

# MICROFÍSICA DA PRECIPITAÇÃO

Capítulo 1 – Introdução à microestrutura de nuvens e da precipitação

**Prof. OSWALDO MASSAMBANI, Ph.D.**  
**Professor Titular**

**Departamento de Ciências Atmosféricas IAG-USP**  
**massambani@usp.br**  
Maio - Junho de 2006

## Conteúdo

- ❑ **Objetivos**
- ❑ **Introdução à microestrutura de nuvens e da precipitação**
- ❑ **Equilíbrio de fases**
  - Potencial químico do vapor de água no ar úmido
  - Calor latente da mudança de fase
  - A equação de Clausius-Clapeyron
  - A variação da energia livre de Gibbs no processo de nucleação homogênea
- ❑ **Aerossol atmosférico**
  - A variação da energia livre de Helmholtz no processo de nucleação heterogênea
  - O equilíbrio entre gotas de solução aquosa e o ar úmido
  - A nucleação por íons
- ❑ **O processo de difusão de vapor no crescimento e na evaporação de gotículas**
  - O crescimento de uma população de gotículas em nuvens quentes
- ❑ **A interação dinâmica entre as gotículas – O processo de colisão e coalescência**
  - O crescimento de gotas na corrente ascendente
- ❑ **A formação de gelo na atmosfera**
  - O crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor
  - O desenvolvimento da precipitação na fase gelo
- ❑ **Composição química de hidrometeoros**
- ❑ **Microfísica da carga e da eletricidade atmosférica**
- ❑ **O sensoriamento remoto da precipitação**
  - O espectro de tamanho de gotas
  - A taxa de precipitação e os parâmetros integrais e suas variabilidades

## Referências bibliográficas:

Rogers, R.R. and Yau, M. K.  
A short course in cloud physics

Pruppacher, H.R. and Klett, J.D.  
Microphysics of clouds and precipitation

## Objetivo:

Descrever a microestrutura de nuvens e da precipitação, a natureza do aerossol atmosférico, os processos físicos associados à nucleação de hidrometeoros, o processo de difusão de vapor associado à condensação e à evaporação, o crescimento de uma população de gotículas em nuvem e de gotas de chuva, a origem e o crescimento de cristais de gelo e a formação do granizo, a composição química dos hidrometeoros, a microfísica da carga e da eletricidade atmosférica, a distribuição de tamanhos de gotas de chuva e o sensoriamento remoto da precipitação.

## Cap.1 - Uma visão geral da microestrutura da nuvem e da precipitação

A maravilhosa aparência do planeta Terra quando visto a partir do espaço, é dominada pela presença das nuvens e de suas estruturas organizadas na atmosfera.

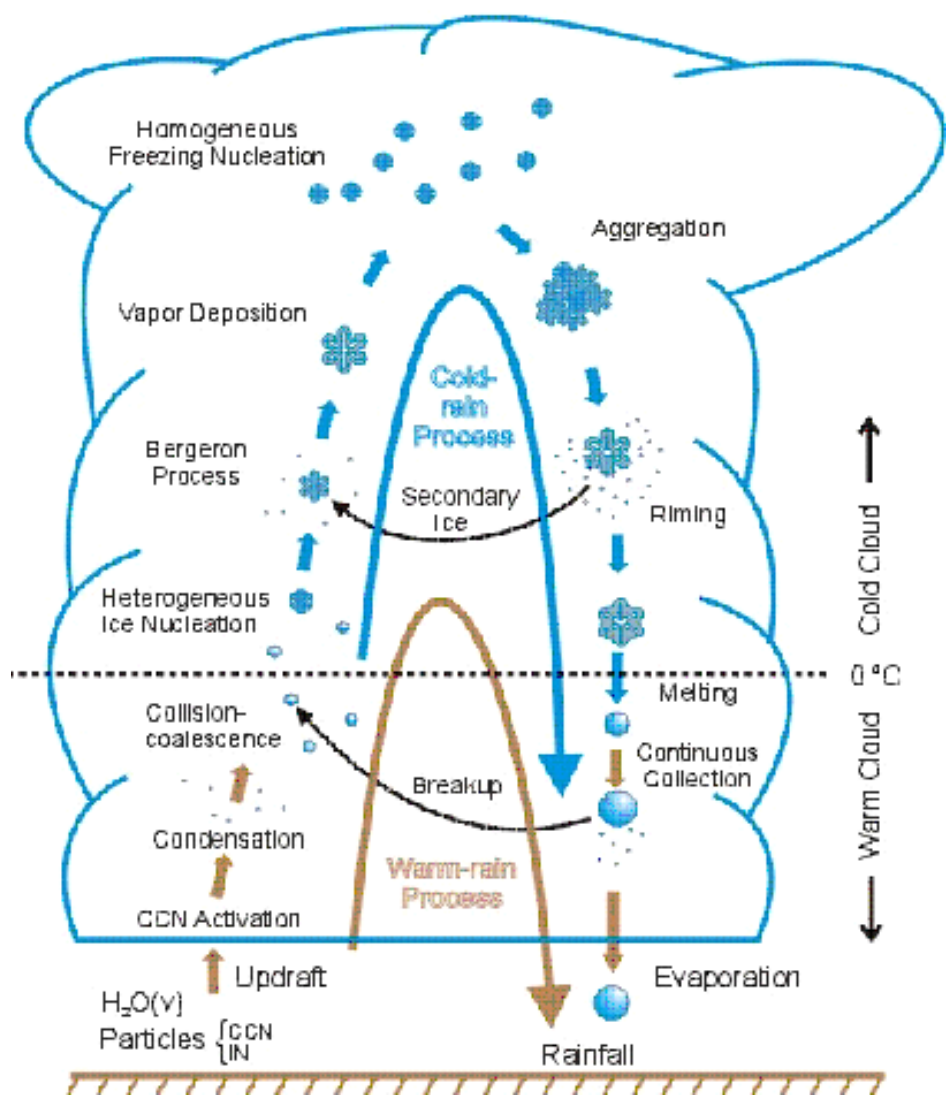
As nuvens existem na atmosfera terrestre como resultado da presença da molécula  $H_2O$ , do aerossol atmosférico e das mudanças de fase do vapor de água, em resposta aos processos termodinâmicos na troposfera terrestre.

No cerne do conhecimento associado à microfísica da precipitação está a microestrutura das partículas que compõem o ar úmido presente nas camadas inferiores da troposfera, a física da formação de gotículas e cristais de gelo, seu crescimento e interação.

Como resultado da variabilidade espaço-temporal dos processos dinâmicos na troposfera, observa-se a formação da nuvem e da precipitação, através de um amplo espectro de tamanhos de hidrometeoros com suas variadas propriedades e efeitos físico-químicos e elétricos.

A utilização das tecnologias e técnicas de sensoriamento remoto da nuvem e da precipitação, em particular do radar meteorológico, proporciona uma grande fonte de investigação de seus processos físicos e dinâmicos, bem como, de suas múltiplas aplicações hidrometeorológicas.

## Processos



## Escalas

### MESOSCALE

- Thermodynamic Forcing
- Supersaturation Development
- Water Budget

### CLOUD SCALE

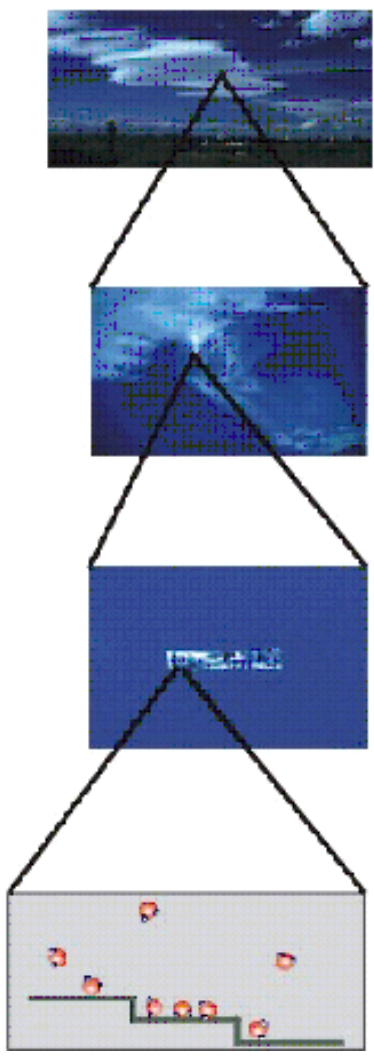
- Ice Water Content
- Vapor Depletion
- Interstitial Supersaturation

### PARTICLE SCALE

- Vapor Diffusion
- Mass Growth
- Habit

### MOLECULAR SCALE

- Surface Kinetics
- Condensation Coefficient



## Processos associados com a condensação e a evaporação

As moléculas de água estão constantemente saindo e retornando à superfície de água líquida.

**EVAPORAÇÃO:** Mais moléculas deixam a superfície do que as que adentram à superfície

**CONDENSAÇÃO:** Mais moléculas adentram à superfície líquida do que as que deixam a superfície.

**PRESSÃO DE VAPOR:** Pressão exercida pelo vapor de água contra a superfície de água líquida.



**A taxa na qual as moléculas de vapor chegam à superfície de água líquida depende da:**

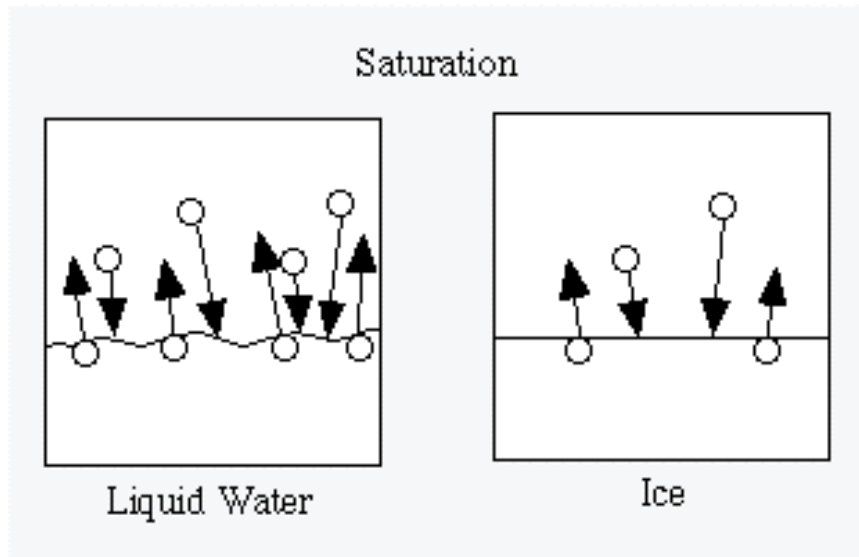
1. Pressão de vapor de saturação, a qual determina a taxa na qual as moléculas de água chegam à superfície da água.
2. A fase da água: as moléculas escapam mais facilmente das superfícies líquidas do que das superfícies sólidas.
3. Temperatura da interface: temperaturas elevadas = elevada energia molecular, mais escape da superfície
4. Forma da interface: mais moléculas escapam se a superfície for muito curva (pequena superfície) de líquido ou gelo
5. A pureza da interface: substâncias estranhas (p.ex., sal) diminuem o número de moléculas que escapam.

## A Pressão de vapor de saturação ( $e_s$ )

Definição:

É a pressão de vapor na qual o vapor de água está em equilíbrio (evaporação = condensação) numa interface plana de água pura, numa dada temperatura.

Essa pressão é mais baixa para uma interface plana de gelo



Moléculas escapam mais facilmente da superfície líquida.

Menor  $e_s$  sobre o gelo.

## A temperatura

A temperatura da água é muito importante:

Mais quente: moléculas vibram excitadamente e escapam da gotícula (evaporam)

Mais fria: Moléculas vibram mais lentamente, poucas escapam da gotícula.

A pressão de vapor de saturação é mais alta para temperaturas mais altas da água e do ar.

## O efeito da curvatura da interface

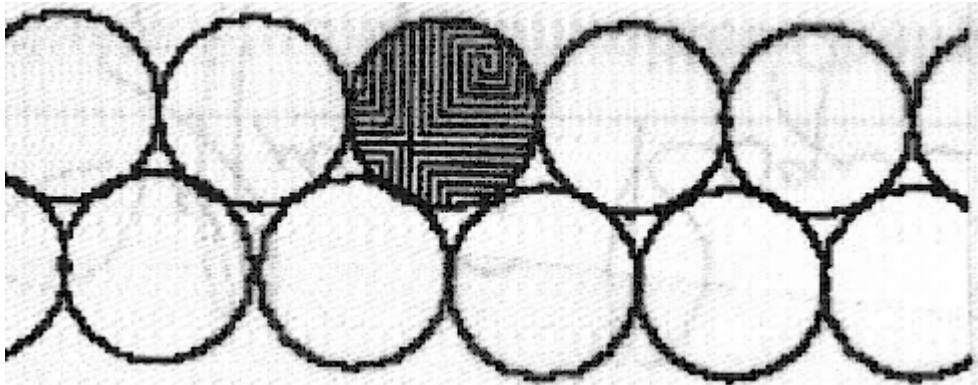
Depende do tamanho da gotícula: gotículas maiores são mais planas”.

Gotas grandes: cada molécula de água atrai sua vizinha criando a “tensão superficial” que mantém as molécula juntas, resistindo à evaporação.

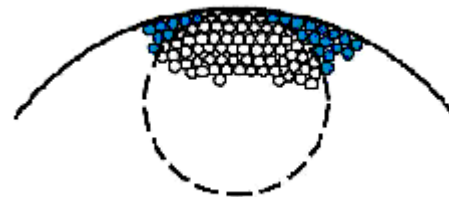
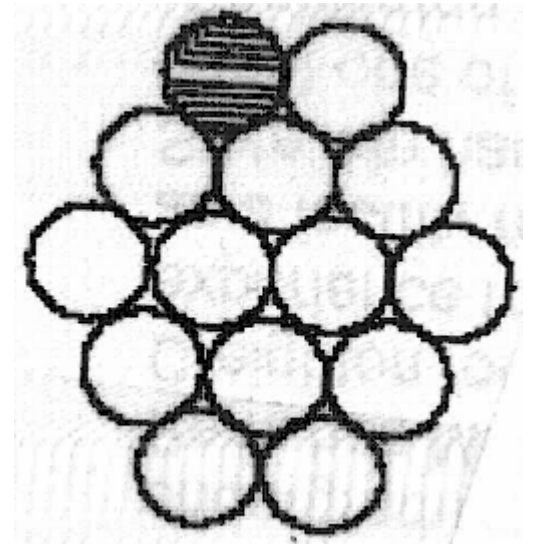
Gotas pequenas: a superfície expõe moléculas mais facilmente para o ar, promove evaporação e reduz a tensão superficial nas gotículas.

Maior curvatura requer maiores supersaturações para produzir condensação.

Superfície plana de água: cada molécula é mantida perfeitamente presa pelas suas vizinhas



Na superfície da gota, as moléculas estão mais expostas



Efeito da curvatura – interpretação molecular

## Efeito do soluto (a salinidade da gotícula)

As partículas de sal são “higroscópicas”, possuem afinidade com a água.

Elas atraem água do ar com umidade relativa tão baixa quanto 75%.

Quando uma gotícula com sal é formada, ela possui mais benefícios:

- O sal adiciona massa à água.
- O sal ocupa espaços expostos ao ar que teria sido ocupado por moléculas de água, expondo menos moléculas de água para o ar.
- Promove condensação em baixas umidades.

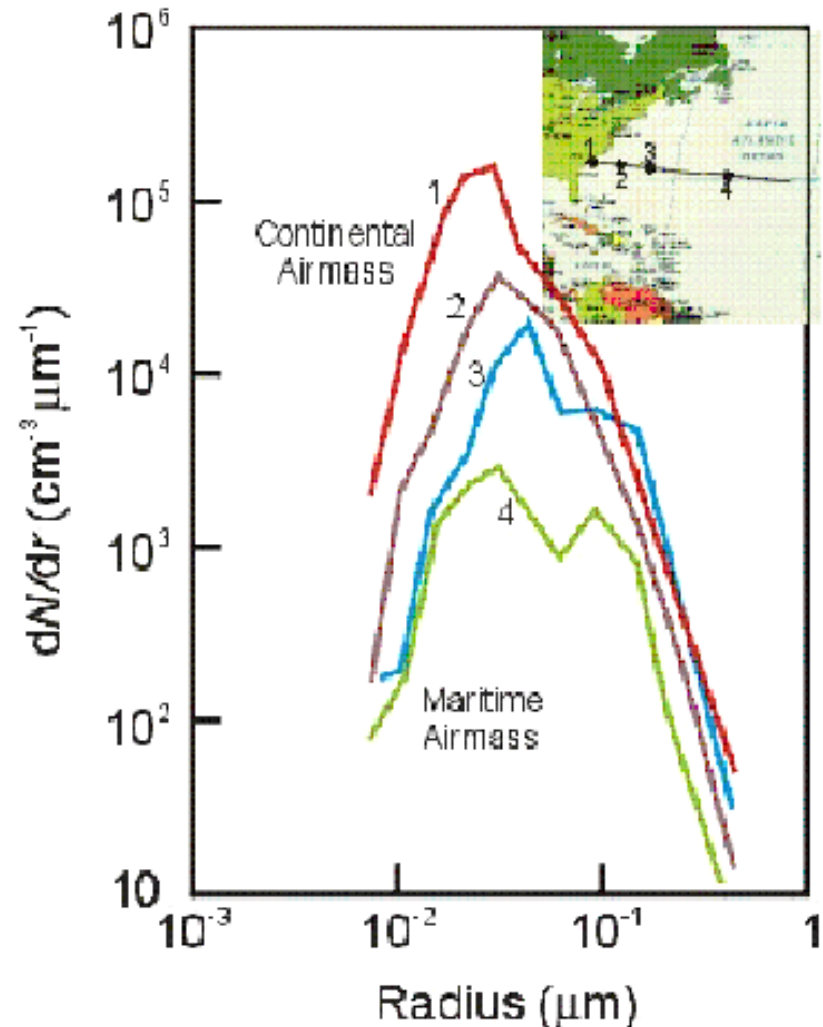
## Distribuição geográfica do aerossol

A grande extensão dos oceanos promovem uma enorme produção do aerossol marinho na formação das gotículas:

1000 cm<sup>-3</sup> sobre os oceanos  
10.000 cm<sup>-3</sup> sobre os continentes; 100.000 cm<sup>-3</sup> nos centros urbanos

Se a Terra tivesse menos sal, a umidade seria muito mais alta e seria mais difícil produzir precipitação.

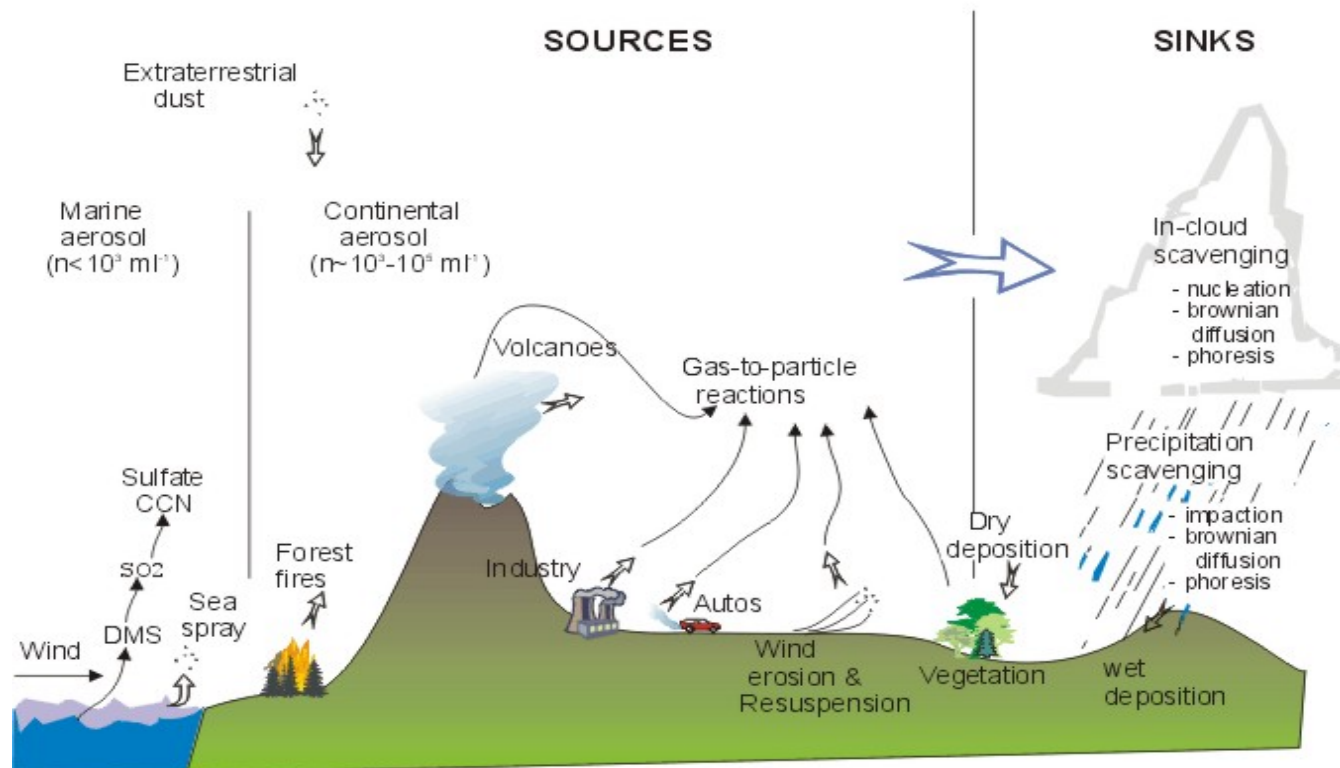
Se não existisse o aerossol, as gotículas seriam formadas através da nucleação homogênea a umidade relativa de cerca de 300-400%.



As fontes de CCN (“cloud condensation nuclei”) são:

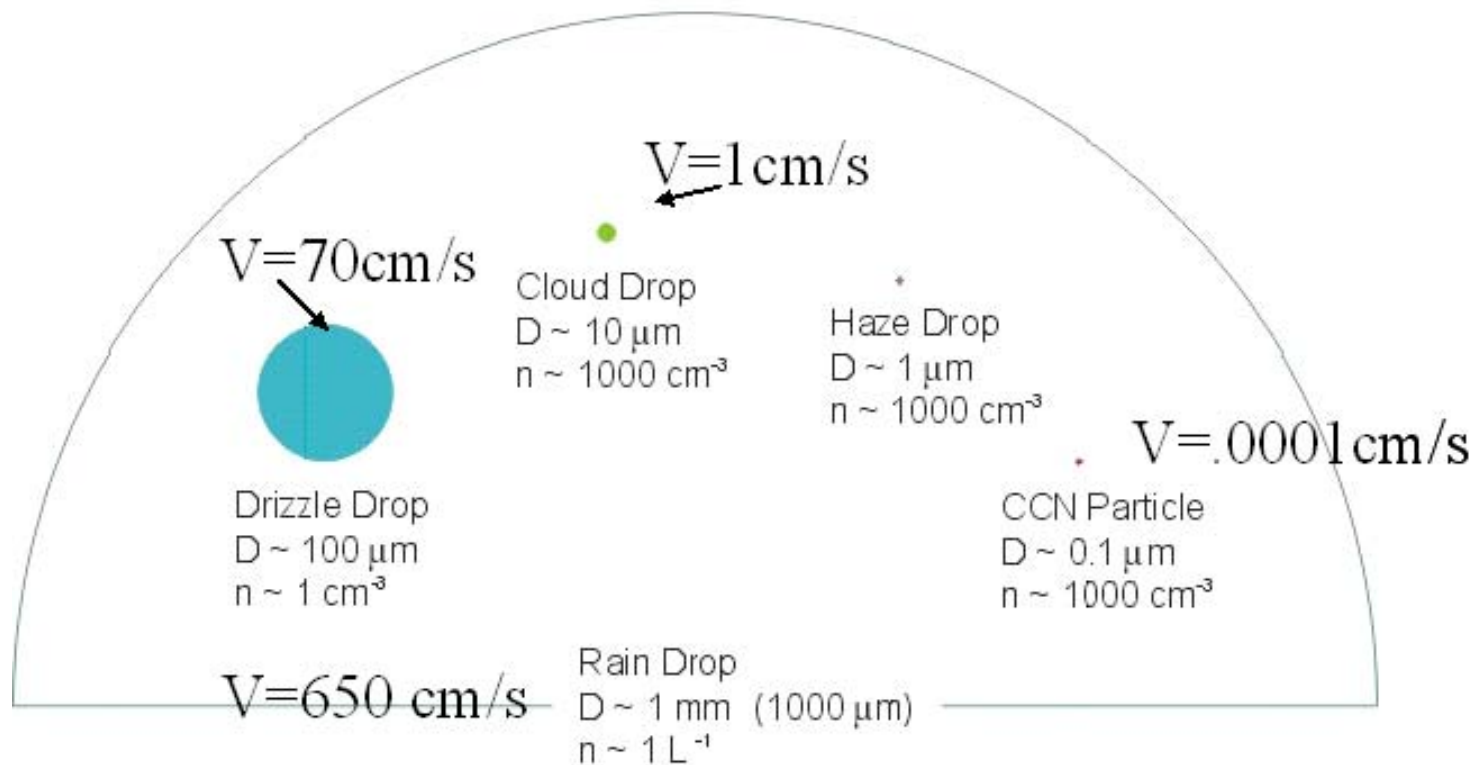
Sal, poeira, vulcões, incêndios, partículas de SO<sub>3</sub> oriundas do fitoplâncton, partículas biogênicas, transformações gas-partículas, ...

## ATMOSPHERIC AEROSOL





## Os tamanhos relativos das gotículas de nuvem e de chuva



## O crescimento da gotícula de nuvem e de chuva

- (a) condensação
- (b) Colisão e coalescência
- (c) As 3-fases – o processo de Bergeron

Crescimento por condensação:

Combina os efeitos do soluto e da curvatura.

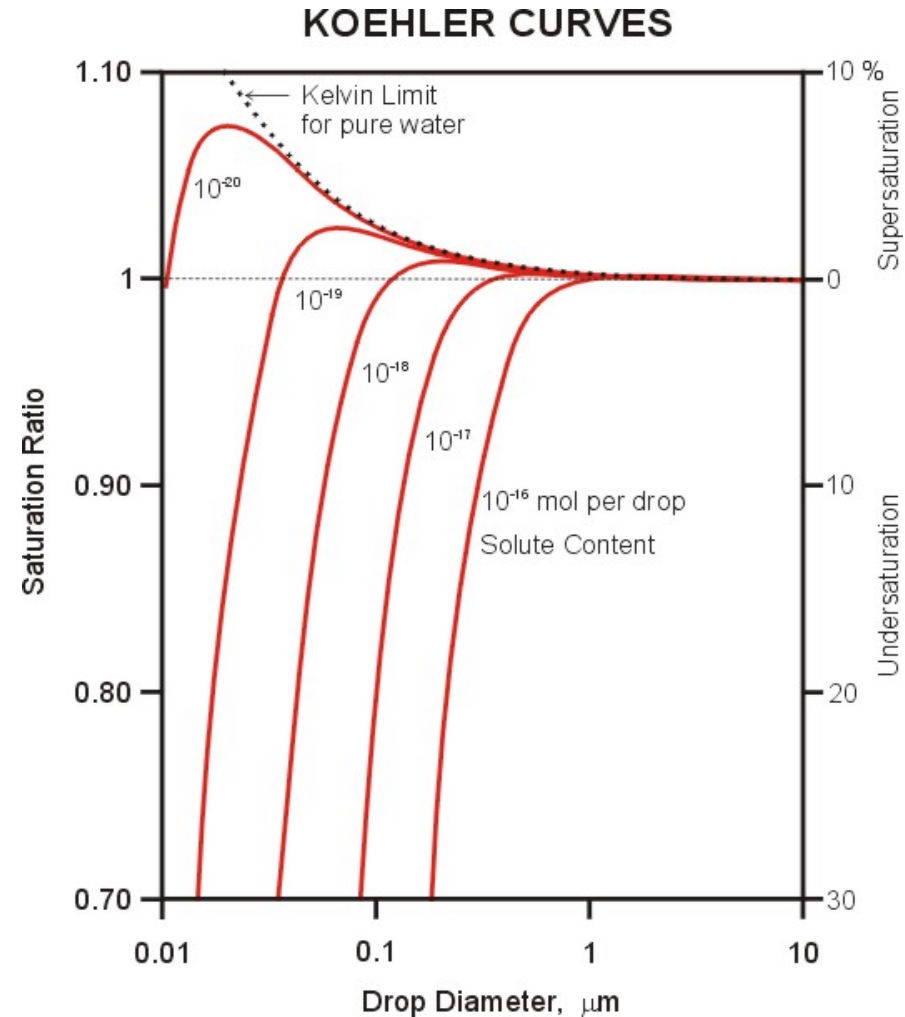
Inicialmente domina o efeito do soluto, crescendo pequenas gotículas a baixas umidades e abaixo da saturação. As gotículas começam a crescer com o domínio do efeito de curvatura. Quando as gotas são muito grandes (superfície plana), nenhum processo predomina. “

## Curvas de Koehler e o crescimento de gotículas

Curvas de Koehler ilustram o crescimento resultante entre a curvatura e a salinidade.

Quanto tempo leva para uma gotícula de raio  $1\mu\text{m}$  crescer até:

- $10\mu\text{m}$  : cerca de 8 a 30 minutos
- $20\mu\text{m}$  : 30 min a 2 horas - muito lento!!
- $30\mu\text{m}$  : 75 min a cerca de 5 horas – não acontece!



**A velocidade terminal** - Com que velocidade as gotas caem?

- Quanto mais pesada a gota, mais rápido ela cai.
- Quando a força gravitacional é balanceada pela resistência do ar, é atingida a Velocidade Terminal.

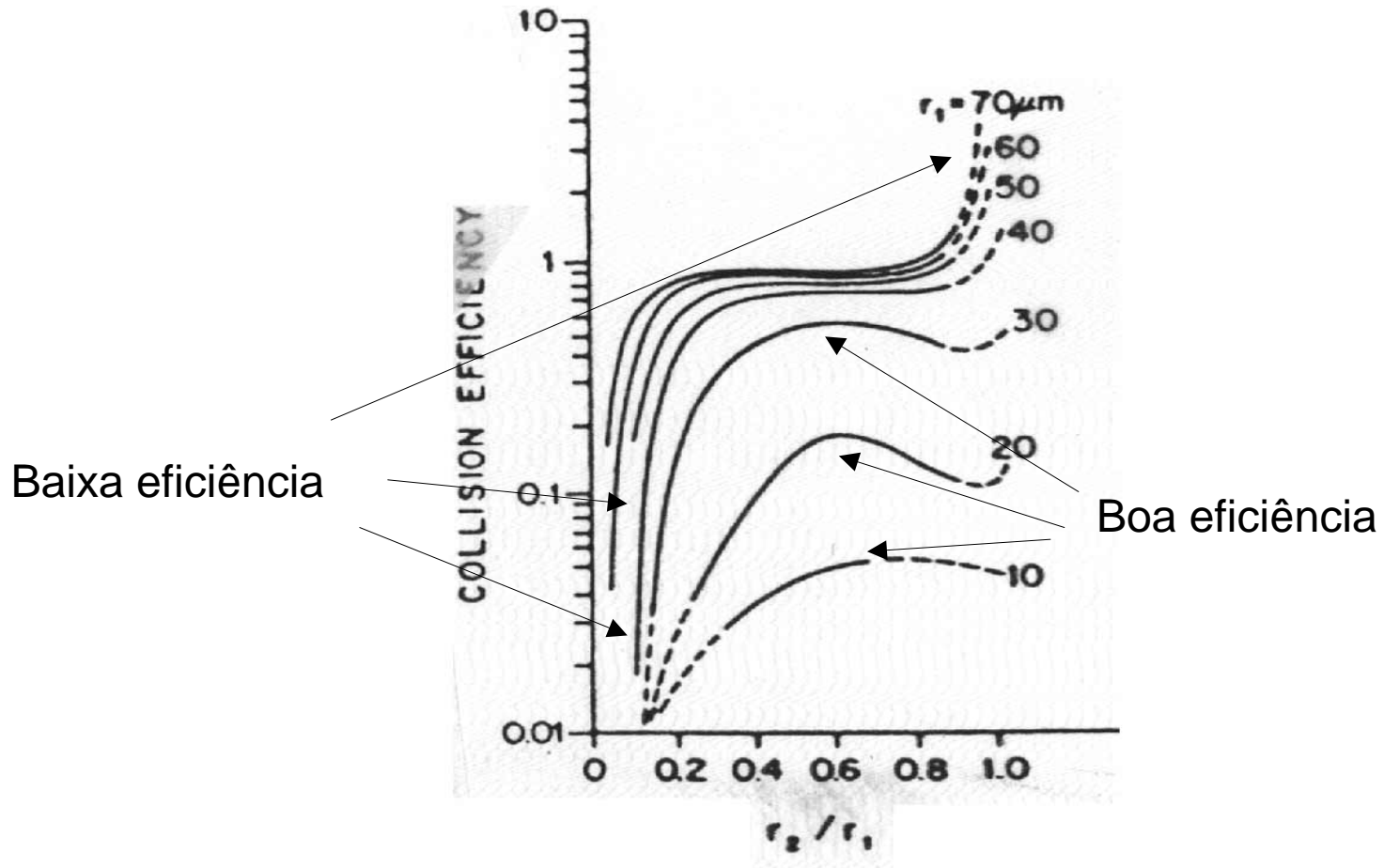
**TABLE 3**  
Terminal velocities of water drops  
in still air at 1 atm and 20° C.

Drop diameter (mm)	Terminal velocity (cm/s)
0.01	0.3
0.02	1.2
0.03	2.6
0.05	7.2
0.1	25.6
0.3	115
1	403
2	649
3	806
5	909
5.8	917

## O processo de colisão e coalescência

- Gotículas de nuvens não podem crescer além de 10  $\mu\text{m}$  num intervalo razoável de tempo.
- Para gotículas crescerem de 10 microns a 1000 microns de raio,
  - há um aumento de  $10^6$  no volume:  $\frac{4}{3} \pi r^3$
  - gotículas grandes caem mais rápido que as menores
  - elas podem colidir e mergirem - ou coalescerem
- O processo de Colisão e Coalescência funciona se:
  - há grandes gotas no caminho das pequenas
  - a nuvem é alta e a base é razoavelmente baixa
  - o ar abaixo da base da nuvem não é seco.

## Eficiência de colisão



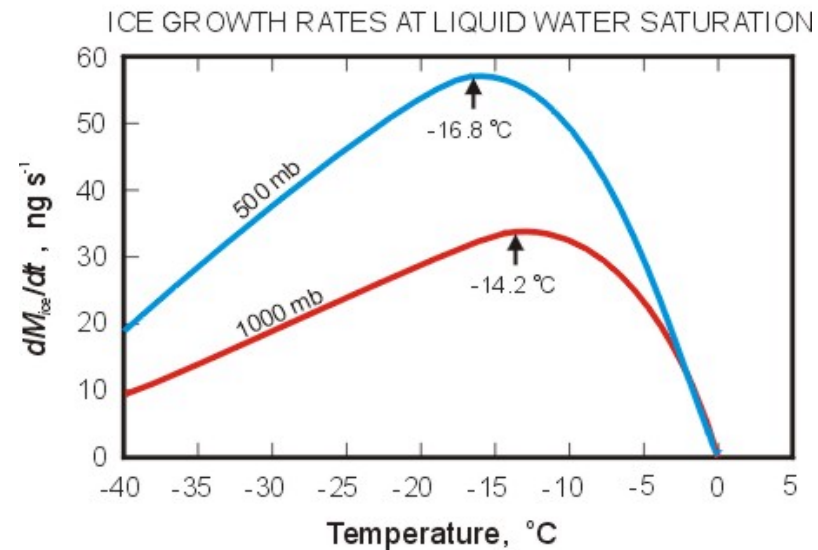
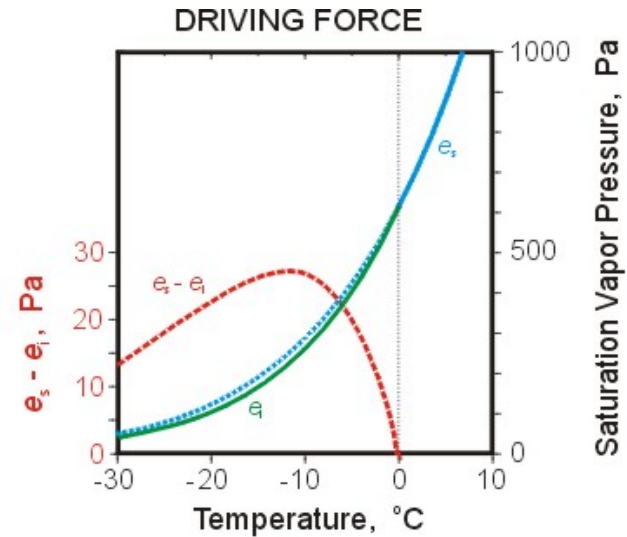
## O processo de Bergeron - o processo das 3-fases

- Um novo ingrediente: cristais de gelo (fase sólida)
- Dentro da nuvem: água super-resfriada (líquido) em equilíbrio com o vapor de água.
  - Gelo não forma espontaneamente abaixo de 0°C
  - Gotículas de água "Super-resfriada" podem existir a temperaturas abaixo do ponto de congelamento - “esperando” por contatar alguma partícula para congelar.

## Um fato singular:

Abaixo de 0°C,  $e_s$  é menor sobre gelo plano do que sobre água líquida.

A maior diferença ocorre a -12°C



Adapted from Byers (1965)



## Uma classificação

Type of particle (F)	CODE	GRAPHIC SYMBOL	TYPICAL FORMS			TERM
	1					Plates
2					Stellar crystals	
3					Columns	
4					Needles	
5					Spatial dendrites	
6					Capped columns	
7					Irregular particles	
8					Group (soft hail)	
9					Ice pellets (Am. sleet)	
0					Hail	

Additional characteristics	m	*	Broken
	r	*	Rimed
	f	(*)	Flake
	w	*	Wet

Size of particle (D)	a	0-0.49 mm	Very small
	b	0.5-0.99 mm	Small
	c	1.0-1.99 mm	Medium
	d	2.0-3.99 mm	Large
	e	4.0 mm or larger	Very large

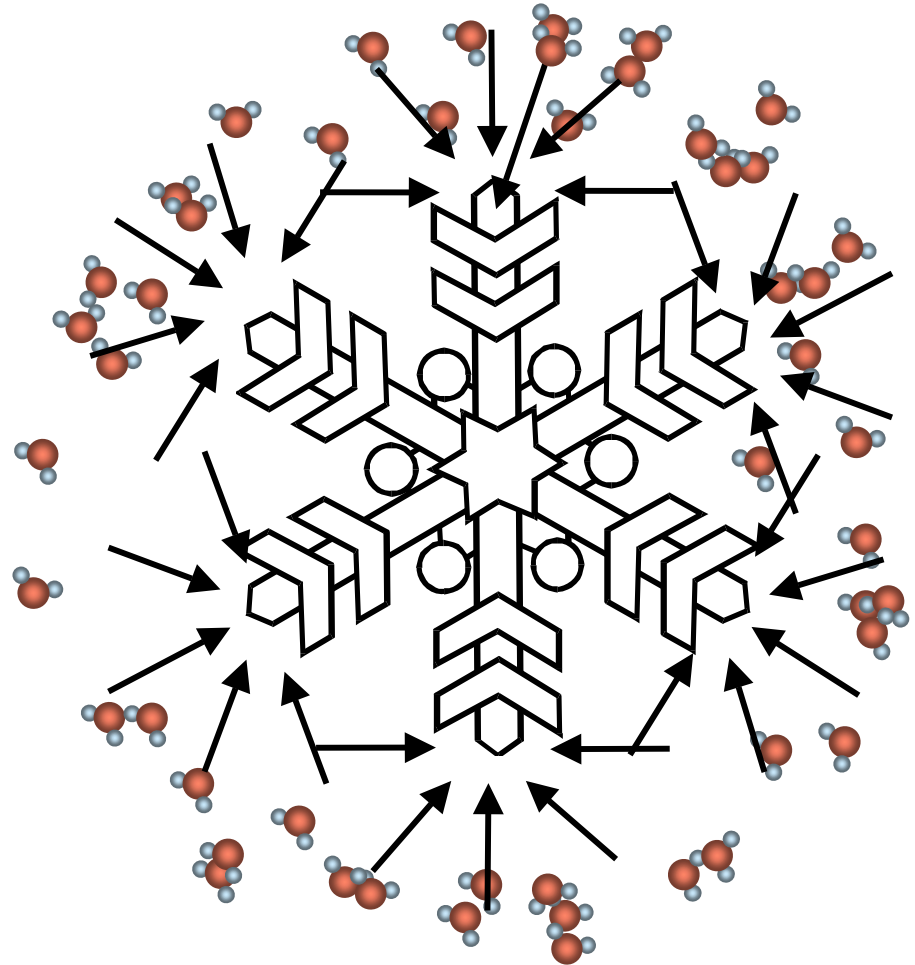
## Processos de crescimento de cristais de gelo

- **Deposição:**  
difusão molecular de vapor sobre o cristal de gelo – na mistura líquido/gelo, o líquido pode evaporar para vapor e então congelar sobre o cristal de gelo.
- **Acrescimento - *Riming*:**  
gotículas super-resfriadas se aderem aos cristais de gelo durante contatos mecânicos.
  - gotículas congelam em contato com o gelo
  - forma pelotas de gelo - *graupel*
  - *graupel* torna-se pesado e cai rápido
  - granizo
- **Agregação:**  
agregado de cristais, colidem, aderem entre si e formam os flocos de neve.

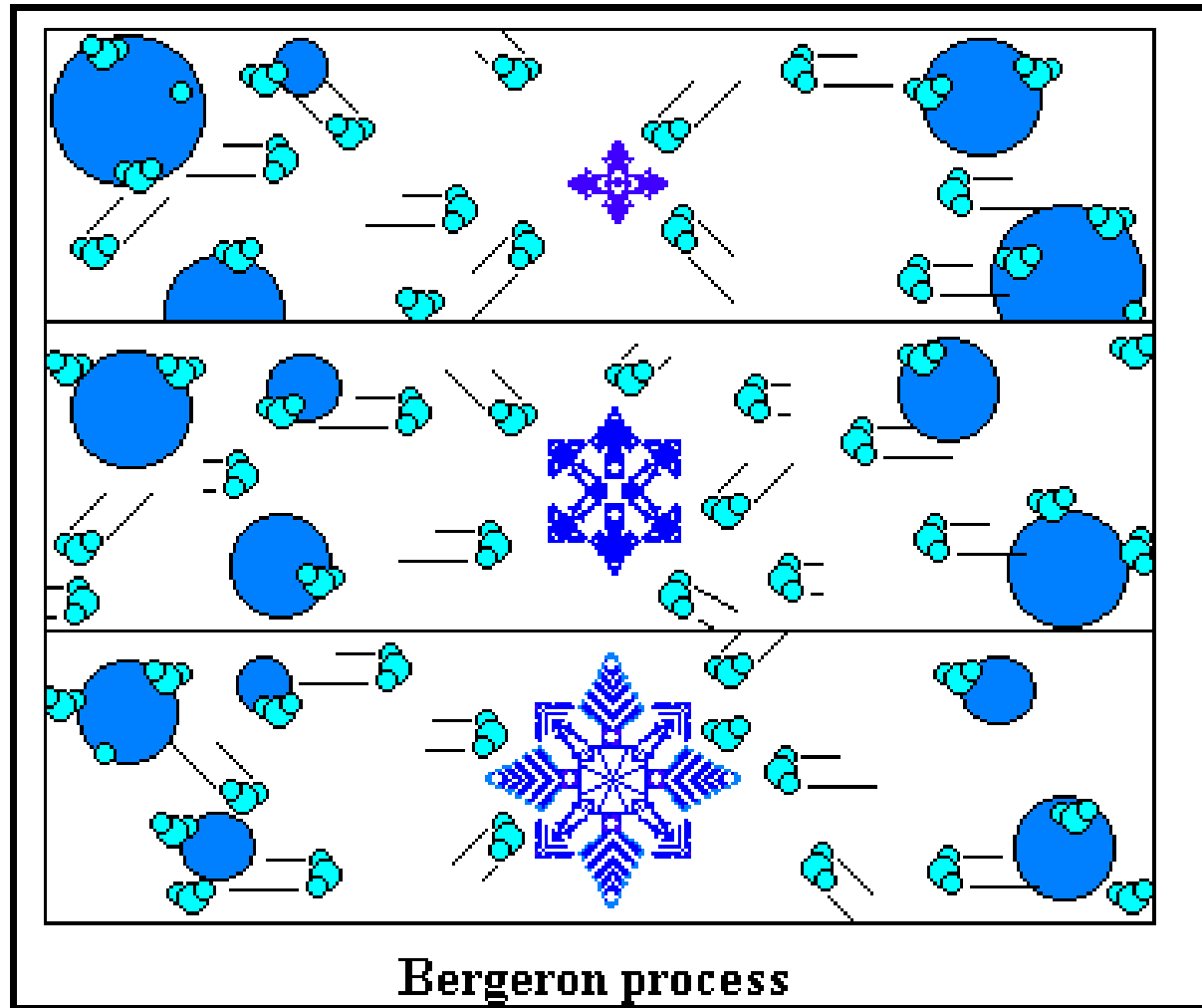
## O processo de deposição em nuvens frias

Cristais de gelo crescem por difusão molecular do vapor na nuvem.

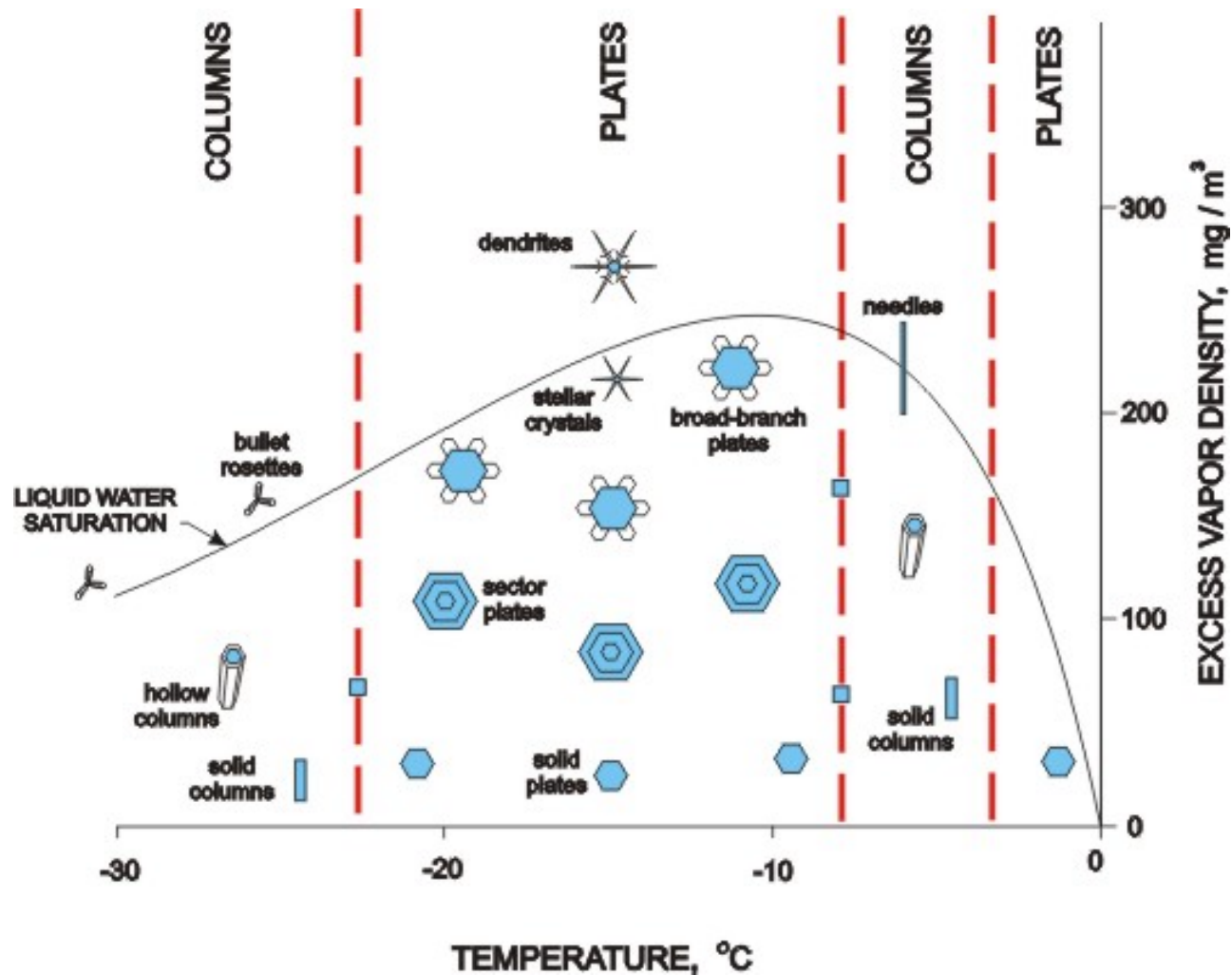
O vapor difunde para as estruturas pontiagudas a partir de muitas direções, e as pontas crescem rapidamente.



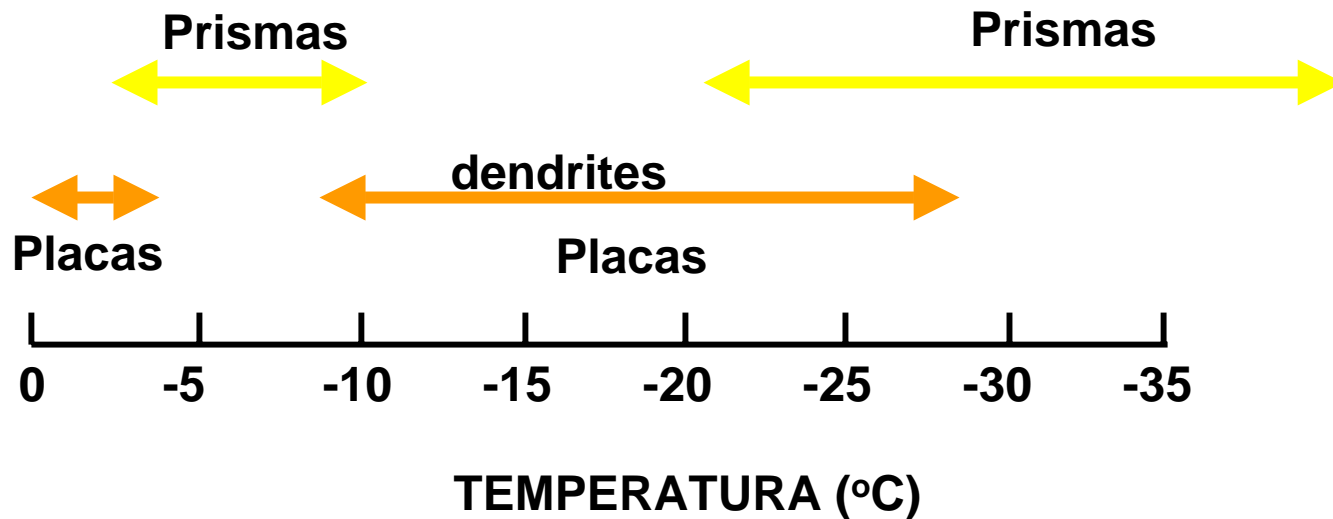
## Crescimento de gelo através da deposição de vapor



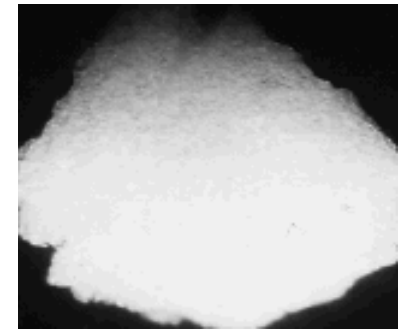
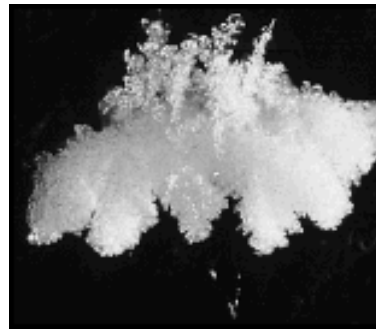
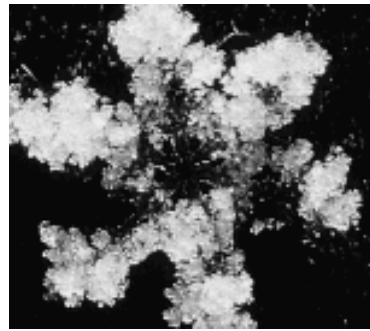
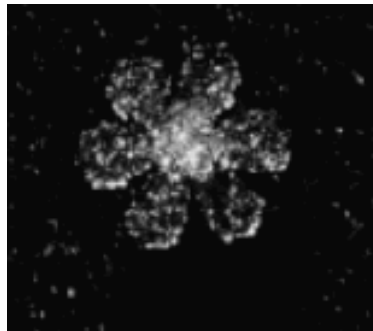
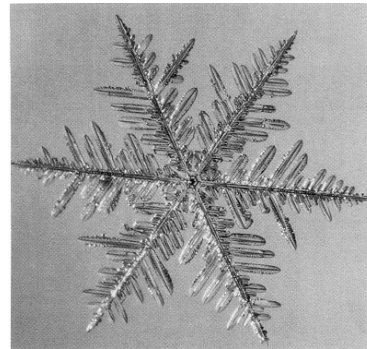
## Habitats dos cristais de gelo



- Habitats básicos mudam 3 vezes com o decréscimo da temperatura



## O crescimento por acreção de gotículas super-resfriadas



**Cristal de gelo**



**Tempo**

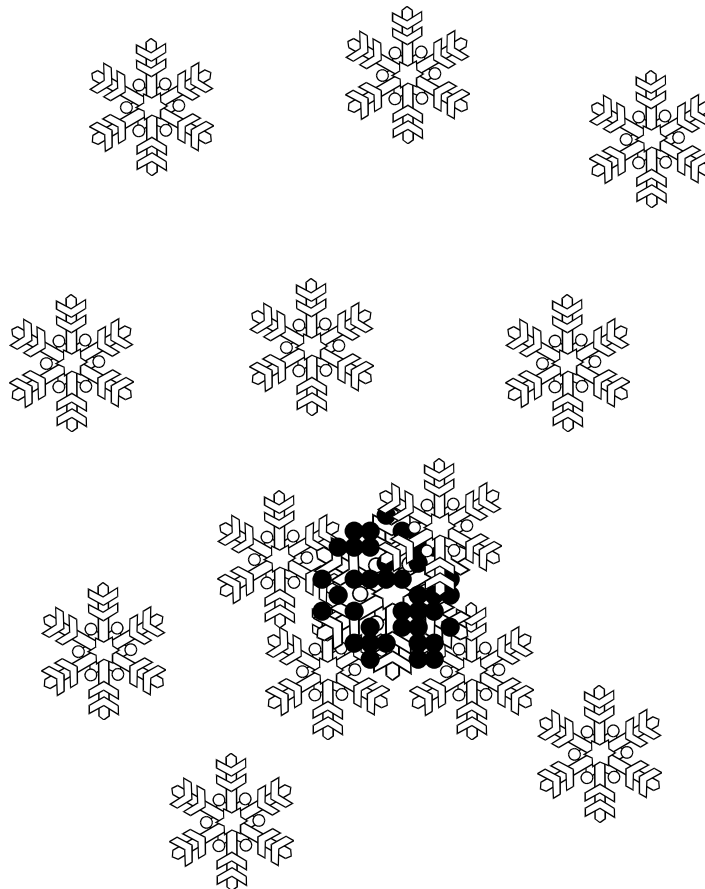


**graupel**

Ao final do processo, o cristal original não pode mais ser distinguido.

## Crescimento por agregação - Aderência de cristais

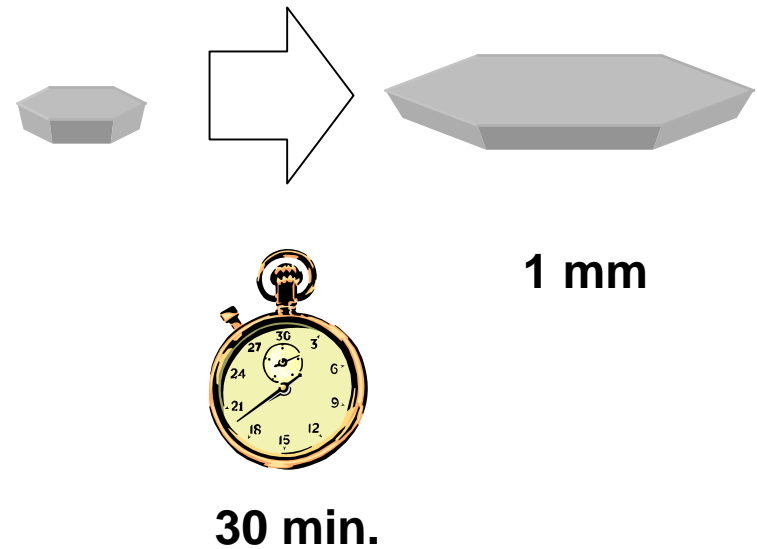
cristais se tornam mais “pegajosos” para temperaturas entre - 5 e 0 C

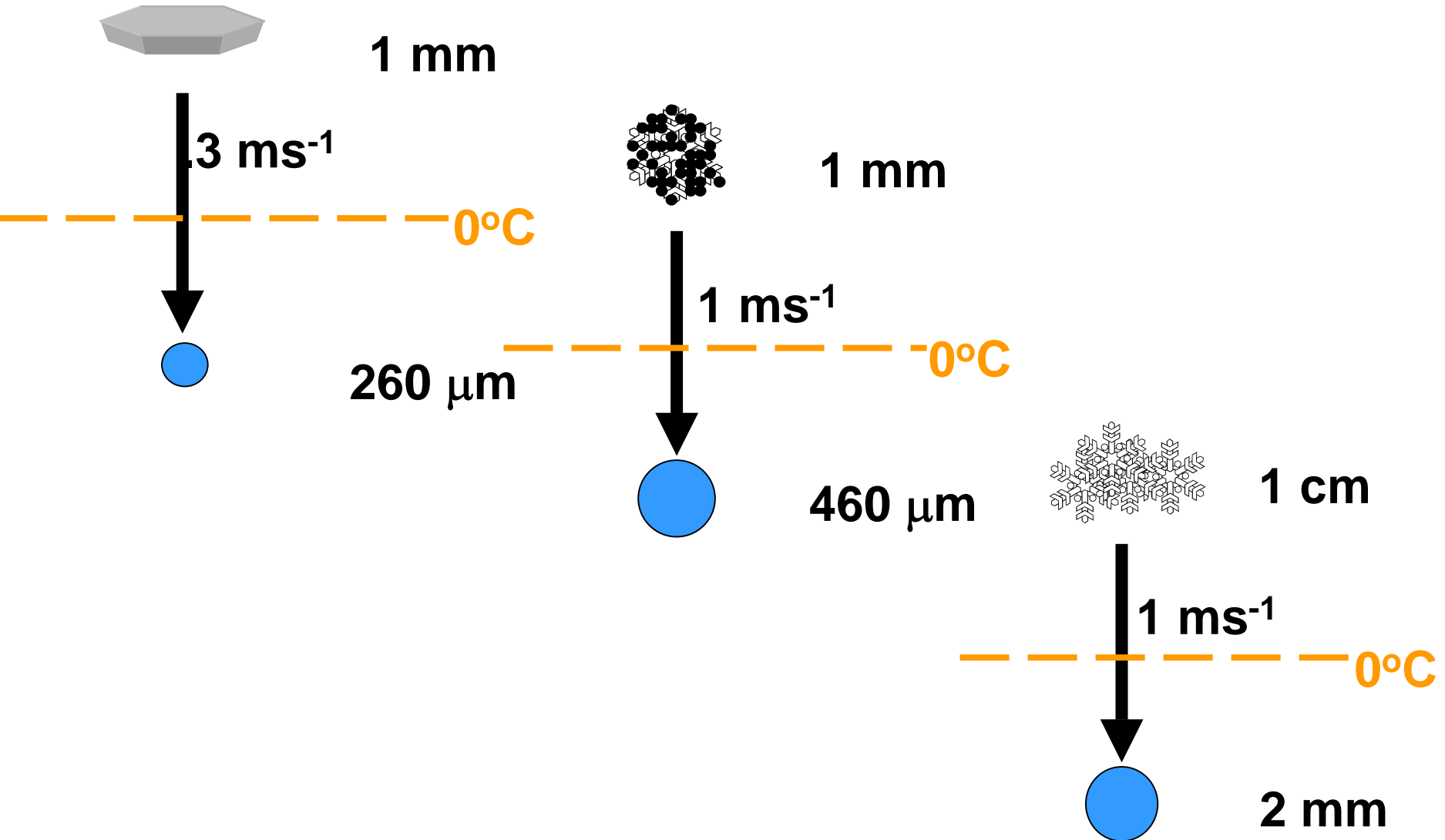




## Processos de nuvem fria

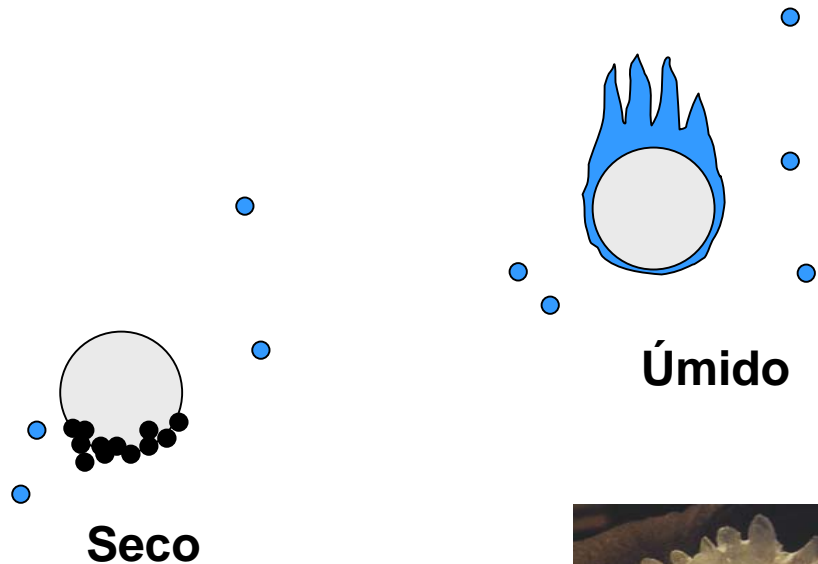
A deposição só não justifica a formação de grandes partículas de gelo que precipitam.





## Formação do Granizo

Precipitação oriunda de nuvens convectivas em forma de pelotas irregulares de gelo, gerada por crescimento através de múltiplas interações na corrente ascendente.



## A Síntese

