

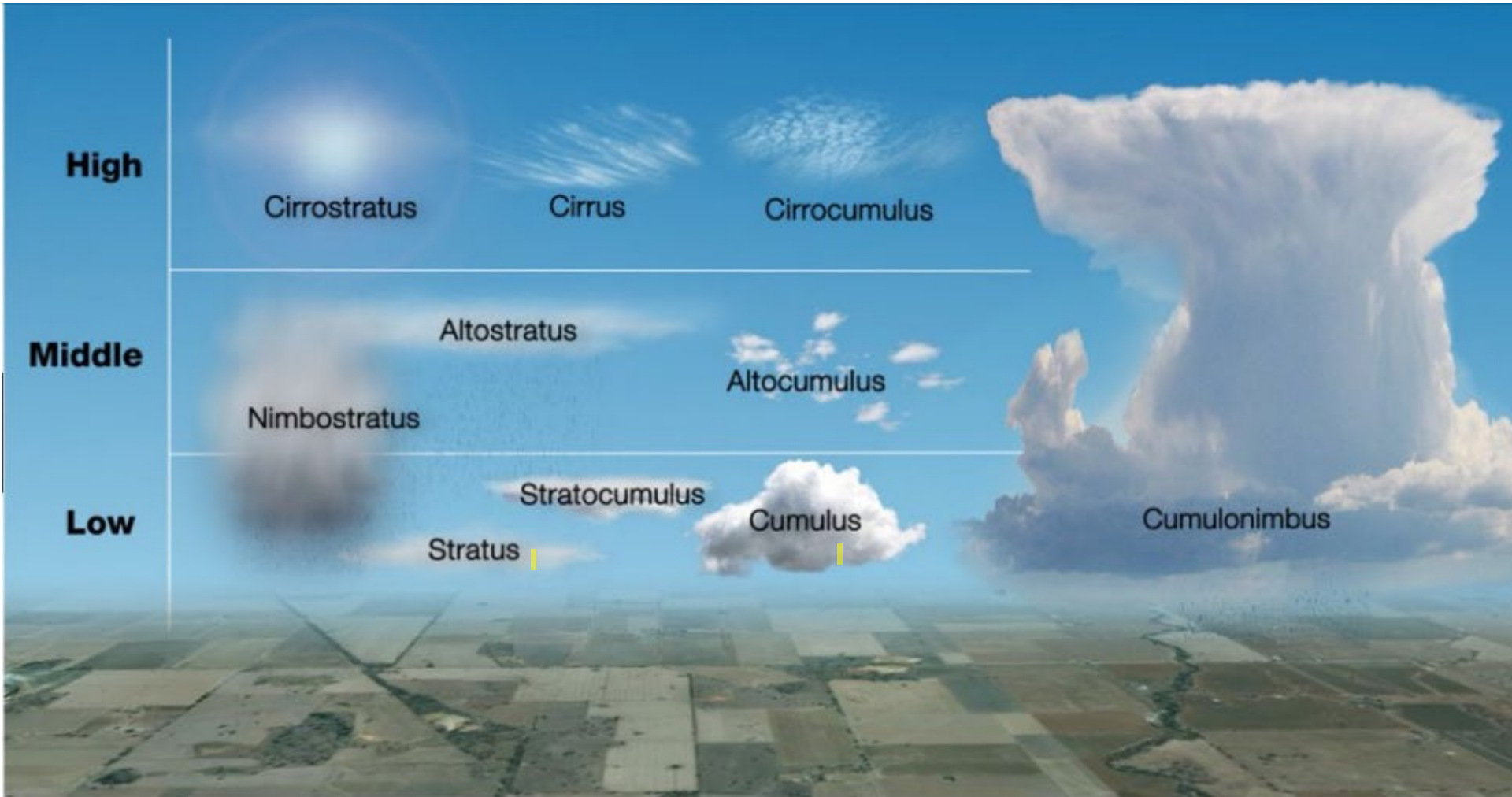
Universidad de Chile
Departamento de Geofísica

Introducción a la Meteorología

Nubes: macro- y microfísica

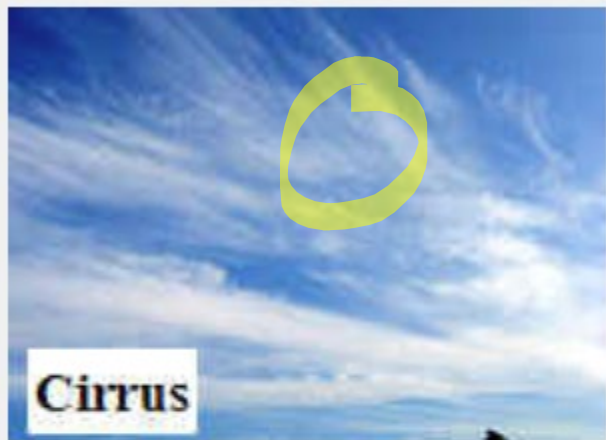
Prof. René Garreaud
www.dgf.uchile.cl/rene

Tropopausa (12-15 km)



The ten main types of cloud

Fuente: OMM



Cirrus



Stratocumulus



Stratus



Nimbostratus

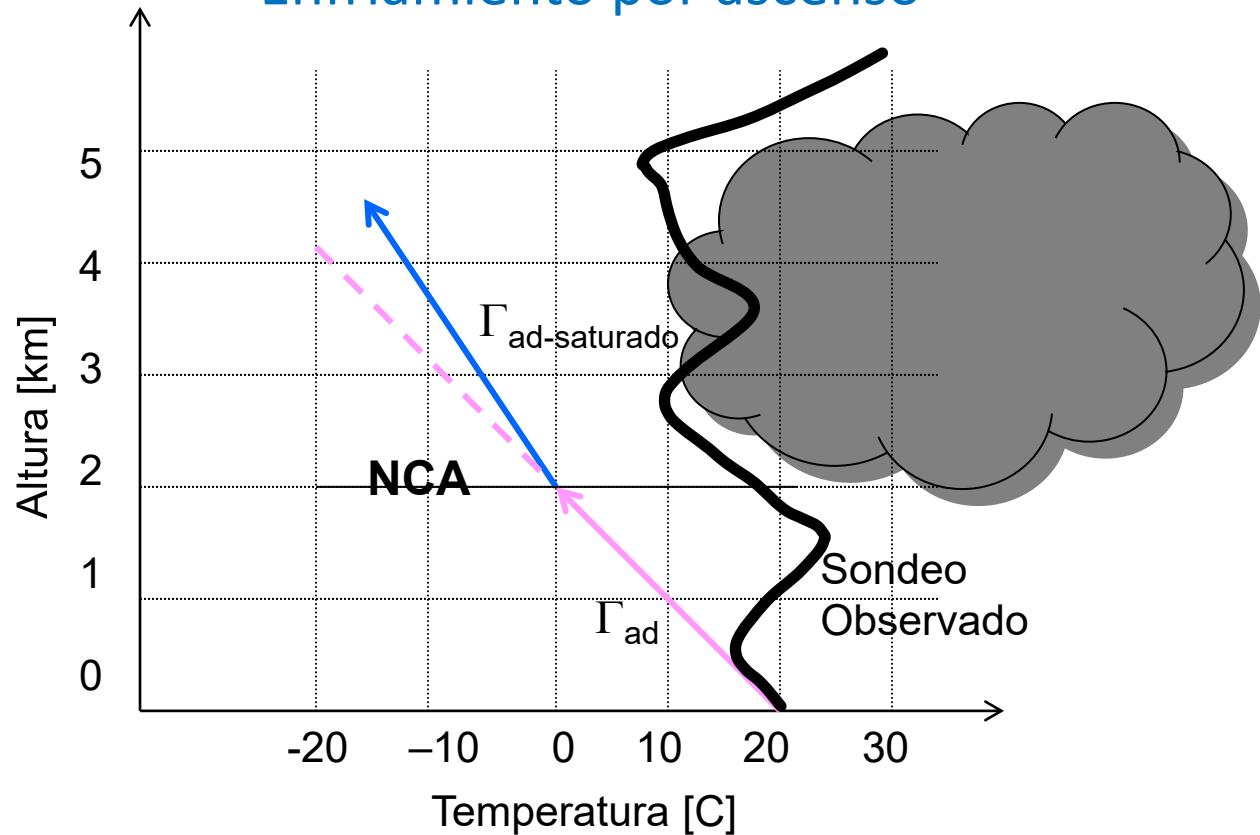


Cumulonimbus



Cumulus

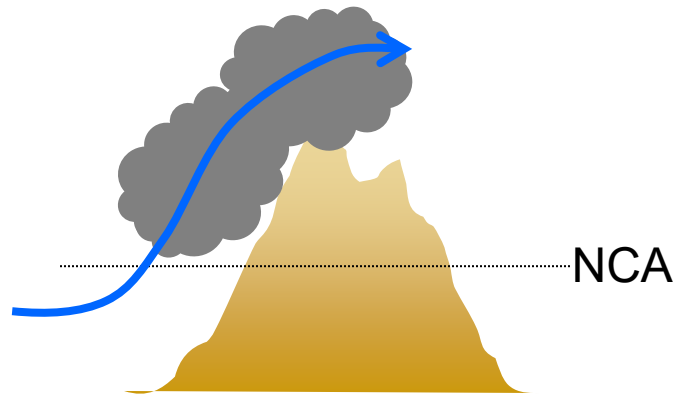
Formación de Nubes:
Saturación por enfriamiento
Enfriamiento por ascenso



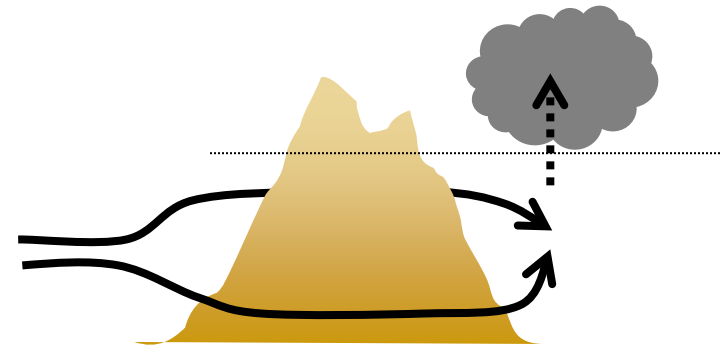
Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreud

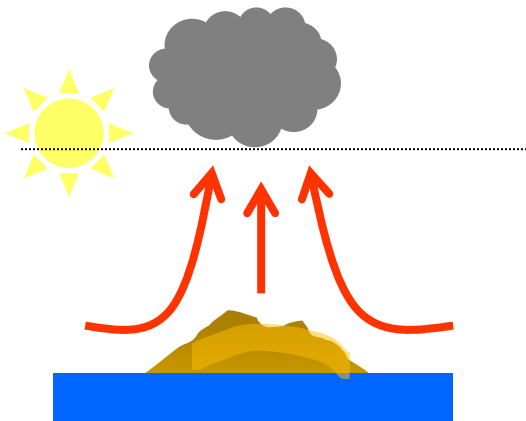
Mecanismos de ascenso en la atmósfera



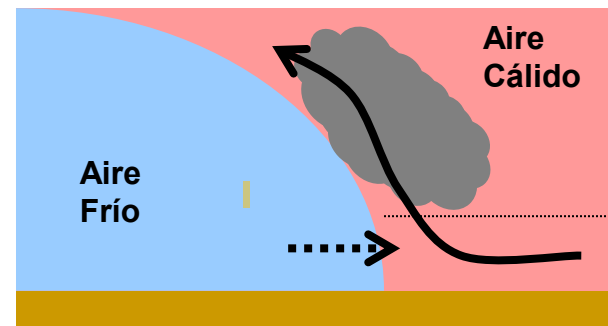
(a) Ascenso Orográfico



(b) Convergencia Orográfica



(c) Ascenso Convectivo

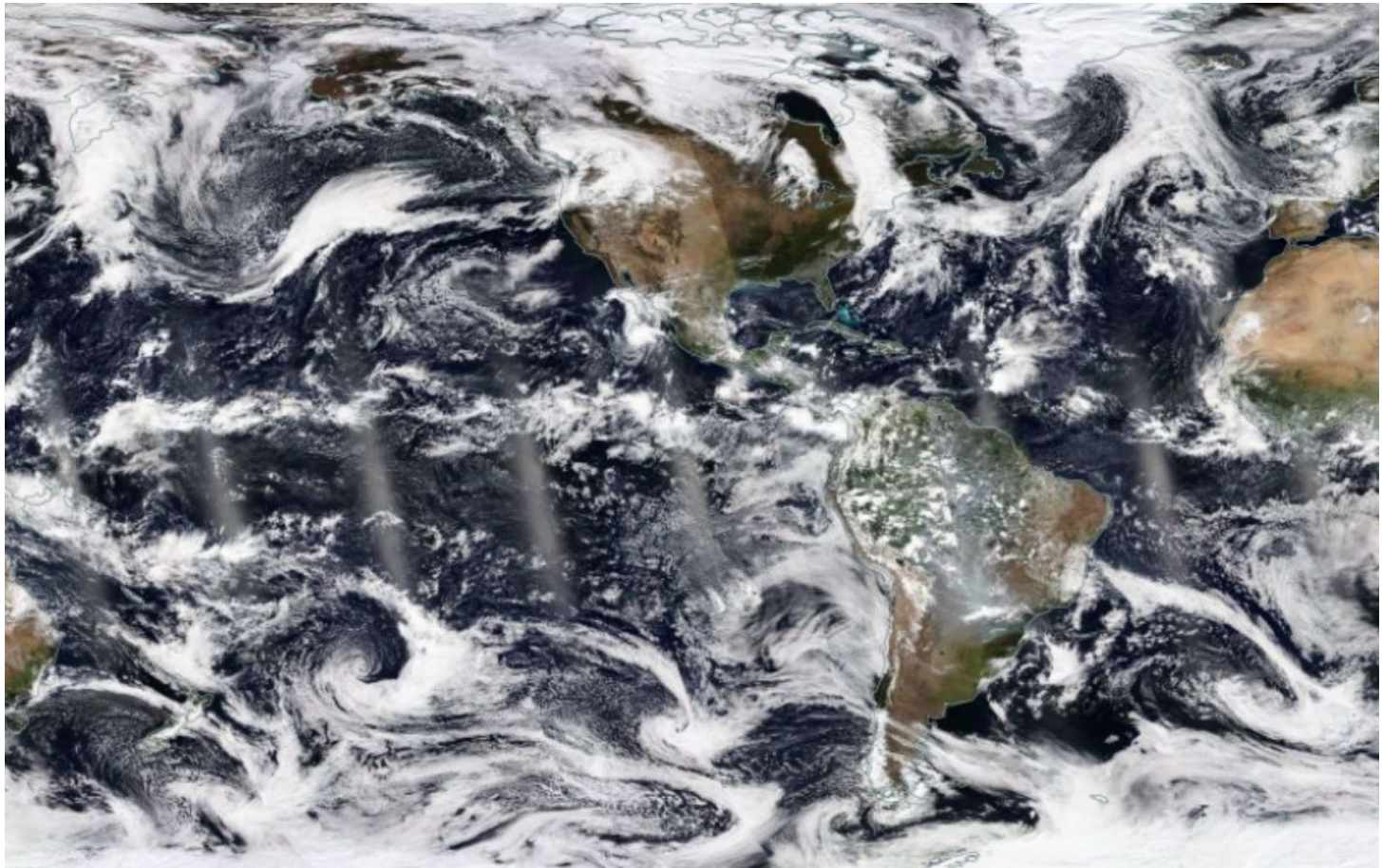


(d) Ascenso Frontal

Mecanismos de ascenso en la atmósfera



Ascenso frontal es el dominante sobre las vastas zonas oceánicas en latitudes medias



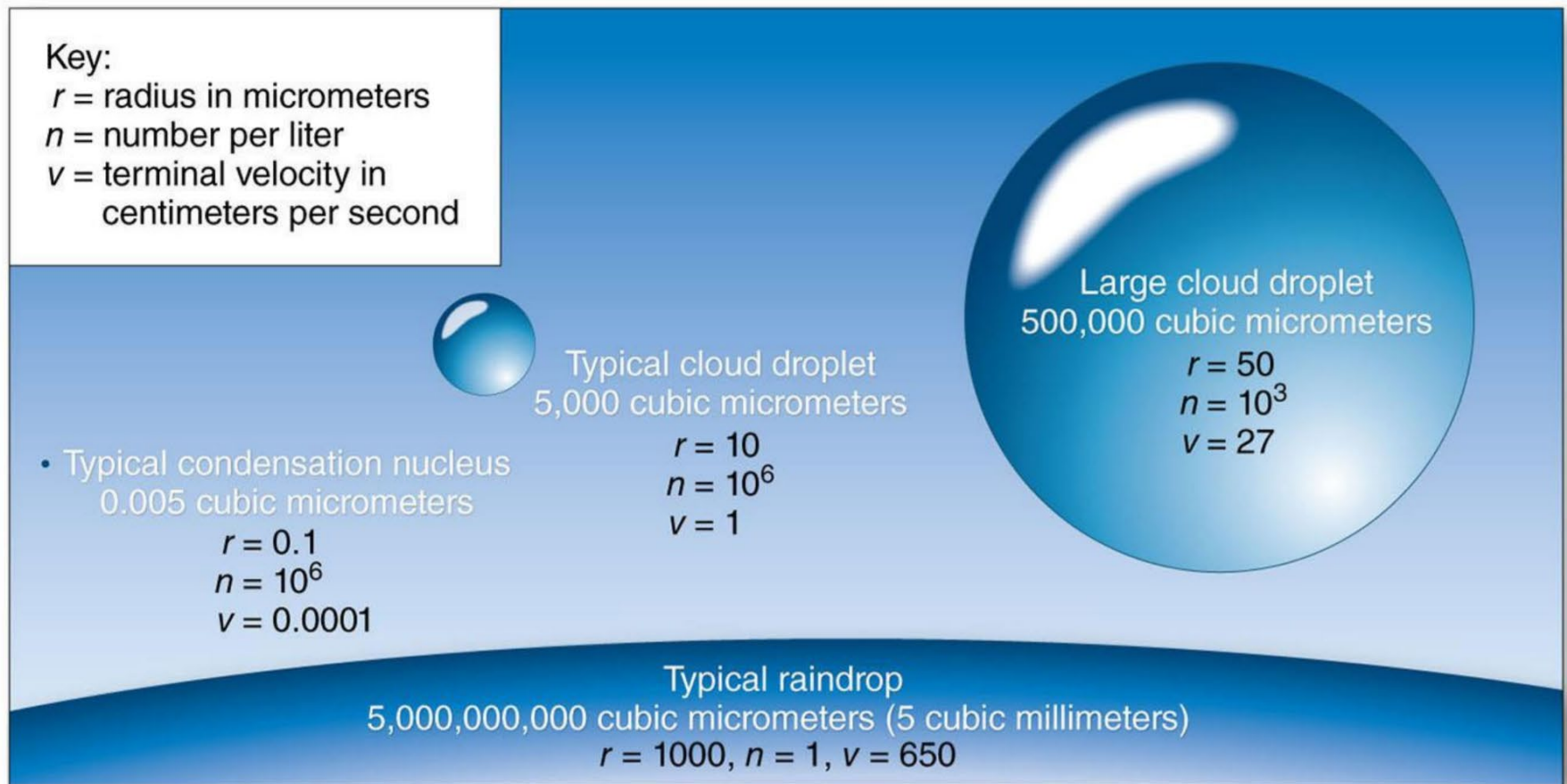
¿Como son las nubes por dentro?



¿Como son las nubes por dentro?

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

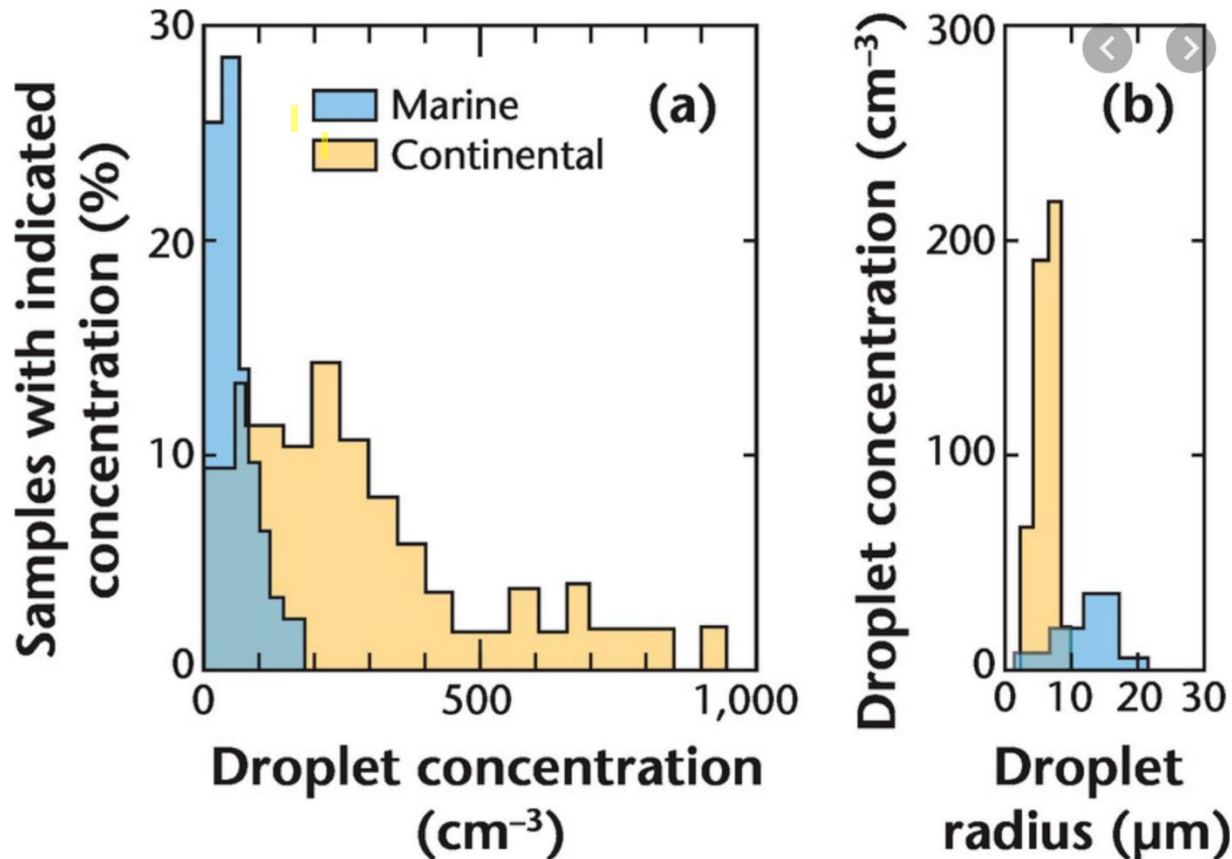
Crecimiento de volumen en 7-9 ordenes de magnitud en unas pocas horas



¿Como son las nubes por dentro?



¿Como son las nubes por dentro?



Continental: Muchas gotas chicas ($N \sim 500 \text{ cm}^{-3}$, $r \sim 5 \mu\text{m}$)

Oceánicas: Pocas gotas grandes ($N \sim 50 \text{ cm}^{-3}$, $r \sim 15 \mu\text{m}$)



Azotea FCFM
(5to piso)



Disdrometro



Micro Radar
de lluvia



Estación Meteorológica
Automática



Nefobasiemetro

Oficina AM
4to Piso DGEO

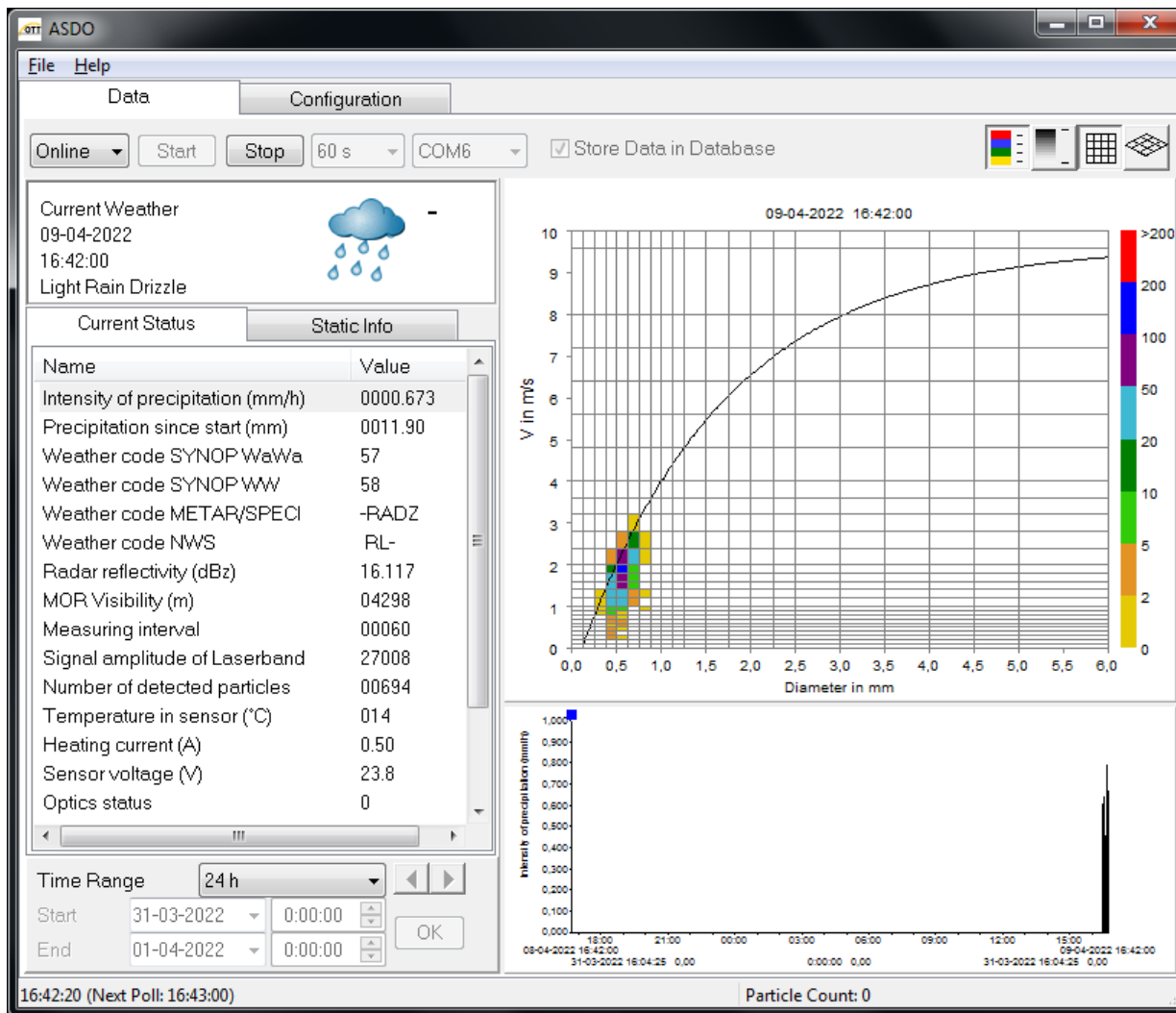


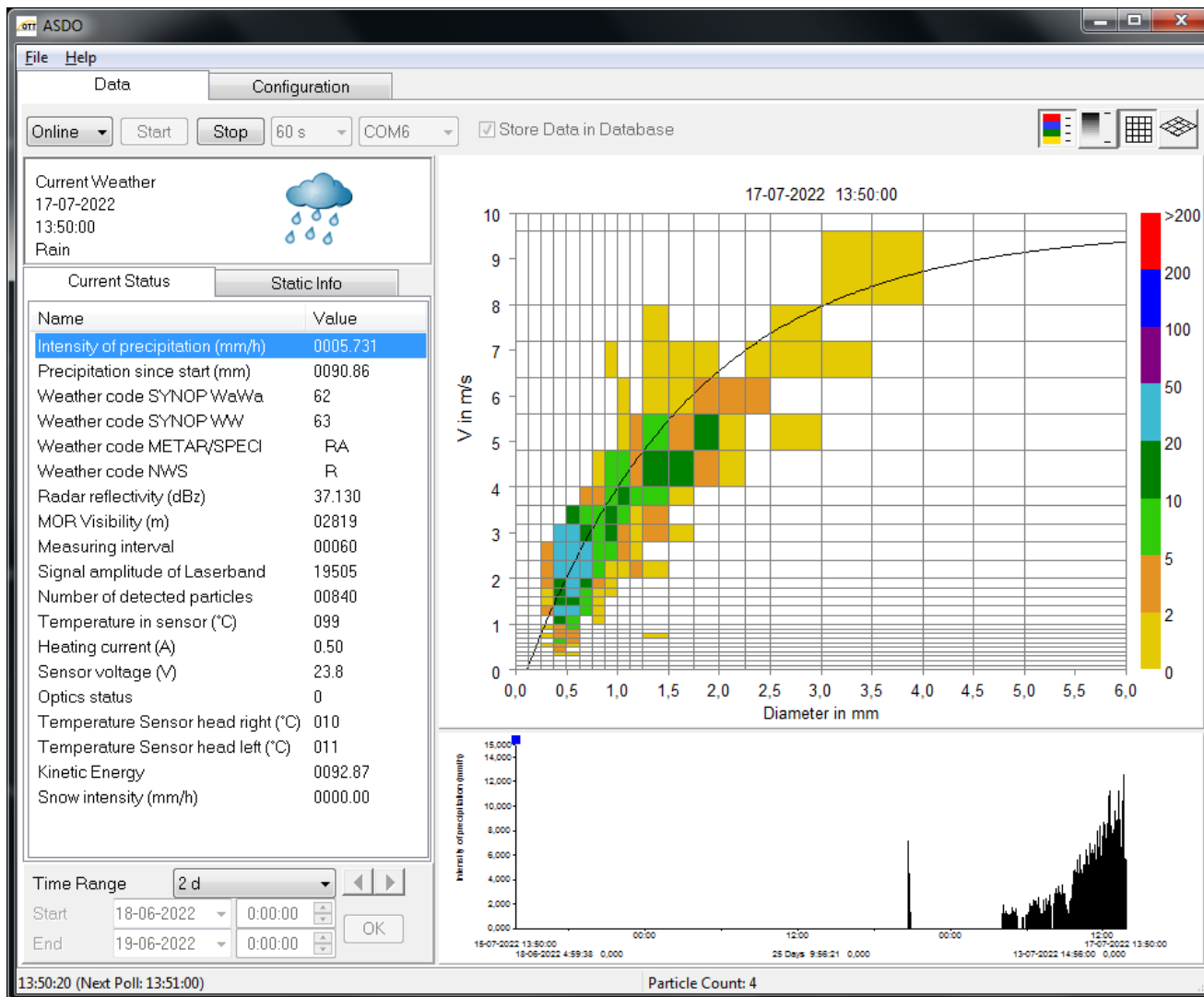
Internet

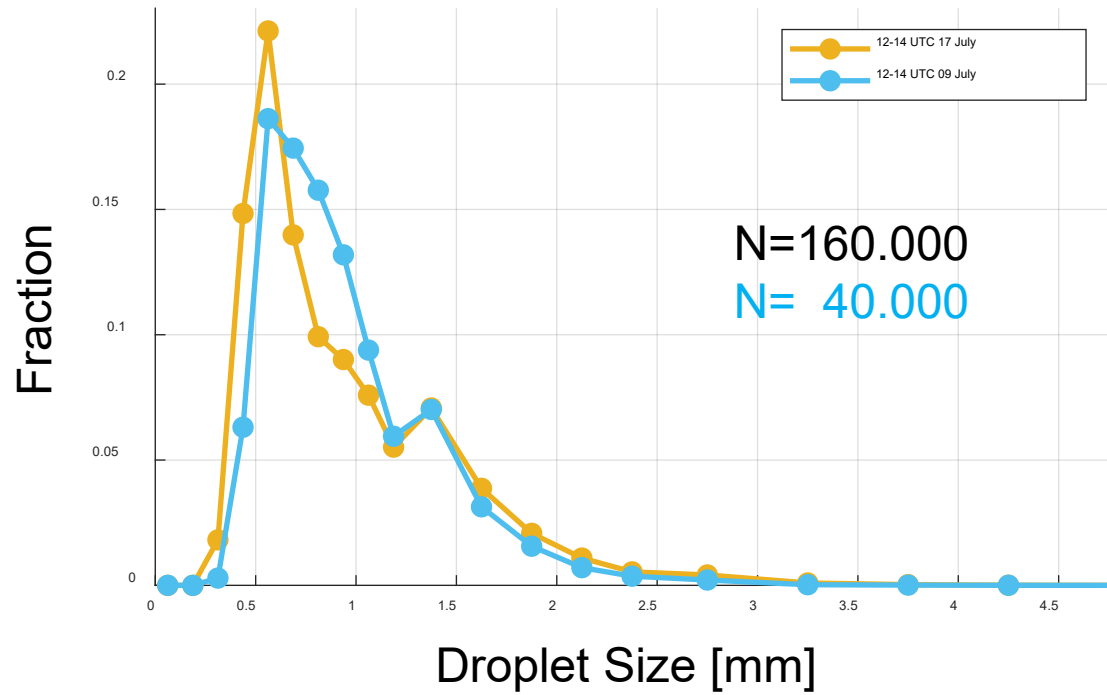


Servidor de datos



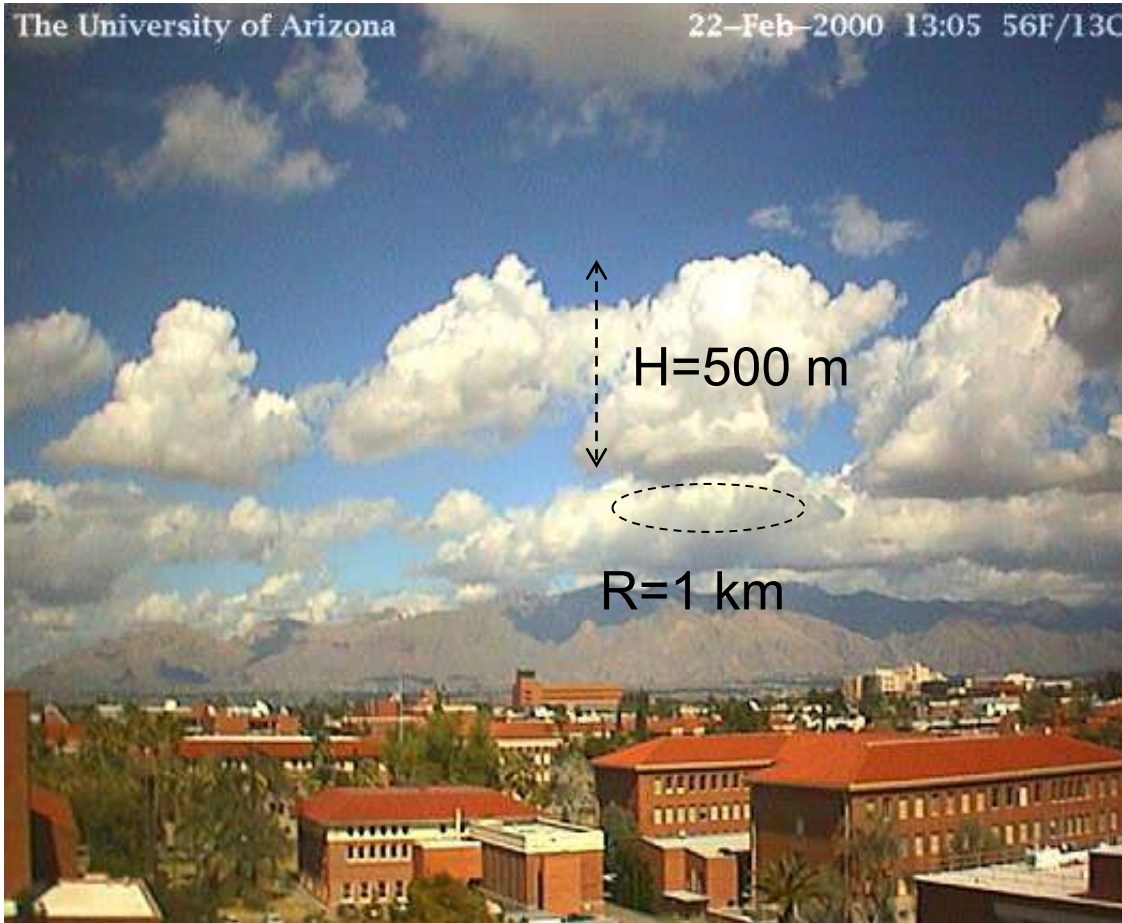






¿Como son las nubes por dentro?

¿Cuanto pesa una nube (Toneladas)? ¿Cuánta agua tiene (m^3)?
Expresar en términos de un camión y piscina



Conc. de gotas:
 $(100 + 10 \cdot N)$ gotas/ cm^3

Tamaño de una gota:
 $r = 0.01 \text{ mm}$

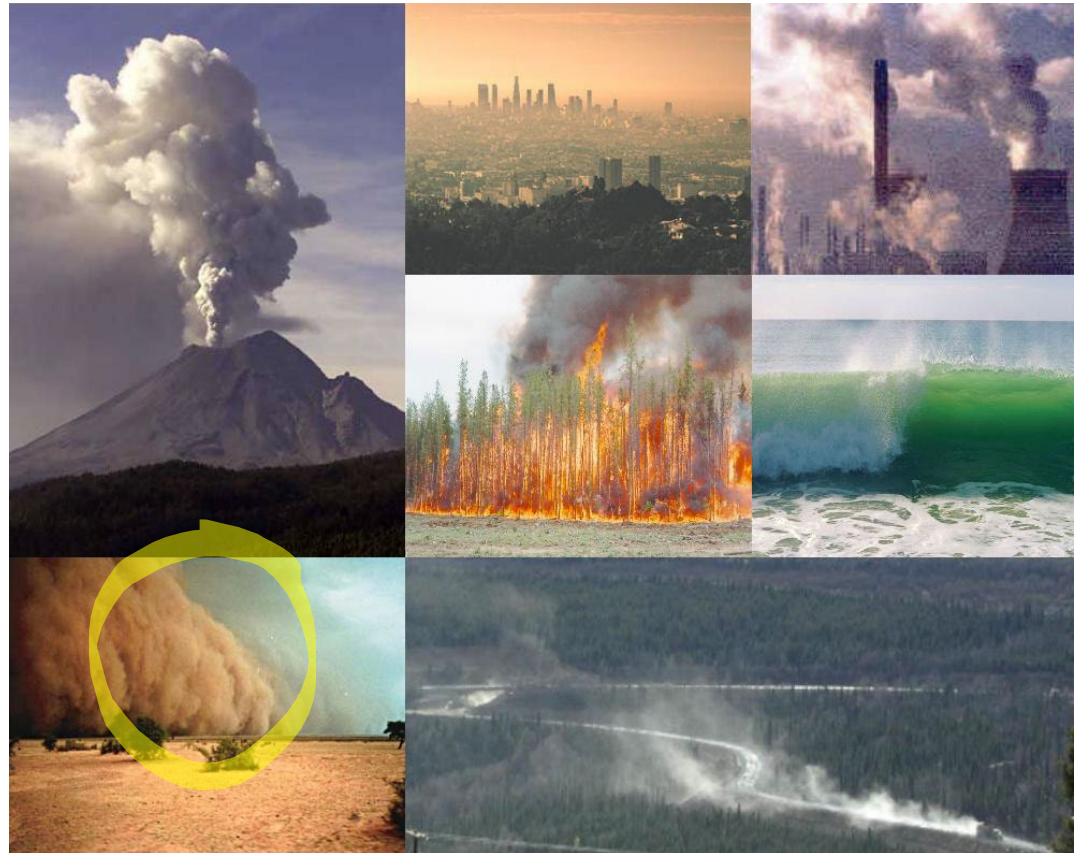
Densidad del aire:
 1 kg/m^3

Densidad del agua:
 1000 kg/m^3

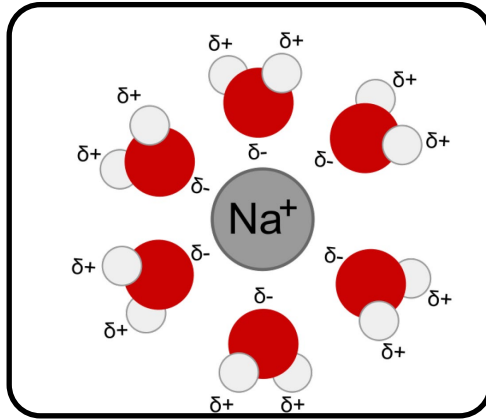
N: Ultimo digito de su rut (antes del guion)

Casi siempre la formación de gotas ocurre en presencia **aerosoles** que primero atraen al vapor y luego actúan como soluto. Esto se denomina **Nucleación heterogénea** (en contraste con la N. Homogénea, cuando solo hay vapor....muy difícil)

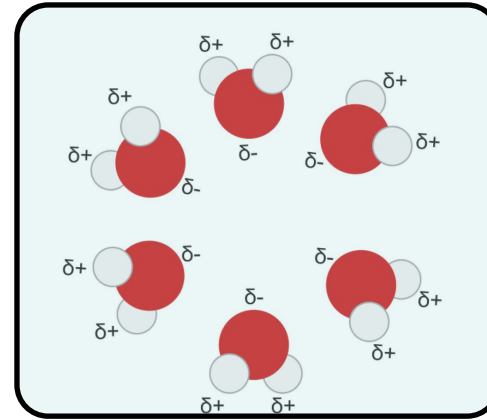
Existen muchas fuentes de aerosoles (naturales y antrópicas). Solo una fracción de ellos actúan como **núcleos de condensación**, pues deben ser higrofilos (atraer al H₂O) y luego disolverse en el agua líquida que los cubre....



Nucleación heterogénea
(nucleó de condensación)

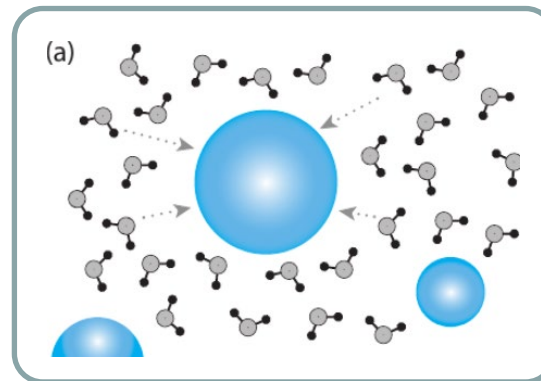


Nucleación homogénea
(muy poco común)

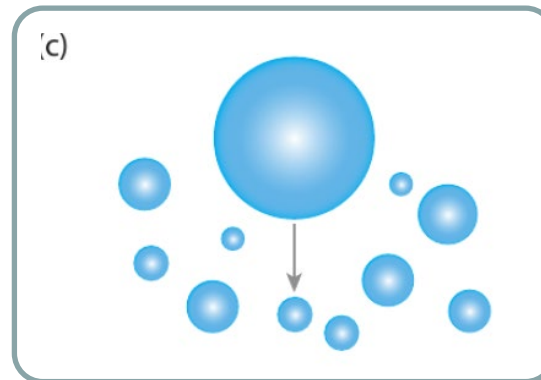


Tiempo

Crecimiento
por difusión



Crecimiento
por colisión
coalescencia



Tamaño

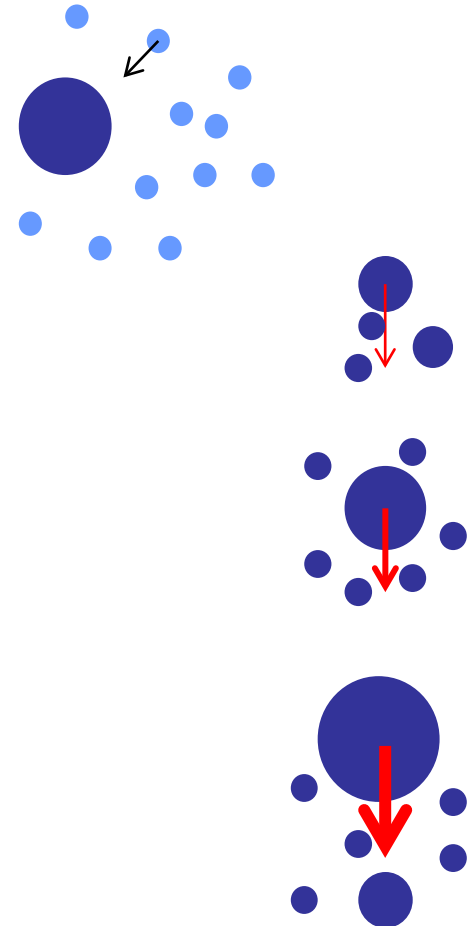
Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

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)



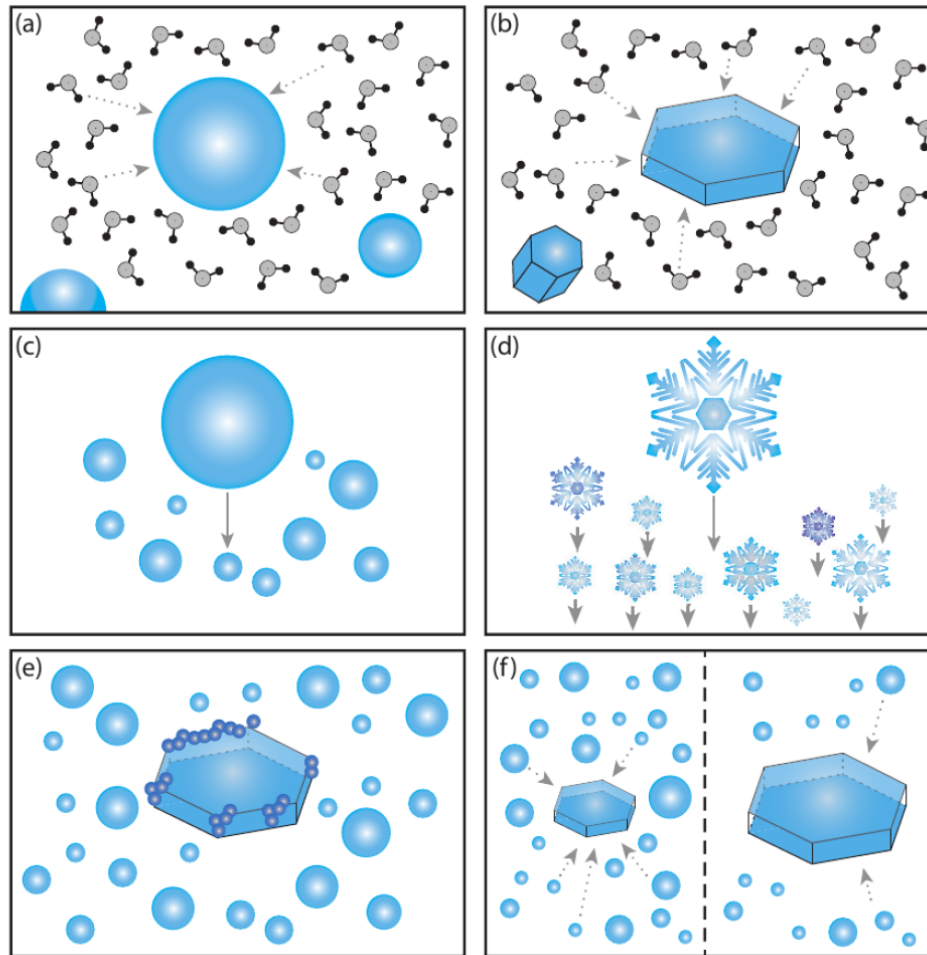
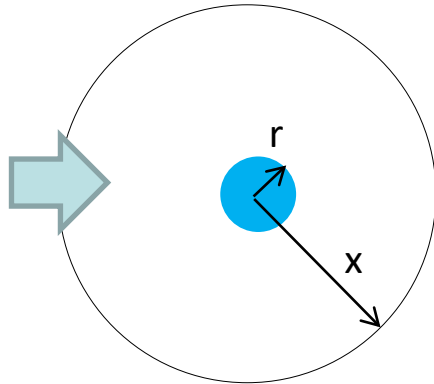


Figure : Crystal growth processes (a) condensation (b) deposition (c) collision-coalescence, (d) aggregation, (e) riming, (f) Bergeron-Findeisen process. (from Lohmann, U.)

Modelo de crecimiento de una gota por difusión de vapor agua



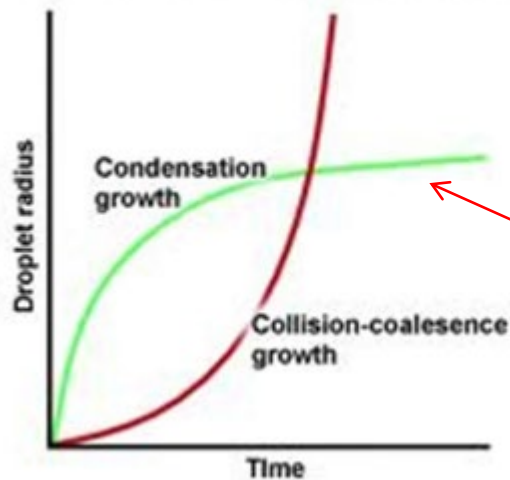
$$\frac{dm}{dt} = 4\pi x^2 D \frac{\partial \rho_v}{\partial x}$$

$$\frac{dm}{dt} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = 4\pi D \int_{\rho(r)_v}^{\rho(\infty)_v} d\rho_v$$

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D (\rho(\infty)_v - \rho(r)_v)$$

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{liq}$$

Collision-Coalescence and Condensation Growth of a Droplet

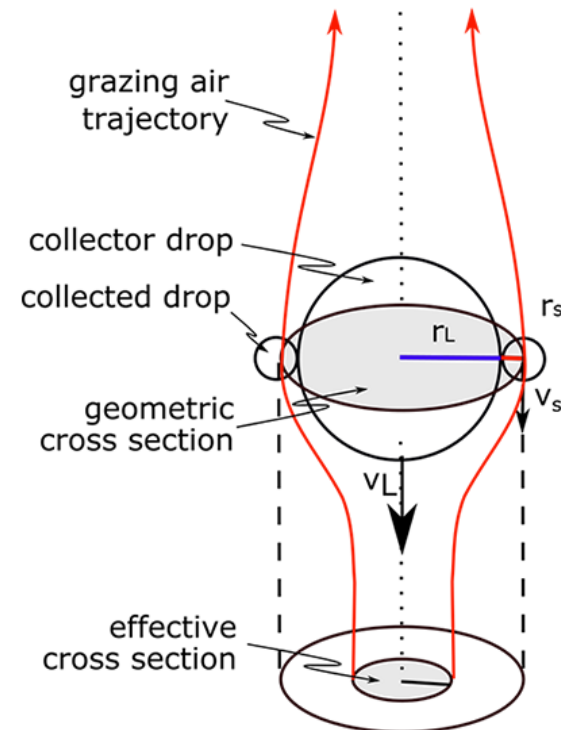
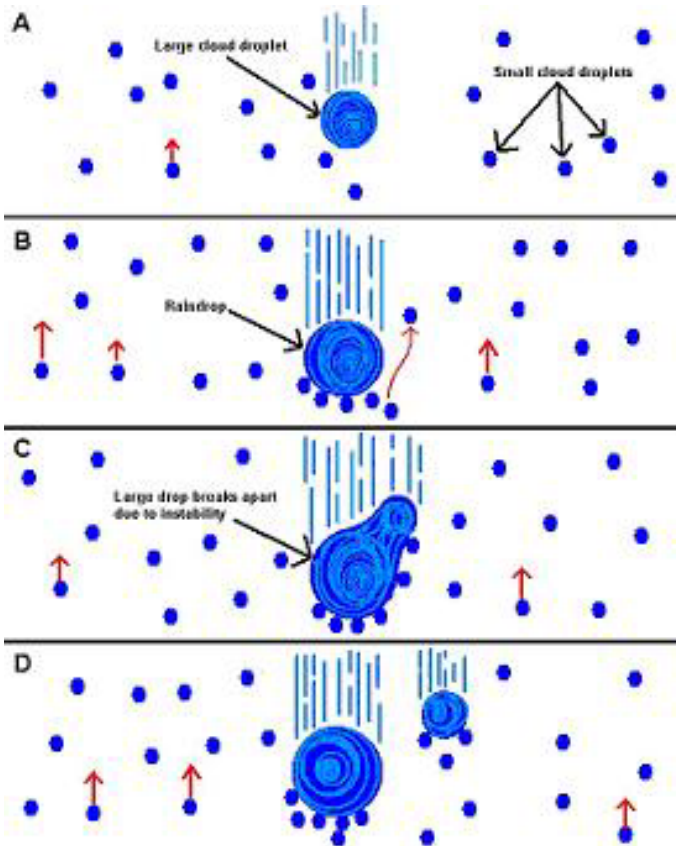


$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{r\rho_{liq}} \frac{\rho(\infty)_v}{e(\infty)} (e - e(r))$$

e $e(\text{sat})$
 $\nearrow$ $\nearrow$

$$r \frac{dr}{dt} = G \times SAT$$

La difusión de vapor comienza el crecimiento de las gotas pero se hace ineficiente conforme pasa el tiempo. En esa etapa los tamaños de gotas son diversos y comienza a operar el proceso de **colisión-coalecencia**.

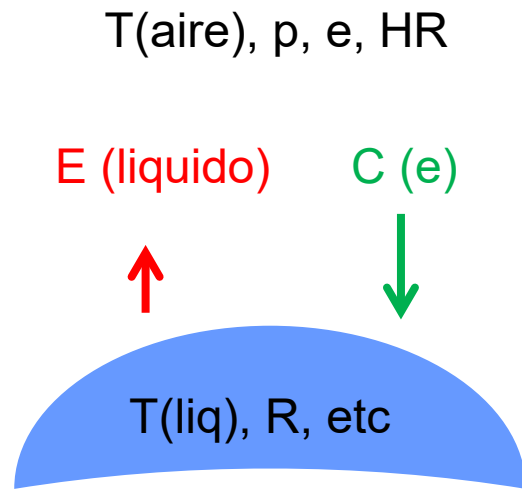


Schematic of the maximum possible geometric cross-section of a large and small drop and the actual cross-section due to particles following air streamlines around the big particle.

Credit: W. Brune (after Lamb and Verlinde)

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



Dos flujos relevantes:

E: Evaporación (liquido $\rightarrow$ gas), depende del estado del agua liquida

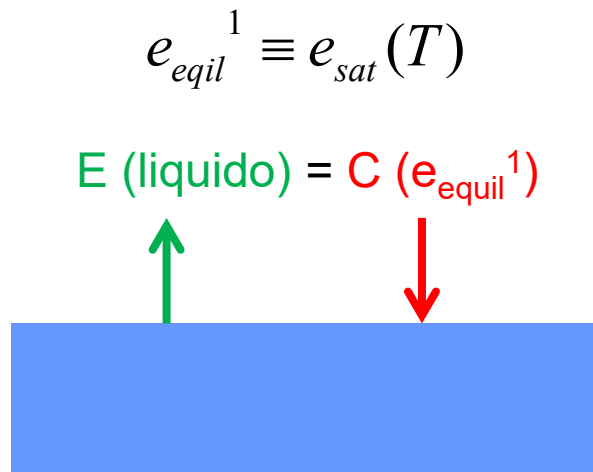
C: Condensación (gas $\rightarrow$ liquido), depende de la cantidad de vapor en el aire....el flujo **C** aumenta con el valor de **e**

El volumen de agua liquida (gota, piscina, lago, etc) crece si $C > E$ y decrece si $E > C$.

El equilibrio ocurre cuando $E = C$. ¿Que valor de $e(\text{aire})$ produce la saturación?

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



Caso 1: Superficie plana de agua pura

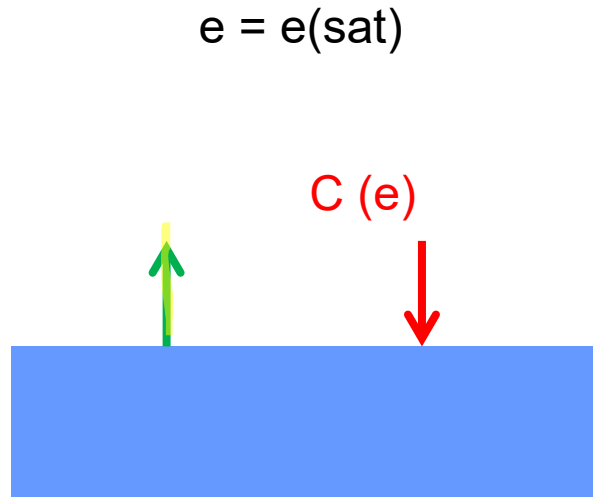
En este caso particular $e_{equil}^1 = e(sat)$ obtenido de la ecuación de **Clausius Clapeyron**.

Recordemos que $HR = e(obs)/e(sat)$. Las observaciones muestran que $HR \leq 100\%$

We have a problem (droplet growth!)

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



Supongamos que $e = e(\text{sat})$.

Esto es $HR=100\%$. Eso fija el flujo de condensación (C). Si estamos sobre una superficie plana de agua pura estamos en equilibrio.

Valor real
en el aire

Obtenido
de ec.
Clasius
Clapeyron

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

$$e = e(\text{sat})$$

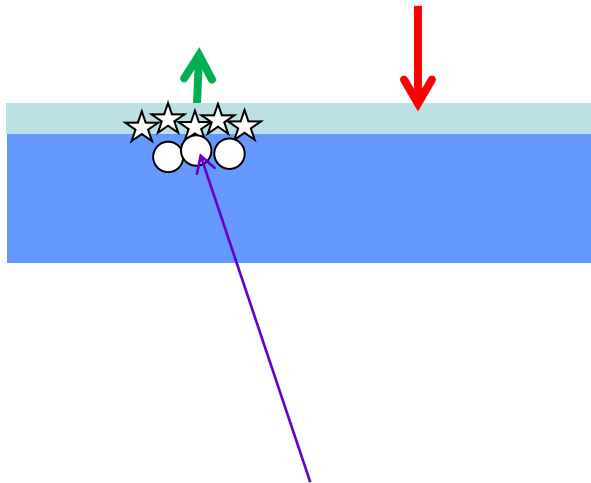
Caso 2. Superficie plana de hielo

Supongamos que $e=e(\text{sat})$. Esto es $HR=100\%$. Eso fija el flujo de condensación (C).

Ahora congelamos la superficie del agua, con lo cual disminuye E con lo cual $E < C$.

Entonces el aire está sobre-saturado con respecto al hielo! Buena cosa...el hielo crece...

$$E(\text{hielo}) < C(e)$$



Cubierta de hielo dificulta la evaporación (sublimación) debido a incremento en cohesión

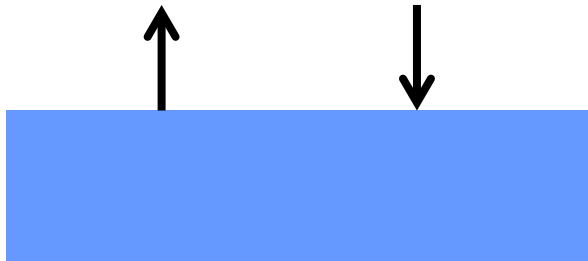
Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

También podemos definir un $e(\text{sat})$ para este caso

Aire saturado c/r
superficie plana agua pura

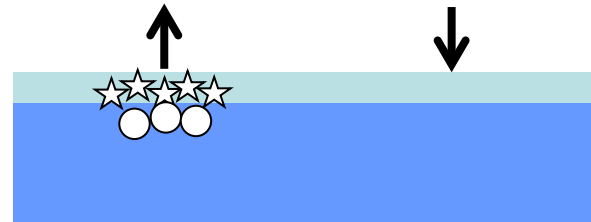
$$C(e_{\text{equil}}^1) = E(\text{liquido})$$



$$e_{\text{equil}}^1 \equiv e_{\text{sat}}(T)$$

Aire saturado c/r
superficie plana de hielo

$$E(\text{liquido}) = C(e_{\text{equil}}^2)$$

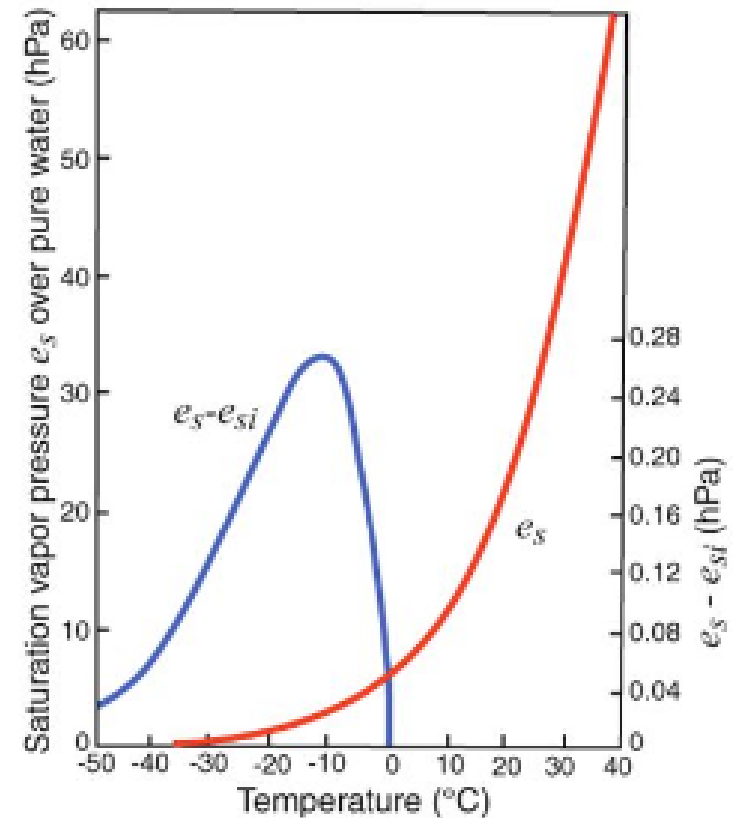
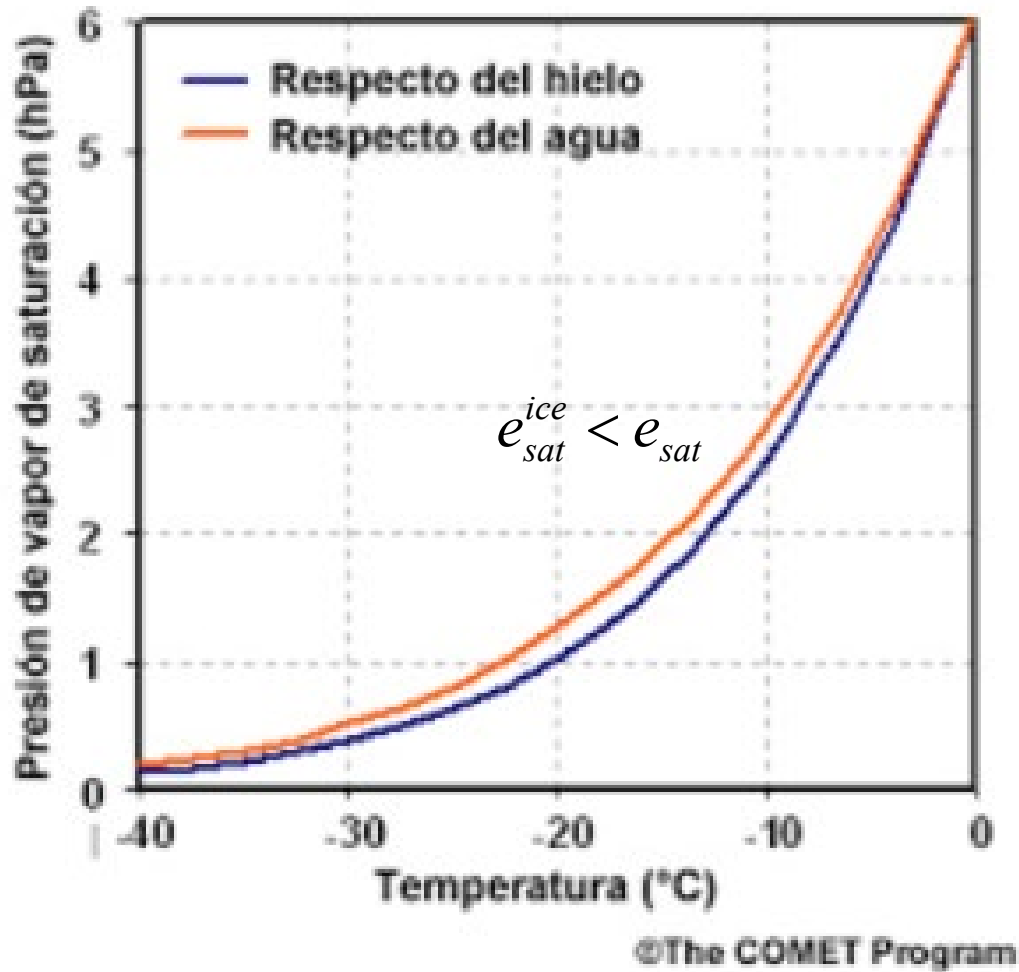


$$e_{\text{equil}}^2 \equiv e_{\text{sat}}^{\text{ice}} < e_{\text{sat}}$$

Entonces, el estado de saturación (equilibrio $E=C$) depende del caso....

Curvas de saturación

Indican el valor de e para que el aire este saturado con respecto a....



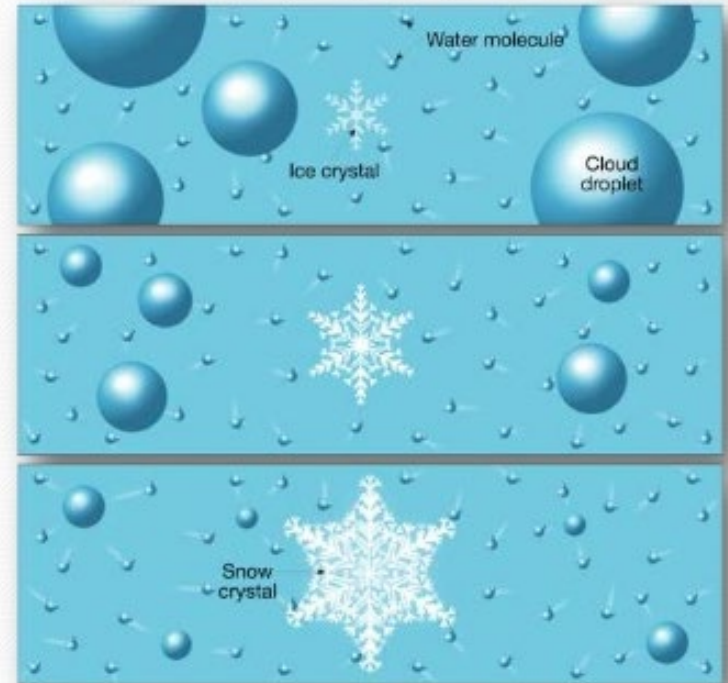
THE BERGERON PROCESS

¿Que pasa si $e < e_{\text{sat}}$ pero $e > e_{\text{esat}}|_{\text{hielo}}$?

Ejemplo: a una temperatura de -20°C

$e_{\text{sat}} = 1.3 \text{ hPa}$ y $e_{\text{esat}}|_{\text{hielo}} = 1 \text{ hPa}$

Si $e = 1.2 \text{ hPa}$ entonces el **aire esta sub-saturado c/r al agua** (se evapora) y **sobre-saturado c/r al hielo** (crece)

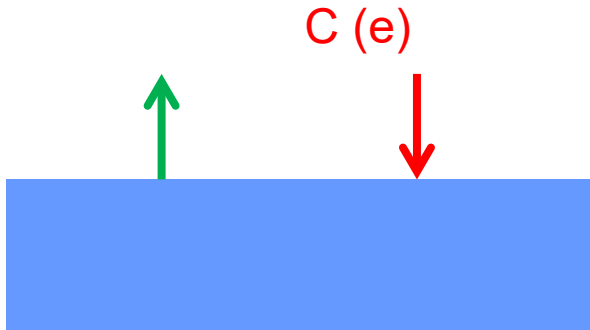


Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

$$e = e(\text{sat})$$

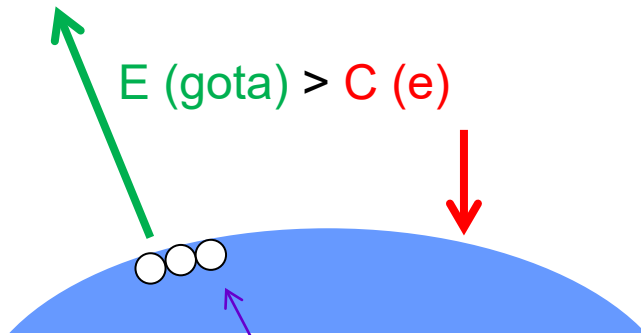
Supongamos que $e = e(\text{sat})$. Esto es $\text{HR}=100\%$. Eso fija el flujo de condensación (C).



Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

$$e = e(\text{sat})$$



Curvatura superficial
facilita la evaporación
debido a la reducción de
cohesión superficial

Caso 3. Efecto de curvatura

Ahora consideremos una superficie curva, con lo cual aumenta E y resulta $E > C$

Entonces el aire está sub-saturado con respecto a la gota (pese a que $HR=100\%$)! Mala cosa... la gota tiende a desaparecer

Introducción a la Meteorología – Nubes

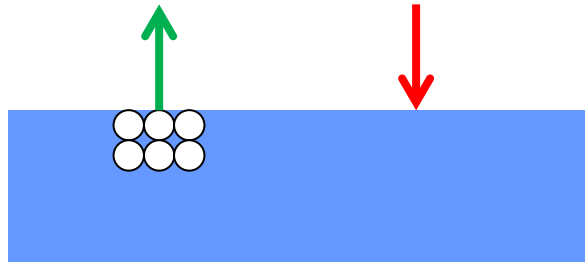
UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

También podemos definir un e_{sat} para este caso

Aire saturado
c/r sfc. plana agua

$$E \text{ (liquido)} = C (e_{equil}^1)$$

$$e_{equil}^1 \equiv e_{sat}(T)$$

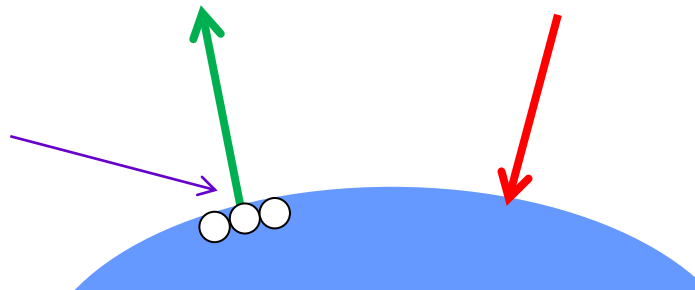


Aire saturado
c/r gota de agua

$$E \text{ (liquido)} = C (e_{equil}^3)$$

$$e_{equil}^3 \equiv e_{sat}^{\circ} > e_{sat}$$

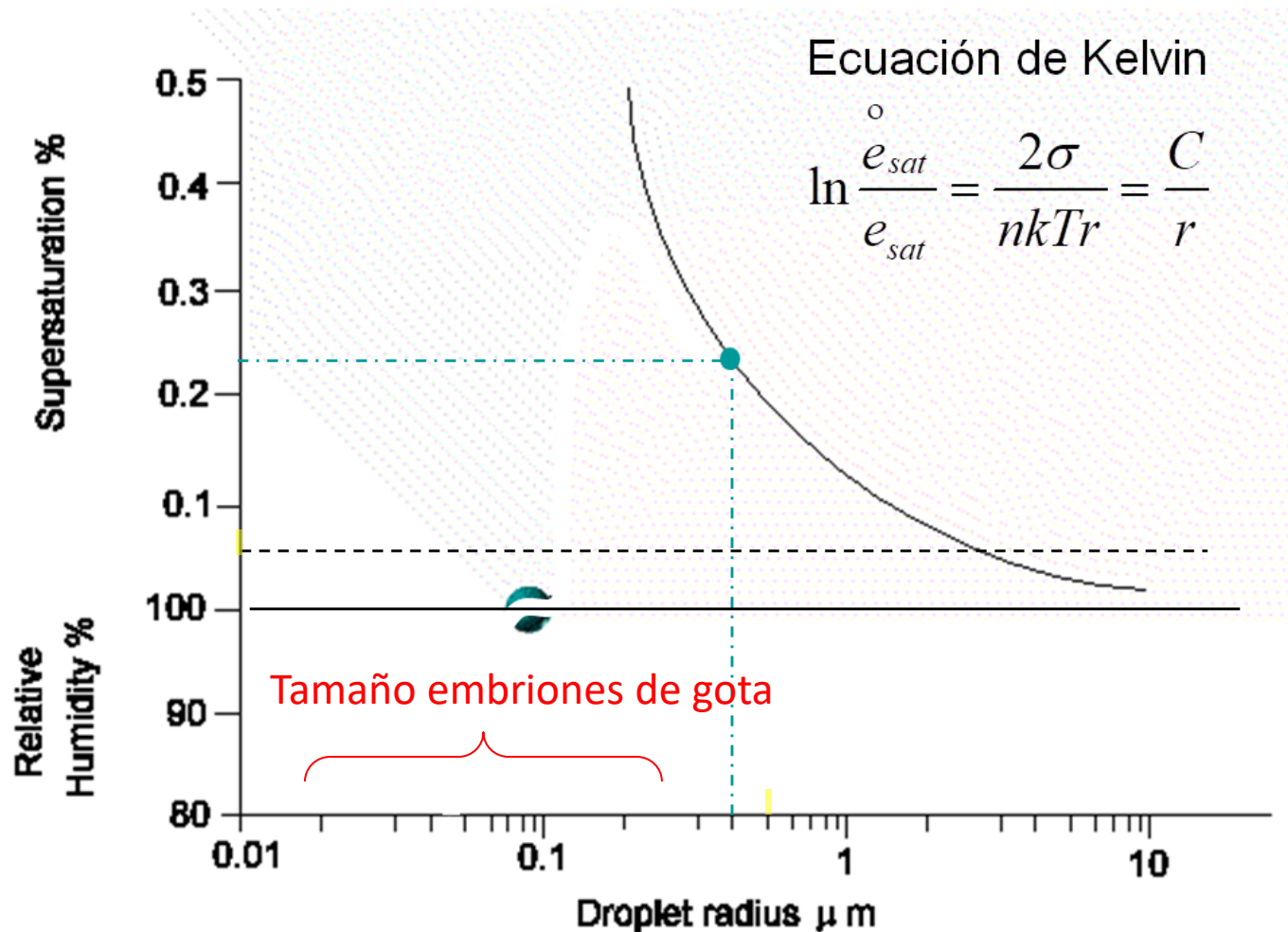
Curvatura superficial
facilita la evaporación
debido a la reducción de
cohesión superficial



$$\ln \frac{e_{sat}^{\circ}}{e_{sat}} = \frac{2\sigma}{nkTr} = \frac{C}{r}$$

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud



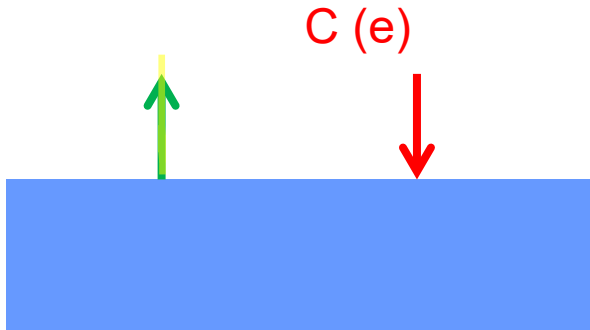
Tenemos un problema...se requiere tener una súper saturación alta para mantener en equilibrio gotas pequeñas...

Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

$$e = e(\text{sat})$$

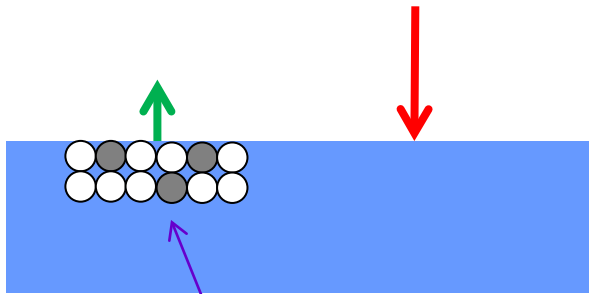
Supongamos que $e = e(\text{sat})$. Esto es $\text{HR}=100\%$. Eso fija el flujo de condensación (C).



Efecto del soluto

Aire saturado c/r
superficie plana agua pura

$E (\text{liquido}) < C (e)$



Presencia de soluto
(núcleos de condensación
soluble) aumentan cohesión

Caso 4. Efecto del soluto

Ahora agregamos soluto al agua, con lo cual disminuye E y entonces $E > C$.

Entonces el aire está sobre-saturado con respecto a la solución (agua+solute), aun cuando $HR=100\%$! Buena cosa...

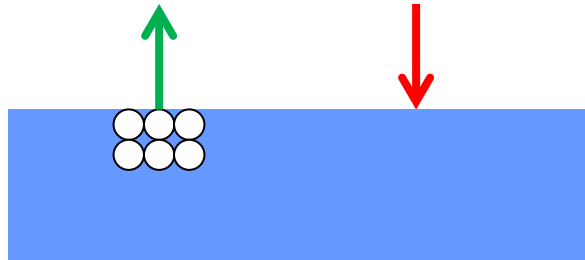
Introducción a la Meteorología – Nubes

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Aire saturado c/r sfc.
plana agua **pura**

$$E \text{ (liquido)} = C (e_{\text{equil}}^1)$$

$$e_{\text{equil}}^1 \equiv e_{\text{sat}}(T)$$

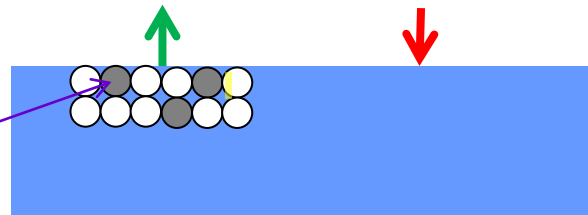


Aire saturado c/r sfc.
plana agua + **solute**

$$E \text{ (liquido)} = C (e_{\text{equil}}^4)$$

$$e_{\text{equil}}^4 \equiv e'_{\text{sat}} < e_{\text{sat}}$$

Presencia de soluto
(núcleos de condensación
soluble) aumentan cohesión



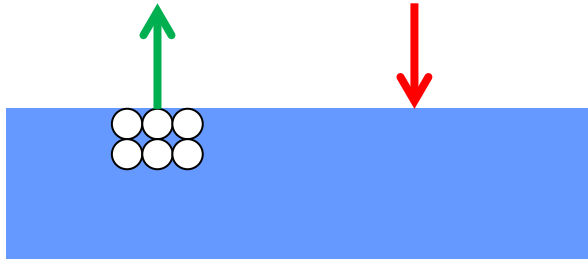
$$\frac{e'_{\text{sat}}}{e_{\text{sat}}} = f \propto \frac{n'}{n' + N}$$

köhler

La presión de vapor de saturación (equilibrio E=C) depende del caso....

$$e_{eqil}^1 \equiv e_{sat}(T)$$

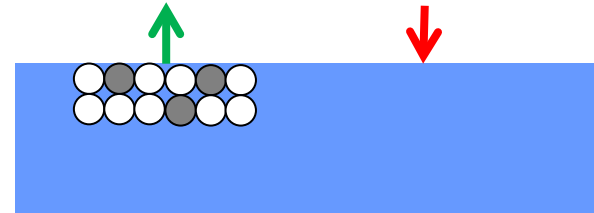
$$E(\text{liquido}) = C(e_{equil}^1)$$



Agua pura y superficie plana

$$e_{eqil}^4 \equiv e'_{sat} < e_{sat}$$

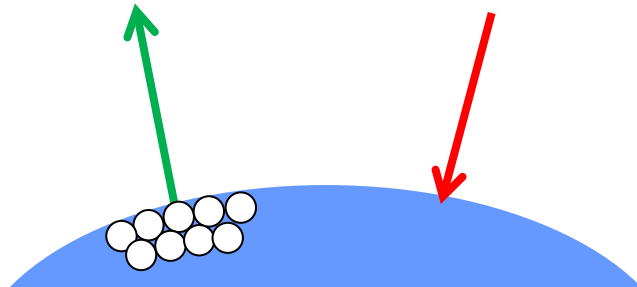
$$E(\text{liquido}) = C(e_{equil}^4)$$



Agua con soluto y superficie plana

$$e_{eqil}^3 \equiv e_{sat}^{\circ} > e_{sat}$$

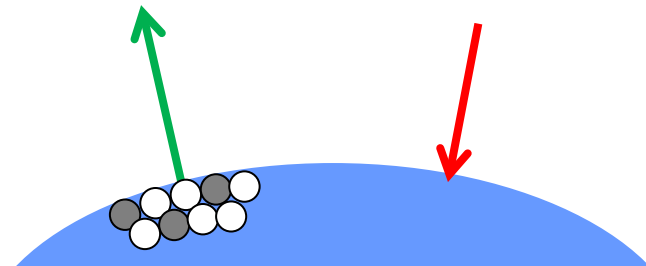
$$E(\text{liquido}) = C(e_{equil}^3)$$



Agua pura y superficie curva

$$\frac{e'_{sat}}{e_{sat}} = 1 + \frac{\dot{C}}{r} - \frac{C'}{r^3}$$

$$E(\text{liquido}) = C(e_{equil}^5)$$



Efecto combinado de curvatura y soluto.

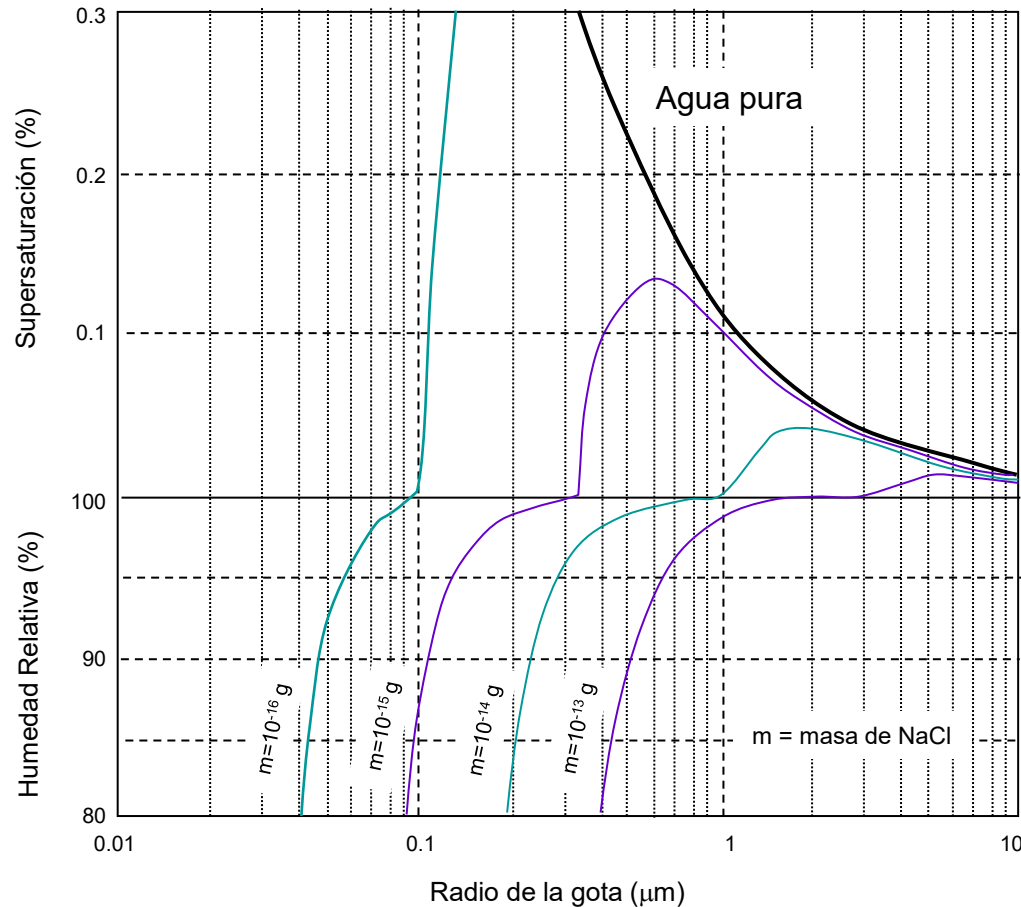
Curvas de Köhler

Efecto combinado de curvatura y soluto.

Presión parcial de vapor para alcanzar saturación ($E=C$) sobre una gota de radio r en la cual hay una masa m de soluto

Presión parcial de vapor para alcanzar saturación ($E=C$) agua pura y superficie plana...directamente de Clasiuss-Clapeyron

$$\frac{e'_{sat}}{e_{sat}} = 1 + \frac{\dot{C}}{r} - \frac{C'}{r^3}$$

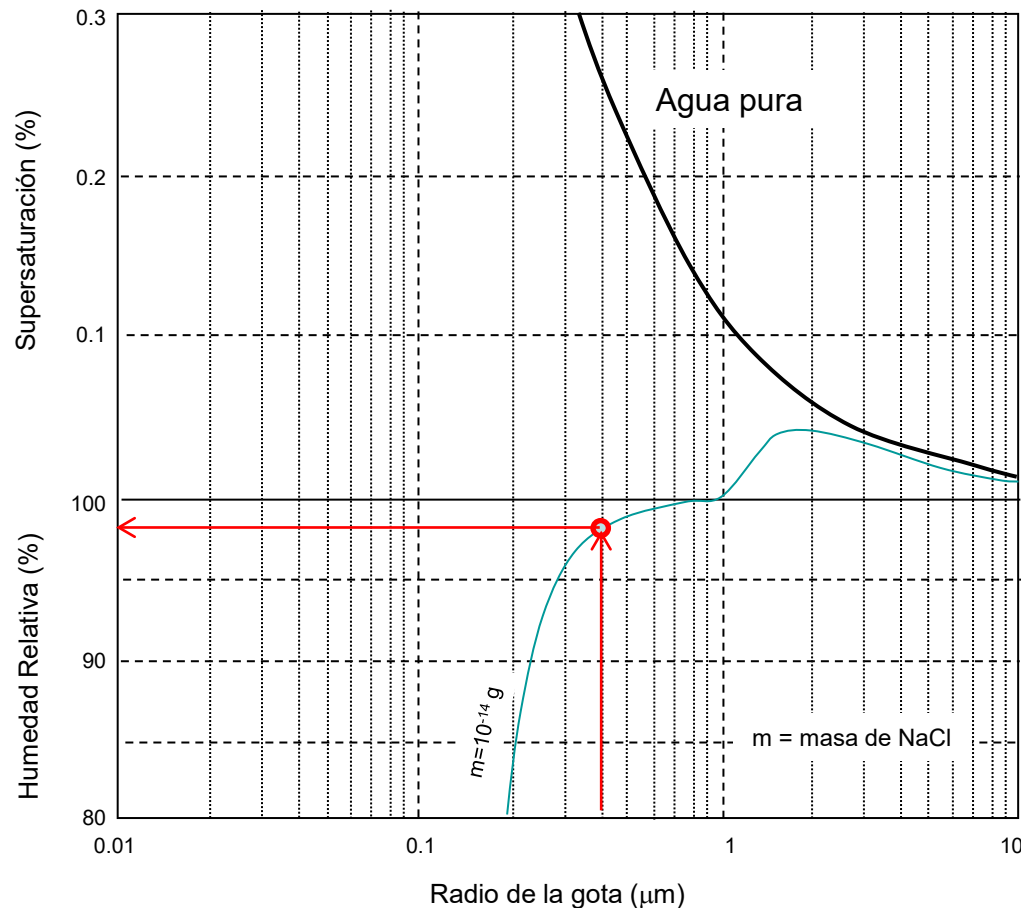


Curvas de Köhler

Efecto combinado de curvatura y soluto.

Indican la HR o Súper-saturación para que una gota de radio r formada sobre un núcleo de masa m se encuentre en equilibrio.

Por ejemplo, si $r=0.4 \mu\text{m}$ y $m=10^{-14} \text{ gr}$ el ambiente debe tener HR=98% para que la gota este en equilibrio

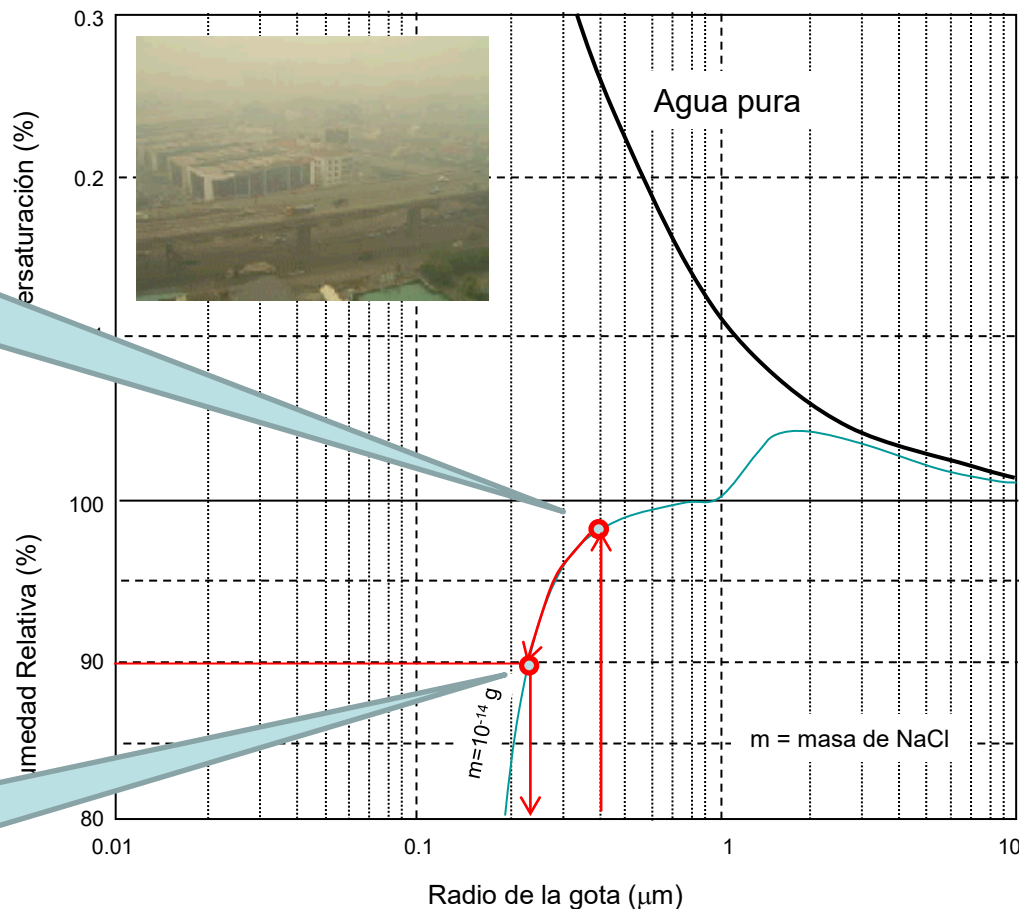


Formación de niebla, bruma y nubes tenues

Que pasa si $r = 0.4 \mu\text{m}$ y $m = 10^{-14} \text{ gr}$ y el ambiente esta a HR=90%?

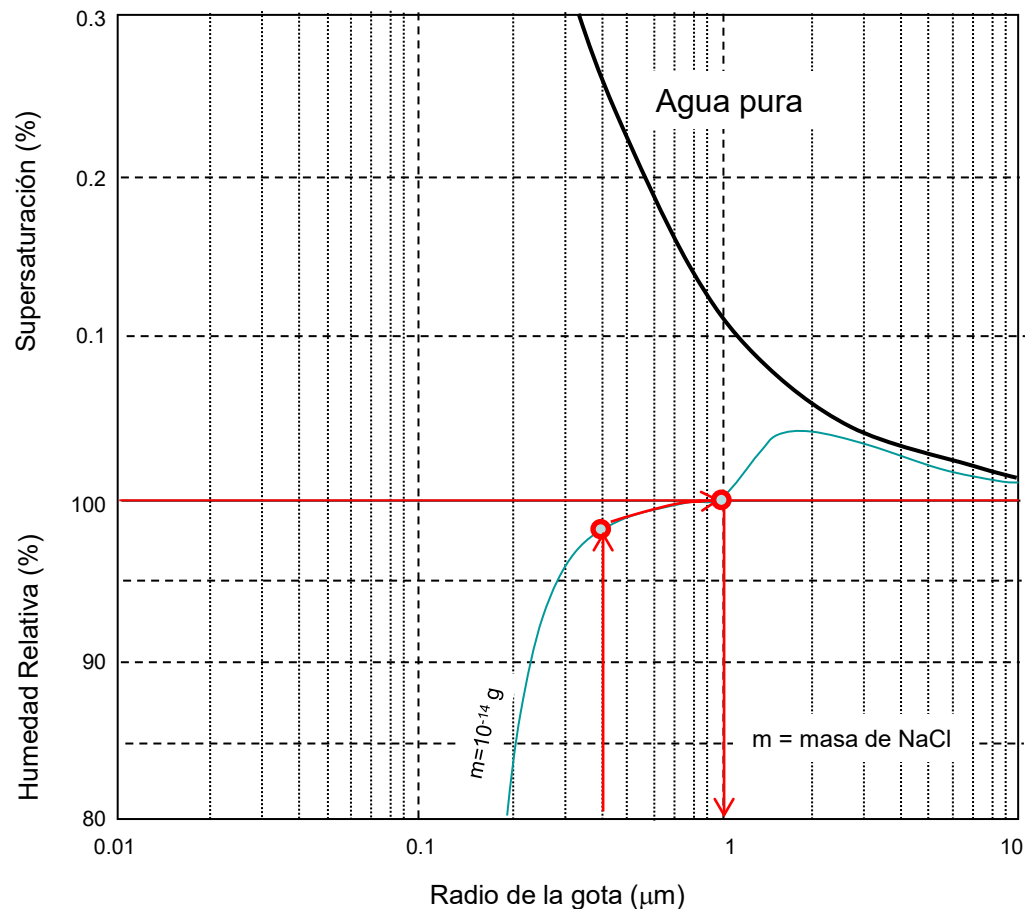
En este caso, el ambiente esta sub-saturado pues el equilibrio se alcanza con HR=98%

La gota comienza a evaporarse y se hace mas pequeña hasta alcanzar el equilibrio cuando $r = 0.25 \mu\text{m}$. Esto producirá una leve niebla aun cuando HR es solo 90%



Formación de niebla, bruma y nubes tenues

Que pasa si $r = 0.4 \mu\text{m}$ y $m = 10^{-14}$ gr y el ambiente esta a 100% de HR?
En este caso, el ambiente esta sobre-saturado y la gota crece hasta alcanzar su equilibrio en $r = 1 \mu\text{m}$. Una nube digna....



Gotas activadas

Que pasa si $r = 0.4 \mu\text{m}$ y $m = 10^{-14}$ gr y el ambiente esta a $S=0.07\%$?
En este caso, el ambiente esta sobre-saturado. La gota alcanza su punto de activación ($r = 1.8 \mu\text{m}$) y continua creciendo aceleradamente pues el ambiente se hace mas sobresaturado para una gota grande...

