to reduce the CO₂ level back down to 350 parts per million (ppm)—equivalent to 745 billion metric tons of carbon—to avoid serious climate impacts. But if current emissions trends continue, 450 ppm will be passed well before mid-century.

Hasn't CO₂ been this high before?

Not for at least 800,000 years, say the oldest air bubbles found in Antarctic ice cores—and probably not for millions of years.

45% REMAINS IN ATMOSPHERE

30% ABSORBED BY PLANTS & SOILS

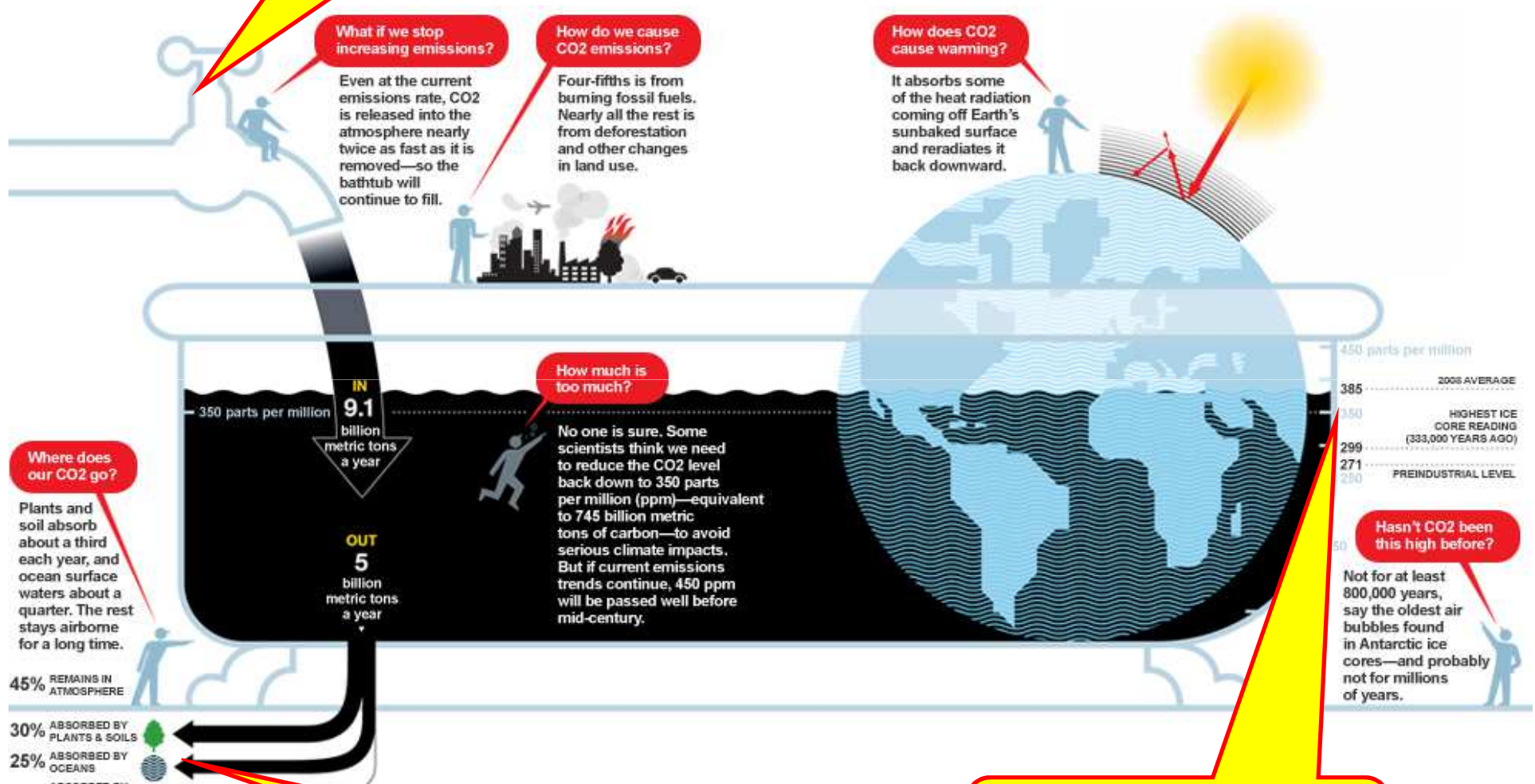
25% ABSORBED BY OCEANS

<1% ABSORBED BY SEDIMENTS & ROCKS*

* PERCENTAGES DO NOT ADD UP TO 100 BECAUSE OF ROUNDING

ACIDIFICACIÓN DEL OCEANO

CONCENTRACIÓN



- Emisiones

Unidades: masa sustancia / tiempo

g C/año, g CO₂/año

Pg C/año (peta 10¹⁵)

- Concentraciones (fracción molar)

Unidades: cantidad moléculas sustancia / cantidad de moléculas totales

ppm, ppb, ppt

¿Por qué no se usa
concentración=masa/volumen?

Concentraciones: Unidades comunes en la atmósfera

		<u>unidades SI</u>
partes por millón (ppm)	(10 ⁻⁶)	μmol mol ⁻¹
partes por billón (ppb)	(10 ⁻⁹)	nmol mol ⁻¹
partes por trillón (ppt)	(10 ⁻¹²)	pmol mol ⁻¹

Se distinguen (si no se indica, para gases es siempre ppmv):

ppmv: partes por millón volumen

ppmm: partes por millón masa

OJO: billon =10⁹

- Ecuación general de los gases ideales

$$PV=nRT$$

R

8,31434

J mol⁻¹ K⁻¹

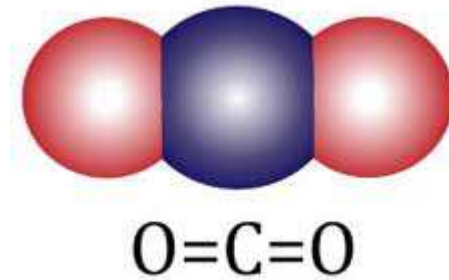
0,0820562

atm L mol⁻¹ K⁻¹

Equivalencia C-CO₂

Peso molecular C = 12g/mol

Peso molecular CO₂ = 44g/mol



1 g C \leftrightarrow 3,667 g CO₂



1 cabeza de ganado \leftrightarrow

4 patas de ganado \leftrightarrow

2 orejas de ganado

Prefijos

10^1	deca (da)	10^{-1}	deci (d)
10^2	hecto (h)	10^{-2}	centi (c)
10^3	kilo (k)	10^{-3}	milli (m)
10^6	mega (M)	10^{-6}	micro (μ)
10^9	giga (G)	10^{-9}	nano (n)
10^{12}	tera (T)	10^{-12}	pico (p)
10^{15}	peta (P)	10^{-15}	femto (f)
10^{18}	exa (E)	10^{-18}	atto (a)

Unidades: Factores de emisión

Fuel Economy - Used Cars	Reg No. ABC 123A
<p>CO₂ emission figure (g/km)</p> <p>A: < 100 B: 101-110 C: 111-120 D: 121-130 E: 131-140 F: 141-150</p> <p>D 127 g/km</p>	
<p>Fuel cost (estimated) for 12,000 miles</p> <p><small>A fuel cost figure introduced by the consumer is guide price for comparison purposes. This figure is calculated by using the combined urban cycle (open cycle and highway) and average fuel price. Re-calculated annually. The cost per litre or gallon is to follow - (units: lit, gallon, mpg and L/100 km).</small></p>	CO ₂
<p>VED for 12 months</p> <p><small>Vehicle excise duty (VED) is paid for vehicles according to the CO₂ emissions and fuel type of the vehicle.</small></p>	ET20



Masa CO₂/ unidad específica

unidad, km recorrido, unidad de energía producida, etc

Potencial de calentamiento global

(GWP; Global Warming Potential)

Es el forzante radiativo de un pulso de emisión de 1 kg del compuesto respecto a la emisión de 1 kg de CO₂ en un tiempo determinado.

$$GWP_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

Es un índice simplificado basado en las propiedades radiativas, que se usa para estimar el impacto futuro potencial de las emisiones de distintos gases al sistema climático, en relación al CO₂ (GWP=1).

RF: forzante radiativo, o eficiencia radiativa, w/m².ppb

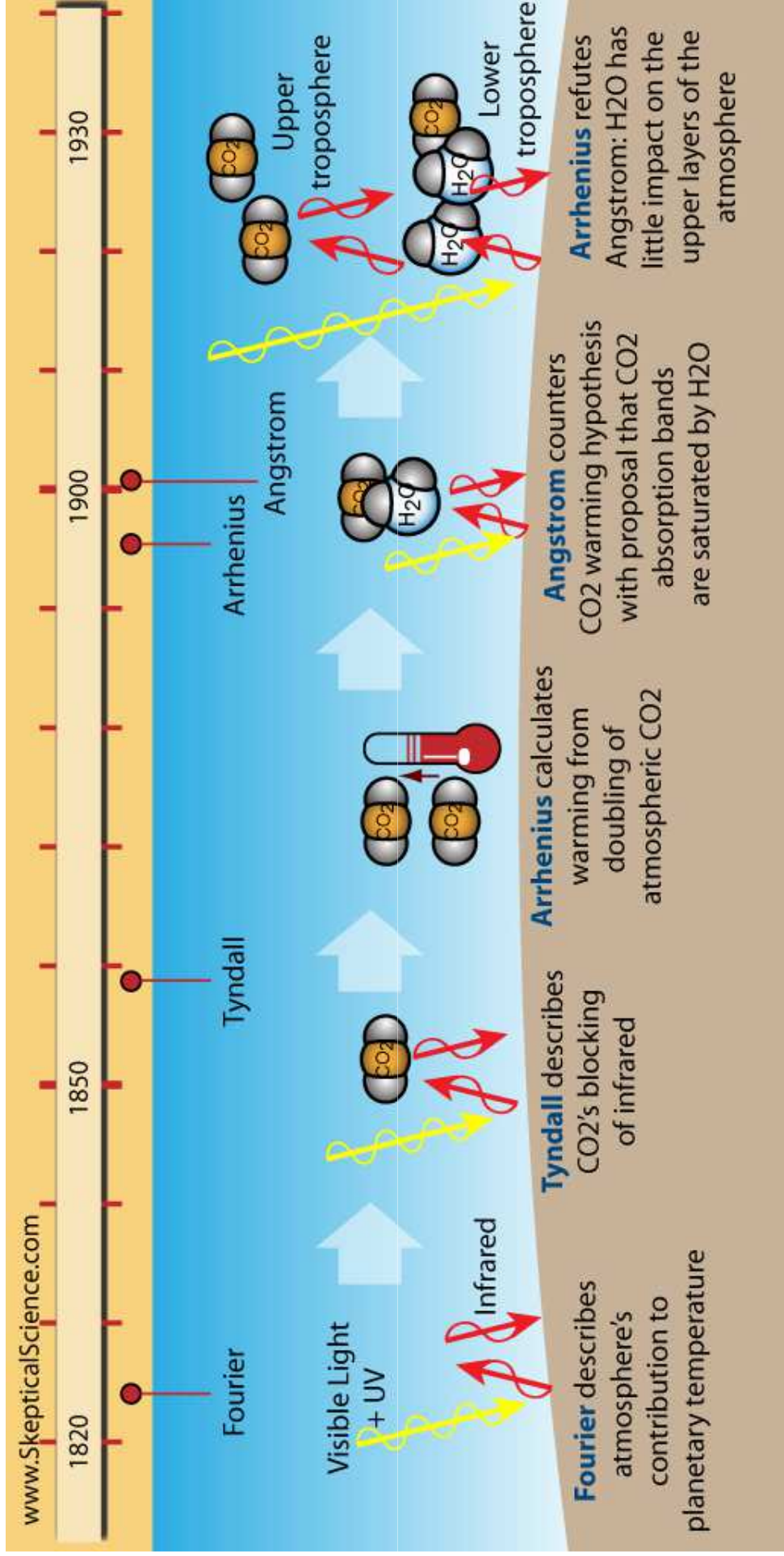
Potencial de calentamiento global

(GWP; Global Warming Potential)

				Global Warming Potential (GWP) para un dado horizonte			
	Fórmula química	Tiempo de vida (años)	Eficiencia radiativa (W m ⁻² ppb ⁻¹)	SAR‡ (100-años)	20-años	100-años	500-años
Dióxido de carbono	CO ₂	*200 a miles	1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Metano	CH ₄	12	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Óxido nitroso	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153

Tabla completa

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html#table-2-14





Hulburt

4°C



Hulburt calculates 4°C warming from doubling of CO₂ with H₂O feedback and refutes Angstrom

Callendar

Callendar observes temperature rise since 1900s and suggests that saturation of upper ocean layer reduces sink



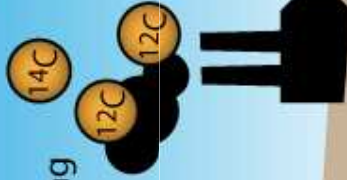
Assumption that CO₂ absorption bands are saturated limits acceptance of warming

Assumption of a strong oceanic sink limits concern over CO₂



Revelle and Suess

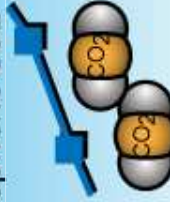
Plass computes warming using a layered model of the atmosphere



Revelle examines how ocean chemistry limits uptake of CO₂
Bolin and Erikson report that sequestration to the deep ocean is too slow to keep up with rate of CO₂ emissions

Keeling

Keeling measures yearly increase in atmospheric CO₂



Suess identifies isotopic fingerprint of fossil fuels in the atmosphere



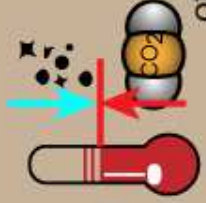


Manabe and Wetherald



Manabe and Wetherald build first model of Earth's entire climate, 1st to describe convection

Rasool and Schneider



Rasool and Schneider model cooling effects of aerosols, which launches global cooling speculation

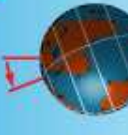
Wigley and Jones



Palaeodata
Ice, ocean, and terrestrial proxies reveal palaeoclimates

Rasool and Schneider model cooling effects of aerosols, which launches global cooling speculation

IPCC Hansen
Charney report marks entry of climate science in public policy

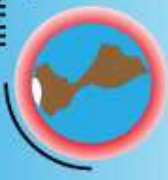


Palaeodata supports Milankovitch theory

Wigley and Jones project detectable warming from CO2 by 2000

Hansen predicts further warming; testifies before congress

Probability of killer heatwaves linked to global warming



Enhanced greenhouse effect observed



2000-2012 contain five warmest years in global temperature sets

Healthy skepticism

Temperature decline since 1940s fuels skepticism

Models fail to explain historical temperature fluctuations