

A dramatic landscape photograph of a mountain range over a lake under a cloudy sky. The sky is filled with dark, heavy clouds, with bright light breaking through on the right side, creating a strong contrast and highlighting the mountain peaks. The mountains are dark and rugged, with some snow or light-colored patches visible. The lake in the foreground is calm and reflects the light from the sky. The overall mood is atmospheric and somewhat somber.

# GF3003

# Ciencias Atmosféricas

Laura Gallardo Klenner

Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

Primavera 2010

LGK 2010

# HOY: Termodinámica (3)

## Nubes y precipitación

- Entropía y ecuación de Clausius-Clapeyron
- ¿Qué se requiere para que se forme una nube y llueva?



# Más específicamente, el/la alumno/a será capaz de:

- Definir el concepto de entropía y relacionarlo con cambios de fase
- Reconocer y hacer aplicaciones simples de la ecuación de Clausius-Clapeyron
- Familiarizarse con la fenomenología de nubes y su formación



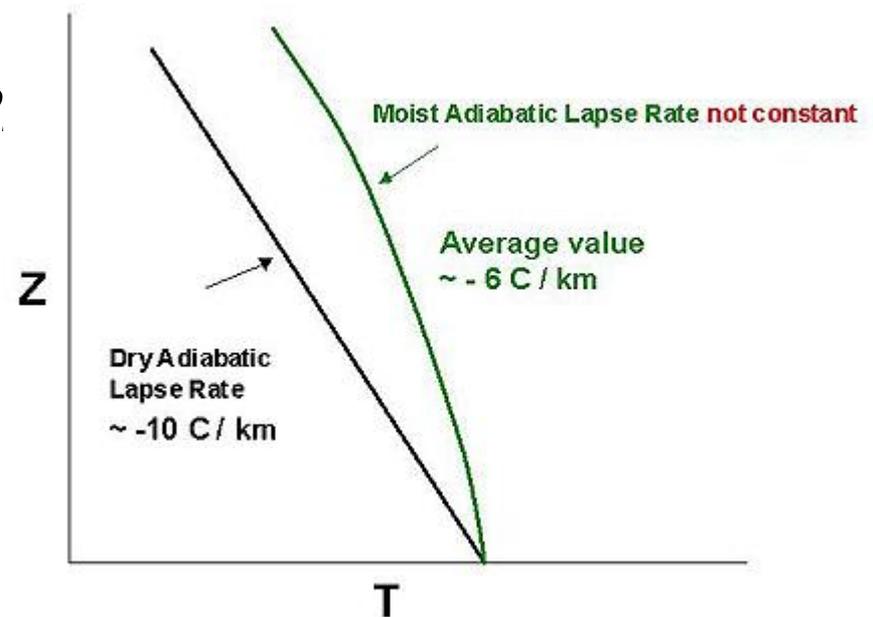
# Vimos que el cambio vertical de temperatura si hay calor latente

Si hay liberación/consumo de calor latente:

$$dq = c_p dT + g dz = -L_v d\omega$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} - \frac{L_v}{c_p} \frac{d\omega_s}{dz}$$

$$\Gamma_s = \Gamma_d - \frac{L_v}{c_p} \frac{d\omega_s}{dz}$$

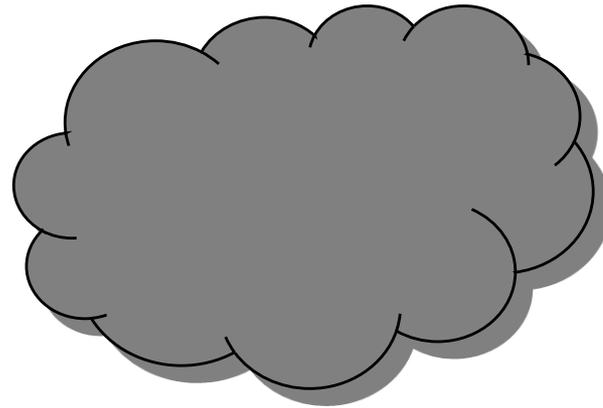


*Y si no hay precipitación*

LGK 2010

Pero **NO** todos los procesos son reversibles....

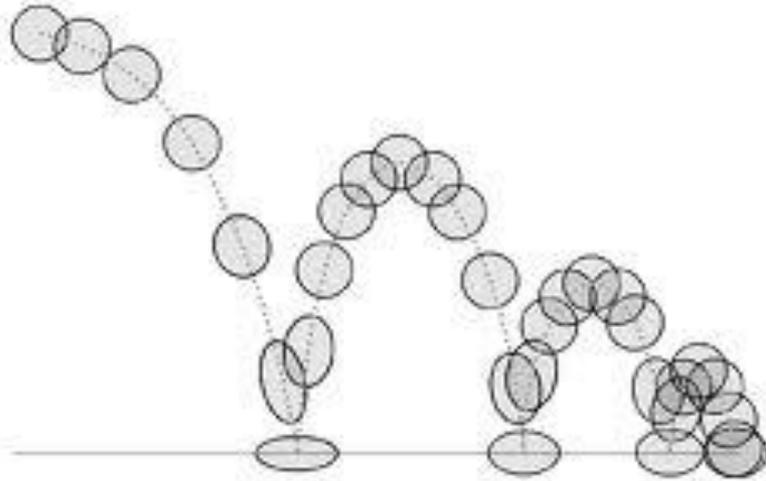
Proceso reversible



Proceso **irreversible**



# Y parte del calor se pierde



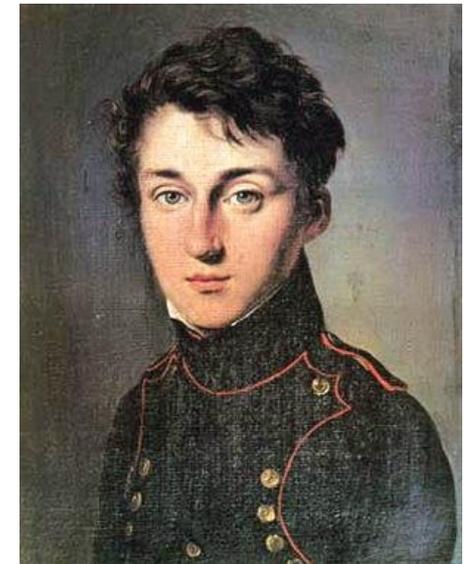
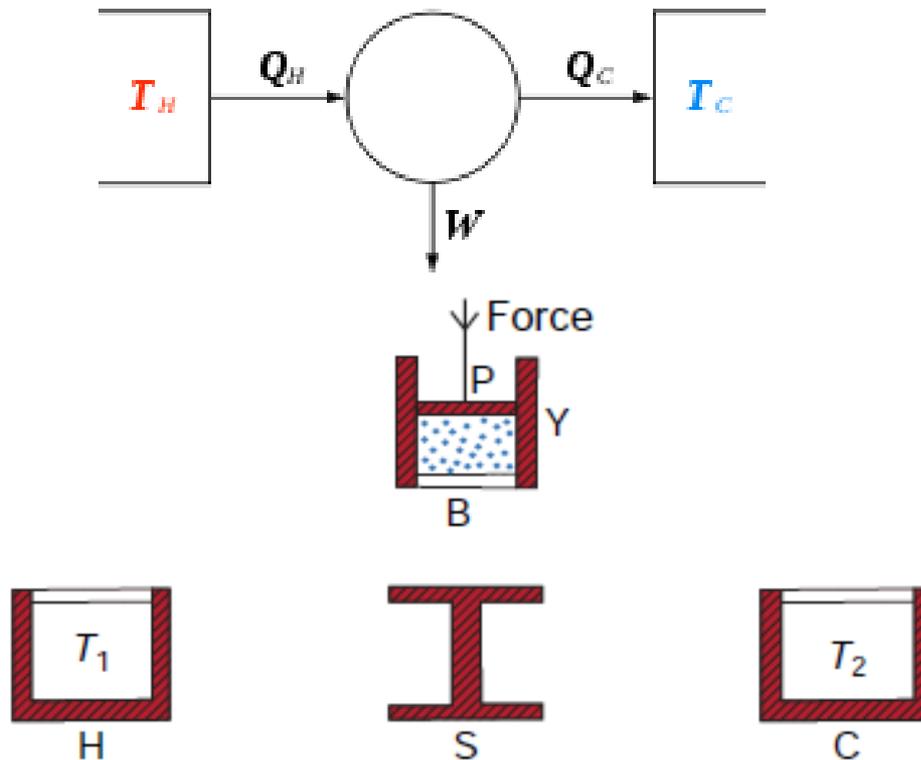
VISIT [WWW.IDLEWORM.COM/HOW/INDEX.SHTML](http://WWW.IDLEWORM.COM/HOW/INDEX.SHTML) FOR ANIMATION TUTORIALS



**¿Cuál es el máximo de calor convertible en trabajo?**

# Entropía à la Carnot (1)

- ¿Cuál es la máquina más eficiente que se puede tener para realizar un trabajo?



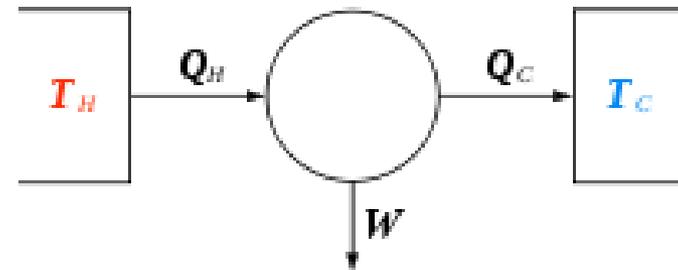
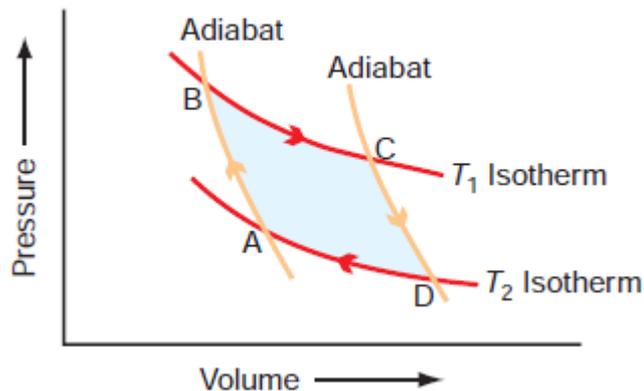
Sadi Carnot ( 1796 – 1832)

# Carnot escribió...2<sup>do</sup> principio



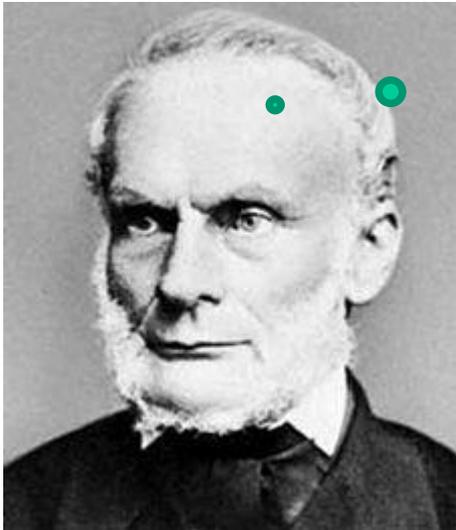
Sadi  
Carnot (1796 –  
1832)

- El trabajo realizado por la máquina de Carnot se debe a la transferencia de calor entre el reservorio cálido y el frío...
- **Se realiza trabajo sólo si la transferencia es desde lo cálido a lo frío**



# Entropía à la Clausius (2)

- Es una variable de estado termodinámico y que indica el máximo calor disponible para realizar un trabajo....



$\epsilon v + \tau \rho \pi \epsilon i v =$   
*Verwandlungsinhalt*

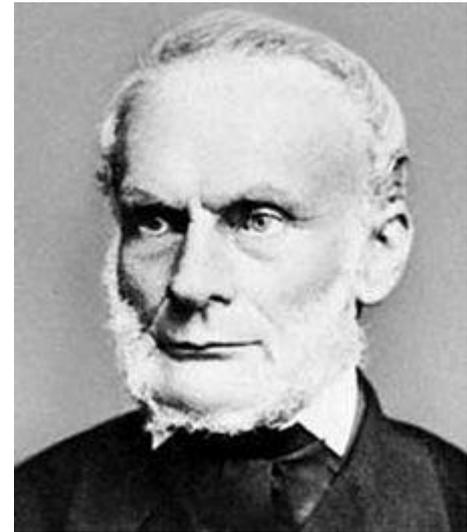
$$s = \oint \frac{dq}{T} \leq 0$$

LGK 2010

Rudolf Clausius (1822-1888)

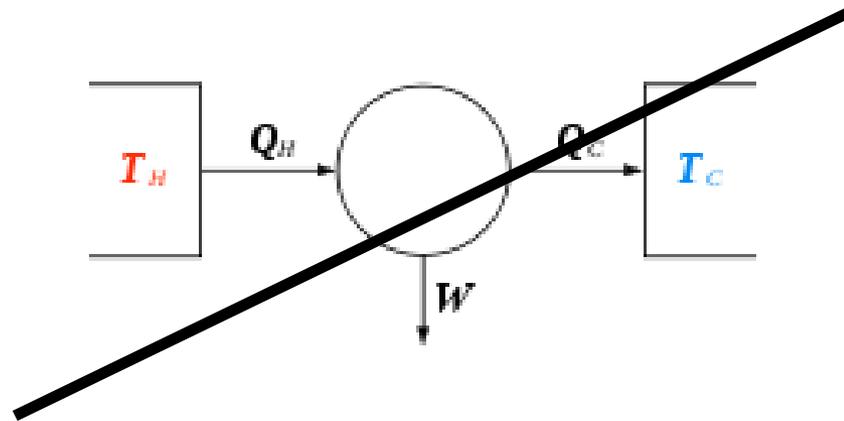
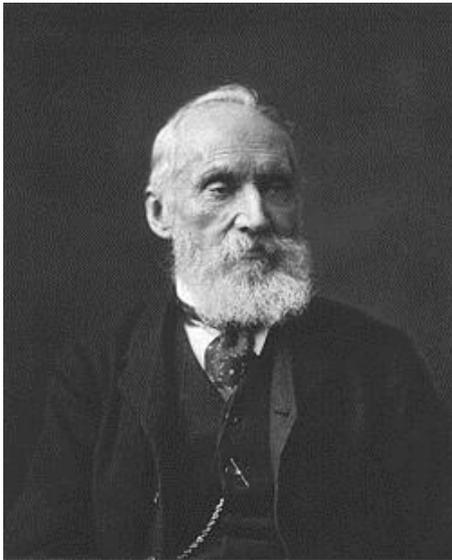
# Clausius habría dicho...

- La energía del universo es constante
- La entropía del universo tiende a un máximo (crece)



# Entropía à la Kelvin

- No process is possible whose **sole** result is the absorption of heat from a reservoir and the conversion of this heat into work.



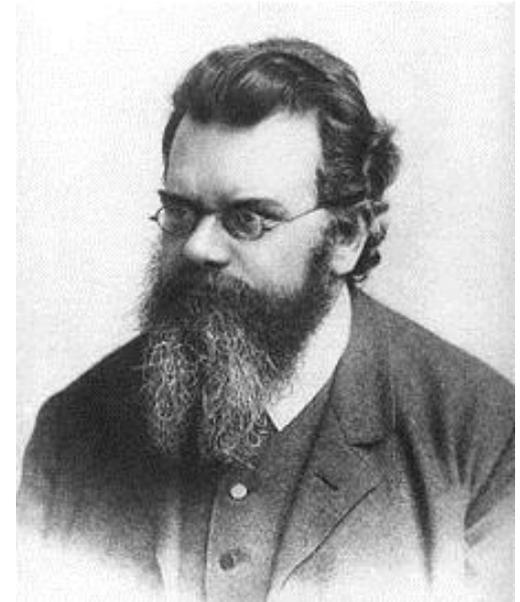
Lord Kelvin (1824-1907)

# Entropía à la Boltzmann (4)

Defínase la entropía como una medida de la probabilidad de ocurrencia de un macroestado de un gas ideal de  $N$  partículas idénticas

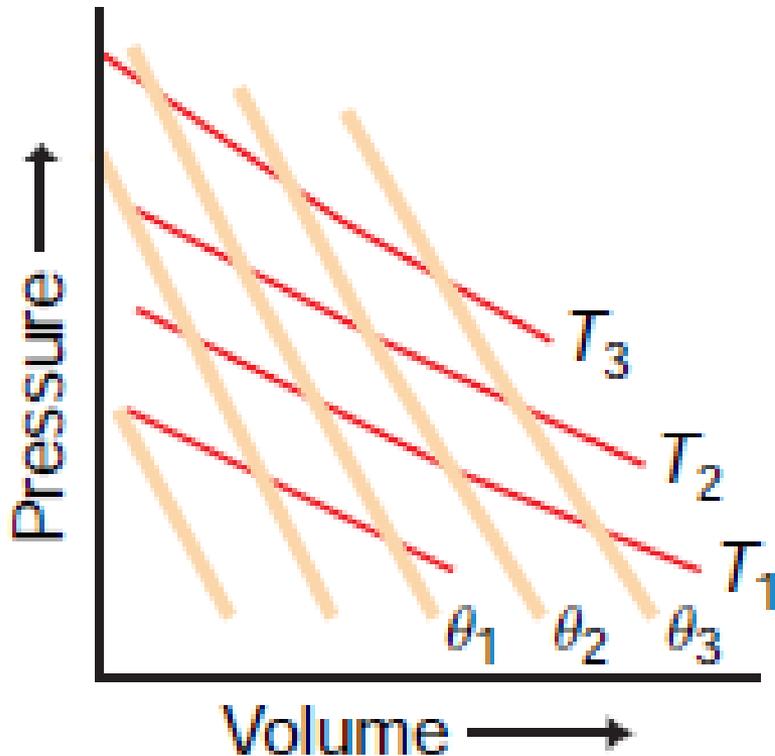
$$S = k_B \ln \left( \frac{N!}{\prod_{i=1}^N N_i!} \right)$$

**Indicador de orden en un sistema**



Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

# ¿Y qué tiene que ver esto con nubes y lluvia?



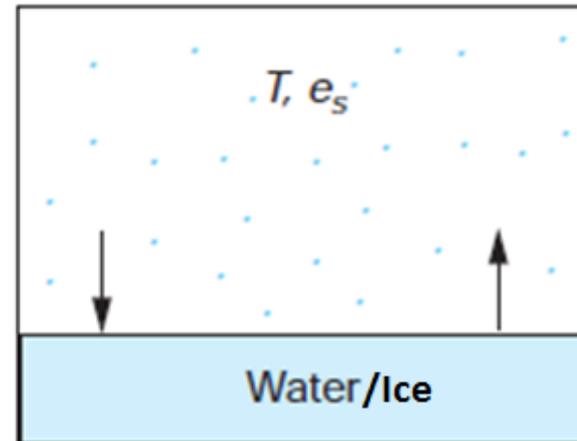
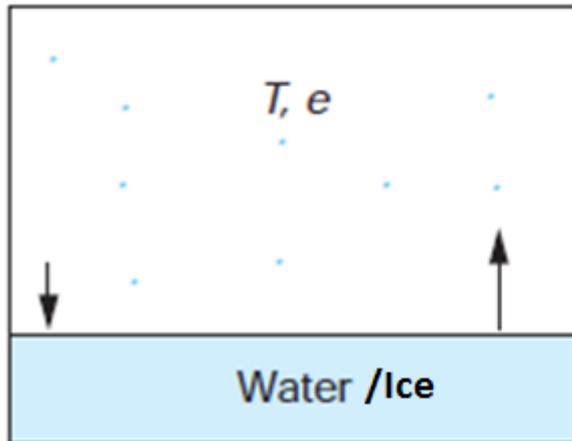
En un proceso reversible:

$$ds = c_p \frac{d\theta}{\theta}$$

$$s = c_p \ln \theta + \text{constant}$$

**Los procesos adiabáticos son isentrópicos (s constante)**

# Para una transformación de fase, por ejemplo, **evaporación/condensación**



$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{L}{T}$$

Hay un cambio en el estado de agregación u orden del sistema

# Por otro lado, la entalpía...

$$h = u + p\alpha \quad \overset{\text{1er ppo}}{\Rightarrow} \quad dh = dq + \alpha dp$$

A partir de lo anterior, se puede demostrar que:

$$\left( \frac{dp}{dT} \right)_s = \left( \frac{ds}{d\alpha} \right)_p$$

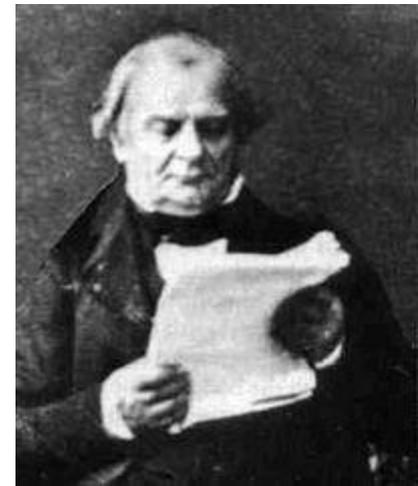
$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{L}{T} \quad \rightarrow \quad \frac{de_s}{dT} = \frac{L}{T(\alpha_v - \alpha_l)} \approx \frac{L}{T\alpha_v}$$

# Ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\rightarrow \left( \frac{de_s}{dT} \right)_s = \frac{L}{T(\alpha_v - \alpha_l)} \approx \frac{L}{T\alpha_v}$$

Y como:  $e_s \alpha_v = R_v T$

$$\frac{1}{e_s} \frac{de_s}{dT} \approx \frac{L}{R_v T^2}$$

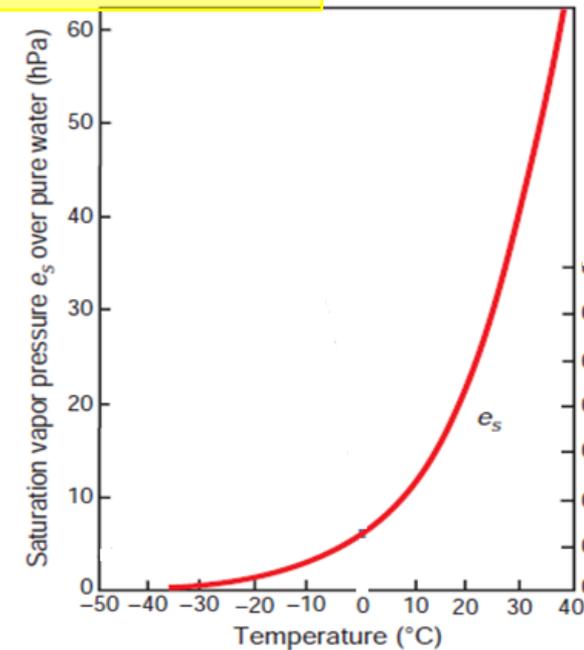
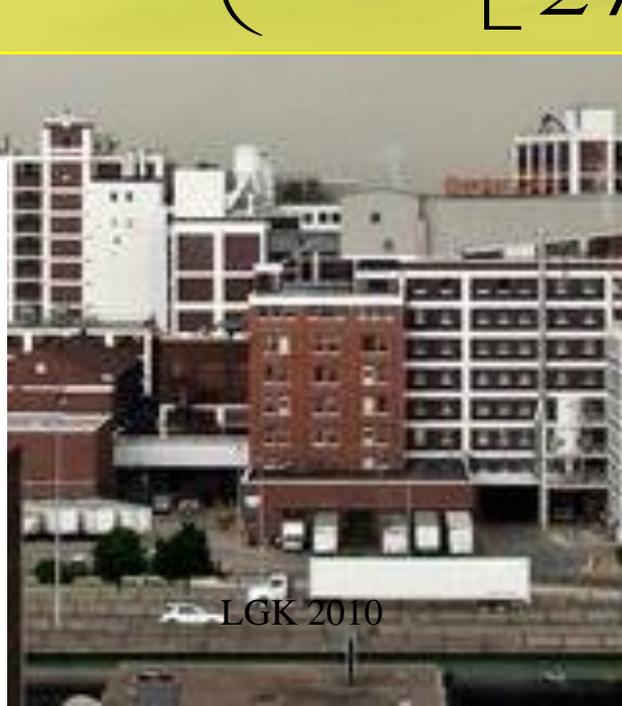
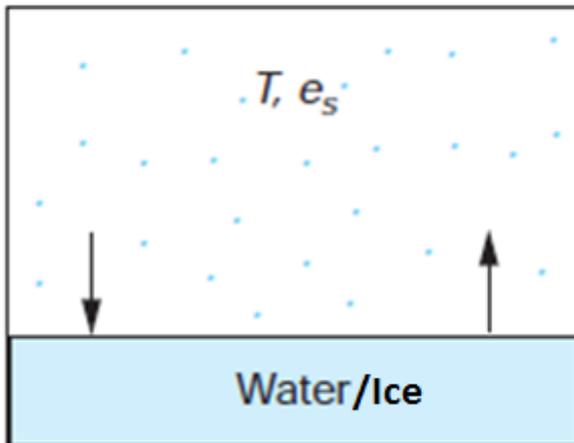


# Ecuación de Clausius-Clapeyron

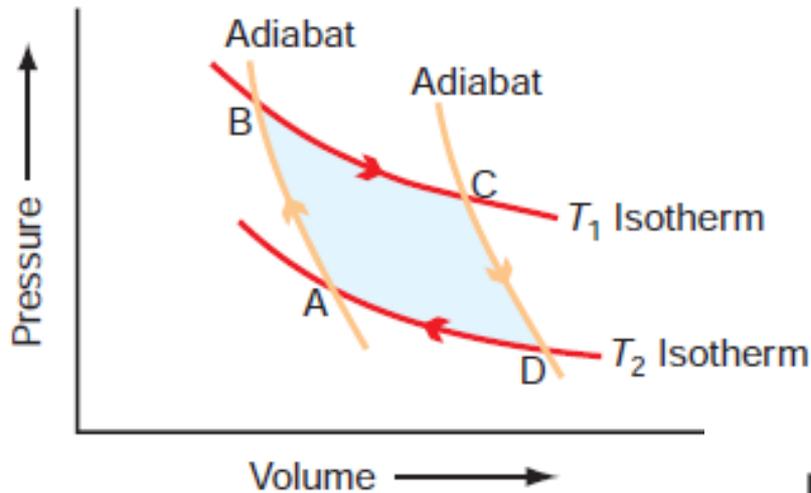
(Transf. de fase asociado a nubes)

$$\frac{1}{e_s} \frac{de_s}{dT} \approx \frac{L}{R_v T^2}$$

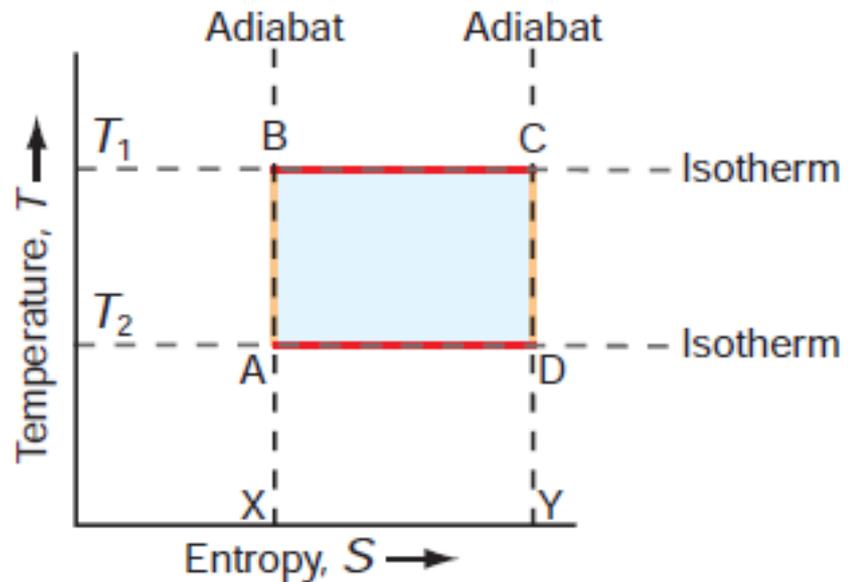
$$e_s \approx 6.11 \exp \left( 5420 \left[ \frac{1}{273} - \frac{1}{T} \right] \right)$$



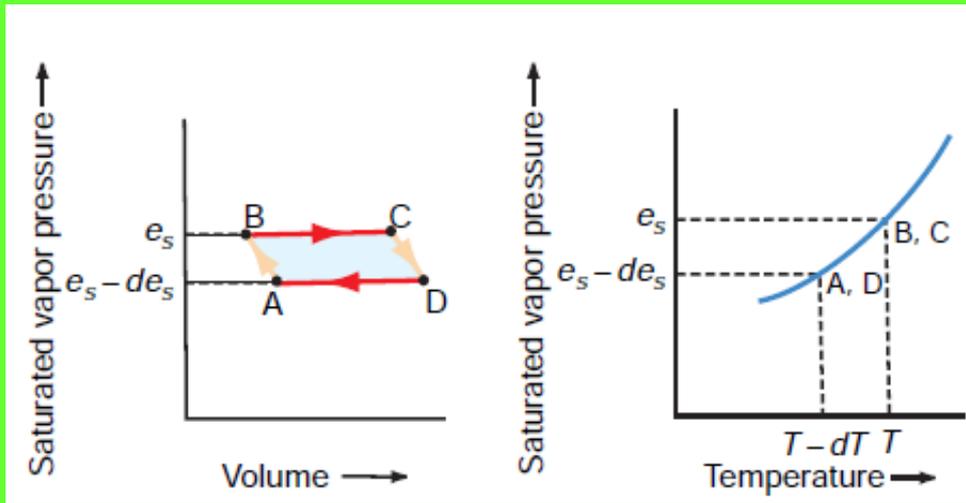
# Entonces, el ciclo de Carnot ...



El trabajo realizado corresponde al área en el diagrama p-V y  $Q_1/Q_2=T_1/T_2$

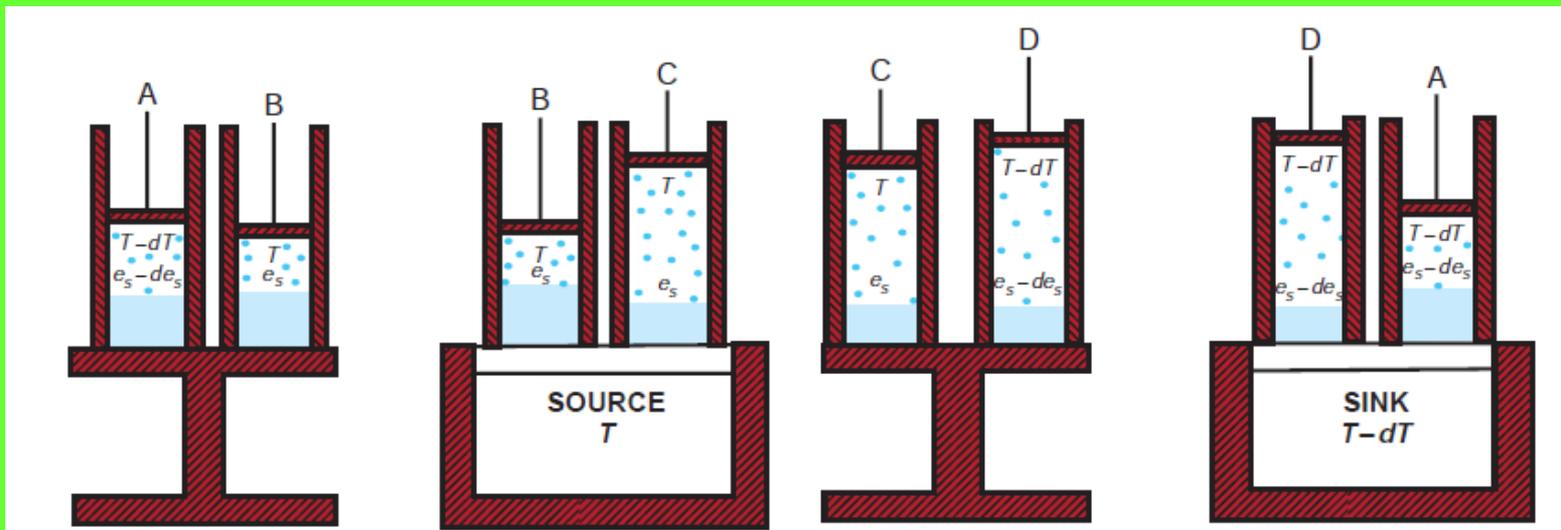


# Entonces para una transformación de fase



$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{T_1 - T_2}$$

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L_v}{T(\alpha_2 - \alpha_1)}$$



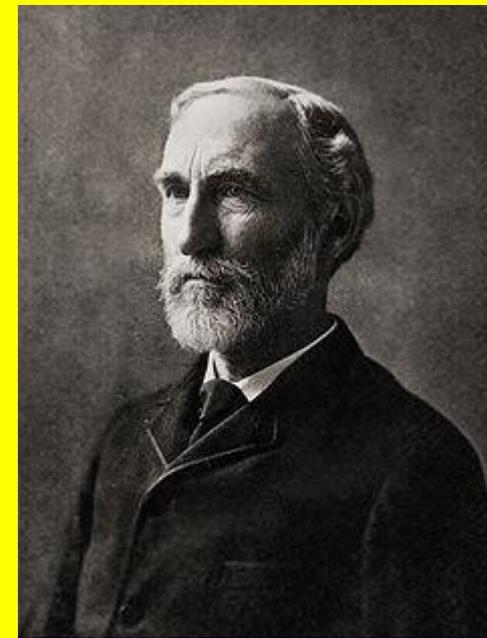
NB. Recordar que el calor latente se define como aquel requerido para cambiar el estado de agregación sin cambiar la temperatura

# Función de Gibbs

$$g = u + p\alpha - Ts = h - Ts$$

La función de Gibbs es igual para ambas fases (conservativa)

$$\rightarrow \left( \frac{de_s}{dT} \right)_s = \frac{L}{T(\alpha_v - \alpha_l)} \approx \frac{L}{T\alpha_v}$$



Josiah Willard Gibbs  
1839-1903

© Original Artist  
Reproduction rights obtainable from  
[www.CartoonStock.com](http://www.CartoonStock.com)



search ID: kman4479

"If we have everlasting life,  
what about *entropy*?"



LGK 2010



# ¿Qué es una nube?

Mezcla de gotas de  
agua líquida y/o  
hielo y aire  
suspendida en la  
atmósfera

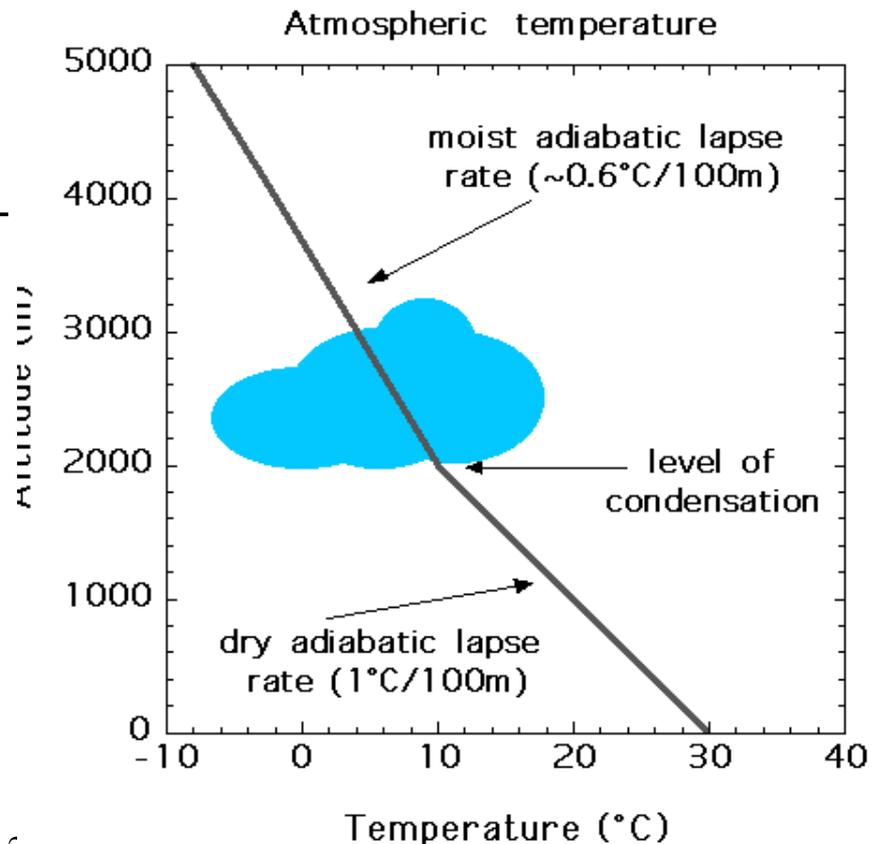


# Para formar nubes (cálidas) hay que alcanzar saturación...

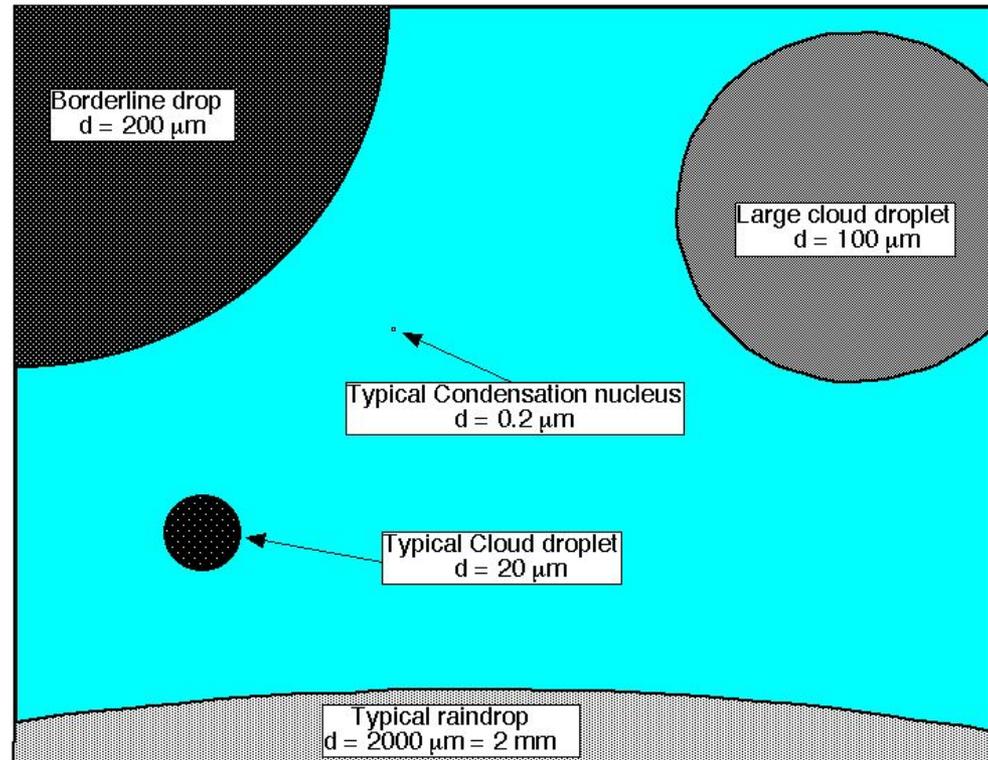
- ☺ Fácil, hay que enfriar el aire...típicamente por ascenso

$$\frac{1}{e_s} \frac{de_s}{dT} \approx \frac{L}{R_v T^2}$$

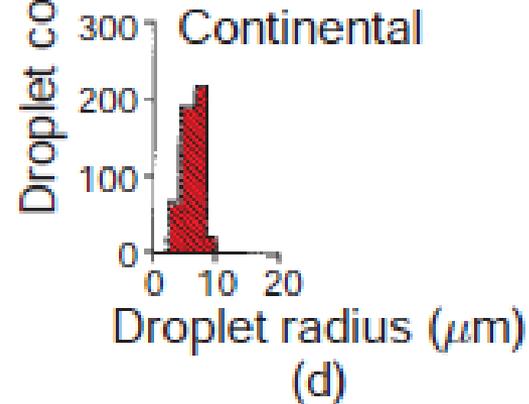
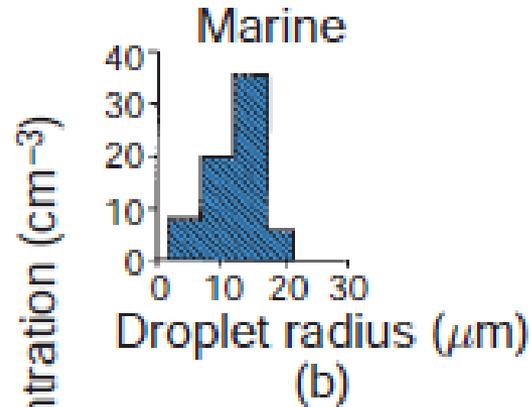
☹ El agua pura no forma gotas fácilmente...se puede alcanzar HR~600% y el agua no condensa ni forma gotas



# Para que llueva, las gotas deben crecer ...mucho

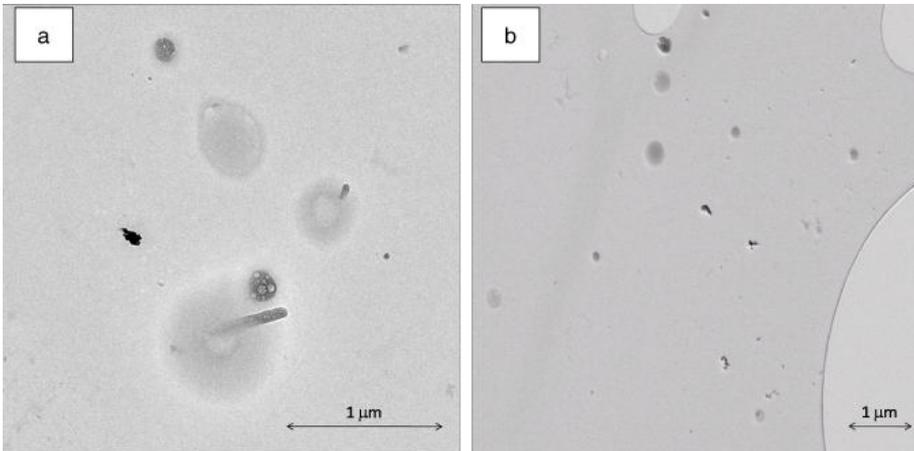
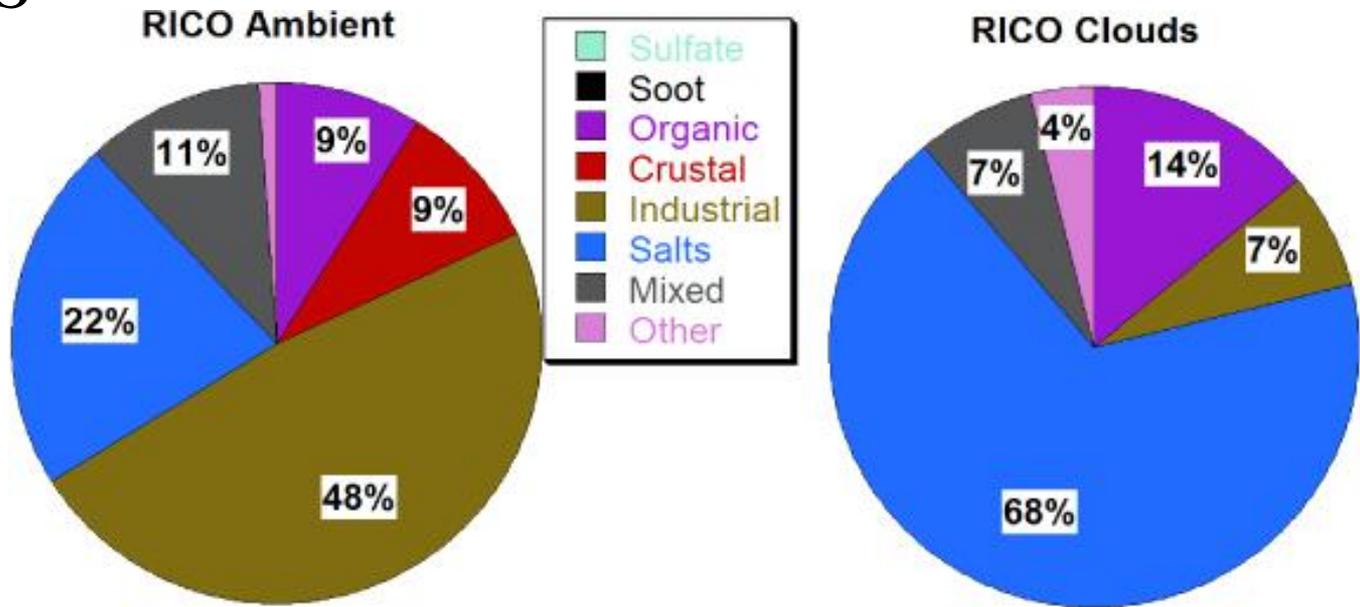


# ¿Cómo son las gotas de una nube?



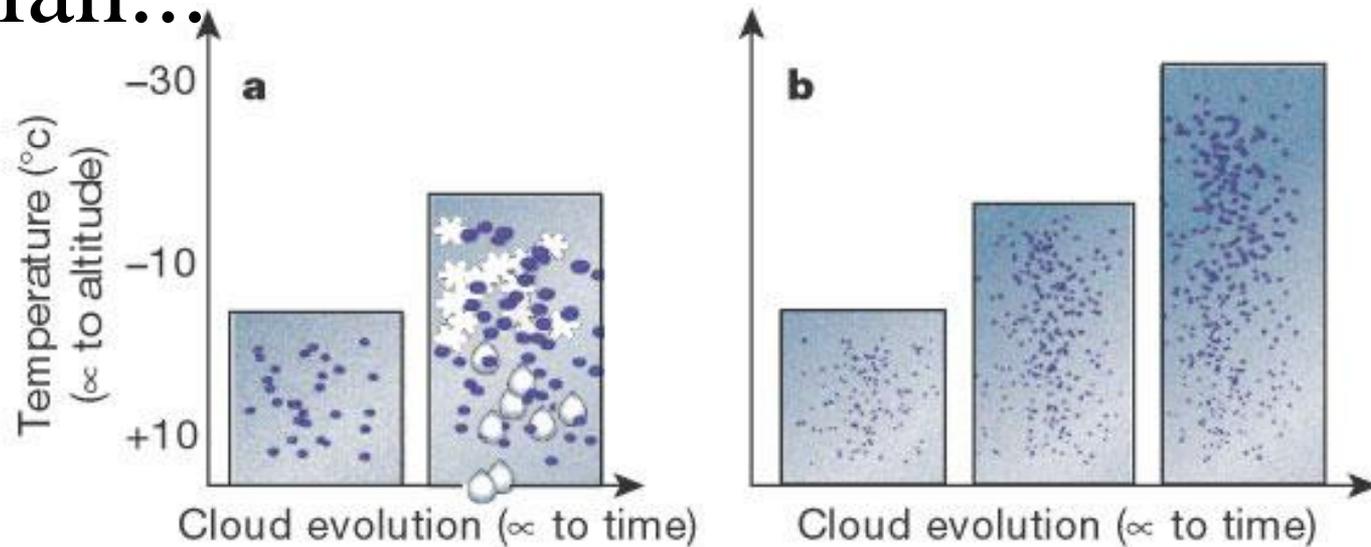
Squires, 1958 Tellus 10, 258

# Composición de las gotas y sus precursores



LGK 2010

Según la disponibilidad, el tamaño y la composición de los aerosoles los procesos cambian...

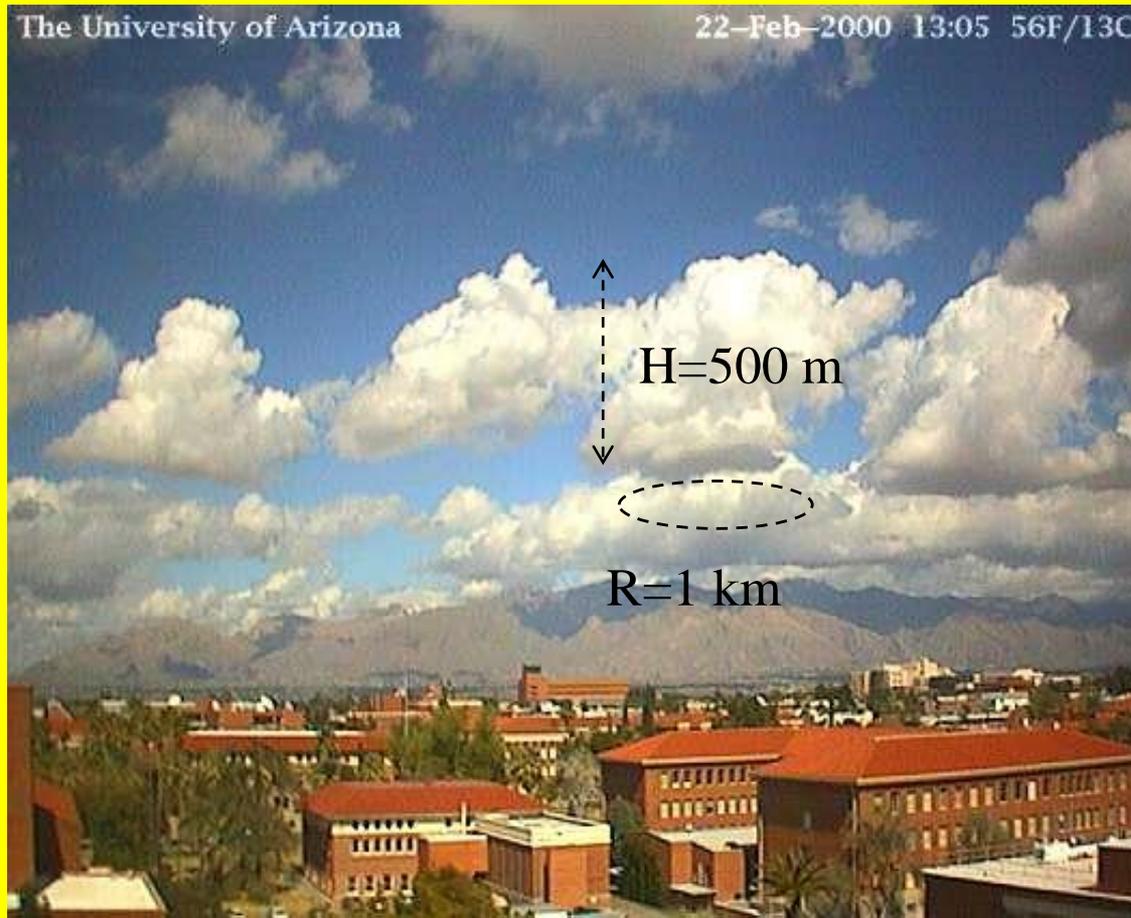


LGK 2010

# Introducción a la Meteorología – Nubes

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

**¿Cuánto pesa una nube? ¿Cuánta agua tiene?**  
**Expresar en términos de un camión y una piscina**



Conc. de gotas: 100  
gotas/cm<sup>3</sup>

Tamaño de una gota:  
0.01 mm = 1e-5 m

Densidad del aire:  
1 kg/m<sup>3</sup>

Densidad del agua:  
1000 kg/m<sup>3</sup>

[http://science.nationalgeographic.com/science/photos/clouds/?source=link\\_fb20101018cloudsgallery](http://science.nationalgeographic.com/science/photos/clouds/?source=link_fb20101018cloudsgallery)



LGK 2010

# Lecturas de hoy

- Obligatoria
  - Wallace and Hobbs, Atmospheric Science (Ch. 3.7; Ch. 6.2)
- Más sobre termodinámica
  - GF500 (Física de la Atmósfera)
- Más sobre aerosoles y CCN
  - GF3022 (Contaminación atmosférica)

Próximamente...

- Nubes y precipitación (Diagrama de Köhler)

