



GF3003
Ciencias Atmosféricas

Laura Gallardo Klenner

Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

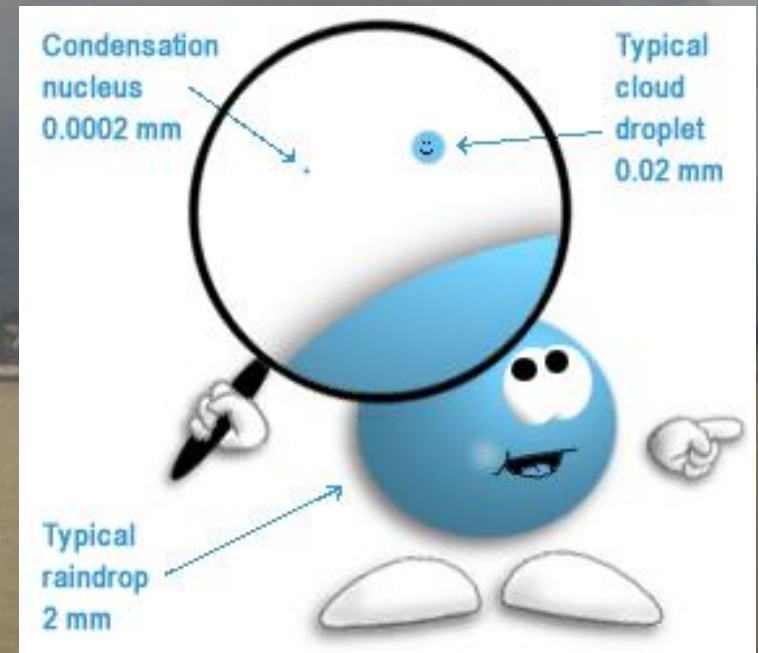
Primavera 2010

LGK 2010

HOY: Termodinámica (3)

Nubes y precipitación

- Curvas de Köhler
- Crecimiento de gotas de nubes cálidas y frías
- Sistemas nubosos: estratocúmulus, convección tropical, frentes cálidos y fríos

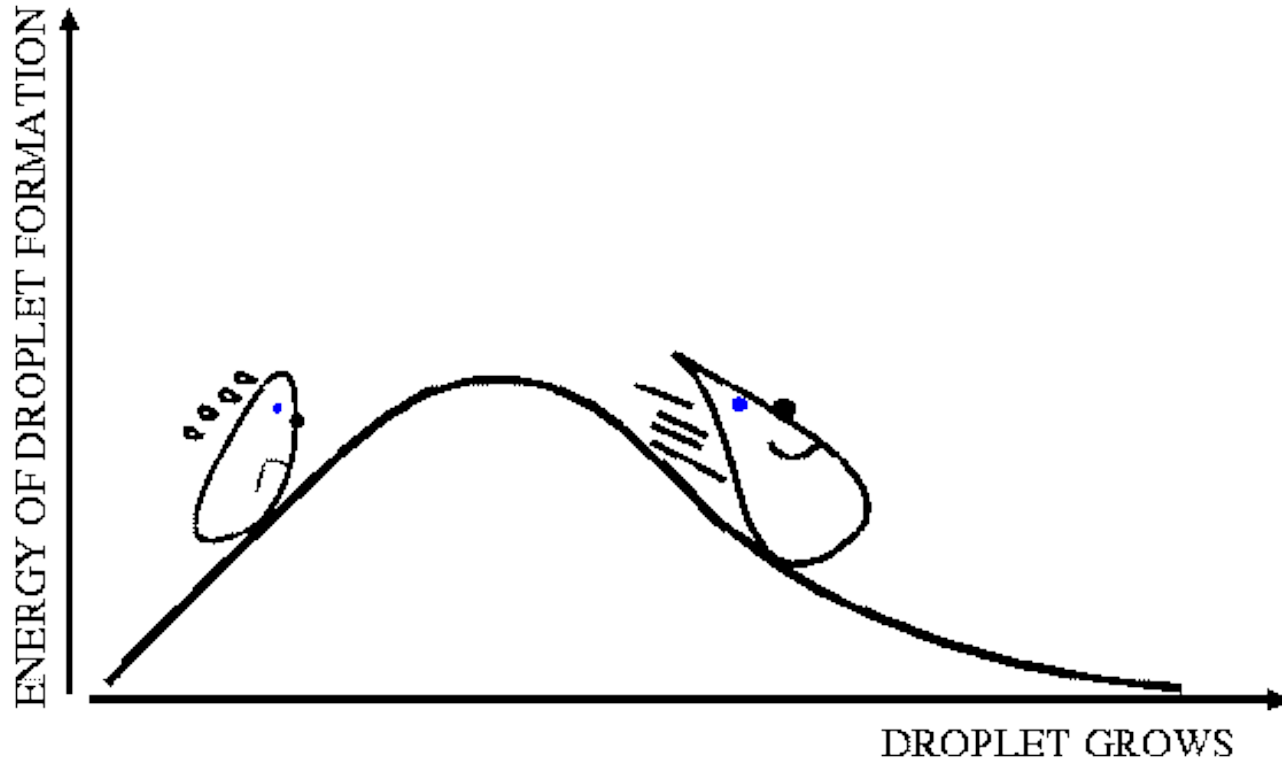


Más específicamente, el/la alumno/a será capaz de:

- Explicar los procesos representados en las curvas de Köhler
- Caracterizar núcleos de condensación de nubes en términos de composición y tamaño
- Describir los procesos que explican el crecimiento de gotas en nubes cálidas
- Describir los procesos que explican el crecimiento de cristales en nubes frías
- Familiarizarse con las propiedades de los núcleos de condensación de hielo
- Reconocer la nubosidad asociada a sistemas frontales



¿Cómo se forman las gotas de nube?

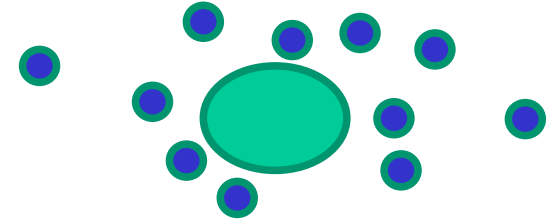


LGK 2010

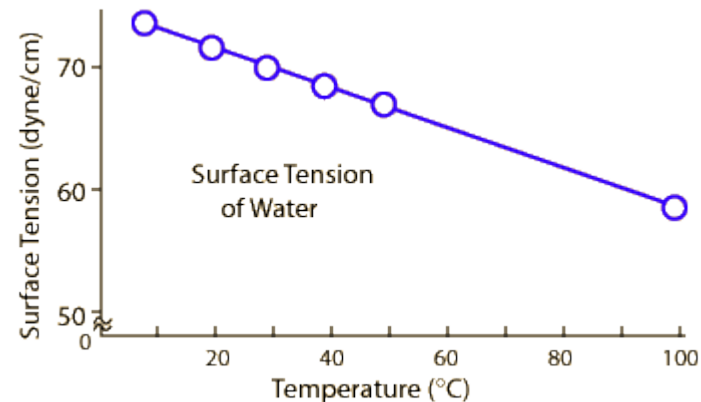
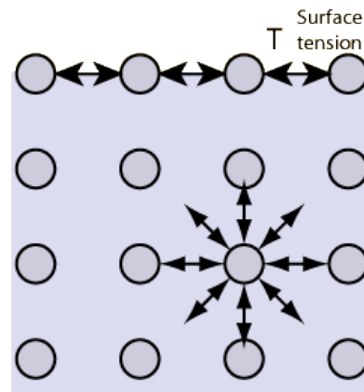
<http://www.atm.helsinki.fi/~hvehkama>

Nucleación homogénea: ¿cómo condensa el vapor de agua pura?

La formación de gotas se verá favorecida en tanto haya más vapor de agua disponible

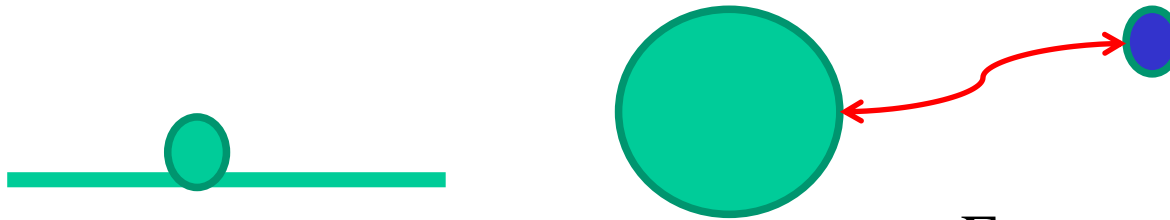


La formación se verá desfavorecida por la evaporación (temperatura) y por la tensión superficial de la gota



LGK 2010

Nucleación homogénea de gota



Competencia entre tensión superficial y evaporación/condensación

$$V, A=\delta V$$

Evaporación/**Condensación**

Para formar una gota se necesita un cambio en energía:

$$\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l)$$

Tensión superficial

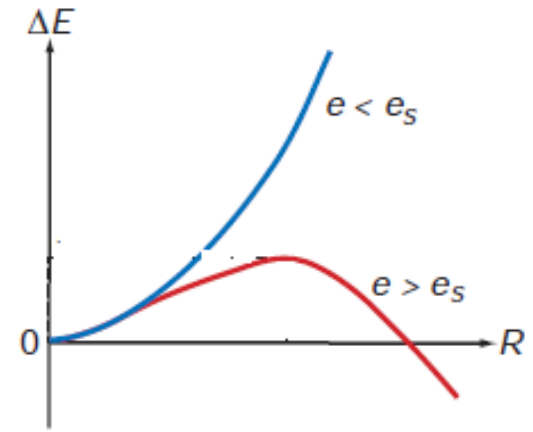
Cambio de fase para n gotas/ V

$$\mu_v - \mu_l \approx kT \ln \left(\frac{e}{e_s} \right)$$

Para el caso de una gota esférica

$$\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l)$$

$$\Rightarrow \Delta E = 4\pi R^2 \sigma - \frac{4\pi R^3}{3} nkT \ln\left(\frac{e}{e_s}\right)$$



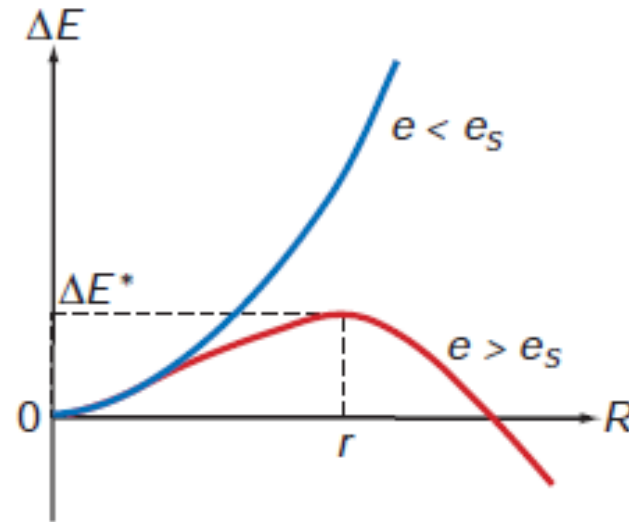
En condiciones subsaturadas el sistema requiere ganar energía y eso desfavorece la formación gotas

En condiciones sobresaturadas es posible la formación de gotas pero....depende del tamaño

Ecuación de Kelvin

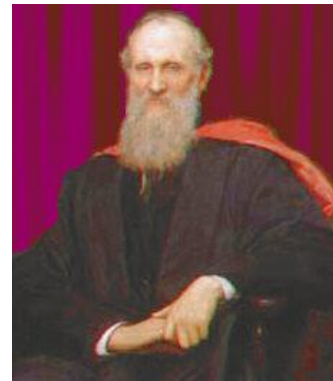
$$\frac{d(\Delta E)}{dR} = 0$$

$$\Rightarrow r^* = \frac{2\sigma}{nKT \ln\left(\frac{e}{e_s}\right)}$$



Si $R < r^*$: las gotas se evaporan

Si $R \geq r^*$: las gotas crecen por condensación



Para que logren crecer las gotas de agua pura

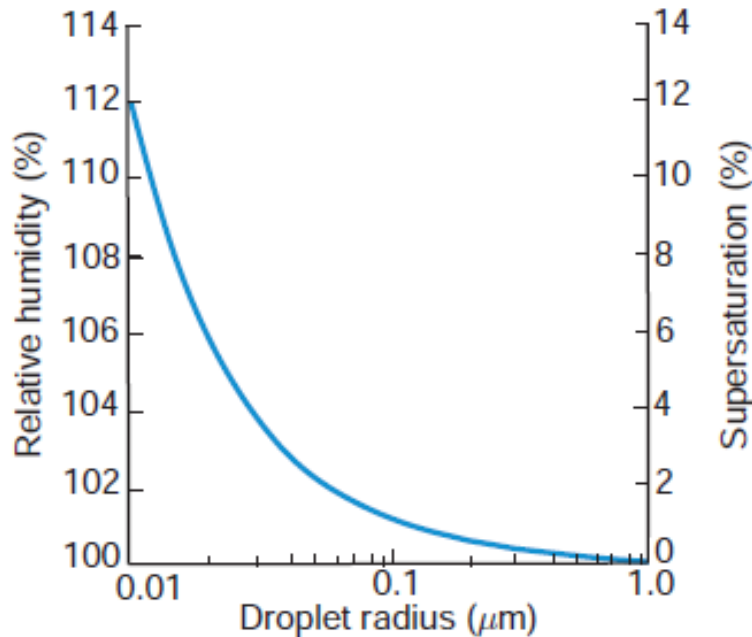
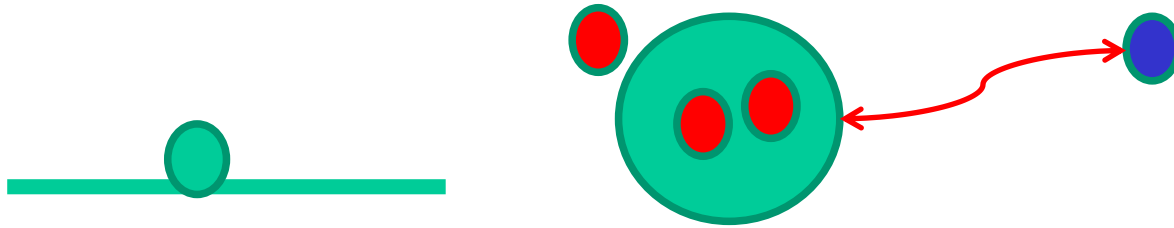


Fig. 6.2 The relative humidity and supersaturation (both with respect to a plane surface of water) at which pure water droplets are in (unstable) equilibrium at 5 °C.

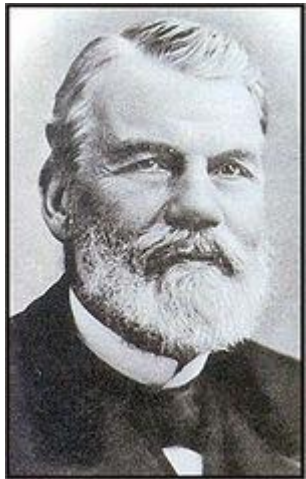
$$\frac{e}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma}{nKTr^*}\right)$$

Pero en la atmósfera la sobresaturación no excede el 2%

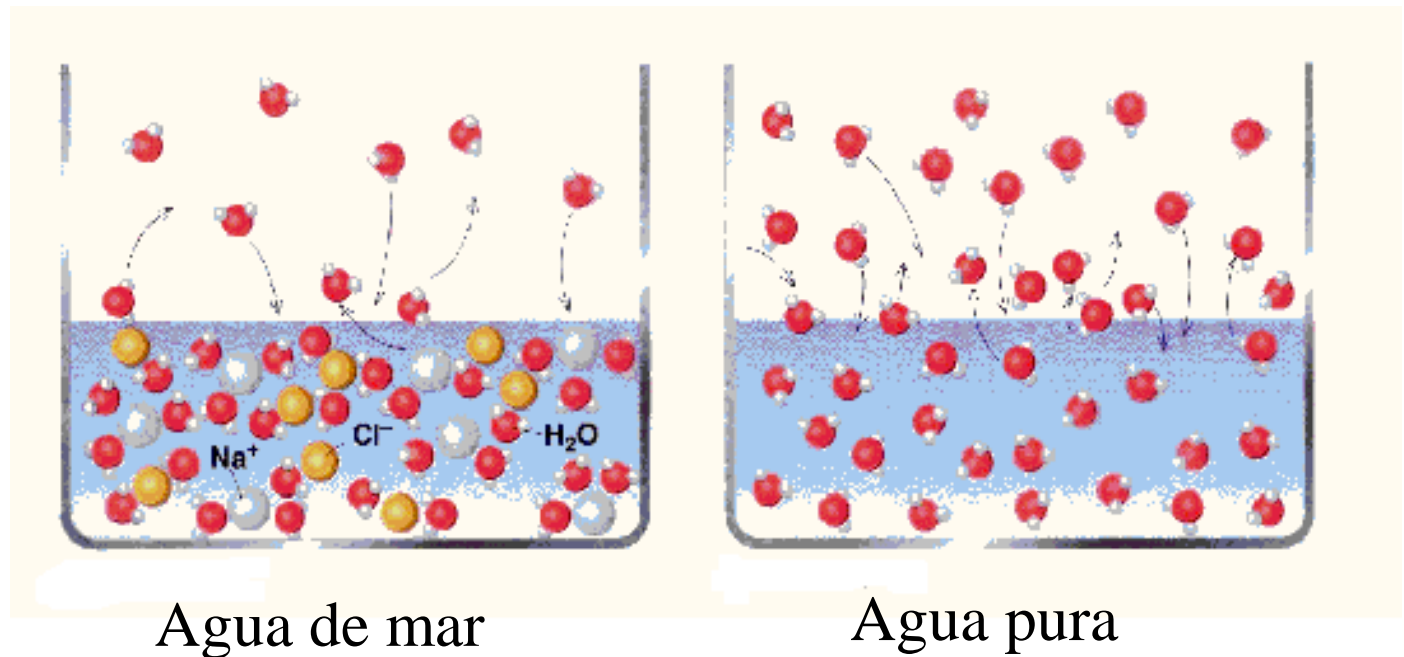
¿Qué pasa si hay núcleos de condensación? (Nucleación heterogénea)



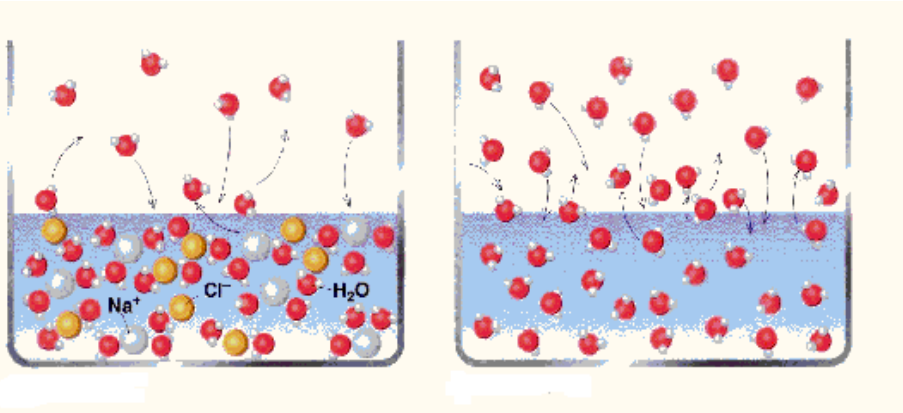
La presencia de solutos no volátiles baja la presión de vapor de la solución



F. M. Raoult
(1830-1901)



Efecto de soluto o de Raoult



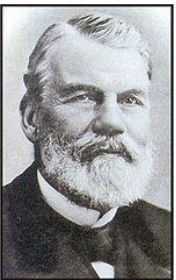
$$\frac{e'_s}{e_s} = f = \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{agua}} + n_{\text{solute}}}$$

$$n_{\text{solute}} = i N_A \frac{m}{M}$$

i : grado de disociación iónica

$$\Rightarrow \frac{e'_s}{e_s} = 1 - \frac{b}{R^3}$$

$$b = b(i, \rho_l, M_{\text{solute}})$$



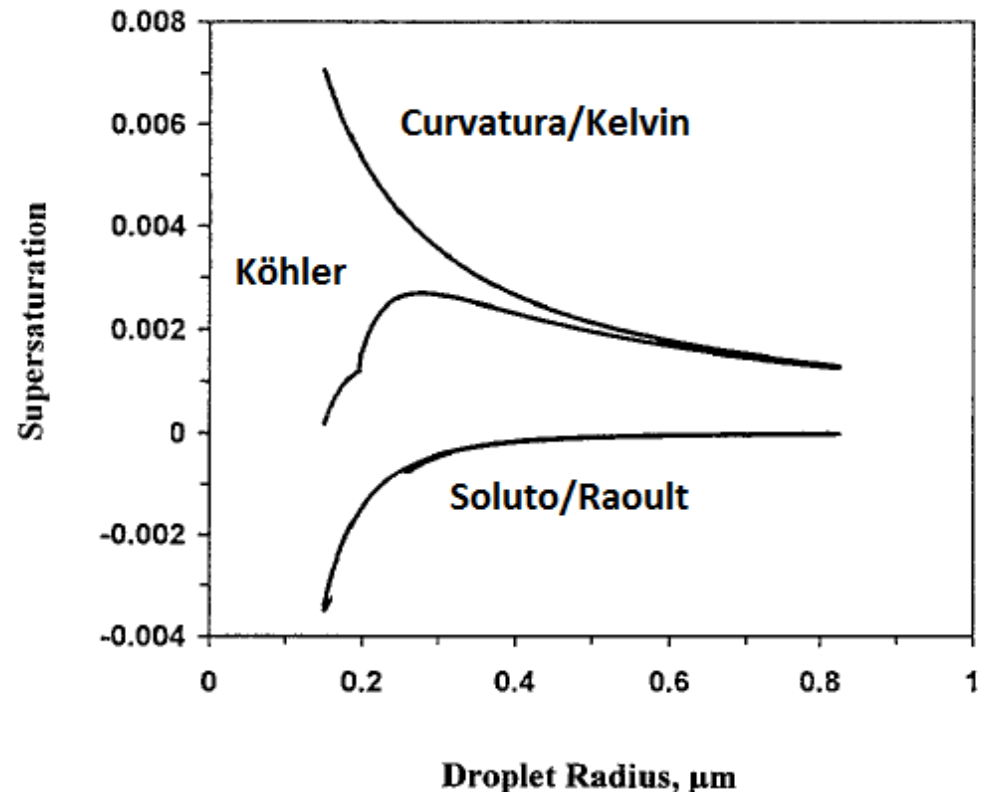
Curva de Hilding Köhler (~1921)

$$\frac{e'_s}{e_s} = \exp\left(\frac{2\sigma'}{nKTr^*}\right) \left[1 + \frac{imM_{agua}}{M_{soluto} \left(\frac{4\pi r^3}{3} \rho_l - m \right)} \right]$$

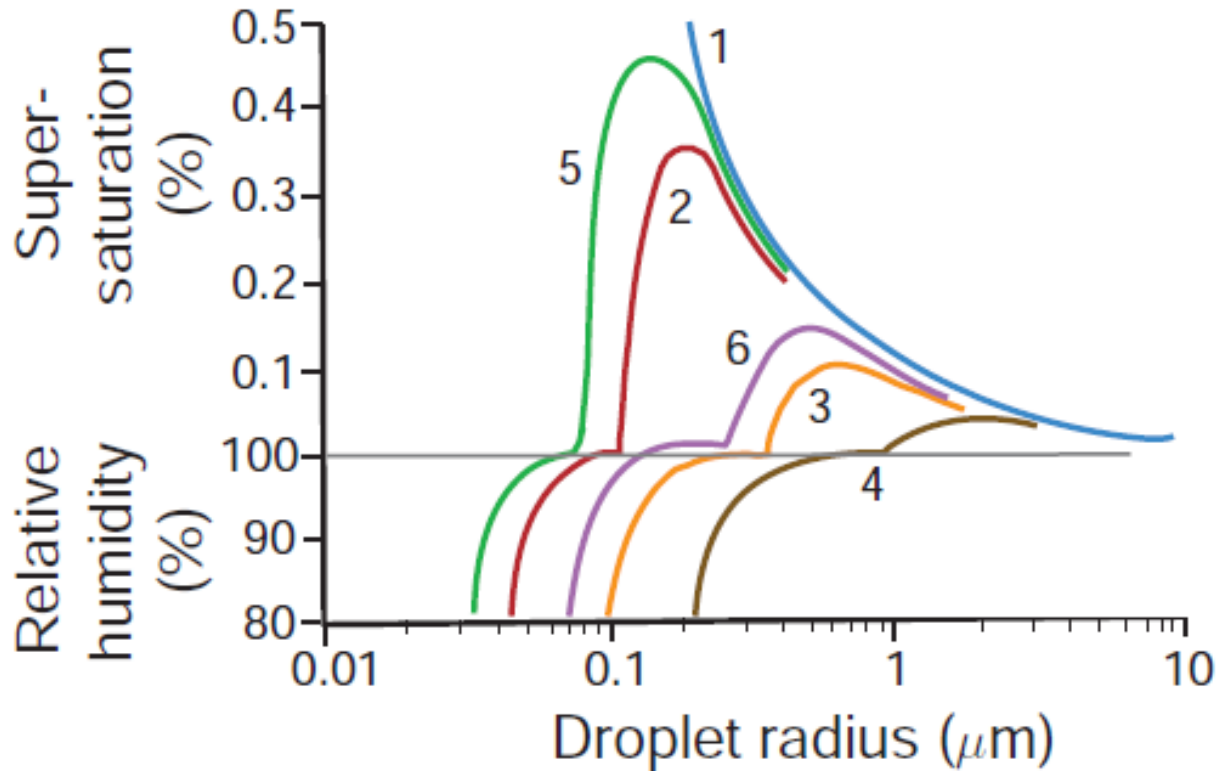
$$\frac{e'_s}{e_s} \approx 1 + \frac{a}{r^*} - \frac{b}{r^{*3}}$$

Efecto de curvatura

Efecto de soluto

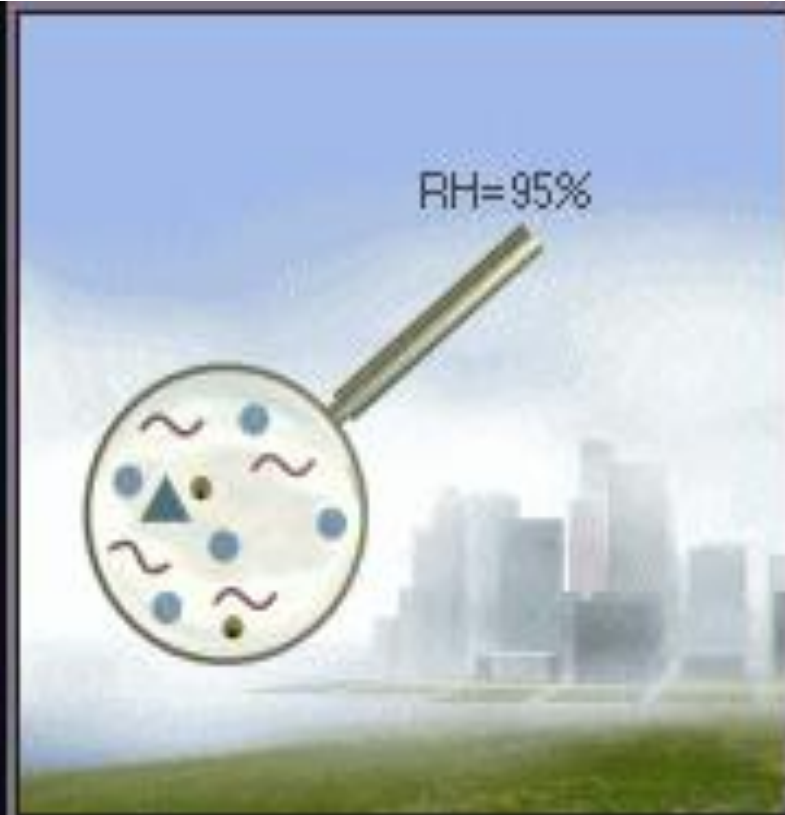
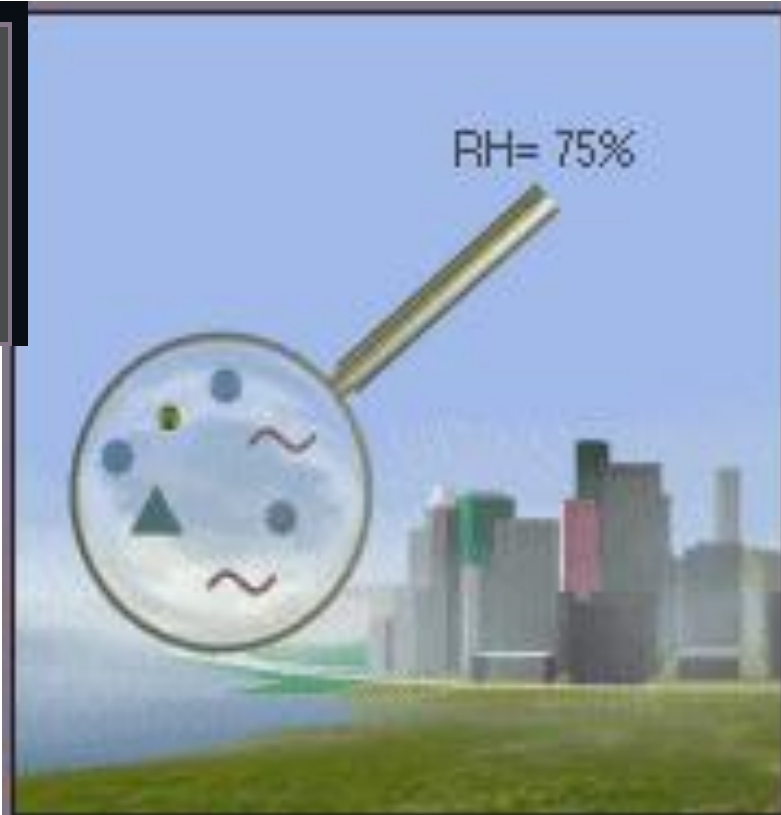


Curvas de Köhler



El radio de activación/supersaturación de activación depende de la composición y de la masa del soluto

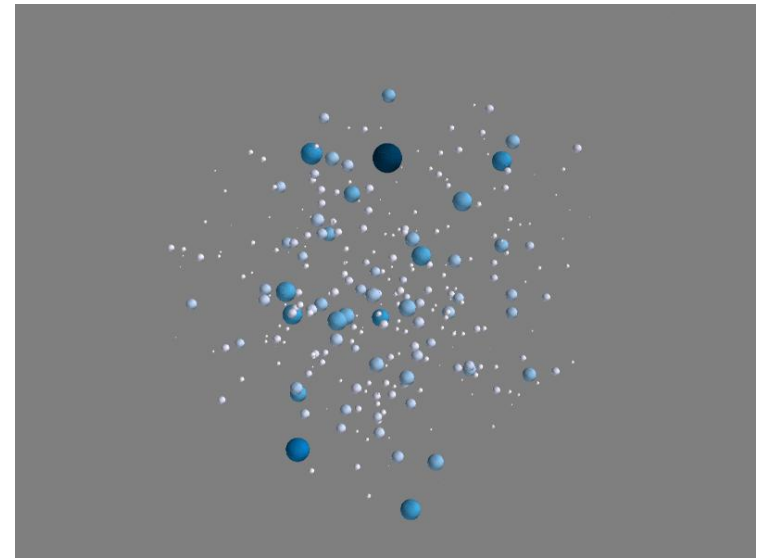
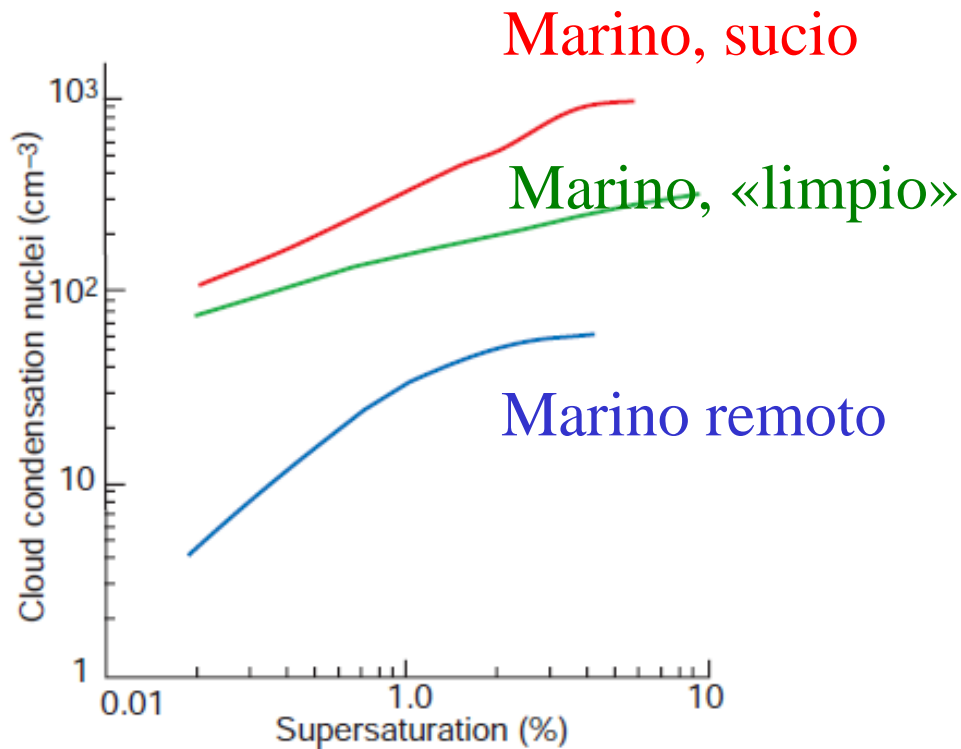
La bruma puede aparecer sin alcanzar saturación: la facilitan los aerosoles higroscópicos



LGK 2010

¿Quiénes actúan como núcleos de condensación de nubes (CCN)?

Los aerosoles que se activan, esto es, que facilitan la condensación a una cierta sobresaturación se llaman núcleos de condensación de nubes (CCN=Cloud Condensation Nuclei)



ESR 2010

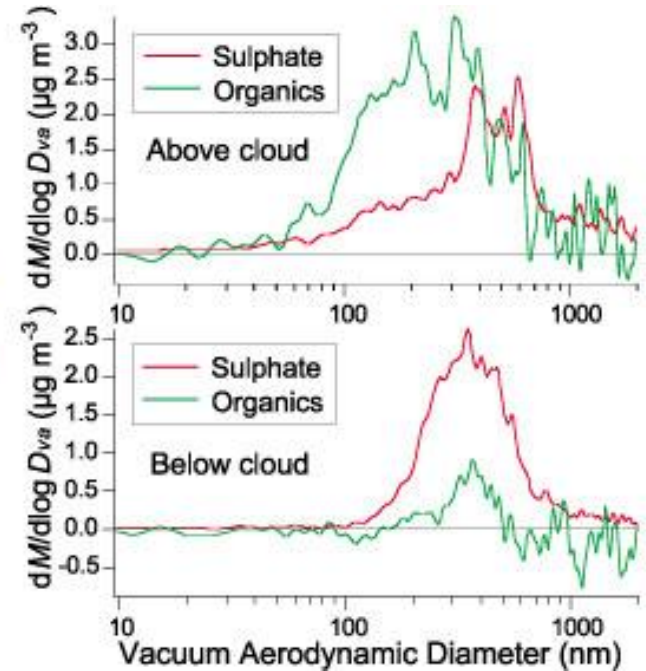
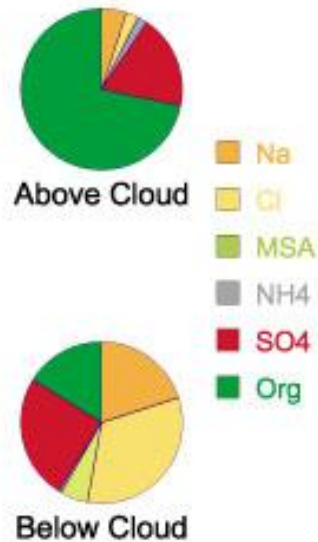
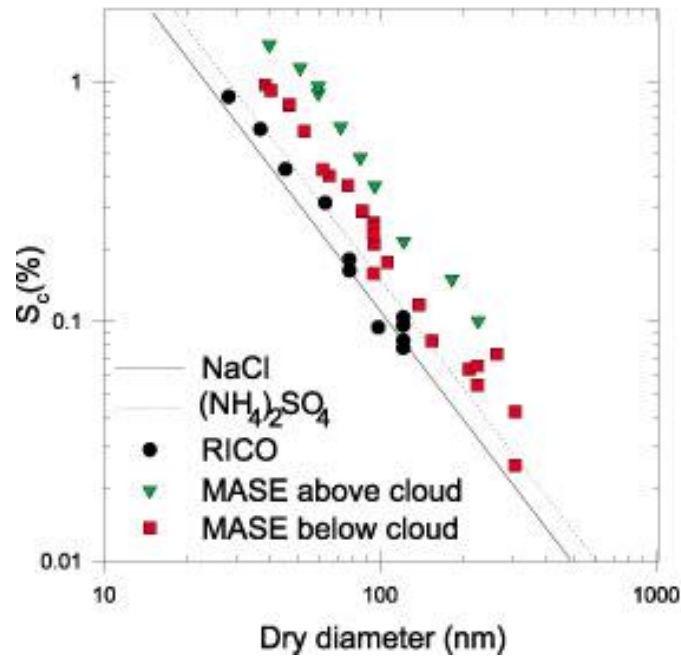
Introducción a la Meteorología – Nubes

UICH/ECFM/DGE – R. Garreaud

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



Origen de los CCN

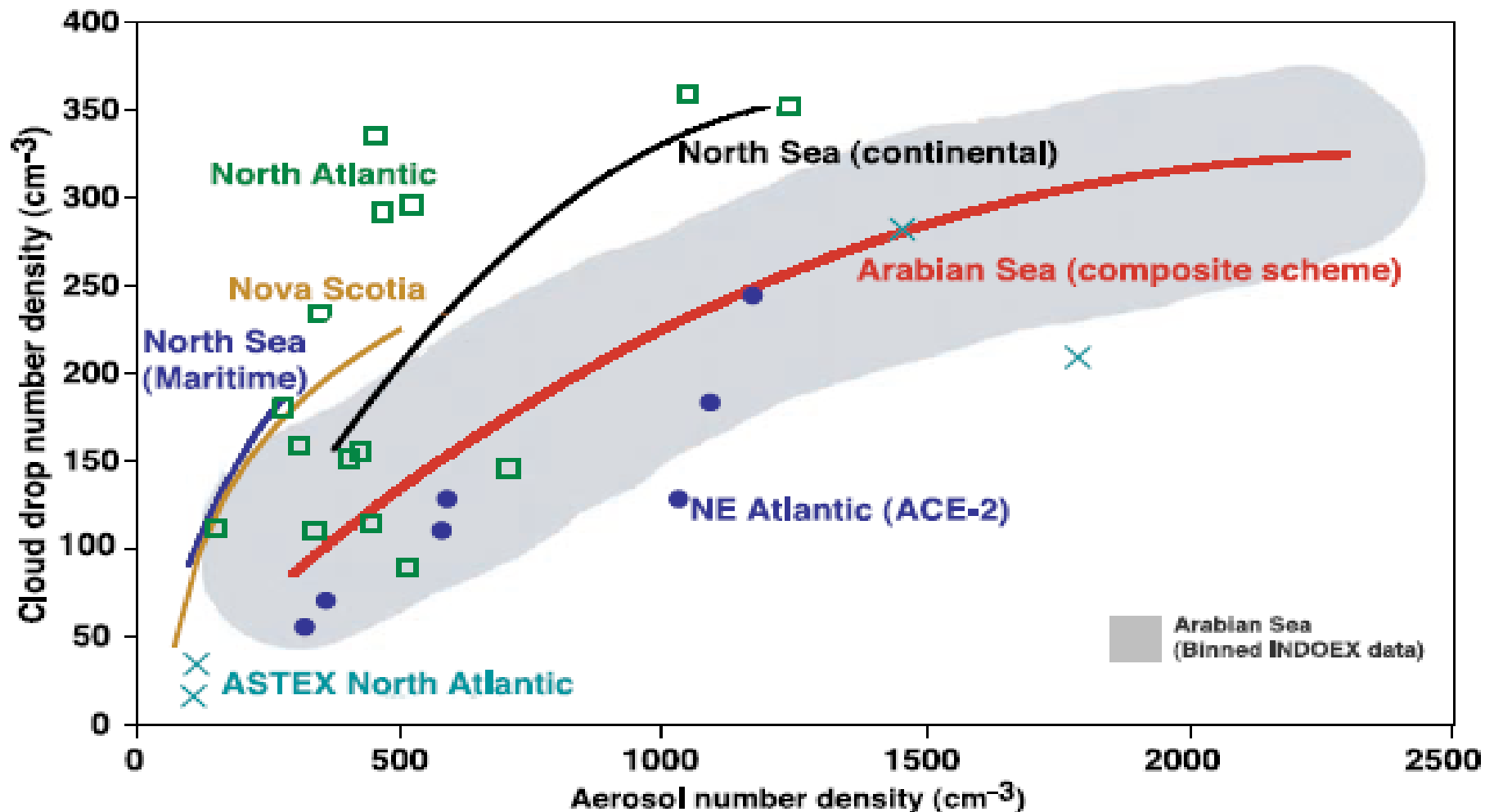


¡Tamaño y composición importan!

Aerosoles y núcleos de condensación

Ramanathan et al, 2001

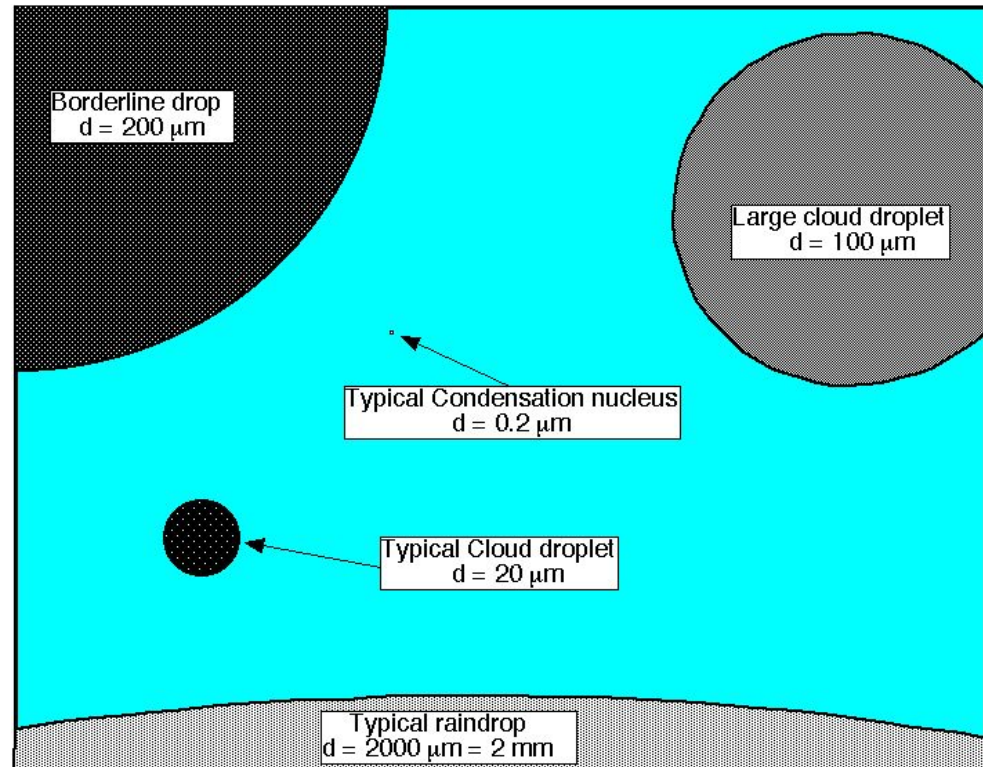
SCIENCE'S COMPASS



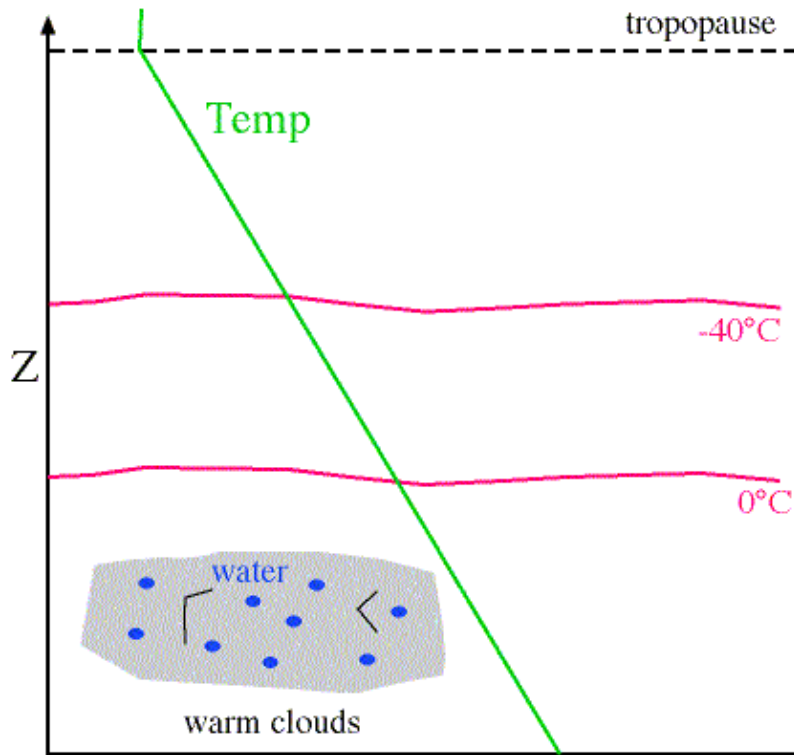
Pausa (5 minutos)



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

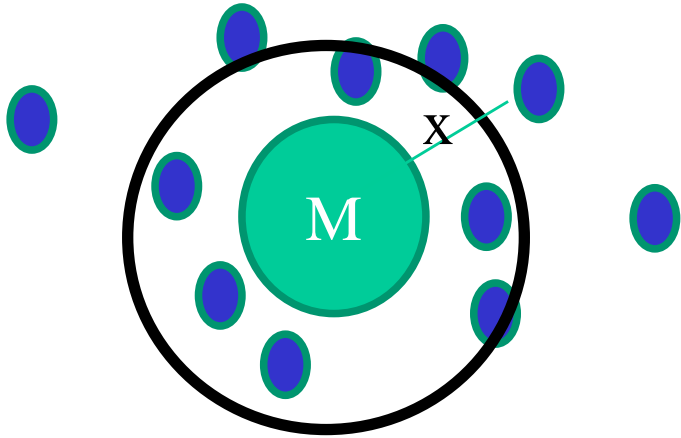


Nubes cálidas: ¿crecimiento de gotas?



LGK 2010

Crecimiento por condensación



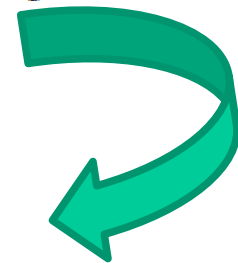
$$\frac{dM}{dt} = 4\pi x^2 D \frac{d\rho_v}{dx}$$

D: Difusión



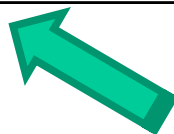
$$\frac{dM}{dt} \int_{x=r}^{x=\infty} \frac{dx}{x^2} = 4\pi D \int_{\rho_v(r)}^{\rho_v(\infty)} d\rho_v$$

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l$$

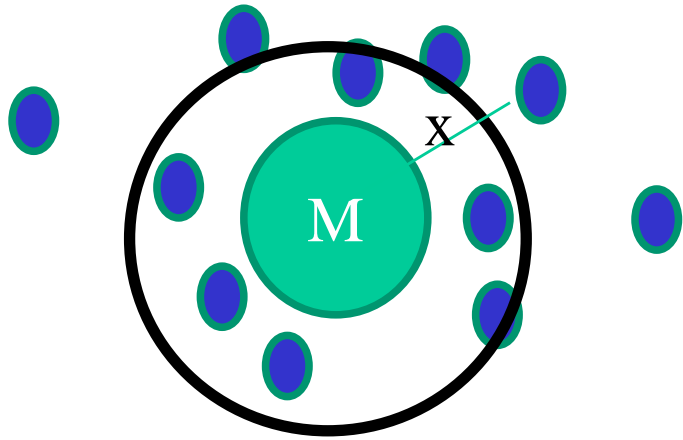


$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r} \frac{D\rho_v(\infty)}{\rho_l e(\infty)} [e(\infty) - e(r)]$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{r\rho_l} [\rho_v(\infty) - \rho_v(r)]$$




Crecimiento por condensación



$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r} \frac{D\rho_v(\infty)}{\rho_l e(\infty)} [e(\infty) - e(r)]$$

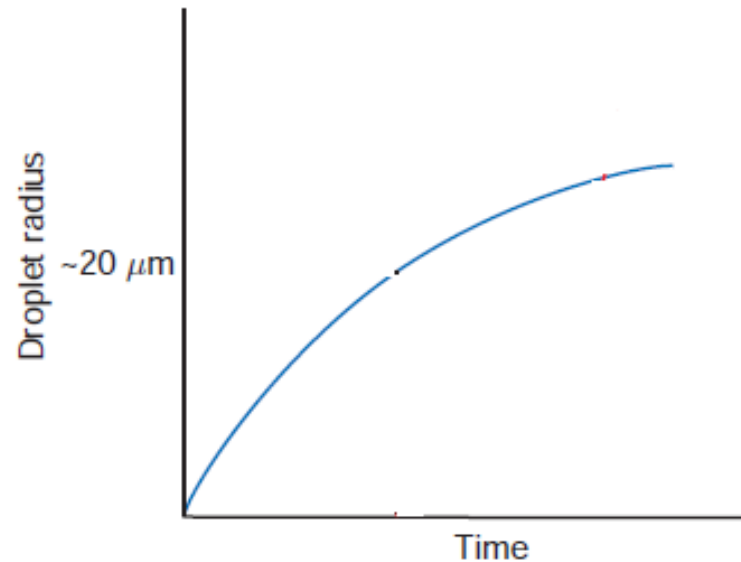
Pero $\frac{e(\infty) - e(r)}{e(\infty)} \simeq \frac{e(\infty) - e_s}{e_s} = S$



$$r \frac{dr}{dt} = G_\ell S$$

$$G_\ell = \frac{D\rho_v(\infty)}{\rho_l}$$

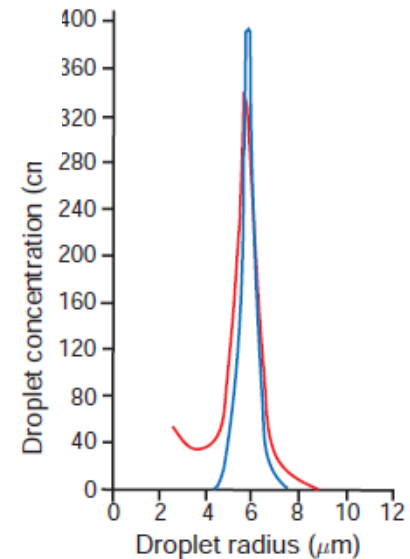
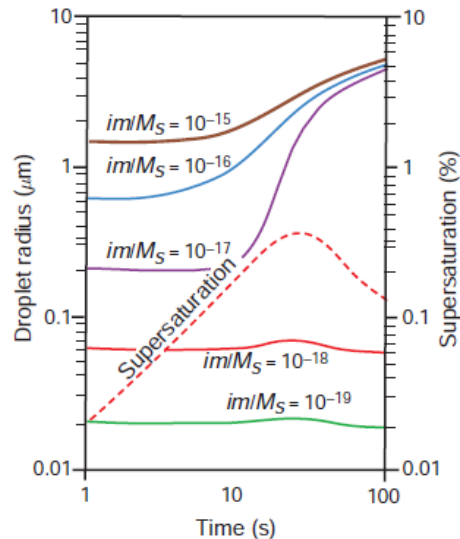
L



En la medida que la parcela asciende ...

- Más vapor de agua condensa
- Se activan los núcleos más eficientes (S_s menores)
- Cuando se alcanza S_{max} , las gotas crecen más rápido que la tasa de condensación por ascenso
- Las gotas más grandes se empiezan a evaporar
- Las pequeñas crecen más rápido que las grandes y las «alcanzan» en tamaño...distribución monodispersa
- La condensación se vuelve poco eficiente

$$r \frac{dr}{dt} = G_e S$$

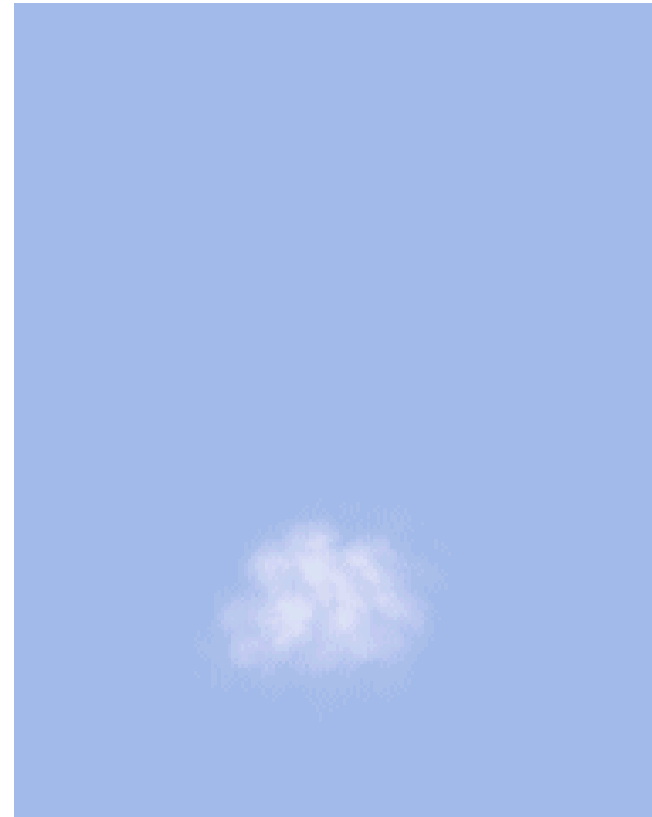
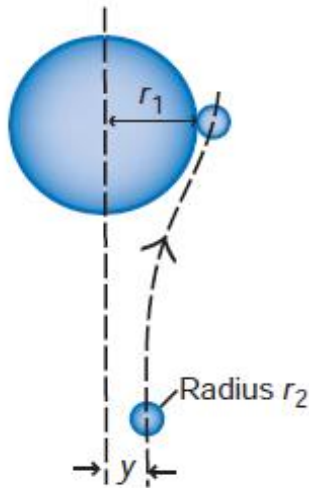


El crecimiento por condensación NO es eficiente

- El proceso sólo es eficiente en los primeros 100-200 m
- La distribución de tamaño de gotas NO es monodispersa
- Si las gotas sólo crecieran hasta $10\ \mu\text{m}$ jamás precipitaría desde nubes cálidas

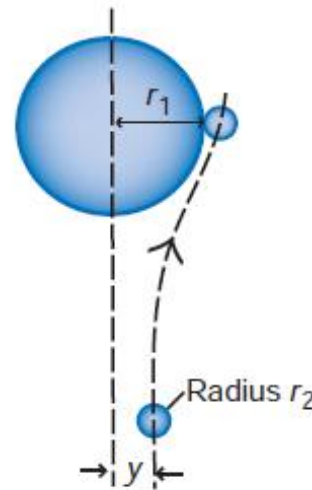
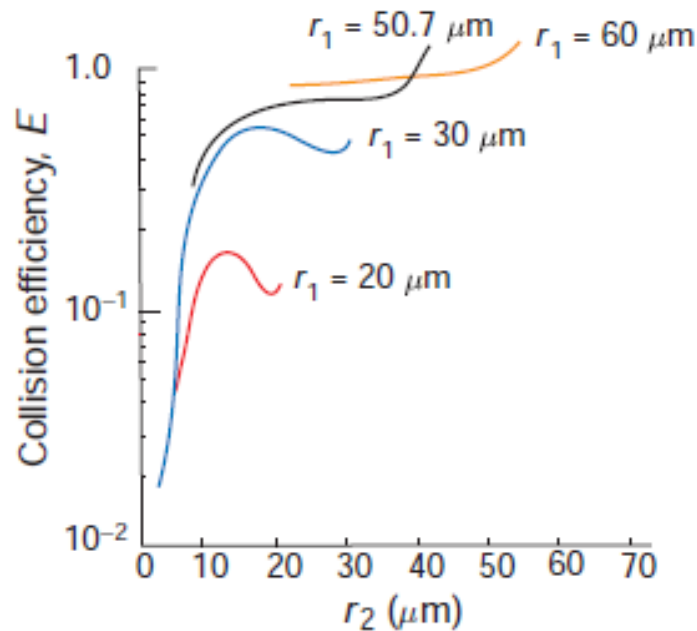
Crecimiento por coalescencia/colisiones

Una vez que **alguna gota** crece un poco más que las otras ($\sim 20 \mu\text{m}$), al caer podrá arrastrar a otras y crecer



LGK 2010

Eficiencia de las colisiones

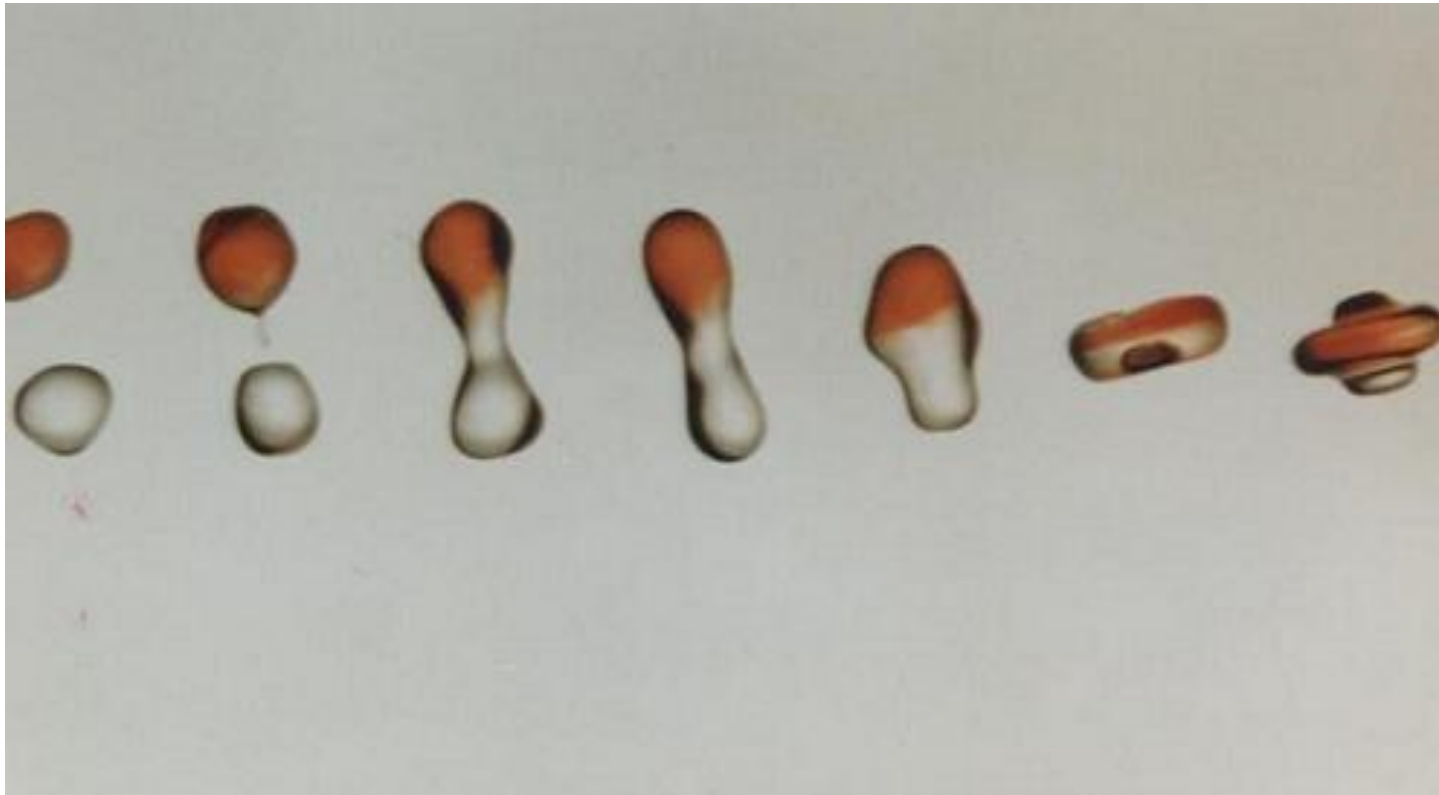


$$E = \frac{y^2}{(r_1 + r_2)^2}$$

Si $r_2 \ll r_1$...las gotas pequeñas siguen las líneas de corriente

Si $r_1 \sim r_2$...podrían chocar pero sus velocidades de caída son parecidas

Eficiencia de la coalescencia

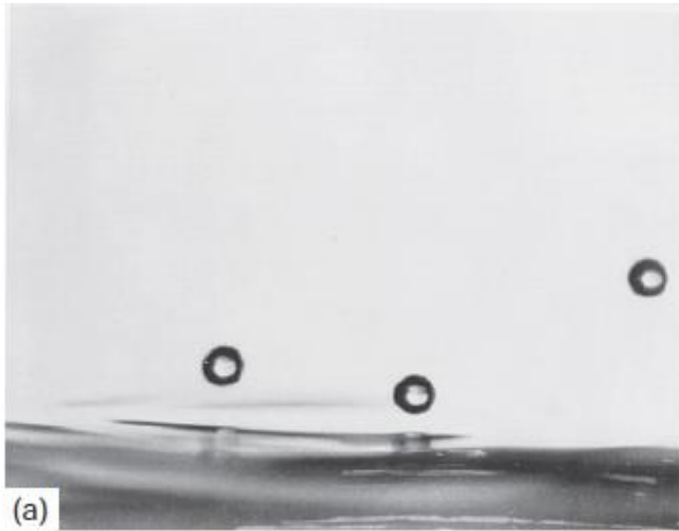


No basta que las gotas choquen, deben juntarse/fundirse

LGK 2010

<http://mussl.mie.utoronto.ca/Spray-Characterization.htm#collisions>

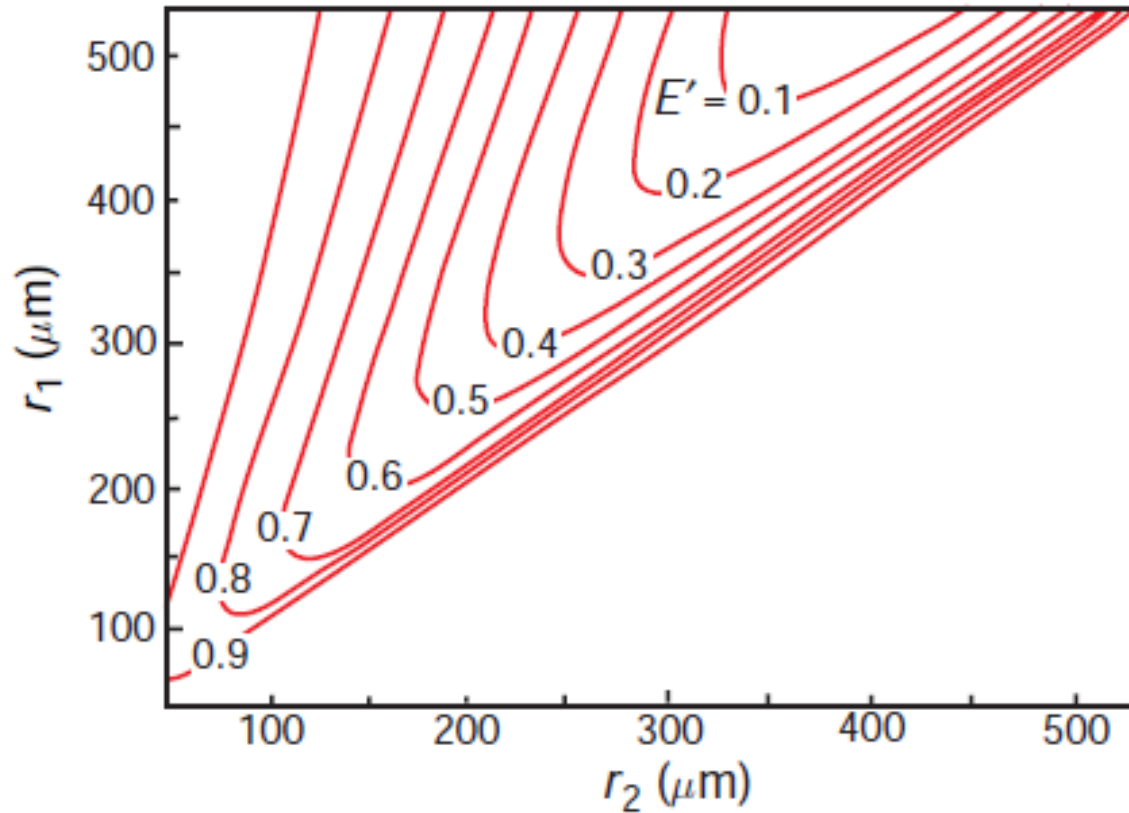
La coalescencia depende la geometría y de la física



Dependiendo del ángulo de incidencia las gotas podrán rebotar o coalescer

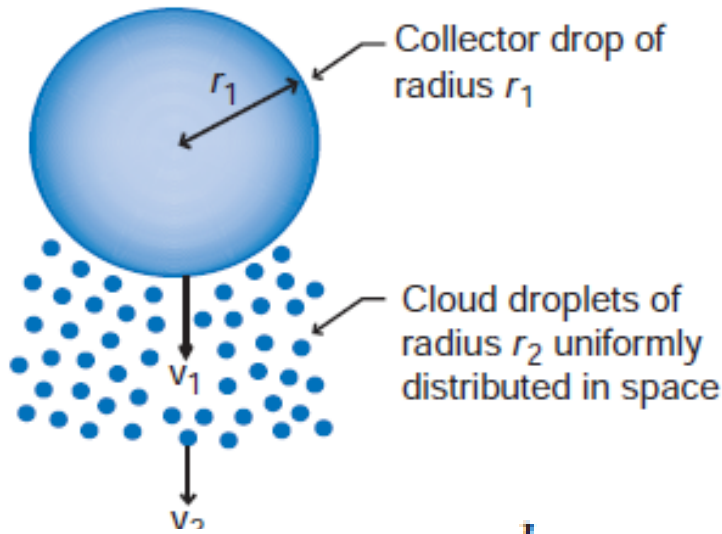
Dependiendo de si queda o no aire entre las gotas las gotas podrán coalescer o no

Eficiencia de la coalescencia



Depende de la energía relativa de las gotas...hay efectos inerciales

¿Cuánto crecen las gotas?



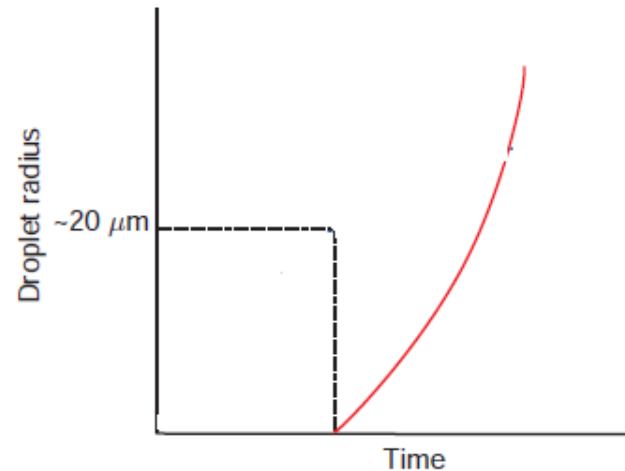
$$\frac{dM}{dt} = \pi r_1^2 (v_1 - v_2) w_l E_c$$

$$E_c = EE'$$

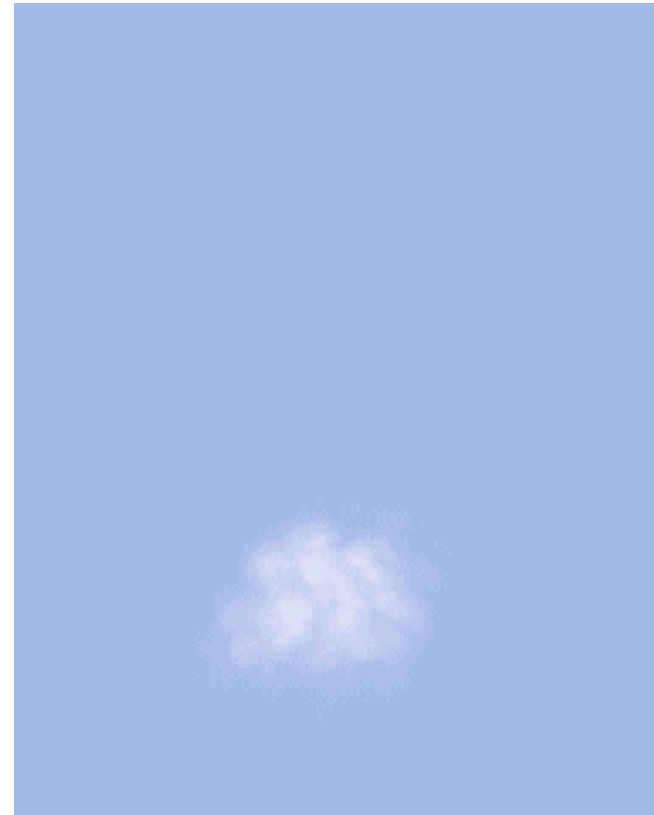
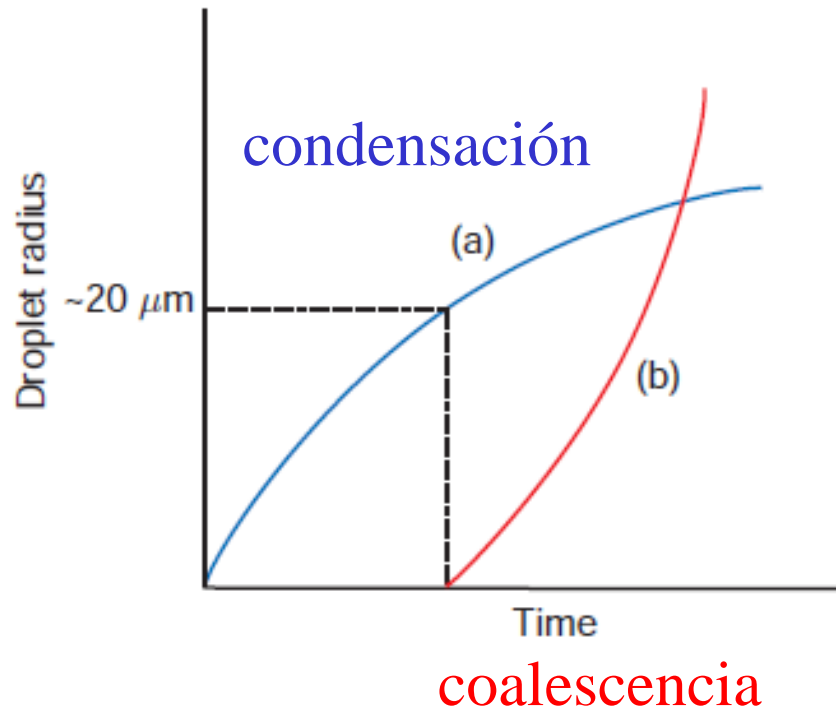
$$\frac{dr_1}{dt} = \frac{(v_1 - v_2) w_l E_c}{4\rho_l}$$

$$\left. \begin{array}{l} v_1 \gg v_2 \\ E_c \sim E^* 1 \sim r_1 \end{array} \right\} \frac{dr_1}{dt} = \frac{v_1 w_l E}{4\rho_l}$$

A mayor tamaño más crece la gota por coalescencia



En suma, en nubes cálidas:



Identificar un experimento para ilustrar la formación de una nube



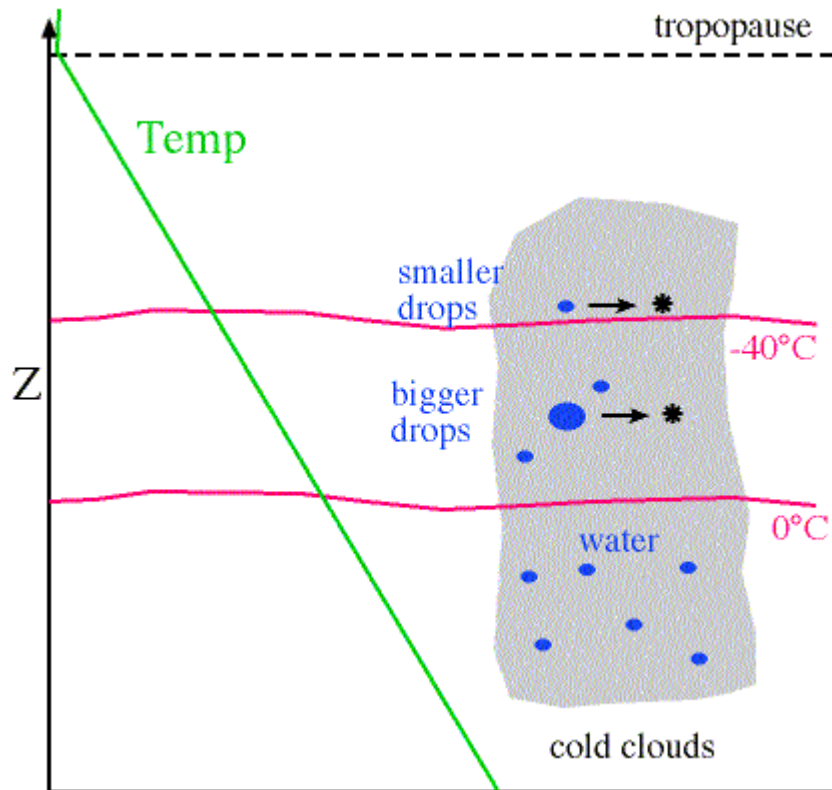
¿Una nube en una botella?/
Cloud in a bottle

Pausa 10 min



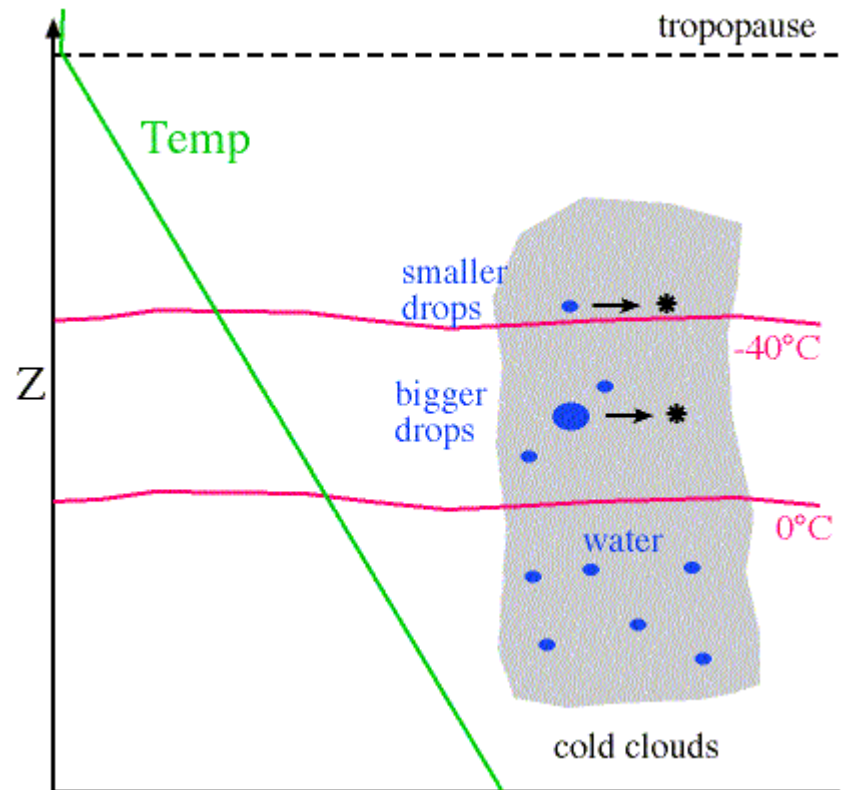
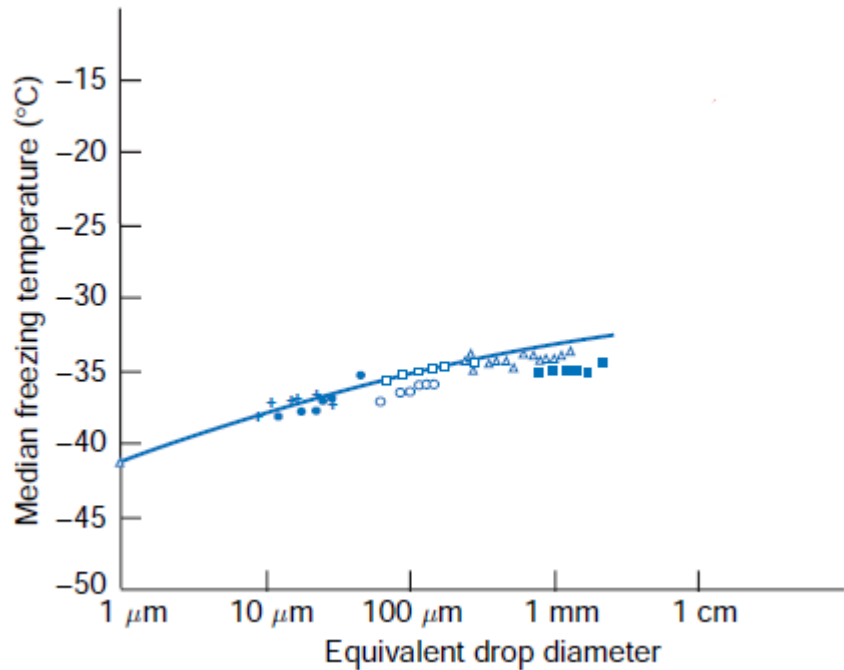
LGK 2010

Nubes frías



Glaciación homogénea

El agua pura NO se congela a 0°C ; hay que enfriarla hasta $\sim -35^{\circ}\text{C}$
Las gotas más grandes se congelan a temperaturas mayores que las pequeñas



Glaciación heterogénea/Núcleos de Condensación de Hielo (ICN)

Main requirements for IN (Pruppacher & Klett)

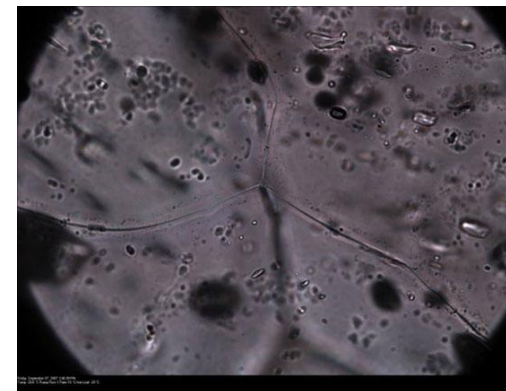
- Insolubility requirement: A rigid substrate is needed for the ice "germ" formation.
- Size requirement: The Aitken range is less efficient than the accumulation mode range.
- Chemichal bond requirement: A similar bond as the ice crystal lattice is beneficial.
- Chrystallographic rquirements. The geometrical arrangement of the aerosol is important.
- Active size requirement.



ICN

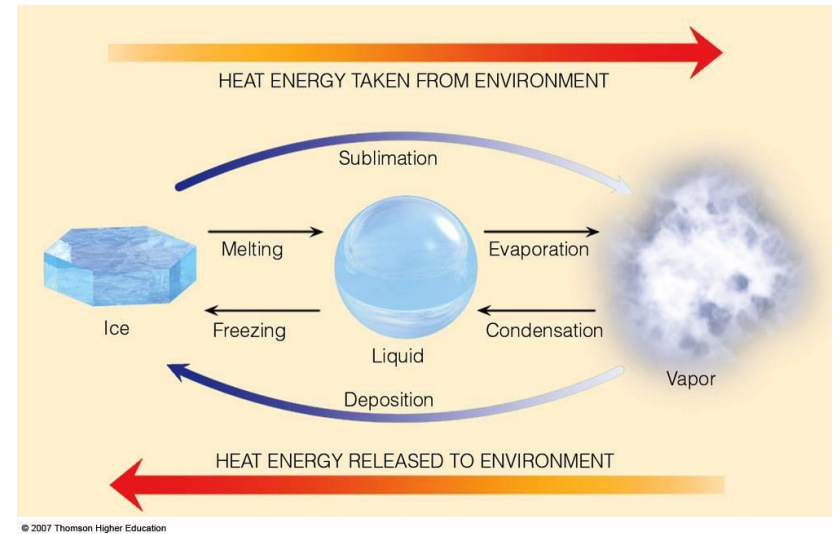
Table 2. Activation Temperatures T_a and Median Freezing Temperatures T_m Determined From Laboratory Experiments^a

Particle Type	Immersion Freezing		Contact Freezing	
	T_a	T_m	T_a	T_m
Bacteria	$-4^{\circ}\text{C}^{\text{b}}$, $a = 250 \mu\text{m}$	$-7^{\circ}\text{C}^{\text{b}}$, $a = 250 \mu\text{m}$	$-3^{\circ}\text{C}^{\text{b}}$	$-4.5^{\circ}\text{C}^{\text{b}}$
Leaf litter	$-5^{\circ}\text{C}^{\text{c}}$, $a = 350 \mu\text{m}$	$-9^{\circ}\text{C}^{\text{c}}$, $a = 350 \mu\text{m}$	$-5^{\circ}\text{C}^{\text{c}}$	$-10^{\circ}\text{C}^{\text{c}}$
Pollen	$-9^{\circ}\text{C}^{\text{d}}$, $a = 250 \mu\text{m}$	$-14^{\circ}\text{C}^{\text{d}}$, $a = 250 \mu\text{m}$	$-5^{\circ}\text{C}^{\text{d}}$	$-10^{\circ}\text{C}^{\text{d}}$
Montmorillonite	$-12^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$, $a = 350 \mu\text{m}$	$-19^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$, $a = 350 \mu\text{m}$, and $-24^{\circ}\text{C}^{\text{f}}$, $a = 50 \mu\text{m}$	$-3^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$	$-8^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$
Kaolinite	$-14^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$, $a = 350 \mu\text{m}$	$-23^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$, $a = 350 \mu\text{m}$, and $-32.5^{\circ}\text{C}^{\text{f}}$, $a = 50 \mu\text{m}$	$-5^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$	$-12^{\circ}\text{C}^{\text{e}}$
Soot	$-18^{\circ}\text{C}^{\text{g}}$, $a = 350 \mu\text{m}$	$-28^{\circ}\text{C}^{\text{g}}$, $a = 350 \mu\text{m}$		$-18^{\circ}\text{C}^{\text{h}}$ (extrapolated)

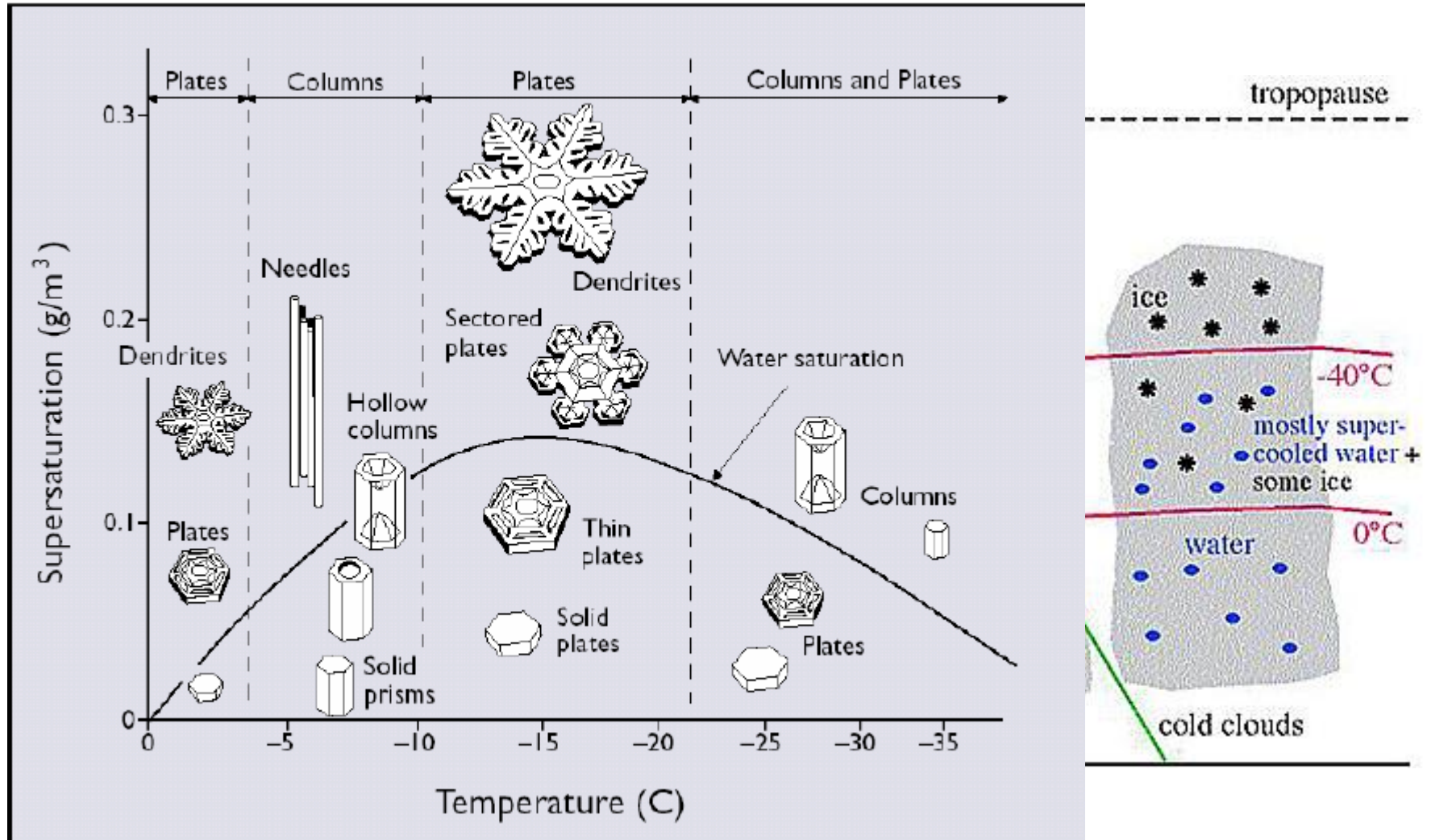


Crecimiento de cristales

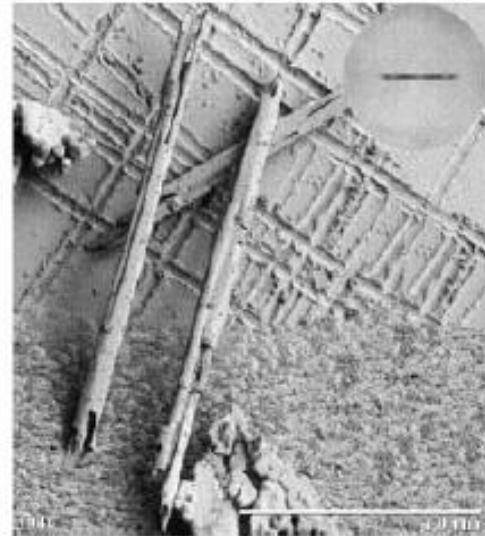
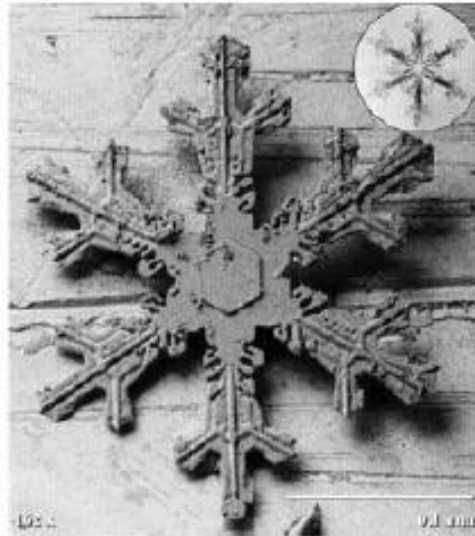
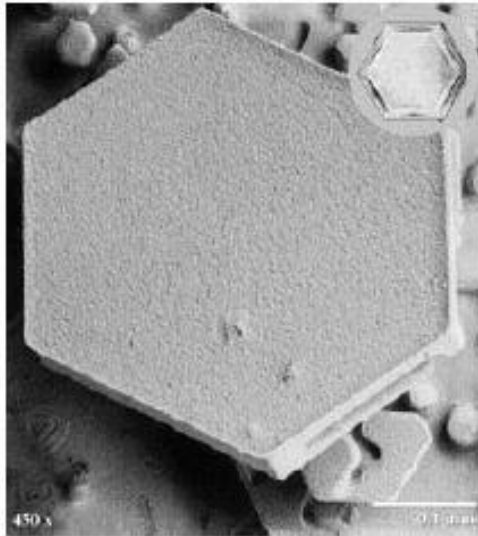
- Deposición: vapor a hielo
- Condensación de agua sobre hielo/núcleo
- Inmersión
- Contacto



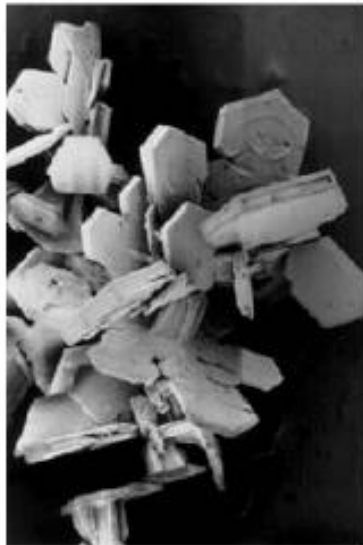
Distintos cristales predominan según T



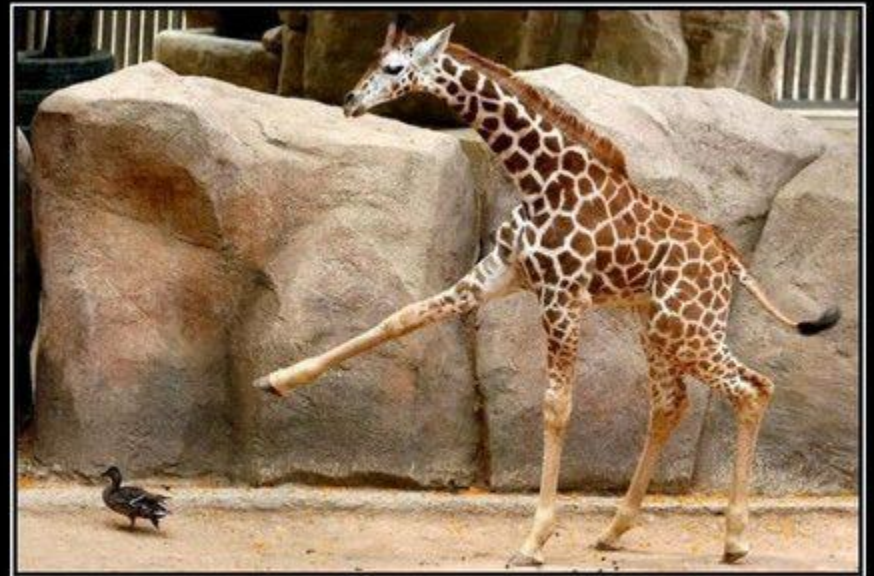
Cristales de hielo



<http://www.lpsi.barc.usda.gov/ennisnow/>



Pausa in situ

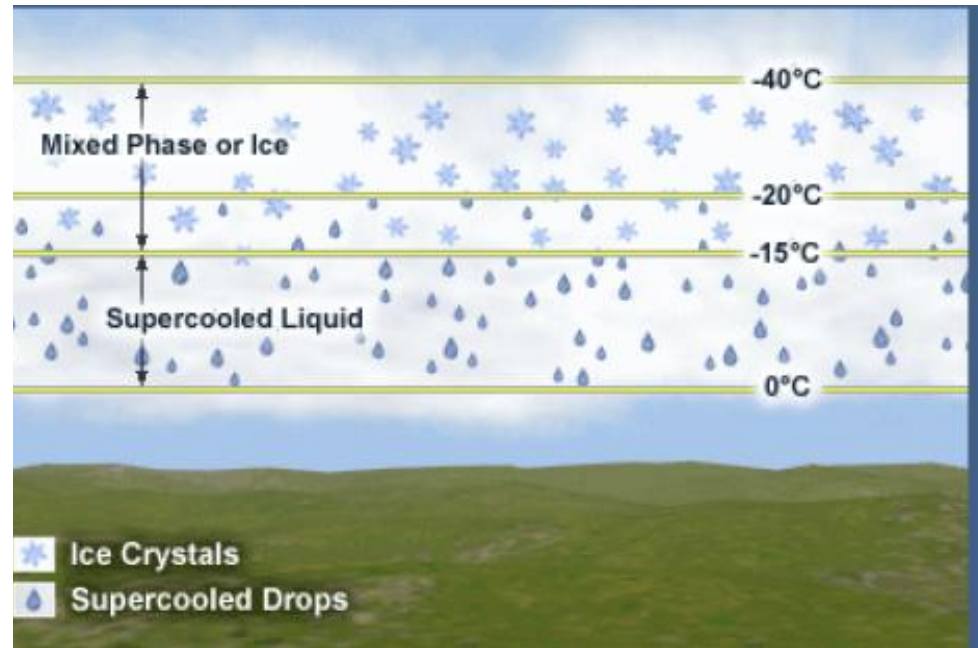
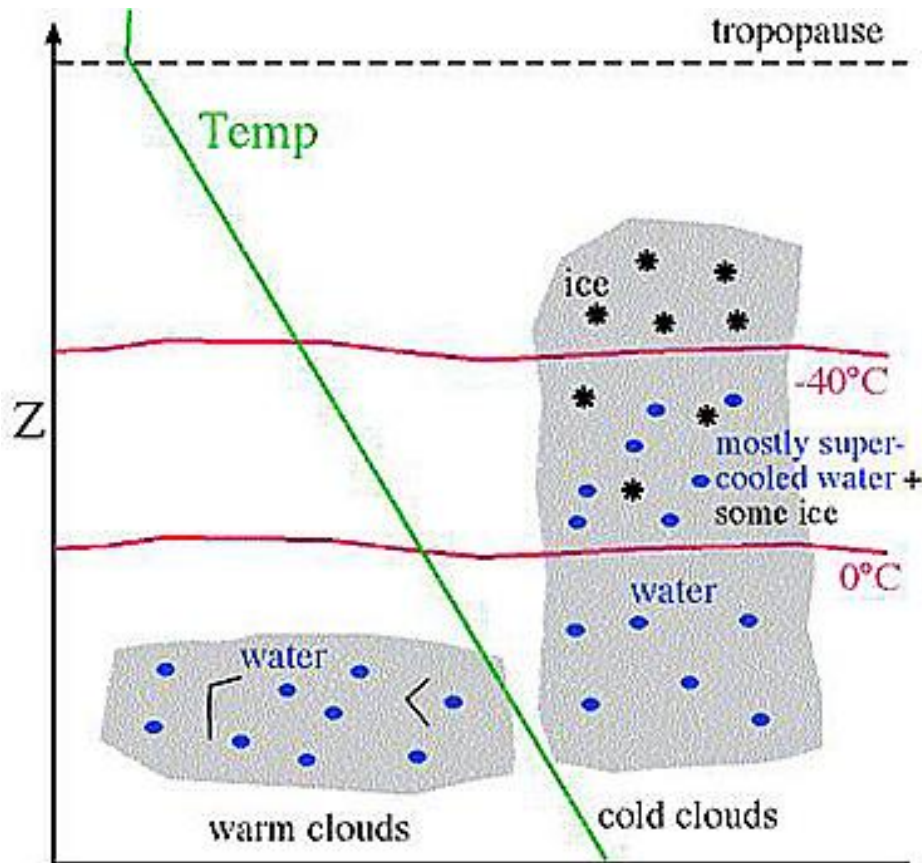


LOOK AT THIS DUCK

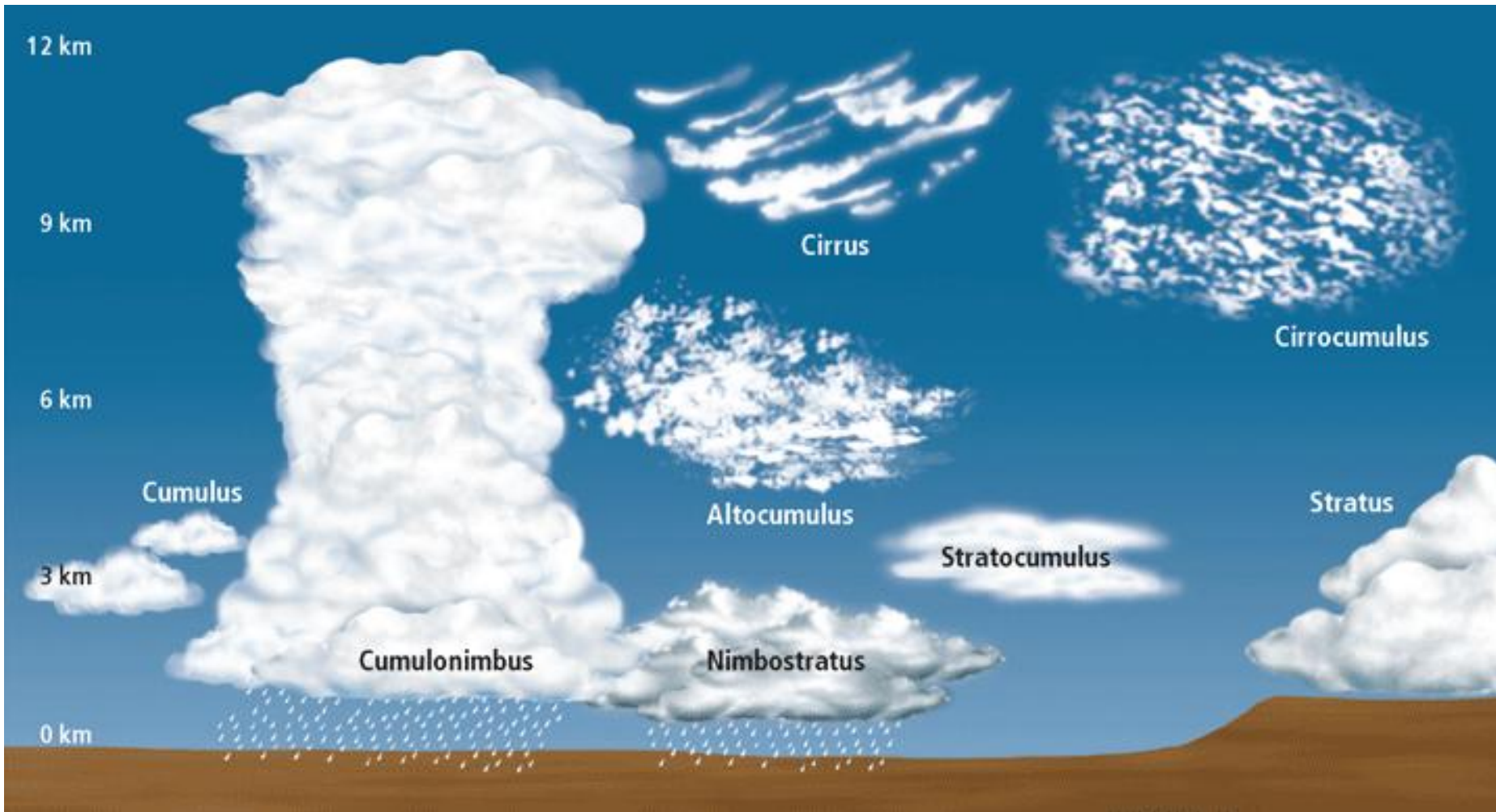
Look at it.

SLUGGERS.CO.ZA

Tipos de nubes



Clasificación de nubes



LGK 2010

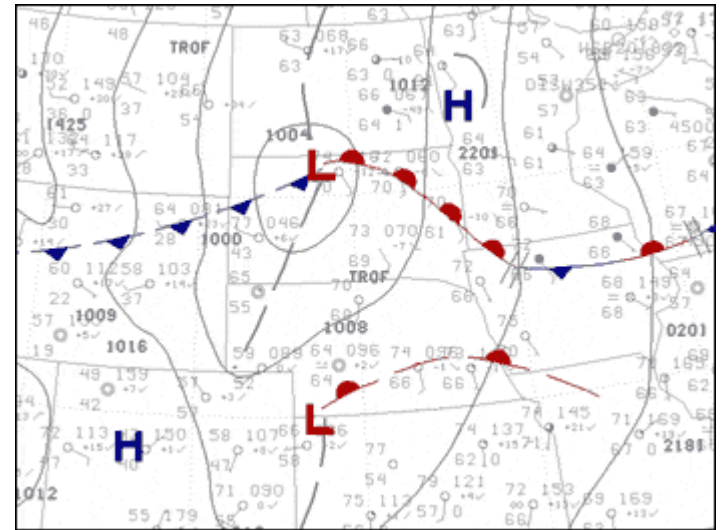
Ver más en:

http://www.atmosphere.mpg.de/enid/146d5e933a00f7ded3f636bb51c381a0,0/1__Clouds/-_Cloud_types_25q.html

()Histórico

Escuela de Bergen, Noruega

Tor Bergeron, Halvor Solberg, Vilhelm Bjerknes, Harald Sverdrup, Jacob Bjerknes, Sverre Petterssen og Carl Ludvig Schreiner Godske.

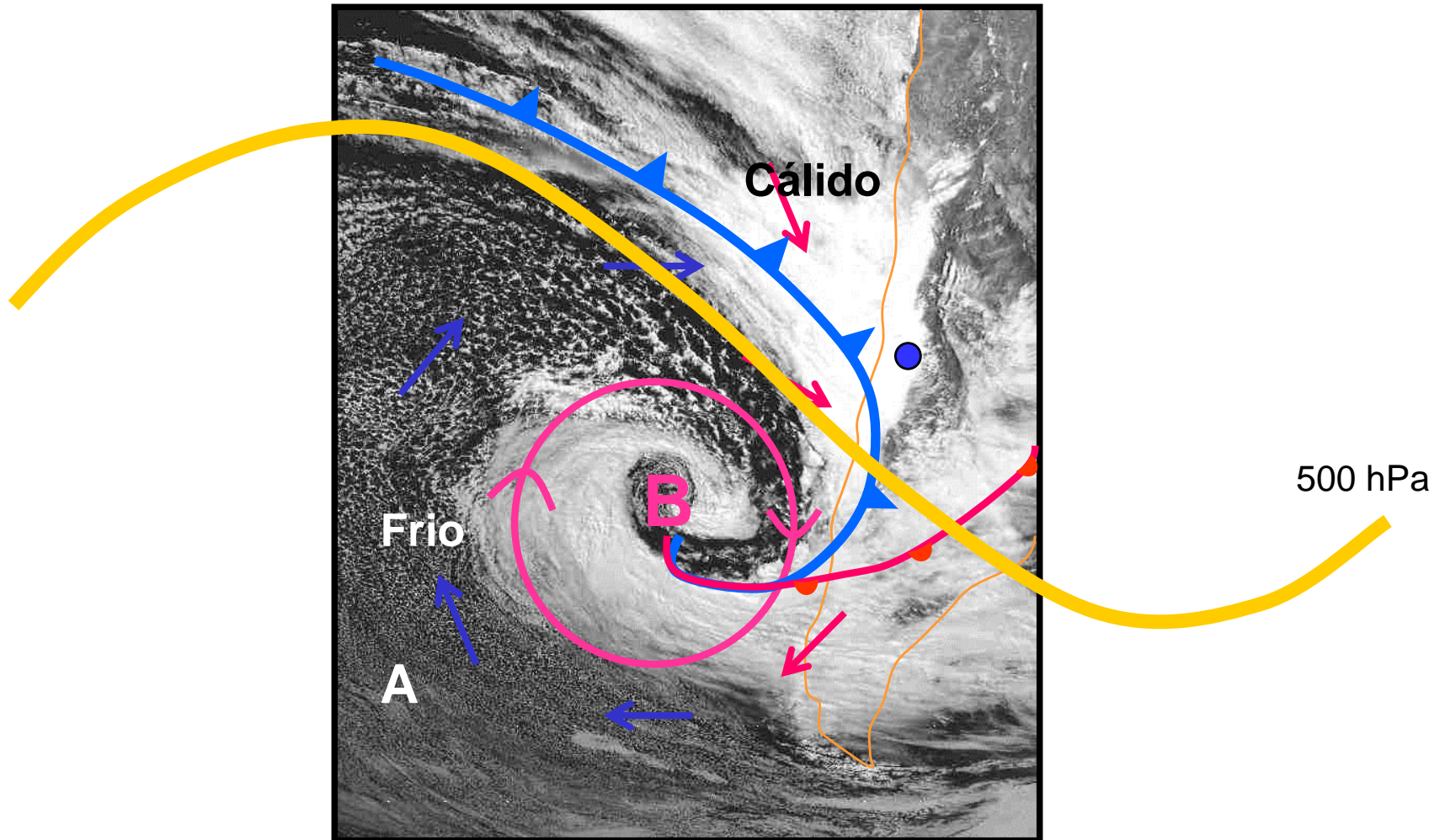


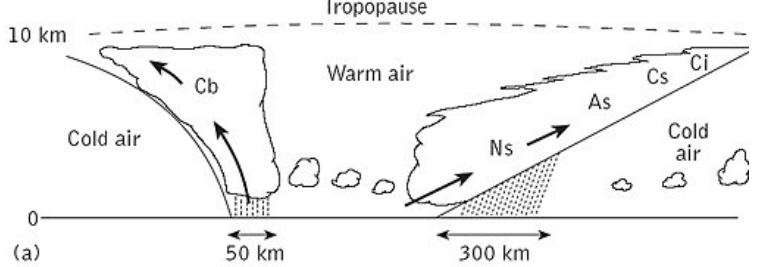
Ca. 1917

LGK 2010

http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Bjerknes/bjerknes_3.php

Ejemplo de una depresión en latitudes medias

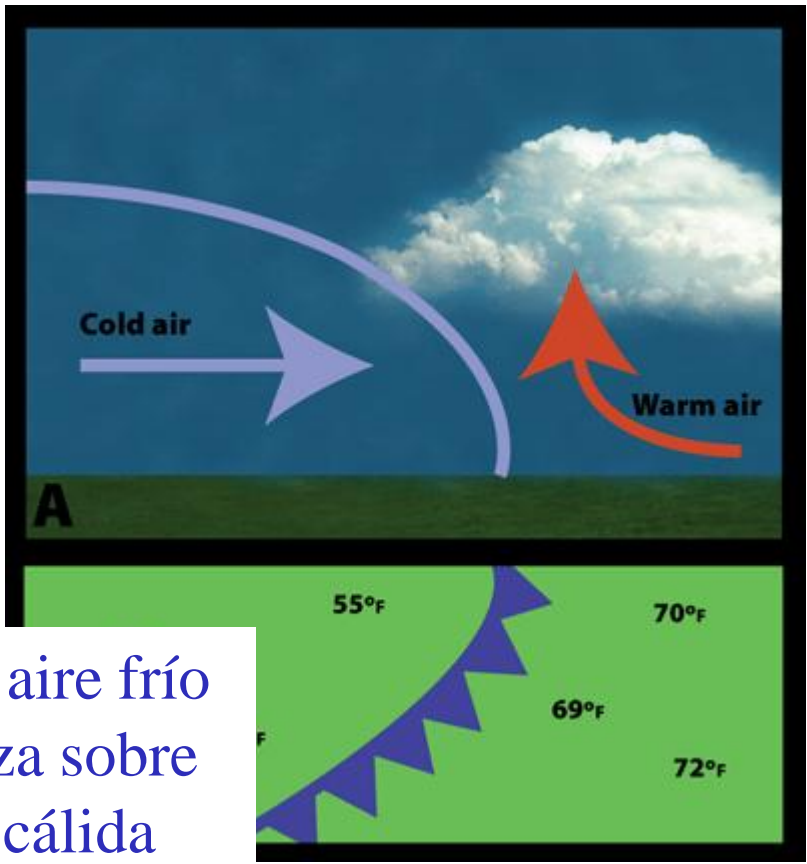




Frentes

Frente Frío (rápido)

Frente Cálido (lento)



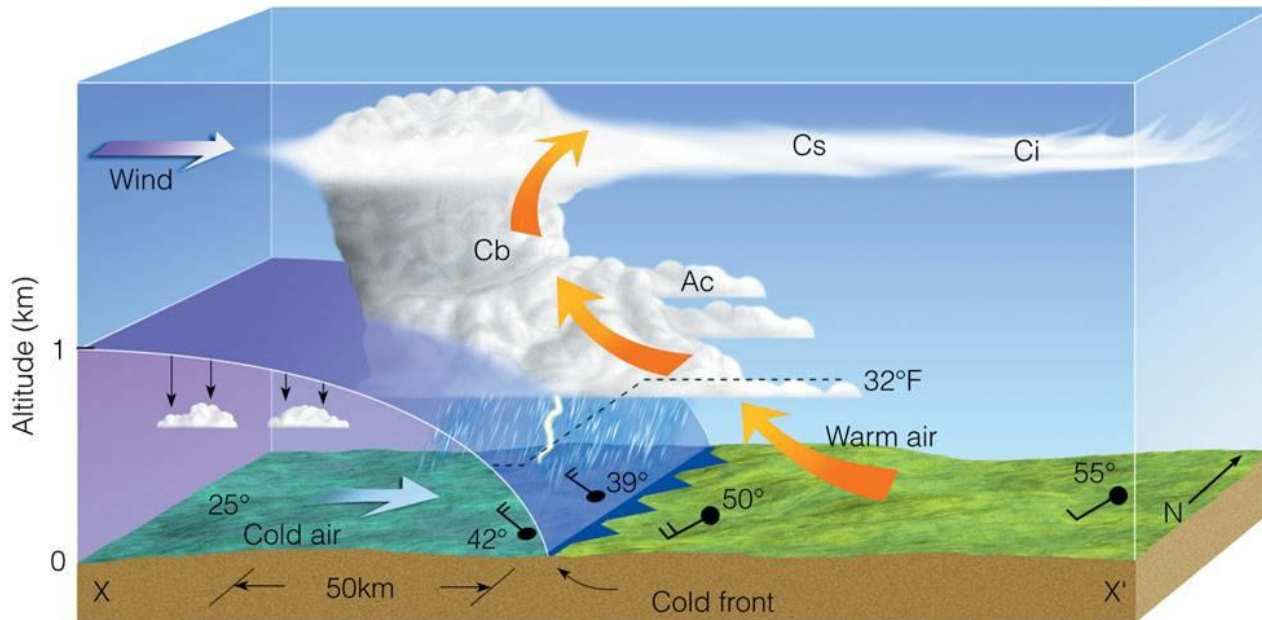
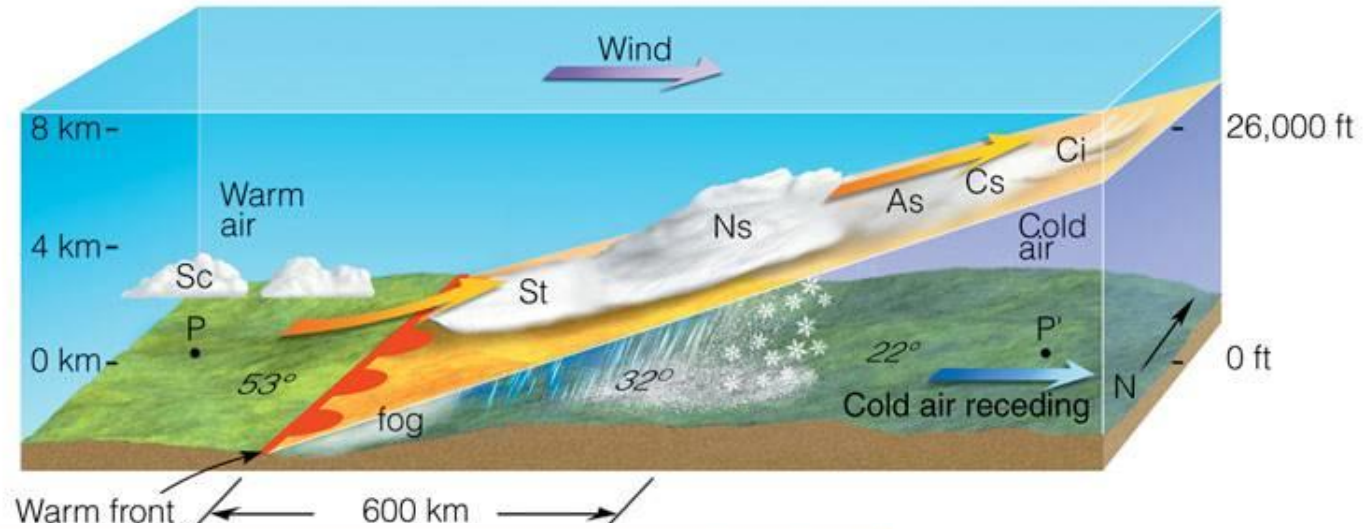
Frío: aire frío avanza sobre zona cálida



Cálido: aire cálido avanza sobre zona fría

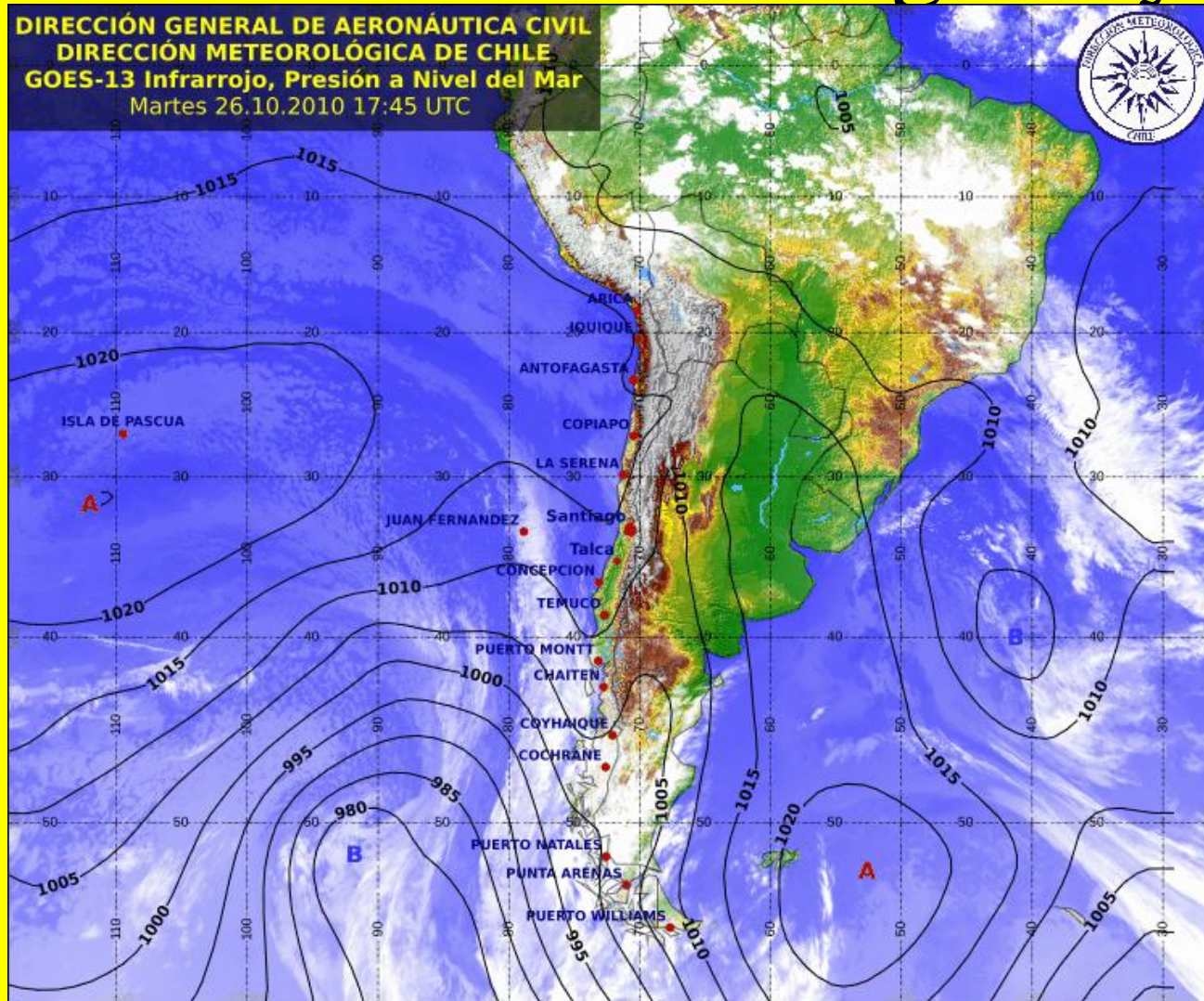
Nubes y frentes

Cálido: aire
cálido avanza
lento sobre
zona fría



Frío: aire frío
avanza rápido
sobre zona
cálida

¿Qué tipo de frente se «vio» acercándose a Santiago hoy?



LGK 2010

Lecturas de hoy

- Obligatoria
 - Wallace and Hobbs, Atmospheric Science (Ch. ~6)
- Más sobre nubes y su formación
 - GF500 (Física de la Atmósfera)
- Complementarias
 - *Precipitación desde un Cb*
 - http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook/ch6/precip_process_cb_ocean.html
 - «*Rain making bacteria*»
 - <http://www.nature.com/news/2008/080228/full/news.2008.632.html>
 - *CCN...y formación de nubes*
 - <http://www.iac.ethz.ch/groups/lohmann/research/lab/ccn>

