

Investigación para un planeta vivo:

Avances en las ciencias de la Tierra

Mónica Solé

msole@culturciencia.com



El Cambio Global es REAL



- Hay un cambio global significativo (IPCC 2001)
- Importante determinar cuánto es antropogénico y cuanto natural
- Hay que predecir las consecuencias para tomar medidas... ¿a tiempo?

- Que sabemos hoy en día del funcionamiento del Sistema Terrestre: Componentes e interacciones
- La revisión de la historia evolutiva del sistema terrestre desde el origen de la Tierra y la vida hasta el día de hoy nos dará las claves para entender el futuro
- Los tres grandes aspectos del cambio global actual:
 - Calentamiento global
 - Reducción de la capa de ozono estratosférico
 - Pérdida masiva de biodiversidad

¿SISTEMA?

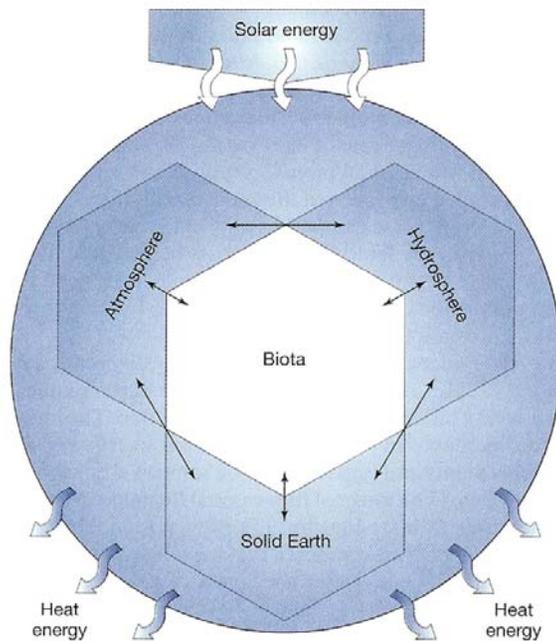


FIGURE 1-1

Schematic diagram of the Earth system, showing interactions among its four components. (From R.W. Christopherson, *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, 3/e, 1997. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)

- El sistema terrestre funciona gracias a mecanismos de retroacción (*feedback*) acoplados en ciclos en los que intervienen todos los componentes del sistema

mecanismos de retroacción

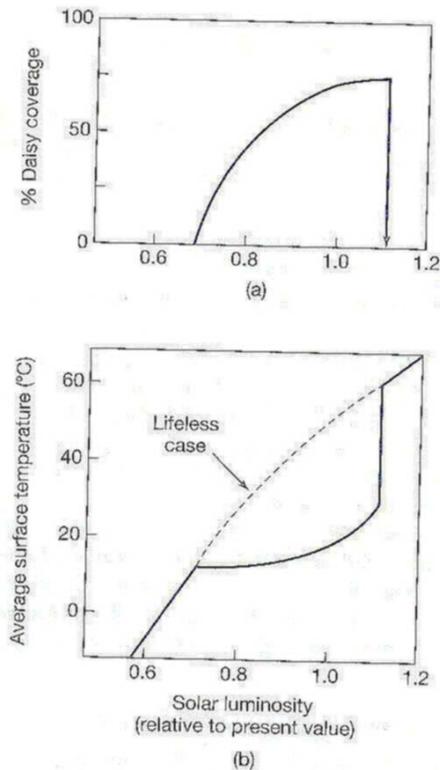


FIGURE 2-14

The response of Daisyworld to increasing solar luminosity.
(a) The change in daisy coverage of the planet in response to changes in solar luminosity (relative to the presumed present value).
(b) The change in average surface temperature of Daisyworld in response to increasing solar luminosity (solid line) and the response on a lifeless planet with fixed albedo (dashed line).

POSITIVOS: Establecen los estados de equilibrio inestable (una pequeña perturbación lleva al sistema a un estado de equilibrio diferente)

NEGATIVOS: Establecen estados de equilibrio (resistentes a perturbaciones moderadas, llevando de nuevo de vuelta al sistema a su estado de equilibrio estable)

Balance energético terrestre

$$S/4 \cdot (1 - A) = \delta T_e^4$$

S = Radiación solar incidente en la Tierra = 1.370 W/m²

A = Albedo (reflectividad de la superficie de la Tierra) = 0,3

δ = constante = 5,67 . 10⁻⁸ W/m².K⁴

T_e = 255 K = -18 °C (Temperatura del planeta sin Efecto Invernadero)

T_s = 15 °C (Temperatura real del planeta)

Magnitud **EFFECTO INVERNADERO = 33 °C**

Gases atmosféricos

Gases Atmosféricos

<u>Gas</u>	<u>Concentración (vol.)</u>
Nitrógeno	78 %
Oxígeno	21 %
Argon	0,9 %
V. de agua.	0,00001-4 %
Dióxido de carbono	0,037 %

Gases de Efecto Invernadero

<u>Gas</u>	<u>Concentración (ppm/vol)</u>
Vapor de agua	0,1 - 40.000
Dióxido de carbono	370
Metano	1,7
Óxido nitroso	0,3
Ozono (superficie)	0,01
Freón-11 (CCl ₃ F)	0,00026
Freón-12 (CCl ₂ F ₂)	0,00054

Distribución de la energía

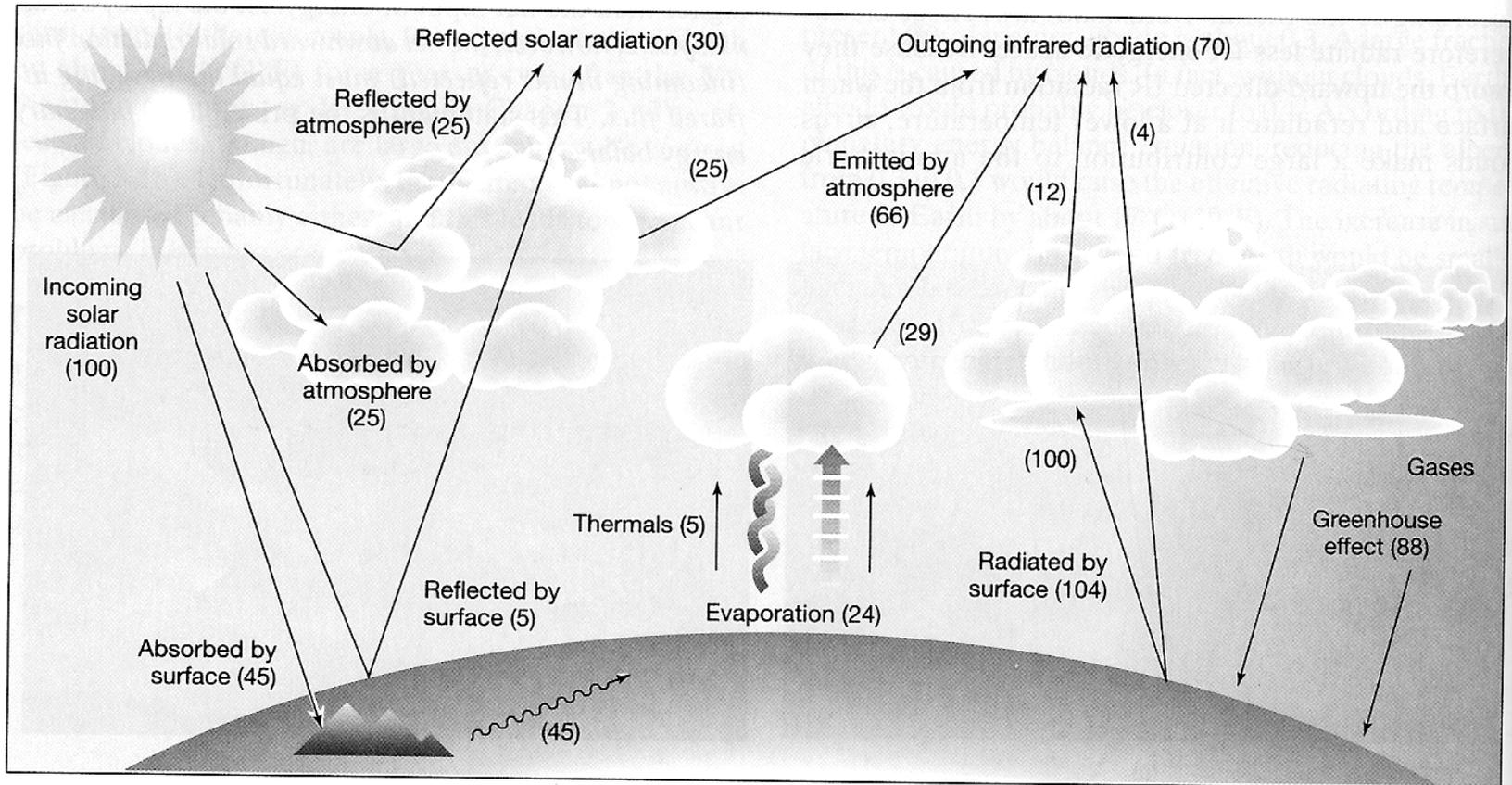


FIGURE 3-19

Earth's globally averaged atmospheric energy budget. All fluxes are normalized relative to 100 arbitrary units of incident radiation. (From S. Schneider, *Climate Modeling*, Scientific American, 256:5, 72-80, 1987.)

Mecanismos de retroacción

- NEGATIVO: T °C de superficie frente a IR emitido
- POSITIVO: T °C de superficie frente a Vapor de agua
- POSITIVO: Radiación solar frente a albedo
- Las nubes: Efecto no cuantificable

Circulación atmosférica

- Los vientos, entre otros componentes del sistema, se encargan de redistribuir la materia y sobre todo energía del planeta: Mecanismo de retroacción negativo
- Movimiento vertical: por diferencias de densidades
- Movimiento horizontal: por diferencias de presión

Circulación atmosférica

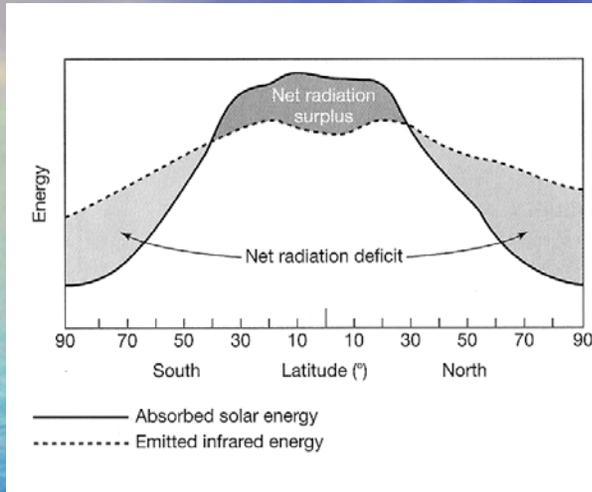
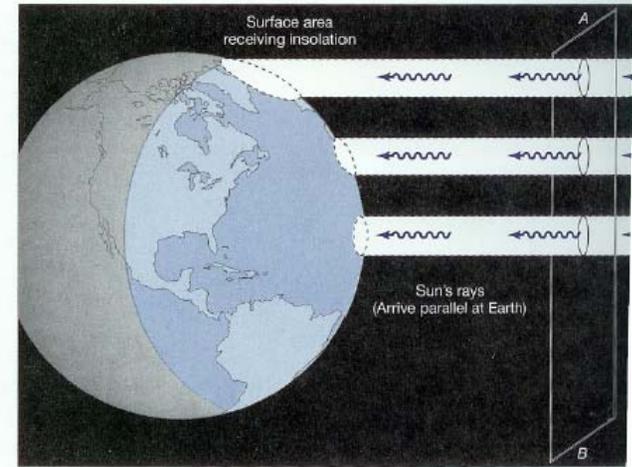


FIGURE 4-1

Variation of incoming solar energy with latitude. The radiation reaching Earth is spread over larger and larger areas as we move from the equator to the poles. Each square meter of the surface receives proportionately less energy as we move to higher latitudes. (From R.W. Christopher. *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, 3/e, 1997. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)



La fuerza conductora de la circulación atmosférica es la distribución global de energía:

1. El ángulo de incidencia de los rayos solares
2. Relación inversa de T °C y densidad de los gases
3. El aire se desplaza de zonas de altas a bajas presiones

Circulación general en la troposfera

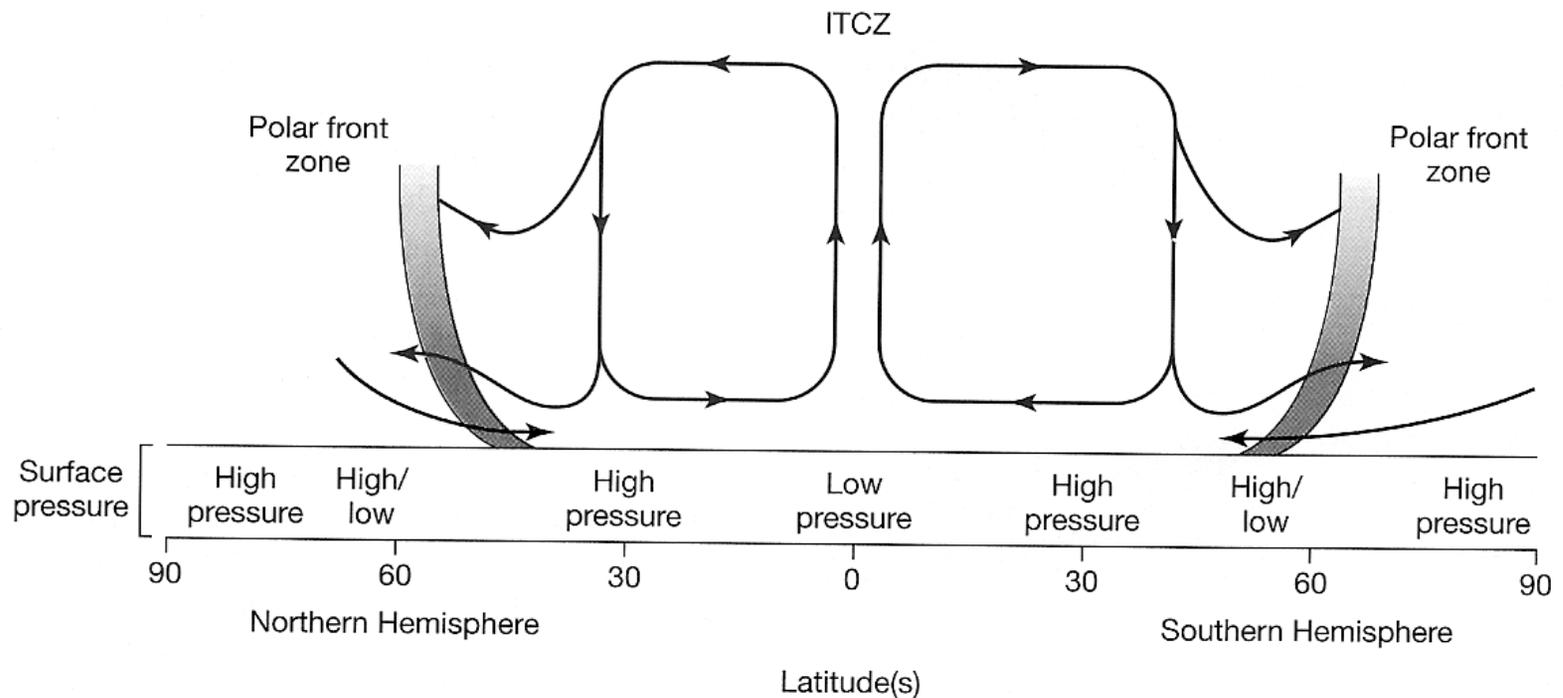


FIGURE 4-7

The north-south (meridional) circulation of the troposphere. The tropical circulation is dominated by the Hadley circulation, whereas mid-latitude circulation and weather are controlled by the location of the polar front zone and the mixing of cold polar air with warm air from the tropics.

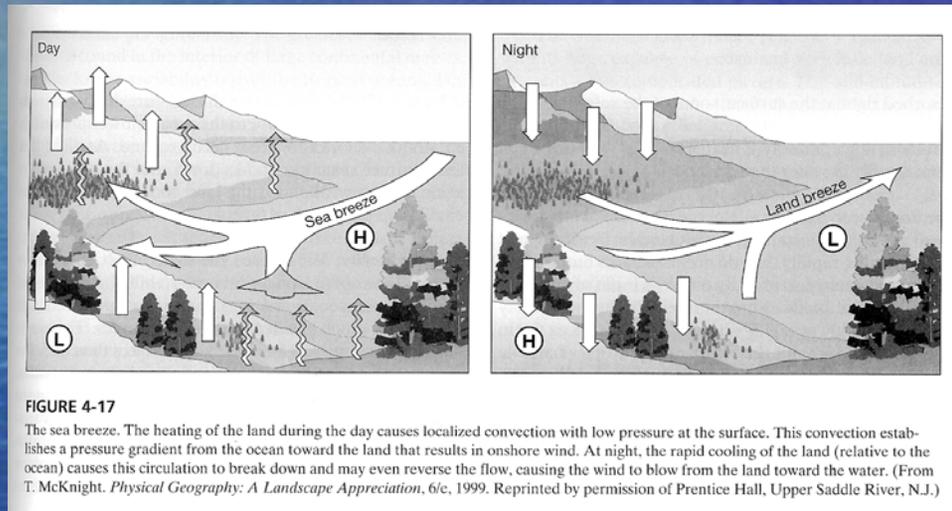
Distribución global de temperaturas y circulación atmosférica

El contraste tierra-océano afecta al patrón de temperatura global:

- Albedo océanos < albedo tierra
- Propiedades termal:
 - Conductividad termal océano > tierra
 - Capacidad calórica del océano > tierra
 - Diferencias de absorción: océano penetra & tierra que es a nivel superficie

Consecuencias de las diferencias en las propiedades termales

- La **brisa marina**



- La **continentalidad**: Variabilidad de temperatura estacional y latitudinal
- Los **monzones**: consecuencia extrema de variabilidad estacional

Patrones de precipitación global

- La circulación atmosférica también transporta vapor de agua y nubes, los cuales juegan un papel dominante en el balance energético global
- Factor significativo en la distribución global del agua dulce
- Es muy variable en el tiempo y el espacio

El agua

"El agua, en todas sus fases, es el medio principal por el que materia y energía circulan entre todos los componentes del sistema terrestre"

Transporta energía por toda la geografía en forma de calor latente (dependiente del estado físico en el que se encuentre)

Ciclo hidrológico global

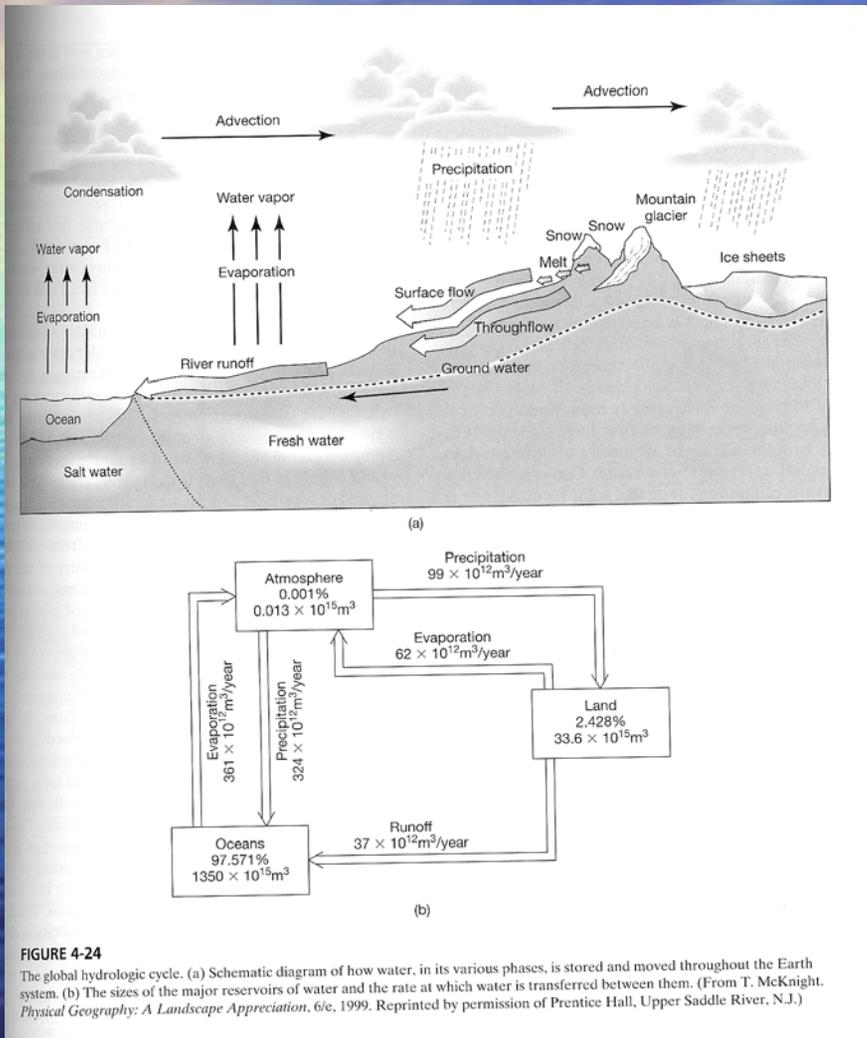


FIGURE 4-24 The global hydrologic cycle. (a) Schematic diagram of how water, in its various phases, is stored and moved throughout the Earth system. (b) The sizes of the major reservoirs of water and the rate at which water is transferred between them. (From T. McKnight. *Physical Geography: A Landscape Appreciation*, 6/e, 1999. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)

- 97 % océanos
- 2,4 % terrestre:
 - $\frac{3}{4}$ Placas de hielopolares
 - $\frac{1}{4}$ Glaciares
 - 1/100 líquida subterránea y superficial:
 - 2/3 lagos
 - 1/3 suelo
 - 0,000... ríos
- 0,001 % atmosférica

¿Cuándo llueve?

Cuando se alcanza una humedad relativa del aire en torno al 100 %.

La humedad relativa aumenta con el aumento de la presión de vapor.

La presión de vapor aumenta con el aumento de la concentración de vapor de agua y con la bajada de la temperatura

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{Presión de vapor}}{\text{presión de vapor saturada}} \times 100$$

Precipitaciones

ZONAS DE LLUVIAS:

- Zona de convergencia intertropical (ITCZ): ecuador
- Zona del frente polar: 60° latitud

ZONAS DE BAJAS PRECIPITACIONES:

- Interior de grandes masas continentales
- Zonas de subsidencia: Desiertos
- Laderas de sotavento de montañas
- Zonas muy frías donde no hay convección (Antártica)

Circulación de los océanos

- Corrientes superficiales (hasta 100m de profundidad)
- Circulación de aguas profundas:
Circulación termohalina

Circulación de la superficie oceánica

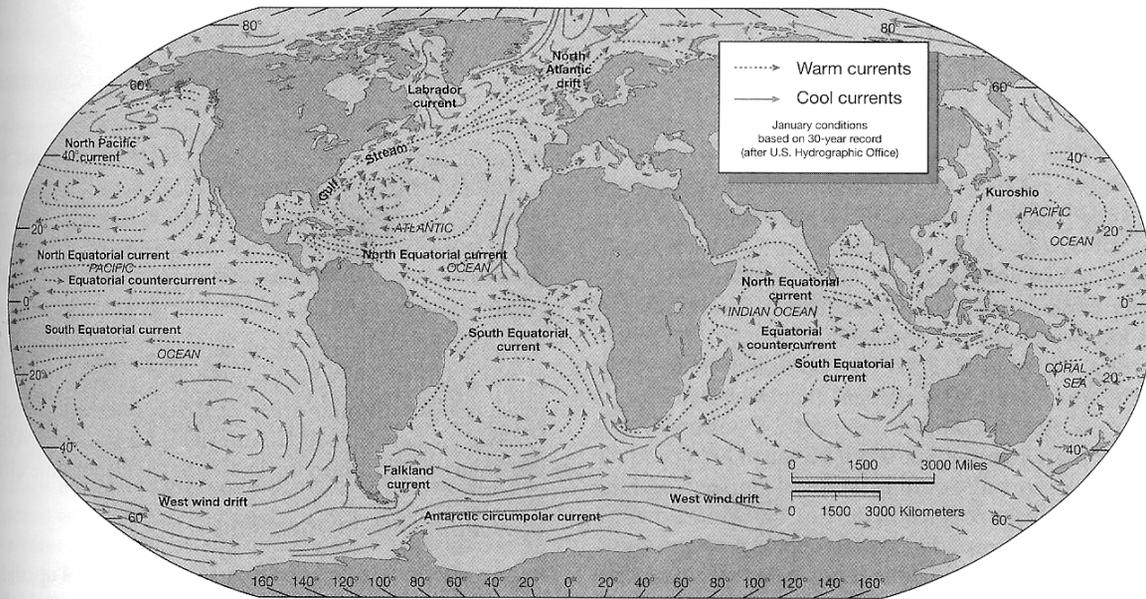
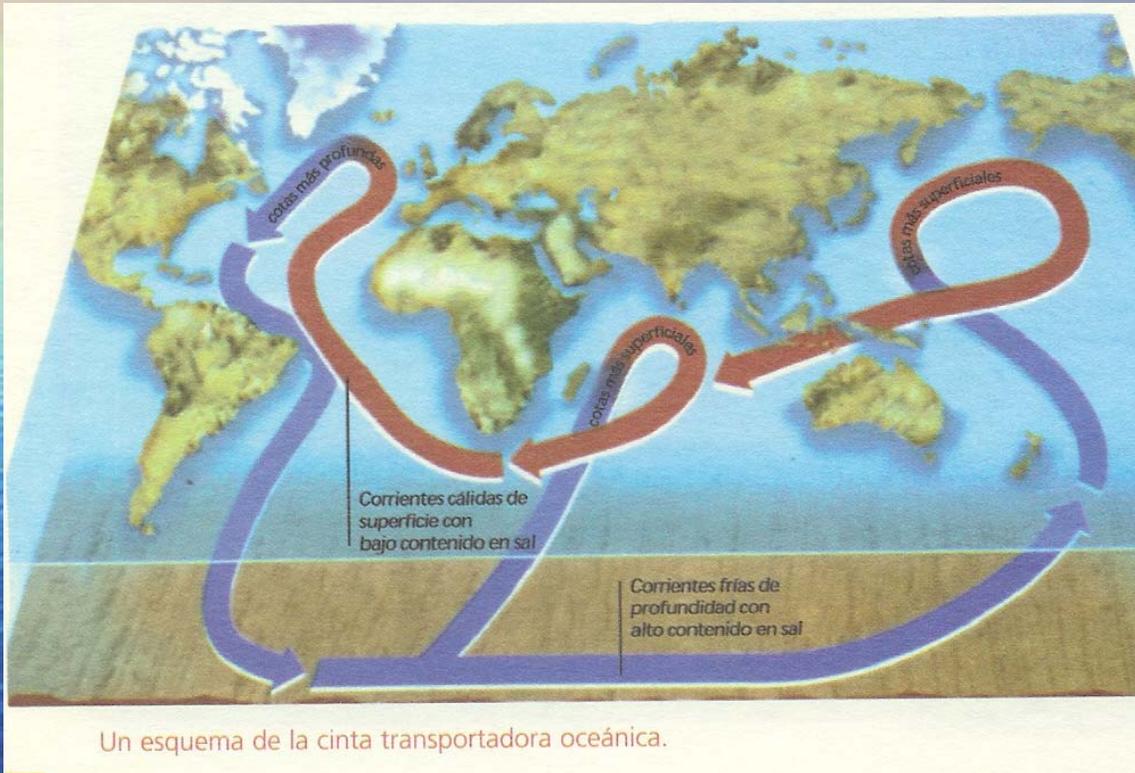


FIGURE 5-2

The major surface-ocean currents. (From R.W. Christopherson, *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, 3/e, 1997. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)

- Vientos
- Efecto Coriolis
- Transporte Ekman
- Elevación del centro del giro
- Forma del giro determinada por los continentes

Circulación del fondo oceánico



- Aguas más frías y saladas = más densas
- Corrientes lentas (30-60 m/h = 19 a 38 años para recorrer 10.000 Km.
- Recorrido completo tarde 500 años

Circulación oceánica y clima

- Los océanos, al igual que la atmósfera, transportan energía calórica del ecuador a los polos
- El océano transporta más energía calórica en latitudes bajas y menos en medias y altas
- El océano es la reserva global de energía calórica (puede calentar o enfriar la atmósfera en periodos de meses, estaciones o años)
- El océano modera el clima en escalas de tiempo largas (mil años en adelante)

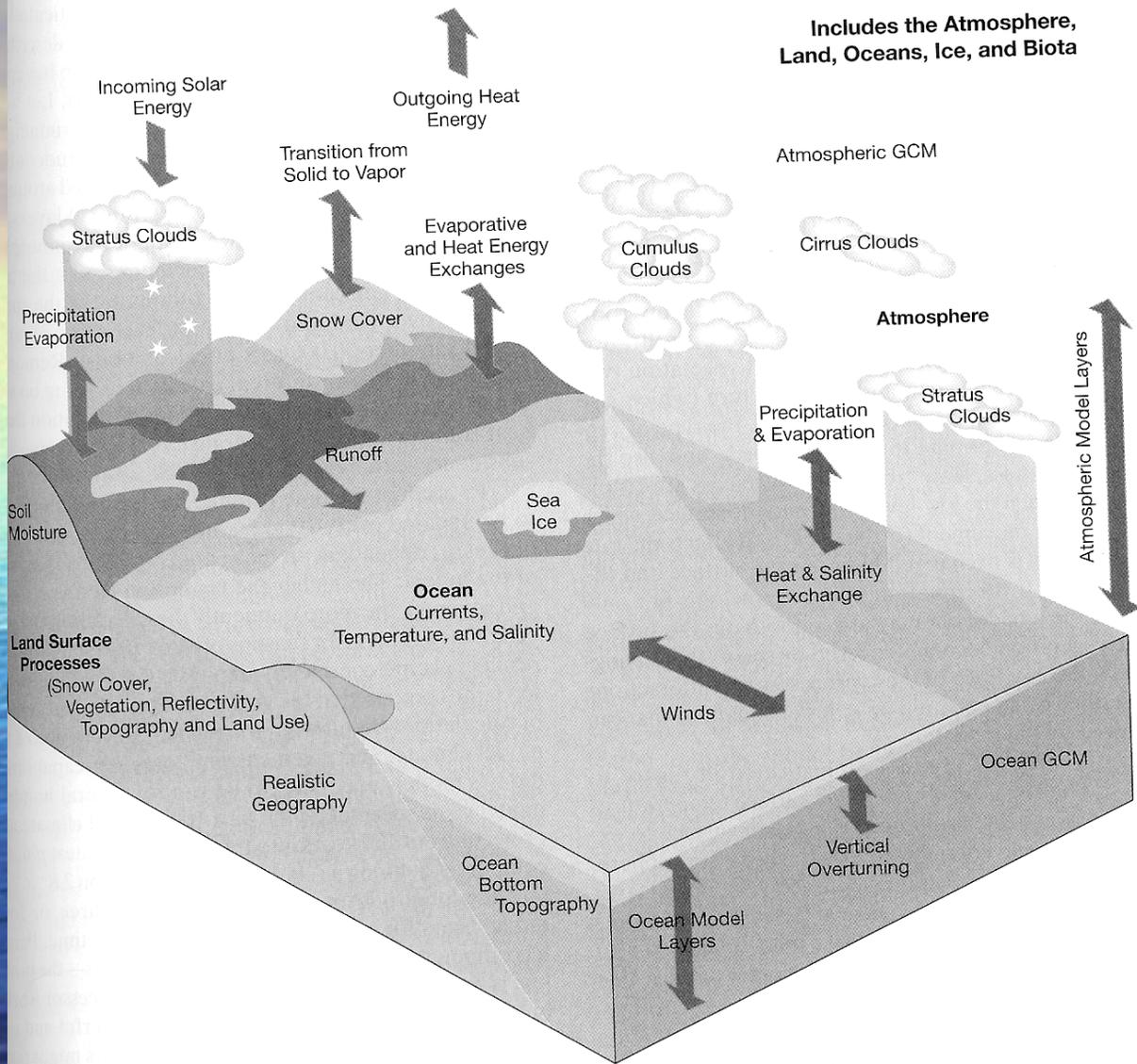
Modelos del sistema atmósfera-océano

El sistema climático es inherentemente complejo. Son muchas las variables que interactúan en rango amplio de escalas de espacio y tiempo a través de procesos interconectados de retroacción positiva y negativa. Por tanto, tan sólo la complejidad de los modelos matemáticos de los procesos físicos los convierte en la única aproximación fiable para proyectar el cambio climático.

Modelos de Circulación General (GCM) o tridimensionales

- **Incluyen** simultáneamente los modelos de atmósferas, océanos, suelos, vegetación y hielo marino
- **Aplicaciones:** estudiar cómo funciona el sistema climático, predecir el tiempo, recrear climas del pasado y asesorar sobre el potencial futuro cambio climático

Modeling the Climate System



Includes the Atmosphere,
Land, Oceans, Ice, and Biota

Procesos que
incluyen los
GCMs

FIGURE 6-3
Some of the processes included in Global Climate Models. (From the National Assessment Synthesis Team, *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*, U.S. Global Change Research Program.)
(www.usgcrp.gov)

Debilidad de los GCMs

Resolución espacio-temporal: No pueden resolver procesos en escalas espaciales inferiores a su cuadrícula de trabajo (62.500 Km²). Muchos de estos procesos son importantes para el cambio climático, lo que produce cierta incertidumbre sobre los resultados del modelo. La forma de parametrizar estos procesos de escala inferior a su cuadrícula de los diferentes modelos, es la causa principal de la dispersión de las proyecciones del cambio climático en los diferentes GCMs

Efectividad de los GCMs

Simulación del registro del clima global observado: Generan proyecciones válidas del cambio climático a escala subcontinental y en escalas de tiempo que van de estaciones (meses) a décadas.

El ciclo del carbono

*"El reciclado de los elementos químicos entre los distintos componentes del sistema terrestre es fundamental para que la Tierra continúe funcionando como un **planeta vivo**"*

Principal elemento en el Sistema Terrestre: **EL CARBONO**

- Constituyente fundamental de todos los seres vivos
- Gas de efecto invernadero muy relevante presente en la atmósfera
- Los compuestos de carbono regulan la acidez (pH) de los océanos
- Principal constituyente de las rocas sedimentarias de nuestro planeta, secuestrando así el CO₂ atmosférico

El ciclo global del carbono

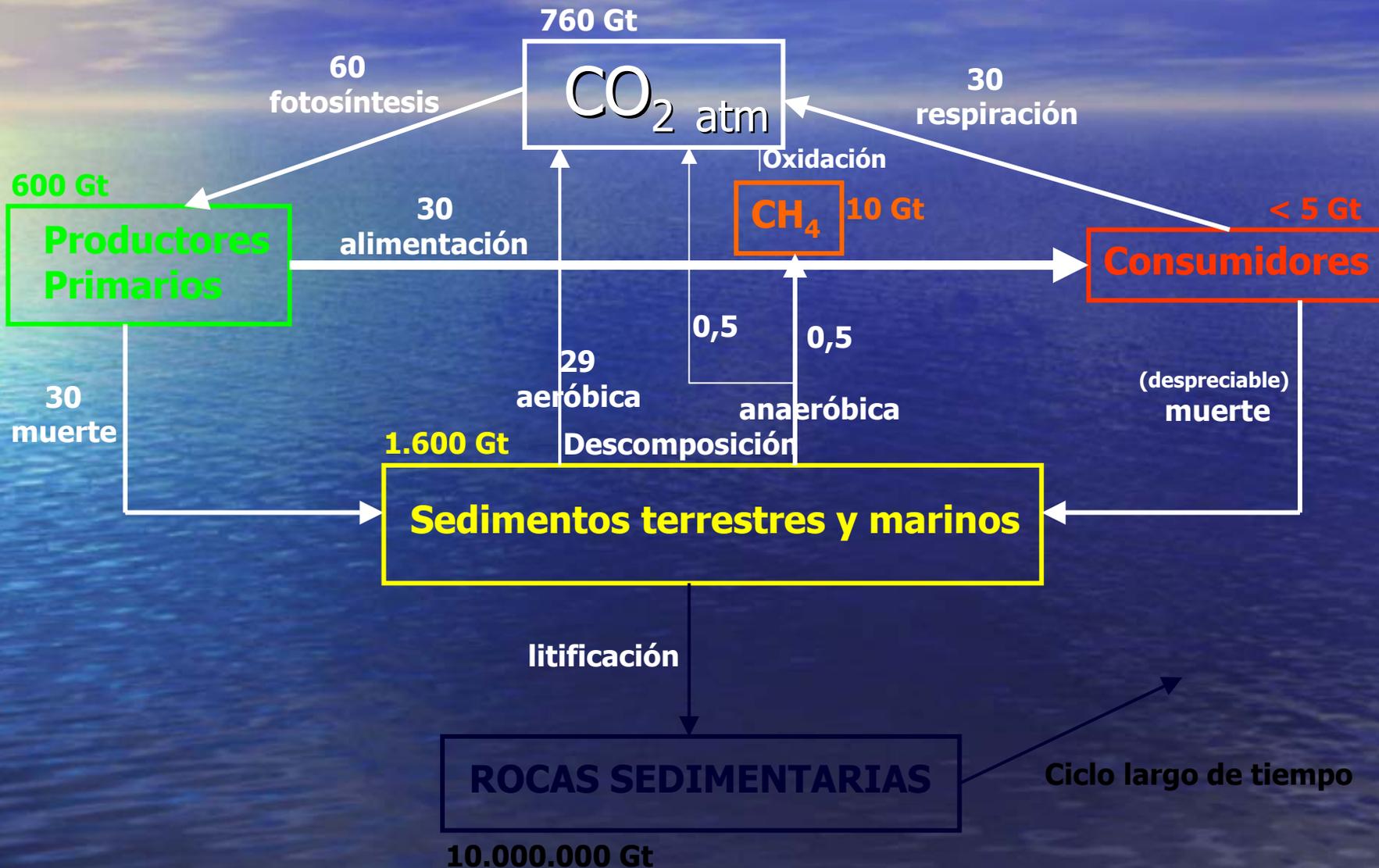
- **Ciclos del carbono orgánico**

- Escalas cortas de tiempo (días a un siglo)
 - Fotosíntesis, respiración, descomposición terrestre
 - Enterramiento en sedimentos terrestres
 - Fotosíntesis, respiración, descomposición marinos
 - Enterramiento en sedimentos marinos
- Escalas largas de tiempo (millones de años)
 - Litificación de los sedimentos
 - Formación de combustibles fósiles

- **Ciclos del carbono inorgánico**

- Escalas cortas de tiempo
 - Intercambio de CO_2 atmosférico y oceánico
 - Lluvia ácida: CO_2 atmosférico se disuelve en agua de lluvia que se acidifica y al caer sobre rocas de carbonatos y silicatos se convierte en ión bicarbonato que los ríos llevarán al mar
 - Organismos del plancton toman el ión bicarbonato para formar sus caparazones y esqueletos. Al morir irán a parar a los sedimentos marinos
- Escalas largas de tiempo
 - Ciclo geoquímico carbonato-silicato: mecanismo de retroacción negativo (mantiene el sistema estable ante perturbaciones a grandes escalas de tiempo) entre factores climáticos y velocidad de erosión química de rocas de silicatos (consumo de CO_2)

Ciclos del carbono orgánico a escalas cortas de tiempo



Ciclos del carbono orgánico a escalas largas de tiempo

- Procesos que están cerca del equilibrio
- Procesos geológicos son los grandes controladores de la $[CO_2]$ a grandes escalas de tiempo
- Los reservorios son de gran tamaño y los flujos de entrada y salida pequeños

Ciclos del carbono orgánico a escalas largas de tiempo

1.600 Gt

Sedimentos terrestres y marinos

Enterramiento
y
litificación

Rocas sedimentarias

(200 X 10⁶ años de residencia)

10.000.000 Gt

**Combustibles
fósiles**

Los humanos aceleramos
este proceso un factor de
10⁶ veces/unidad tiempo:



- Proceso responsable del mantenimiento de la [O₂] en la atmósfera:



Secuestro
por enterramiento

Atmósfera:

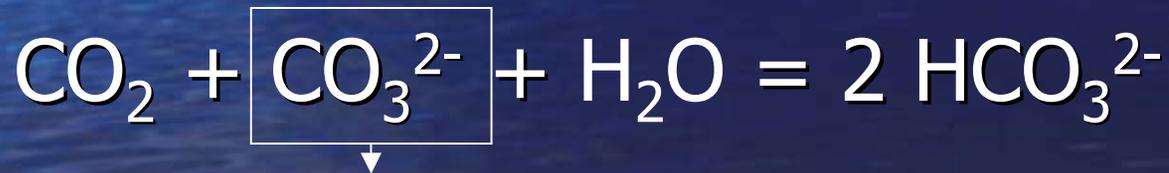
(Repone el oxígeno atmosférico
consumido en oxidación de
compuestos reducidos
procedentes de gases volcánicos
y rocas de superficie)

Ciclos del carbono inorgánico a escalas cortas de tiempo

- **Intercambio de CO_2** atmosférico y oceánico
- **Lluvia ácida:** CO_2 atmosférico se disuelve en agua de lluvia que se acidifica (ácido carbónico) y al caer sobre rocas de carbonatos y silicatos se convierte en ión bicarbonato (HCO_3^{2-}) que los ríos llevarán al mar
- Organismos del **plancton** toman ese ión bicarbonato para formar sus caparazones y esqueletos. Al morir irán a parar a los sedimentos marinos

Intercambio entre el CO₂ atmosférico y oceánico

- Antes del aumento antropogénico de la [CO₂], las concentraciones del CO₂ atmosférico y del oceánico estaban equilibradas
- Ahora el **océano** ya no es fuente de CO₂ atmosférico sino sólo **sumidero**:



Íon carbonato es el factor limitante de la capacidad de sumidero del océano

La lluvia ácida

- El dióxido de carbono en contacto con el agua se disuelve dando ácido carbónico



- Este ácido, de acción débil, disuelve las rocas de la superficie terrestre con carbonatos (caliza, CaCO_3) y silicatos (wollastonita, CaSiO_3)
- El resultado son iones calcio (Ca^{2+}) + iones bicarbonato (HCO_3^-) que llevarán los ríos al mar
- En el caso de los silicatos también se genera dióxido de siliceo (SiO_2) que también irá al mar

Deposición de los carbonatos: El papel de la biota marina

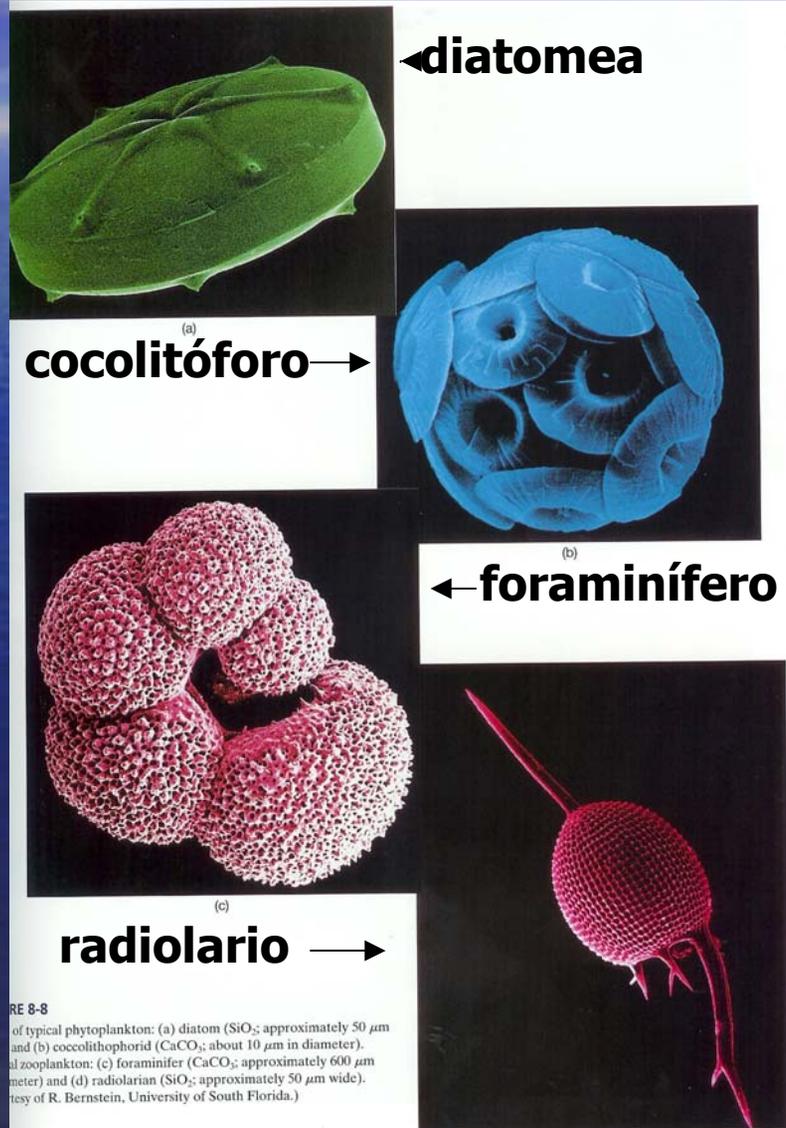
- La salinidad de los océanos se mantiene constante a pesar de la entrada continua de sales procedentes de la erosión química por los ríos
- La razón es que diferentes organismos marinos secuestran estas sales e iones para formar sus caparazones y esqueletos

Organismos marinos

- Diatomeas, radiolarios y esponjas: SiO_2

- Foraminíferos, cocolitóforos, corales y moluscos:

- Ca^{2+} y HCO_3^-



Sedimentación marina del CaCO_3 de origen biótico

- Se deposita en aguas poco profundas y arrecifes coralinos: se formarán rocas calizas marinas
- No se encuentra en cuencas profundas porque lo disuelve el ácido carbónico presente : no hay sedimentos de carbonatos

Resultado neto

El resultado neto de los procesos de:

- Erosión terrestre
- Precipitación de carbonatos en los océanos
- Intercambio de $[\text{CO}_2]$ atmosférico y oceánico

Conversión neta de $[\text{CO}_2]$ atmosférico a carbonato cálcico (CaCO_3)

$$V = 0,03 \text{ Gt/año}$$

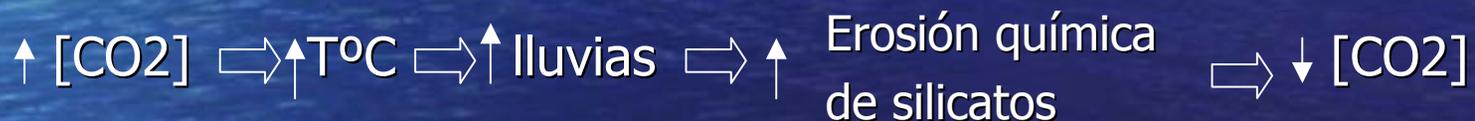
Ciclo biogeoquímico carbonato-silicato

- Los sedimentos de carbonatos y silicatos enterrados, en las zonas de subducción se entierran hacia el manto, y al aumentar la presión y temperatura a la que están sometidos, reaccionan generando rocas metamórficas y liberando **CO₂**



Ciclo biogeoquímico carbonato-silicato

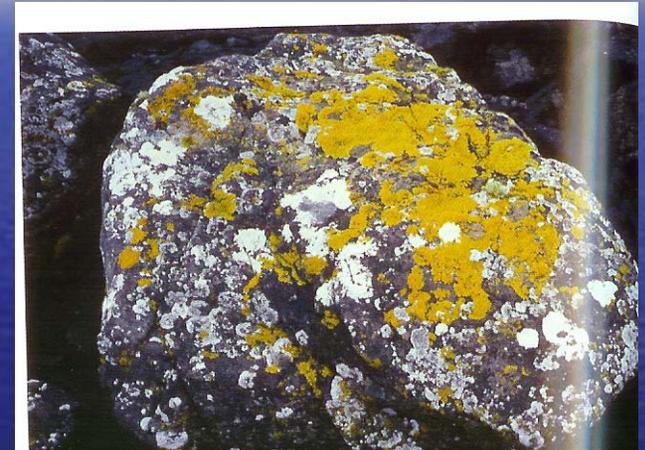
- La regulación del CO_2 atmosférico en escalas de tiempo largas (millones de años) es la consecuencia de un ciclo de retroacción negativo entre los factores climáticos y las velocidades a las que se da la erosión química de las rocas de silicatos (parte del ciclo del carbono inorgánico a largo plazo):



ESTABILIZA EL CLIMA

Aumento de la erosión química por acción de la biota

- La descomposición microbiana y la respiración de las raíces aumenta la $[CO_2]$ del suelo que es de 10 a 100 veces mayor que la atmosférica
- La descomposición microbiana libera ácidos orgánicos que disuelven los minerales
- Las raíces estabilizan los suelos y reducen la erosión mecánica, por lo que hay más tiempo para la disolución de minerales (erosión química)
- Las raíces penetran por las fracturas de las rocas y favorecen así la penetración de agua y ácidos



La Biota:

Características de la vida

Características de la biota que le permiten jugar un papel importante en el sistema terrestre interaccionando con los procesos físicos:

- Su tendencia al crecimiento exponencial
- Su requerimiento de energía: metabolismo
- Su tendencia a contaminar: productos metabólicos
- Su versatilidad de interacción entre ellos y con el ambiente

Los organismos según sus formas de obtención y metabolización de la energía

- Desde el punto de vista del sistema terrestre interesa clasificar los organismos por su forma de obtención y metabolización de la energía:
 - **Autótrofos:** Toman la energía del sol (fotosintetizadores) o de compuestos químicos inorgánicos (quimiosintetizadores). Su fuente de carbono es inorgánica (CO_2)
 - **Heterótrofos:** Toman la energía y el carbono de compuestos orgánicos producidos por los autótrofos. Pueden utilizar (consumir) oxígeno (aerobios), o no (anaerobios)

Organización de la Biota

- Ecosistemas: Las poblaciones (organismos de una sola especie) viven dentro de comunidades (varias poblaciones compartiendo un espacio geográfico) que interaccionan entre sí y con su entorno físico (ecosistema).
- Los ecosistemas se funden entre sí en sus fronteras, generando zonas de transición llamadas ecotonos.

Flujo de energía en la Biota

- El flujo de energía entre los ecosistemas se da en forma de red trófica:
 - Productores: 100 unidades de carbono
 - Consumidores primarios (herbívoros): Explotan 20 unidades y desperdician 80
 - Consumidores secundarios (carnívoros): Explotan tan sólo 0,2 unidades de las 100 originales
 - Descomponedores

MUY BAJA EFICIENCIA DE EXPLOTACIÓN

Organización interna de los ecosistemas

- Redes tróficas
- Relaciones interespecie:
 - Simbiosis: corales y dinoflagelados
 - Mutualismo: flores e insectos
 - Competición

Los ecosistemas ante las perturbaciones y estabilidad

- Tras una perturbación, un ecosistema responde con una sucesión predecible de organismos, empezando por oportunistas de rápido crecimiento, seguido de los que crecen algo más despacio y finalmente aparecerán especies más competitivas
- La diversidad de la vida sobre la Tierra no está sólo en función del número de especies, sino también del grado en el que las poblaciones de dichas especies se distribuyen no uniformemente (heterogéneas)
- La estabilidad ambiental parece desembocar en una alta biodiversidad algunos casos, no obstante, pequeñas perturbaciones pueden aumentar la diversidad en otros.

Cambios globales en escalas de tiempo cortas (actuales)

- **Calentamiento global:** El aumento de los gases de efecto invernadero está aumentando la temperatura media del planeta
- La acumulación estratosférica de compuesto clorados está disminuyendo el espesor de la **capa de ozono**
- La deforestación de los trópicos está causando una gran disminución de la **biodiversidad**



El calentamiento global

El ciclo global del carbono: reservorios y flujos

El flujo de liberación de CO₂ antropogénico (6 Gt/año) es mucho menor que el de liberación de CO₂ procedente de la respiración y decaimiento (acción de la biota) (62,5 Gt/año), pero mucho mayor que el del CO₂ volcánico (0,06 Gt/año), por lo que el CO₂ antropogénico supone una perturbación significativa en el ciclo global del carbono.

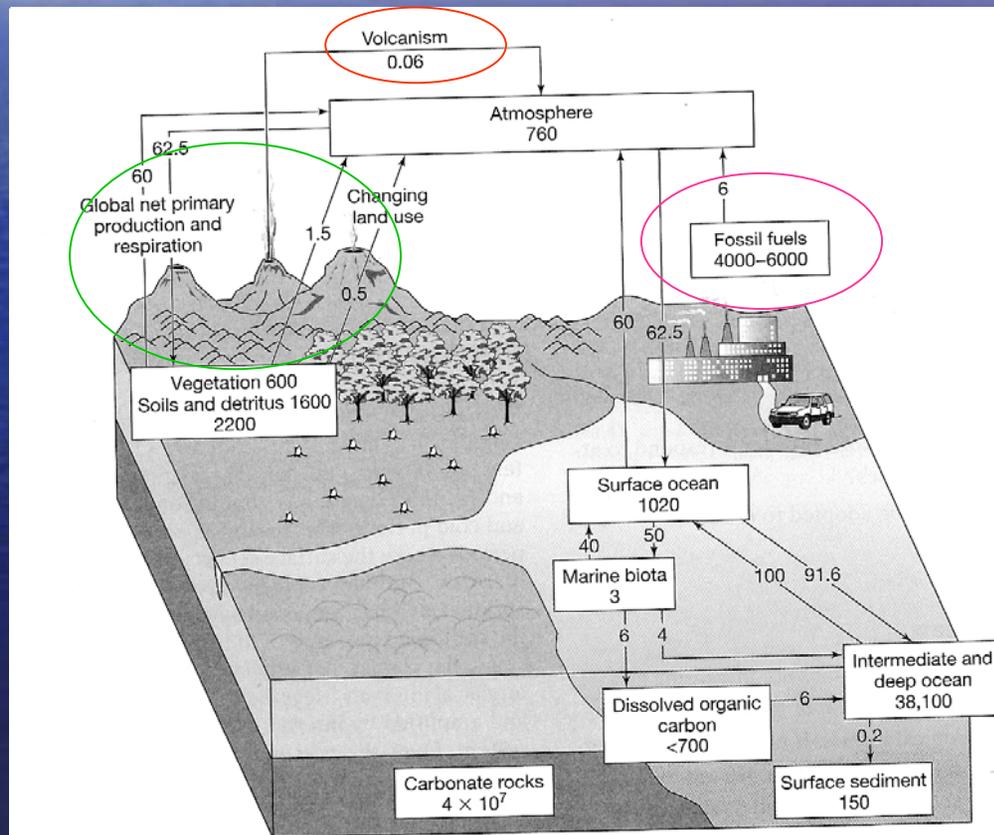


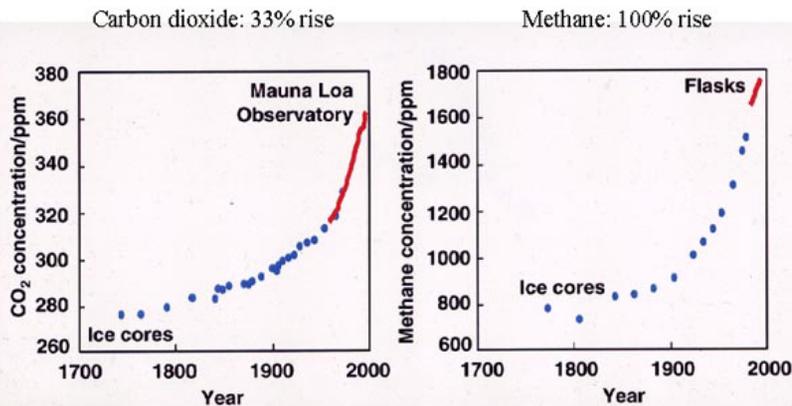
FIGURE 16-1

The major reservoirs and fluxes in the global carbon cycle. Units are Gton (C) for reservoir sizes and Gton(C)/yr for the fluxes. (After *Climate Change, 1994: Radiative Forcing of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 21.)

Efectos globales de la quema de combustibles fósiles: Efecto invernadero

El aumento de la concentración del CO₂ atmosférico que se está observando hoy en día se debe principalmente a la **quema de combustibles fósiles** y en menor medida a la deforestación

Figure 5: Concentration of Carbon Dioxide and Methane Have Risen Greatly Since Pre-Industrial Times



The MetOffice. Hadley Center for Climate Prediction and Research.

Global, Regional and National CO₂ emissions

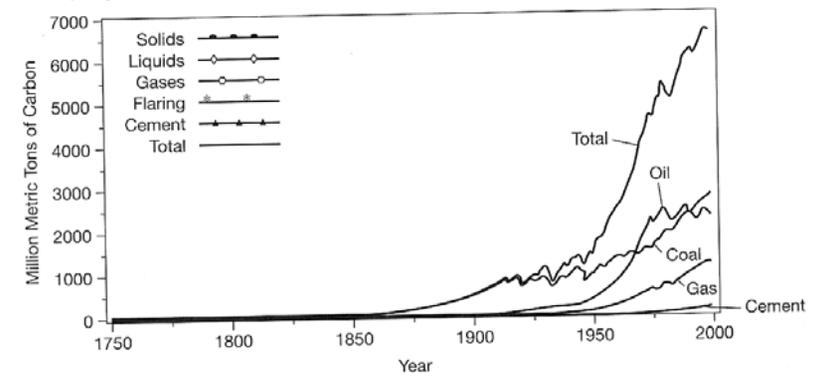
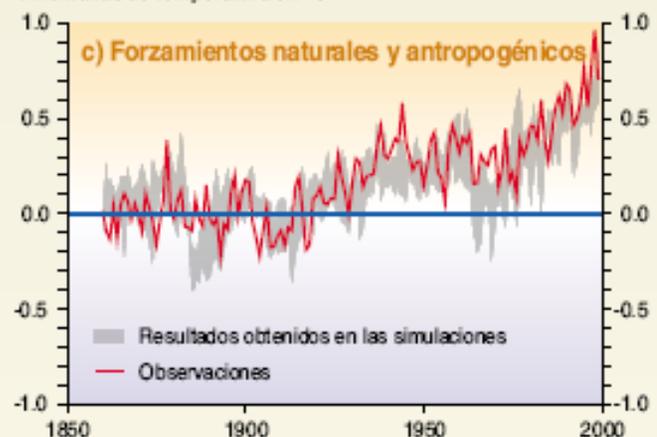


FIGURE 16-2

Coal, oil, and natural gas consumption rates, 1750-present. (From the Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Labs, available online at http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/em_cont.htm)

Anomalías de temperatura en °C



Consumo de petróleo

- Velocidad de quema de petróleo en 1999: 6,1 Gt/año (2,5 Gt/año son absorbidos por los océanos; 0,6 Gt/año se acumulan en bosques y suelos; pero 3 Gt/año se acumulan en la atmósfera)
- La vida media natural de una bolsa de petróleo es de 250 años, actualmente se ha reducido a 90 años y sigue disminuyendo.
- Distribución geográfica de la quema del petróleo:

ZONA GEOGRÁFICA	Gt/año
Extremo oriente (con China* y Japón)	1,970
Norteamérica	1,832
Europa occidental	1,000
Europa oriental (con Rusia)	0,844
Oriente medio	0,288
América Central y del Sur	0,269
África	0,240

* *China es el segundo consumidor mundial de carbón (después de EE.UU.). Dada su población actual de 1.200 millones y sus grandes reservas de carbono, se predice que se convertirá en las próximas décadas en el mayor emisor de CO₂ del mundo.*

Mecanismos de eliminación del CO₂ atmosférico de origen antropogénico

EMISIÓN ACTUAL DE CO₂ ANTROPOGÉNICO
7,5 Gt/año

1. FOTOSÍNTESIS: El más rápido, pero sólo será efectivo si reforestamos



2. Fertilización (crecimiento de plantas) con CO₂ permite que se pueda almacenar carbono adicional en bosques y suelos:

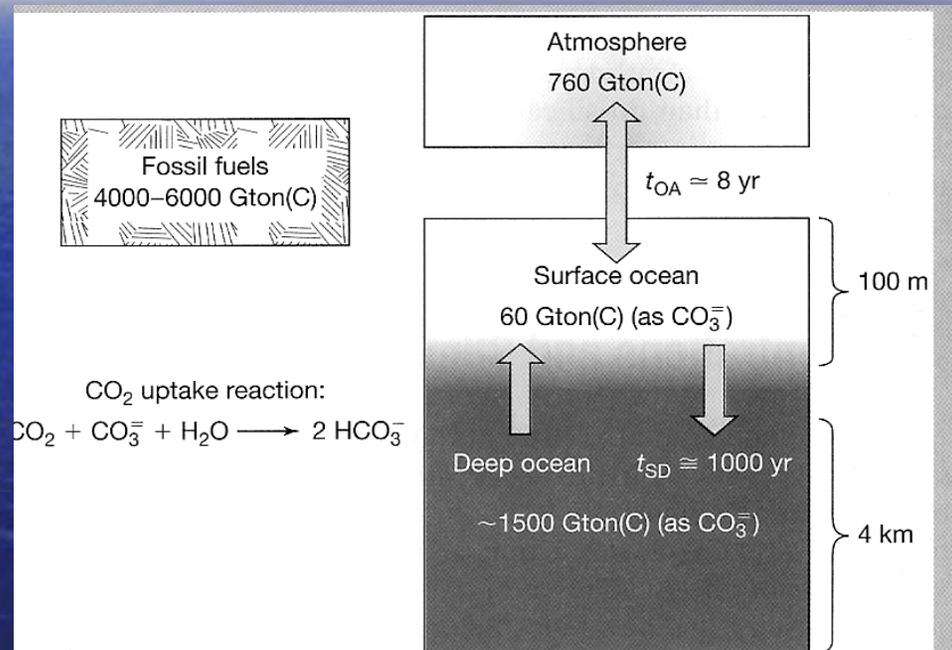
Si $\uparrow [\text{CO}_2]$ \Leftrightarrow \uparrow fotosíntesis \Leftrightarrow \uparrow **Crecimiento Vegetación** \Leftrightarrow \uparrow fotosíntesis \Leftrightarrow $\downarrow [\text{CO}_2]$

Mecanismos de eliminación del CO₂ atmosférico de origen antropogénico

2. Absorción en los océanos

- Flujo Atmósfera ↔ Océanos = 90 Gt/año
- Tiempo de residencia:
 - Atmósfera y superficie oceánica = 8 años
 - Fondo oceánico = 1.000 años
- Capacidad del océano de secuestro de CO₂ depende de la concentración de ión carbonato ([CO₃²⁻])
- Sólo se puede absorber de esta manera entre el 30 y el 40 % del CO₂ atmosférico disponible

Según aumenta la [CO₂]_{atm}, mayor será la vida media de este en la atmósfera (actualmente es de 60 años), ya que cada vez tendrá que ir más profundo en el océano para ser capturado por las reacciones químicas y los tiempos en el océano profundo son más largos



BOX FIGURE 16-1

Two-box ocean model illustrating the capacity of the ocean for CO₂ uptake. The numbers in the ocean boxes represent the amount of carbonate ion that can react with CO₂.

Mecanismos de eliminación del CO₂ atmosférico de origen antropogénico

3. Disolución de sedimentos y rocas de carbonatos

Disolución sedimentos marinos:

Escala de tiempo: de 100 a N x 1000 años



Disolución rocas de silicatos de la superficie terrestre:

Escala de tiempo: de 600 mil a 1 millón de años

$$T = \frac{38.000 \text{ Gt de C en ciclo atm/ocea.}}{0,06 \text{ Gt/año}} = 633.333 \text{ años}$$

Predicciones futuras según los modelos informáticos

1. En 50 a 100 años habremos doblado la $[CO_2]_{atm}$

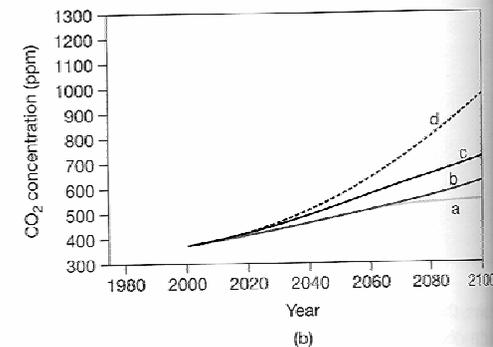
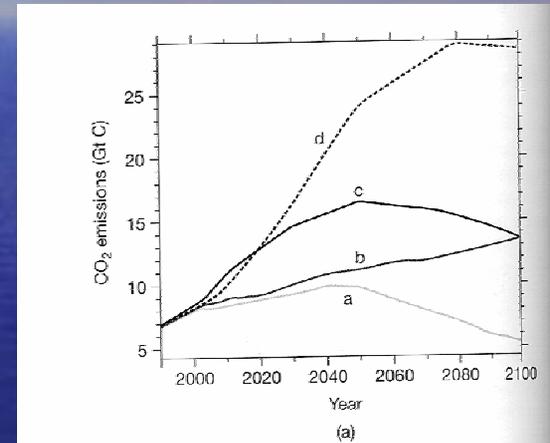
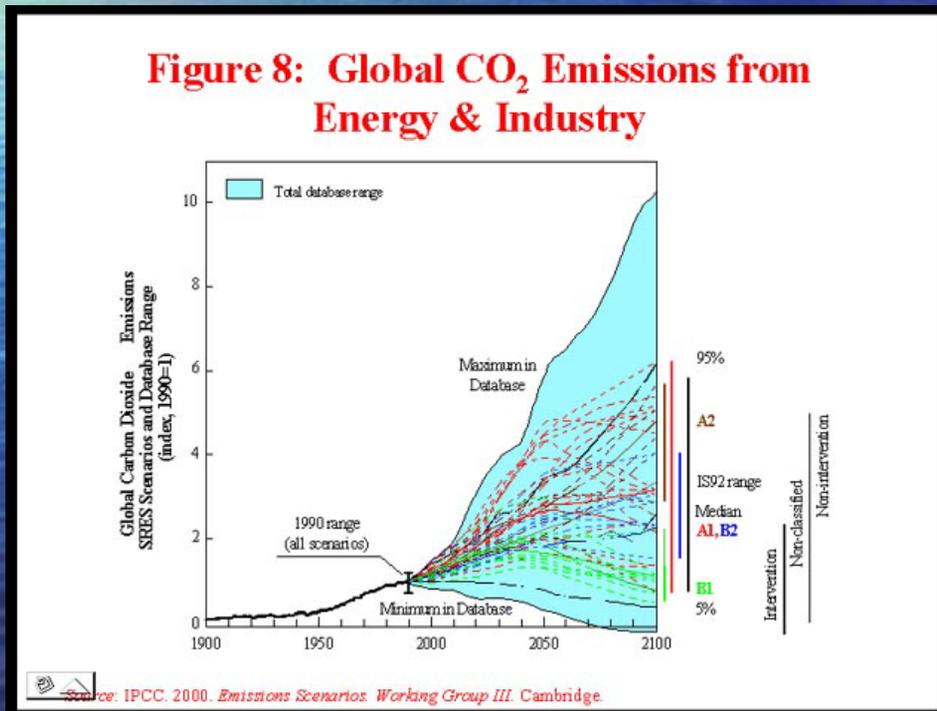
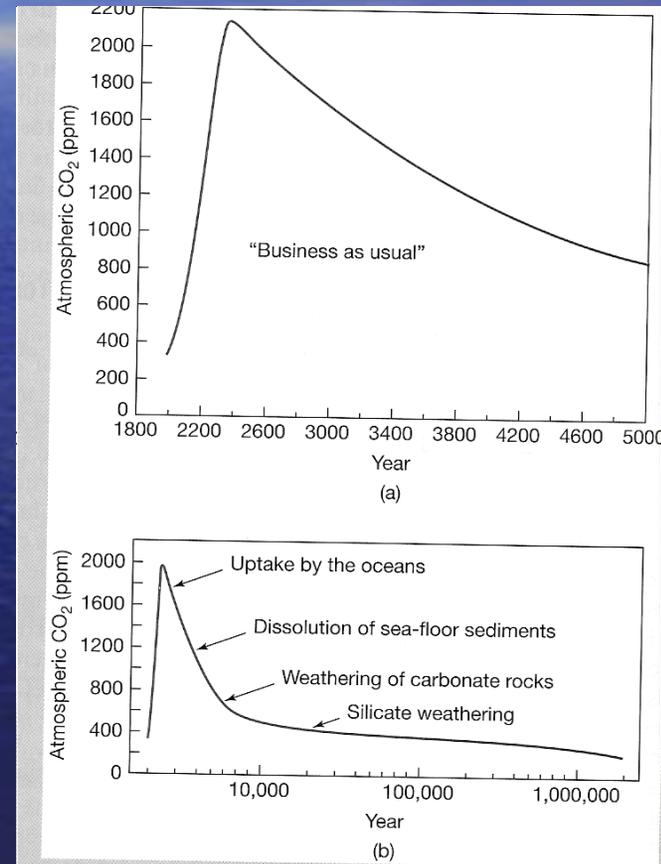


FIGURE 16-3

Estimated CO₂ emissions (panel a) and atmospheric CO₂ concentrations (panel b) for the next century for different assumptions about population and economic growth. (From IPCC Report: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Available online at <http://www.ipcc.ch/>)

Predicciones futuras según los modelos informáticos

2. En varios siglos la $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ será de 2.000 ppm (hoy 371 ppm)

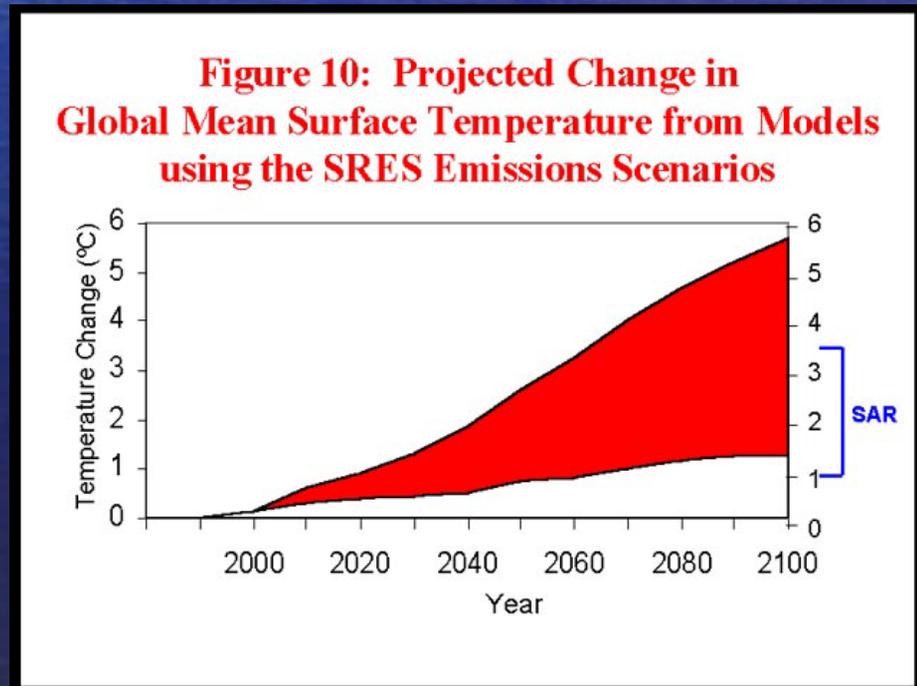


BOX FIGURE 16-2

Long-term projections for atmospheric CO₂ for (a) the next 3,000 years and (b) the next several million years. The total amount of fossil fuel consumed is equivalent to 4200 Gton (C). (After Walker and Kasting, *Global and Planetary Change* 97:151, 1992).

Predicciones futuras según los modelos informáticos

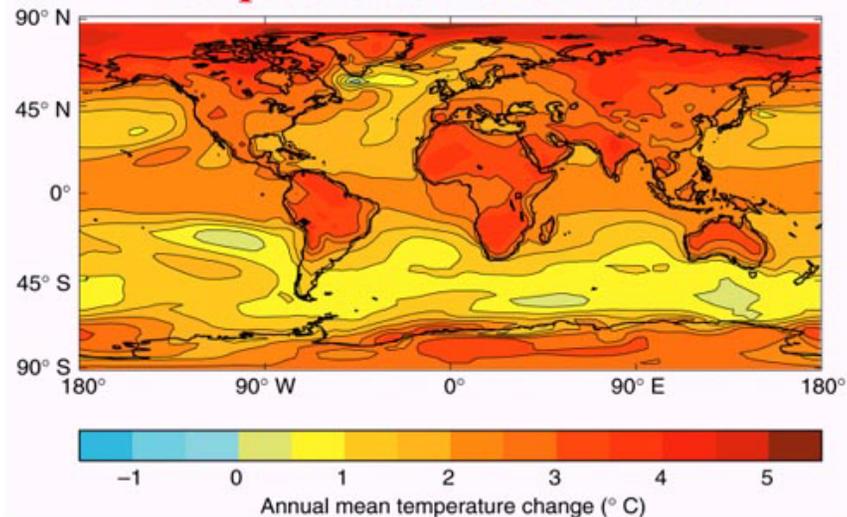
3. El aumento de la emisión de gases de efecto invernadero aumentará la temperatura media del planeta en varios $^{\circ}\text{C}$ durante este siglo y entre 10 y 15 $^{\circ}\text{C}$ a largo plazo



Predicciones futuras según los modelos informáticos

4. La distribución planetaria del calentamiento no será homogénea, siendo el incremento mayor cuanto mayores sean las latitudes (hacia los polos)

Figure 11: Projected Changes in Annual Temperatures for the 2050s

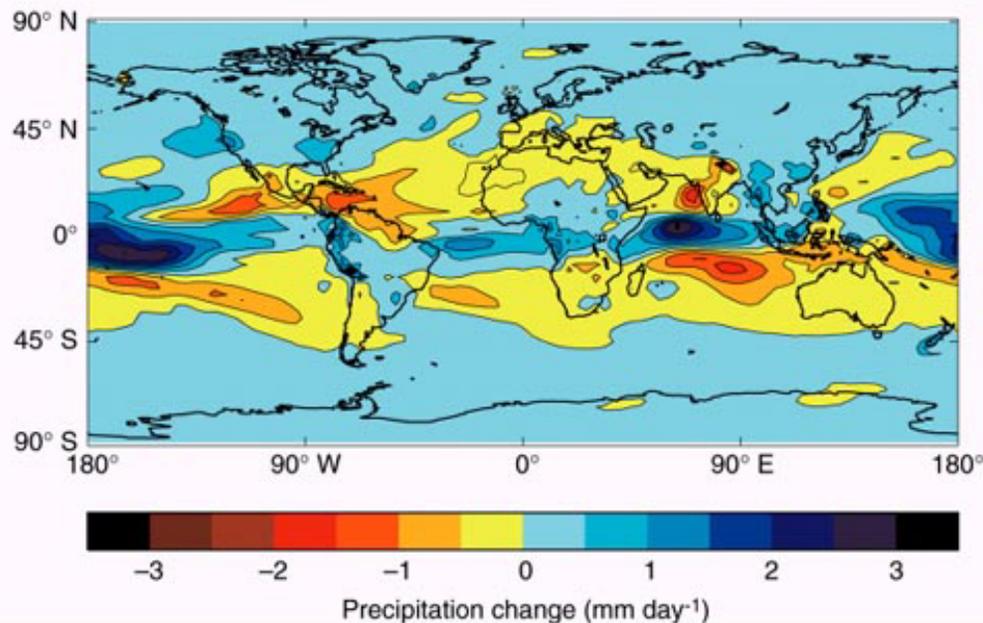


The projected change in annual temperatures for the 2050s compared with the present day, when the climate model is driven with an increase in greenhouse gas concentrations equivalent to about a 1% increase per year in CO₂.

The Met Office. Hadley Centre for Climate Prediction and Research.

Consecuencias predecibles del calentamiento global

Figure 12: Projected Changes in Annual Precipitation for the 2050s



The projected change in annual precipitation for the 2050s compared with the present day, when the climate model is driven with an increase in greenhouse gas concentrations equivalent to about a 1% increase per year in CO₂.

The Met Office - Hadley Centre for Climate Prediction and Research.

Sequías en los interiores continentales. Cambios en los patrones de precipitaciones

Consecuencias predecibles del calentamiento global

Figure 17: Vector (insect)-borne Diseases

<i>Disease</i>	<i>Vector</i>	<i>Population at risk (millions)</i>	<i>Present distribution</i>	<i>Likelihood of altered distribution with warming</i>
Malaria	mosquito	2,100	(sub)tropics	✓✓
Schistosomiasis	water snail	600	(sub)tropics	✓✓
Filariasis	mosquito	900	(sub)tropics	✓
Onchocerciasis (river blindness)	black fly	90	Africa/Latin America	✓
African trypanosomiasis (sleeping sickness)	tsetse fly	50	tropical Africa	✓
Dengue	mosquito	unavailable	tropics	✓✓
Yellow fever	mosquito	unavailable	tropical South America & Africa	✓

Likely ✓
Very likely ✓✓

Source: Modified WHO, as cited in Stone (1995).

Mayor expansión de plagas agrícolas de insectos y enfermedades tropicales

Consecuencias predecibles del calentamiento global

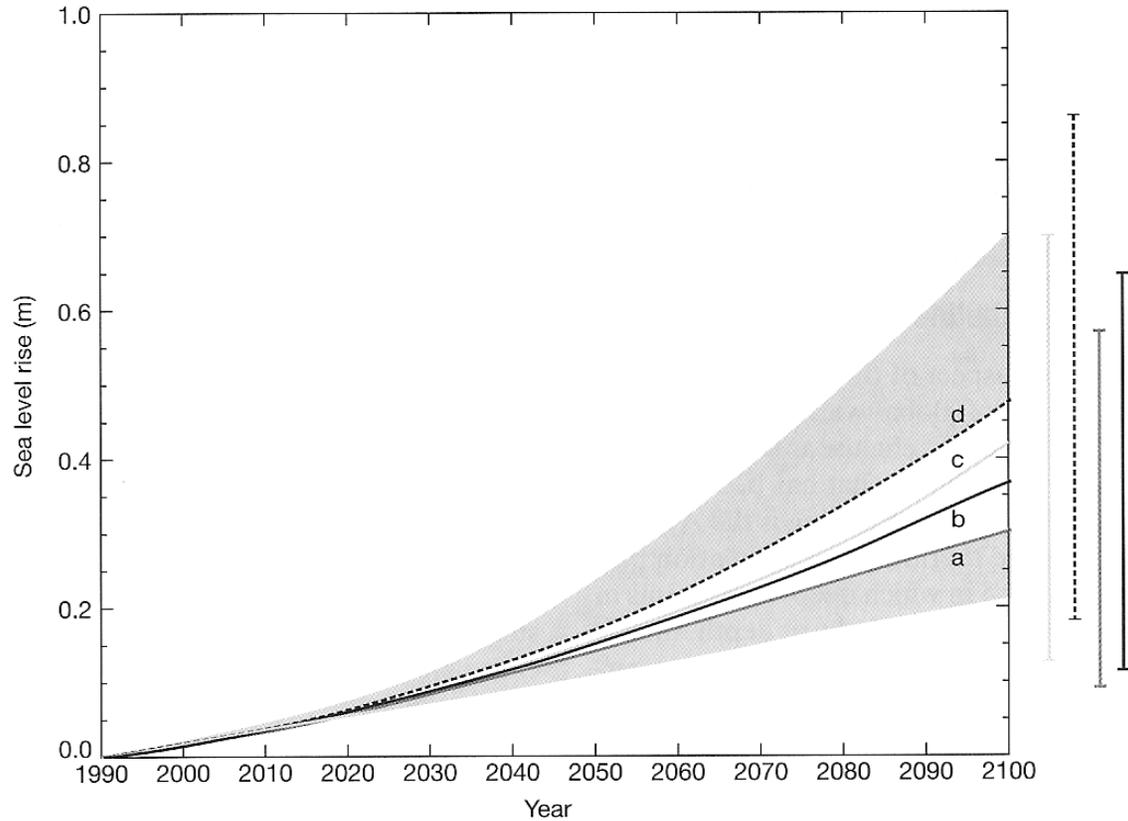
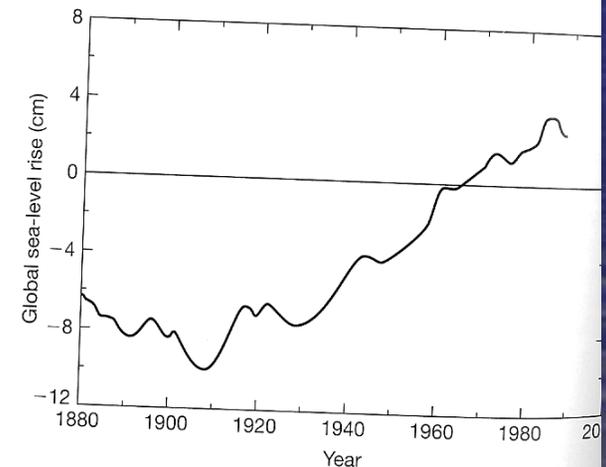
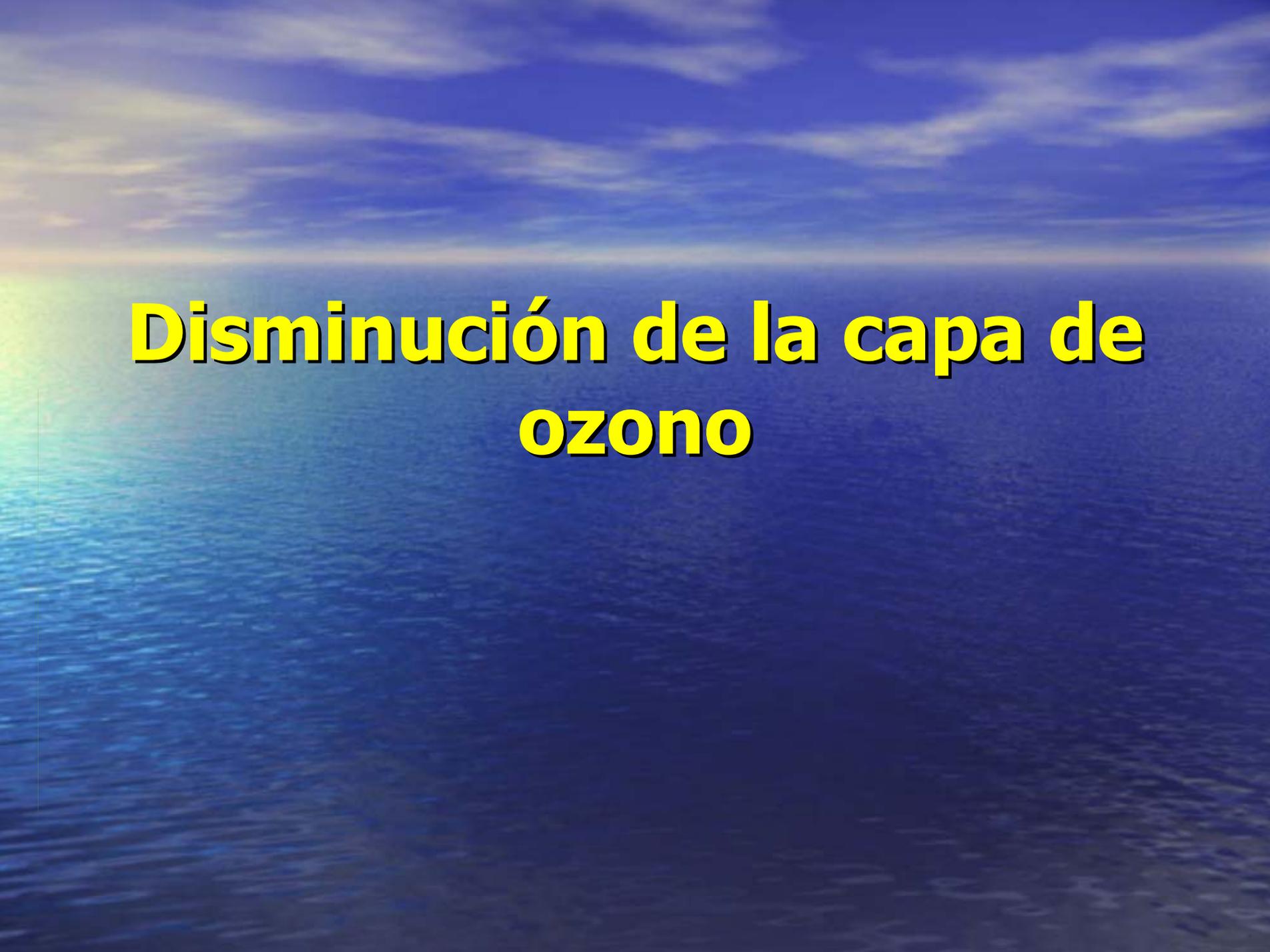


FIGURE 16-9

Predicted changes in sea level over the next century for the four different cases shown in Figures 16-3 and 16-6. (From *IPCC Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Available online at <http://www.ipcc.ch/>)

Aumento
del nivel
del mar





Disminución de la capa de ozono

Radiación ultravioleta y efectos biológicos

Rango (nm)	nombre	Efecto biológico
320-400	UVA	No dañino (moreno)
290-320	UVB	Dañino: quemaduras de Sol. Cáncer de piel, etc.
200-290	UVC	Muy dañino pero es absorbido por el ozono estratosférico casi en su totalidad

Flujo de radiación UV incidente

El flujo de radiación solar UV que alcanza la superficie de la Tierra depende de:

1. Ángulo de incidencia de la radiación:

Mayor radiación en el ecuador y disminuye con el aumento de latitud

2. Profundidad de la columna vertical de ozono:

- 8×10^{18} moléculas de O_3/cm^2 (o 300 unidades Dobson) es la concentración normal en latitudes medias.

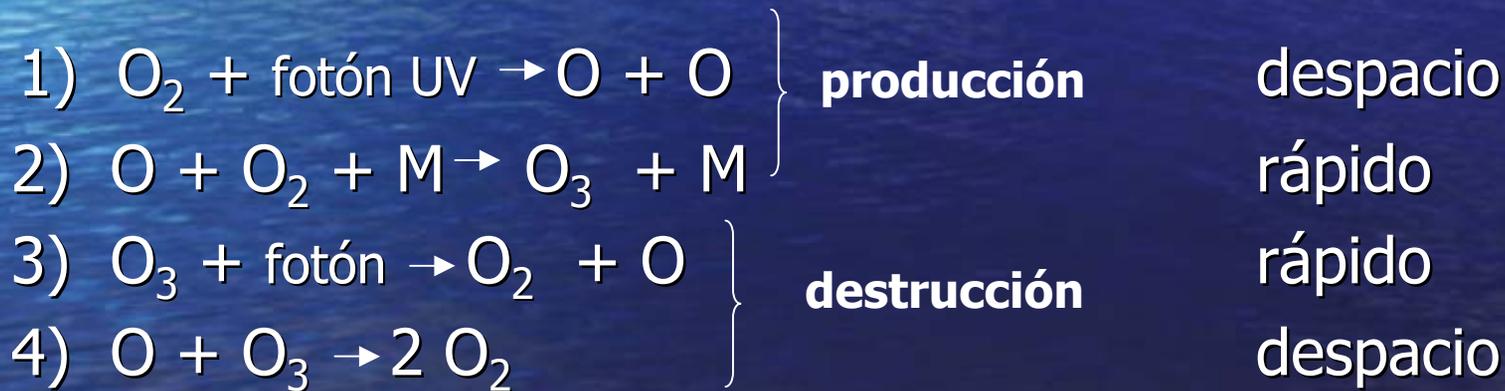
- La columna es mayor según nos acercamos a latitudes mayores.

Mecanismo Chapman

Producción y destrucción del ozono

Reacción

Velocidad



Ciclos catalíticos

El Mecanismo Chapman corresponde a una situación ideal e introducido en un modelo informático se predice un 30 % más de ozono estratosférico del que hay en realidad. Esto se debe a que hay otros procesos destruyendo el ozono de los que son responsables elementos traza tales como el nitrógeno (natural) y el cloro (antropogénico)

- Ciclo catalítico del nitrógeno
- Ciclo catalítico del cloro (freones)

Ciclo catalítico del nitrógeno

Óxido nítrico (NO) destruye el ozono:



Proceso rápido

Ciclo catalítico del cloro



Proceso rápido

Origen del cloro estratosférico

- Cloruro de metilo (CH_3Cl)
 - Generado por el plancton marino
 - Sólo 600 ppm alcanzan la estratosfera ([Cl] total en la estratosfera es de 3.300 ppm)
- Cloruro de hidrógeno (HCl)
 - Liberado en erupciones volcánicas (sólo una cantidad casi despreciable alcanza la estratosfera) y evaporación de spray marino (no alcanza la estratosfera)
- Freones 11 y 12 (CCl_3F y CCl_2F_2)
 - Origen antropogénico: sprays, limpiadores de chips semiconductores, AC de coches, refrigerantes, etc. Varios ya han sido prohibidos y realmente se a eliminado su uso en la década de los 90s.
- CCl_4
 - Origen: limpiezas en seco (Protocolo de Montreal)
- CH_3CCl_3
 - Origen: Disolventes industriales (Protocolo de Montreal)

Concentración estratosférica de gases antropogénicos

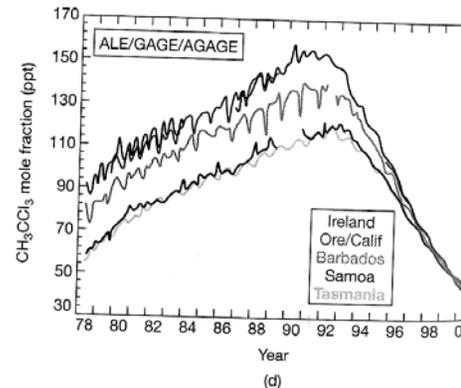
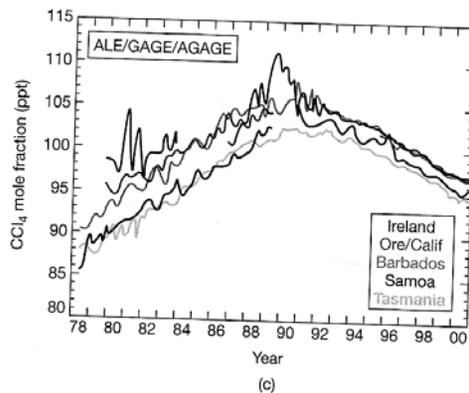
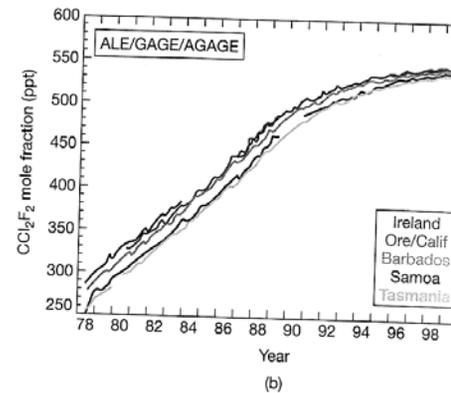
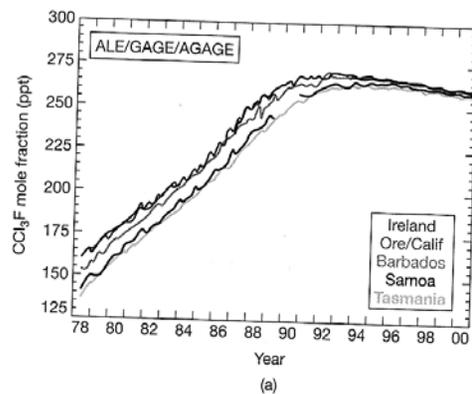


FIGURE 17-8

Atmospheric concentrations of (a) freon-11, (b) freon-12, (c) carbon tetrachloride, and (d) methyl chloroform since 1977. (Data from R.G. Prinn, R.F. Weiss, P.J. Fraser, P.G. Simmonds, F. N. Alyea, and D.M. Cunnold. The ALE/GAGE/AGAGE database, DOE-CDIAC World Data Center (E-mail to: cpd@ornl.gov), Dataset No. DB-1001, 2002.)

El agujero antártico estacional de la capa de ozono

- Agujero de ozono causado por una serie de reacciones químicas complejas en la estratosfera pola
- La estratosfera Ártica se comporta diferente a la Antártica porque el vórtice polar invernal no está tan desarrollado
- El ozono ha disminuido a un ritmo menor en las latitudes medias en ambos hemisferios, pero las razones no se entienden bien

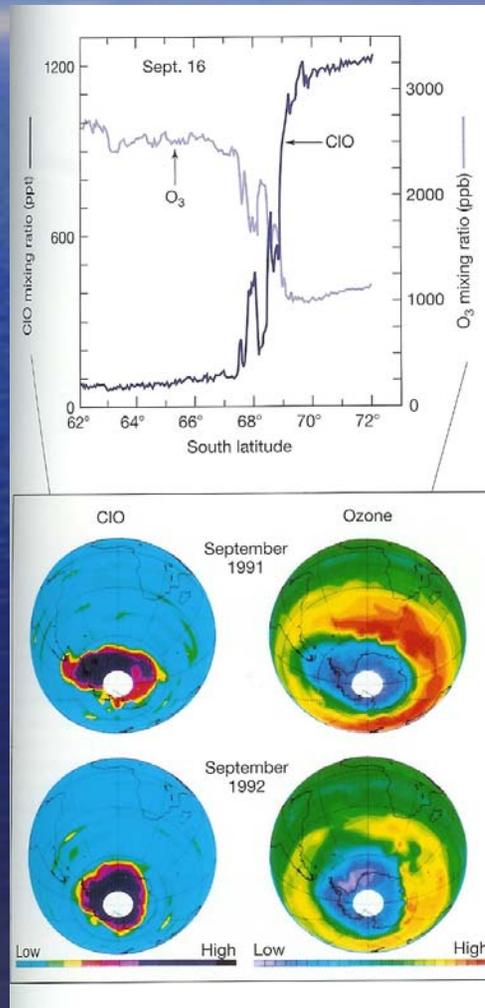


FIGURE 1-6

(Top) Simultaneous measurements of ozone (O₃) and chlorine monoxide (ClO) made from a NASA aircraft as it flew into the Antarctic ozone hole in September 1987. The hole was entered at a latitude of about 68° S. The units ppt and ppb stand for "parts per trillion" and "parts per billion," respectively. (Bottom) Contour plots of ClO and O₃ concentrations obtained from spacecraft measurements. These data also show that ozone is low where ClO is high. (From R. W. Christopherson, *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, 3/e, 1997. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)

Acuerdos internacionales

PROTOCOLO DE MONTREAL 1987

Pone límites estrictos a la cantidad de freones y halones que se pueden liberar a la atmósfera.

Ha sido ratificado por todos los países industrializados del mundo

Acuerdo de Montreal, 1997

Limitaciones mucho más estrictas

Se calcula que para 2060 las concentraciones de cloro estratosférico se reduzca a 2ppb (como en 1970). Para entonces se espera que el agujero de ozono desaparezca

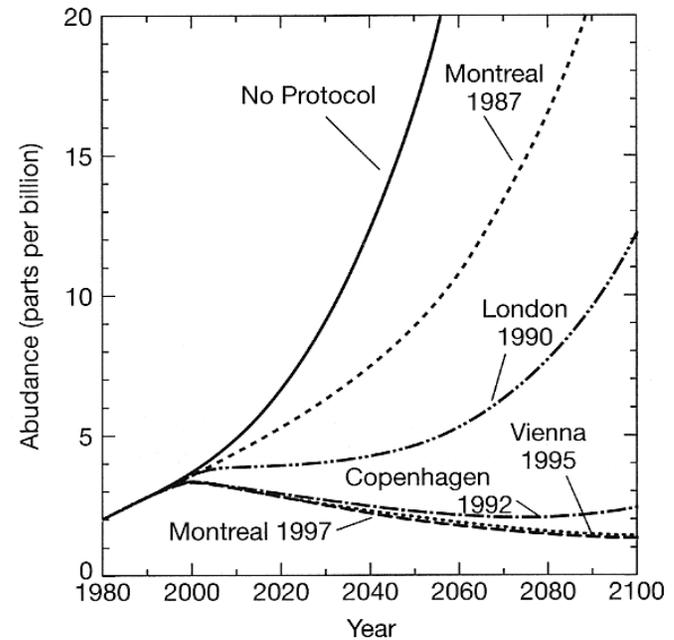
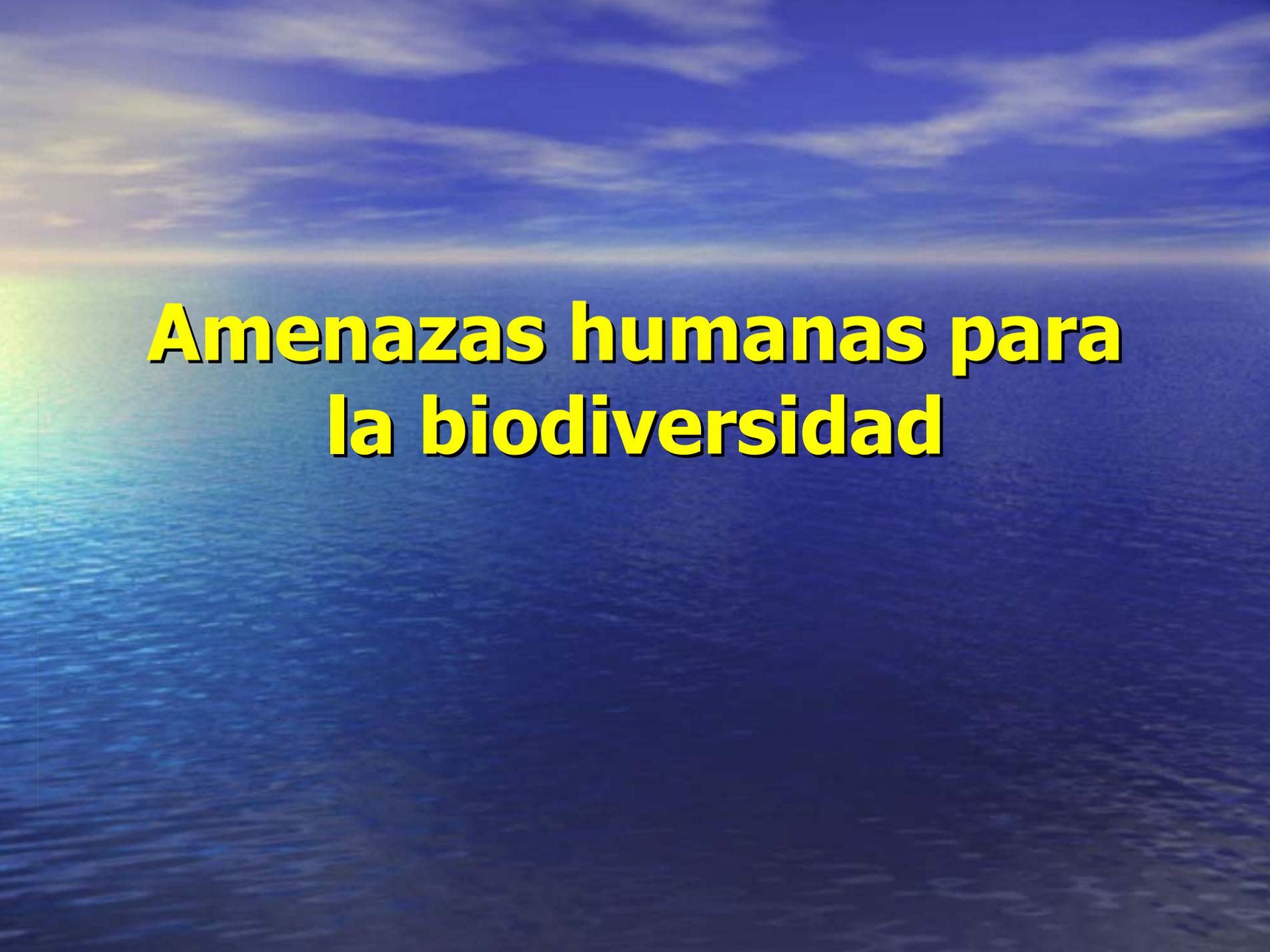


FIGURE 17-14

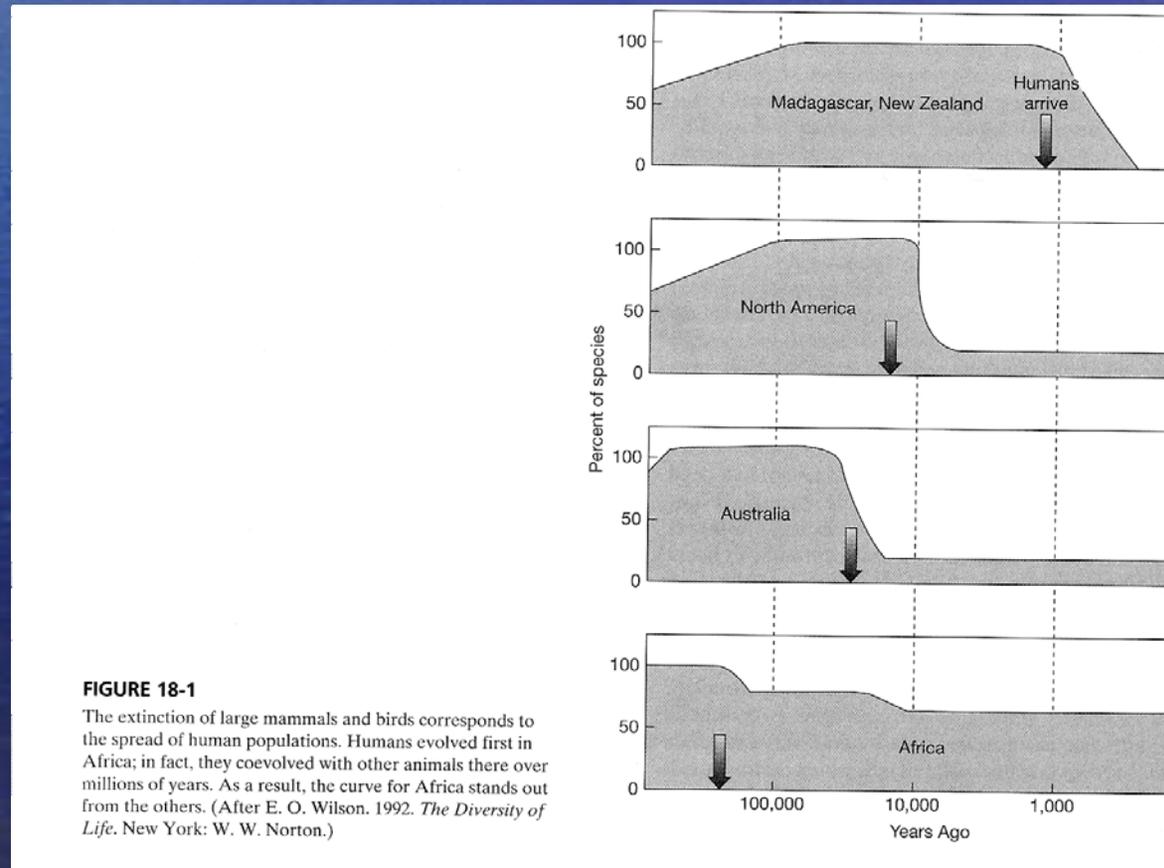
Projected atmospheric chlorine concentrations under the various international agreements. The horizontal dashed line shows the estimated preindustrial level of chlorine. (After Dr. M. McFarland at DuPont.)



Amenazas humanas para la biodiversidad

Pérdida de biodiversidad: “La sexta extinción”

Actualmente estamos viviendo un episodio de extinción masiva de la dimensión de las extinciones periódicas ya vividas en la historia de la biosfera: La sexta extinción



Deforestación de los trópicos y la pérdida de biodiversidad

Los bosques tropicales son los ecosistemas que albergan mayor diversidad del planeta (3/4 partes de todos los seres vivos del planeta; 2/3 de todos los animales y plantas del planeta)

Esta pérdida de diversidad (especies) se está dando más deprisa de lo que estamos pudiendo estudiar y catalogar (nunca las conoceremos)

Impacto de la pérdida de biodiversidad

- Valor de especies:
 - Farmacéutico
 - Recreativo
 - Científico
 - Comercial
- Valor de la diversidad de especies:
 - Productividad y estabilidad de los ecosistemas
 - Estabilidad del sistema terrestre en su conjunto
- Otros impactos:
 - Grandes cambios en el clima local y en el ciclo hidrológico
 - Impacto en el clima a escala global por aumentar la [CO₂] atmosférico

Pérdida de biodiversidad en agricultura

- Aumentar la productividad aumentando la especialización y limitando el número de variedades desarrolladas de forma selectiva.
 - Vulnerabilidad ante nuevas plagas y enfermedades
 - Diversidad es crucial para mantener la salud y supervivencia de una especie a largo plazo
 - Se están haciendo bancos de semillas de especies agrícolas, pero en caso de nuevas plagas o enfermedades, la información genética almacenada en estos bancos puede no ser suficiente para desarrollar variantes resistentes. Entonces hay que ir a la región del mundo donde se originó la especie y buscar por la variante silvestre original que sería resistente a las amenazas.
 - La mayor parte de la comida mundial procede de tan sólo 12 regiones, todas situadas en áreas donde la presión ejercida por poblaciones crecientes o en desarrollo ponen un estrés creciente en el hábitat natural existente.

¿Qué cambios son los que más nos deben preocupar?

- La vida media de los freones no supera los 150 años. Como ya se han dejado prácticamente de emitir, es probable que el agujero de la capa de ozono sea en menos grave de nuestros problemas
- El calentamiento global, si redujéramos la emisión de gases invernadero, todavía aumentaría durante varios siglos porque la vida media del dióxido de carbono es de varios miles de años
- Quizá la más preocupante, por su irreversibilidad y nuestro desconocimiento de la magnitud de las consecuencias a nivel sistema global, es la pérdida de biodiversidad (especies y ecosistemas)