

## Clase 4

# Agua en la Atmósfera (+ nubes + precipitación)

Otoño 2007

## Preguntas claves

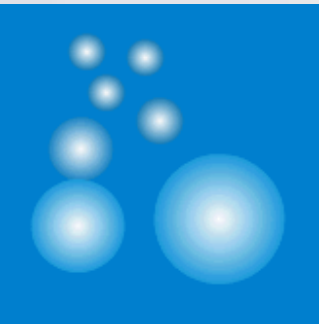
1. ¿Cuanta agua hay en la aire?
2. ¿Cómo se satura el aire?
3. ¿Por qué se forman las nubes?
4. ¿Qué determina la altura de las nubes?
5. ¿Cuánto pesa una nube?
6. ¿Cómo se forma la lluvia/granizo/nieve?

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



**Vapor de agua (Fase gaseosa)**

Invisible debido a su tamaño muy pequeño



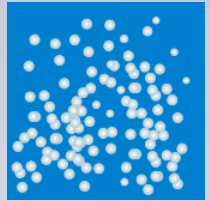
**Gotas de nube o lluvia (Fase líquida)**

Diferentes tamaños 0.001 mm - 1 cm



**Cristales de hielo o nieve (Fase sólida)**

Estructura ordenada o desordenada



## 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 específica = Masa vapor de agua / Masa de aire**

[H] = gr vapor / kg de aire

Notar que  $H < q$ , pero  $H \sim q$

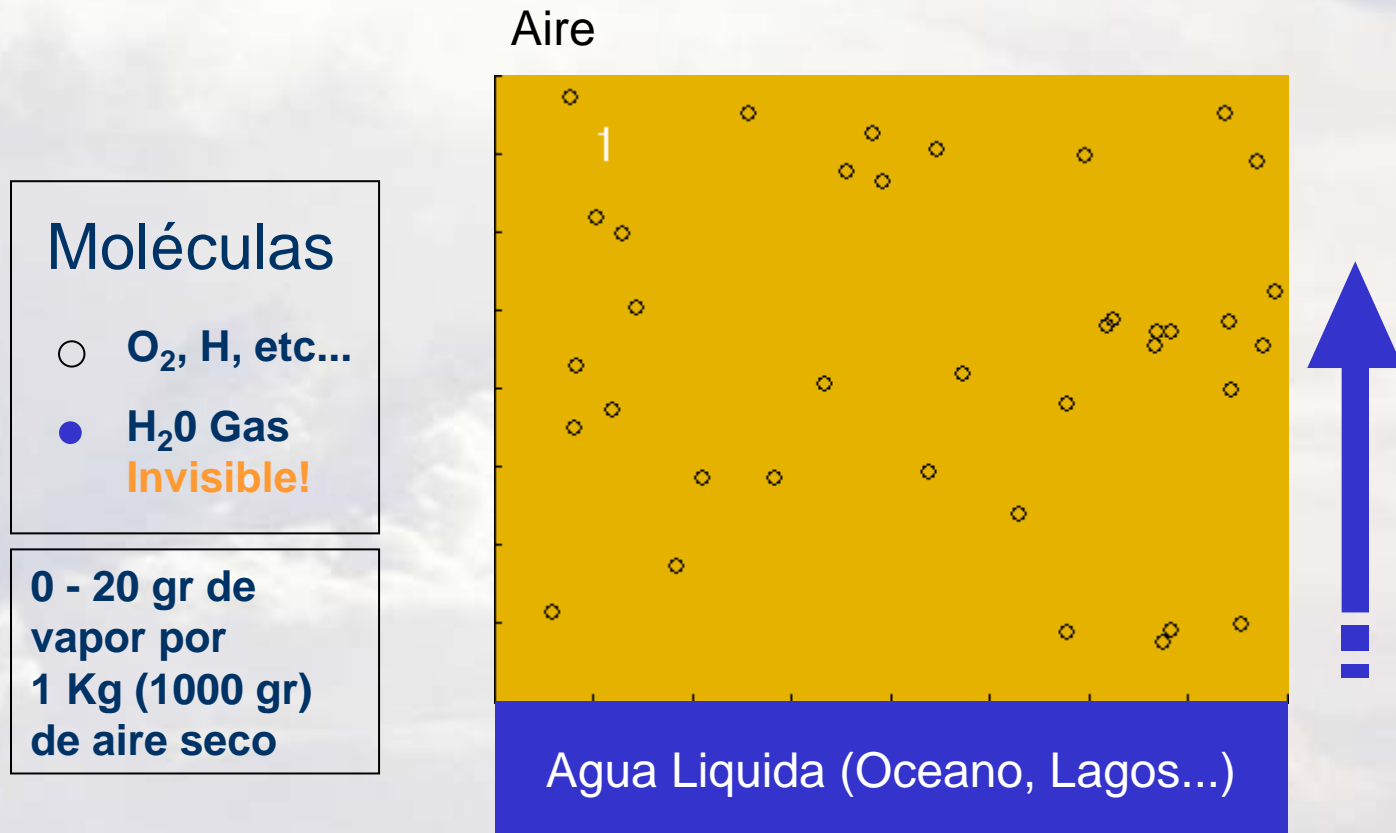
- **Humedad absoluta = densidad del vapor (Masa/Volumen)**

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

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**.

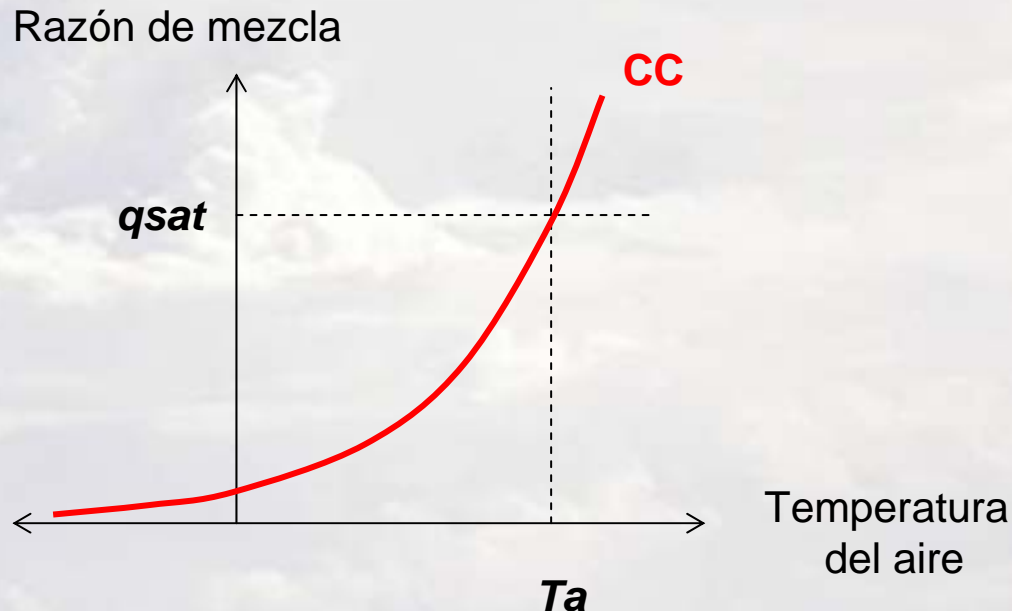


La evaporación es rápida cuando el aire es seco, la temperatura es alta y el viento es fuerte.

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:

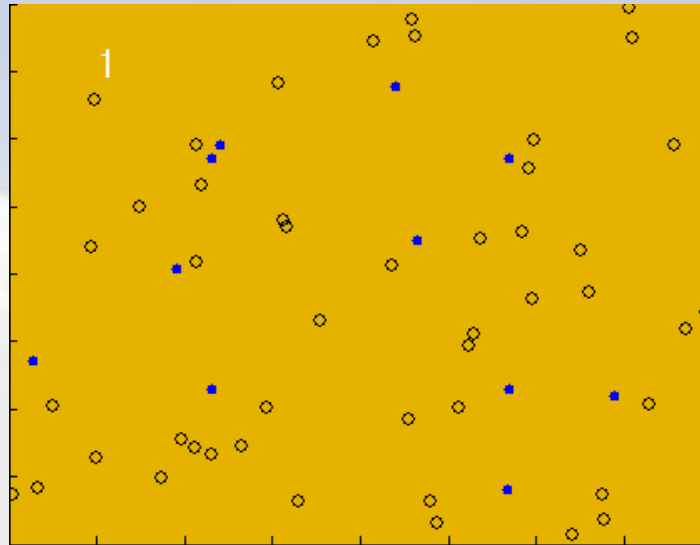




Interpretación simple de la ley de Clausius-Clapeyron

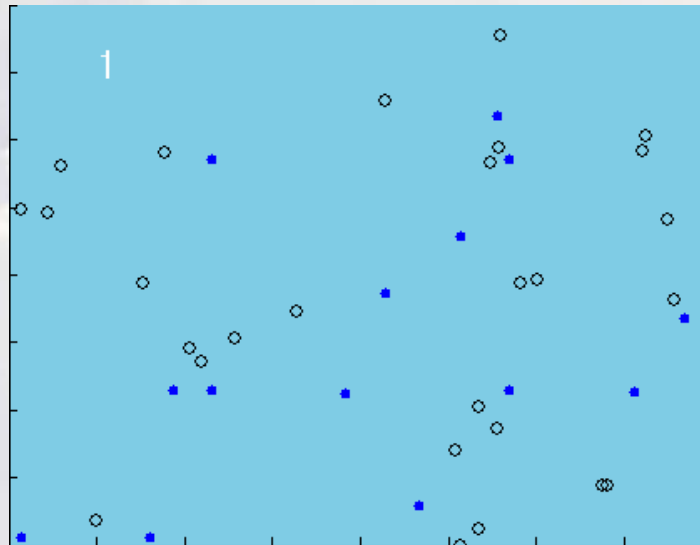
## Moléculas

- 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

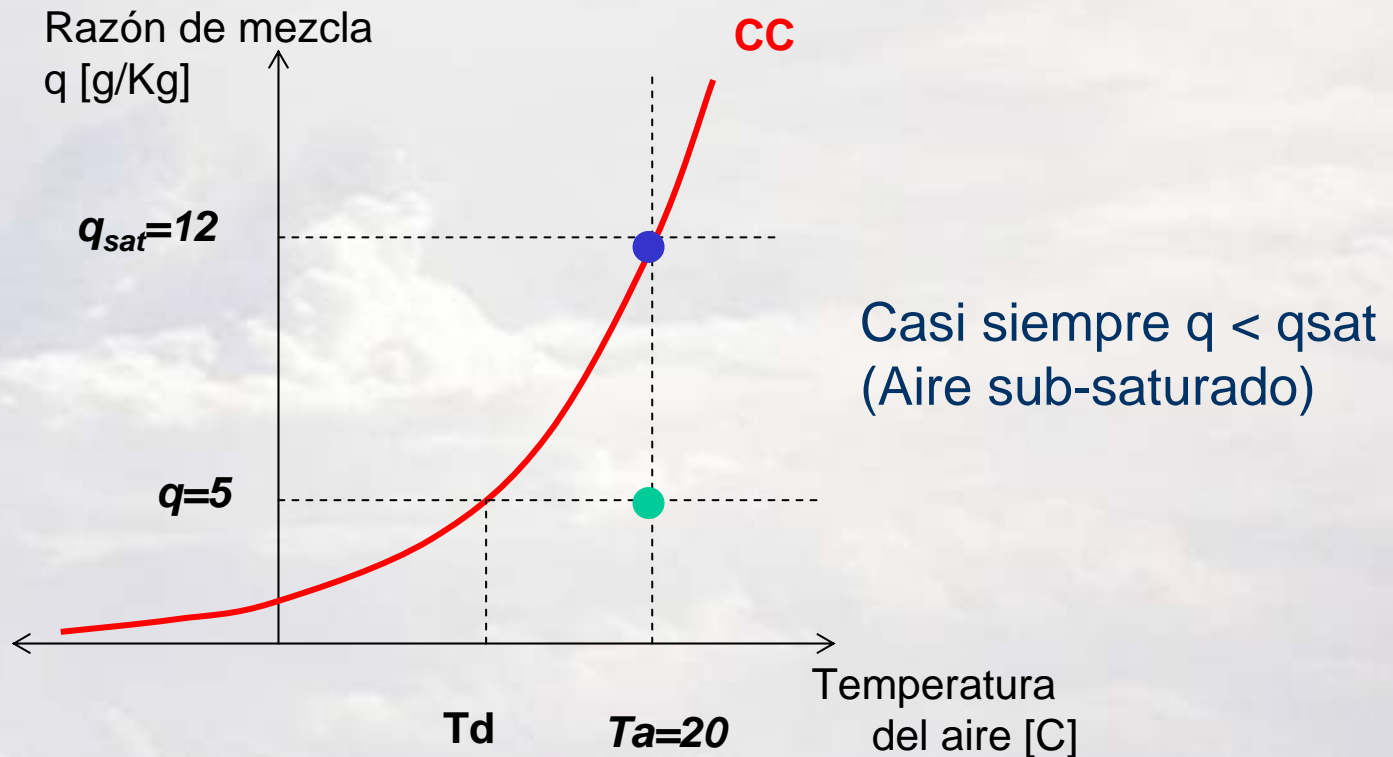
Moléculas se mueven lento y choques de H<sub>2</sub>O vapor si logran formar una gota:

**Condensación**

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:

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

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

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

$$e_{\text{sat}} = 23.4 \text{ hPa}$$

$$q_{\text{sat}} = 15.7 \text{ g/Kg}$$

## 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....

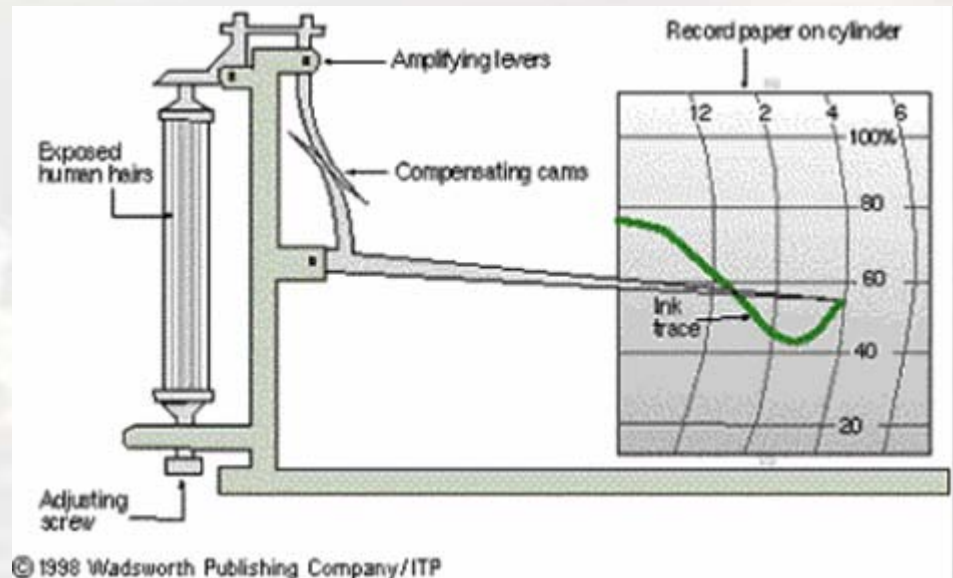
Notar que HR es función de q (contenido de vapor) Y de la temperatura, por lo cual HR no es un buen indicador de la cantidad de vapor de agua en el aire:

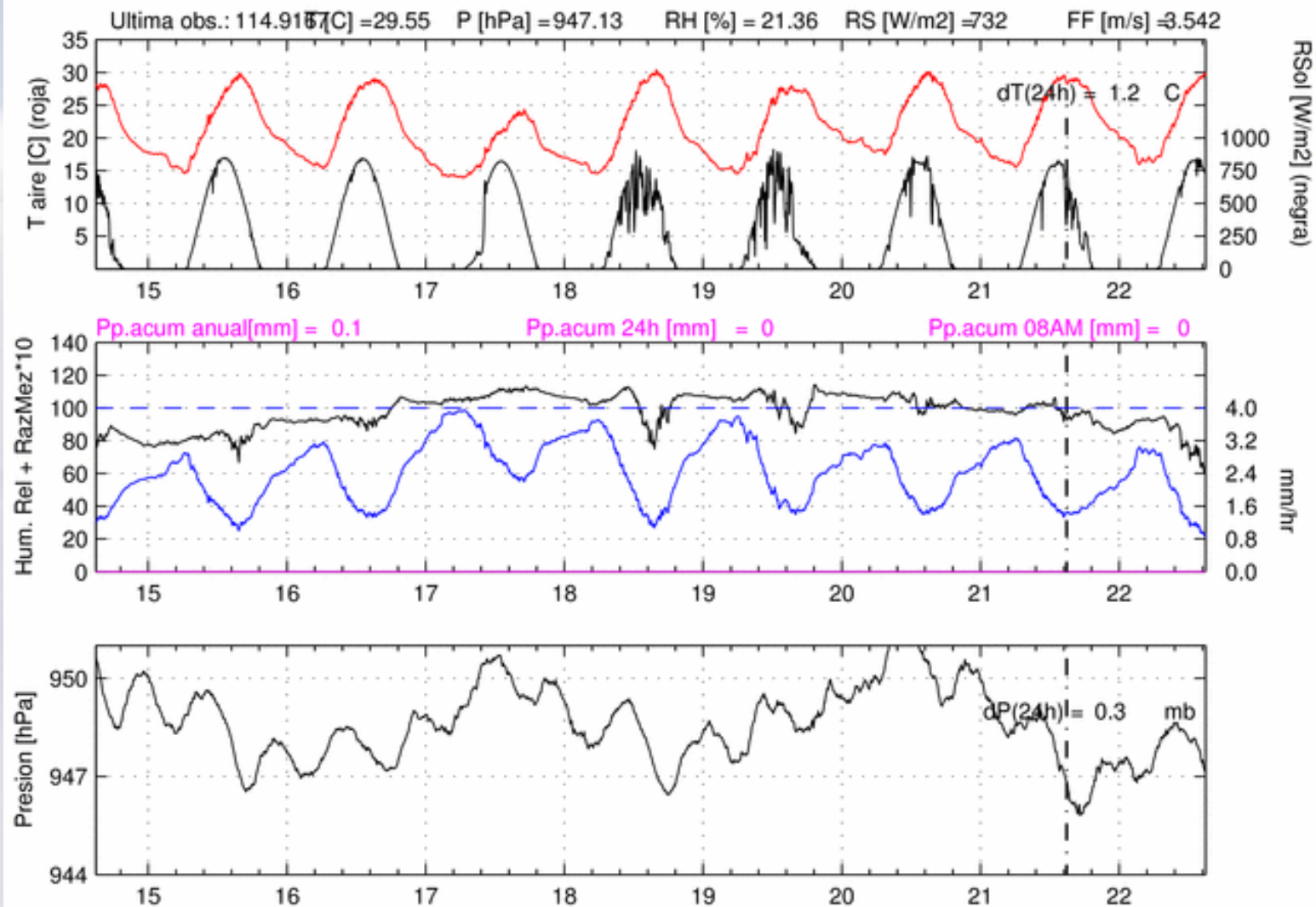
HR=70%, T=20°C, p=950 hPa → q = 11.0 g/Kg

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 higrometros, en los cuales un material (e.g., cabello humano) responde a cambios de humedad relativa.

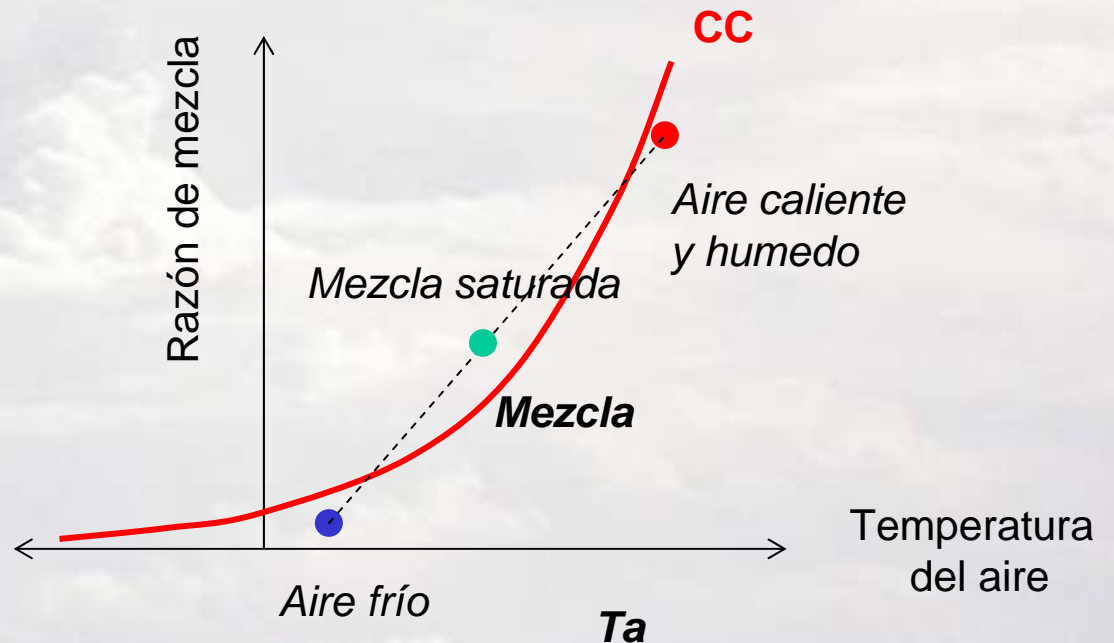
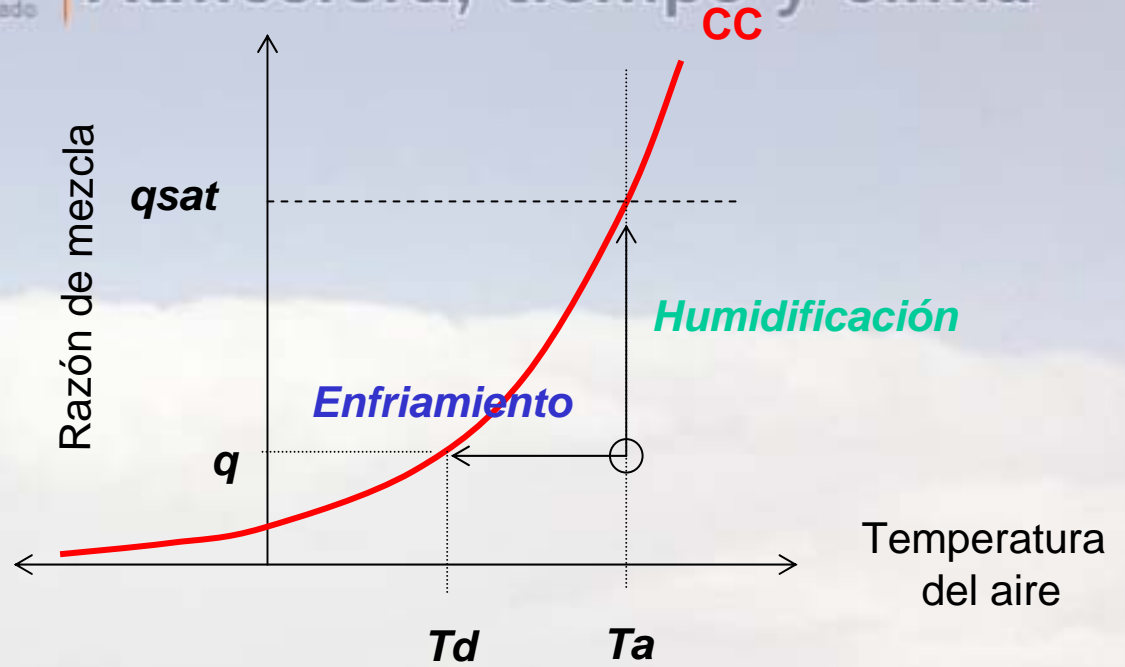




La saturación de aire puede alcanzarse en la atmósfera a través de tres mecanismos:

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









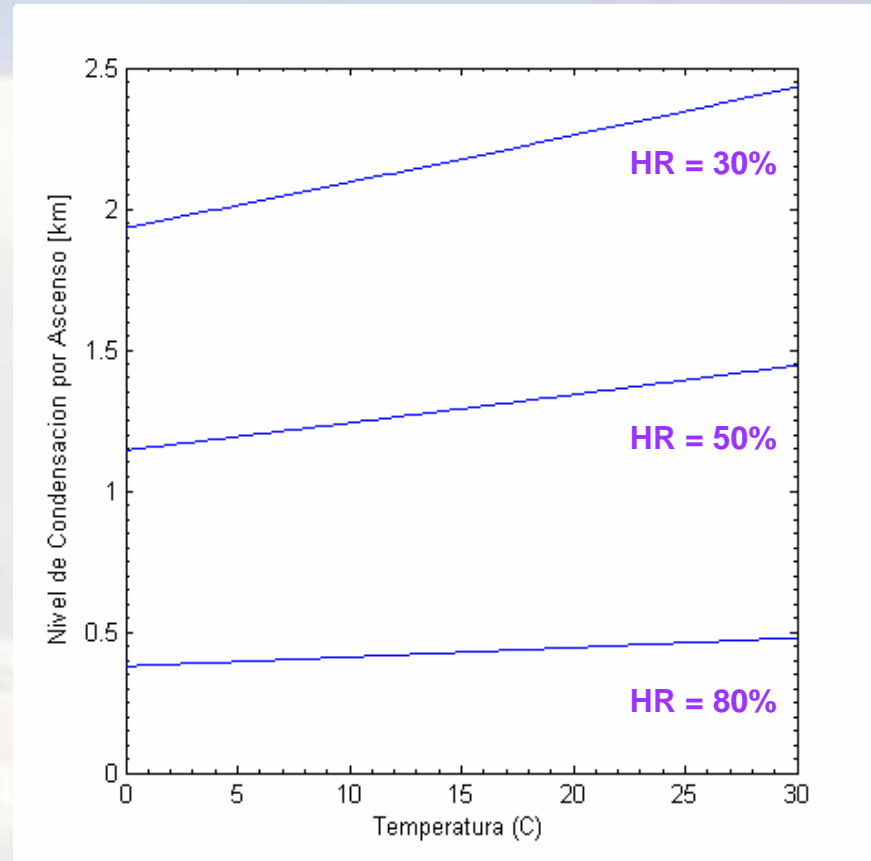
Con excepción del caso de las nieblas y neblinas, casi todas las nubes que observamos se debe al enfriamiento de masas de aire producto del ascenso de esta últimas...

¿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)

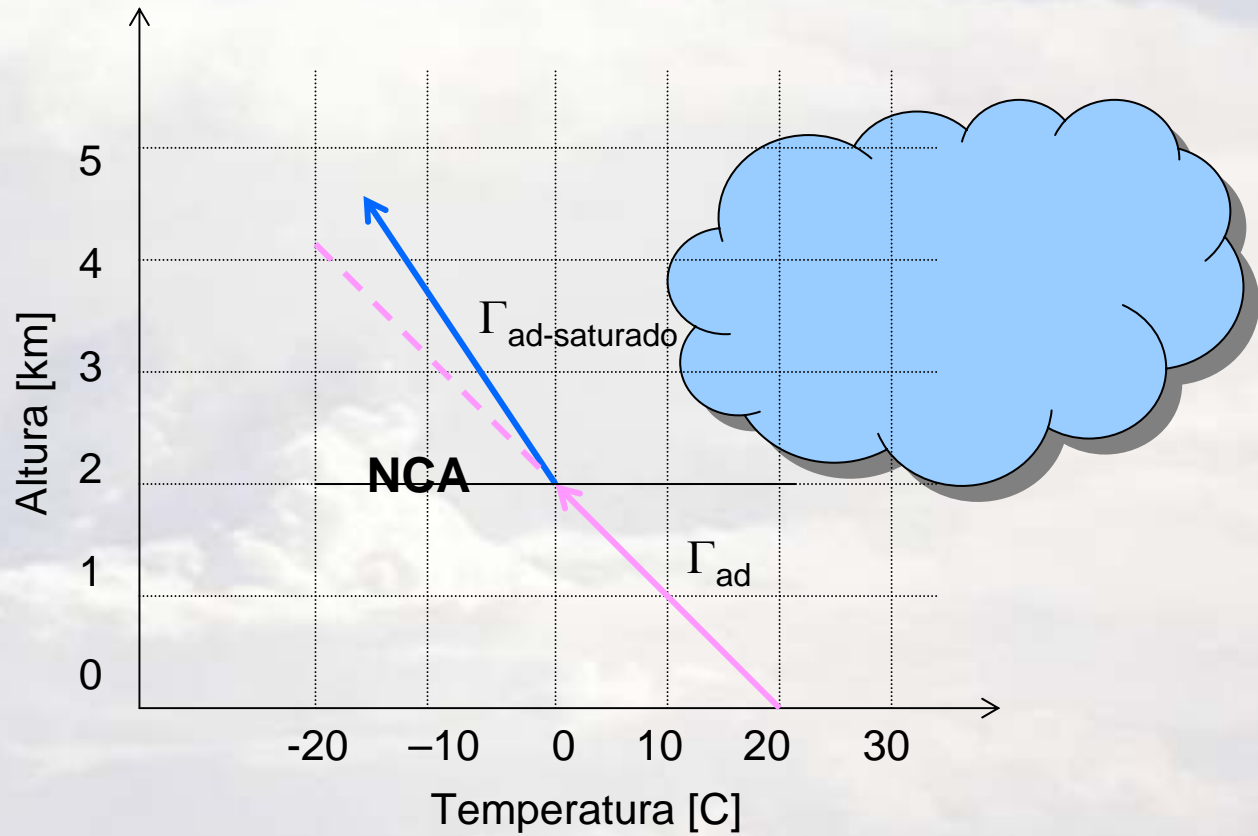


Una vez que la parcela alcanza su NCA, el vapor de agua se comienza a convertir en agua líquida. Este proceso libera calor dentro de la parcela.

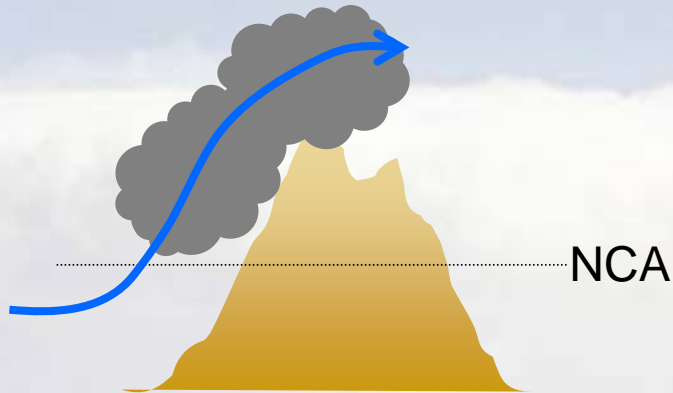
Si el ascenso continúa, la parcela se continuara enfriando, pero a una tasa menor que el gradiente adiabático (seco). En este caso:

$$G_{\text{adiabático saturado}} \cong +6.5 \text{ } ^\circ\text{C/km}$$

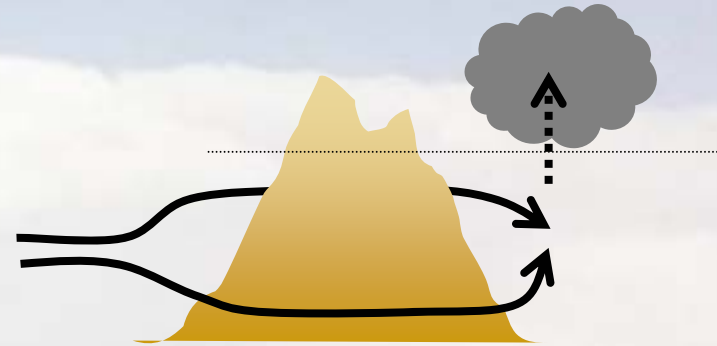
Esto es, por cada kilómetro de ascenso (descenso) la temperatura de la parcela disminuye (aumenta) en  $6.5^\circ\text{C}$ .



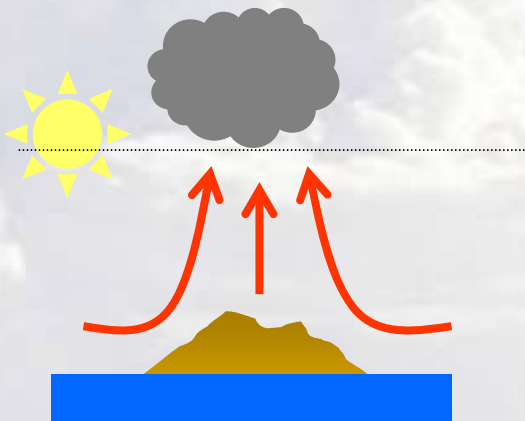
## Mecanismos de ascenso en la atmósfera



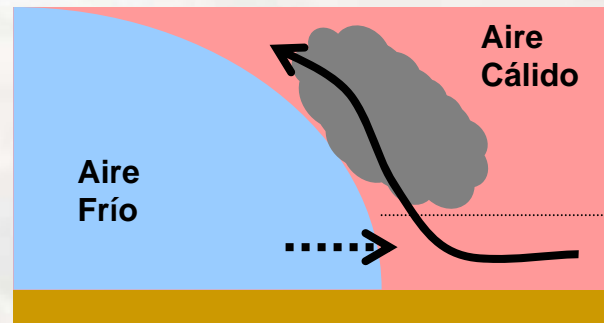
(a) Ascenso Orográfico



(b) Convergencia Orográfica



(c) Ascenso Convectivo



(d) Ascenso Frontal

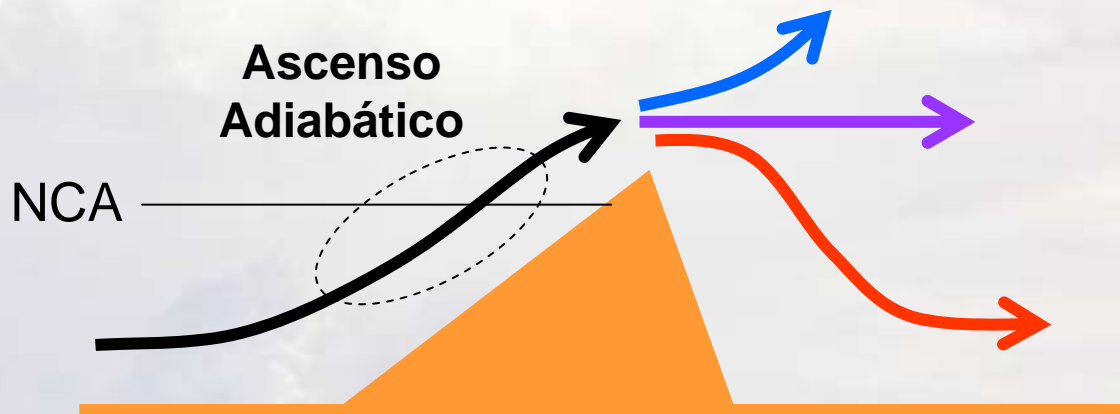
## Mecanismos de ascenso en la atmósfera





**El NCA (que depende de la T y HR inicial del ascenso) indica la base de la nube...pero donde estara su tope?**

La extensión vertical y tipo de nube esta determinado por la estabilidad de la atmósfera



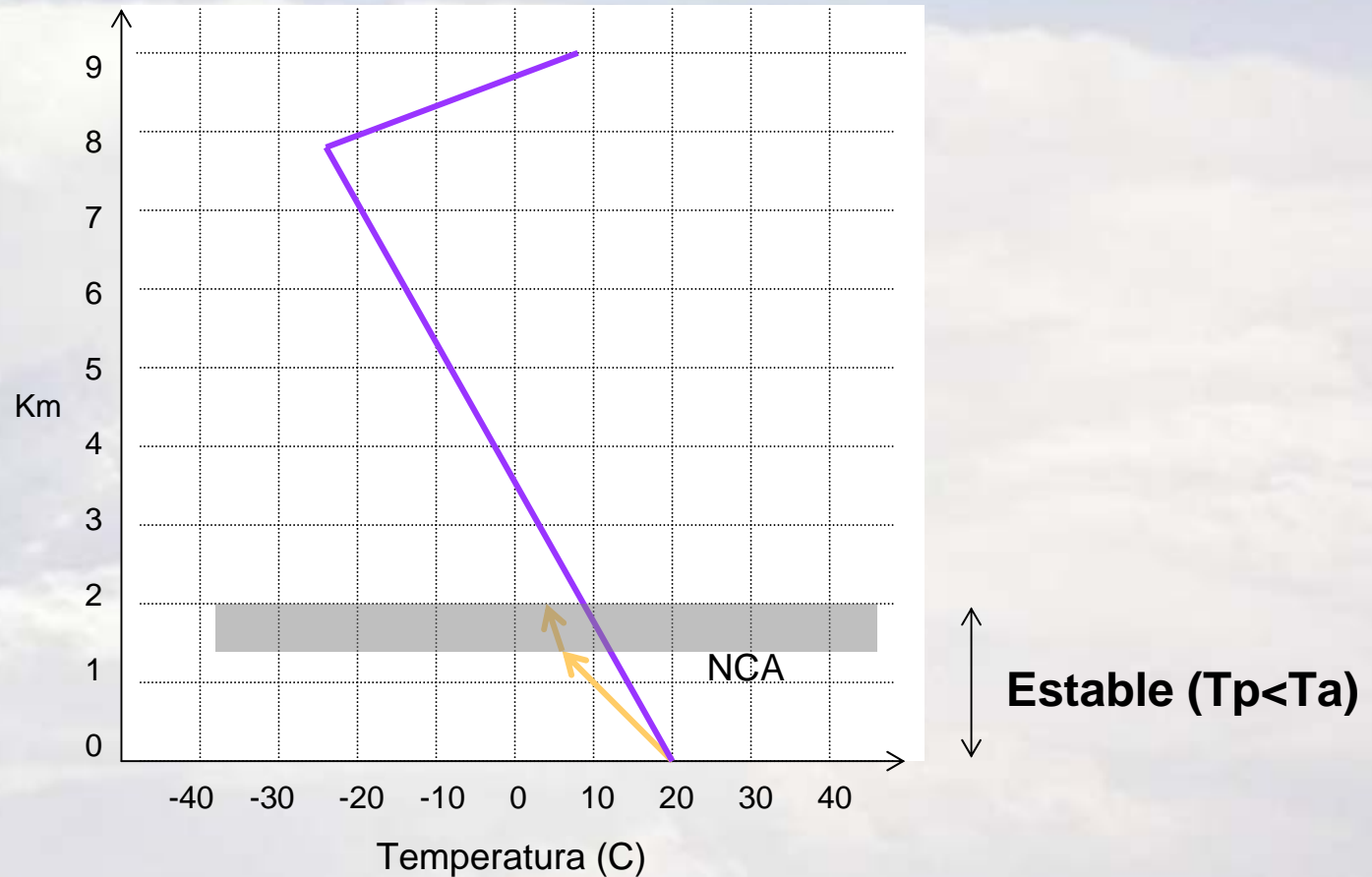
El movimiento puede ser:

**Estable** → Parcela tiende a volver a su nivel inicial

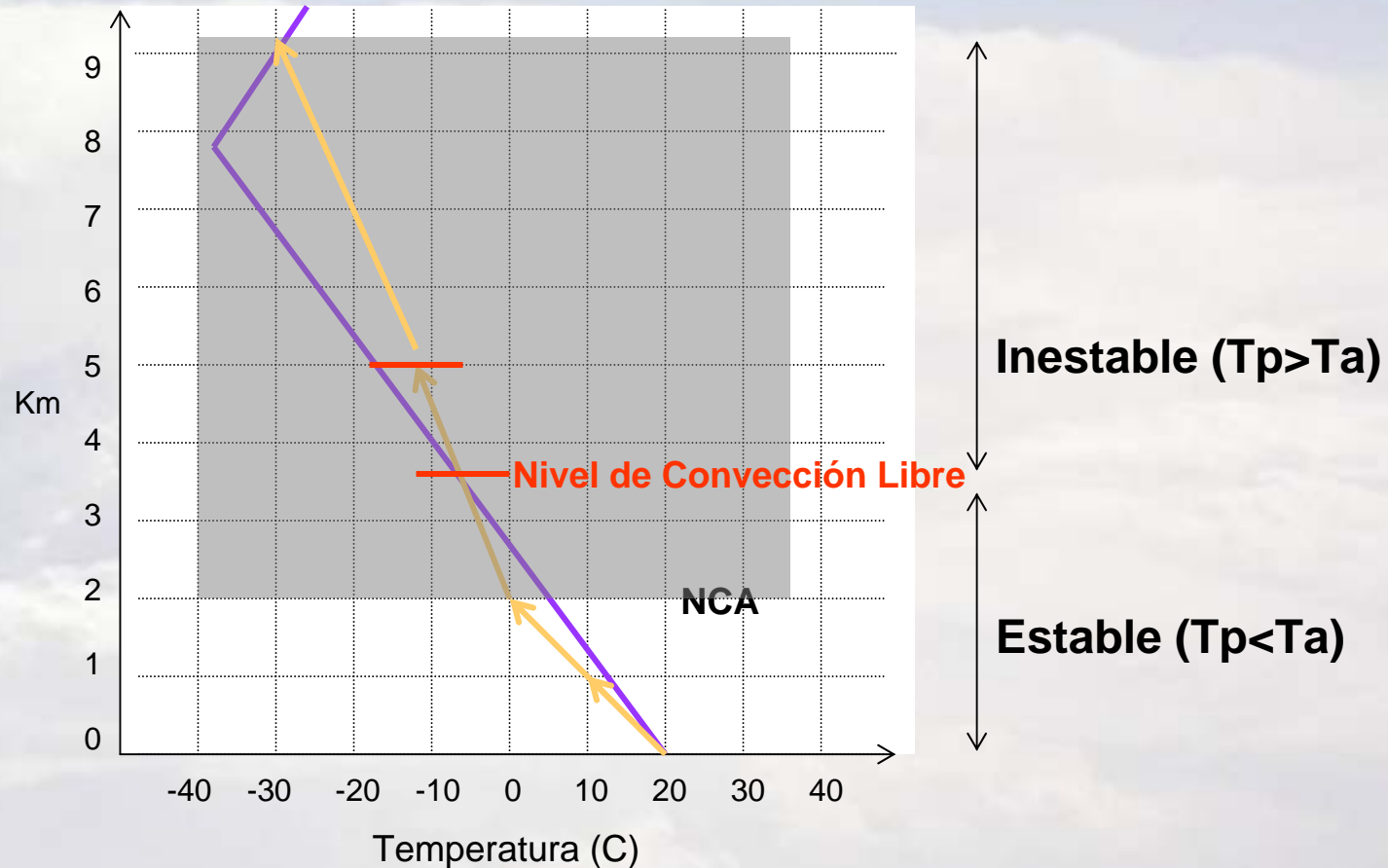
**Inestable** → Parcela continua subiendo (sin necesidad de forzamiento)

**Neutro** → Parcela se mantiene al nivel que quedo

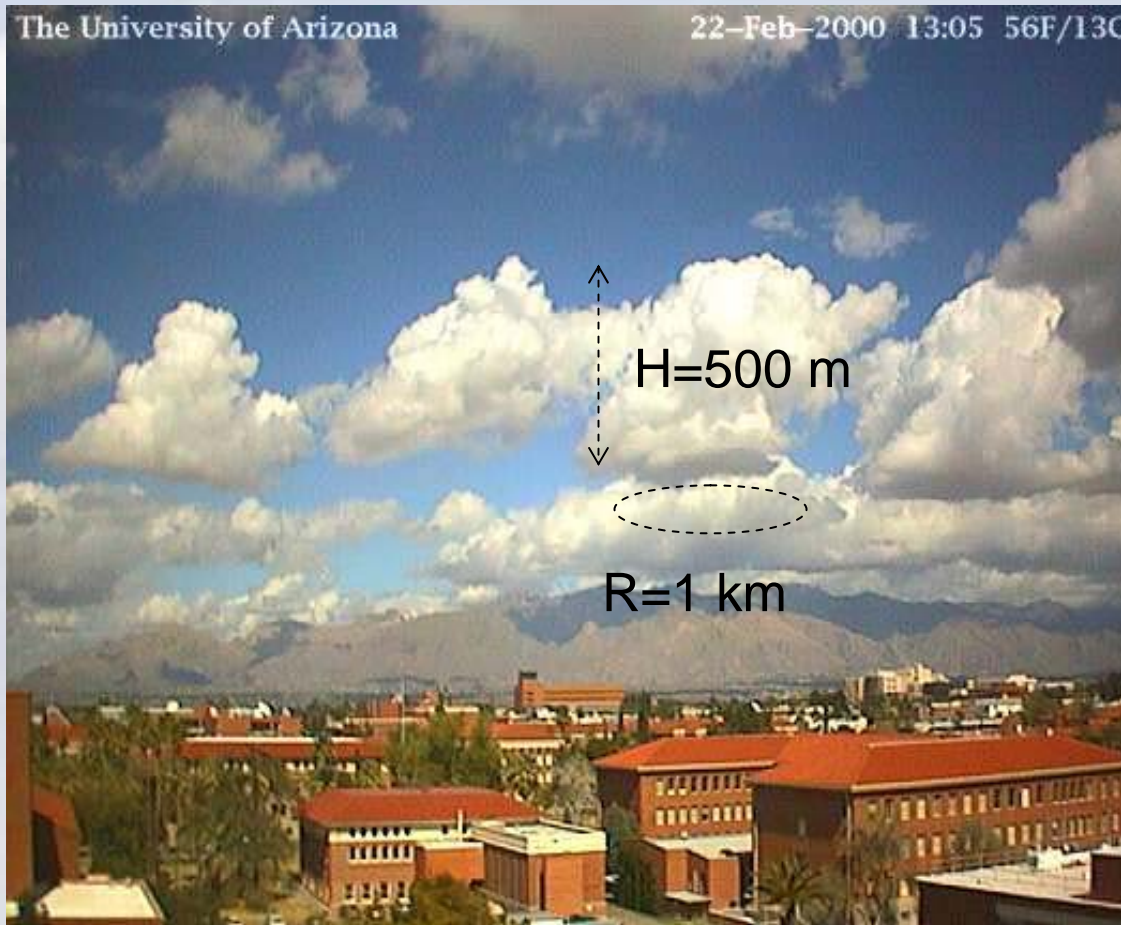
Ejemplo 1: Aire en superficie (con NCA a 1.5 km) es levantado por ascenso orografico hasta los 2 km → stratus



Ejemplo 2: Aire en superficie (con NCA a 2 km) es levantado por ascenso frontal hasta los 5 km → Nimbo



¿Cuanto pesa una nube? ¿Cuánta agua tiene?  
Expresar en términos de un camión y 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>

Volumen de una gota =  $\frac{4}{3} \pi r^3 = 4e^{-15} \text{ m}^3$

Masa de una gota = densidad \* Volumen =  $4e^{-12} \text{ kg}$

Masa de todas las gotas en  $1 \text{ cm}^3 = 100 * M = 4e^{-10} \text{ kg}$

Masa de todas las gotas en  $1 \text{ m}^3 = 4e^{-10} \text{ kg} * 1e^6 \text{ m}^3 = 4e^{-4} \text{ kg/m}^3$

Masa de todas las gotas en  $1 \text{ m}^3 = 0.4 \text{ g/m}^3$

Volumen de la nube =  $A * H = (\pi * R^2) * H = 1.6 e^{+9} \text{ m}^3$

Masa de agua en la nube =  $M_t * V_n = 4e^{-4} \text{ kg/m}^3 * 1.6e^{+9} \text{ m}^3 = 6e5$   
kg

600 toneladas!

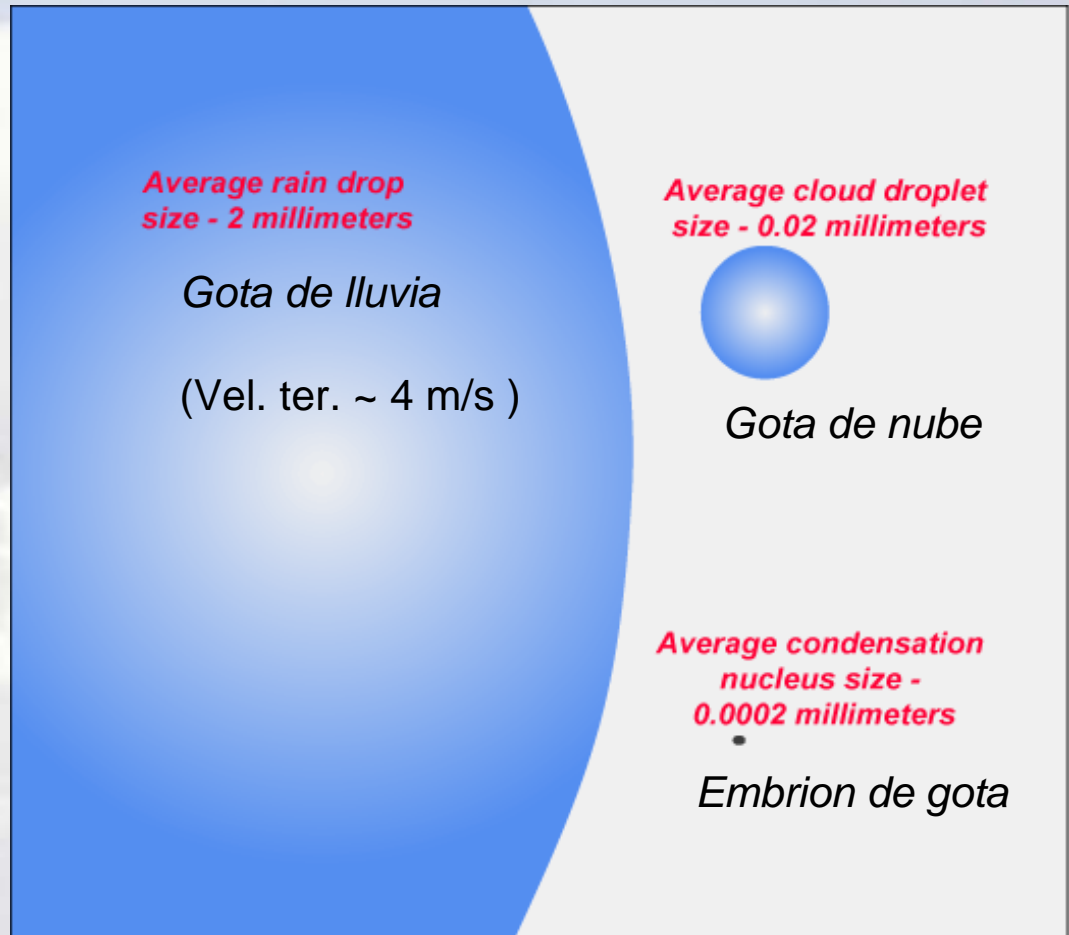
Volumen de agua contenido en la nube =  $6e5 \text{ kg} / (1000 \text{ kg/m}^3) =$   
 $600 \text{ m}^3$

Si distribuimos toda esa agua en el area basal de la nube,  
la lamina de agua resulta =  $600 \text{ m}^3 / (\pi * R^2) = 0.2 \text{ mm}$



Regresemos al mundo microscópico...como se forman las nubes?

Una vez alcanzada la saturación comienzan a formarse “embriones” de gotas sobre los **Núcleos de Condensación** (aerosoles higroscópicos)....





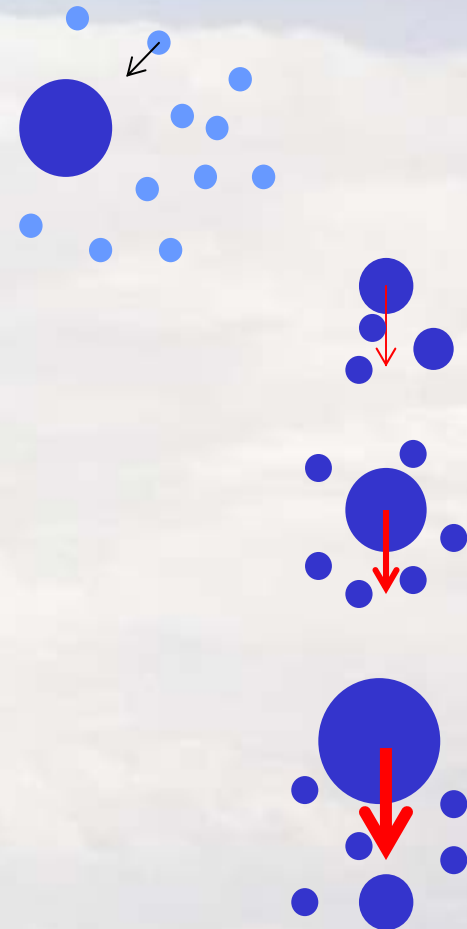
**Fuentes de  
Aerosoles  
(solo una  
facción de  
ellos actúan  
como NC)**



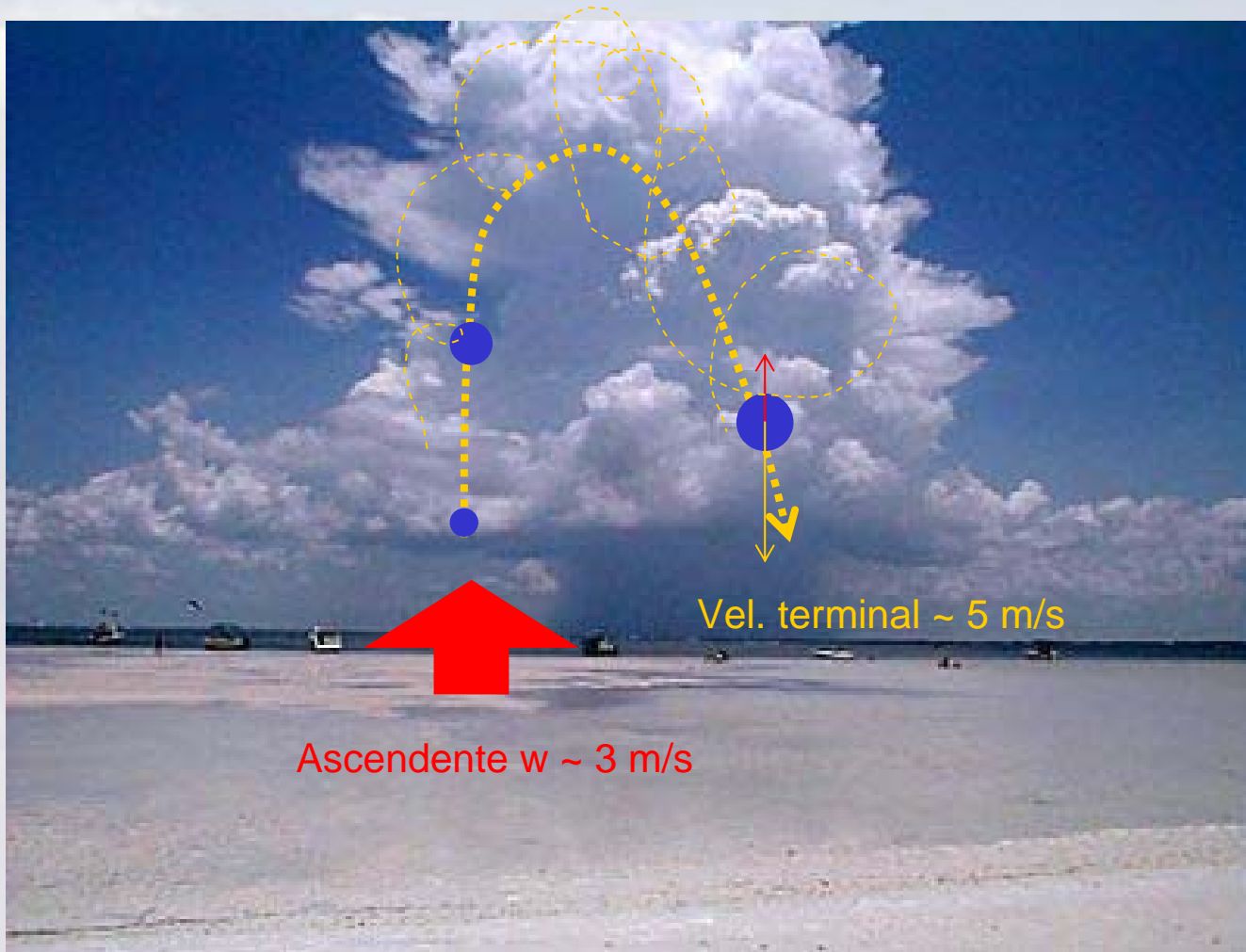
En una tormenta, los embriones crecen miles de veces hasta convertirse en gotas de nube/lluvia en menos de una hora...como es posible esto?

En una primera etapa las gotas crecen por difusión de vapor de agua. Este proceso esta controlado por la cantidad de vapor disponible, el tamaño de la gota y su contenido químico; su eficiencia decrece con el tamaño de la gota.

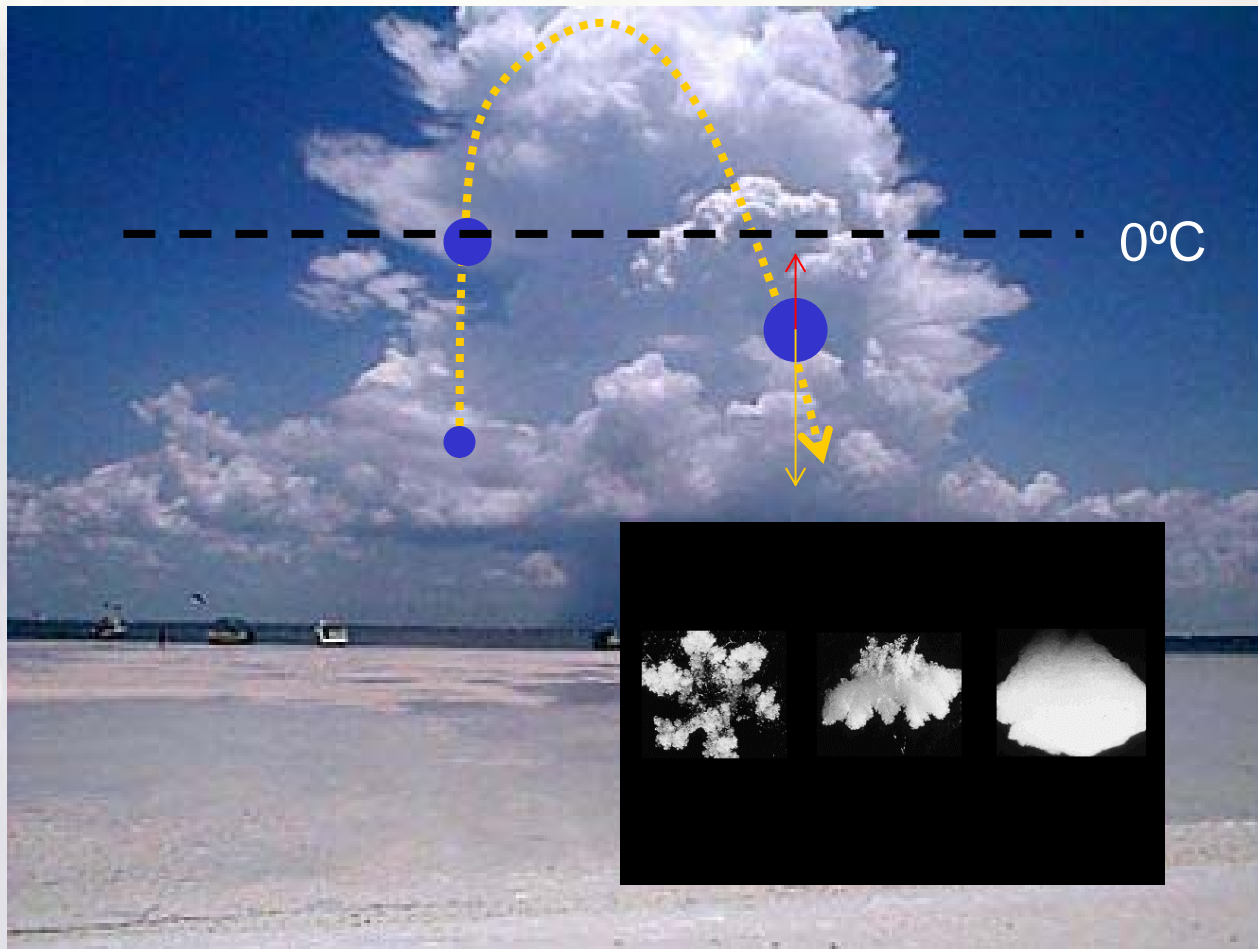
En una segunda etapa, las gotas crecen por colisión-coalescencia (choque entre gotas). La eficiencia de este mecanismo aumenta con el tamaño de la gota (mayor área colectora, mayor vel. terminal)



Por supuesto, la trayectoria de una gota puede complicada, en especial en una tormenta convectiva...



Las cosas también se complican en una nube fría (parte de su volumen esta sobre isoterma de 0°C). En este caso el agua se congela rápidamente y sigue creciendo como granizo..





Una situación distinta ocurre en una tormenta de nieve. En este caso toda (o casi toda) la nube esta bajo  $0^{\circ}\text{C}$ , y la difusión de vapor ocurre en torno a núcleos de condensación de hielo (típicamente en forma prismática), dando origen a la nieve.

