

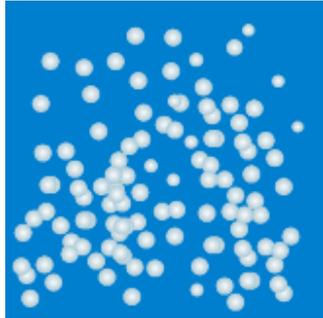
Universidad de Chile
Departamento de Geofísica

Introducción a la Meteorología

Termodinámica Atmosférica (Leyes Td + Humedad)

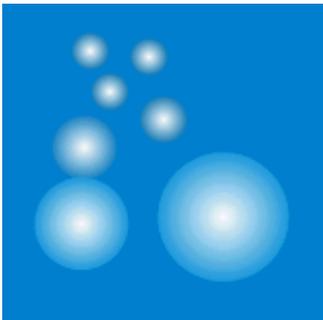
Prof. René Garreaud
www.dgf.uchile.cl/rene

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

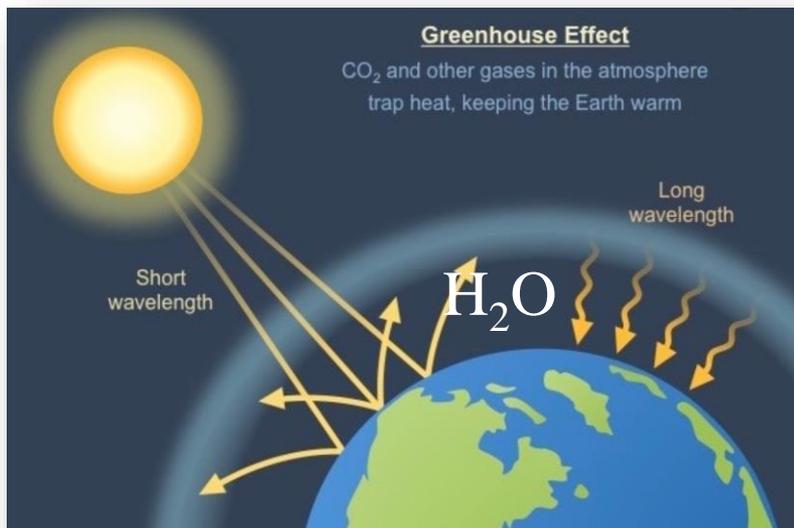
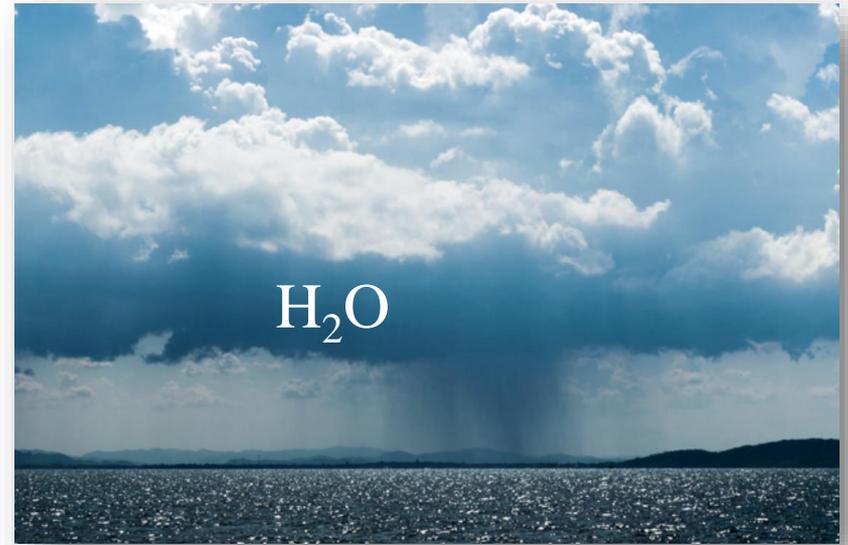


Cristales de hielo o nieve (Fase sólida)

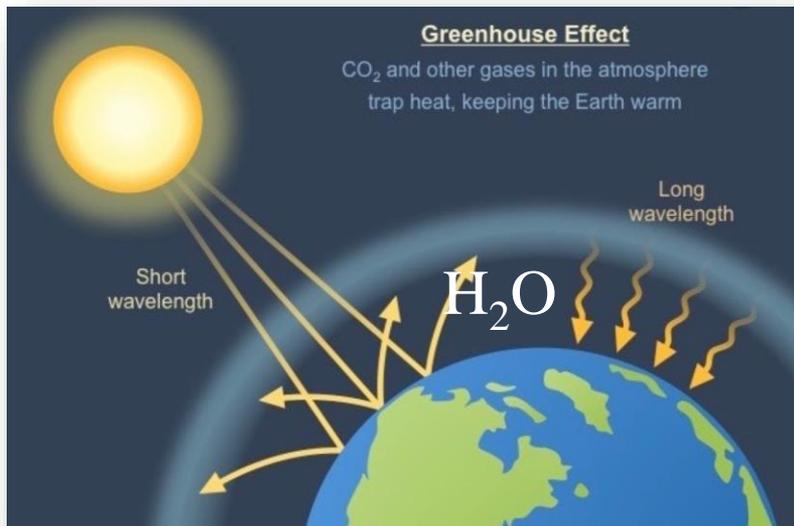
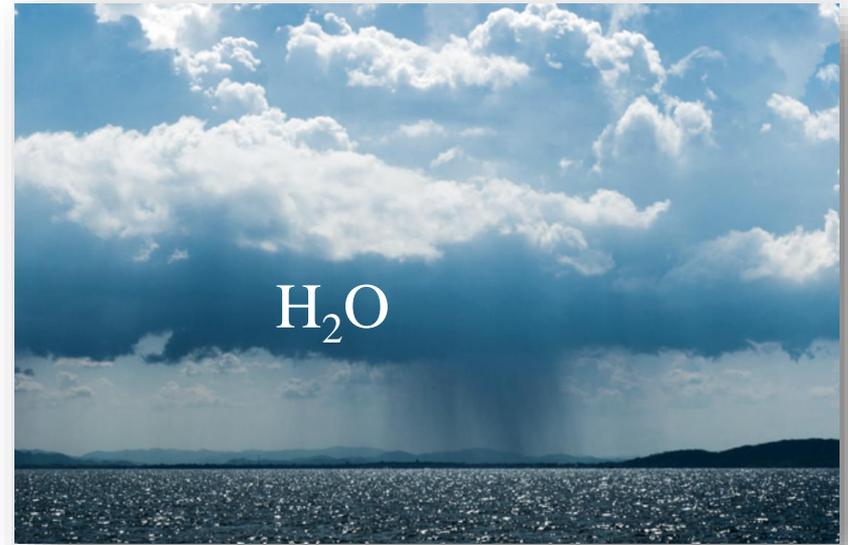
Estructura ordenada o desordenada

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?



Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

I. Leyes fundamentales de los gases

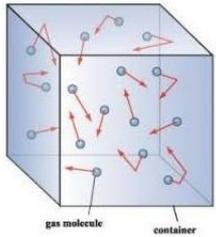
- Ecuación de estado gases ideales
- Conservación de Energía (1er Ppio. Td)
- Ecuación Hidrostática
- Ley de Dalton

II. Humedad Atmosférica

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

III. Procesos Termodinámicos

- Procesos Adiabático seco
- Procesos Adiabático saturado
- Estabilidad Atmosférica



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 ρ es la densidad del aire y $[v]$ es la velocidad media

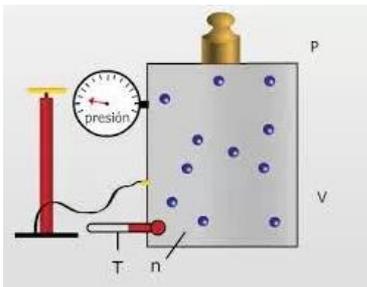
Empleando **mediciones macroscópicas** se obtiene una relación aproximada (gas ideal) entre presión de un gas, su temperatura (T) y volumen (V):

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

donde R^* es la constante universal de los gases ($=8.31 \text{ J/Mol/K}$) y M es la masa molecular (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

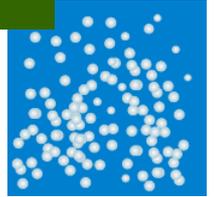
$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n n_i \frac{RT}{V}$$

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 ρ_v



Parámetros de Humedad Atmosférica

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

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

[q] = gr vapor / kg de aire seco

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

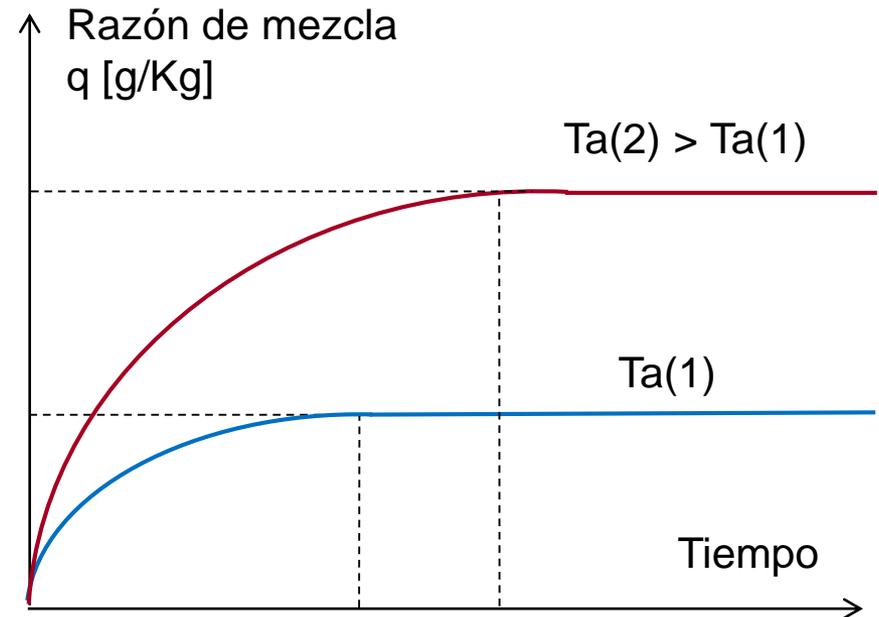
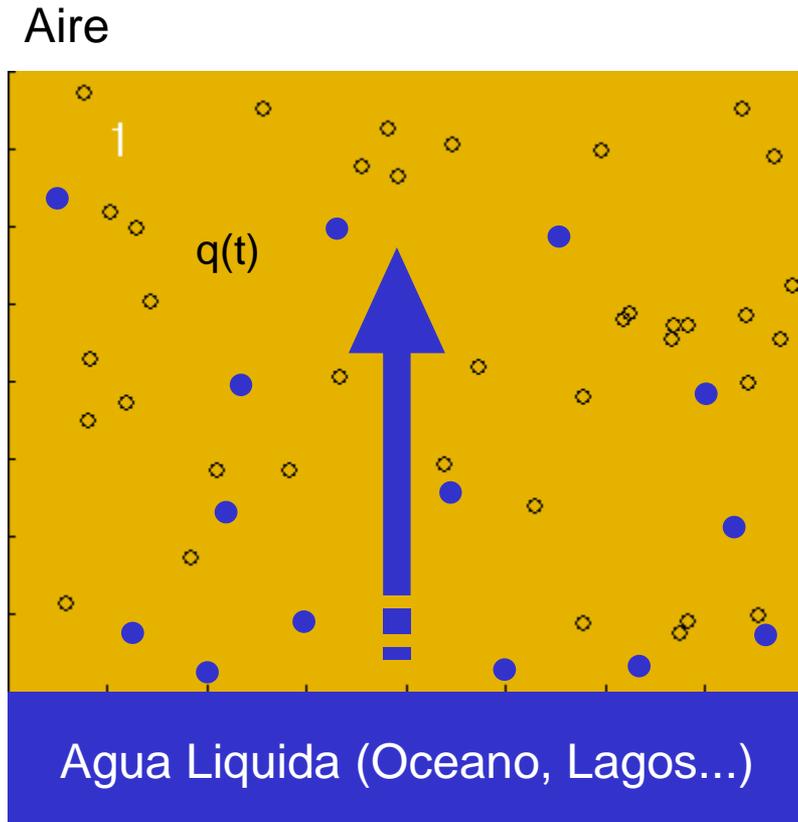
- **Humedad absoluta = densidad del vapor (Masa/Volumen)**

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

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

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

Las moléculas de vapor de agua pasan desde la superficie de cuerpos de agua hacia la atmósfera. Este proceso se denomina evaporación.



La evaporación es rápida cuando el aire es seco, la temperatura (Ta) es alta y el viento es fuerte.

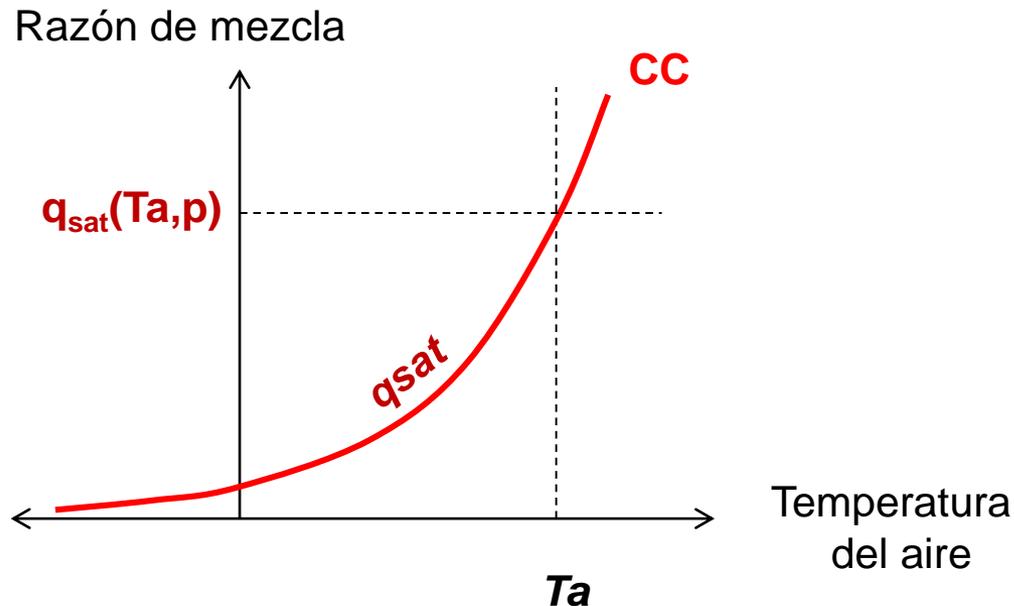
Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Si la evaporación continua, la razón de mezcla aumenta y llegara un momento en que el aire no puede contener mas vapor de agua y comienza la formación de gotas.

Esa condición se denomina estado de **saturación**. El valor de q en ese estado se denomina como razón de mezcla de saturación (q_{sat}).

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



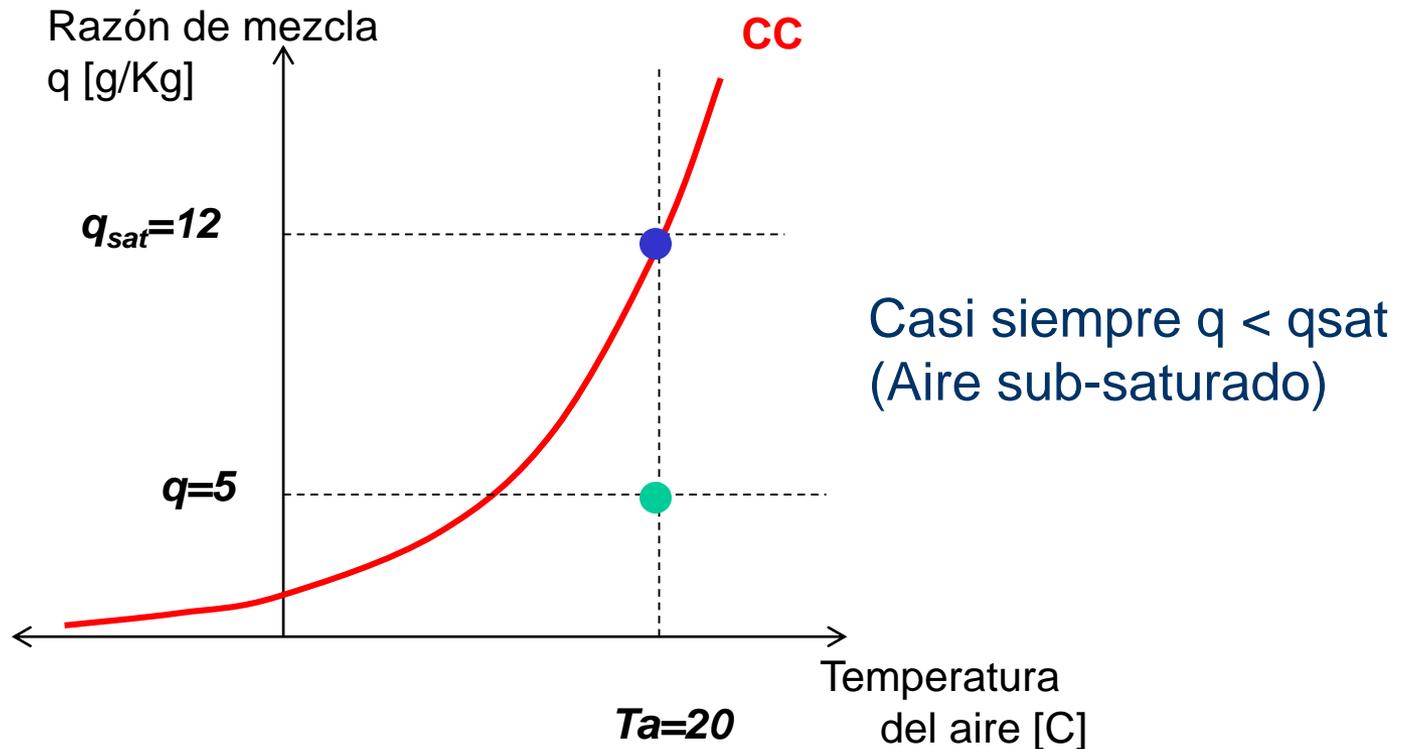
Introducción a la Meteorología – Termodinámica

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.

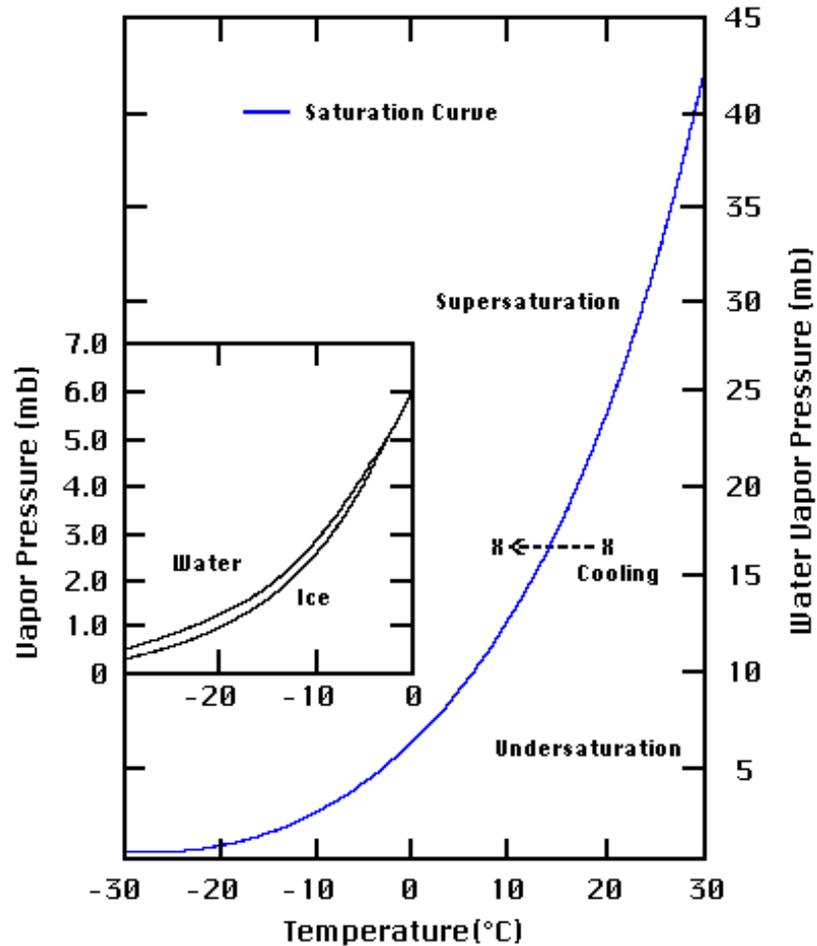
Ambos valores pueden ser dibujados en el grafico T - q :



Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

The vapor pressure of ice and water
between -30° and 30° (mb = millibar).
(Berner and Berner 1987)



Calculo de razón de mezcla de saturación:

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

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

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....

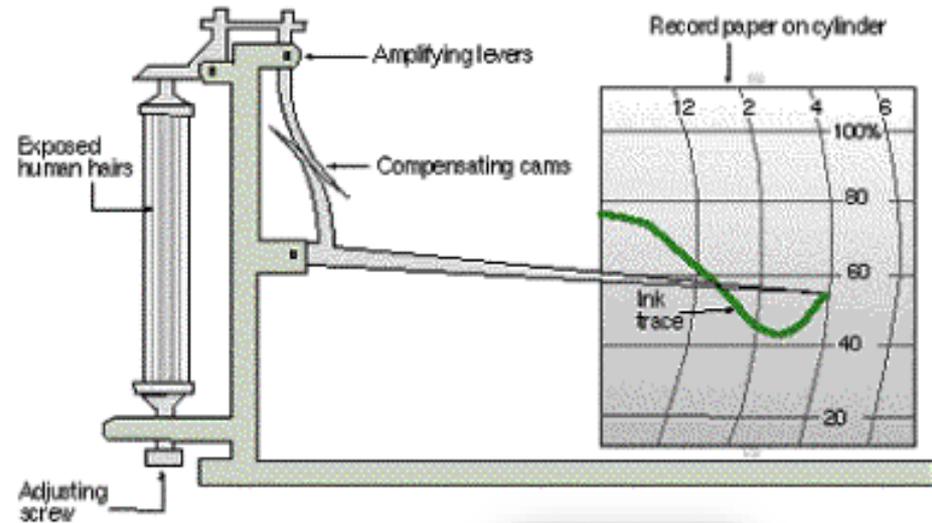
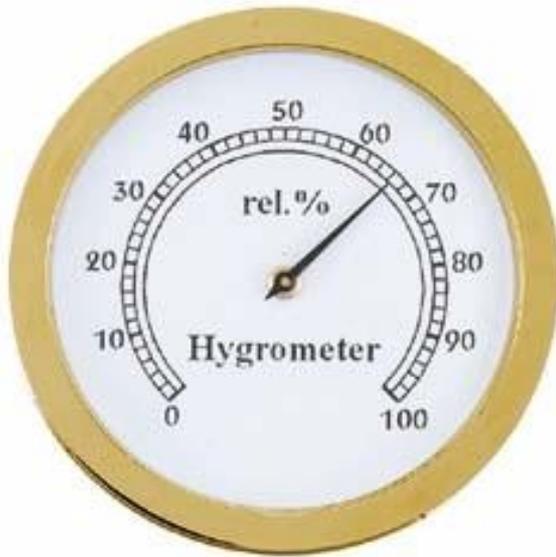
Notar que HR es función de q (contenido de vapor) Y de la temperatura, por lo cual HR no es un buen indicador de la cantidad de vapor de agua en el aire:

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

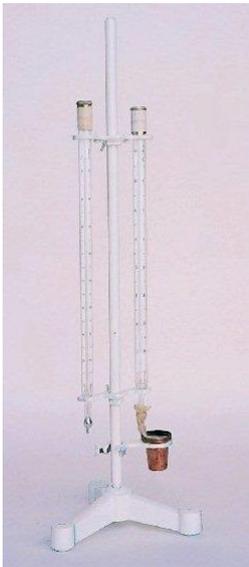
Sin embargo, la humedad relativa es una cantidad fácilmente medible a través de higrómetros, en los cuales un material (e.g., cabello humano) responde a cambios de humedad relativa.



© 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

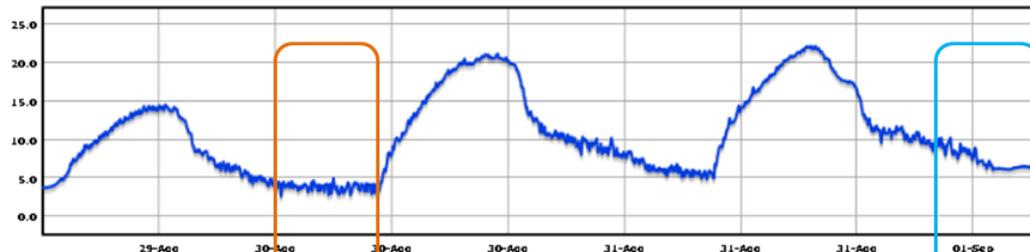
S/01 kt

W/01 kt

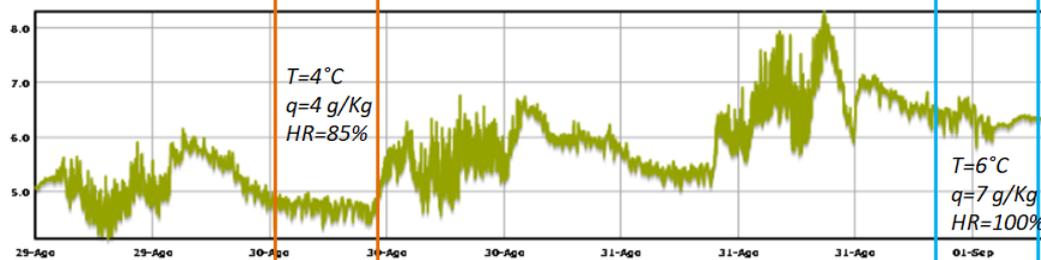
0.1 mm

Gráficos últimas 24 Horas

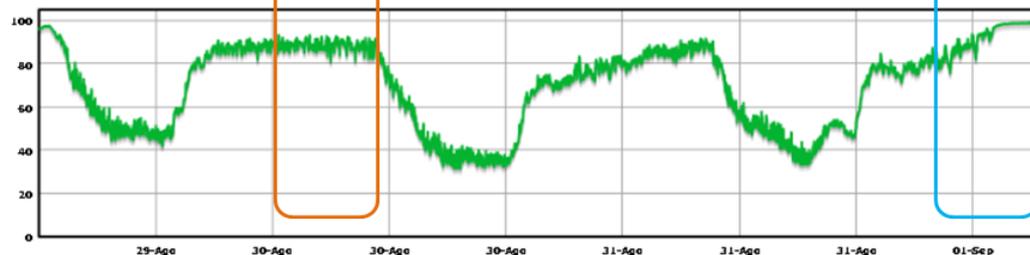
Temperatura en °C



Razón de Mezcla de Vapor (gr / Kg)



Humedad en %



Introducción a la Meteorología – Termodinámica

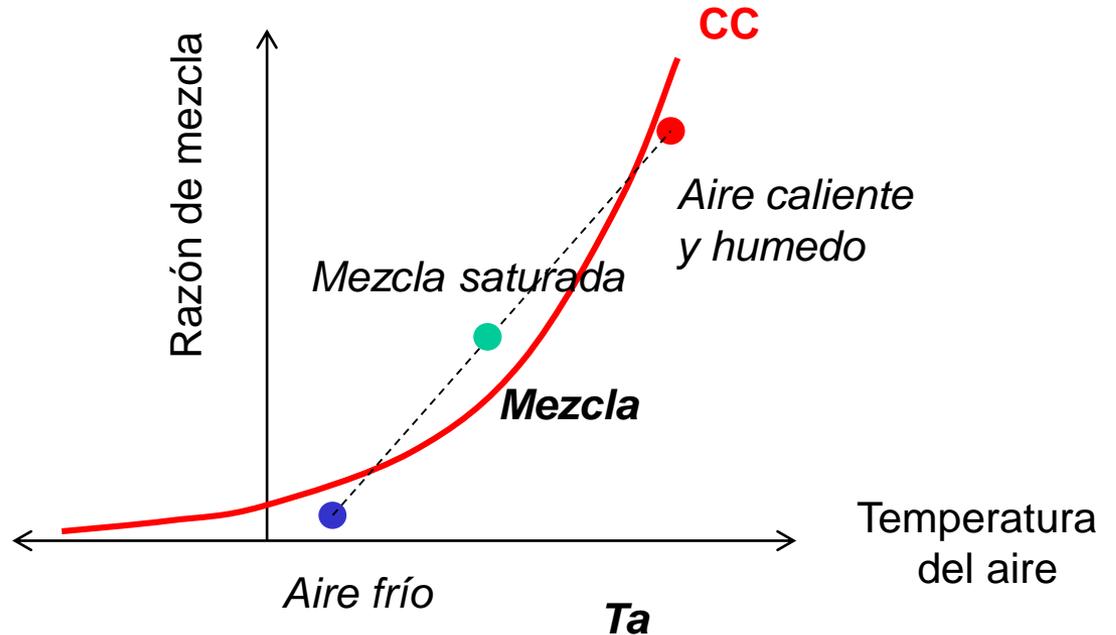
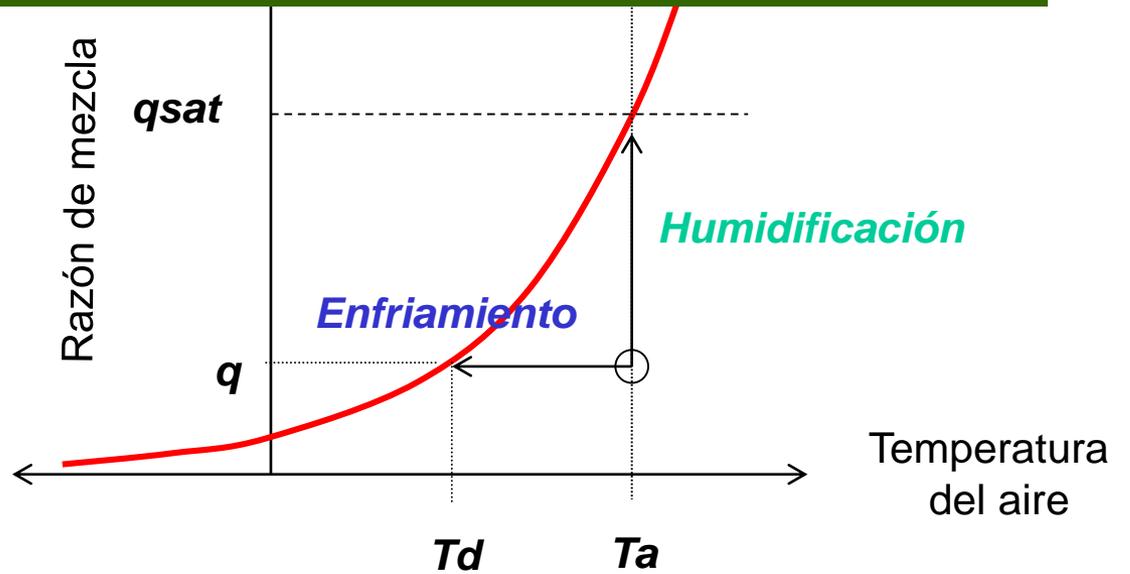
UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

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_{sat})
3. Mezcla de dos masas de aire subaturadas, pero cercanas a la saturación

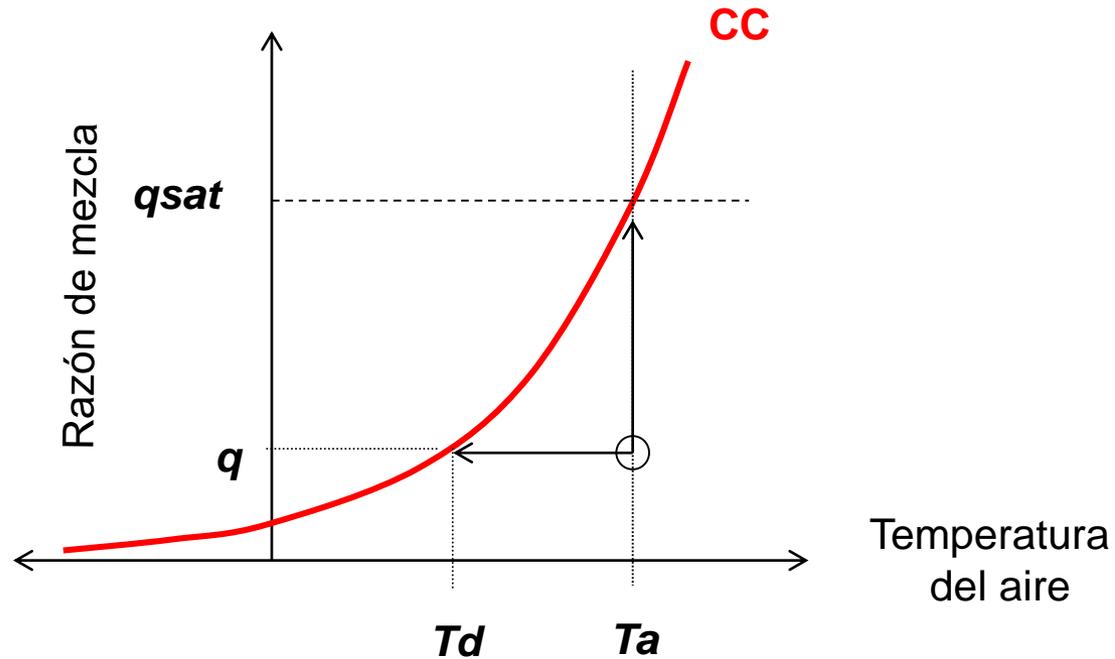
Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



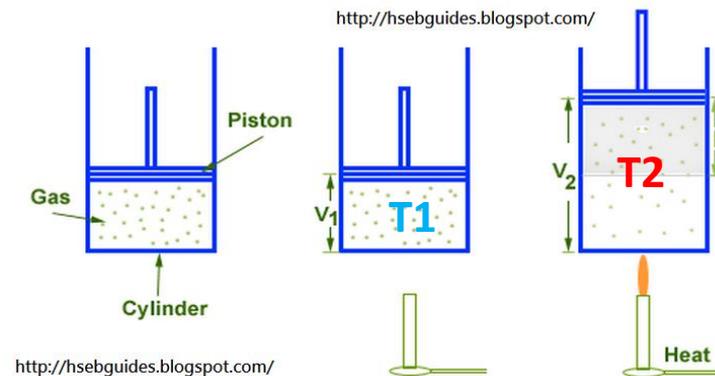
Otra parámetro que indica el grado de humedad del aire es la **temperatura del punto de rocío** (T_d): valor al cual hay que enfriar el aire para que sature.

Material Adicional

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

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

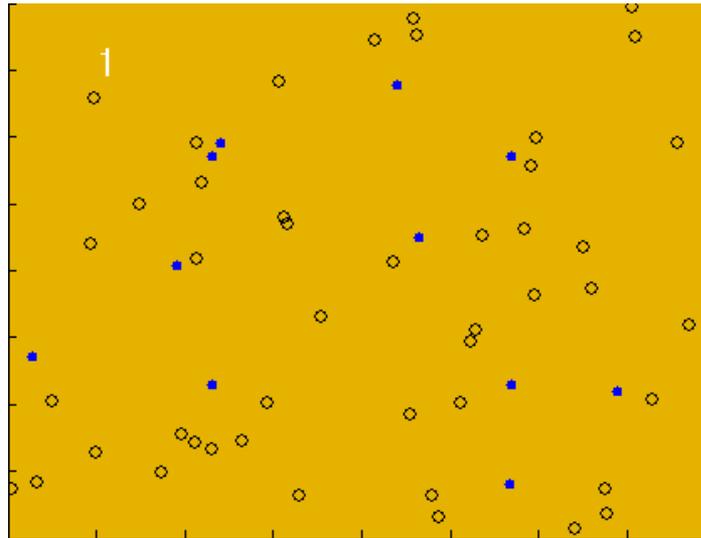
Introducción a la Meteorología – Termodinámica

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Interpretación simple de la ley de Clausius-Clapeyron

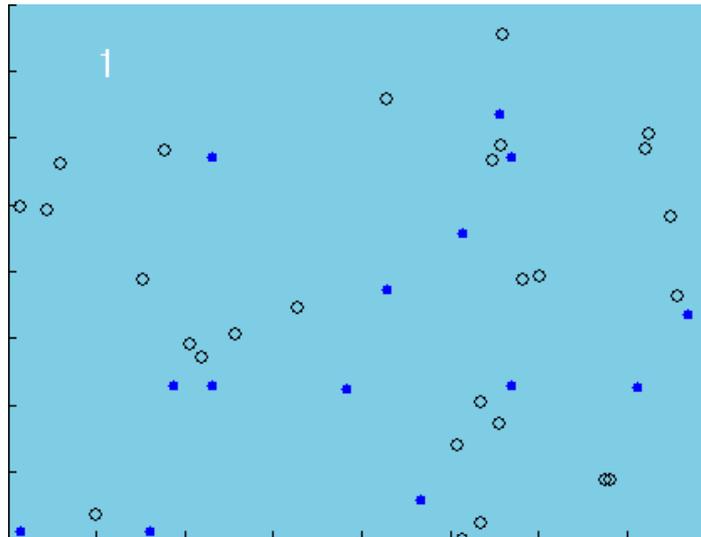
Moléculas

- O₂, H, etc...
- H₂O Vapor
- H₂O Líquido



Temperatura del aire: 22°C

Moléculas se mueven rápido y choques de H₂O vapor no logran formar una gota



Temperatura del aire: 5°C

Moléculas se mueven lento y choques de H₂O 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)

