





































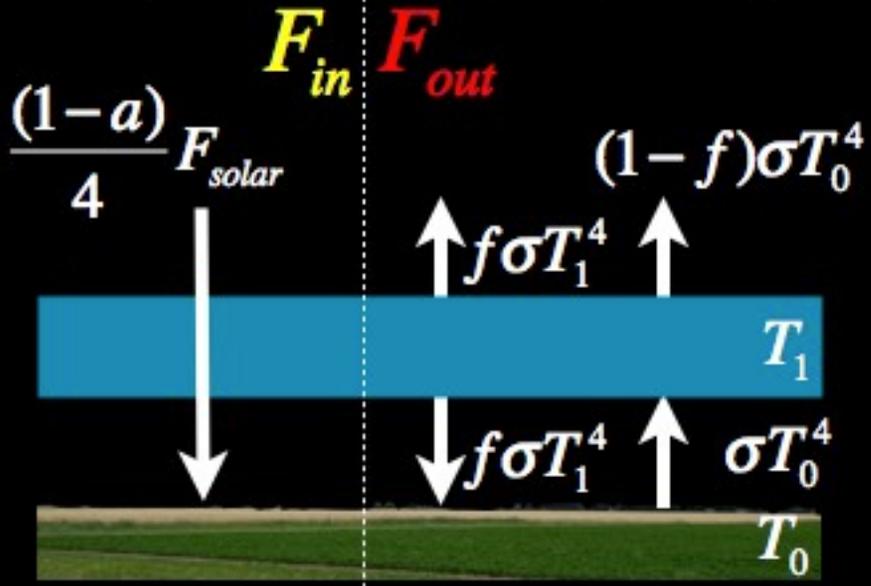






# Balance de energía

Modelo considerando atmósfera



43



# Balance de energía

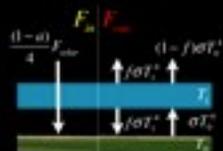
Modelo considerando atmósfera

Para el balance  $F_{in} = F_{out}$

$$\frac{(1-a)}{4} F_{solar} = (1-f)\sigma T_0^4 + f\sigma T_1^4$$

Para la capa atmosférica

$$f\sigma T_0^4 = f\sigma T_1^4 + f\sigma T_1^4$$



44



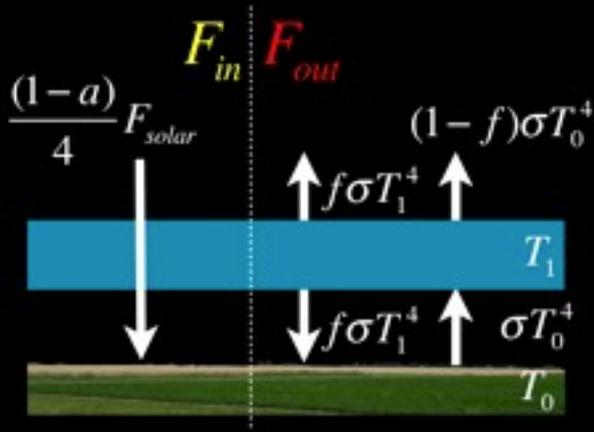




# Balance de energía

## Modelo considerando atmósfera

¿Es apropiado el modelo?



49

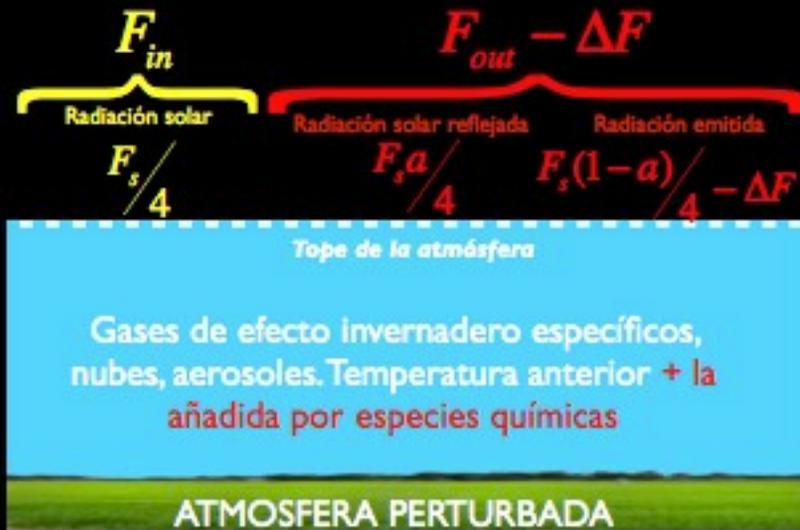
# Atmósfera y gases de efecto invernadero

Concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero aumentar la eficiencia de absorción  $f$  de la atmósfera, y que conllevaría un aumento en la temperatura de la superficie.

50



# Atmósfera y gases de efecto invernadero



53

# Atmósfera y gases de efecto invernadero

El forzamiento radiativo puede ser descrito según el modelo de una capa.

$$\Delta F = \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma T_0^4 - \left(1 - \frac{f + \Delta f}{2}\right) \sigma T_0^4 = \frac{\Delta f}{2} \sigma T_0^4$$

Si la perturbación se mantiene por un tiempo y se alcanza un nuevo equilibrio

$$\frac{(1-a)}{4} F_{solar} = \left(1 - \frac{f + \Delta f}{2}\right) \sigma (T_0 + \Delta T)^4$$

54

# Atmósfera y gases de efecto invernadero

Si la perturbación es suficientemente pequeña

$$(T_0 + \Delta T_0)^4 \approx T_0^4 + 4T_0^3 \Delta T_0$$

Reemplazando

$$\Delta T_0 = \xi \Delta F$$

$$\xi = \frac{1}{4 \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma T_0^3}$$

55

# Atmósfera y gases de efecto invernadero

Si la perturbación es suficientemente pequeña

$$(T_0 + \Delta T_0)^4 \approx T_0^4 + 4T_0^3 \Delta T_0$$

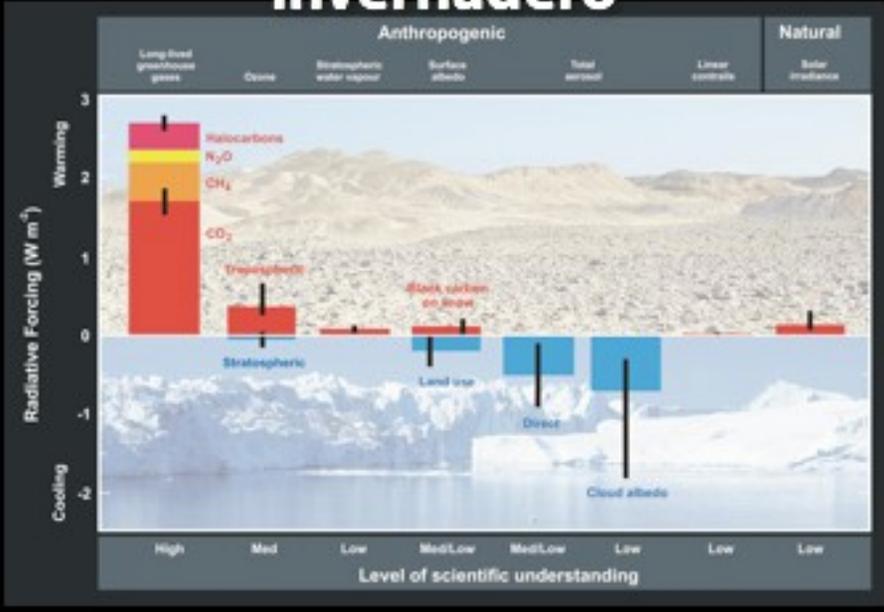
Reemplazando

$$\Delta T_0 = \xi \Delta F$$

$$\xi = \frac{1}{4 \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma T_0^3} = 0,3 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}$$

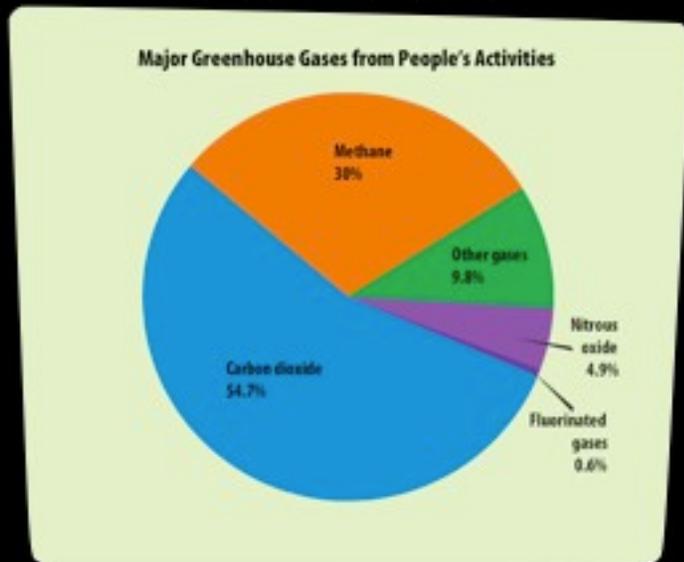
56

# Atmósfera y gases de efecto invernadero



57

# Atmósfera y gases de efecto invernadero



58

# Atmósfera y gases de efecto invernadero

De la figura el forzamiento radiativo total es de  $2,5 \text{ W m}^{-2}$

$$\Delta T_0^{teo} = 0,8 \text{ K}$$

$$\Delta T_0^{obs} = 0,6 \text{ K}$$

59

# Atmósfera y gases de efecto invernadero

Forzamiento radiativo por las nubes

$$\Delta F = \frac{F_s \Delta a}{4}$$

Un aumento en el albedo de 0,007 (o 2,6%) desde los tiempos preindustriales habría causado un forzamiento radiativo negativo de  $-2,5 \text{ W m}^{-2}$ , cancelando el forzamiento del aumento simultáneo de los gases de efecto invernadero.

60



# Atmósfera, absorción y dispersión

$$F(x + dx) = F(x) - dF_{abs} - dF_{scat}$$

EL  $dF$  es proporcional a la concentración de densidad y la sección eficaz

$$dF_{abs} = n\sigma_{cross-sec}^{abs} F(x)dx$$

$$dF_{scat} = n\sigma_{cross-sec}^{scat} F(x)dx$$

63

# Atmósfera, absorción y dispersión

reemplazando y reordenando

$$dF = F(x + dx) - F(x)$$

$$dF = -n(\sigma_{cross-sec}^{abs} + \sigma_{cross-sec}^{scat})Fdx$$

reordenando, separando variables e integrando:

$$F(L) = F(0)e^{-n(\sigma_{cross-sec}^{abs} + \sigma_{cross-sec}^{scat})L}$$

64

# Atmósfera, absorción y dispersión

Se define el paso óptico como:

$$\delta = \ln \frac{F(0)}{F(L)}$$

Y considerando contribuciones de varias especies

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n n_i (\sigma_{cross-sec,i}^{abs} + \sigma_{cross-sec,i}^{scat}) L$$

65

# Atmósfera, absorción y dispersión



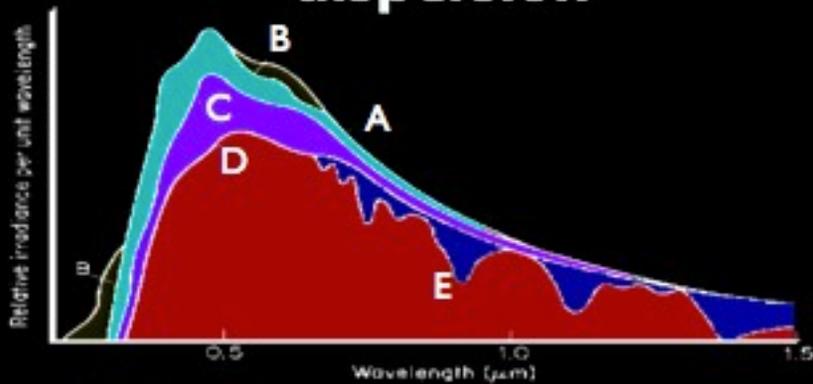
66

# Atmósfera, absorción y dispersión



67

# Atmósfera, absorción y dispersión



- A** al tope de la atmósfera
- B** después de la absorción del ozono
- C** después del scattering molecular
- D** después del scattering por aerosoles
- E** después de la absorción por vapor de agua y oxígeno

68









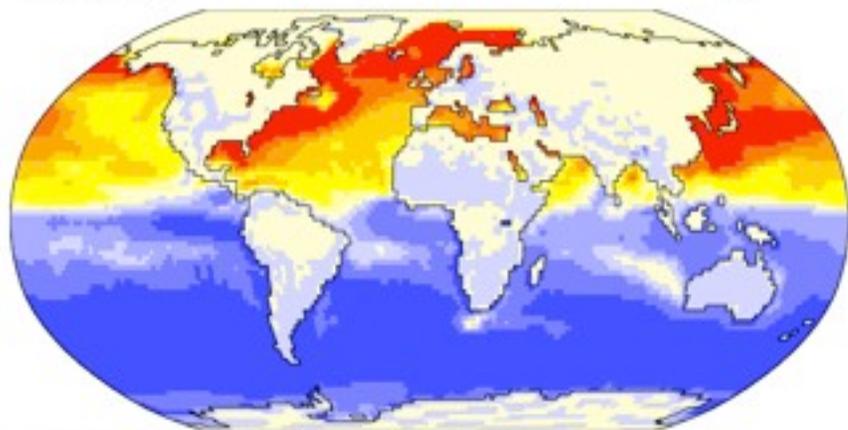




# Balance de energía

Storage Change

Dec



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatology  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

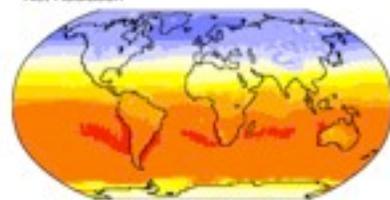
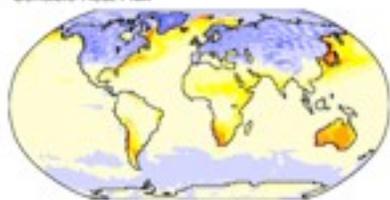
81

# Balance de energía

Sensible Heat Flux

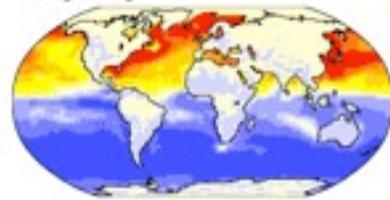
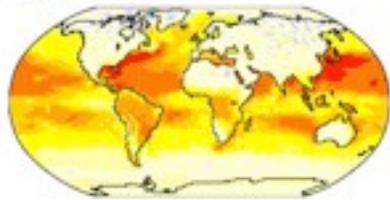
Net Radiation

Dec



Latent Heat Flux

Storage Change



-100 -50 -25 0 25 50 100 125 150 200 W/m²

Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatology  
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

82



# Potencial de calentamiento global

$$GWP = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta F_{1kg \text{ de } x} dt}{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta F_{1kg \text{ de } CO_2} dt}$$

85

# Potencial de calentamiento global

Ejemplo de gases de efecto invernadero producidos por la actividad humana

Tipo	Duración (años)	Potencial de calentamiento mundial (comparado con el CO <sub>2</sub> )		
		20 años	100 años	500 años
Metano	12 ±3	56	21	6,5
Óxido nítrico	120	280	310	170
Hexafluoruro de azufre	3.200	16.300	23.900	34.900
Tetrafluoruro de carbono	50.000	4.400	6.500	10.000

86





