

Universidad de Chile  
Departamento de Geofísica

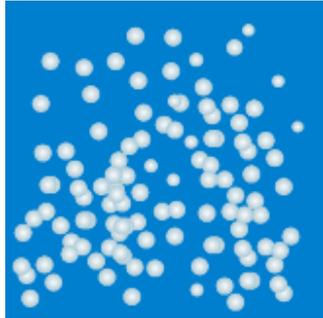
Introducción a la Meteorología

## Termodinámica I

# Vapor de agua en la atmosfera (Humedad)

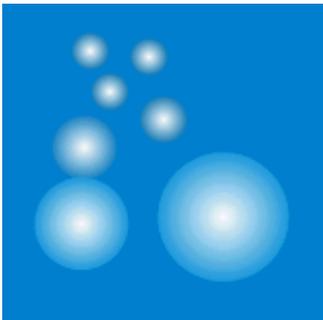
Prof. René Garreaud  
[www.dgf.uchile.cl/rene](http://www.dgf.uchile.cl/rene)

## El agua en la atmósfera se encuentra en tres formas:



Vapor de agua (Fase gaseosa)

**Invisible** debido a su tamaño muy pequeño



Gotas de nube o lluvia (Fase líquida)

Diferentes tamaños 0.001 mm - 1 cm

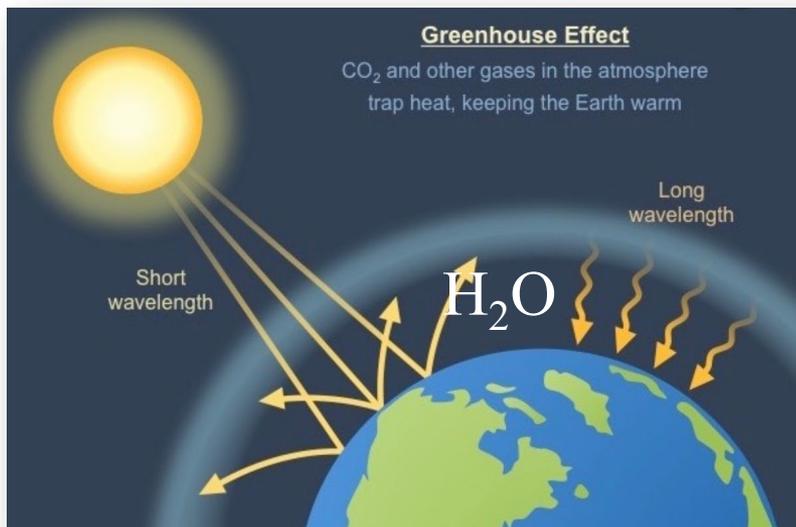
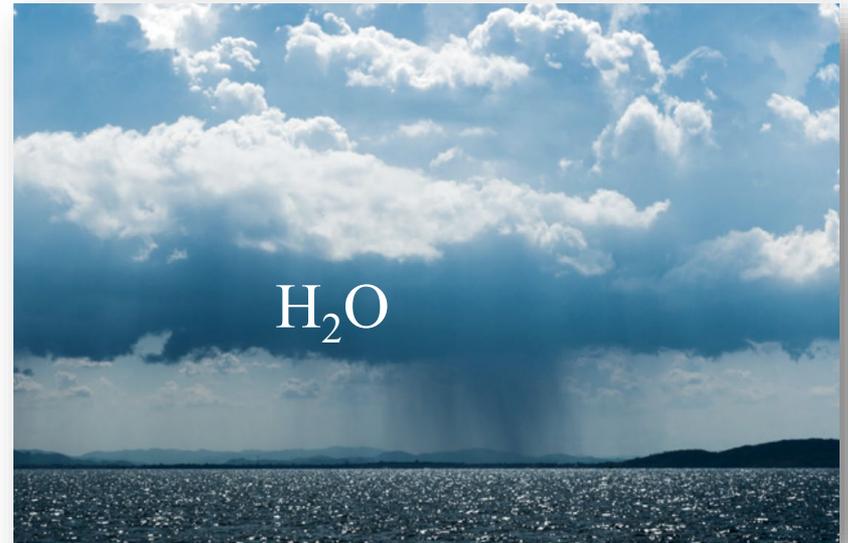


Cristales de hielo o nieve (Fase sólida)

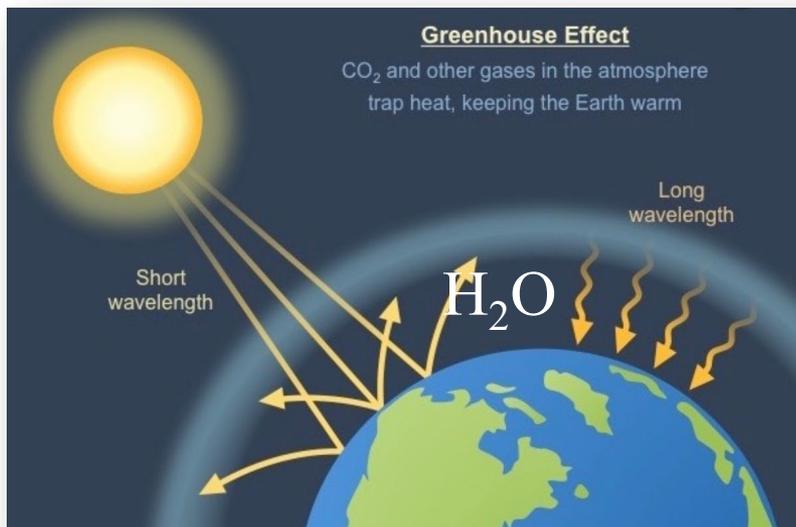
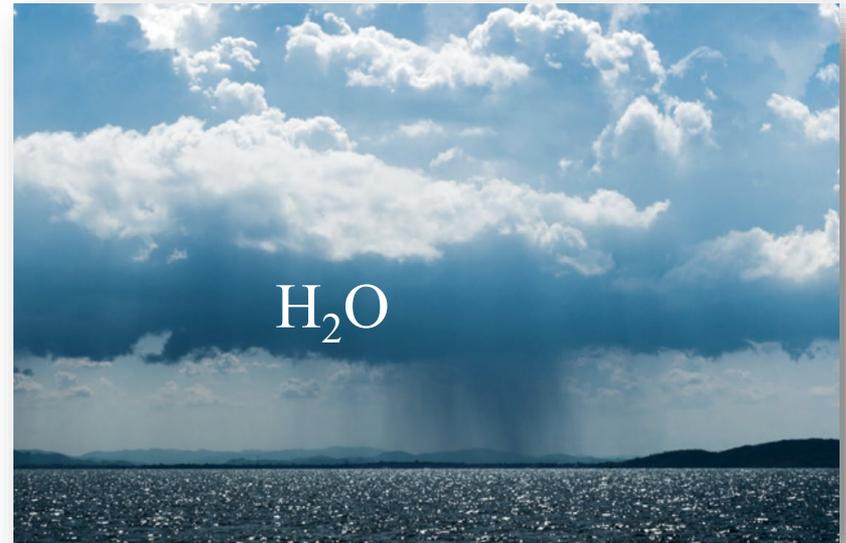
Estructura ordenada o desordenada

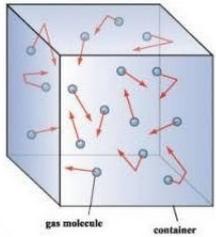
Porque es importante saber  
cuanto vapor de agua hay  
en el aire?

Porque es importante saber  
cuanto vapor de agua hay  
en el aire?



Porque es importante saber  
cuanto vapor de agua hay  
en el aire?





Empleando la **teoría cinética** de los gases (micro) se obtiene la presión ejercida por moléculas de un gas sobre una pared del recipiente que lo contiene:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot [v]^2$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $[v]$  es la velocidad media

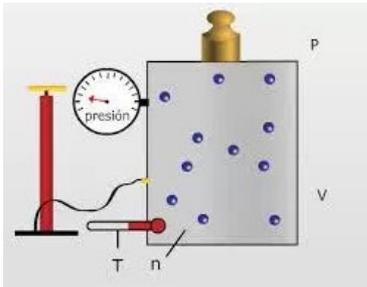
Empleando **mediciones macroscópicas** se obtiene una relación aproximada (gas ideal) entre presión de un gas, su temperatura (T) y volumen (V):

$$p \cdot V = n \cdot R^* \cdot T \rightarrow p = \rho \cdot R \cdot T \rightarrow p \cdot \alpha = R \cdot T$$

donde  $R^*$  es la constante universal de los gases ( $=8.31 \text{ J/Mol/K}$ ) y  $M$  es la masa molecular ( $\text{g/Mol}$ ). Se define  $R = R^*/M$  como la constante específica de cada gas.  $N$  es el número de moléculas.

Una ecuación mas general es la ecuación de Van der Waals:

$$\left( P + \frac{a \cdot n^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb) = n \cdot R \cdot T$$



**Ley de Dalton:** Presión total es la suma de cada componente

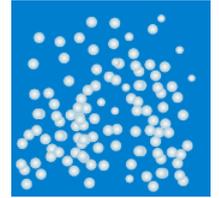
$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n n_i \frac{RT}{V}$$

El Aire es una mezcla de aire seco ( $M_d = 28 \text{ g/mol}$ ) y vapor de agua ( $M_w = 18 \text{ g/mol}$ ):

$$p = p_d + e = \rho_d \cdot R_d \cdot T + \rho_v \cdot R_v \cdot T$$

donde  $R_v = R^*/M_w = 0.461 \text{ SI}$  y  $R_d = R^*/M_d = 0.286 \text{ SI}$

$e$ : Presión parcial de vapor...depende directamente de  $\rho_v$



## Parámetros de Humedad Atmosférica

Consideremos en primer lugar como cuantificar el contenido de vapor de agua en el aire:

\* **Humedad absoluta = densidad del vapor (Masa/Volumen)**

Como  $\rho(\text{aire}) \sim 1 \text{ kg/m}^3$ , si  $q=5 \text{ gr/Kg}$  entonces  $\rho(\text{vapor}) \sim 5 \text{ g/m}^3$

\* **Razón de mezcla = Masa de vapor de agua / Masa de aire seco**

$[q] = \text{gr vapor} / \text{kg de aire seco}$

En esta sala, probablemente  $q = 5 \text{ gr/Kg}$

\* **Presión parcial de vapor de agua ( $e = \rho_v \cdot R_v \cdot T$ )....típicamente 6-20 hPa**

$$q = 622 * e / [p - e] \approx 622 * e_s / p \quad (q_{\text{sat}} \text{ en g/Kg})$$

Naturalmente, todos los parámetros anteriores son difíciles de medir directamente...(necesitamos contar moléculas de vapor)



7:05 AM  
 $q=5 \text{ g/Kg}$   
 $T=12^\circ\text{C}$   
Sub-Saturado

7:07 AM  
 $q=6 \text{ g/Kg}$   
 $T=12^\circ\text{C}$   
Sub-Saturado

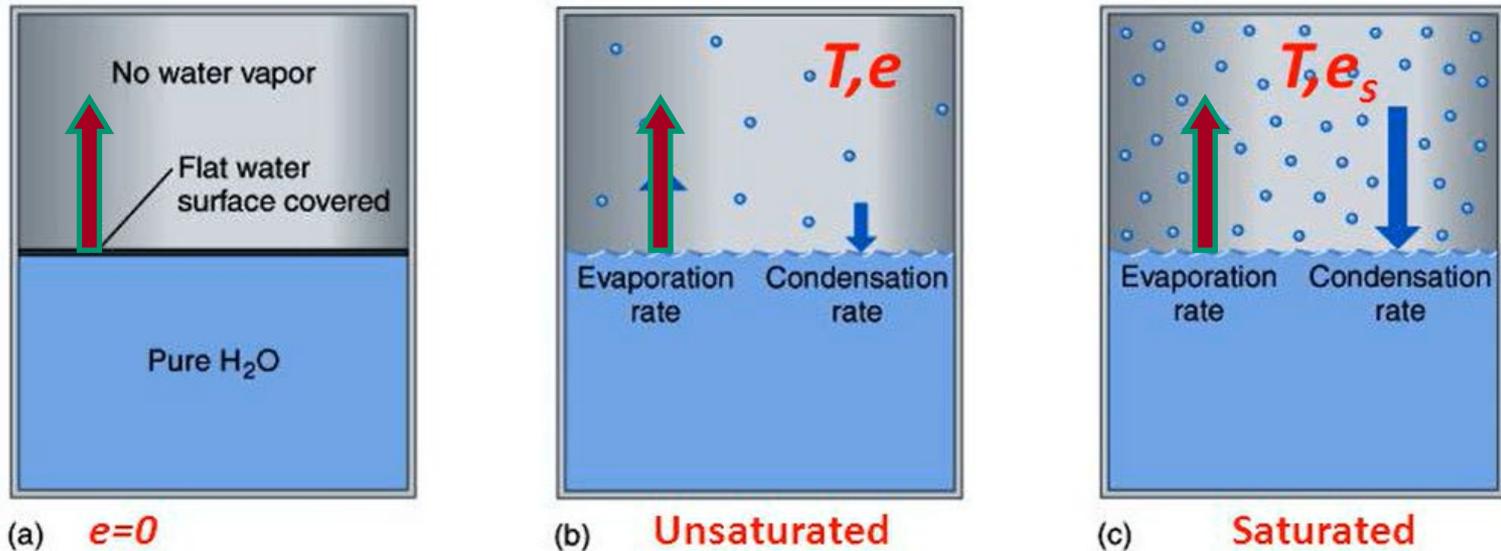


7:12 AM  
 $q=10 \text{ g/Kg}$   
 $T=12^\circ\text{C}$   
Saturado



Vapor+  
Gotas

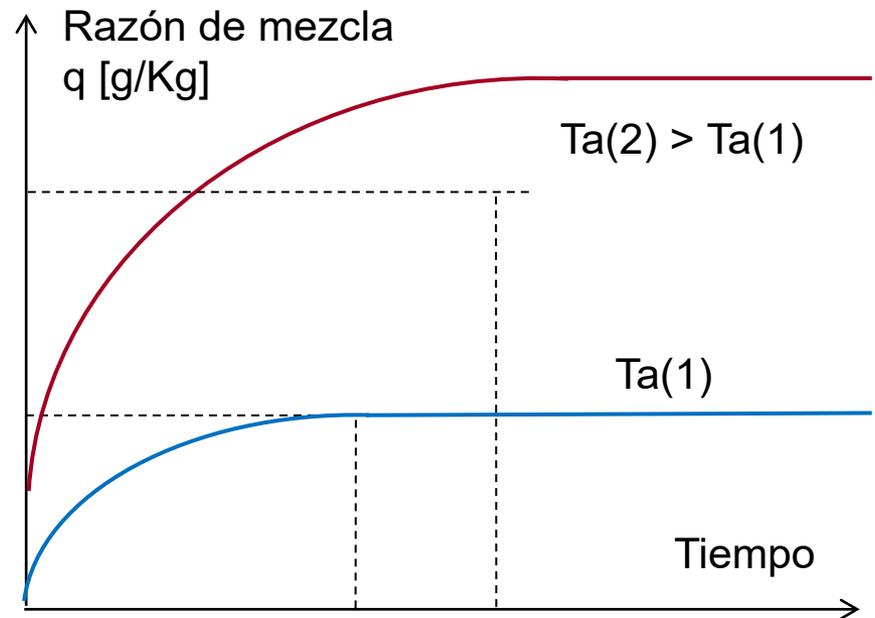
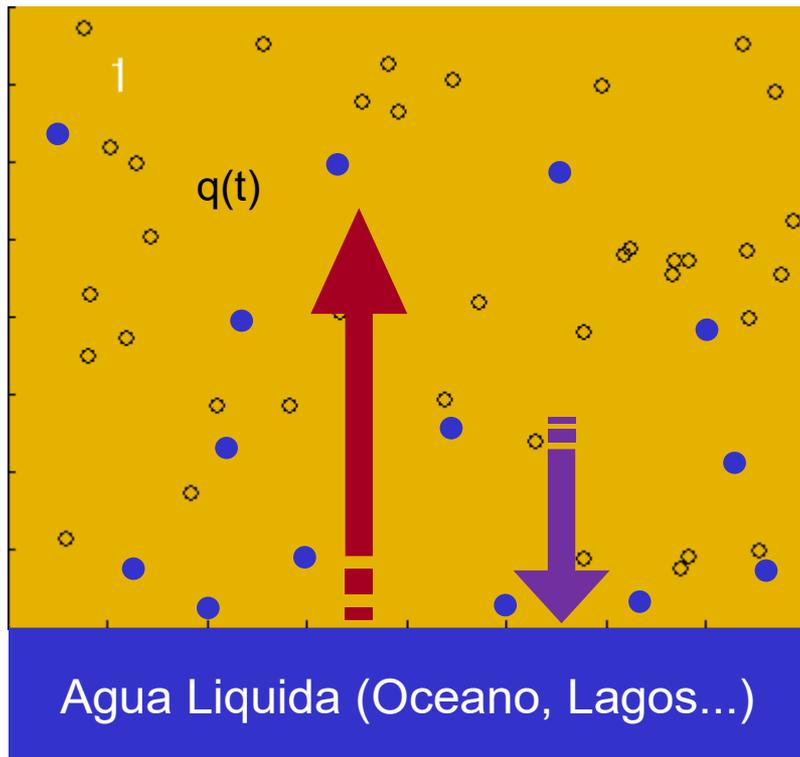
Formalmente, la condición de saturación ocurre cuando el flujo de **evaporación** (líquido → gas) se iguala con el flujo de **condensación** (gas → líquido)



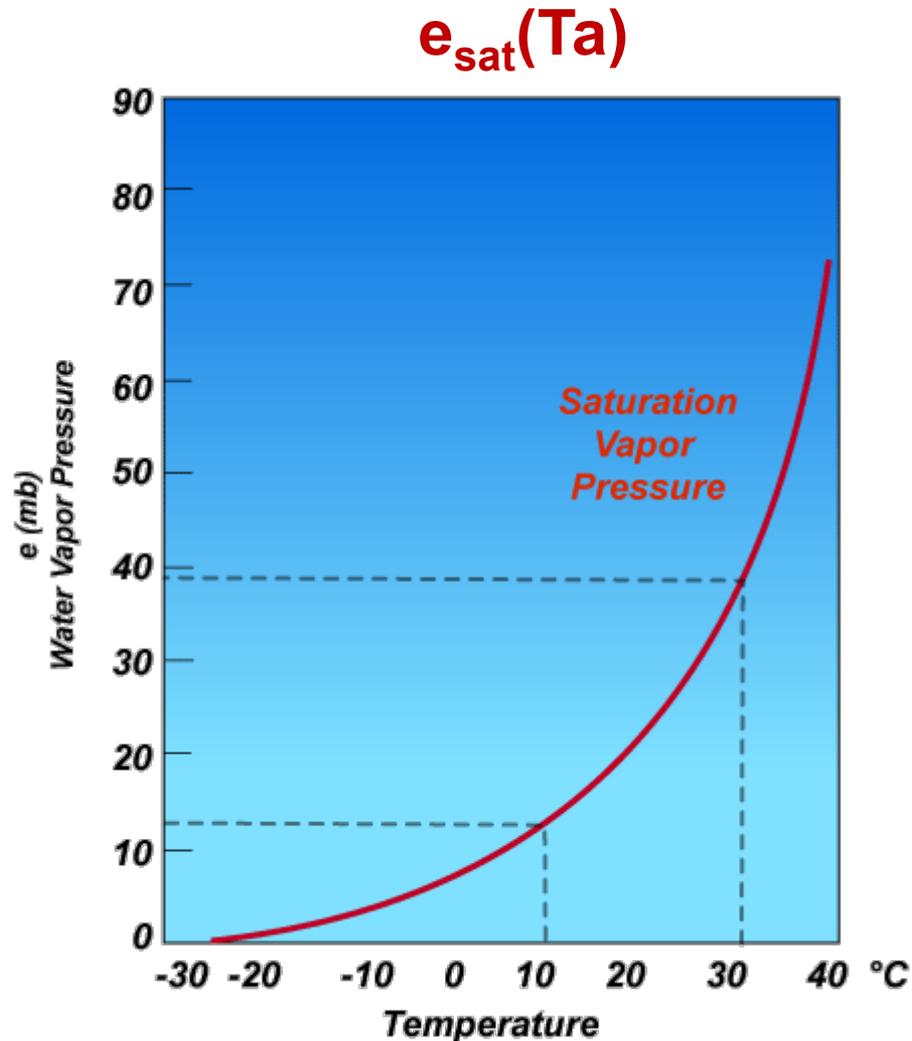
La evaporación es rápida cuando el aire es seco, la temperatura ( $T_a$ ) es alta y el viento es fuerte. La Condensación depende fuertemente de la cantidad de moléculas de vapor en el aire ( $q, e$ )

Si  $E$  se mantiene constante (aproximadamente), el aumento de vapor incrementa la condensación y eventualmente se alcanza un estado de equilibrio denominado **Saturación**. Cualquier molécula adicional de vapor vuelve al agua líquida o forma una gota. De esta forma los parámetros de humedad permanecen constante...en sus valores de saturación  $e_s$  y  $q_s$

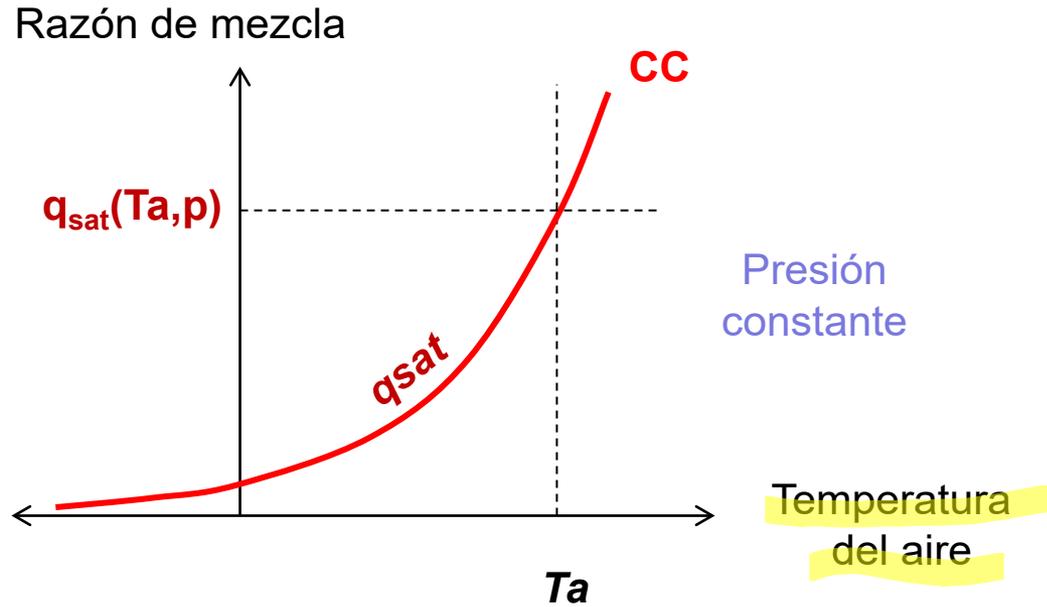
Aire



Se puede demostrar que  $e_{\text{sat}}$  solo depende de la temperatura, a través de la ley de Clausius-Clapeyron:



Se puede demostrar que, a presión constante,  $q_{\text{sat}}$  solo depende de la temperatura, a través de la ley de Clausius-Clapeyron:



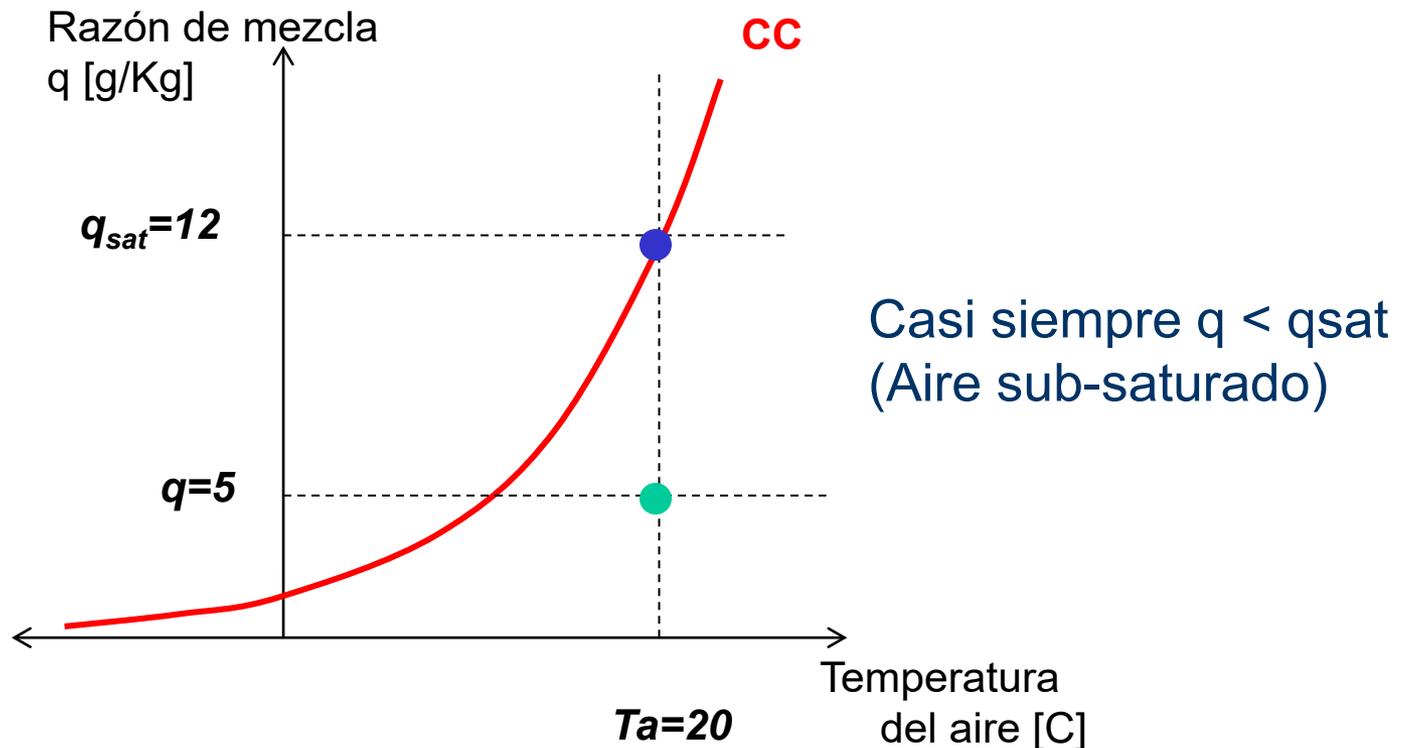
# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Tenemos entonces dos valores de razón de mezcla.

Uno corresponde al “medido” ( $q$ ) e indica cuanto vapor hay en la sala. El otro corresponde al de saturación ( $q_{sat}$ ), solo depende de la temperatura (y presión) y nos dice cuanto vapor se requiere para saturar esta sala.

Ambos valores pueden ser dibujados en el grafico T - q :



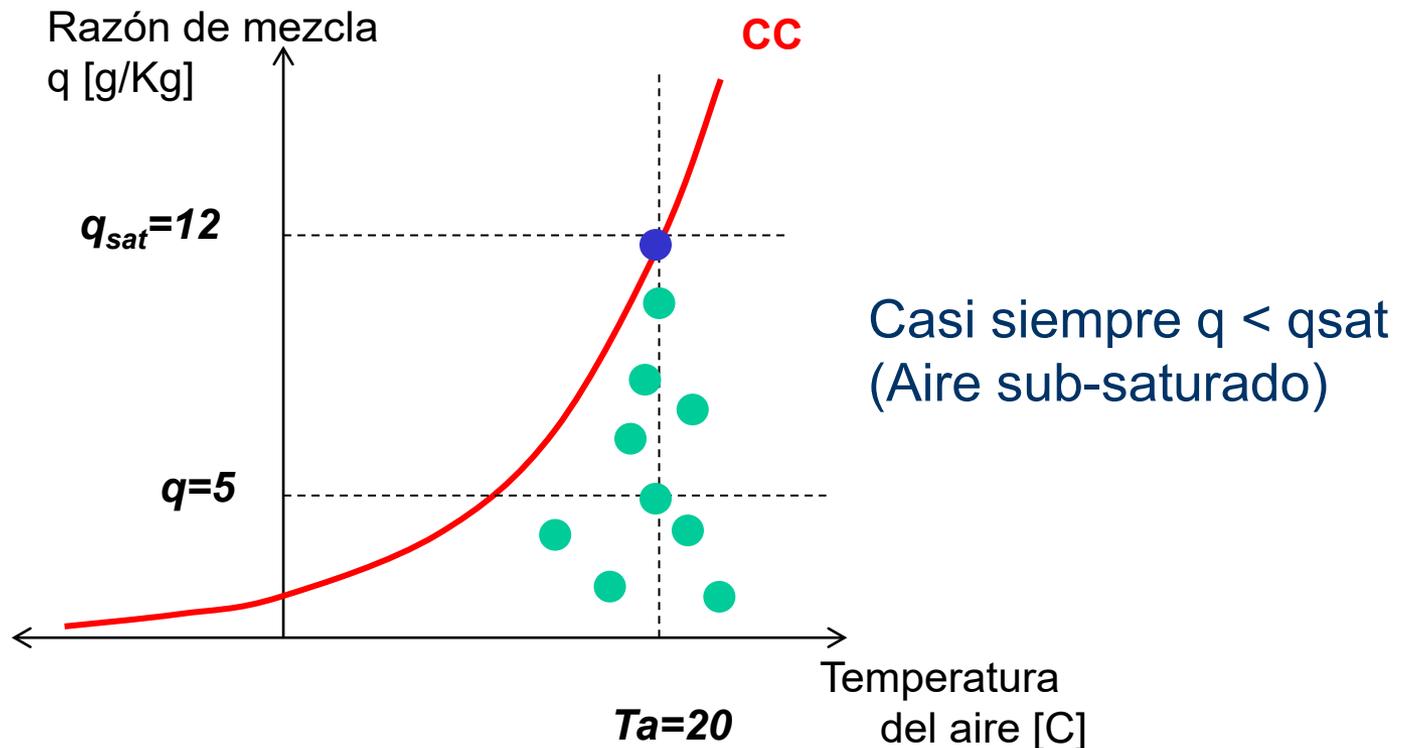
# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Tenemos entonces dos valores de razón de mezcla.

Uno corresponde al “medido” ( $q$ ) e indica cuanto vapor hay en la sala. El otro corresponde al de saturación ( $q_{sat}$ ), solo depende de la temperatura (y presión) y nos dice cuanto vapor se requiere para saturar esta sala.

Ambos valores pueden ser dibujados en el grafico T - q :



## Calculo de razón de mezcla de saturación:

Primero se calcula la presión parcial de vapor de saturación usando la ley de Clausius-Clapeyron

$$e_{\text{sat}} = 6.11 * 10^{[7.5 * T / (T + 237.3)]} \quad (T \text{ del aire en } ^\circ\text{C} \text{ y } e_{\text{sat}} \text{ en hPa})$$

La razón de mezcla se calcula entonces como:

$$q_{\text{sat}} = 622 * e_{\text{sat}} / [p - e_{\text{sat}}] \approx 622 * e_{\text{sat}} / p \quad (q_{\text{sat}} \text{ en g/Kg})$$

Donde  $p$  es la presión atmosférica expresada en hPa.

Ejemplo: esta sala.... $T=20^\circ\text{C}$ ,  $p=950$  hPa.

$$e_{\text{sat}} = 23.4 \text{ hPa}; \quad q_{\text{sat}} = 15.7 \text{ g/Kg}$$

## Humedad relativa

Se define la humedad relativa como:  $HR = 100 * q / q_{sat}$

Es decir, la humedad relativa nos indica cuan cerca o lejos estamos de la condición de saturación. 0% indica aire completamente seco. 100% indica aire saturado. 101% indica sobresaturación....

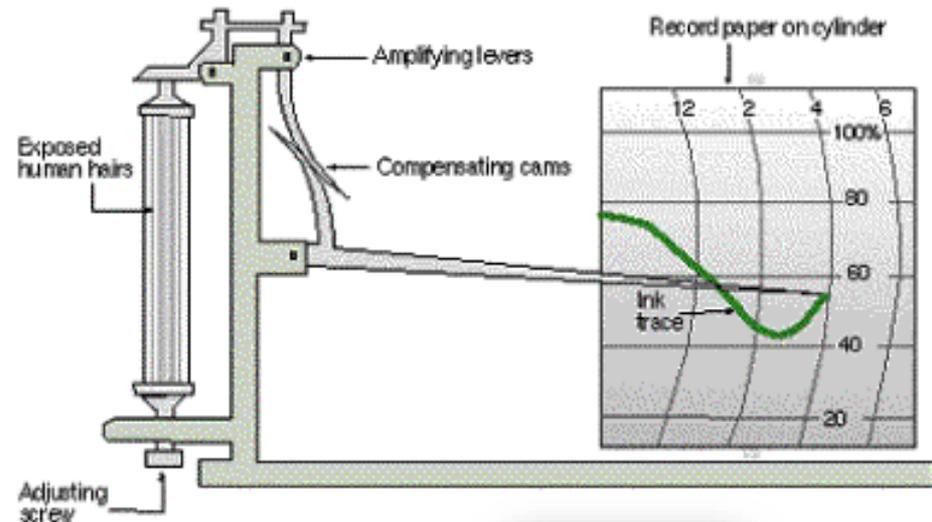
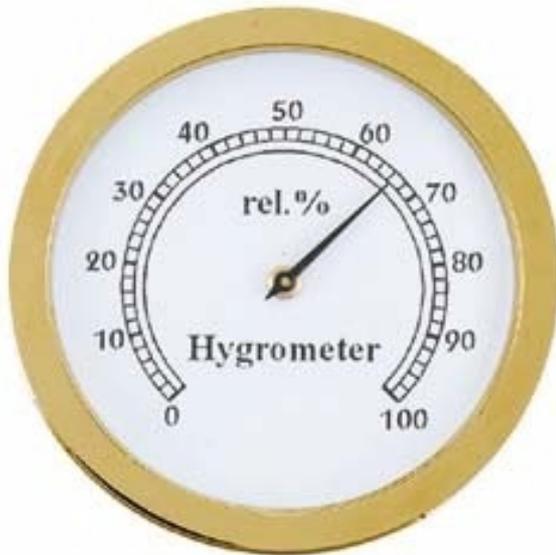
Notar que HR es función de q (contenido de vapor) Y de la temperatura, por lo cual HR no es un buen indicador de la cantidad de vapor de agua en el aire:

HR=70%, T=20°C, p=950 hPa → q = 11.0 g/Kg

HR=70%, T= 2°C, p=950 hPa → q = 3.2 g/Kg ( $q_{sat} = 4.7$  g/Kg)

## Humedad Relativa

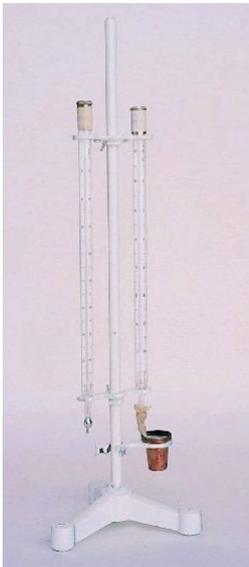
La humedad relativa es una cantidad fácilmente medible a través de higrómetros, en los cuales un material (e.g., cabello humano) responde a cambios de humedad relativa.



© 1998 Wadsworth Publishing Company/ITP



## Otras formas de medir humedad....



Psicrómetro





# Aguas Andinas, La Florida

Latitud : 33° 32' 42" S - Longitud: 70° 32' 54" W - Altura: 670Mts.

08:45 Local X

01-09-2017

Inicio	Gráficos	Datos Recientes	Información Histórica
Temperatura	Humedad	Presión del Lugar	Presión Nivel Mar

**6.4** °C

**98** %

**941.2** hPas

**1020.8** hPas

Temperaturas Extremas	Viento Instantáneo	Viento Promedio 10 Minutos	Precipitación 24 Horas
-----------------------	--------------------	----------------------------	------------------------

Ver Gráfico

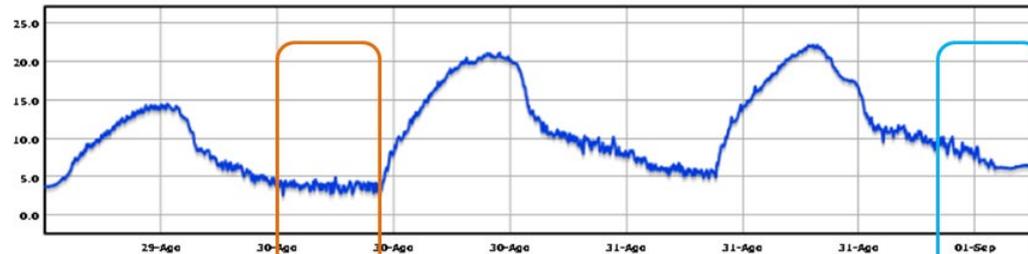
**S/01** kt

**W/01** kt

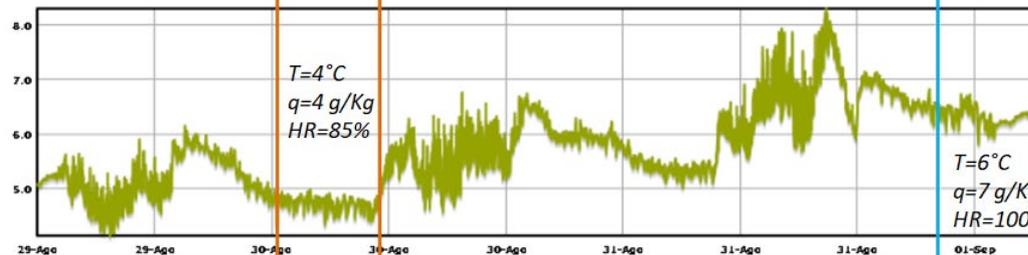
**0.1** mm

## Gráficos últimas 24 Horas

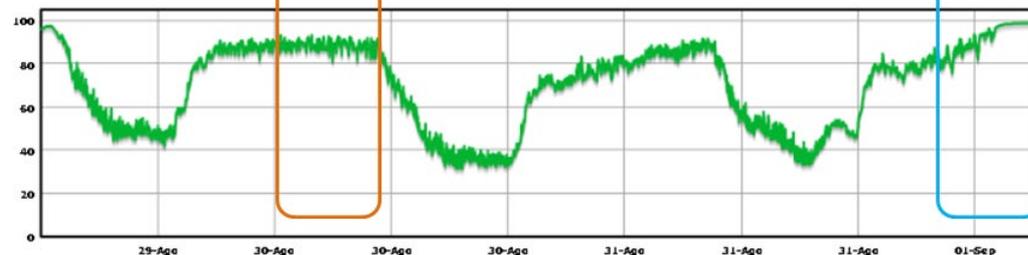
### Temperatura en °C



### Razón de Mezcla de Vapor (gr / Kg)



### Humedad en %



# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

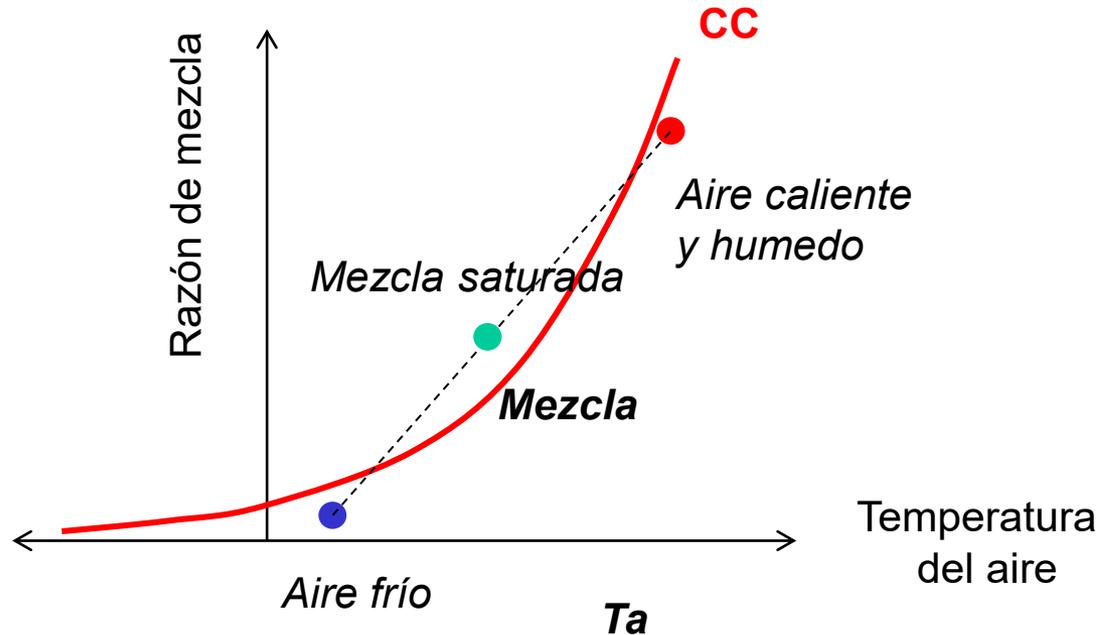
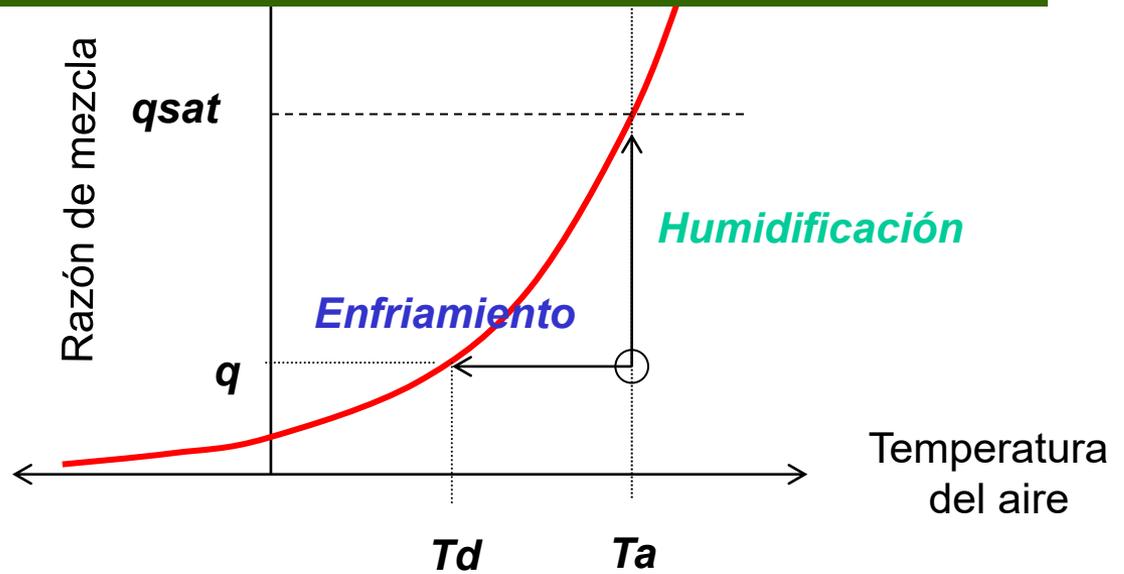
## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

La saturación de aire puede alcanzarse en la atmósfera a través de tres mecanismos:

1. Humidificación (aumentar  $q$  por medio de evaporación)
2. Enfriamiento (disminuye  $q_{\text{sat}}$ )
3. Mezcla de dos masas de aire subaturadas, pero cercanas a la saturación

# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud





Material Adicional

# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

### I. Leyes fundamentales de los gases

- Ecuación de estado gases ideales
- Conservación de Energía (1er Ppio. Td)
- Ecuación Hidrostática
- Ley de Dalton

### II. Humedad Atmosférica

- Vapor en el aire
- Saturación
- Parámetros de humedad
- Mediciones

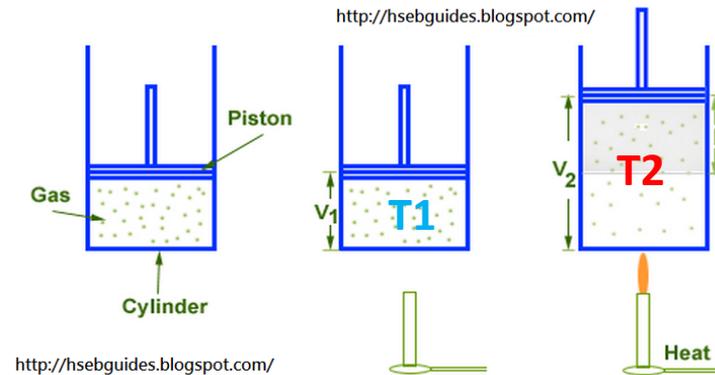
### III. Procesos Termodinámicos

- Procesos Adiabático seco
- Procesos Adiabático saturado
- Estabilidad Atmosférica

# Primera ley de la termodinámica (Conservación de Energía)

$$dQ = dU + dW$$

$$dW = F \cdot dx = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV = p \cdot d\alpha \quad (\text{para una masa unitaria})$$



Adición de calor a volumen constante

$$dQ = dU = c_v \cdot dT \quad (c_v: \text{medible en el laboratorio})$$

Entonces

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot d\alpha = c_v \cdot dT + d(p \alpha) - \alpha \cdot dp$$

$$dQ = c_v \cdot dT + R dT - \alpha \cdot dp = c_p \cdot dT - \alpha \cdot dp$$

Donde  $c_v = 717 \text{ J/Kg}$  y  $c_p = R + c_v = 1004 \text{ J/kg}$  son los calores específicos del aire a volumen y presión constante, respectivamente

Ley de Dalton: Presión total es la suma de cada componente

$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n n_i \frac{RT}{V}$$

El Aire es una mezcla de aire seco ( $M_d = 28 \text{ g/mol}$ ) y vapor de agua ( $M_w = 18 \text{ g/mol}$ ):

$$p = p_d + e = \rho_d \cdot R_d \cdot T + \rho_v \cdot R_v \cdot T$$

donde  $R_v = R^*/M_w = 0.461 \text{ SI}$  y  $R_d = R^*/M_d = 0.286 \text{ SI}$

Si definimos la razón de mezcla como

$$q = \rho_v / (\rho_d + \rho_v)$$

$$R_m = R_d(1-q) + R_v q$$

Podemos escribir

$$p = \rho \cdot R_m \cdot T_v$$

Donde  $T_v$  es la Temperatura virtual que corresponde a

$$T_v = T(1-q + R_v/R_d \cdot q) = T(1 + 0.608 \cdot q)$$

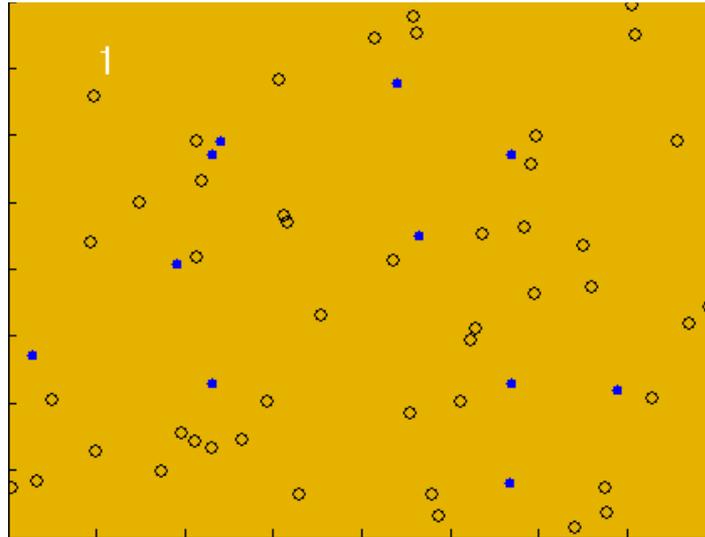
# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Interpretación simple de la ley de Clausius-Clapeyron

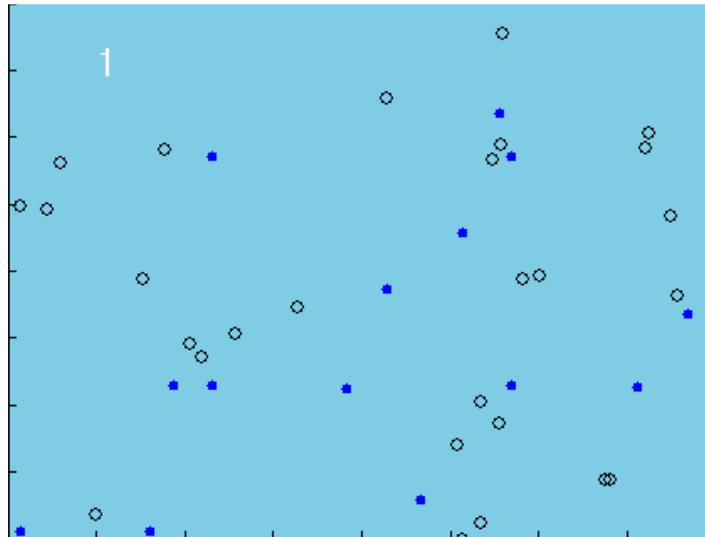
**Moléculas**

- O<sub>2</sub>, H, etc...
- H<sub>2</sub>O Vapor
- H<sub>2</sub>O Líquido



**Temperatura del aire: 22°C**

Moléculas se mueven rápido y choques de H<sub>2</sub>O vapor no logran formar una gota



**Temperatura del aire: 5°C**

Moléculas se mueven lento y choques de H<sub>2</sub>O vapor si logran formar una gota:

**Condensación**

# Introducción a la Meteorología – Termodinámica

## UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Con excepción del caso de las nieblas y neblinas, casi todas las nubes que observamos se debe al enfriamiento de masas de aire producto del ascenso de esta últimas...

¿Cuanto debe subir una parcela para que se sature?: **NCA**

Recuerde que si el proceso es adiabático, la temperatura disminuye a  $10^\circ/\text{Km}$ ...(Gad)

El NCA también depende de la humedad relativa inicial (casos limite: 0% y 100%)

### Nivel de Condensación por Ascenso (NCA)

