

ACA0324 - Meteorologia Física I **(Microfísica de Nuvens)**

Profa. Rachel Ifanger Albrecht
(sala 346, rachel.albrecht@iag.usp.br)

- RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS QUENTES:**

Crescimento por difusão de vapor e colisão-coalescência

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t} \quad + \quad R_f = R_0 + u \int_{R_0}^{R_f} \frac{1}{V_2} dR$$

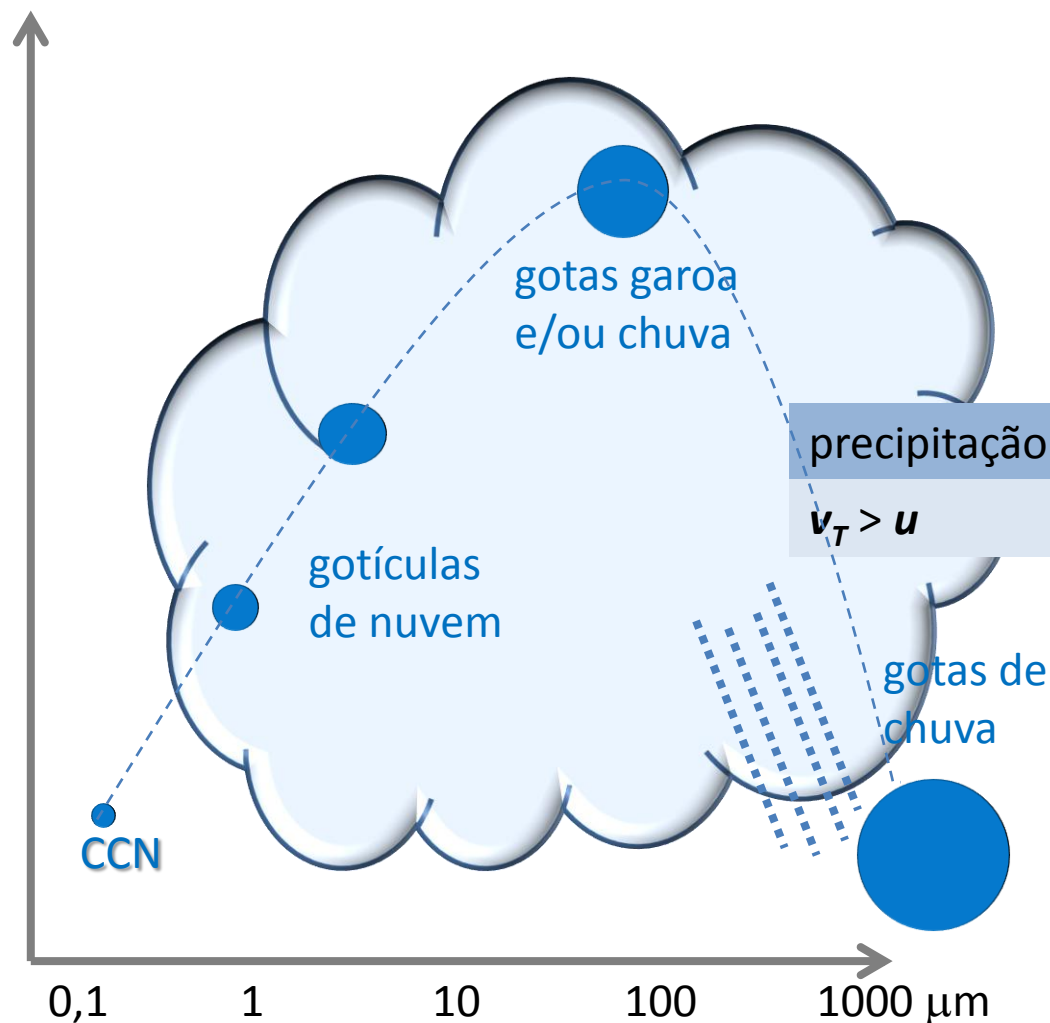
Crescimento por difusão de vapor

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t}$$

Ativação

CCN $\rightarrow N_c = C s^k$, onde $s \propto u$

$$r_c = \sqrt{\frac{3b}{a}} \quad \text{e} \quad S_c = 1 + \sqrt{\frac{4a^3}{27b}}$$



SUMÁRIO

Aula 1 – Formação das gotas de nuvem

Aula 2 – Crescimento de gotas por difusão de vapor

Aula 3 – Crescimento de gotas por colisão-coalescência

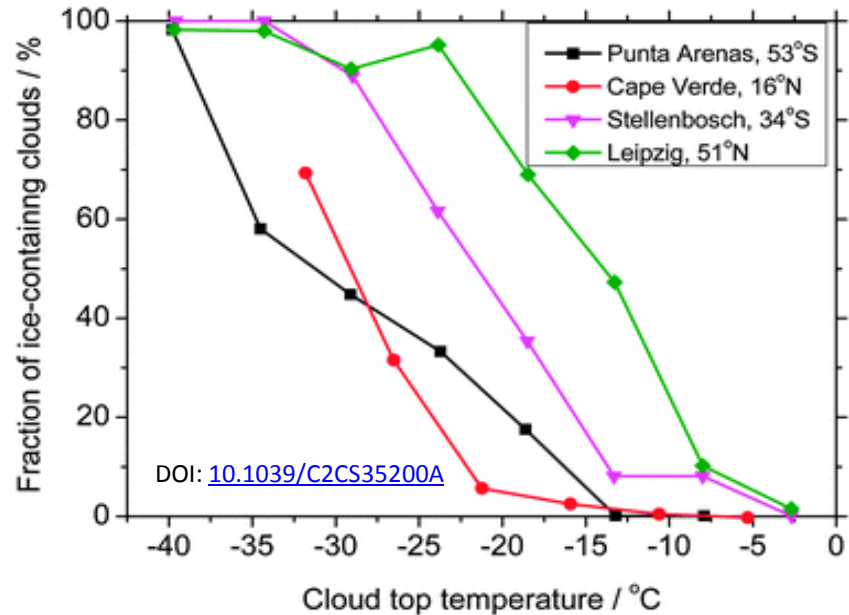
Aula 4 – Formação e crescimento de cristais de gelo

Aula 5 – Distribuição de tamanho de hidrometeoros

Aula 6 – Modelo de Nuvens

Formação e crescimento de cristais de gelo

- Se as nuvens excedem altitudes onde as temperaturas são mais baixas que 0°C, existe uma grande probabilidade de se formar cristais de gelo.



- Assim que são formados os primeiros cristais, a conversão de vapor d'água em partículas de nuvem e precipitação é altamente eficiente pois
 - se o ambiente está saturado em relação à água líquida, ele estará automaticamente supersaturado em relação ao gelo:

$$e_i < e_s$$
 - no intervalo de tempo de apenas alguns minutos um cristal de gelo pode crescer algumas dezenas de micrometros em sua dimensão linear.

- Relembrando a definição de saturação:

- Razão de saturação em relação à água líquida: $S = \frac{e}{e_s}$

- Umidade relativa: $UR = 100 \frac{w}{w_s} \approx 100 \frac{e}{e_s}$

- Supersaturação: s ou $SS = (S - 1) \times 100 \%$

- Razão de saturação em relação ao gelo:

$$S_i = \frac{e}{e_i} = \frac{e}{e_s} \frac{e_s}{e_i} = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right)$$

e – pressão de vapor de saturação do ambiente
 e_s – pressão de vapor de saturação em relação à água líquida
 e_i – pressão de vapor de saturação em relação ao gelo

- Através da equação de Clausius-Clapeyron:

vapor/líquido:

$$e_s = e_{s0} \exp \left\{ \frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

vapor/sólido:

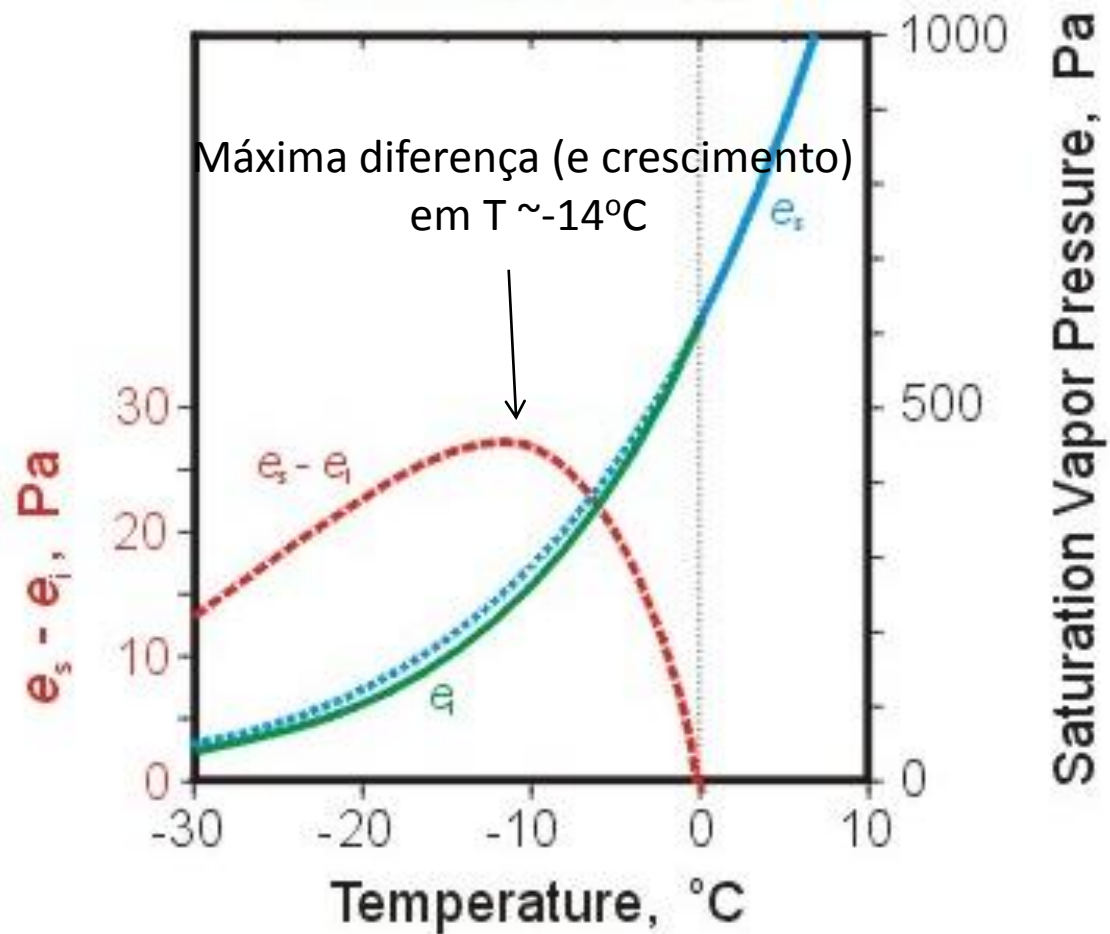
$$e_i = e_{s0} \exp \left\{ \frac{L_f}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} L_v > L_f \\ S_i = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right) \end{array} \right\} \left(\frac{e_s}{e_i} \right) > 1 \rightarrow S_i > S, \text{ para uma mesma } T$$

$$L_f = 3,33 \times 10^5 \text{ J/kg}$$

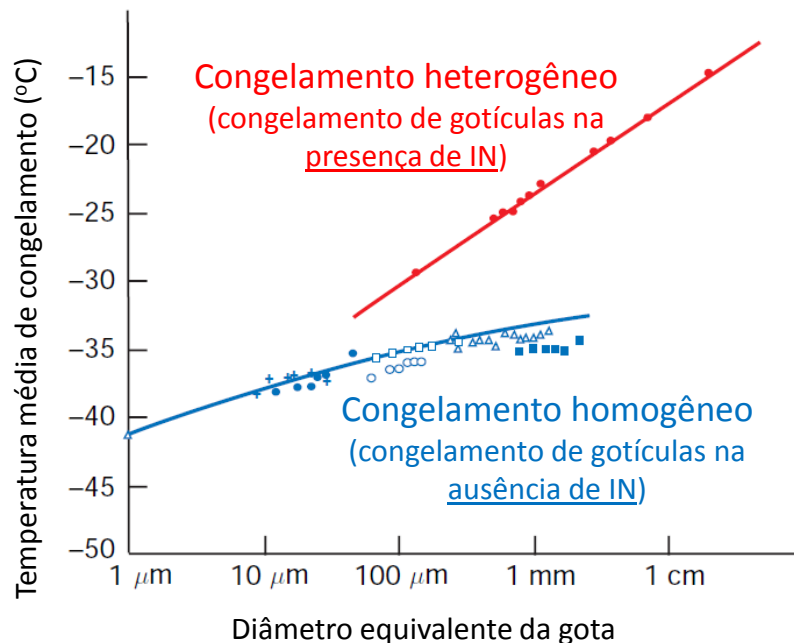
$$L_v = 2,26 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

- Através da equação de Clausius-Clapeyron:



- Assim como para as gotículas líquidas, é conveniente analisarmos a **possibilidade de nucleação homogênea por deposição de vapor para gelo (i.e., deposição homogênea)**. As condições são as mesmas da nucleação homogênea de gotículas de nuvem:
 - *Qual a probabilidade de haver colisões aleatórias de moléculas de água formando um núcleo embriônico de tamanho estável?*
 - Dependente da energia livre superficial da interface cristal/líquido ($\sigma_{\text{gelo}} = 2,0 \times 10^{-2}$ N/m), que é análogo à tensão superficial da interface líquido/vapor ($\sigma_{\text{líquido}} = 7,5 \times 10^{-2}$ N/m) de uma gotícula líquida.
 - Cálculos teóricos preveem que a deposição por nucleação homogênea deve ocorrer em condições extremas de supersaturação: **20 vezes maior que a supersaturação com respeito ao gelo para temperaturas $\sim 0^\circ\text{C}$, e valores mais altos ainda para temperaturas mais baixas.**
 - **Podemos eliminar a ideia de deposição homogênea** pois gotículas de água líquida irão ser formar por nucleação homogênea antes de atingirmos a supersaturação necessária para a nucleação homogênea de gelo. Essas gotículas de água pura se congelarão espontaneamente a temperaturas menores que -40°C , tornando impossível identificar a formação de cristais de gelo por deposição homogênea de moléculas de vapor d'água.

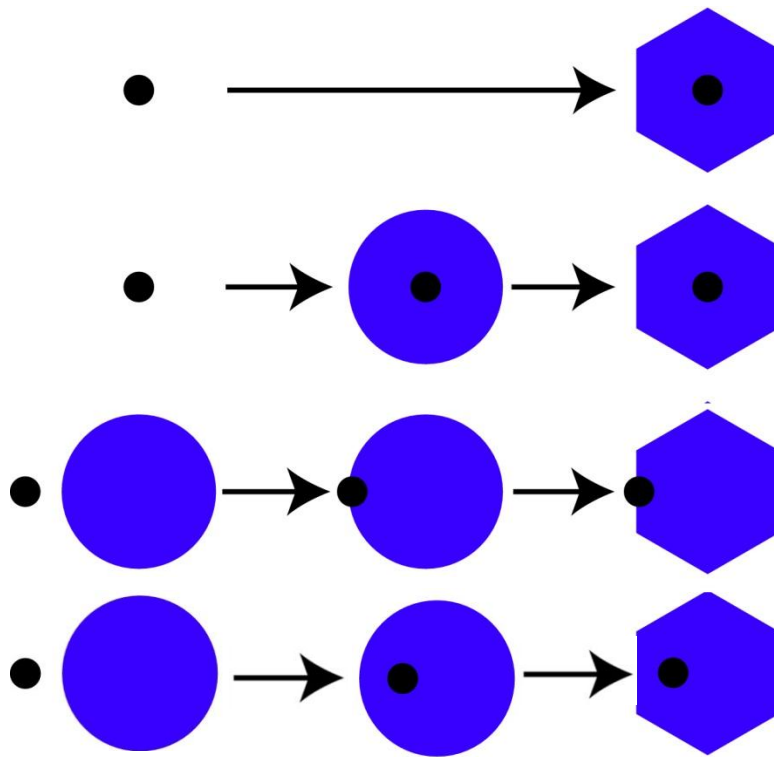
- Assim como na nucleação de gotículas de nuvem, a formação de gelo está associada à presença de **núcleos de gelo** (*IN – do inglês, ice nuclei*), análogo ao CCN, e é chamada de **nucleação heterogênea**.
- Uma gota de água líquida que se formou na fase quente da nuvem e não contém IN irá congelar a temperaturas muito baixas, e este processo é chamado de **congelamento homogêneo de gelo (ou também nucleação homogênea*)**. *Toda água líquida se congela a $T < -40^{\circ}\text{C}$* , mas quanto menor a gota, menor é a temperatura na qual ela se congela:



- gotículas menores que $5\text{ }\mu\text{m}$ congelam espontaneamente a temperaturas de -40°C .
- gotas maiores congelam a temperaturas mais quentes

** Perceba que homogêneo neste caso não se refere à nucleação do vapor, mas sim ao congelamento da água líquida!*

- Existem vários mecanismos de nucleação heterogênea:



1) **Deposição** de vapor em um IN.

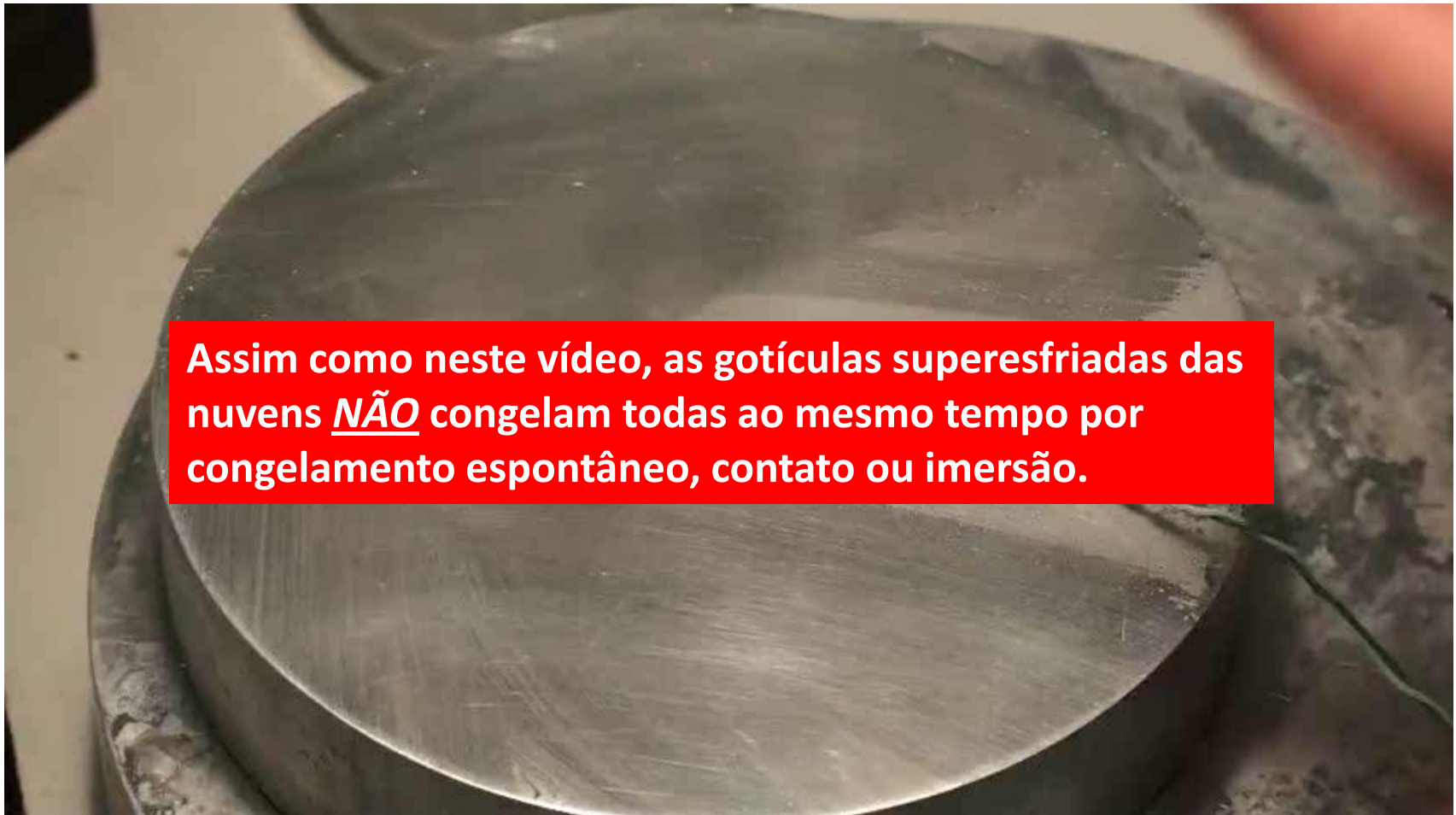
2) Condensação de uma gota seguida de **congelamento** (CCN ou gota já tinha material de IN dentro dela).

3) Condensação de uma gota seguida de congelamento por **contato** com IN.

4) Condensação de uma gota seguida de congelamento por **imersão** de um IN.

- Em (2) o material solúvel dos núcleos nucleia a gota na fase líquida e a parte insolúvel nucleia o gelo levando ao congelamento. Em (3) e (4) o contato/imersão de um material insolúvel leva ao congelamento. Os mecanismos (2) e (3) são muitas vezes referidos como “nucleação de gelo”, mas o termo correto é “nucleação por congelamento”, e no caso de (1) “nucleação por deposição”.

- Vídeo ilustrando o congelamento espontâneo, por contato e por imersão:



Assim como neste vídeo, as gotículas superesfriadas das nuvens NÃO congelam todas ao mesmo tempo por congelamento espontâneo, contato ou imersão.

<https://youtu.be/O0uwGlgkgfY>

- A probabilidade de congelamento ou deposição de vapor a partir da **nucleação heterogênea** depende fortemente das **propriedades da estrutura molecular** do IN, assim como o **superesfriamento** e a **supersaturação**.
- Os IN possuem sua estrutura molecular cristalina próximas à do gelo, e quanto mais o material do IN se parecer com um cristal de gelo mais eficiente ele é em nuclear gelo. Exemplos de IN biológicos:

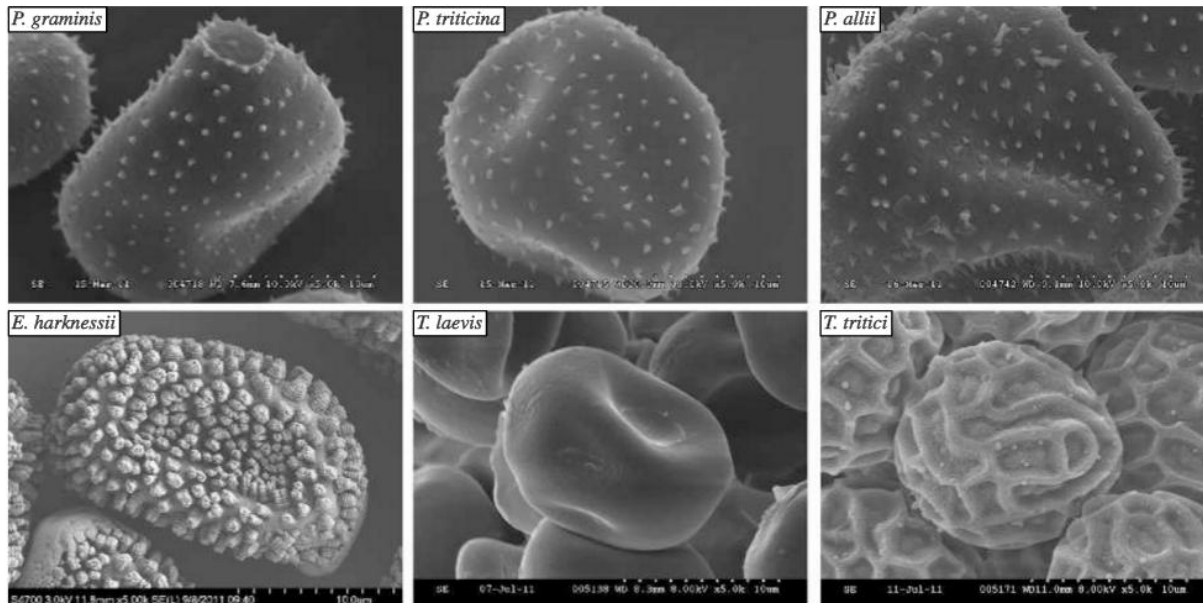
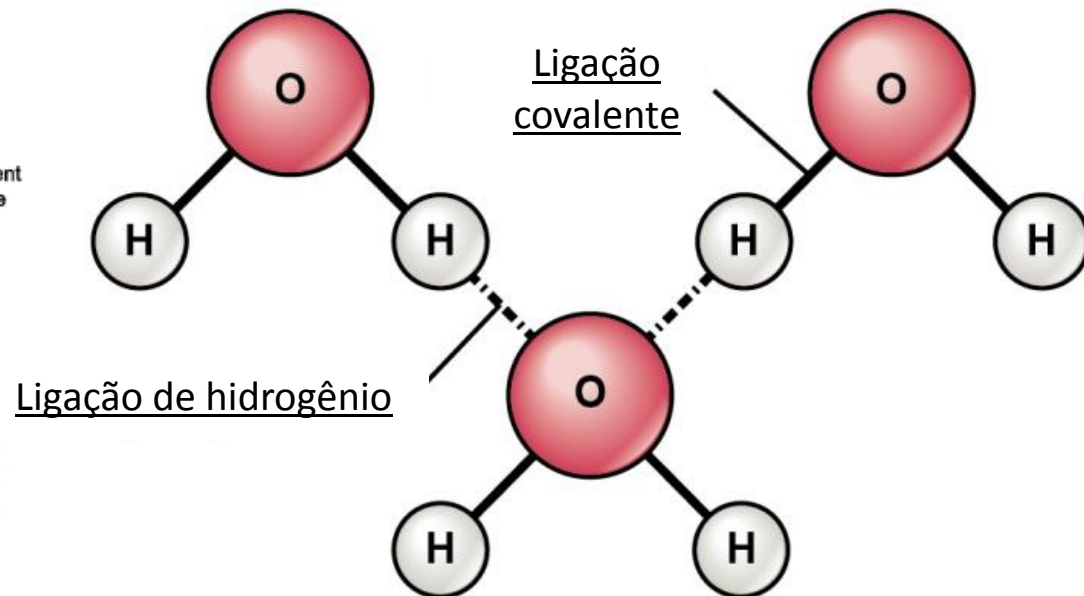
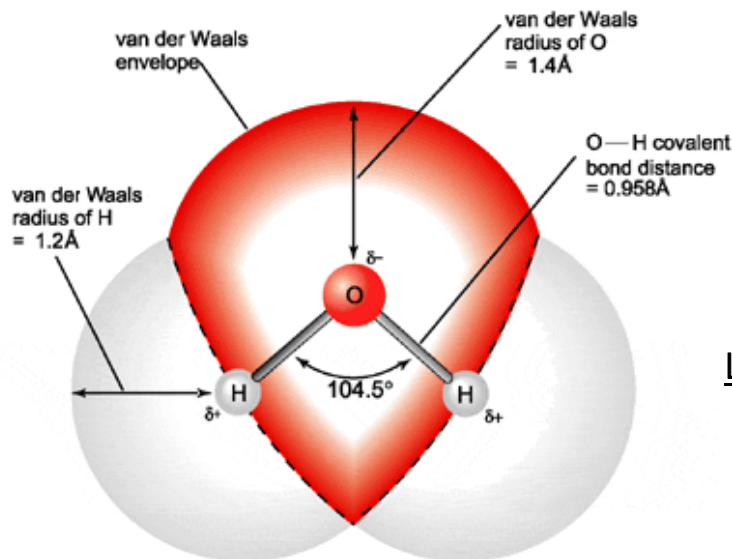


Figure 2. SEM images of rust (*P. graminis*, *P. triticina*, *P. allii*, and *E. harknessii*) and bunt (*T. laevis* and *T. tritici*) spores studied.

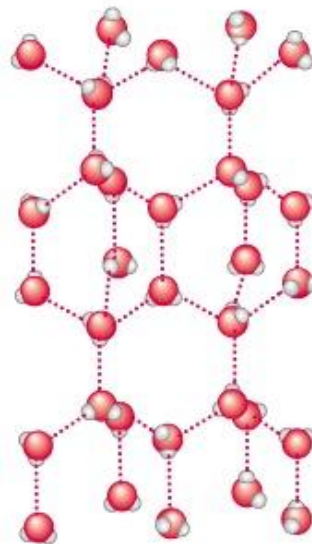
- Entendendo a estrutura molecular do gelo:
 - As moléculas de águas são formadas pelas ligações covalentes entre os átomos de H e o de O, e possuem um momento de dipolo permanente ($104,5^\circ$).
 - Em conjunto, as moléculas de água estão ligadas umas às outras através de ligações entre os átomos de hidrogênio e oxigênio *de diferentes moléculas* (ligação de hidrogênio intermolecular). A forma como as ligações de hidrogênio ocorrem entre as moléculas de água é o que determina a estrutura molecular do gelo (e.g., hexagonal, cúbica).



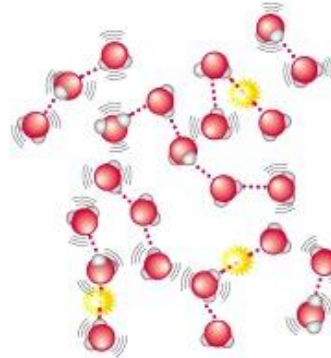
- Entendendo a estrutura molecular do gelo:
 - Quando a água está em estado líquido ou vapor (estado de energia mais elevado), as moléculas de água possuem alta vibração e as ligações de hidrogênio intermolecular são mais fracas, permitindo que elas se movam e se aproximem uma das outras (as ligações de hidrogênio são feitas e quebradas à todo tempo).
 - Quando a água está no estado sólido, as ligações de hidrogênio intermolecular são mais fortes e praticamente estáticas. As moléculas ficam estruturadas e mais separadas umas das outras, deixando a densidade da água no estado sólido menor do que nos estados líquidos e gasoso.



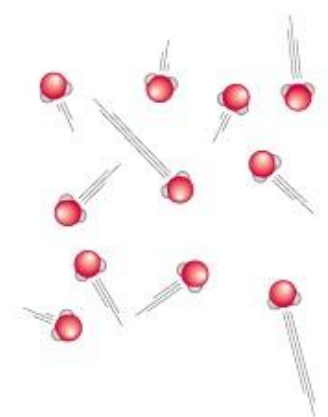
(a) Solid water (ice)



(b) Liquid water

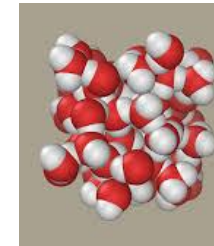
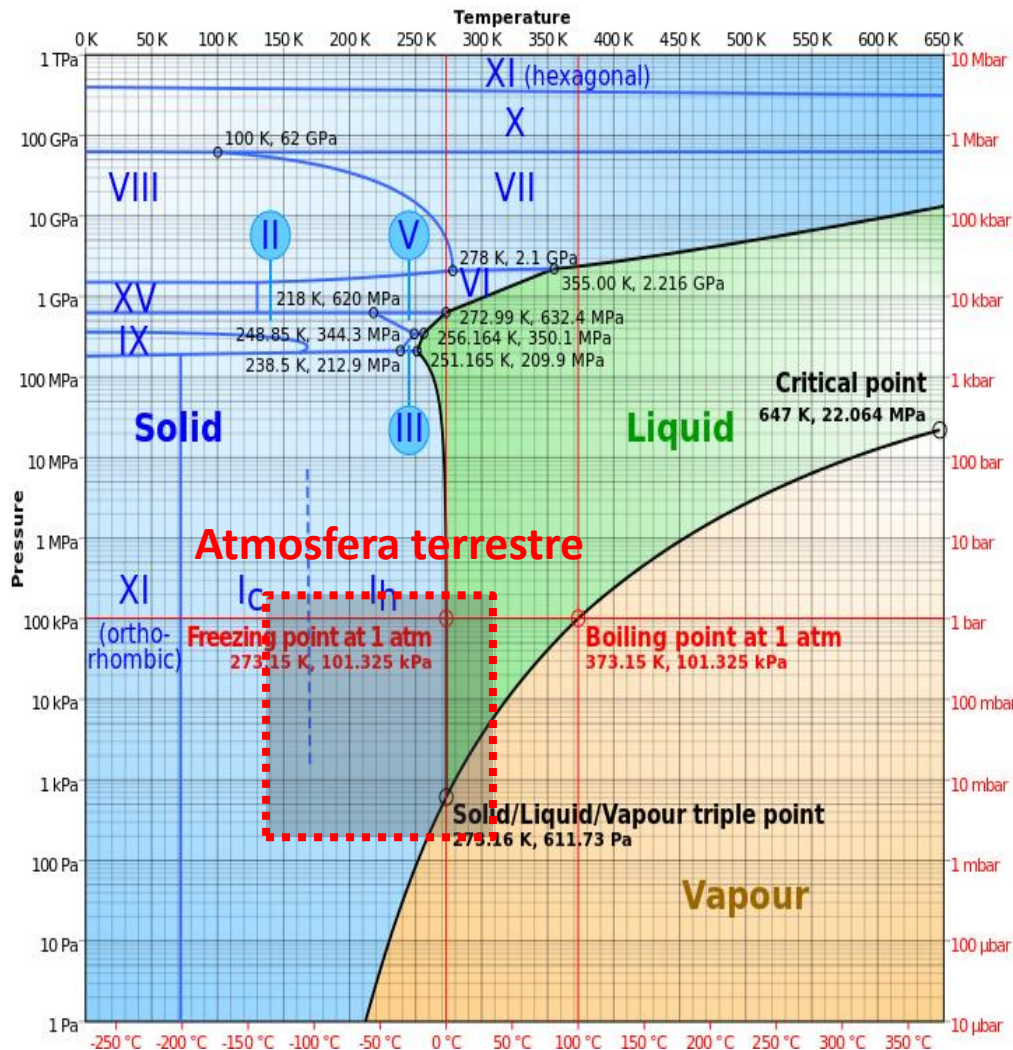


(c) Gaseous water (steam)

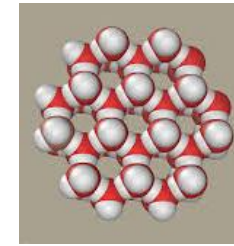


© 2001 Sinauer Associates, Inc.

- Entendendo a estrutura molecular do gelo:
 - Existem 15 estruturas cristalinas na forma de água sólida:



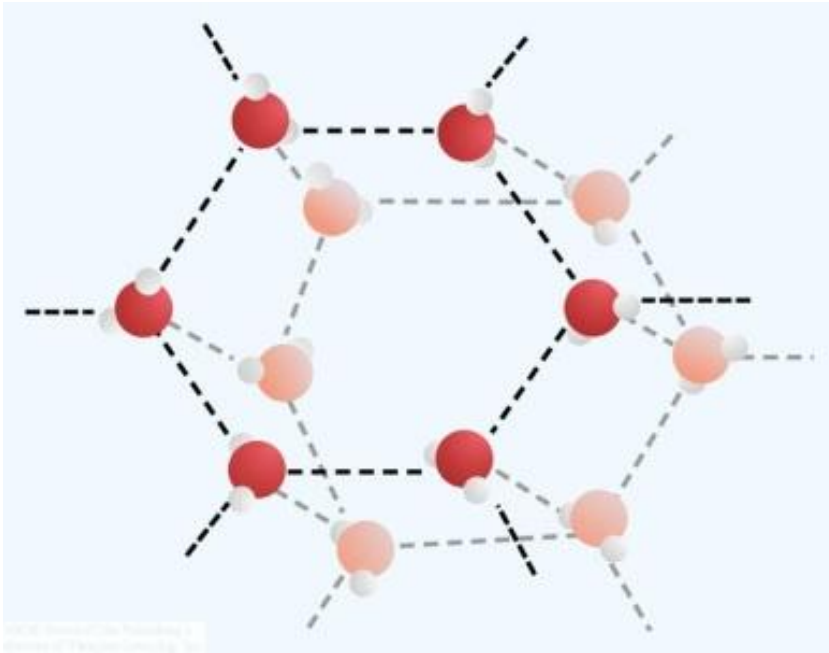
água líquida
(estrutura aleatória)



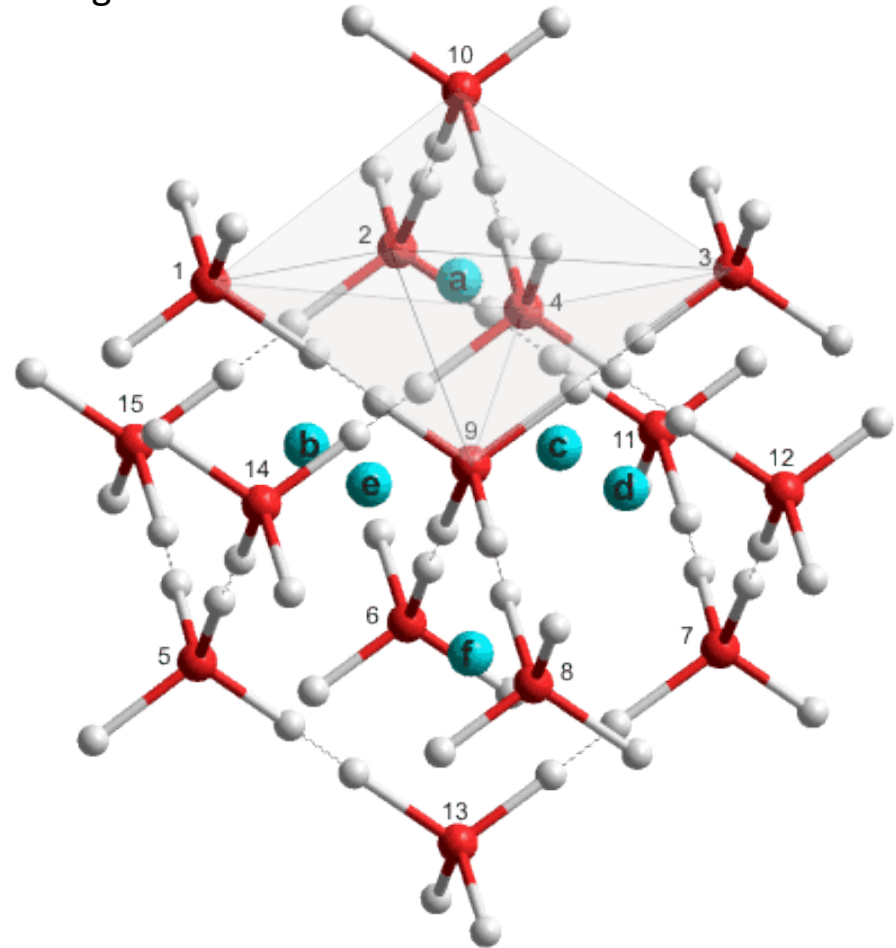
água sólida
(estrutura hexagonal)

- A temperaturas e pressão típicas da **atmosfera** somente gelo com estrutura hexagonal (gelo-I_h) é formado.
- A temperaturas muito baixas, como as encontradas na alta troposfera, gelo cúbico (gelo-I_c) pode se formar.

- Entendendo a estrutura molecular do gelo:
 - Existem 15 estruturas cristalinas na forma de água sólida:



hexagonal



cúbico

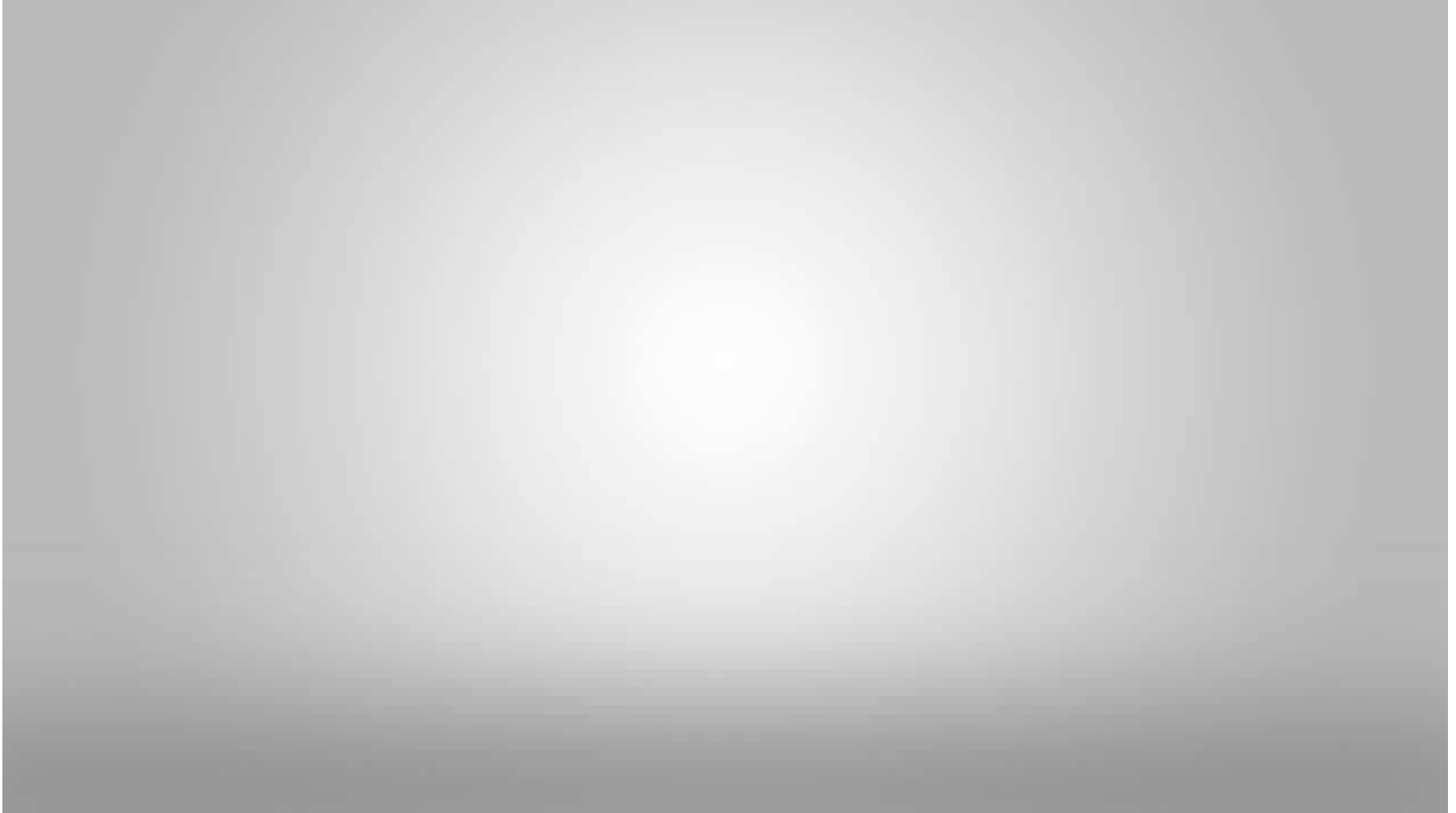
- Entendendo a estrutura molecular do gelo:

<https://youtu.be/sBZfPmlcS-E>

- Entendendo a estrutura molecular do gelo:

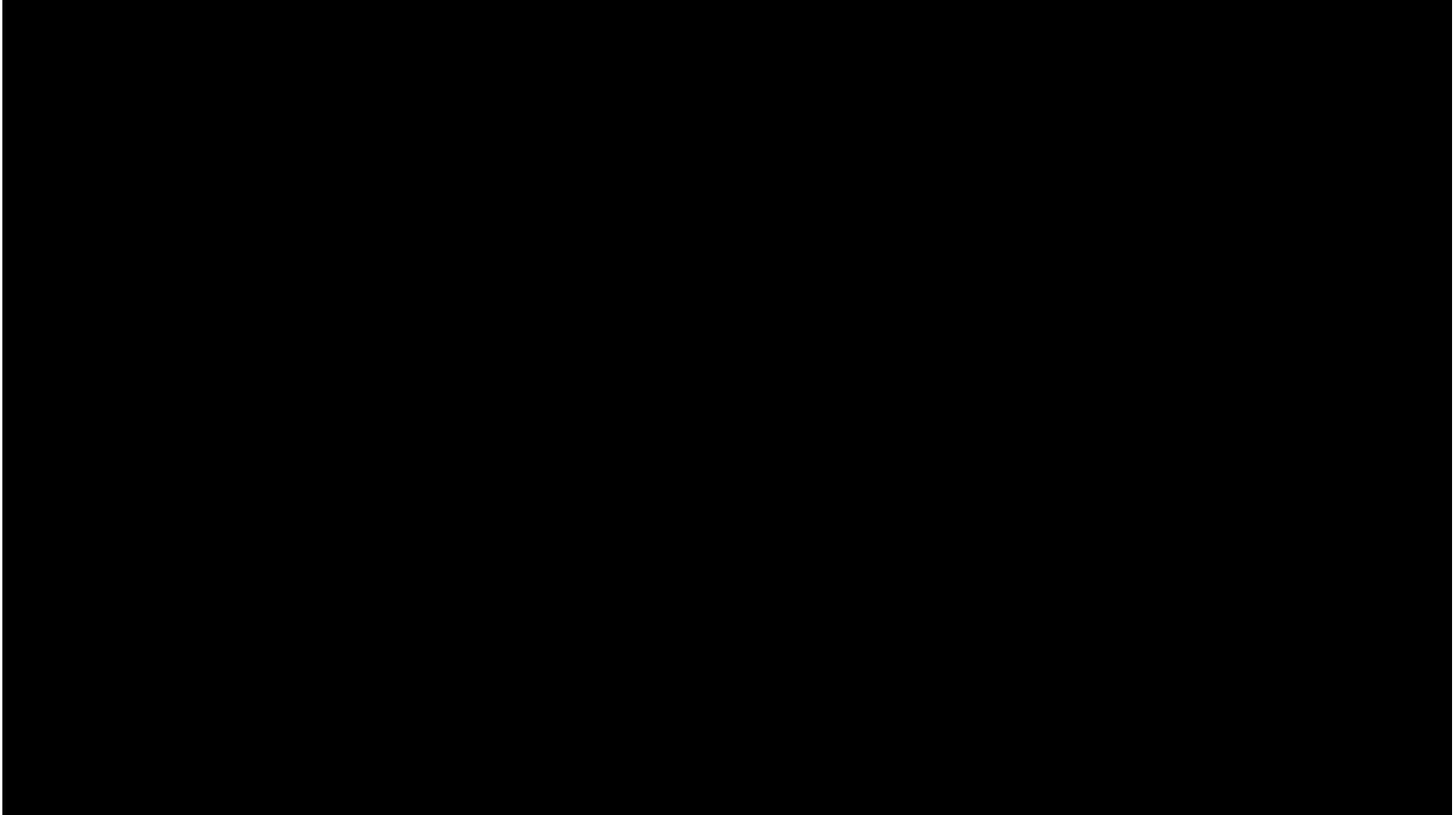
<https://youtu.be/molTG5Q7zzI>

- **PBS** - The Science of Snowflakes, and Why No Two Are Alike



<https://youtu.be/fUot7XSX8uA>

- **TED-Ed** – The science of snowflakes

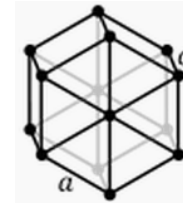


<https://youtu.be/FwGH4gulLX4>

- Exemplos de núcleos de gelo:

TABLE 9.1. *Temperatures at which different substances nucleate ice. (From Houghton, 1985)*

Substance	Crystal lattice dimension		Temperature to nucleate ice (°C)	Comments
	a axis (Å)	c axis (Å)		
Pure substances				
Ice	4.52	7.36	0	—
AgI	4.58	7.49	-4	Insoluble
PbI ₂	4.54	6.86	-6	Slightly soluble
CuS	3.80	16.43	-7	Insoluble
CuO	4.65	5.11	-7	Insoluble
HgI ₂	4.36	12.34	-8	Insoluble
Ag ₂ S	4.20	9.50	-8	Insoluble
CdI ₂	4.24	6.84	-12	Soluble
I ₂	4.78	9.77	-12	Soluble
Minerals				
Vaterite	4.12	8.56	-7	(Silicate)
Kaolinite	5.16	7.38	-9	
Volcanic ash	—	—	-13	
Halloysite	5.16	10.1	-13	
Vermiculite	5.34	28.9	-15	
Cinnabar	4.14	9.49	-16	
Organic materials				
Testosterone	14.73	11.01	-2	(Bacteria in leaf mold)
Cholesterol	14.0	37.8	-2	
Metaldehyde	—	—	-5	
β-Naphthol	8.09	17.8	-8.5	
Phloroglucinol	—	—	-9.4	
Bacterium	—	—	-2.6	
<i>Pseudomonas Syringae</i>				



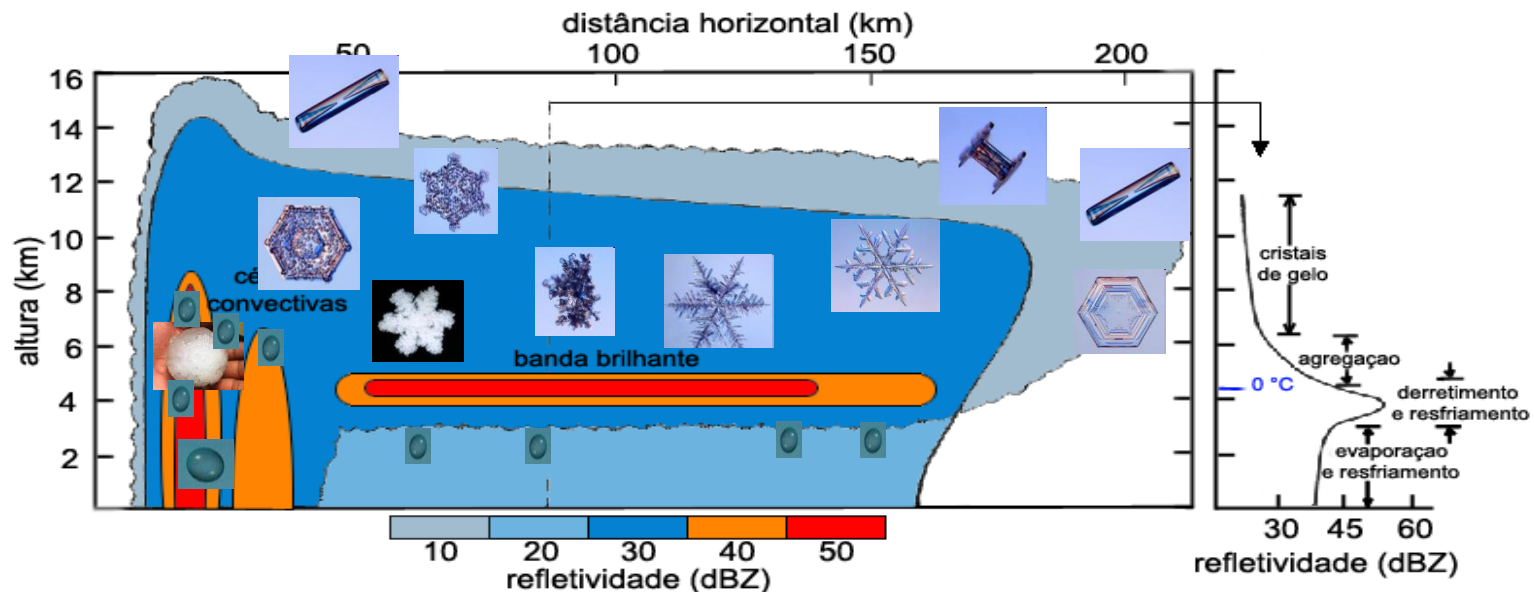
— Estrutura cristalina representada pelos tamanhos dos eixos do *lattice* (“rede”) (*a* e *c*):

- Para água pura: $a=4,52 \text{ Å}$ e $c=7,36 \text{ Å}$ ($\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$).
- Iodeto de prata (AgI) é o material com estrutura mais próxima do gelo: $a=4,58 \text{ Å}$ e $c=7,49 \text{ Å}$ (usado na semeadura de nuvens para evitar granizo)

— Compostos orgânicos:

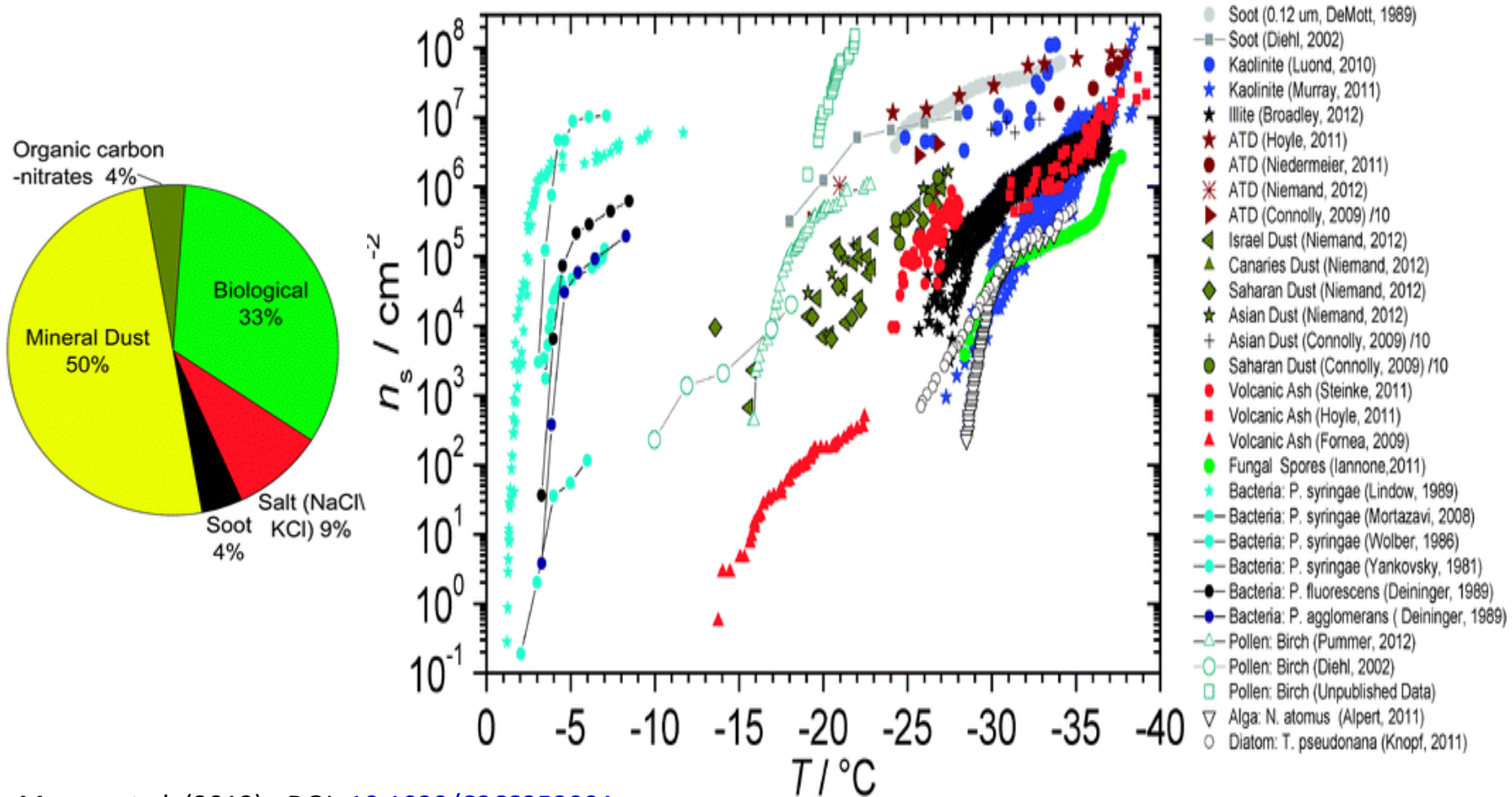
- Nucleação em temperaturas “quentes” ($T > -10^\circ\text{C}$).
- Não possuem estrutura cristalina, mas são ótimos nucleadores de gelo.
- Combinação da estrutura, ligação molecular, e baixa energia interfacial contam para a habilidade de nucleação.

- A ocorrência de cristais de gelo em nuvens está relacionado com o tipo de nuvem (cirrus, cumulonimbus, nimbostratus, etc.), temperatura e o tempo de vida da nuvem (estágio do ciclo de vida).
- Em geral, nuvens com topos que excedem temperaturas inferiores a -20°C tem gelo. Em nuvens tipo cumulonimbus, gelo é mais em sua maturação e decaimento do que no período inicial de desenvolvimento.



- Concentrações de cristais de gelo em nuvens podem variar desde limites muito baixos (0,01 por litro) à 100 por litro.
- **Porém as nuvens possuem muito mais gelo do que IN (da ordem de 10^4 mais partículas de gelo do que IN)!!!**
- Os primeiros cristais de gelo que aparecem em nuvens devem ser formados a partir de núcleos de gelo ou por congelamento de gotas líquidas.
- Os cristais adicionais são produzidos por **processos secundários onde os cristais primários são multiplicados.**

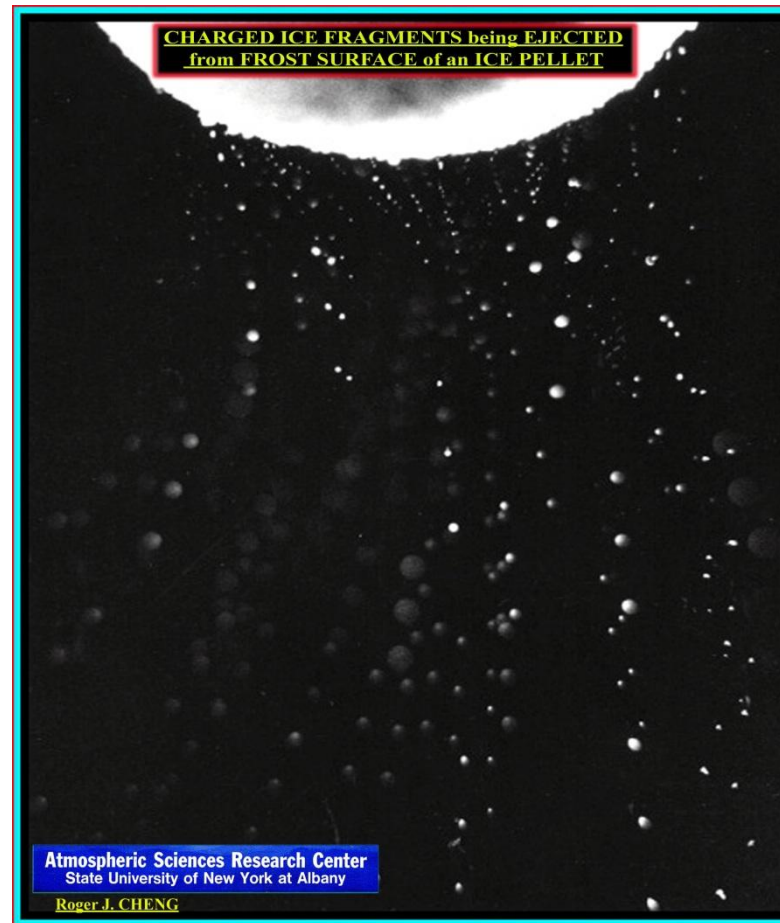
- Aerossóis que são eficientes como CCNs geralmente não são eficientes como INs.
- INs eficientes: partículas insolúveis (minerais) e orgânicas



Murray et al. (2012) - DOI: [10.1039/C2CS35200A](https://doi.org/10.1039/C2CS35200A)

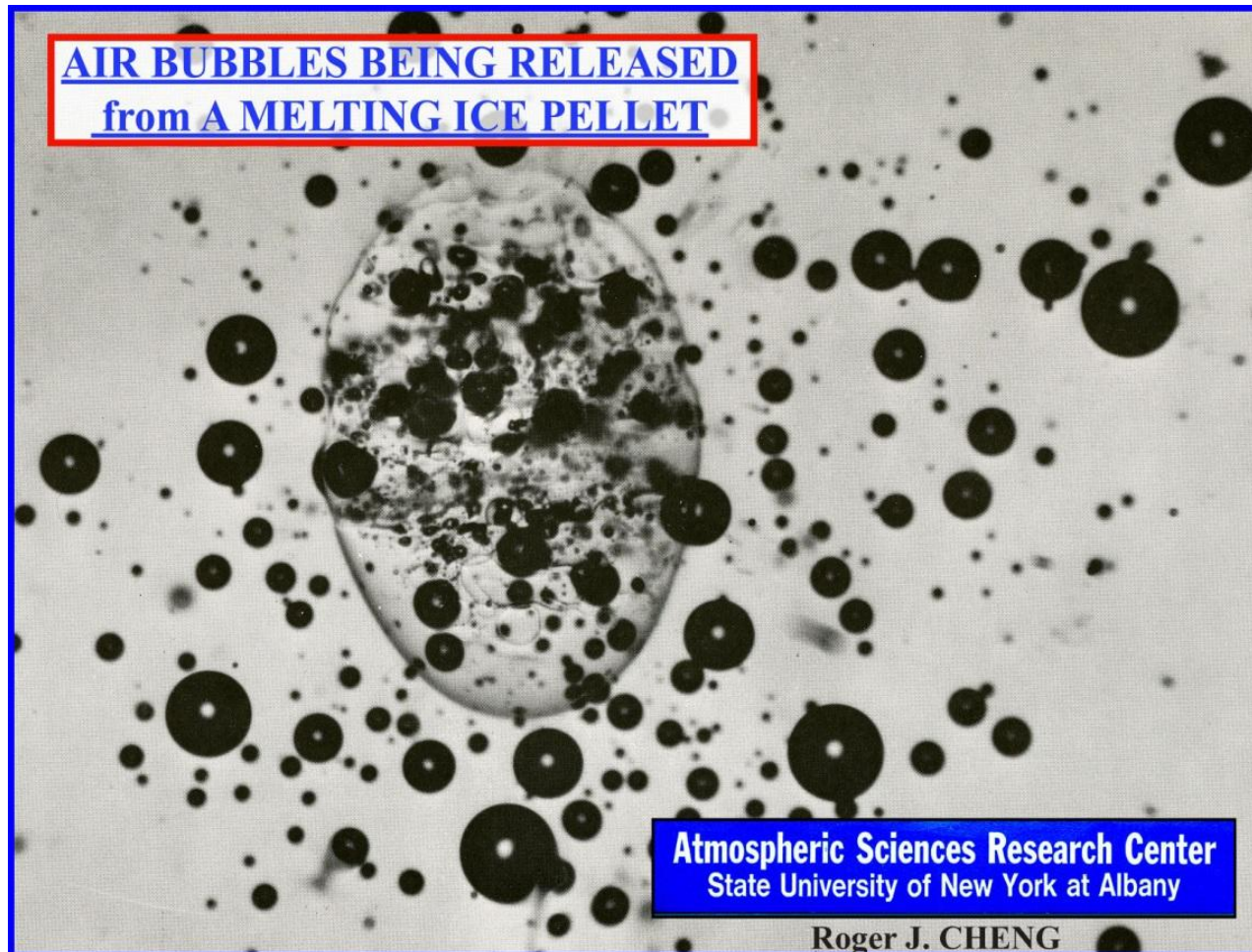
- Dois mecanismos são reconhecidos como produção secundária (multiplicação) de gelo:
 - fratura dos cristais de gelo
 - quebra ou estilhaço de gotas ao se congelar
- Sob condições adequadas, gotas superesfriadas à certas temperaturas são capturadas por *graupel* (embrião do granizo, neve+gotas superesfriadas):
 - Fragmentos de gelo são ejetados quando gotas superesfriadas maiores que $25\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro se congelam ao colidirem com partículas de gelo em temperaturas entre -3°C e -8°C .
 - Para $T > -3^{\circ}\text{C}$, as gotas tendem a se espalhar ao redor da superfície do gelo ao invés de congelarem arredondadas.
 - Para $T < -8^{\circ}\text{C}$, o congelamento é muito rápido começando de fora para dentro, não havendo rompimento.

- Exemplo de fragmentação durante o congelamento de gotas superesfriadas:



- Gotículas menores do que $25\ \mu\text{m}$ se congelam muito rapidamente e não expelem fragmentos.

- Fragmentos em gotículas líquidas também podem ocorrer durante o derretimento de uma partícula de gelo:



CRESCIMENTO DE PARTÍCULAS DE GELO POR DIFUSÃO DE VAPOR:

- Quando os primeiros cristais de gelo nucleiam na nuvem, eles se encontram em um ambiente onde a pressão de vapor é igual ou maior que a pressão de equilíbrio do vapor (e_s) sobre a água líquida. A **razão de saturação relativa ao gelo S_i** pode ser expressa como:

$$S_i = \frac{e}{e_i} = \frac{e}{e_s} \frac{e_s}{e_i} = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right)$$

onde S significa a razão de saturação com relação a água líquida, e **e_i é a pressão de vapor de saturação do gelo.**

- A supersaturação relativa ao gelo, $(e_s/e_i)-1$, ilustra que uma nuvem de água líquida está altamente supersaturada em relação ao gelo, e está em condições favoráveis para um rápido crescimento via difusão ou deposição.

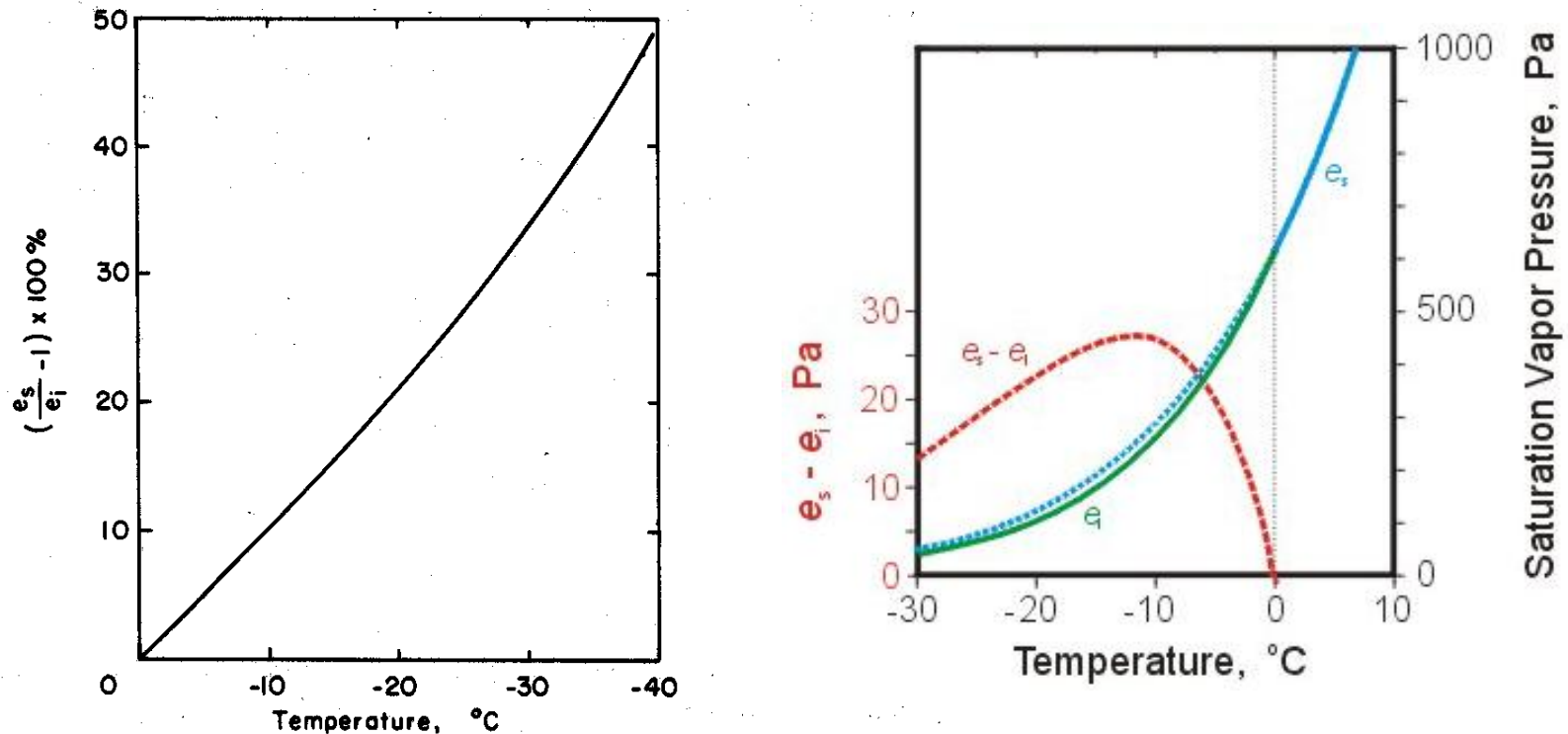
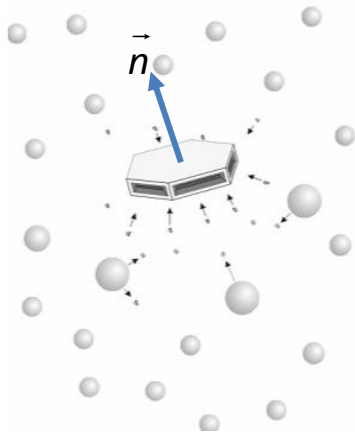


FIG. 9.3. Supersaturation relative to ice in an atmosphere at equilibrium saturation relative to water.

- O ambiente será favorável desde que existam gotículas de água para evaporar e manter a pressão de vapor em equilíbrio com a água. Se por alguma razão as gotículas de água desaparecerem (evaporarem ou congelarem), a razão de saturação irá decrescer a um equilíbrio em relação ao gelo.
- O problema em determinar a taxa de crescimento de uma partícula de gelo por difusão de vapor é análoga à do crescimento das gotas líquidas, mas com uma complicação: *os cristais de gelo não são esféricos!*



- A taxa de crescimento dos cristais de gelo será dependente da **capacitância C** do cristal, relacionado à forma dos mesmos.

- Logo, a teoria de crescimento de partículas de gelo por difusão de vapor é semelhante à de crescimento por difusão de vapor das gotículas:
 - A taxa de crescimento da massa do cristal, m , é

$$\frac{dm}{dt} = 4 \pi C D (\rho_v - \rho_{vr})$$

- e analogamente para a difusão de calor:

$$L_s \frac{dm}{dt} = 4 \pi C K (T_r - T)$$

onde K é condutividade térmica do ar, e T_r e T são a temperatura na superfície do cristal e no “infinito”, e L_s é calor latente de solidificação (fusão).

- Juntando as equações do crescimento pela difusão de vapor e condução de calor e a equação de Clausius-Clapeyron (analogamente ao que foi feito para o crescimento da gotícula líquida por difusão de vapor) temos:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= 4 \pi C D (\rho_v - \rho_{vr}) \\ L_s \frac{dm}{dt} &= 4 \pi C K (T_r - T) \\ \frac{1}{e_i} \frac{de_i}{dT} &= \frac{L_s M}{R T^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{4 \pi C (S_i - 1)}{\left[\left(\frac{L_s}{R_v T} - 1 \right) \frac{L_s}{K T} + \frac{R_v T}{e_i(T) D} \right]}$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4 \pi C (S_i - 1)}{[F_k + F_d]}$$

Equação do crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor

Lembrando que $S_i = e/e_i = S (e_s/e_i)$.

- Assim como no caso das gotículas de água líquida, o crescimento depende da temperatura e da pressão de vapor de saturação, *em relação ao gelo* neste caso.

- A figura abaixo indica que a taxa de crescimento varia inversamente com a pressão e a taxa máxima de crescimento ocorre a $\sim -15^{\circ}\text{C}$.

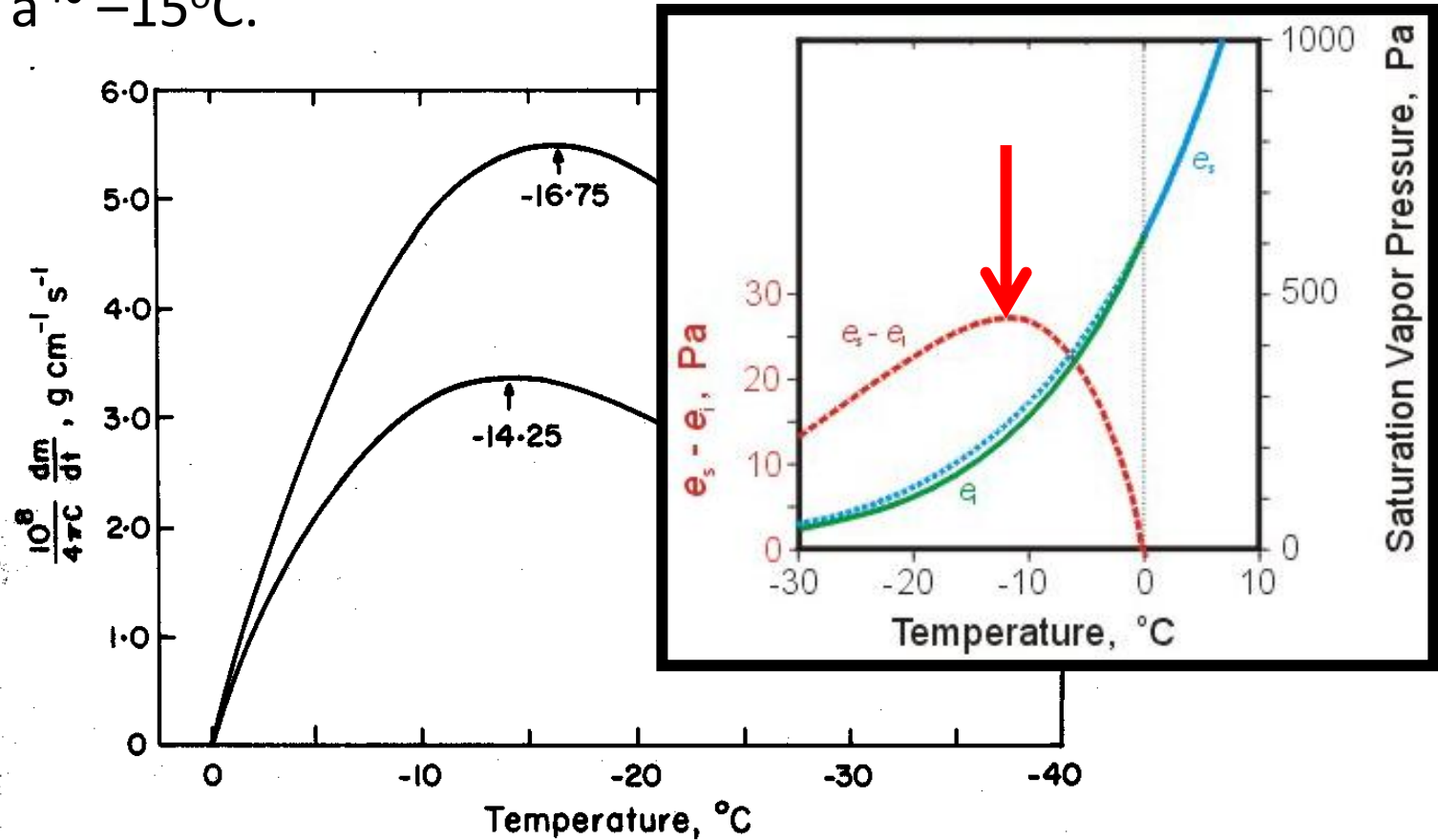
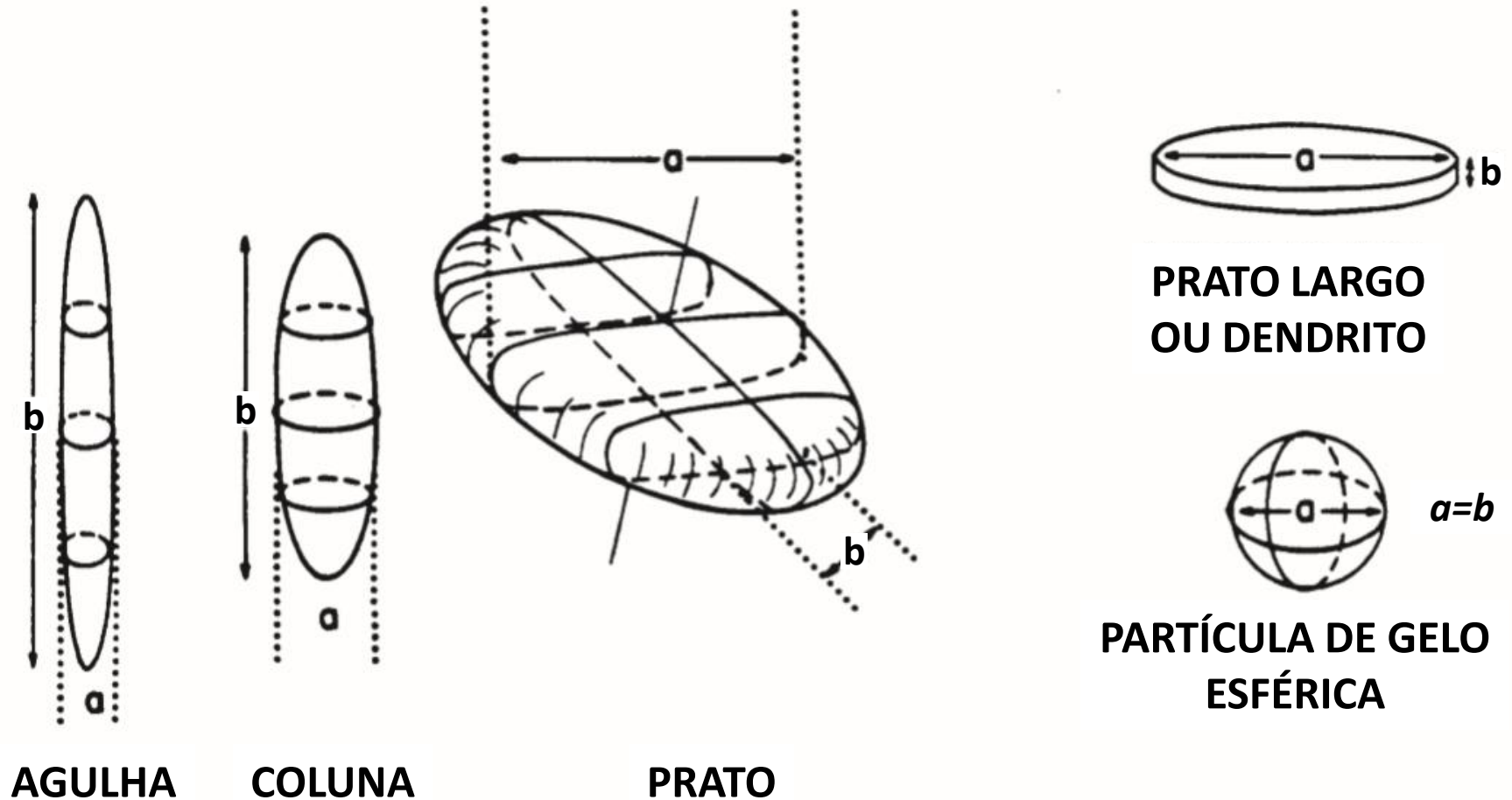


FIG. 9.4. Normalized ice crystal growth rate as a function of temperature. (Adapted from Byers, 1965.)

- Formas dos cristais e seus eixos para capacitância C:



- Alguns valores de C :

Shape	Capacitance	reference
Sphere, diameter D	$C = \frac{1}{2}D$	McDonald(1963) (theoretical)
Thin disk, diameter D	$C = \frac{D}{\pi}$	”
Prolate spheroid: major axis a , minor axis b	$C = A / \ln [(a + A)/b];$ $A = \sqrt{a^2 - b^2}$	”
Circular cylinder: radius a , aspect ratio ϕ	$C = 0.637a(1 + 0.868\phi^{0.76})$	Smythe (1962) (numerical)
Hexagonal columns: half-width a , aspect ratio ϕ	$C = 0.58a(1 + 0.95\phi^{0.75})$	Westbrook et al (2008) (numerical)
6-point bullet rosette: max diameter D_{Max} , aspect ratio of each arm ϕ	$C = 0.4\phi^{0.25}D_{max}$	”
Aggregates, max. diameter D_{max}	$C = \lambda D_{max}$ $\lambda = 0.25 - 0.28$	”
	$C = 0.26D_{max}$	Field et al (2008) (in-situ observations)

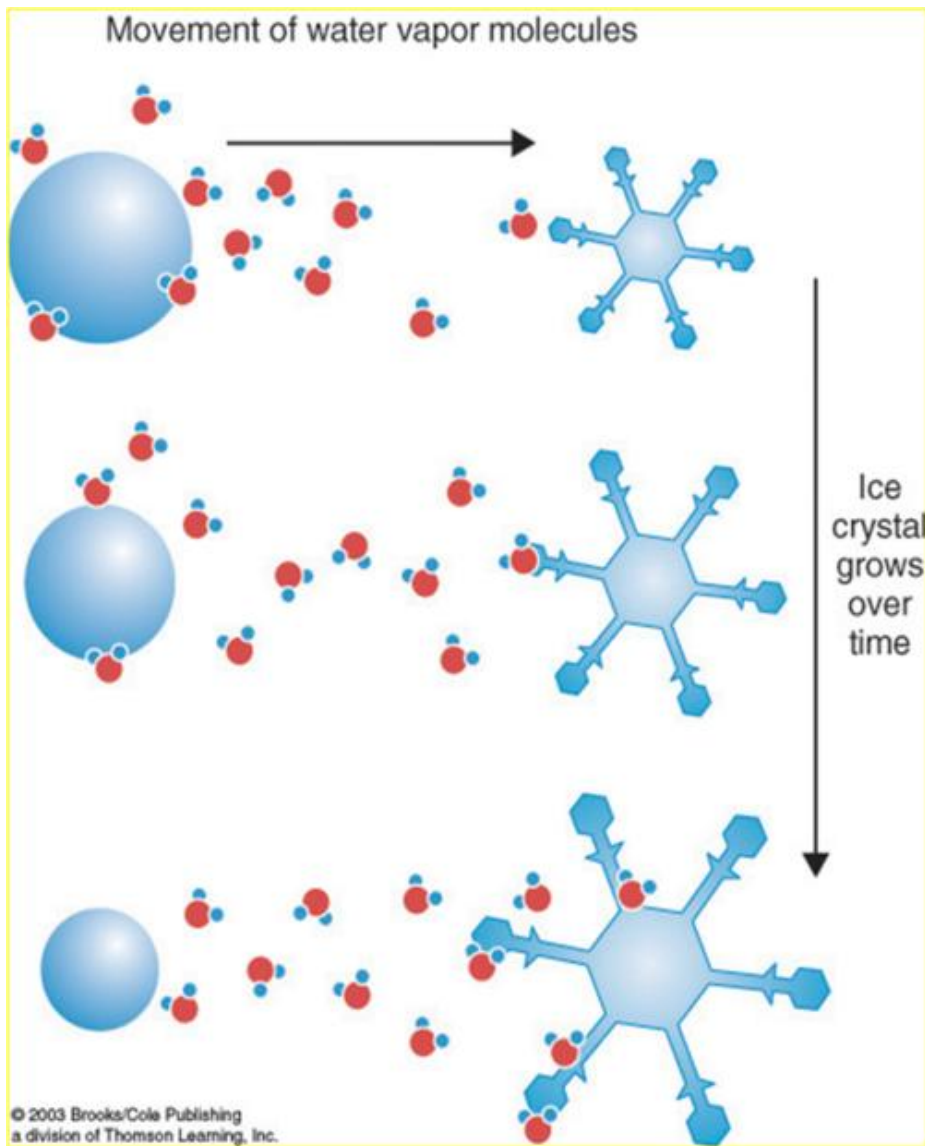
- Ignorando os efeitos do soluto e da curvatura (forma) para os cristais e gelo, e invocando a lei dos gases ideais, encontramos que as gotas líquidas e as partículas de gelo crescem de acordo com:

$$\frac{dm_l}{dt} \propto (e - e_s)$$

$$\frac{dm_i}{dt} \propto (e - e_i)$$

onde e_s e e_i são, respectivamente, as pressões de vapor de saturação sobre o líquido e o gelo.

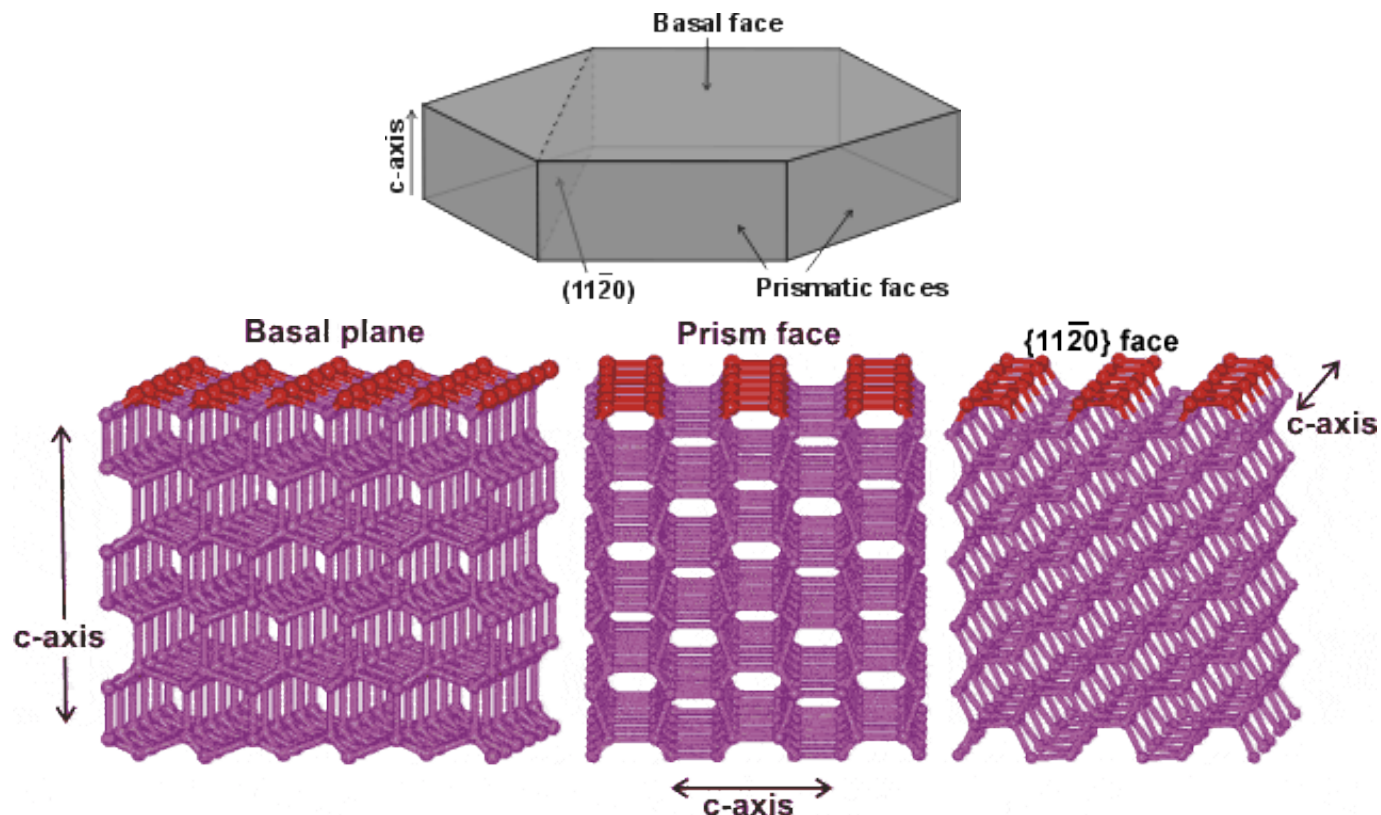
- Temos que $e_s > e_i$ (pois as moléculas de água estão melhores presas no gelo do que no líquido).



- Assim, em condições onde a pressão de vapor do ambiente e , excede ambos e_s e e_i , ambos gotas líquidas e partículas de gelo irão crescer por deposição de vapor.
- Se e está entre e_s e e_i , as partículas de gelo irão crescer por difusão e as gotas líquidas irão evaporar. A evaporação das gotas é uma fonte adicional de vapor, acelerando o crescimento do gelo. Este processo é conhecido como **processo de Wegener-Bergeon-Findeisen**.



- As condições ambientais determinam não somente a taxa de crescimento, mas também a forma (ou *habitat*) que o cristal toma.
- Todas as formas são basicamente estruturas hexagonais, mas com várias razões de eixo.



- As estruturas básicas dos cristais de gelo são (cristais pristine):



colunas

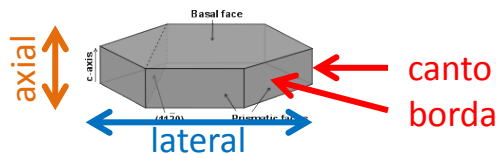


pratos



dendritos

todos se iniciando por um hexágono de acordo com o regime de cristalização nas condições atmosféricas (gelo-Ih)



Formação e crescimento de cristais de gelo

- A região de crescimento dos pontos do hexágono (face, laterais ou pontas) é determinado pela saturação em relação ao gelo e a temperatura ambiente:

Crescimento:

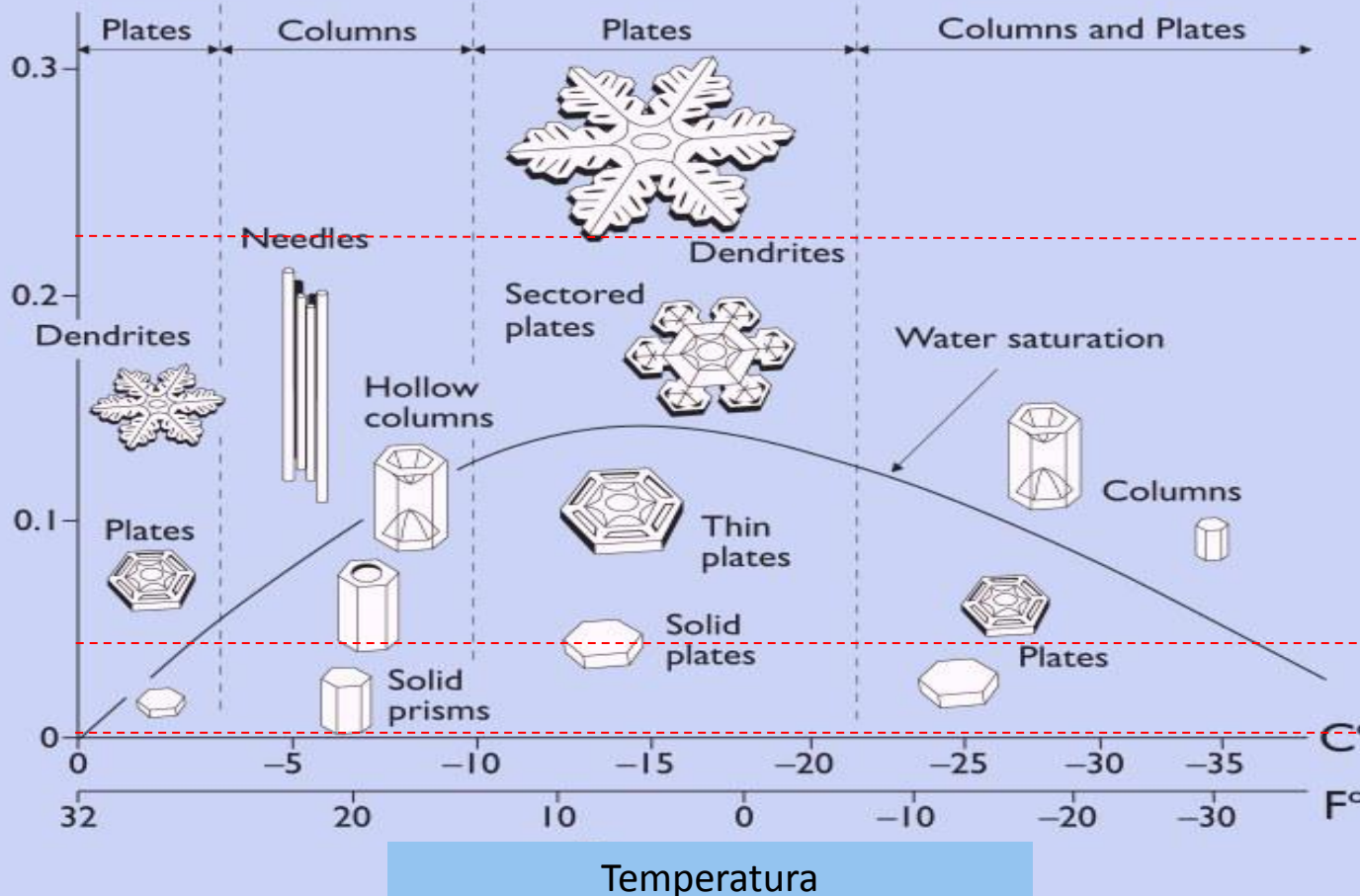
lateral

axial

lateral

axial

Excesso de densidade de vapor em relação ao gelo (gm^{-3})



Canto cresce

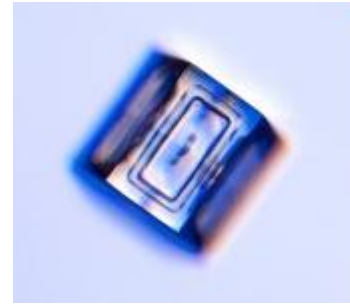
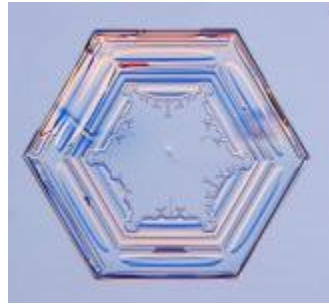
Borda cresce

Borda e cantos crescem quase-equilíbrio)

Crescimento:

- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Prismas simples



Pratos estelares



- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Pratos setorias



Dendritos estelares



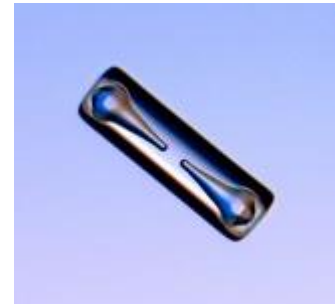
Dendritos estelares tipo samambaia



← Agregados de
dendritos
(não pristine)

- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Colunas ocas



Agulhas



- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Pratos duplos

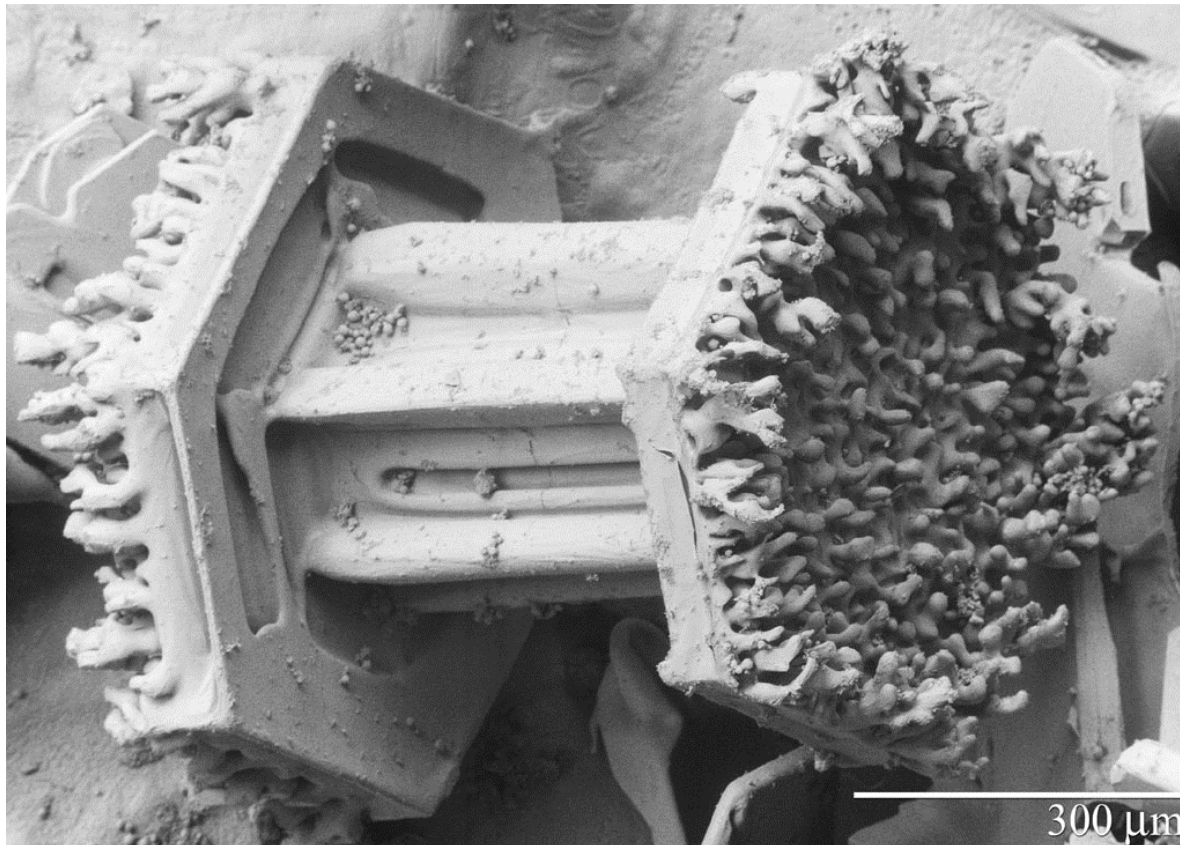


Coluna com chapéu ou limitada



- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Zoom em uma coluna com chapéu (pristine) e gotículas superesfriadas coletadas pelo cristal(→ não pristine)

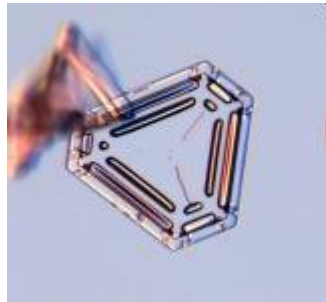


- Variações das estruturas básicas (**cristais pristine**):

Pratos separados ou estrelas



Cristal triangular



Floco de neve com 12 lados



- Variações das estruturas básicas:

Balas de roseta



Dendrites espalhadores

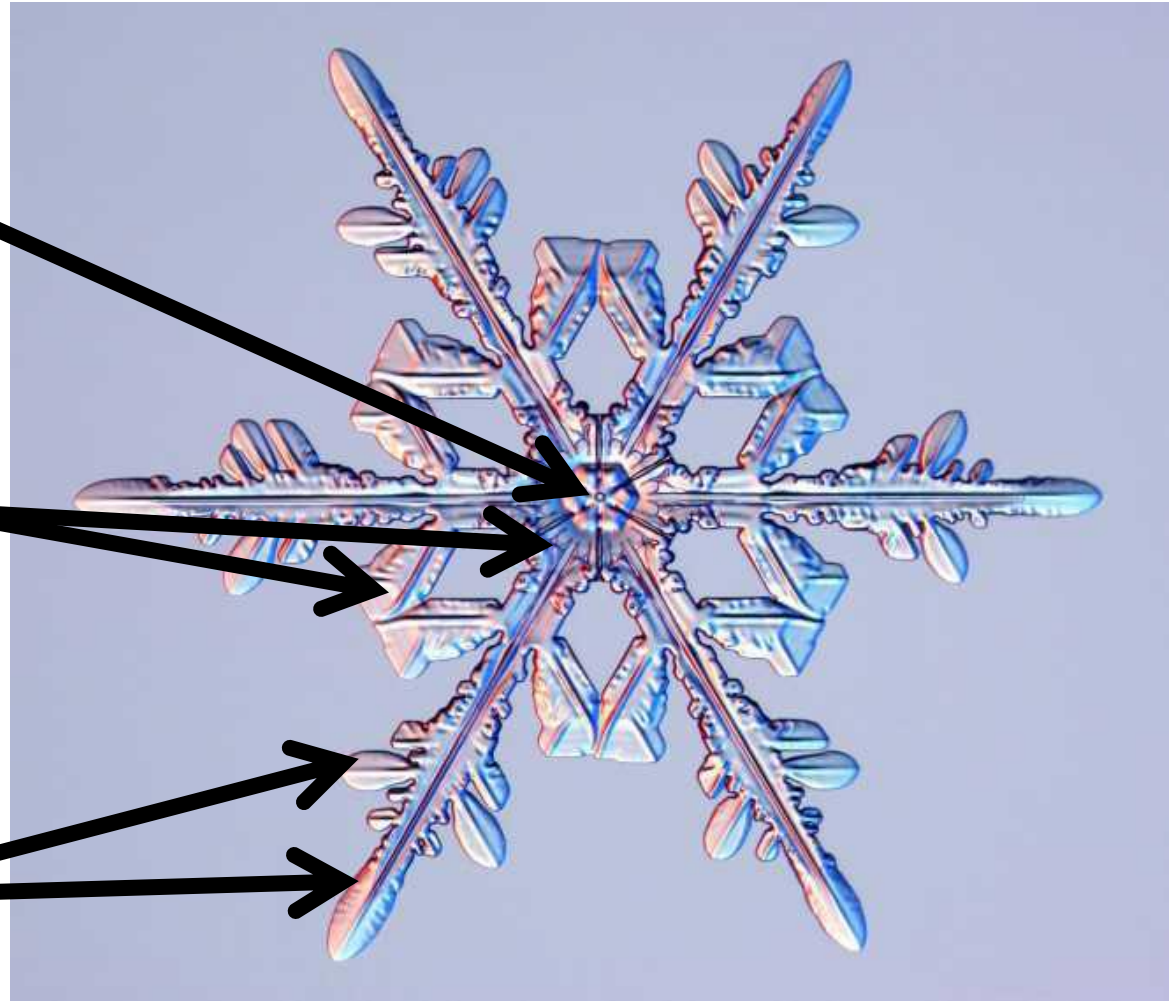


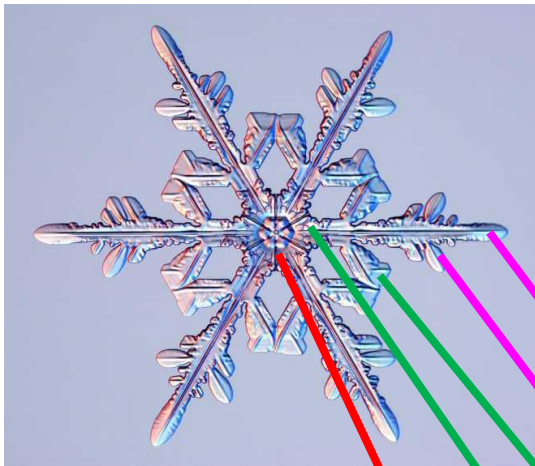
- A mudança da T e S do ambiente determinam o crescimento da face, laterais ou pontas:

Nucleação do gelo
(prato hexagonal)

Crescimento por
deposição lateral pelas
bordas

Crescimento por
deposição das lateral
pelos cantos





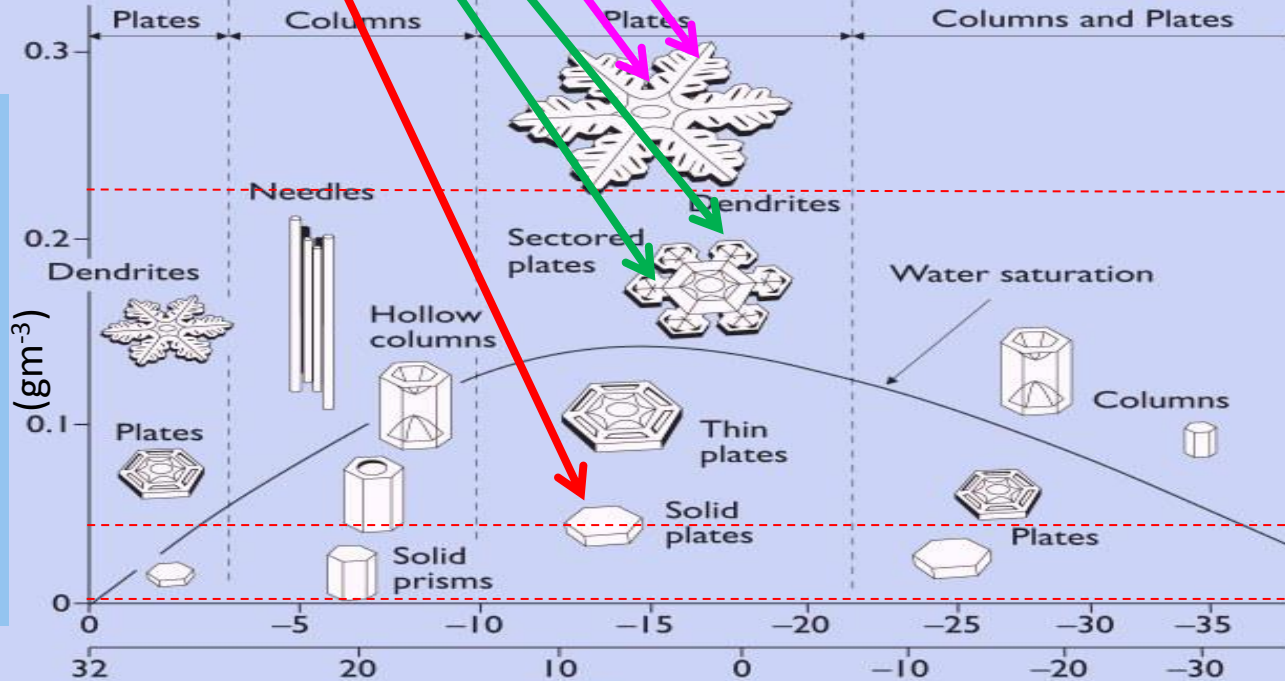
(1) Nucleação do gelo (prato hexagonal)

(2) Crescimento por deposição lateral pelas bordas

(3) Crescimento por deposição das lateral pelos cantos

Crescimento: lateral axial lateral axial

Excesso de densidade de vapor em relação ao gelo



Canto cresce
Borda cresce
Borda e cantos crescem (quase-equilíbrio)

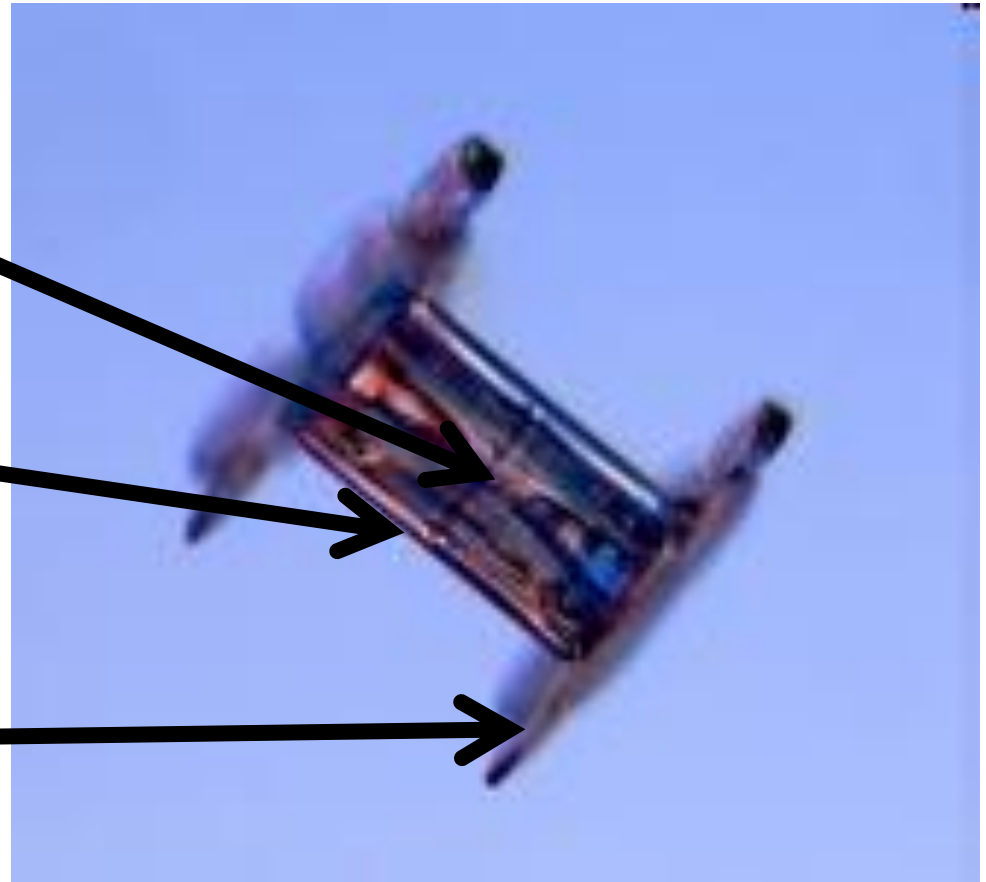
Temperatura

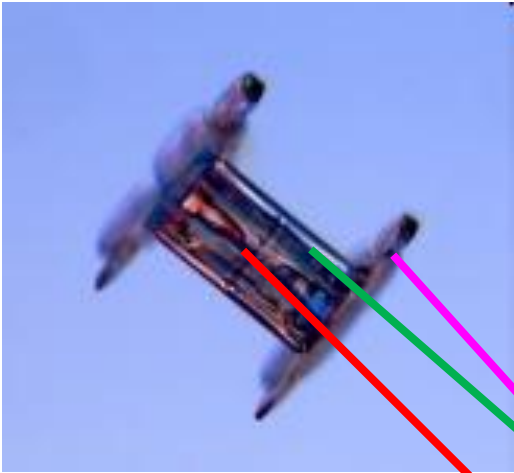
- A mudança da T e S do ambiente determinam o crescimento da face, laterais ou pontas:

Nucleação do gelo
(prato hexagonal)

Crescimento por
deposição facial em
quase-equilíbrio

Crescimento por
deposição da lateral pelas
bordas





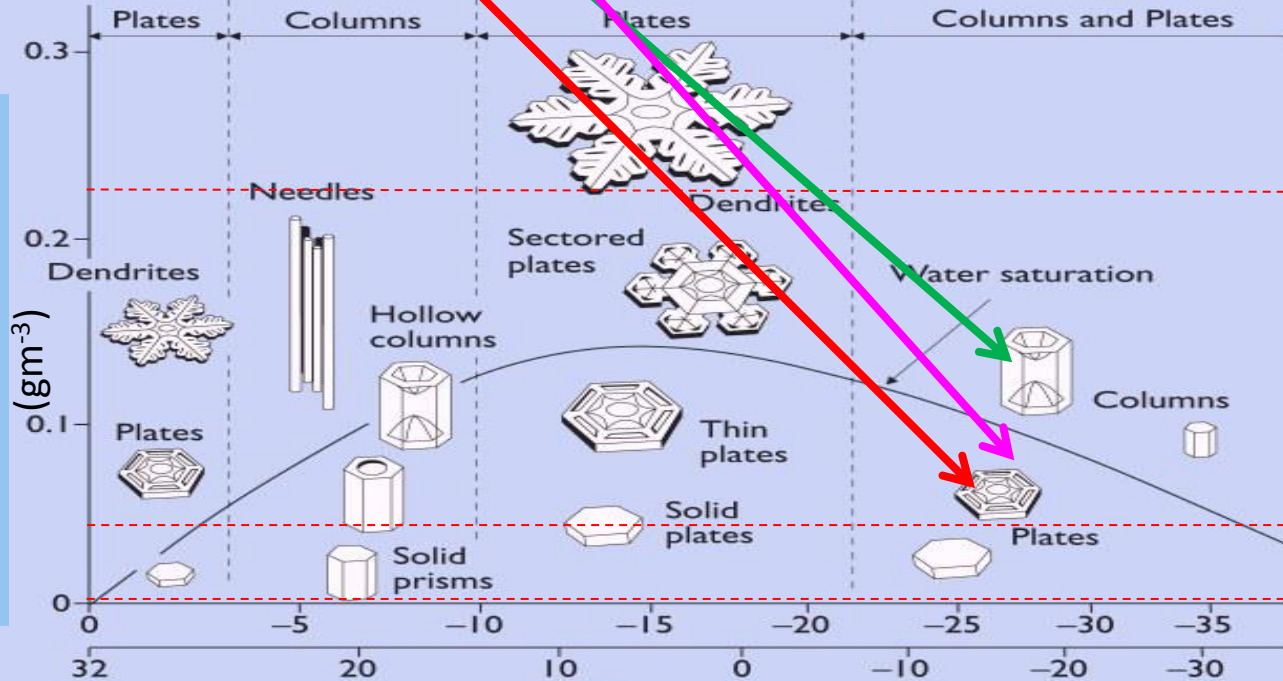
(1) Nucleação do gelo (prato hexagonal)

(2) Crescimento por deposição facial em quase-equilíbrio

(3) Crescimento por deposição da lateral pelas bordas

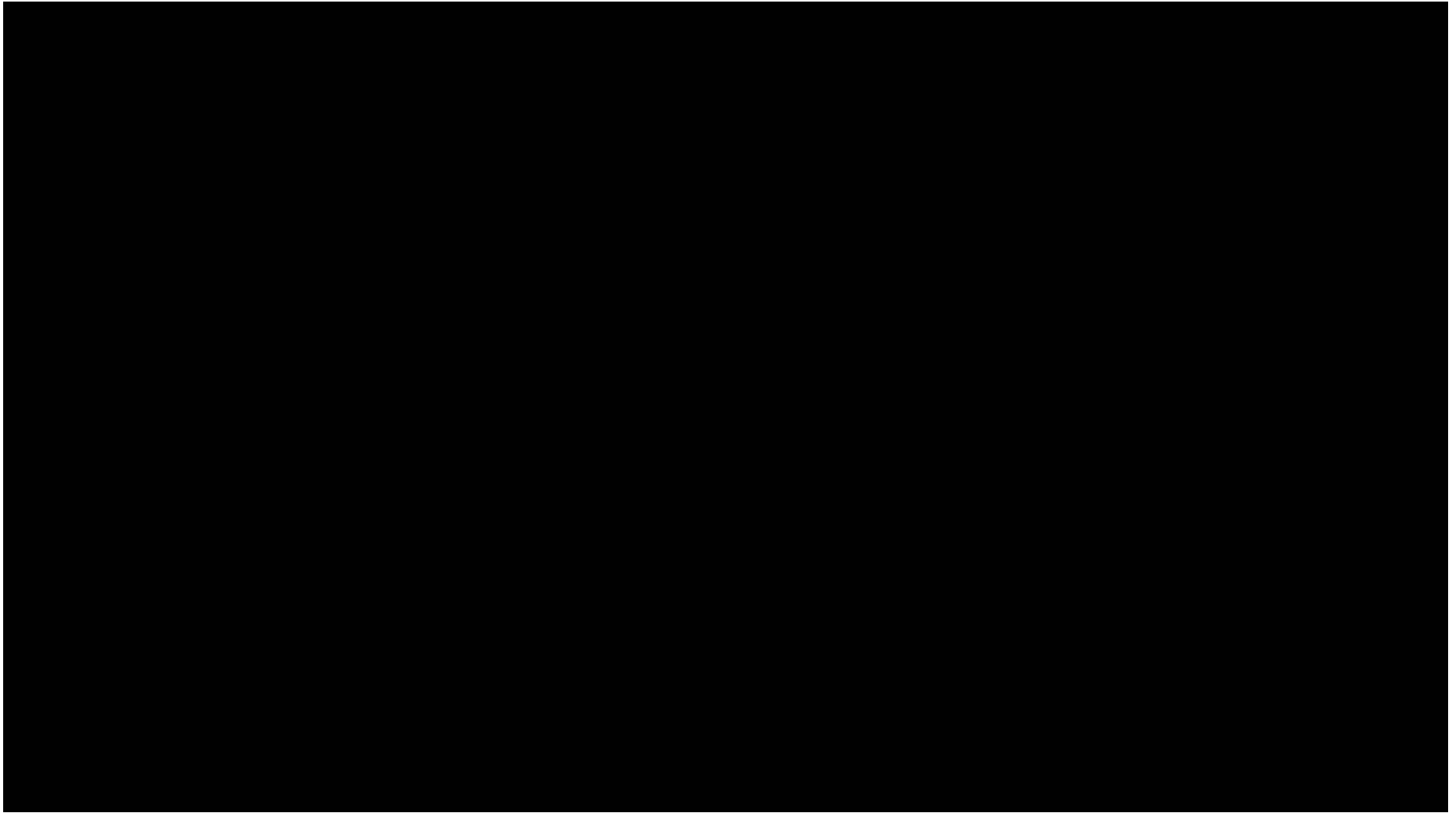
Crescimento: lateral axial lateral axial

Excesso de densidade de vapor em relação ao gelo

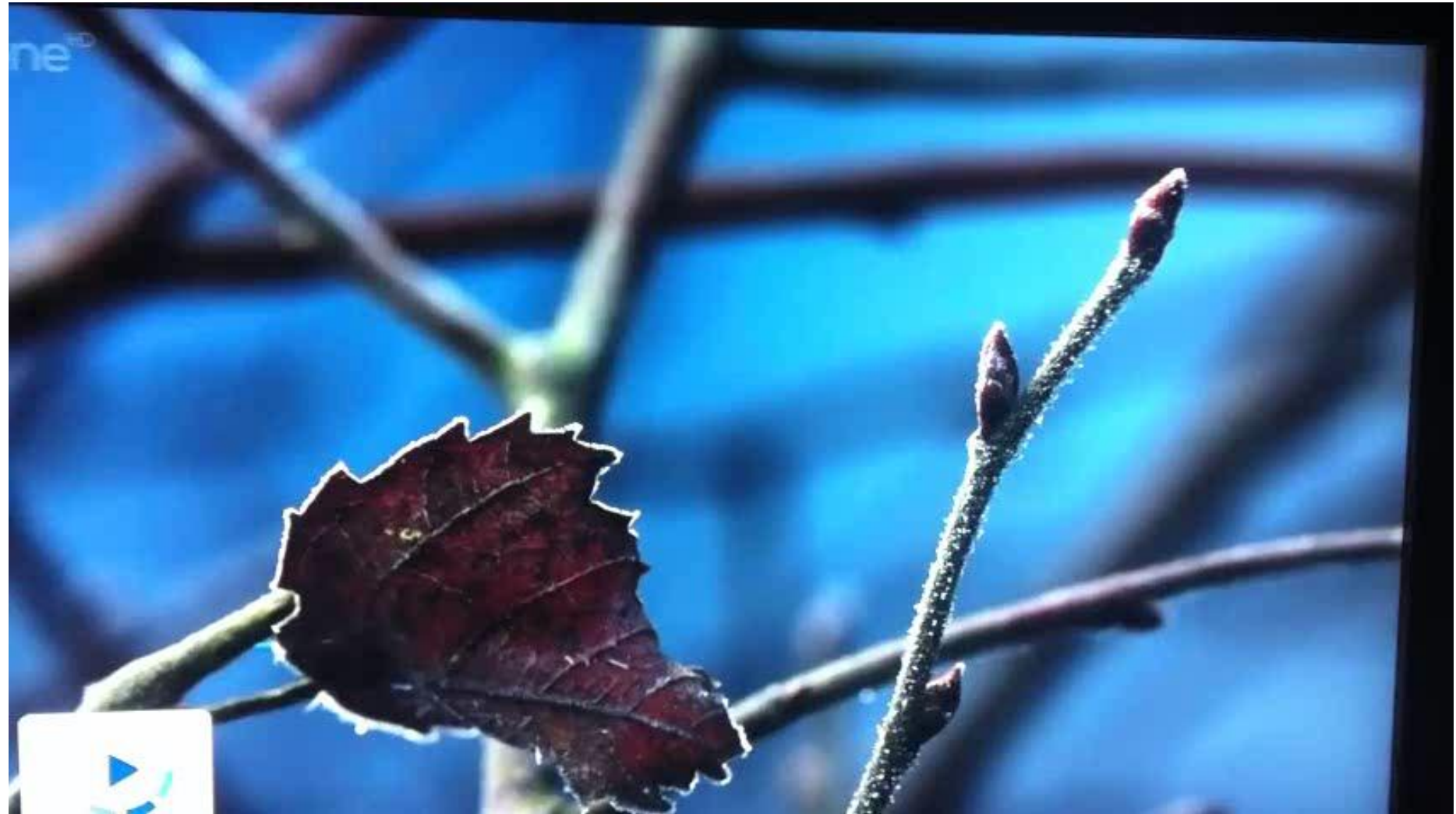


Canto cresce
Borda cresce
Borda e cantos crescem (quase-equilíbrio)

Temperatura



<https://youtu.be/MCA2VmDVzEo>



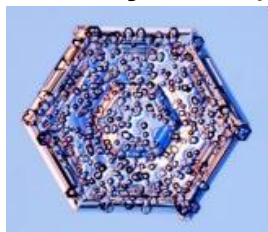
<https://youtu.be/BoW XKqpxLW0>

CRESCIMENTO POR COLISÃO (acresção, *riming* e agregação):

- Tal como acontece com as gotículas líquidas, partículas de tamanho ou forma divergente possuem velocidades terminais diferentes, resultando em colisões.
- A captura de gotículas de nuvem, gotas de chuva e/ou partículas de gelo são divididos em três categorias:

1) *RIMING*:

- Reservado para a coleta de **gotículas de nuvem por partículas de gelo**. Quando as gotículas de nuvem (pequenas), tocam a superfície do gelo, elas congelam imediatamente formando uma camada irregular, chamada de cobertura (*rime*, em inglês) de gotículas. São responsáveis pela formação de cristais *rimed* e *graupel* (também conhecido como granizo mole – *soft hail*).



2) **ACREÇÃO:**

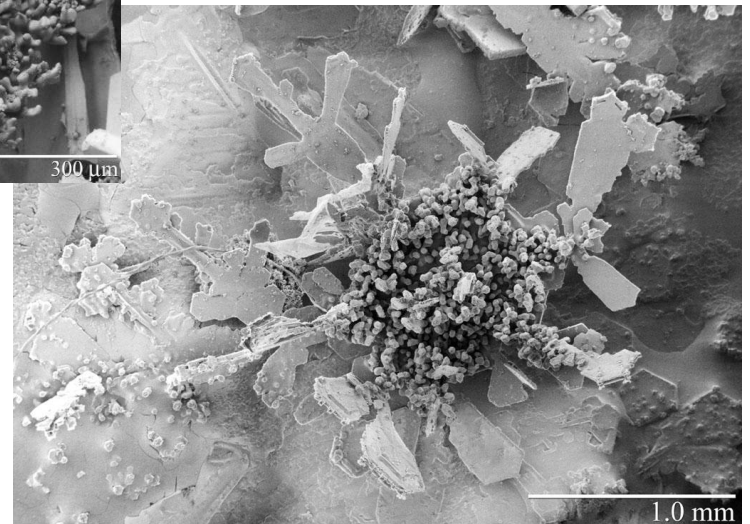
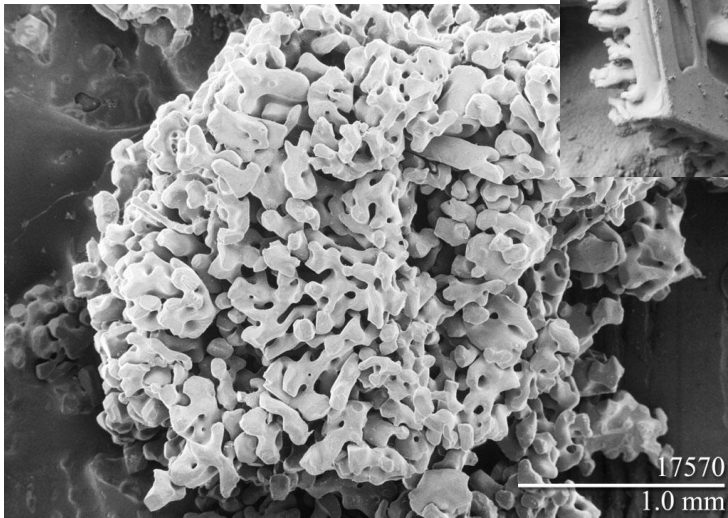
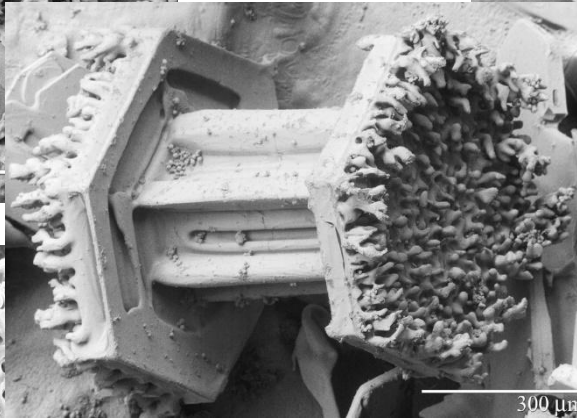
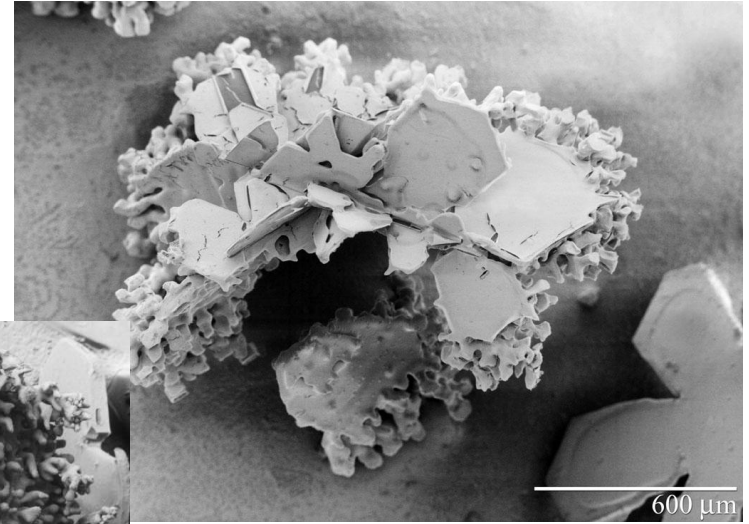
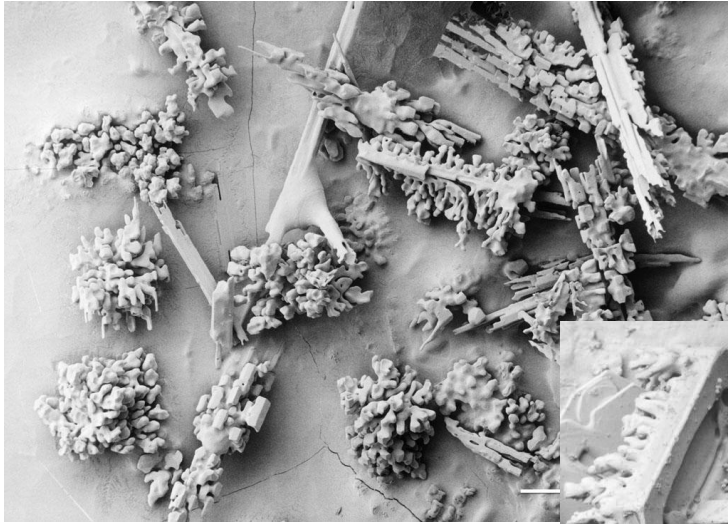
- Estritamente falando, é captura de qualquer de qualquer partícula menor por uma bem maior. Ou seja, pode ser o processo de captura de gotículas pequenas por gotas de chuva grande (o mesmo que coalescência) também é classificado como acreção. Porém, usualmente é refere-se à captura de gotas líquidas por partículas de gelo, mais comumente **de gotas de chuva por partículas de gelo grandes** (já em tamanhos de precipitação).

3) **AGREGAÇÃO**

- É a aglomeração (embaraçamento) de cristais de gelo formando flocos de neve.



- Exemplos de cristais *rimed* densos e *graupel*:



- Exemplos de aglomerados de gelo (neve):

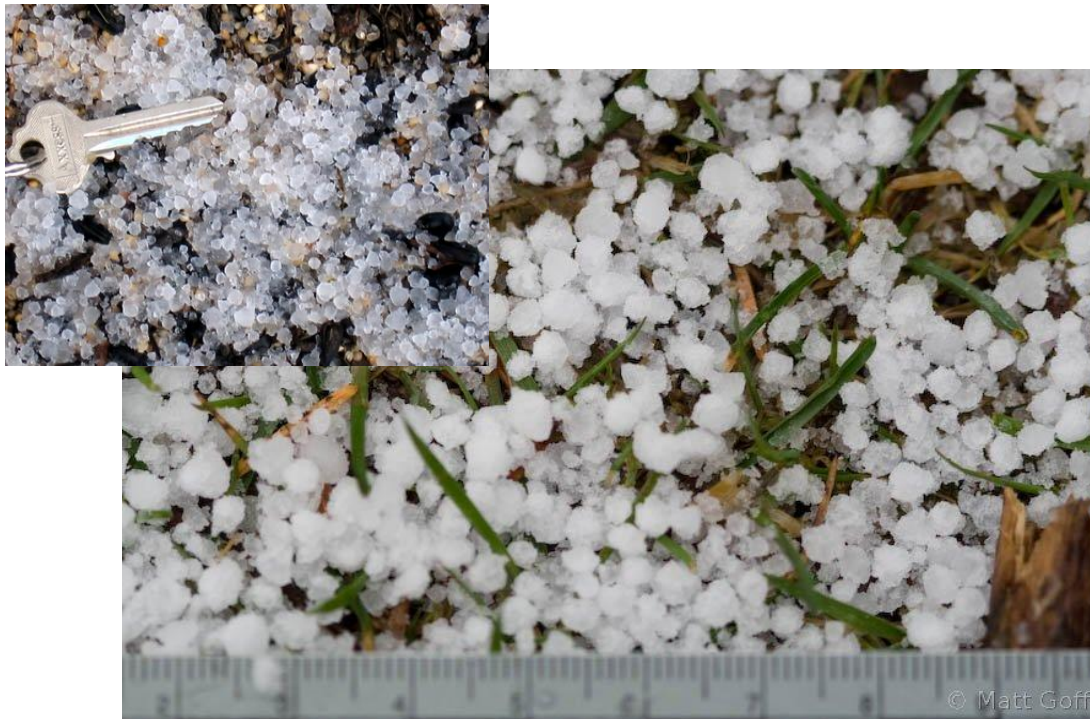
Cristal irregular



Neve artificial



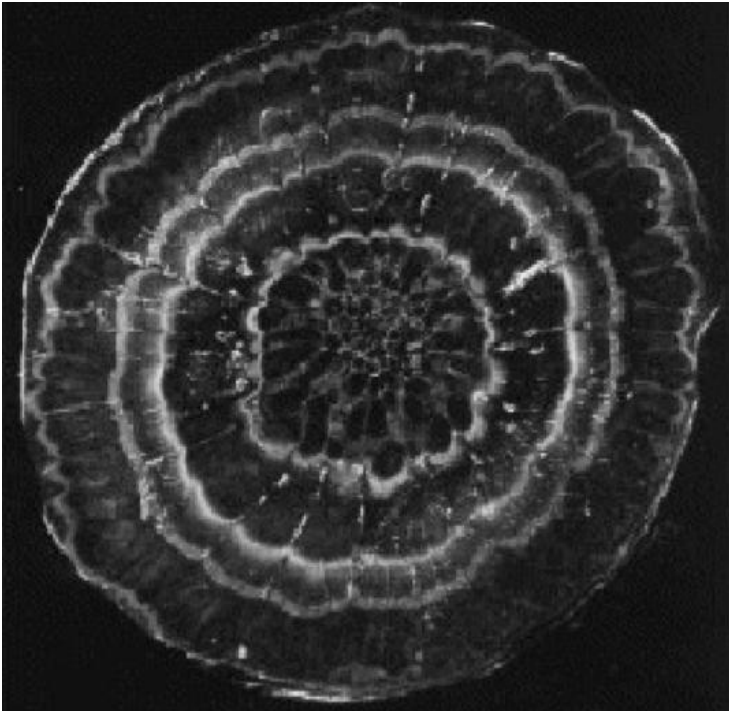
- O *graupel* tem aspecto arredondado de tamanho entre os flocos de neve e granizo, e possuem densidade mais baixa que o granizo por prender ar entre as centenas a milhares de gotículas capturadas.
- O *graupel* é o precursor do **granizo**, mais denso formado então por **acrecção de gotas de chuvas em graupel**. As gotas de chuva são grandes e ao colidirem com o graupel se espalham melhor sobre sua superfície formando camadas mais densas de gelo.



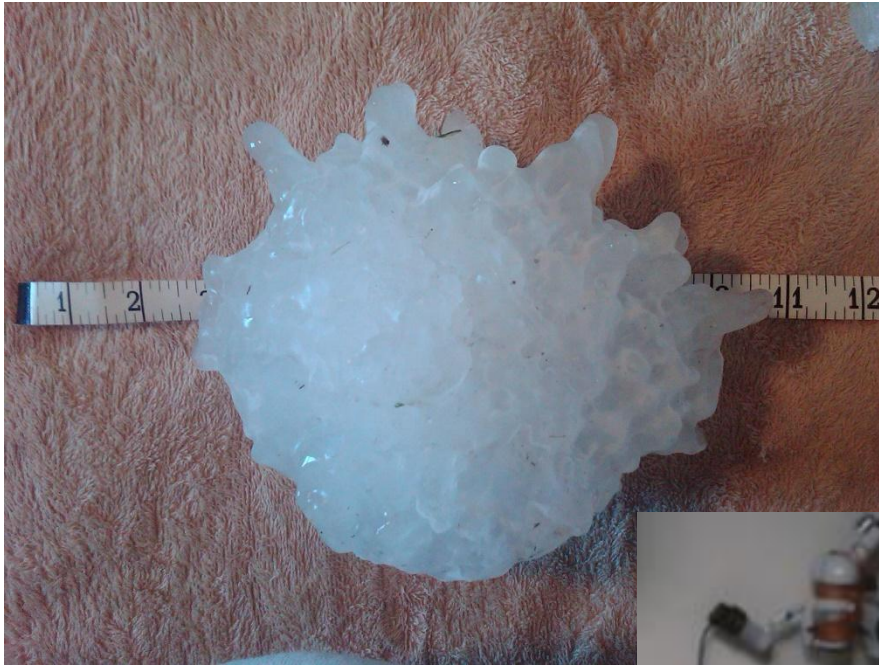
- As famosas “chuvas de granizo” da cidade de São Paulo são na verdade *chuva de graupel*.



- Quando a acreção de gotas de chuva pelo granizo é muito alta, o congelamento das gotas de chuva na superfície do granizo aquece a superfície deixando-a em estado líquido, chamada de crescimento molhado de granizo (que também pode ser dado pelo aumento da temperatura do ambiente). Examinando a secção transversal de um granizo podemos observar o número de vezes que o granizo cresceu por acreção em regime molhado (água líquida espalha, mais denso → transparente) e seco (congelamento imediato, menos denso → branco)



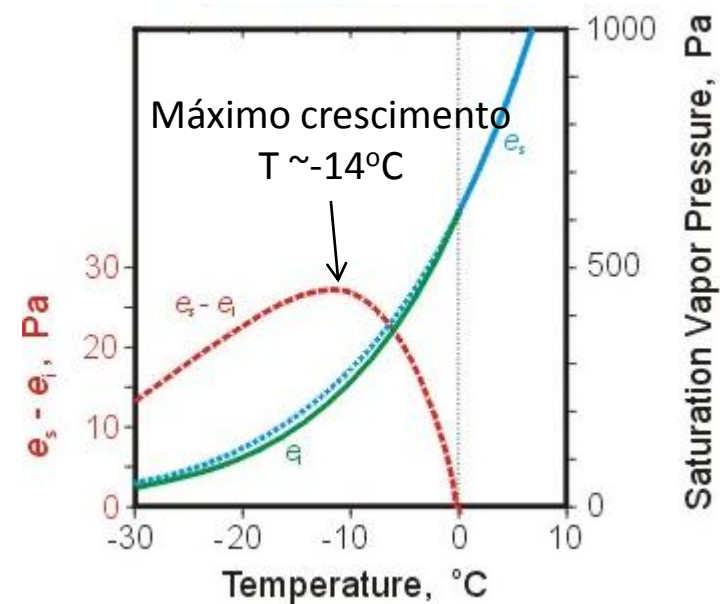
- O maior granizo já registrado foi observado na cidade de Vivian, Dakota do Sul, Estados Unidos, em 23 de Julho de 2010. O granizo tinha 20,32 cm, pesava 880 g e tinha uma circunferência de 47,3 cm.
(<http://www.crh.noaa.gov/abr/?n=stormdamagetemplate>)



• REVISÃO DA AULA ANTERIOR:

$$e_i < e_s$$

- se o ambiente está saturado em relação à água líquida, ele estará automaticamente supersaturado em relação ao gelo



vapor/líquido:

$$e_s = e_{s0} \exp \left\{ \frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

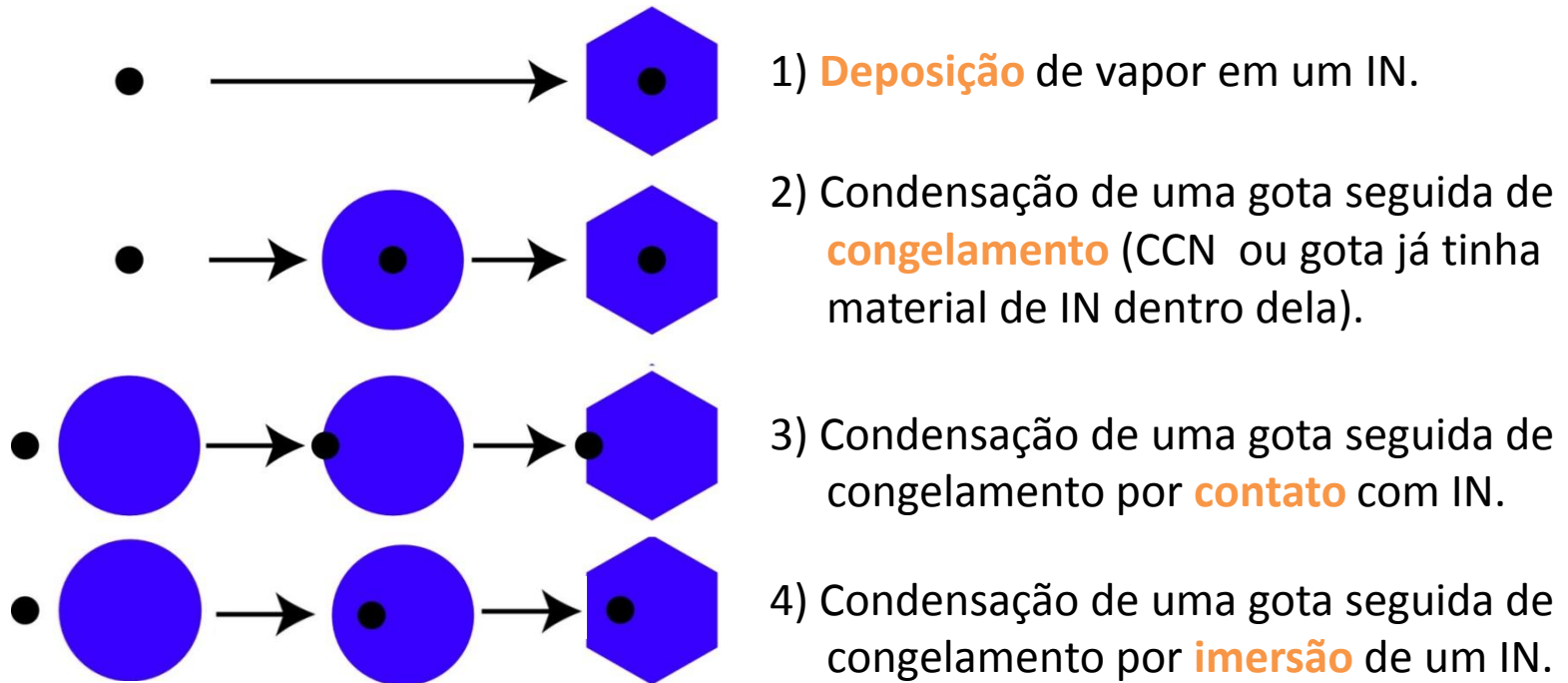
vapor/sólido:

$$e_i = e_{s0} \exp \left\{ \frac{L_f}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

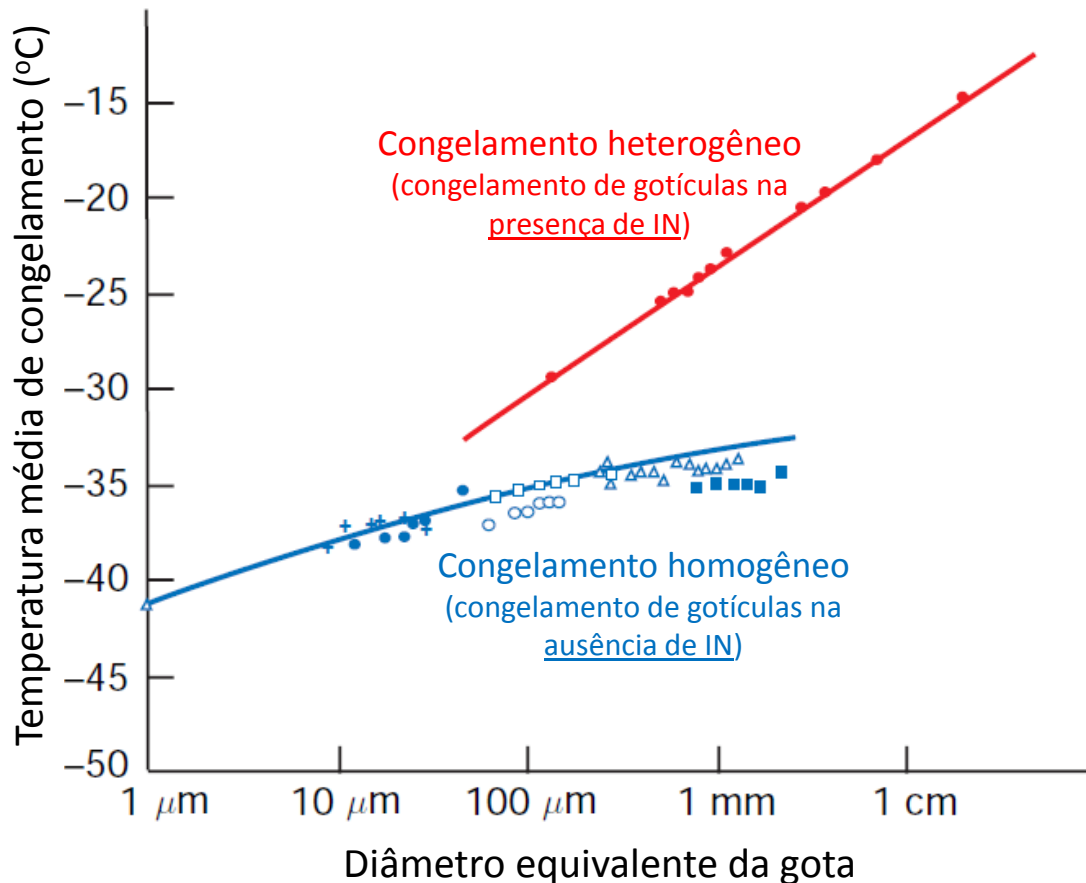
$$\left. \begin{array}{l} L_v > L_f \\ S_i = S \left(\frac{e_s}{e_i} \right) \end{array} \right\} \left(\frac{e_s}{e_i} \right) > 1 \rightarrow S_i > S, \text{ para uma mesma } T$$

- no intervalo de tempo de apenas alguns minutos um cristal de gelo pode crescer algumas dezenas de micrometros em sua dimensão linear.

- Assim como para as gotículas de água líquida, a nucleação homogênea do vapor em cristais de gelo (fusão do vapor) não é possível nas condições atmosféricas.
- Analogamente, a formação de gelo está associada à presença de **núcleos de gelo** (*IN – do inglês, ice nuclei*), análogo ao CCN, e é chamada de nucleação heterogênea.
- Existem vários mecanismos de nucleação heterogênea:



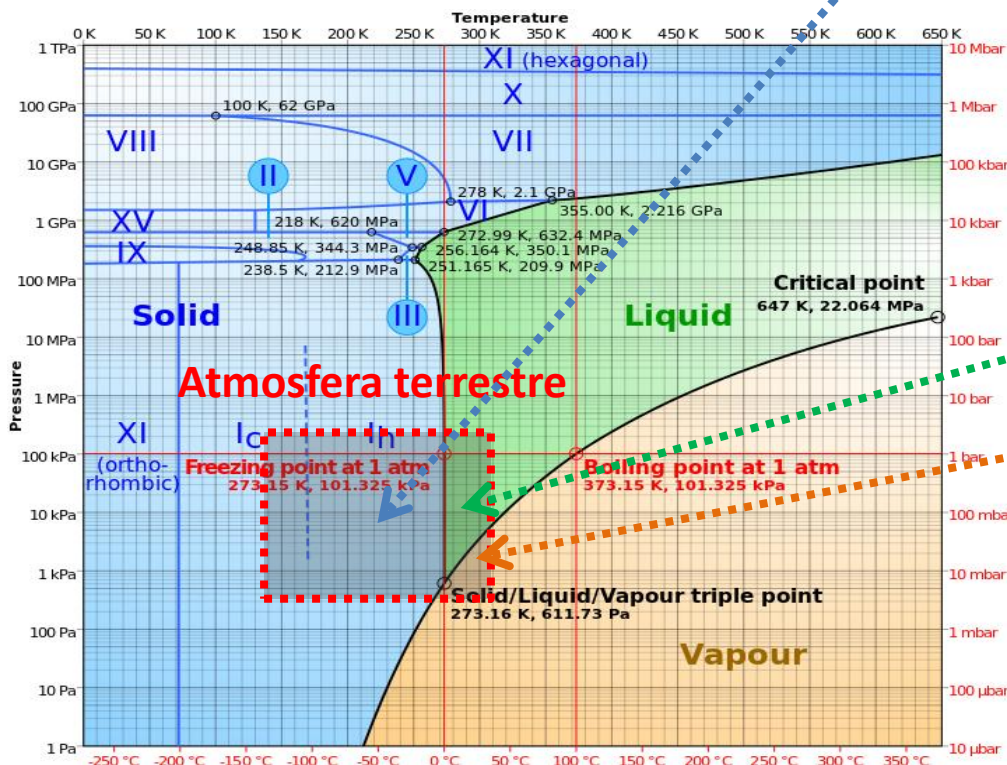
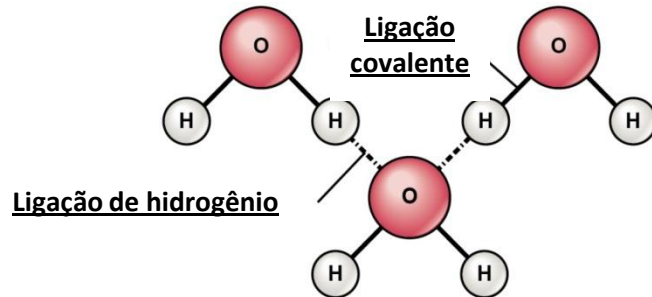
- Uma gota de água líquida que se formou na fase quente da nuvem e não contém IN irá congelar a temperaturas muito baixas, e este processo é chamado de **congelamento homogêneo de gelo (ou também nucleação homogênea*)**. *Toda água líquida se congela a $T < -40^{\circ}\text{C}$* , mas quanto menor a gota, menor é a temperatura na qual ela se congela:.



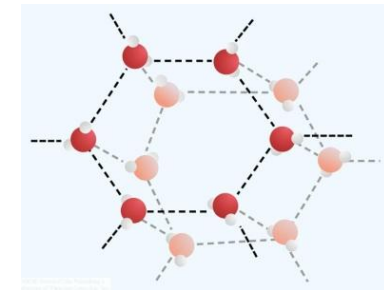
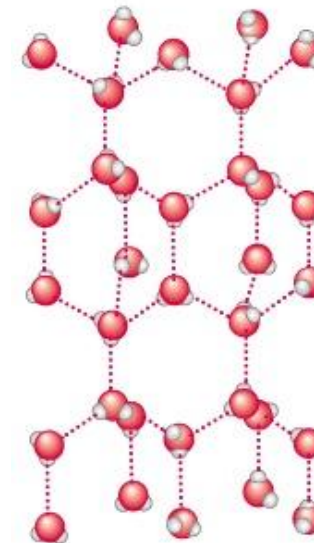
- gotículas menores que $5\ \mu\text{m}$ congelam espontaneamente a temperaturas de -40°C .
- gotas maiores congelam a temperaturas mais quentes

* Perceba que homogêneo neste caso não se refere à nucleação do vapor, mas sim ao congelamento da água líquida!

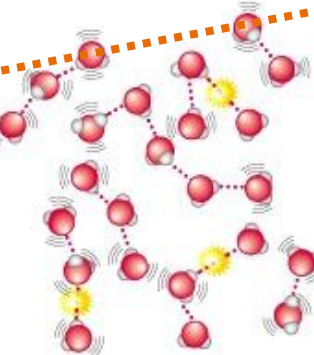
- O gelo nas condições da nossa atmosférica possui uma estrutura rígida de ligações de hidrogênio na forma hexagonal (I_h):



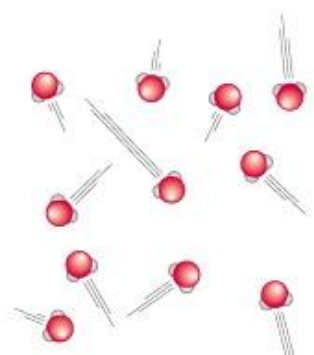
(a) Solid water (ice)



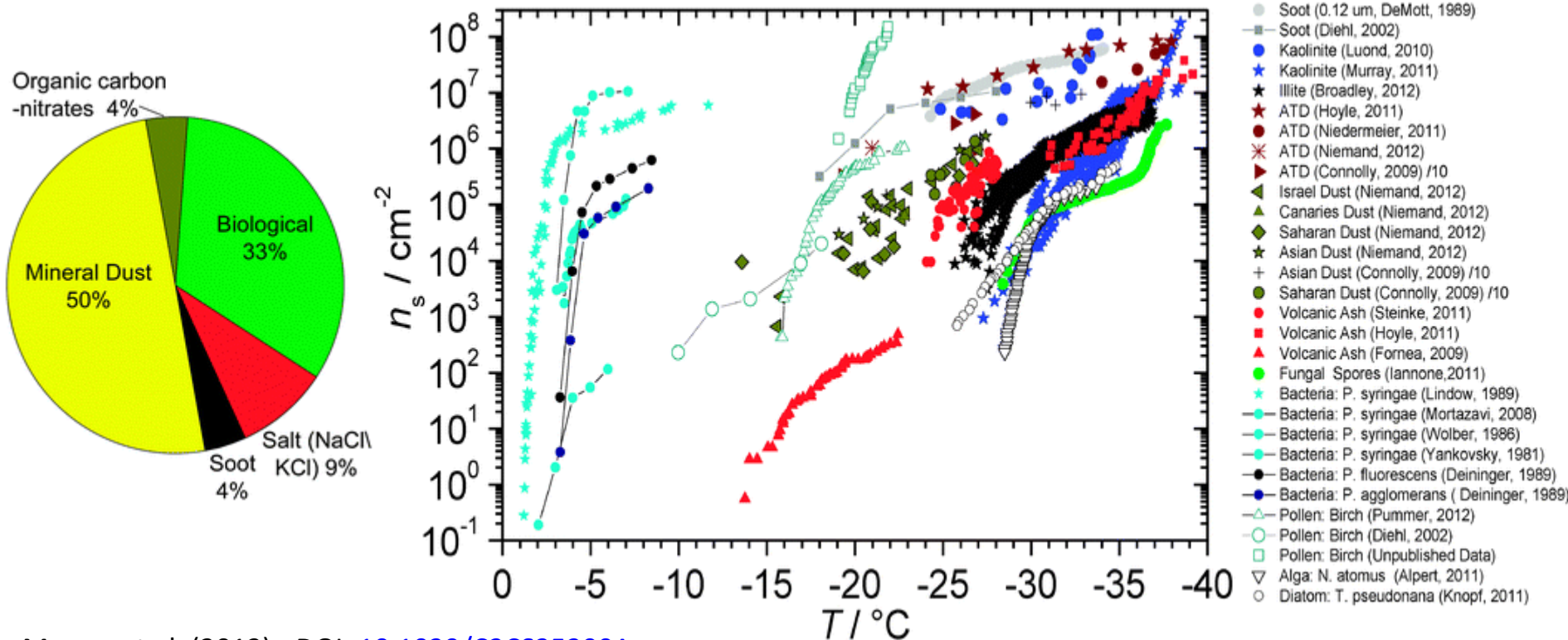
(b) Liquid water



(c) Gaseous water (steam)



- A concentração de IN na atmosfera é da ordem de 0,1 à 10 por litro, muito menor do que a concentração de CCN (100 à 1.000 por litro).
- Aerossóis que são eficientes como CCNs geralmente não são eficientes como INs.
- INs eficientes: partículas insolúveis (minerais) e orgânicas



Murray et al. (2012) - DOI: [10.1039/C2CS35200A](https://doi.org/10.1039/C2CS35200A)

- Os INs possuem estruturas em sua superfície que se assemelham aos hexágonos, facilitando assim a formação de gelo:

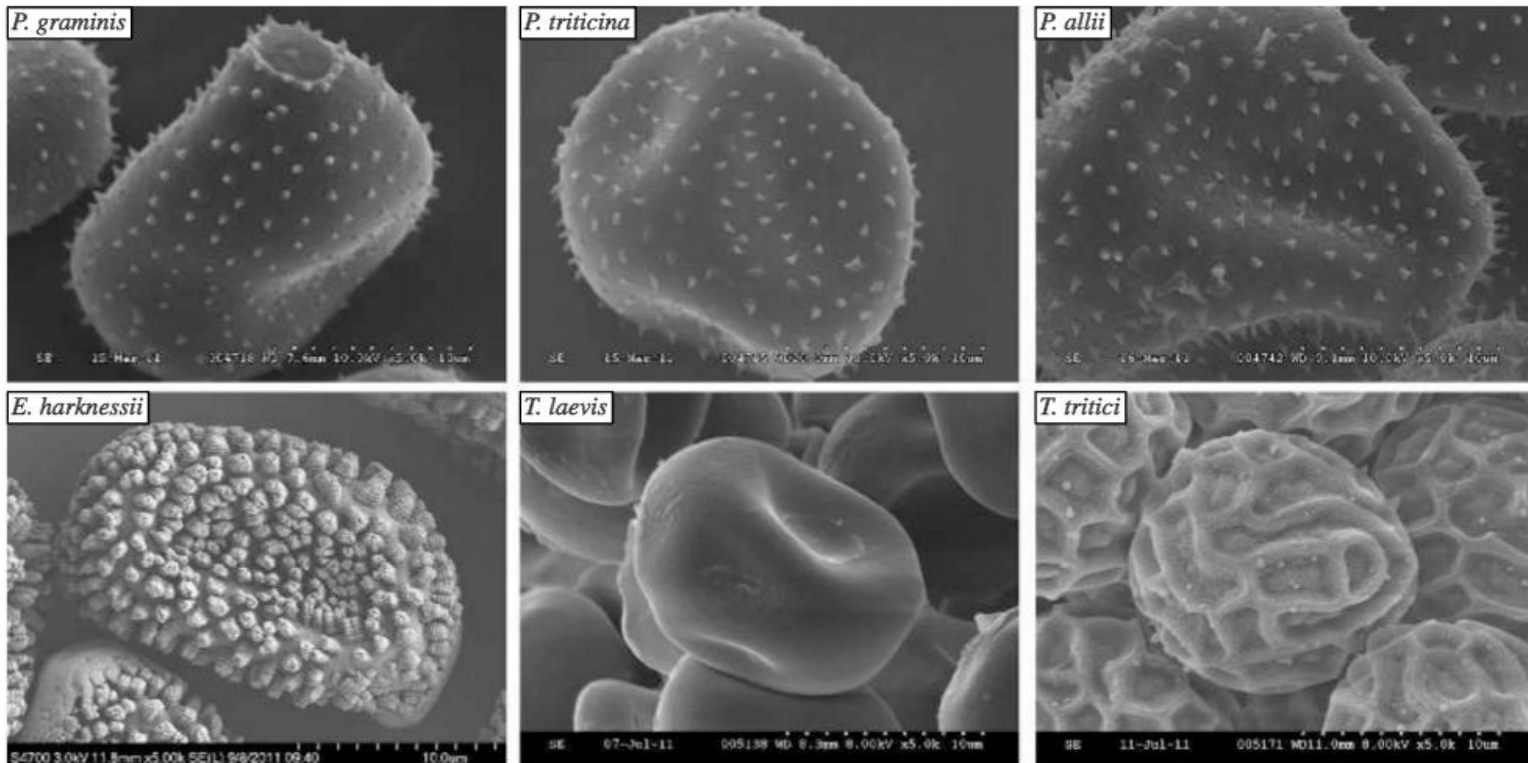
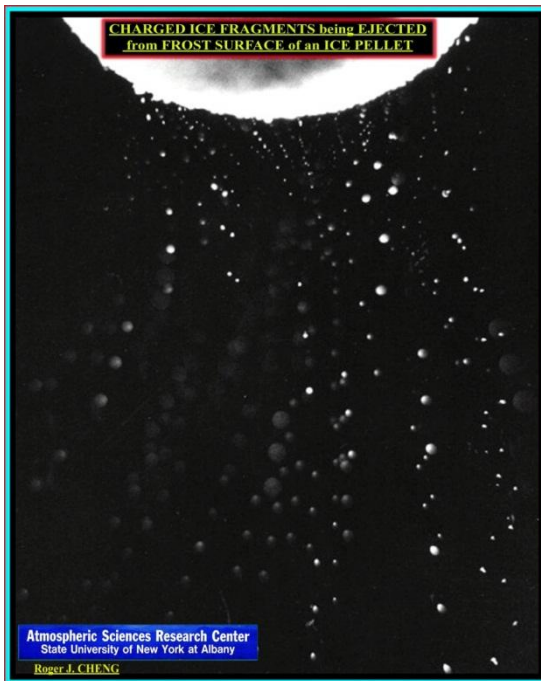


Figure 2. SEM images of rust (*P. graminis*, *P. triticina*, *P. allii*, and *E. harknessii*) and bunt (*T. laevis* and *T. tritici*) spores studied.

- As nuvens possuem muito mais gelo do que IN (da ordem de 10^4 mais partículas de gelo do que IN)!!!
 - Os primeiros cristais de gelo que aparecem em nuvens devem ser formados a partir de núcleos de gelo ou por congelamento de gotas líquidas.
- Os cristais adicionais são produzidos por **processos secundários onde os cristais primários são multiplicados:**



- fratura dos cristais de gelo
- quebra ou estilhaço de gotas ao se congelar
 - Fragmentos de gelo são ejetados quando gotas superesfriadas maiores que $25\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro se congelam ao colidirem com partículas de gelo em temperaturas entre -3°C e -8°C .
 - Para $T > -3^{\circ}\text{C}$, as gotas tendem a se espalhar ao redor da superfície do gelo ao invés de congelarem arredondadas.
 - Para $T < -8^{\circ}\text{C}$, o congelamento é muito rápido começando de fora para dentro, não havendo rompimento.

CRESCIMENTO DE PARTÍCULAS DE GELO POR DIFUSÃO DE VAPOR:

- Juntando as equações do crescimento pela difusão de vapor e condução de calor e a equação de Clausius-Clapeyron (analogamente ao que foi feito para o crescimento da gotícula líquida por difusão de vapor) temos:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= 4 \pi C D (\rho_v - \rho_{vr}) \\ L_s \frac{dm}{dt} &= 4 \pi C K (T_r - T) \\ \frac{1}{e_i} \frac{de_i}{dT} &= \frac{L_s M}{R T^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{4 \pi C (S_i - 1)}{\left[\left(\frac{L_s}{R_v T} - 1 \right) \frac{L_s}{K T} + \frac{R_v T}{e_i(T) D} \right]}$$

Equação do crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4 \pi C (S_i - 1)}{[F_k + F_d]}$$

Lembrando que $S_i = e/e_i = S(e_s/e_i)$.

- Assim como no caso das gotículas de água líquida, o crescimento depende da temperatura e da pressão de vapor de saturação, *em relação ao gelo* neste caso.

- A figura abaixo indica que a taxa de crescimento varia inversamente com a pressão e a taxa máxima de crescimento ocorre a $\sim -15^{\circ}\text{C}$.

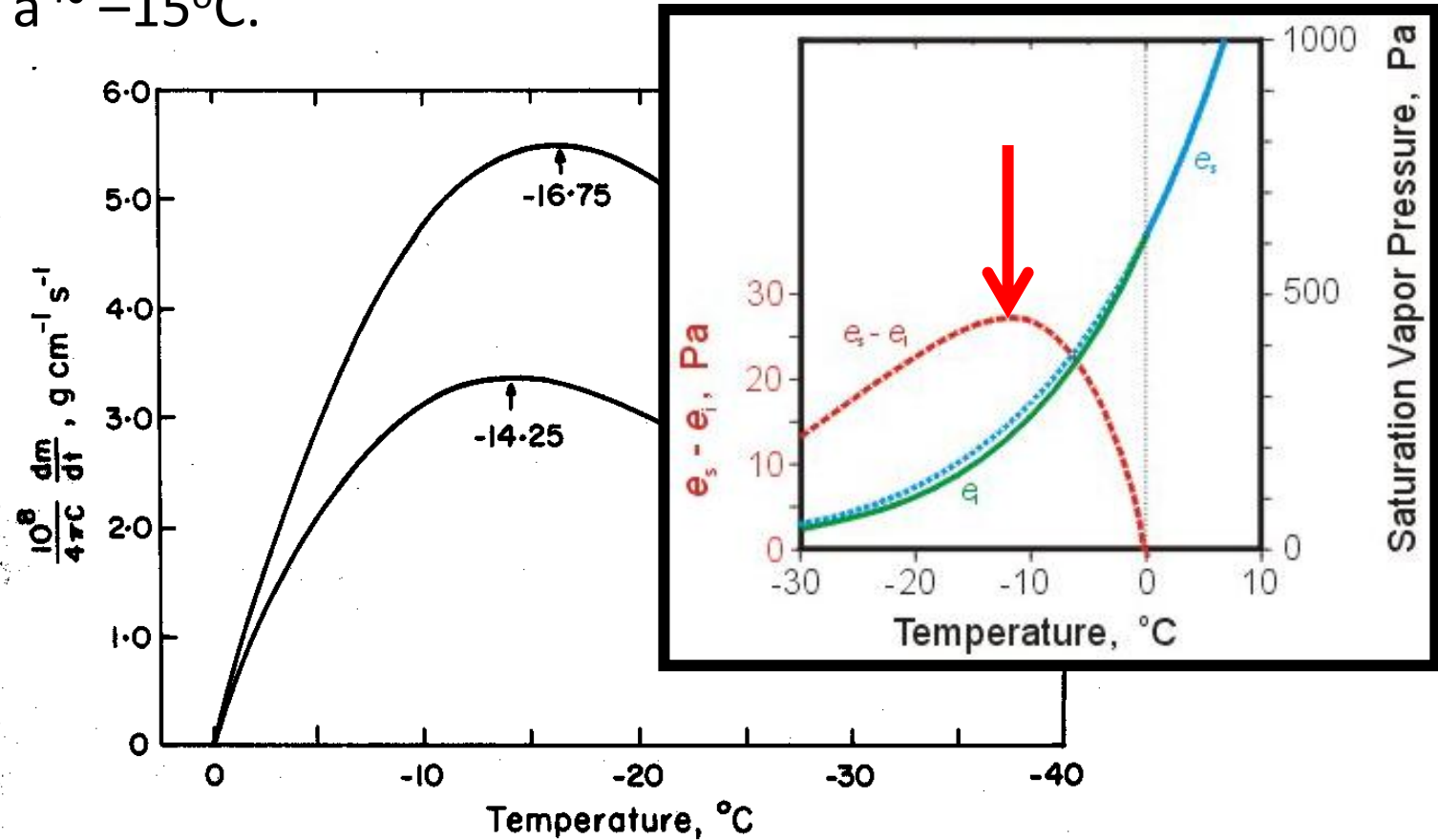
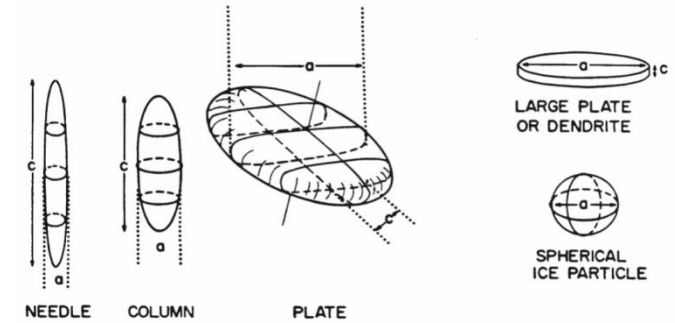


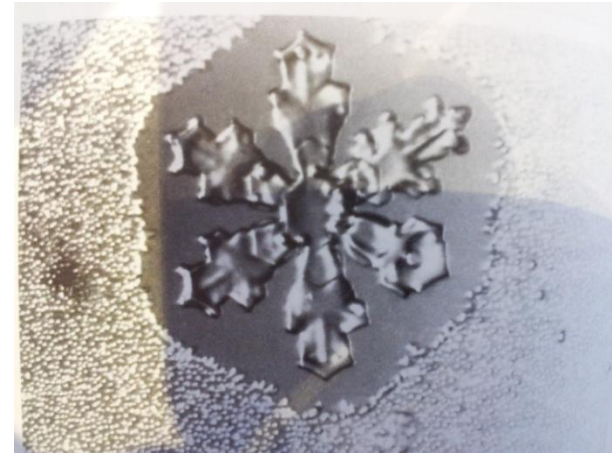
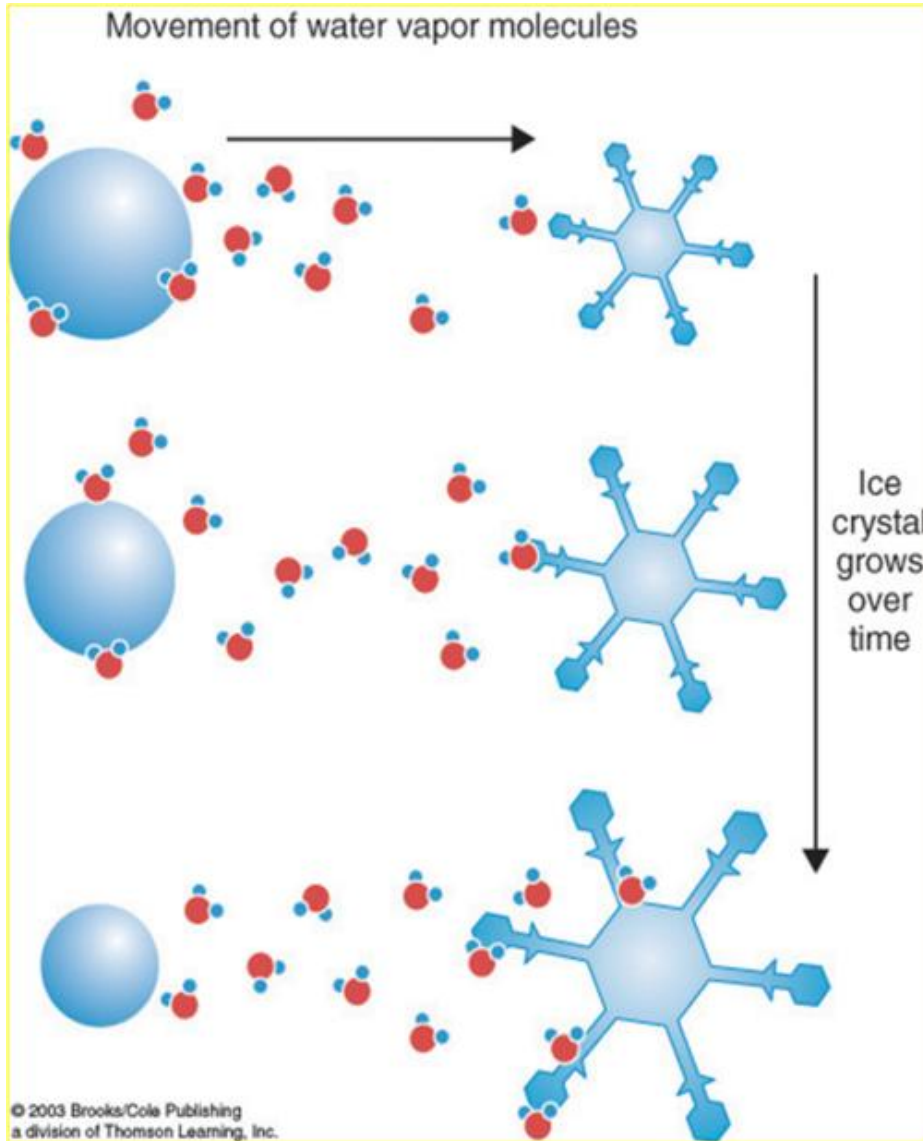
FIG. 9.4. Normalized ice crystal growth rate as a function of temperature. (Adapted from Byers, 1965.)

- Alguns valores de **C**:



Shape	Capacitance	reference
Sphere, diameter D	$C = \frac{1}{2}D$	McDonald(1963) (theoretical)
Thin disk, diameter D	$C = \frac{D}{\pi}$	"
Prolate spheroid: major axis a , minor axis b	$C = A / \ln [(a + A)/b];$ $A = \sqrt{a^2 - b^2}$	"
Circular cylinder: radius a , aspect ratio ϕ	$C = 0.637a(1 + 0.868\phi^{0.76})$	Smythe (1962) (numerical)
Hexagonal columns: half-width a , aspect ratio ϕ	$C = 0.58a(1 + 0.95\phi^{0.75})$	Westbrook et al (2008) (numerical)
6-point bullet rosette: max diameter D_{Max} , aspect ratio of each arm ϕ	$C = 0.4\phi^{0.25}D_{max}$	"
Aggregates, max. diameter D_{max}	$C = \lambda D_{max}$ $\lambda = 0.25 - 0.28$	"
	$C = 0.26D_{max}$	Field et al (2008) (in-situ observations)

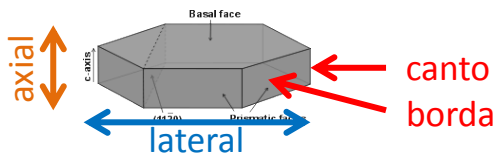
processo de Wegener-Bergeon-Findeisen



Canto cresce

Borda cresce

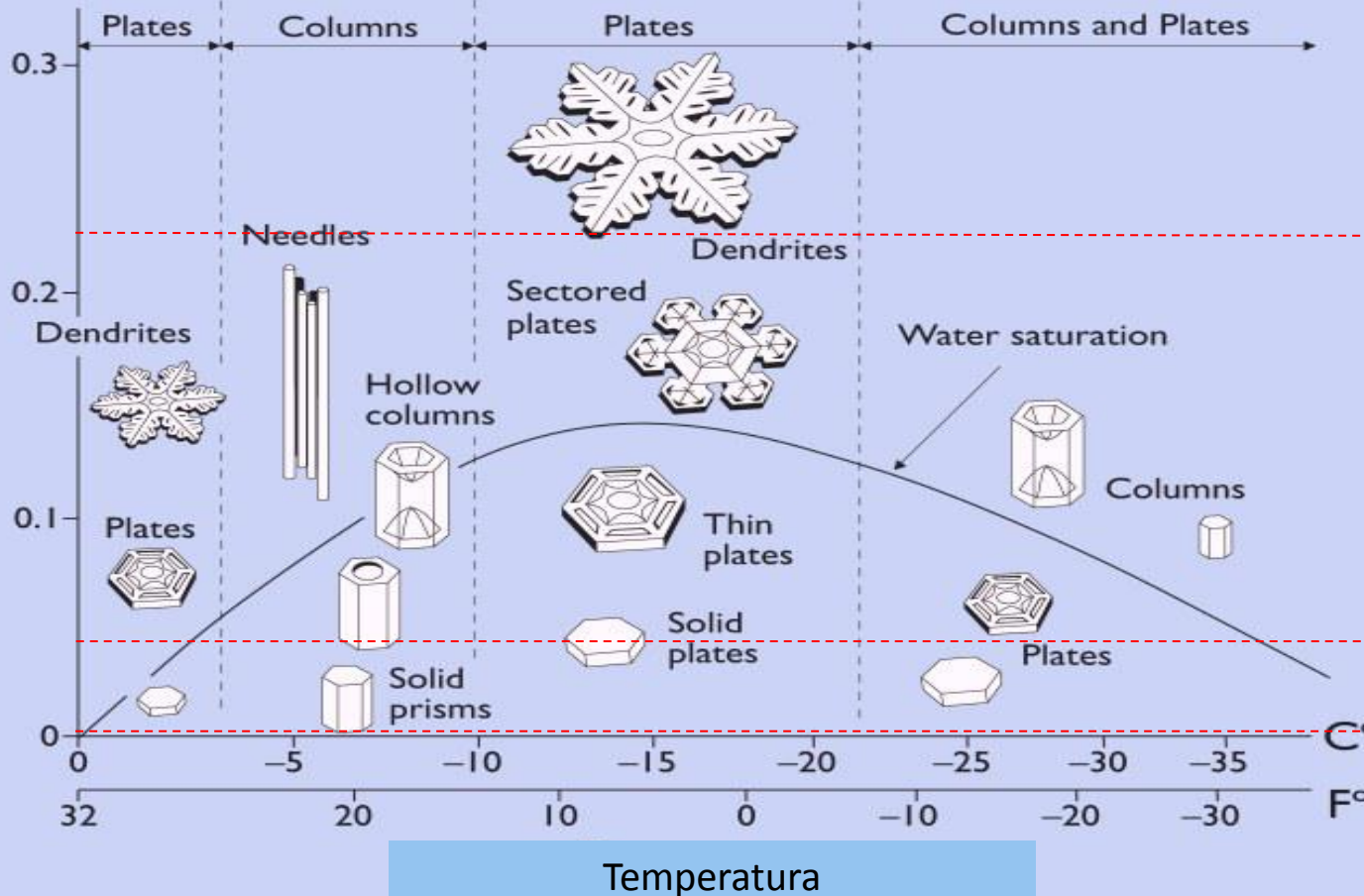
Borda e cantos crescem (quase-equilíbrio)



- A região de crescimento dos pontos do hexágono (face, laterais ou pontas) é determinado pela saturação em relação ao gelo e a temperatura ambiente:

Crescimento: lateral axial lateral axial

Excesso de densidade de vapor em relação ao gelo (gm^{-3})



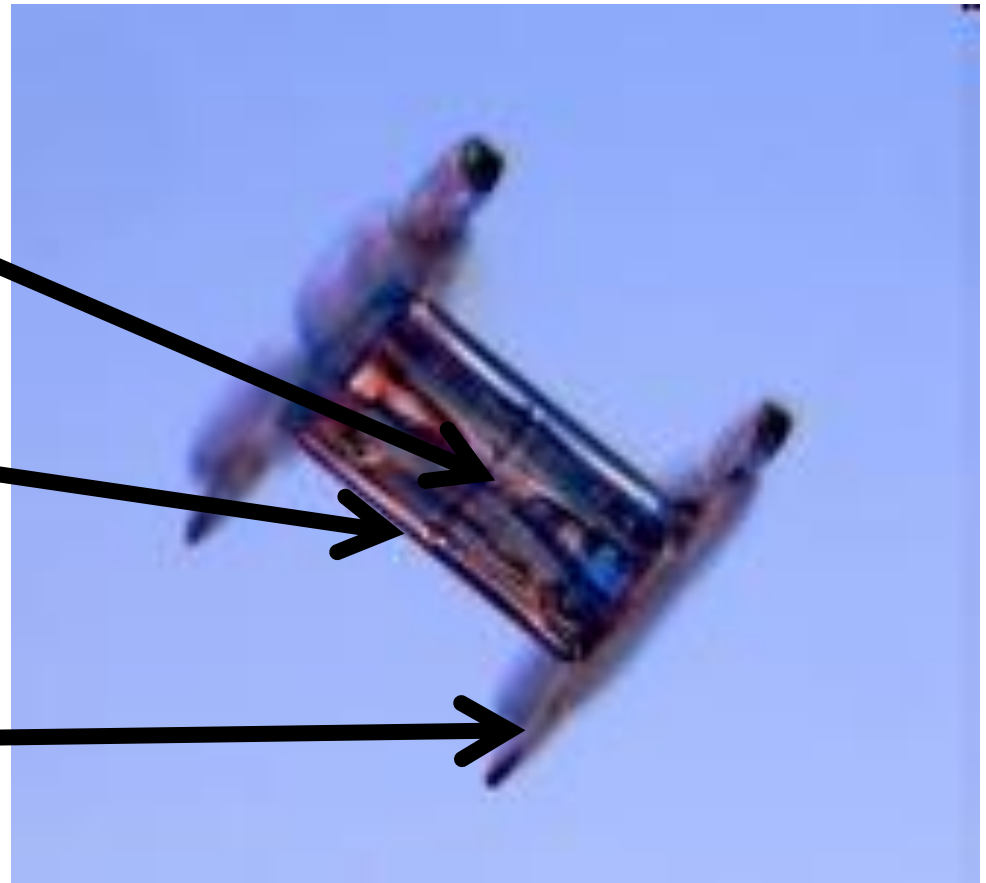
Temperatura

- A mudança da T e S do ambiente determinam o crescimento da face, laterais ou pontas:

Nucleação do gelo
(prato hexagonal)

Crescimento por
deposição facial em
quase-equilíbrio

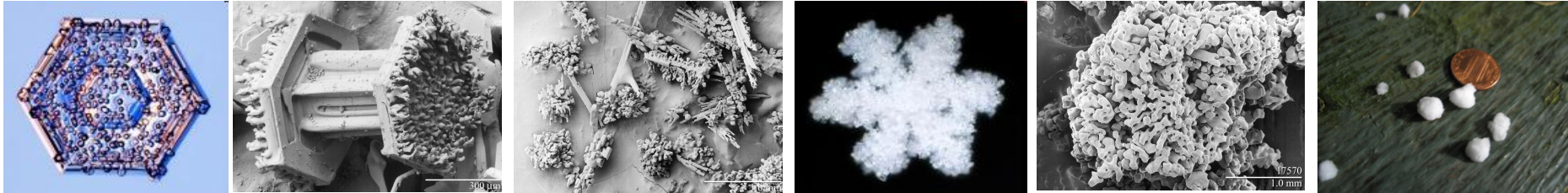
Crescimento por
deposição da lateral pelas
bordas



CRESCIMENTO POR COLISÃO (acresção, *riming* e agregação):

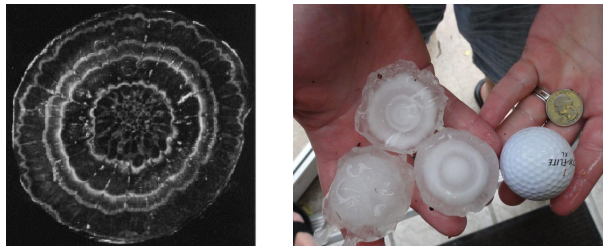
1) RIMING:

- Gotícula de nuvens + cristal de gelo → partículas rimed, graupel



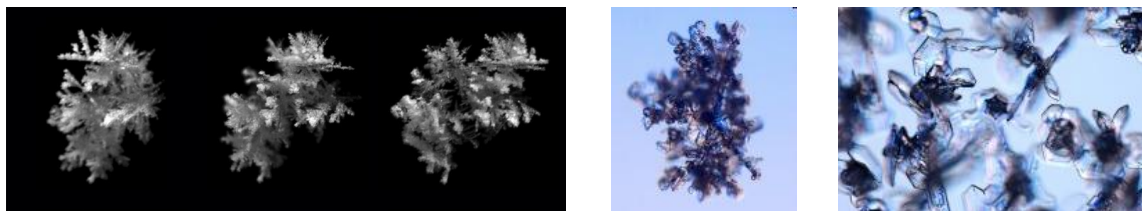
2) ACREÇÃO:

- Gotas de chuva + cristal de gelo (ou graupel) → granizo



3) AGREGAÇÃO

- Cristal de gelo + cristal de gelo → neve



- Tempestade de granizo em Corrientes, Argentina, no dia 08 de outubro de 2017:

**Reportado
granizo de 500g**



- Tempestade de granizo em Corrientes, Argentina, no dia 08 de outubro de 2017:

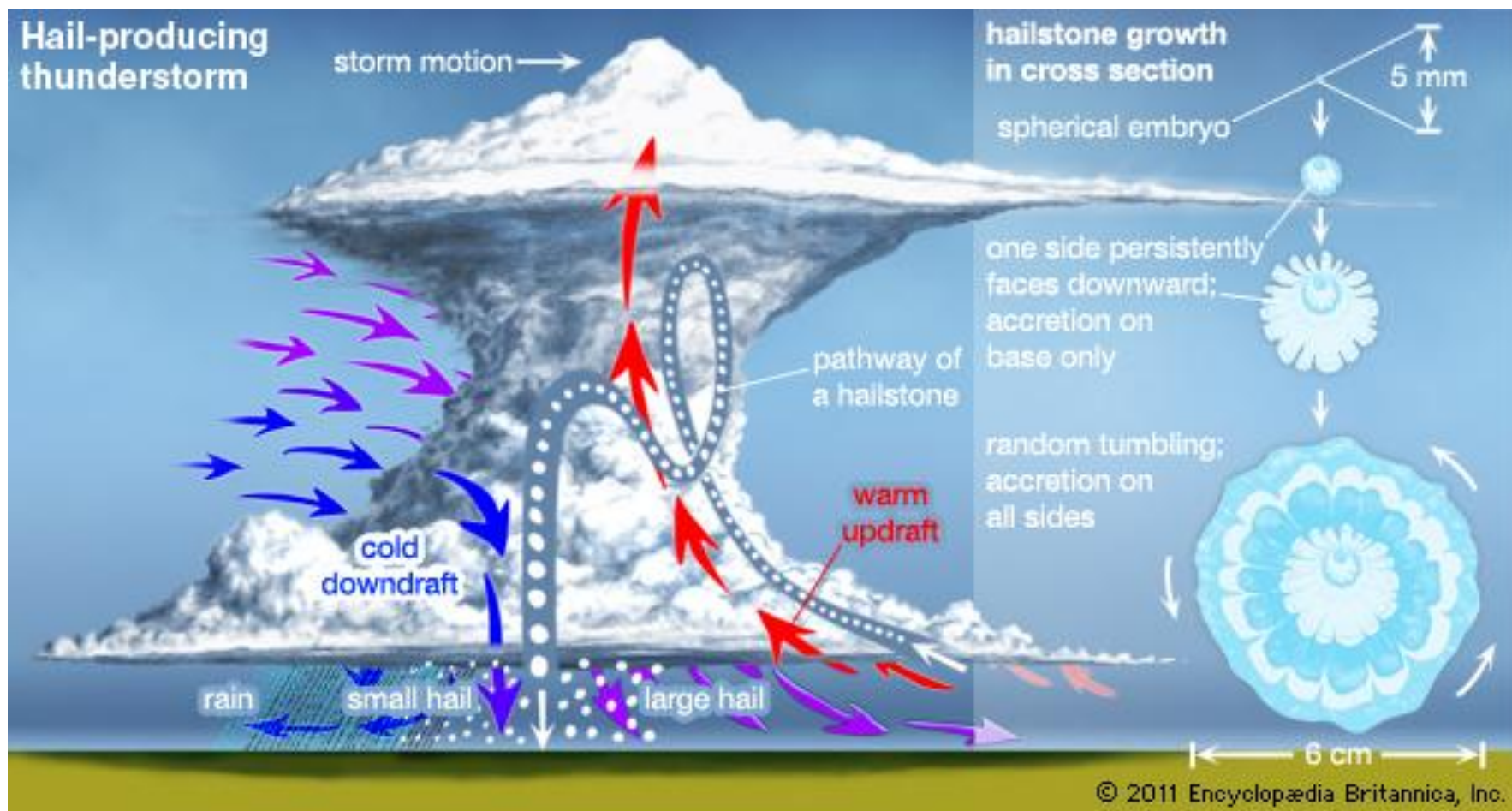


<https://youtu.be/4zoNaeLVR5U>

- Tempestade de granizo em Corrientes, Argentina, no dia 08 de outubro de 2017:



<https://youtu.be/ITdS4HuLXRI>



- Tal como acontece com as gotículas líquidas, partículas de tamanho ou forma diferentes possuem velocidades terminais diferentes.
- A diferença entre as velocidades terminais das partículas de gelo e gotas líquidas é o que garante a colisão e eventual agregação, acreção ou *riming*.
- As partículas de gelo com maior velocidade terminal são, obviamente, os granizos, seguidos do *graupel*, agregados e então cristais puros (*pristine*).
- Estruturas de cristais *agregados* tem velocidade por volta de 1 m/s, e os cristais puros tem velocidades abaixo de 1 m/s.

- Uma fórmula empírica que fornece a velocidade terminal v_T (cm/s) dos *graupel* é:

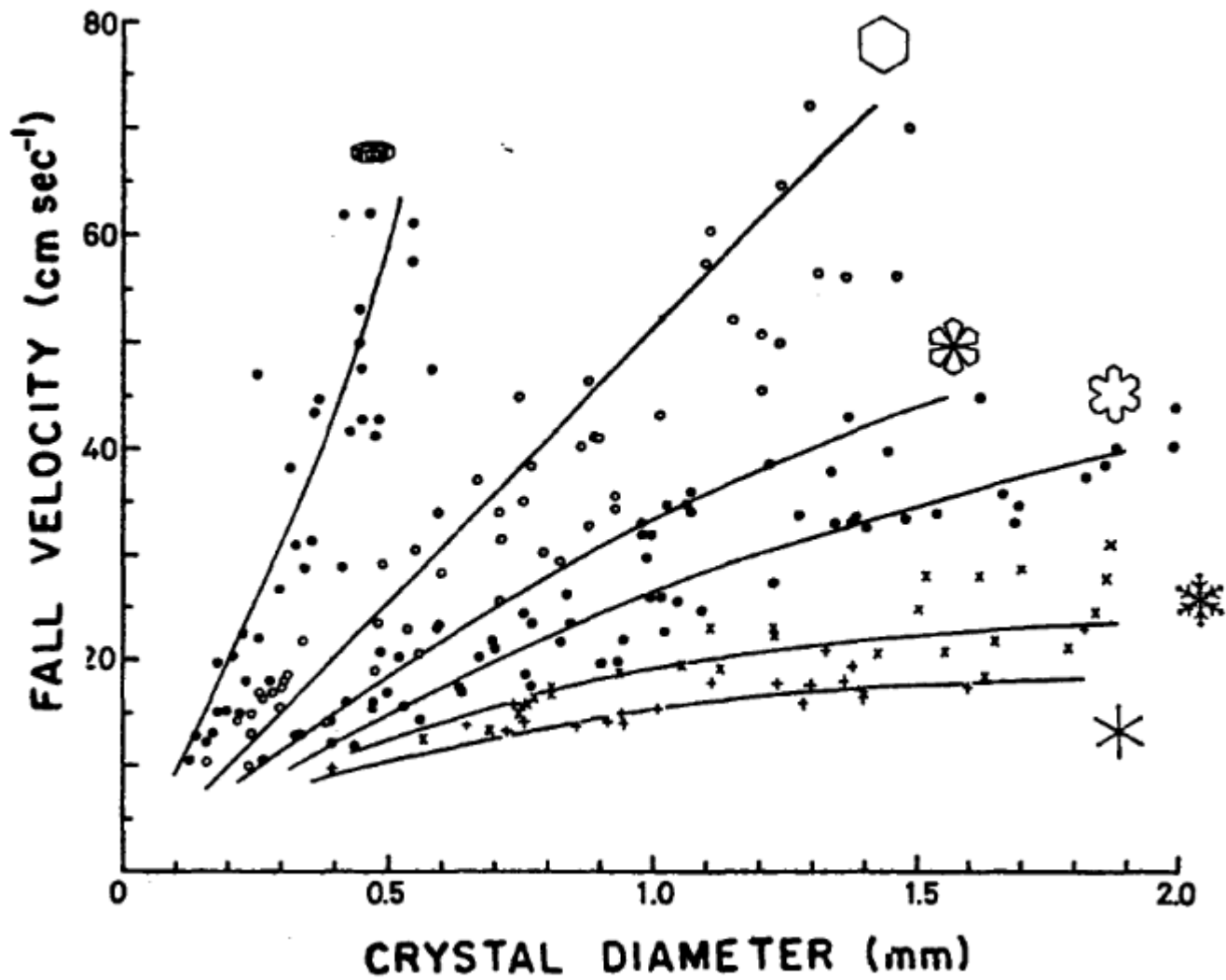
$$v_T = 343 D^{0.6}$$

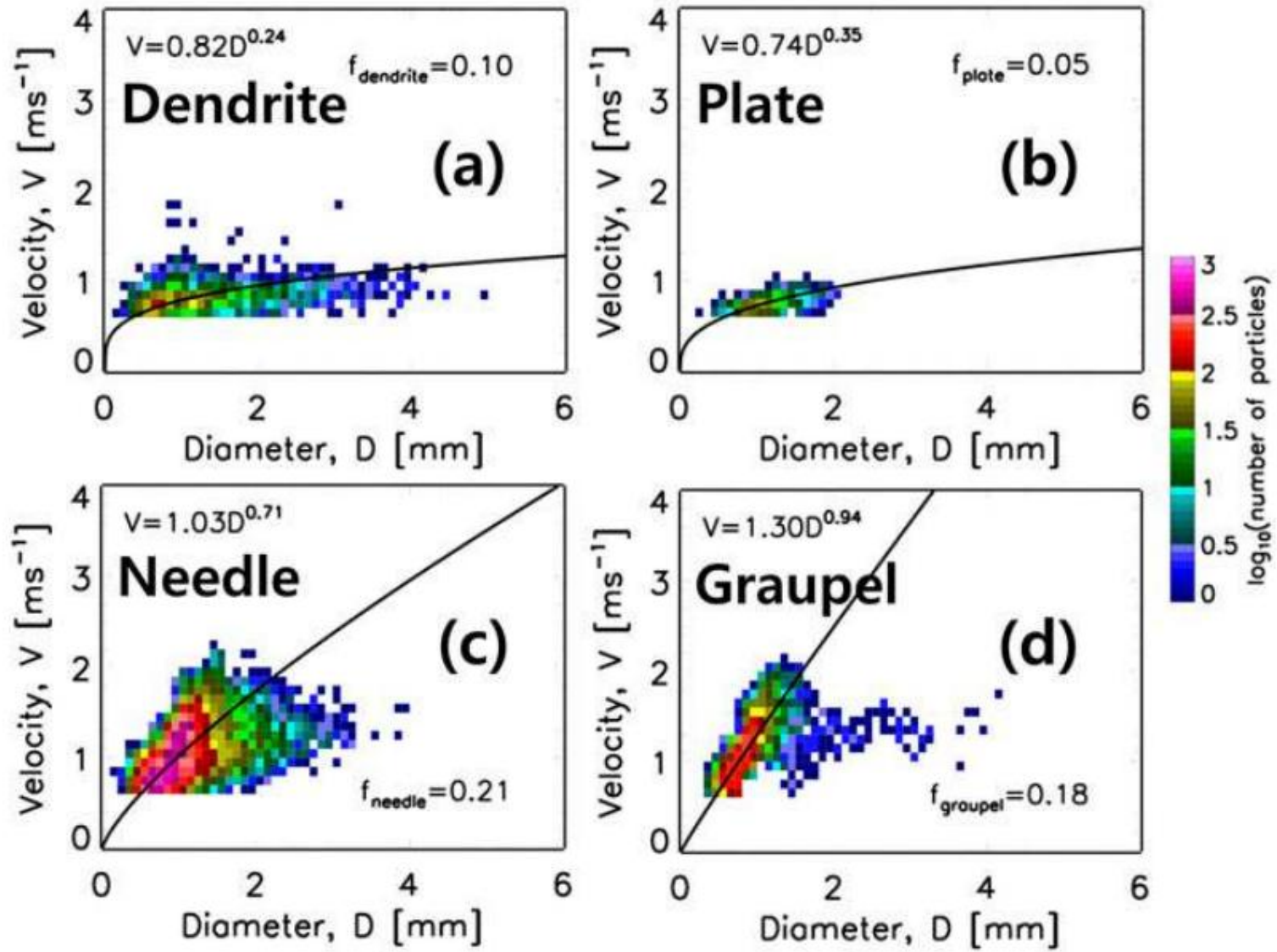
onde D é o diâmetro do granizo em cm.

- Os *flocos de neve* (i.e. *agregados de cristais*) também caem a uma velocidade de ~ 1 m/s se estiverem secos. Quando derretem, eles ficam mais compactos e caem com uma velocidade mais elevada. Uma fórmula para a velocidade terminal (cm/s) de flocos de neve é:

$$v_T = k D^n$$

onde D é o diâmetro derretido em cm, $k \sim 160$ e $n \sim 0,3$ para dendritos, e para gelo em formato de colunas e pratos temos $k \sim 234$ e $n \sim 0,3$.





Lee et al. (2015): Classification of Precipitation Types Using Fall Velocity–Diameter Relationships from 2D-Video Distrometer Measurements - Adv. Atmos. Sci. (<https://doi.org/10.1007/s00376-015-4234-4>)

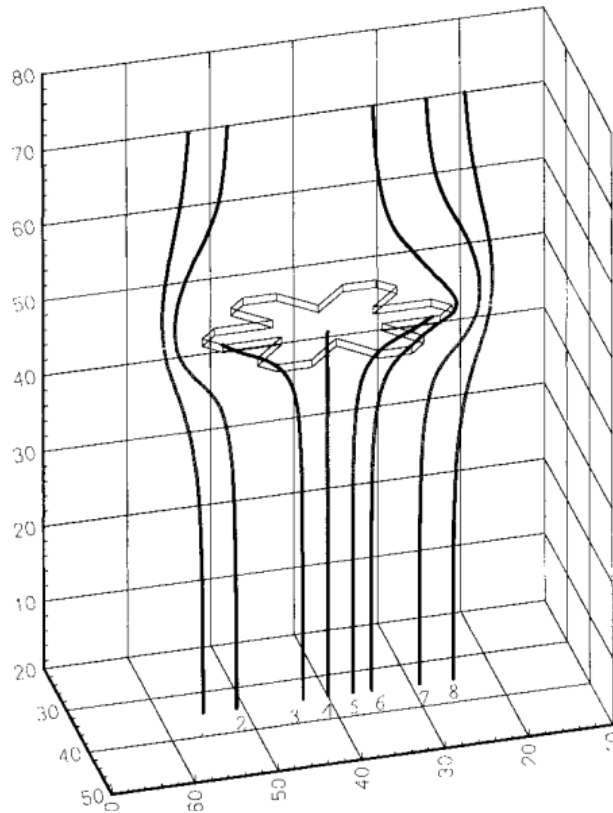
- A massa e o tamanho de diferentes formas de cristais são geralmente da forma:

$$m = aD^b$$

onde ***D*** é a maior dimensão linear do cristal (em cm) e ***m*** é a massa em g.

Tipo de cristal	a	b
Graupel	$6,5 \times 10^{-2}$	3
Prato hexagonal fino	$1,9 \times 10^{-2}$	3
Cristal estrelar	$9,4 \times 10^{-4}$	2
Dendrito plano	$3,8 \times 10^{-4}$	2
Agulha	$2,9 \times 10^{-5}$	1

- A eficiência de coleta nos processos de acreção, *riming* e agregação possuem duas problemáticas:

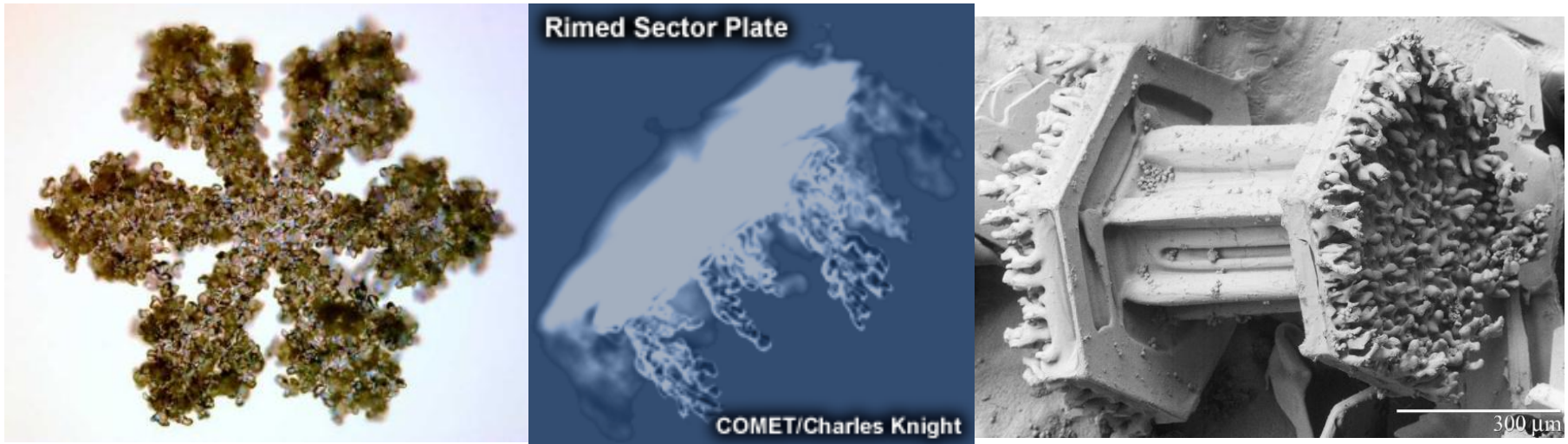


- A aerodinâmica dos cristais
- E se as partículas que colidiram permanecem grudadas

FIG. 2. Trajectories of a droplet of 2 μm in radius moving in the vicinity of a falling broad-branch ice crystal at Re = 10. Trajectories 1, 2, 6, 7, and 8 are misses, and trajectories 3, 4, 5 are hits.

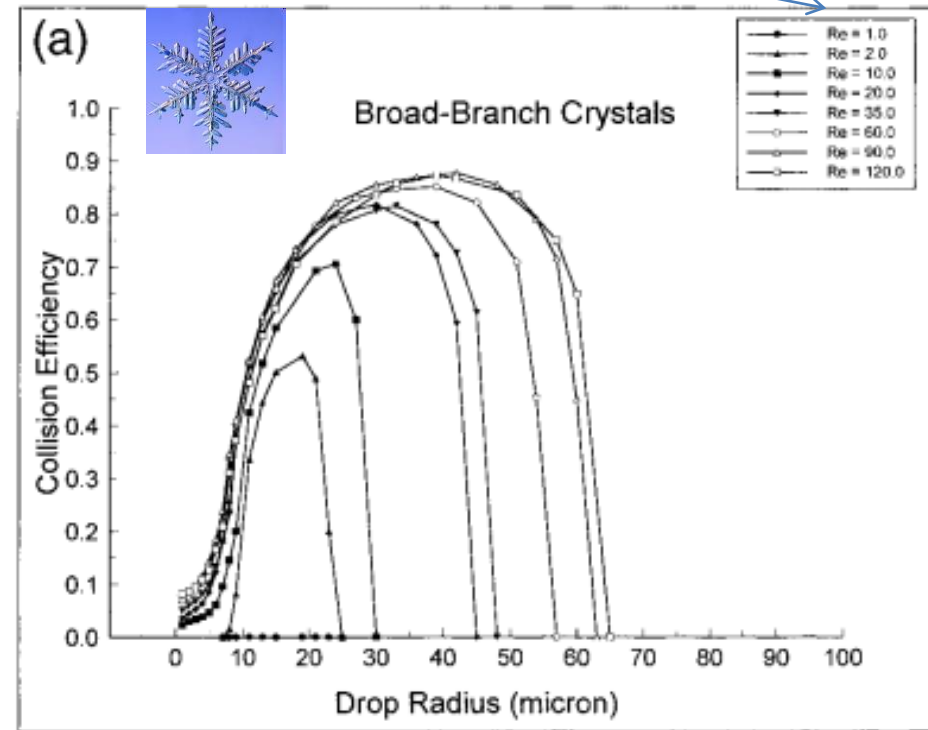
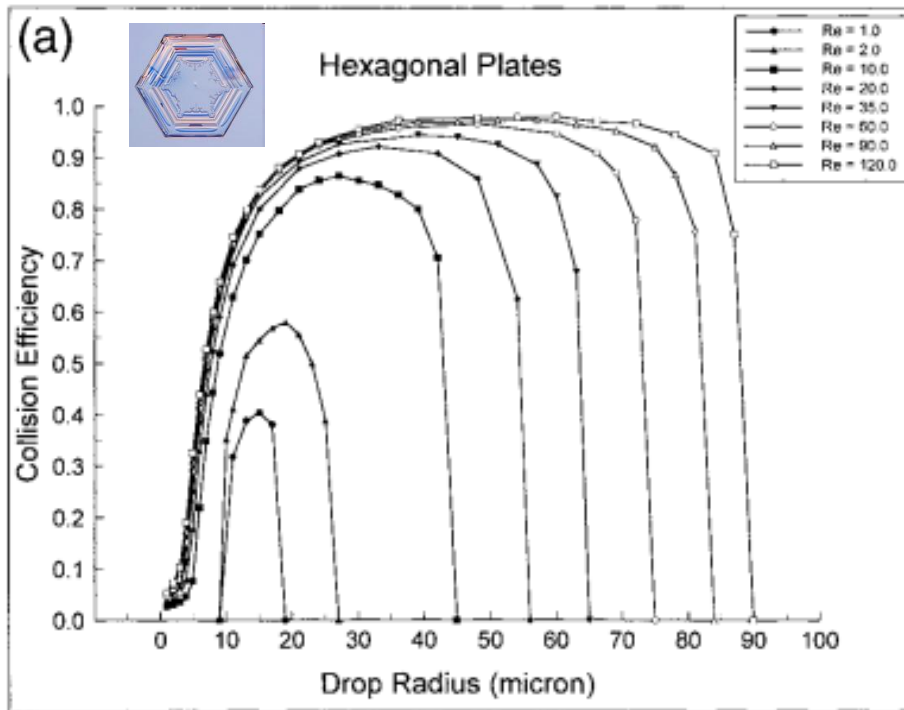
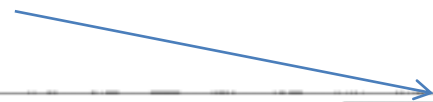
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<1001:CEOICA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<1001:CEOICA>2.0.CO;2)

- Como os cristais de gelo caem a uma velocidade menor que gotículas de nuvem de mesma massa, é razoável assumir que as eficiências de colisão são altas. Porém foi mostrado teoricamente que o **local preferencial de colisão das gotículas com os cristais é em sua área periférica.**



- Eficiência de riming e acreção:

Raio efetivo dos cristais de gelo



[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<1001:CEOICA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<1001:CEOICA>2.0.CO;2)

- Como o congelamento é muito provável que ocorra quando um cristal entra em contato com uma gota superesfriada, a eficiência de coalescência é considerada como unitária.
- No processo de agregação (gelo + gelo), a eficiência de colisão é menos entendida. Há indicações que estruturas como os dendritos tem uma maior propensão a se agudarem durante uma colisão do que cristais de outras formas.
- Independente da forma do cristal, a probabilidade de cristais grudarem durante uma colisão é maior quanto maior a temperatura. Há indícios de que agregação significativa só é possível a temperaturas mais quentes que -10°C .

- Tendo essas incertezas em mente, podemos descrever as equações de crescimento por acreção e agregação analogamente à equação de crescimento por coalescência de gotículas líquidas.
- A **equação de acreção** (gota de chuva + partícula de gelo), que leva à formação de granizo, é descrita como:

$$\frac{dm}{dt} = \overline{E} W \pi R^2 u(R)$$

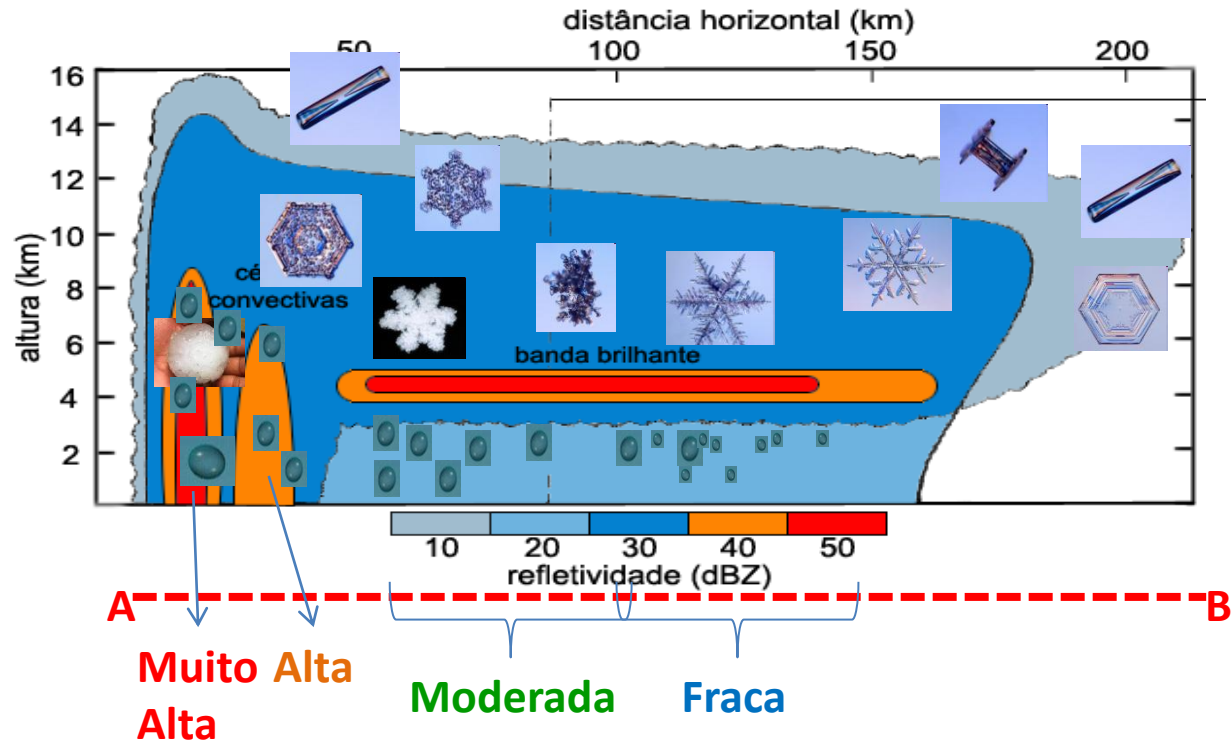
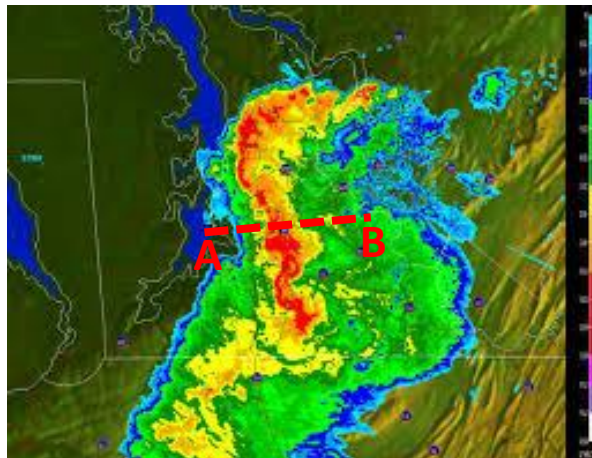
onde ***m*** é a massa da partícula de gelo, ***E*** é a eficiência média de coleta, ***W*** é o conteúdo de água líquida de chuva, ***R*** é o raio da partícula de gelo, e ***u(R)*** é a velocidade terminal da partícula de gelo.

- A **equação de agregação** (partícula de gelo + partícula de gelo) leva em conta que os flocos de neve caem com velocidades de $\sim 1\text{m/s}$ e cristais de gelo da ordem de $0,4\text{-}0,5\text{ m/s}$:

$$\frac{dm}{dt} = \bar{E} W_i \pi R^2 \Delta u$$

onde Δu é a diferença entre as velocidades do floco de neve do cristal de gelo, que é essencialmente constante.

- Resumindo, em sistemas convectivos de mesoescala temos a seguinte distribuição de hidrometeoros e taxa de precipitação:



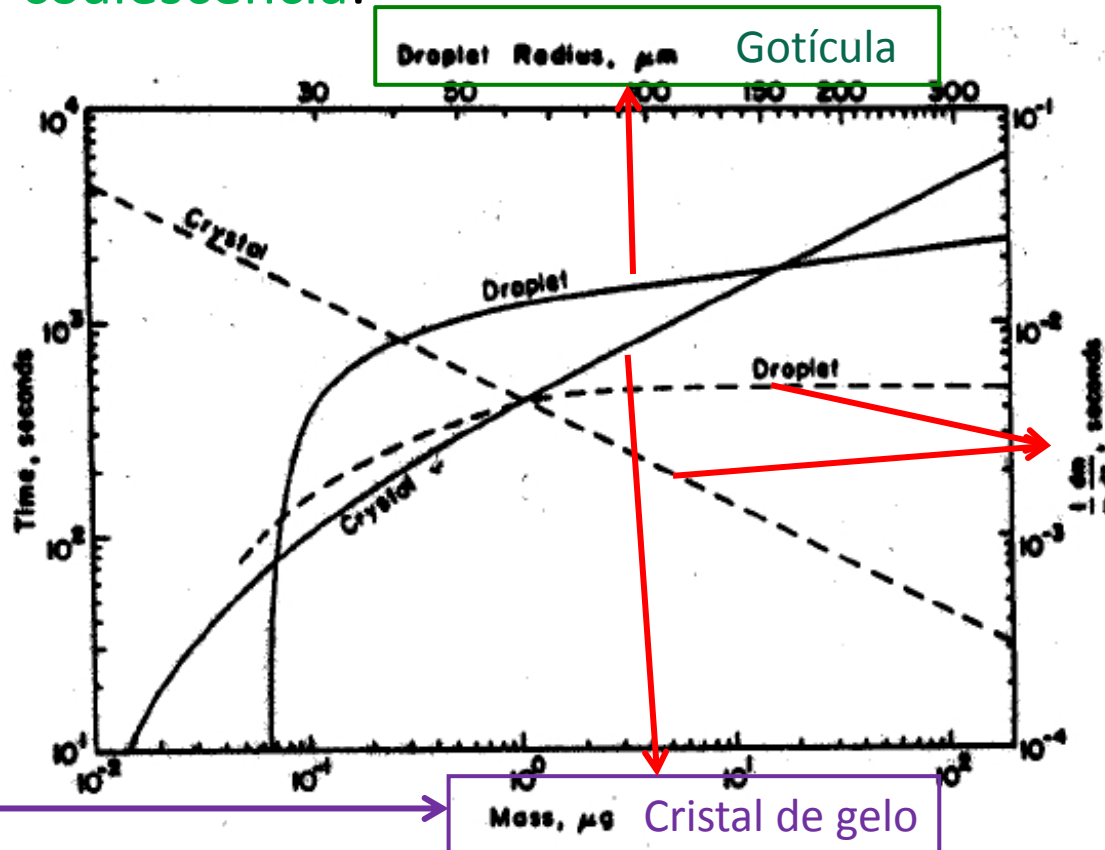
Nuvem quente vs. Nuvem fria:

- Para termos partículas de precipitação de tamanhos apreciáveis em um tempo de aproximadamente 20 minutos, é necessário que haja os processos de agregação e acreção na fase de gelo (nuvem fria), ou que haja um processo eficiente de coalescência na fase quente (nuvem quente).
- A condensação-difusão por si só não explica a formação de partículas com massa maiores do que 1 mg ($r \sim 0,62\text{mm}$) em intervalos de tempo realísticos. Entretanto, esse processo é mais eficiente para cristais de gelo do que para gotas líquidas, porque o vapor dentro da nuvem está geralmente em equilíbrio relativo com a água líquida e então está supersaturado em relação ao gelo (i.e., $e_i < e_s$).

- Parte da precipitação leve e garoa que chega ao solo é proveniente de cristais não-agregados que derreteram antes de atingir o solo.
- Em nuvens quentes, o processo de difusão é tão lento que não consegue nem formar gotas com tamanho de garoa em intervalos de tempo razoáveis; ou seja, coalescência é sempre requerida para formar chuva em nuvens quentes.
- As nuvens cumulus se desenvolvem inicialmente em temperaturas mais quentes que 0°C , onde não há formação de cristais de gelo. Neste estágio o processo de coalescência é dominante na formação da precipitação.
- Mais tarde, se a nuvem se desenvolver verticalmente e atingir temperaturas negativas, haverá a formação de gelo.

- O processo que dominará (coalescência na fase quente ou difusão e/ou acreção/agregação/*riming* na fase fria) depende da temperatura do topo (profundidade) da nuvem, o conteúdo de água líquida dentro da nuvem, e até a concentração de gotículas.
- O processo de coalescência tende a dominar em nuvem com topos relativamente quentes, com alto conteúdo de água e baixa concentração de gotículas (como as nuvens marítimas, por exemplo).

- Eficiência do crescimento por difusão de vapor de cristais de gelo e crescimento de gotículas de nuvem por colisão e coalescência:

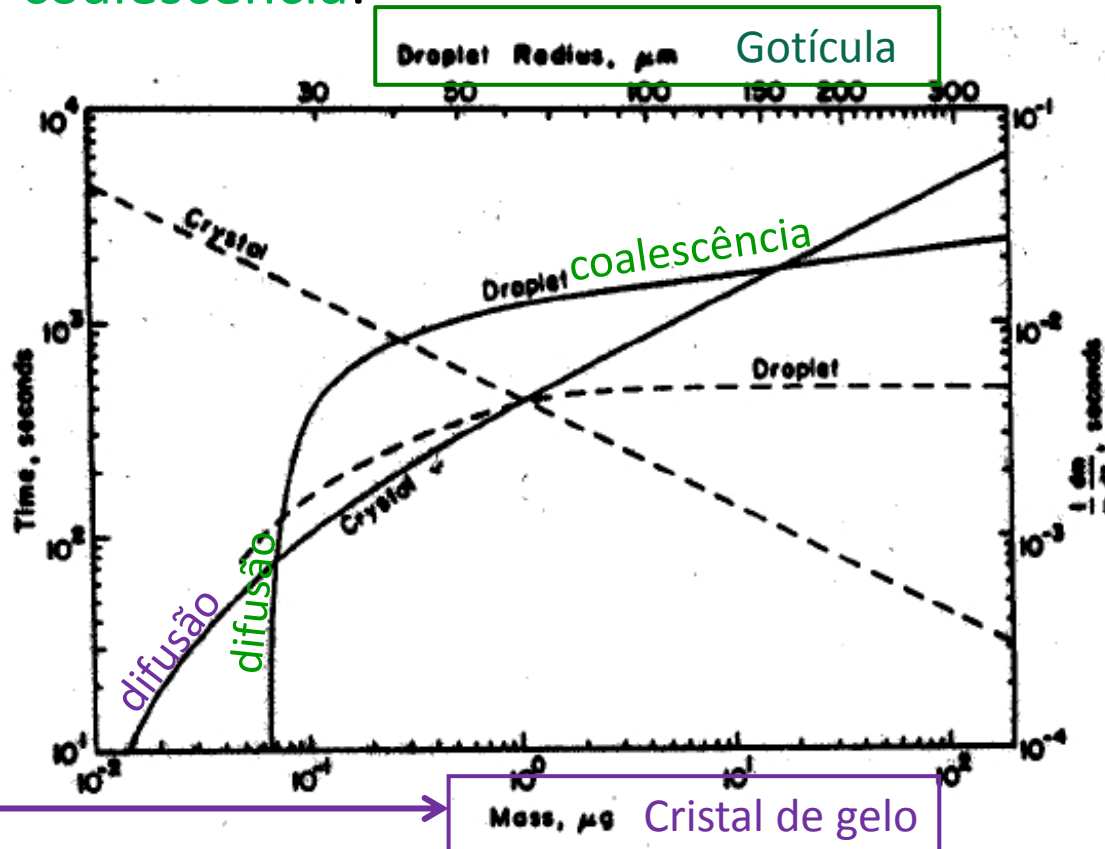


Curva sólida $\rightarrow$ massa p/ cristal, e raio p/ gota

Curva tracejada $\rightarrow$ incremento de massa ($1/m \, dm/dt$) no cristal e gota

FIG. 9.8. Times required for an ice crystal and a water droplet (solid curves) to grow to the indicated mass. Top scale gives the corresponding drop radius. Dashed curves are for the rates of fractional increase of mass, referred to the scale on the right.

- Eficiência do crescimento por **difusão de vapor de cristais de gelo** e crescimento de **gotículas de nuvem por colisão e coalescência**:

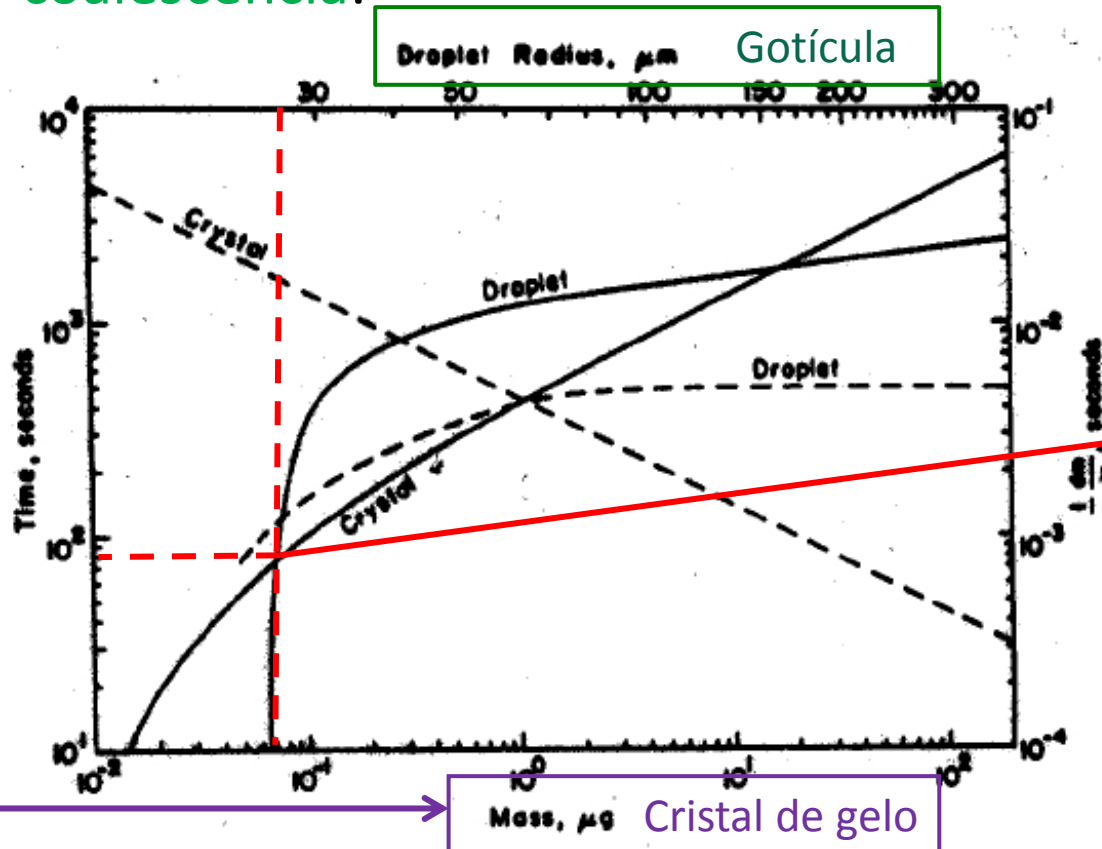


- A gotícula não cresce muito inicial devido à baixa eficiência de coalescência, mas após 500 s passa a crescer rapidamente por coalescência.

- O cristal de gelo cresce constantemente por difusão de vapor.

FIG. 9.8. Times required for an ice crystal and a water droplet (solid curves) to grow to the indicated mass. Top scale gives the corresponding drop radius. Dashed curves are for the rates of fractional increase of mass, referred to the scale on the right.

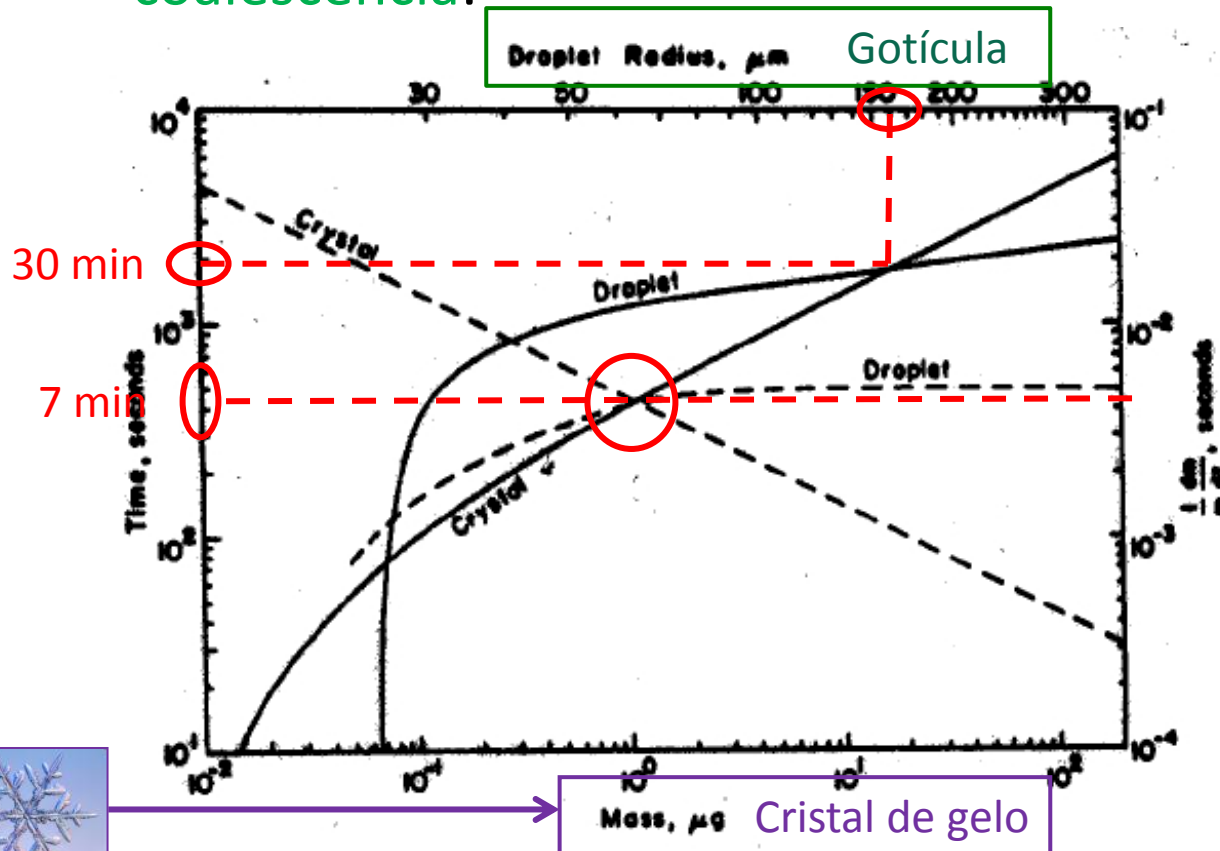
- Eficiência do crescimento por difusão de vapor de cristais de gelo e crescimento de gotículas de nuvem por colisão e coalescência:



- O cristal cresce rapidamente por difusão de vapor e ultrapassa a gota em tamanho em $t \sim 75$ s.
- A gota cresce mais lentamente por coalescência porque a eficiência de coleta é baixa)

FIG. 9.8. Times required for an ice crystal and a water droplet (solid curves) to grow to the indicated mass. Top scale gives the corresponding drop radius. Dashed curves are for the rates of fractional increase of mass, referred to the scale on the right.

- Eficiência do crescimento por difusão de vapor de cristais de gelo e crescimento de gotículas de nuvem por colisão e coalescência:



- Até 7 min, o cristal de gelo cresce relativamente mais rápido do que a gota.
- Neste momento, a gota sofreu colisões suficientes e cresceu, e a eficiência de coleta não é mais pequena.
- A gota só atinge a massa do cristal em $t \sim 30 \text{ min}$, quando ela tem $r \sim 160 \mu\text{m}$.

FIG. 9.8. Times required for an ice crystal and a water droplet (solid curves) to grow to the indicated mass. Top scale gives the corresponding drop radius. Dashed curves are for the rates of fractional increase of mass, referred to the scale on the right.

- Cálculos com modelos numéricos mostram que as condições para iniciar a precipitação tipicamente ocorrem:
 - após 10 minutos do início da fase de gelo
 - enquanto que o ***processo de coalescência demora o dobro do tempo*** para formar precipitação.

- RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS MISTAS (QUENTE E FRIAS):

Crescimento por difusão de vapor, agregação, acreção e *riming*. Multiplicação (fragmentação).

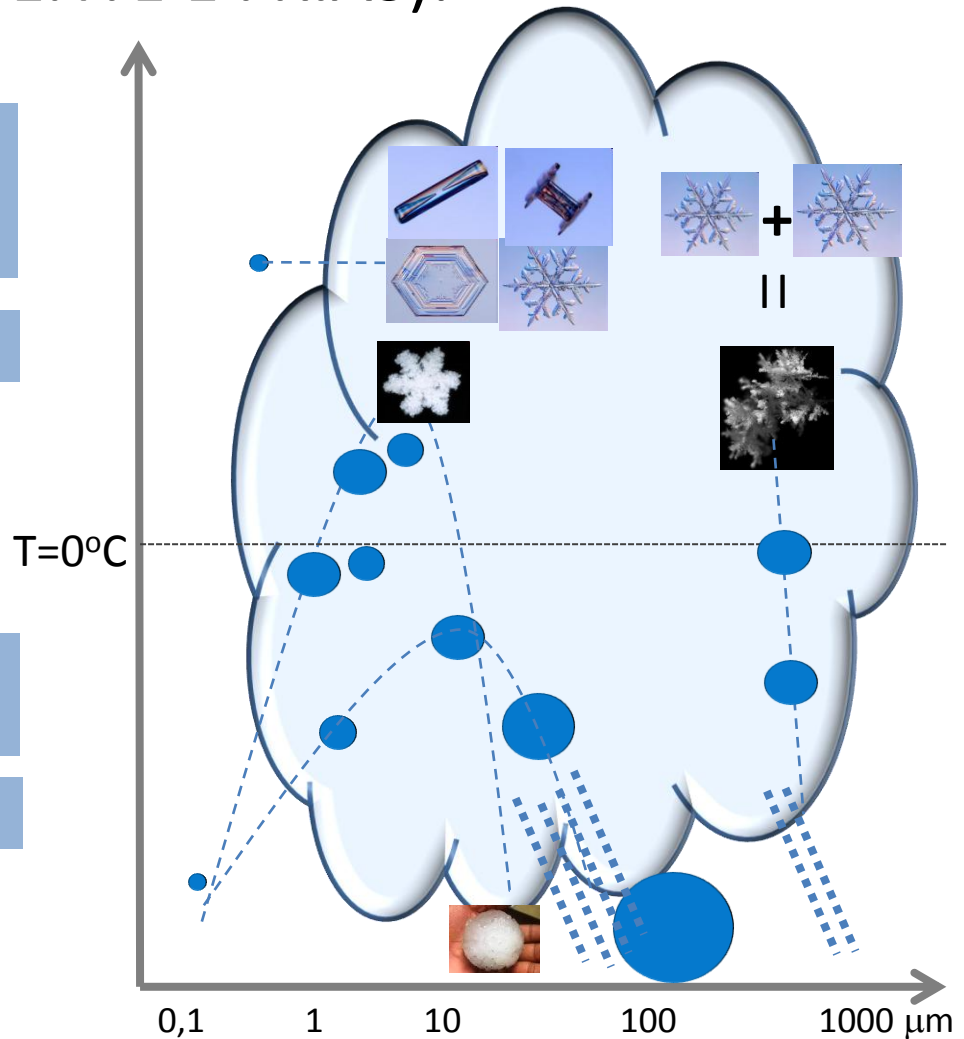
Crescimento por difusão de vapor

Ativação de IN

Crescimento por difusão de vapor e colisão-coalescência

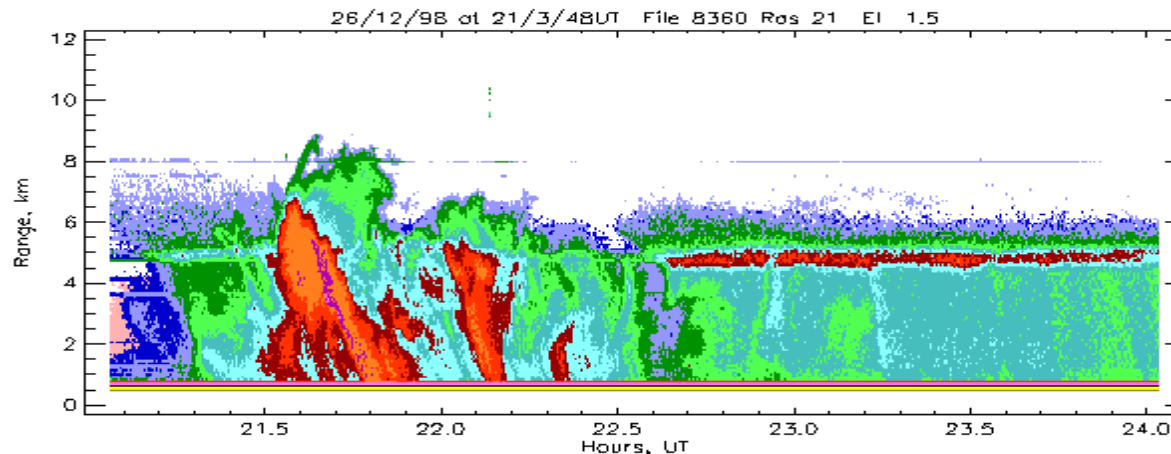
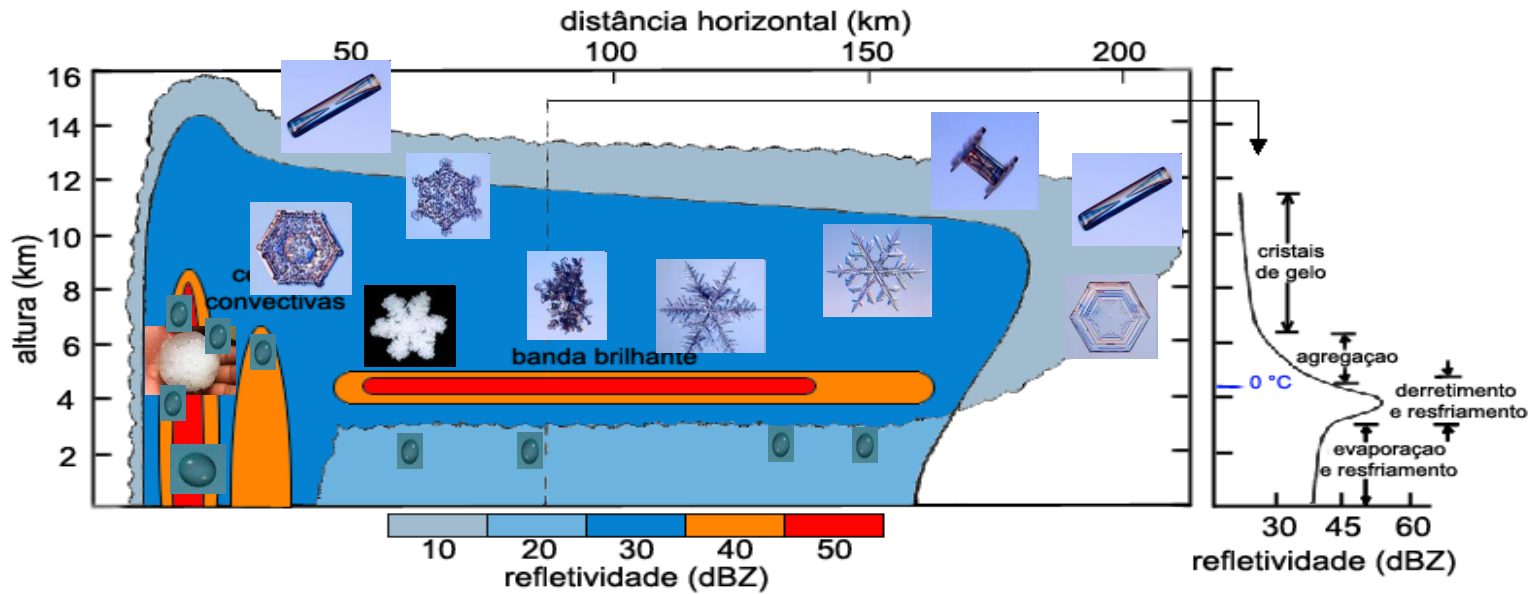
Crescimento por difusão de vapor

Ativação de CCN

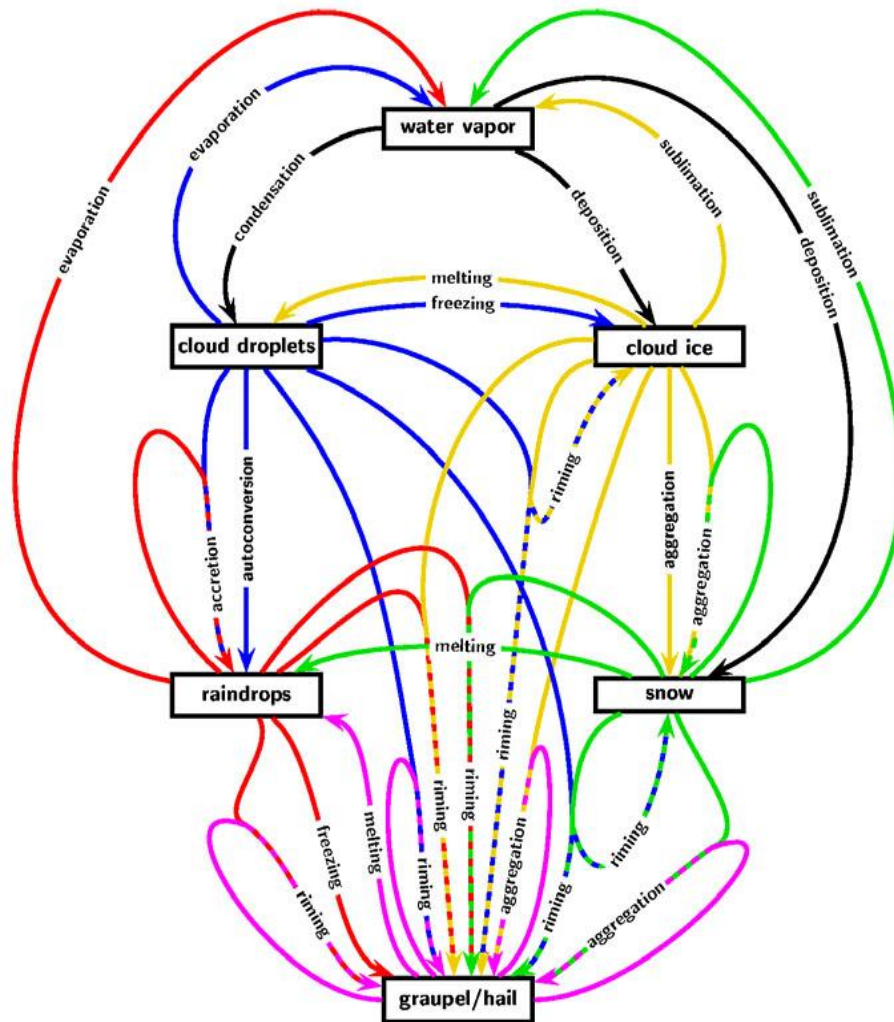


- RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS MISTAS (QUENTE E FRIAS):
 1. Processo de nuvem quente: CCN $\rightarrow$ balanço tensão superficial, composição e tamanho do CCN, e saturação ambiente $\rightarrow$ CCN é ativado ($r > r_c$) $\rightarrow$ Taxa de crescimento depende de ($S = e/e_s$) $\rightarrow$ crescimento parabólico por difusão $\rightarrow$ colisão-coalescência começa a ser eficiente a partir de $r \sim 20 \mu\text{m}$ (melhor quando $r/R \sim 0,6$) $\rightarrow v_T >$ corrente ascendente $\rightarrow$ precipita.
 2. Nuvem atinge níveis com $T < 0^\circ\text{C}$ $\rightarrow$ ativa a fase fria da nuvem.
 3. IN são ativados e forma cristais de gelo, gotículas e gotas permanecem líquidas (superesfriadas).
 4. Colisão cristais + gotículas $\rightarrow$ riming, graupel, fragmentação/multiplicação
 5. Colisão partículas gelo + gotas $\rightarrow$ acreção, granizo, fragmentação/multiplicação
 6. Colisão cristais + cristais $\rightarrow$ flocos de neve, fragmentação/multiplicação
 7. v_T granizo $>$ corr. ascendente $\rightarrow$ precipita granizo
 8. v_T graupel $>$ corr. ascendente $\rightarrow$ derrete e vira gota chuva ou precipita graupel
 9. v_T neve $>$ corr. ascendente $\rightarrow$ derrete e vira gota chuva leve ou garoa

- EXEMPLO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM UM SISTEMA CONVECTIVO DE MESOESCALA:



- RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS MISTAS (QUENTE E FRIAS):



Nucleação de cristais por IN é bem pequena.

Evaporação e condensação de cristais são reguladas pela supersaturação. O crescimento de cristais por difusão de vapor é eficiente.

Riming é coleta de gotículas superesfriadas por cristais.

Acreção é coleta de gotas superesfriadas por precipitação congelada.

Agregação é aglutinação de cristais.

O crescimento por coleta é semelhante ao das gotículas de nuvem.

Multiplicação de gelo é importante para formação de cristais, mas ainda não é bem entendido.

REFERÊNCIAS

- Capítulo 9 - Rogers, R. R. e M. K. Yau (1989): A short course in cloud physics. Third edition. Oxford, UK.. 290 p.p.
- Capítulo 6 - Wallace, J. M. e P. V. Hobbs (2006): Atmospheric Science. Second edition. Academic Press. 504 p.p.
- Imagens cristais de gelo:
<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/> (produzidos em laboratório)
<http://emu.arsusda.gov/snowsite/>
(observados na natureza – Beltsville, MD EUA)