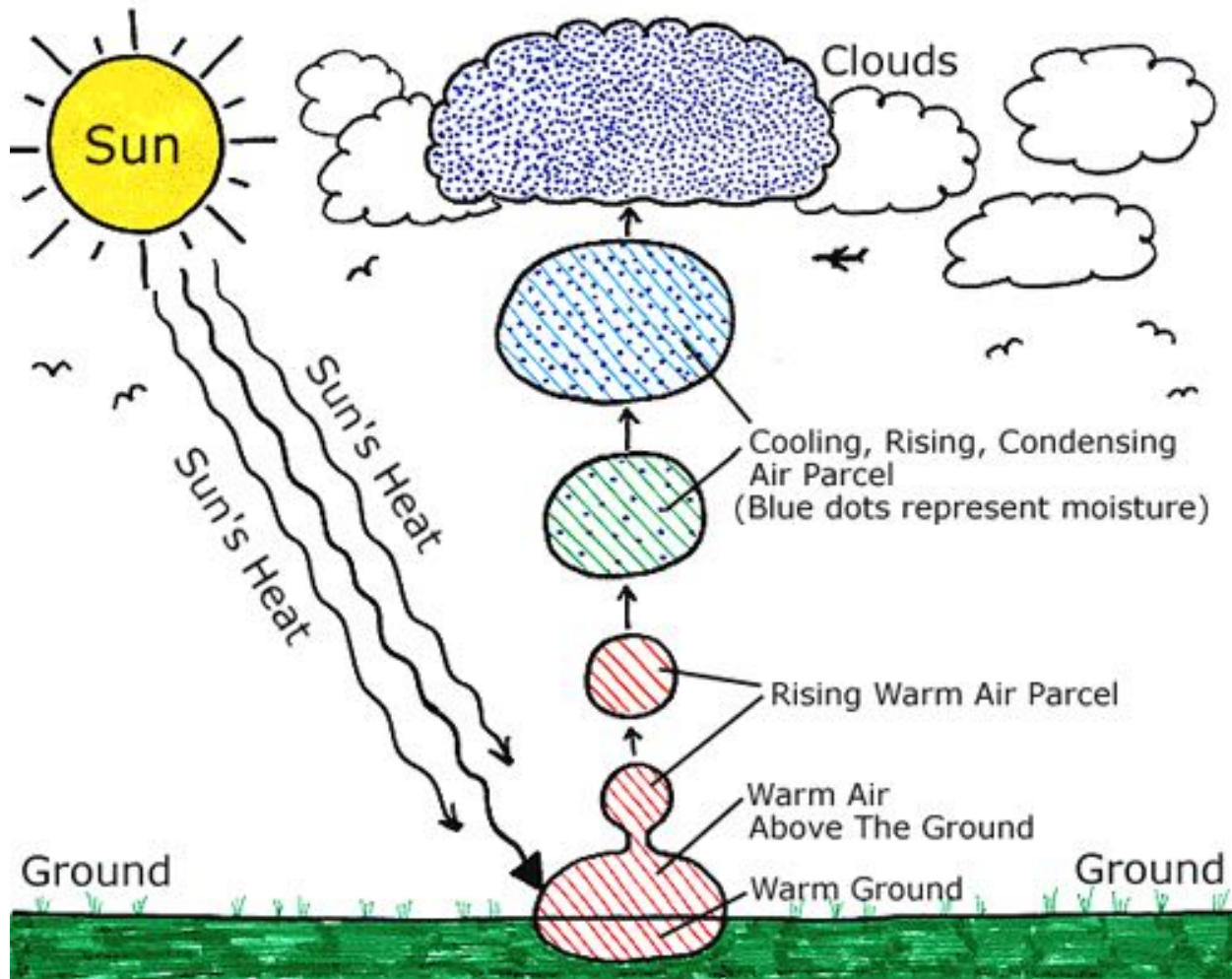


# Microfísica de nuvens quentes e interação aerossóis-nuvens

Micael Amore Cecchini

[micael.cecchini@usp.br](mailto:micael.cecchini@usp.br)

## Relembrando - Teoria da Parcela

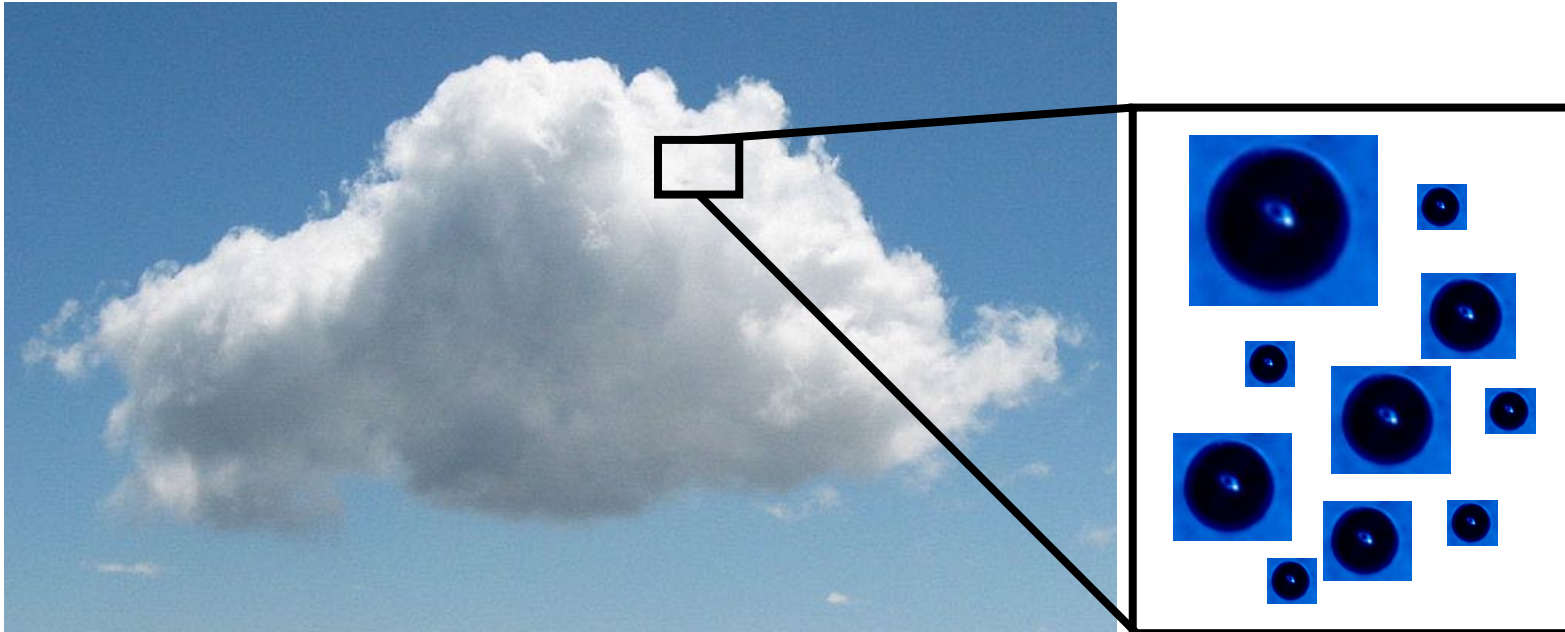


- A teoria da parcela descreve a formação de nuvens convectivas
  - Contraste entre um volume de ar isolado (adiabático) e o ambiente ao seu redor
- Como a quantidade de umidade  $q$  se conserva na parcela, sua UR aumenta conforme ascende
  - LCL  $\rightarrow$  UR = 100%
- Após o LCL, haverá condensação do vapor excedente que aquecerá parcialmente a parcela
  - T decresce mais devagar com  $z$
- Aceleração das parcelas depende de  $T - T'$

## Aula de hoje

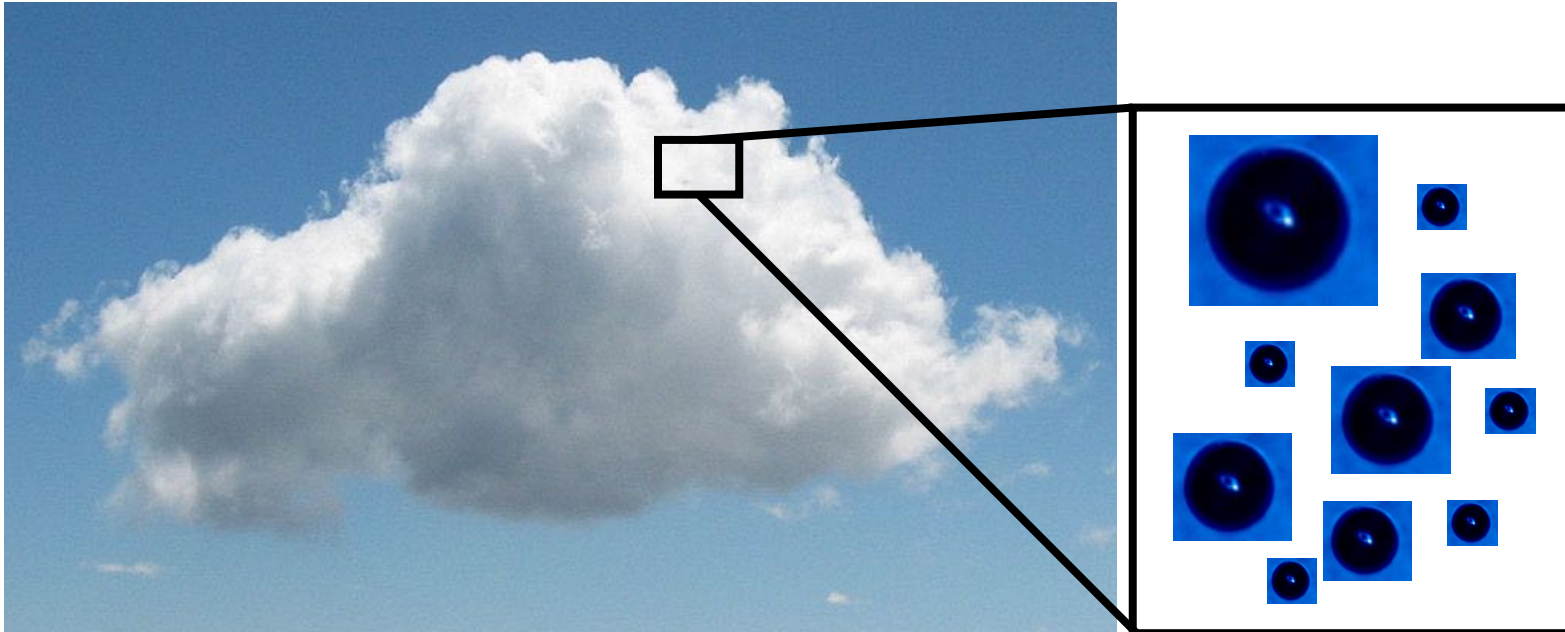
- Hoje vamos estudar o que acontece a partir do LCL
  - Como as gotas se formam?
  - Como elas crescem?
  - Como elas interagem entre si?
  - Como a chuva se forma?
- A chamada “Microfísica de Nuvens” é a área de estudo que visa responder perguntas como essas
  - Microfísica de nuvens quentes: apenas água líquida, sem considerar as partículas de gelo

## Microfísica de Nuvens



- A microfísica busca estudar os processos físicos que ocorrem no interior das nuvens
- As características internas das nuvens afetam diretamente:
  - Sua eficiência em precipitar (chuva)
  - Interação com a radiação
  - Distribuição de tipos de hidrometeoros (água líquida + vários tipos de gelo)
  - Eletrificação
- IPCC: microfísica de nuvens, especificamente sua relação com aerossóis, são a maior fonte de incertezas para cenários climáticos

# Microfísica de Nuvens



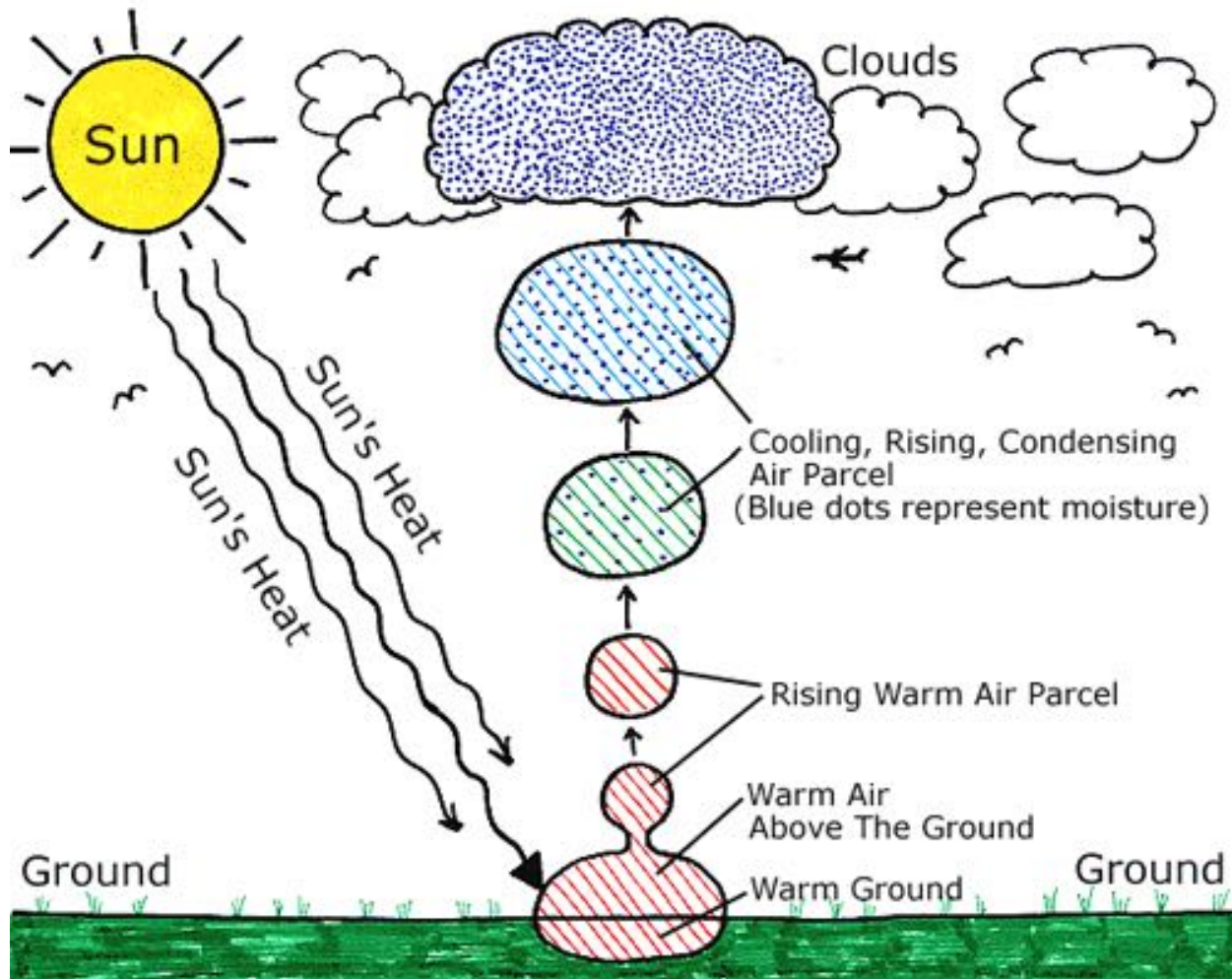
- A base da microfísica são as mudanças de fase da água:

Vapor  $\longleftrightarrow$  Líquido  
Evaporação Condensação

Líquido  $\longleftrightarrow$  Sólido  
Derretimento Fusão

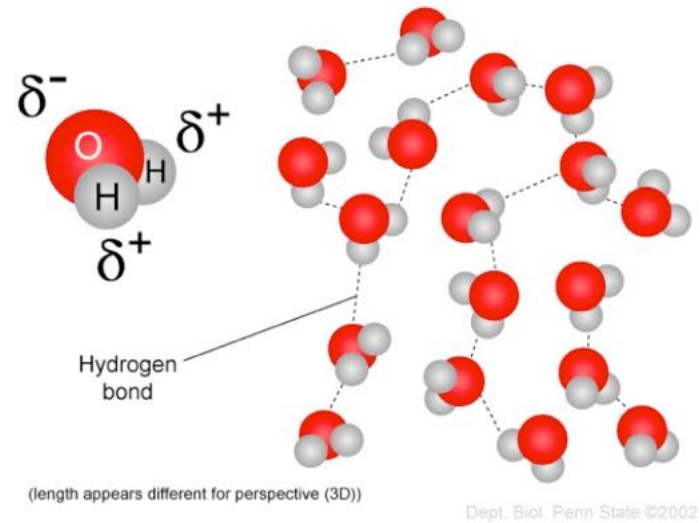
Vapor  $\longleftrightarrow$  Sólido  
Sublimação Deposição

## Como se forma uma gota de nuvem?



- Vamos chamar a razão de saturação de  $S$   
$$S = e/e_s$$
- No LCL,  $S = 1$ 
  - O que ocorre com  $S$  quando a parcela continua a subir? É possível ter UR maior do que 100% ( $S > 1$ )?
- Como o processo de condensação não é instantâneo
  - Sim, podemos ter  $S > 1$
  - Nesse caso, dizemos que a parcela está supersaturada
- Definimos a supersaturação como  
$$SS = (S - 1) \times 100$$
- Em %
  - “Quantos % acima da saturação”
- Essa quantidade de vapor estará disponível para condensar

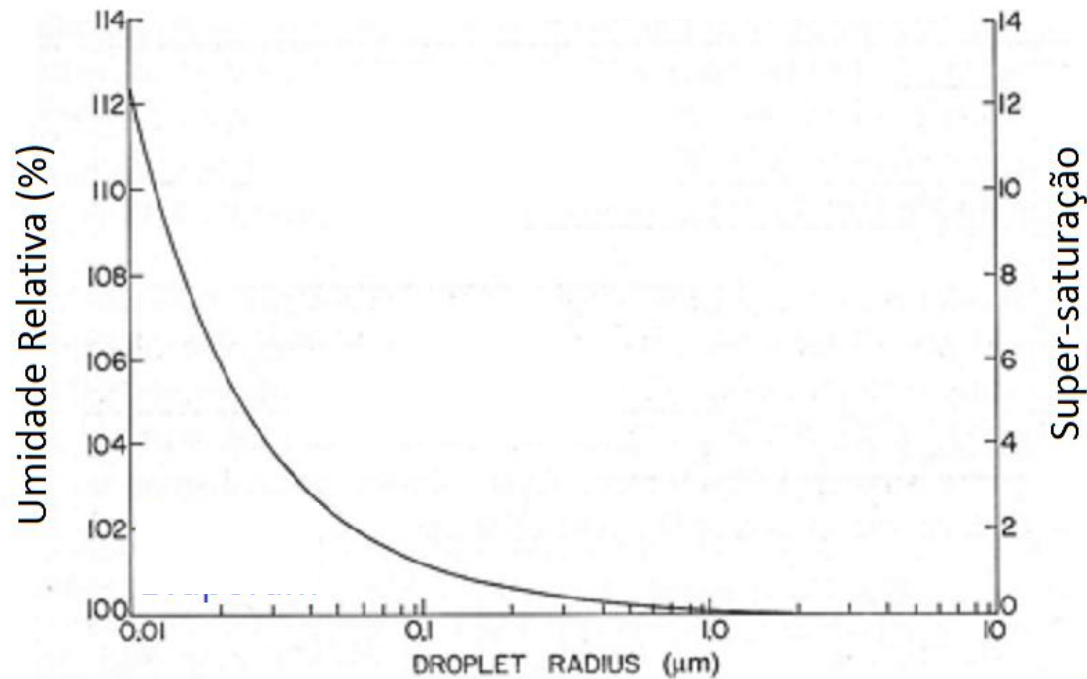
## Como se forma uma gota de nuvem?



- As moléculas de água precisam se agrupar em *clusters*
- Para uma atmosfera completamente limpa (apenas vapor + ar seco)
  - Moléculas precisam colidir aleatoriamente e se agrupar
- Quando há formação de gota, diz-se que ela foi *nucleada*
  - Nucleação de água pura = nucleação homogênea
- Há um custo energético para manter a estrutura coesa
  - Chamada de energia livre de Gibbs
  - “Energia microfísica do sistema”

- Lord Kelvin (1879)

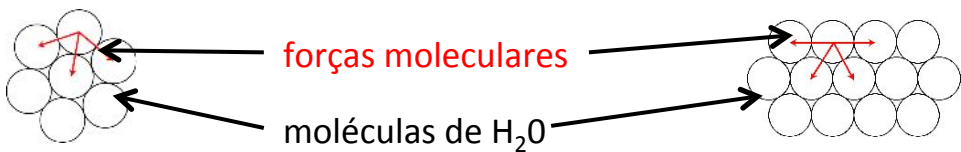
$$S = \exp(2\sigma/R\rho v T\rho L r) = \exp(a/r)$$



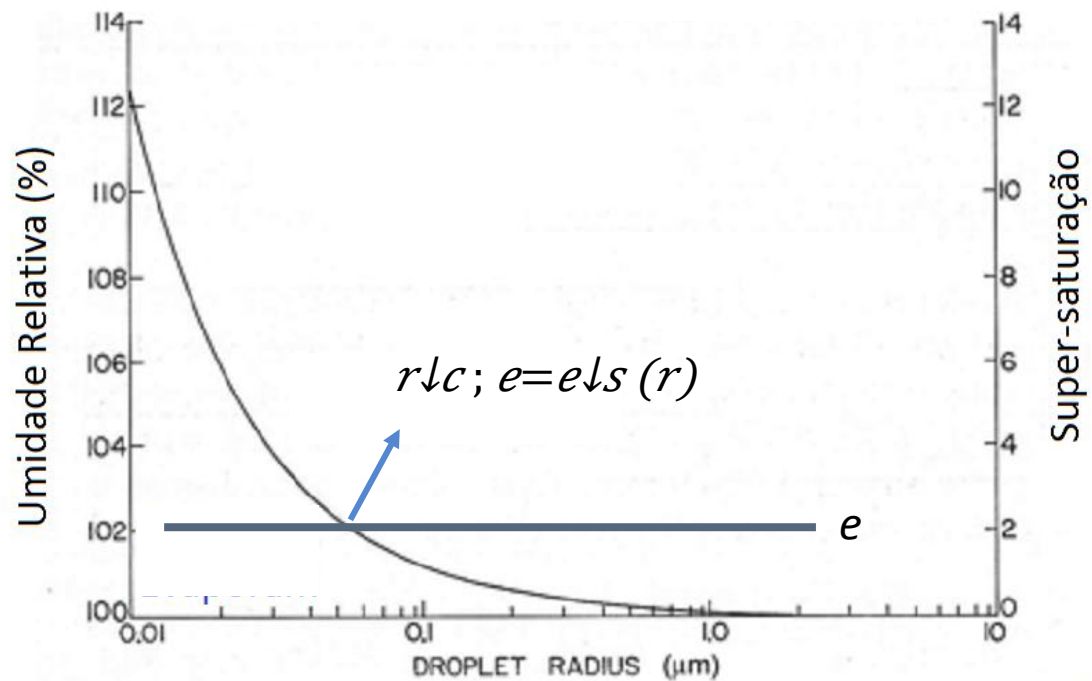
- Equação de Kelvin (1870)
  - Aumento de  $S$  é inversamente proporcional a  $r$
  - Mais difícil formar gotículas pequenas
- Tamanho de uma molécula de água  
0,275 nm = 0,000275 μm
  - Início da formação de uma gotícula de água requer enorme SS
- Mecânica estatística
  - Estimativa de SS = O(100%) para formar 1 gota por cm<sup>3</sup> por segundo
  - É realístico esperar formação de gotas de água pura na atmosfera terrestre?
- Nucleação homogênea NÃO ocorre na atmosfera natural

Superfície curva, água pura

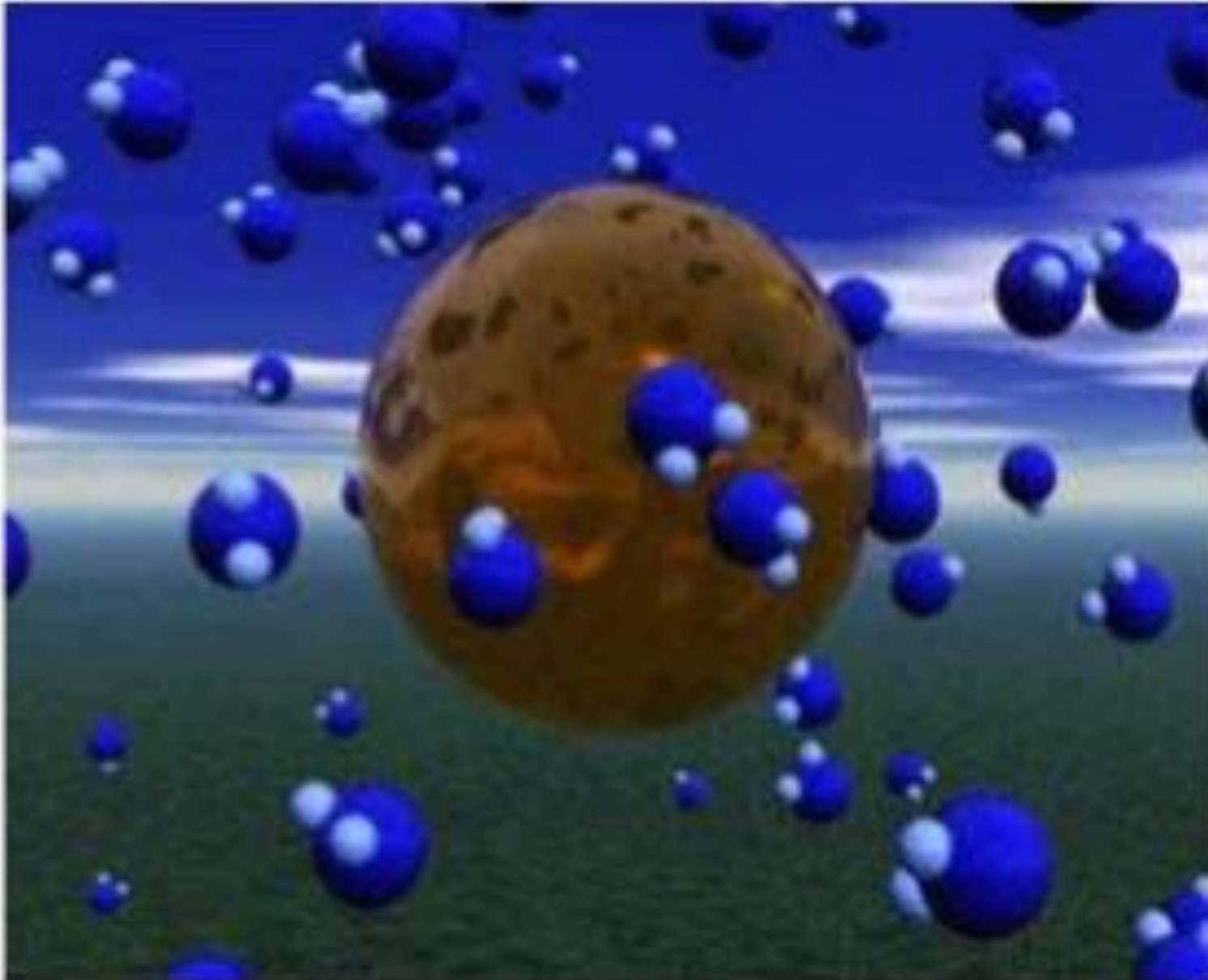
Superfície plana, água pura



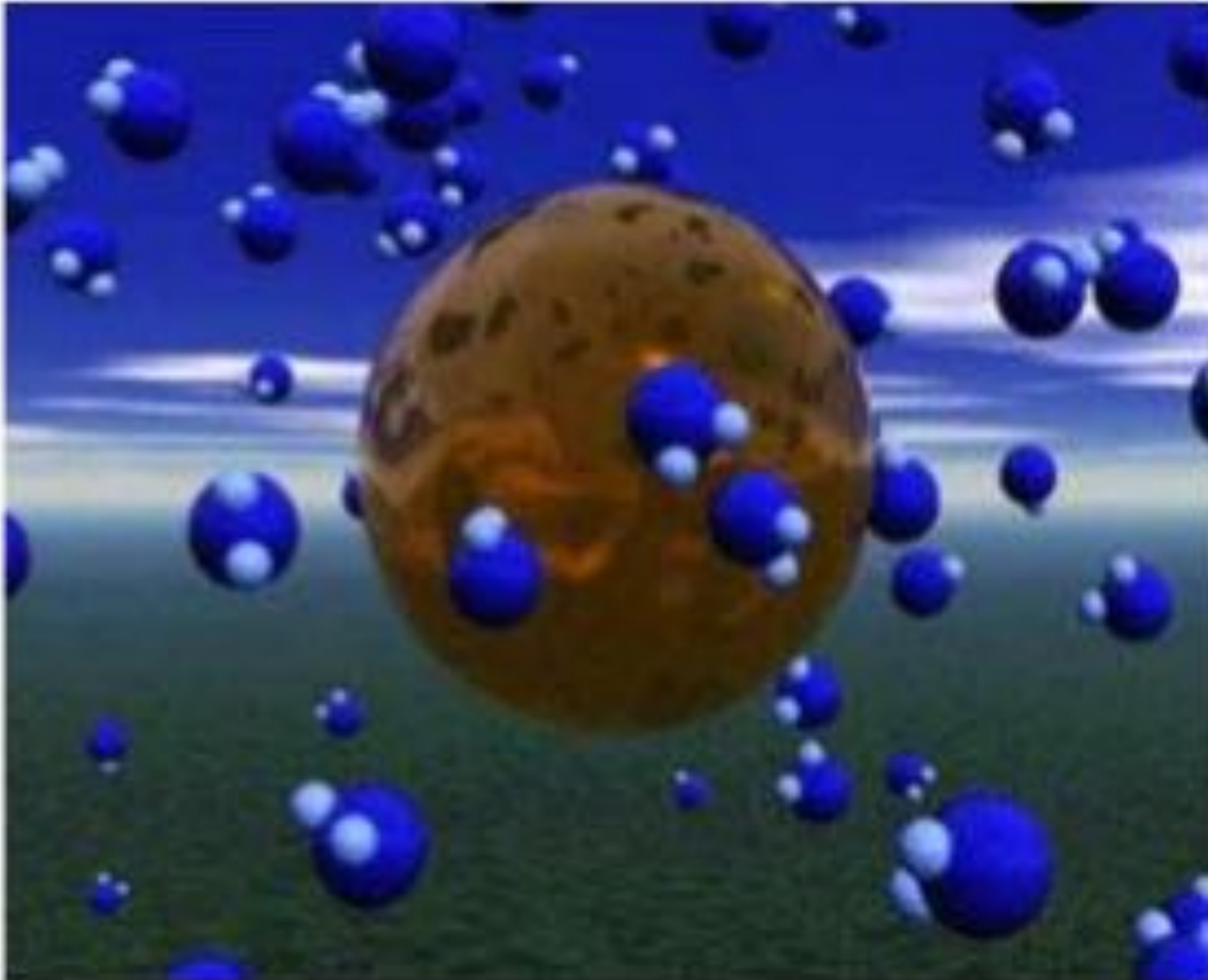




- Para dada  $e$ , há um raio crítico  $r_c$ 
  - $r > r_c$  : gota cresce (condensação)
  - $r < r_c$  : gota decresce (evaporação)
  - $r = r_c$  : gota permanece estável
- Se é muito difícil formar gotículas pequenas, como elas alcançam  $r_c$ ?
  - O quê permite a formação de gotas a  $SS \sim 1\%$ ?
- Efeito dos aerossóis
  - Nucleação heterogênea
  - Condensação ocorre na superfície de um particulado, que usualmente apresenta  $r = O(0.1 \mu\text{m})$



- Partículas que possuem afinidade com a água
  - Higroscópicas ou hidrofílicas
- São conhecidas como Núcleos de Condensação de Nuvens (CCN, em inglês)
  - Exemplos: NaCl (sal marinho),  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (sulfato de amônia)
- CCNs são solúveis em água
  - Água + soluto = solução
  - Reduz concentração de moléculas de água -> reduz e necessário para nucleação
  - Especialmente eficaz para gotas pequenas – mesma massa de soluto, maior % da massa da solução

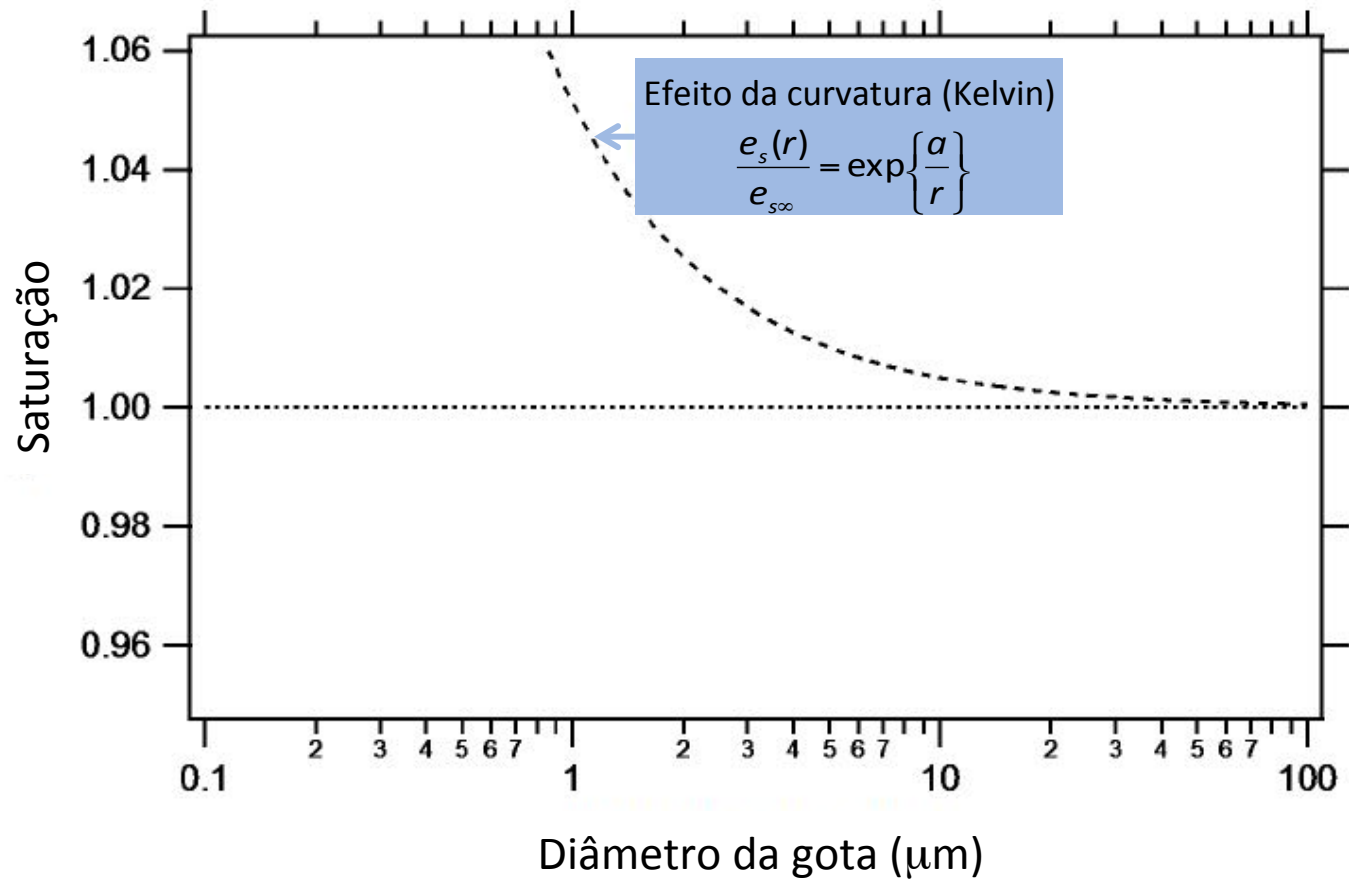


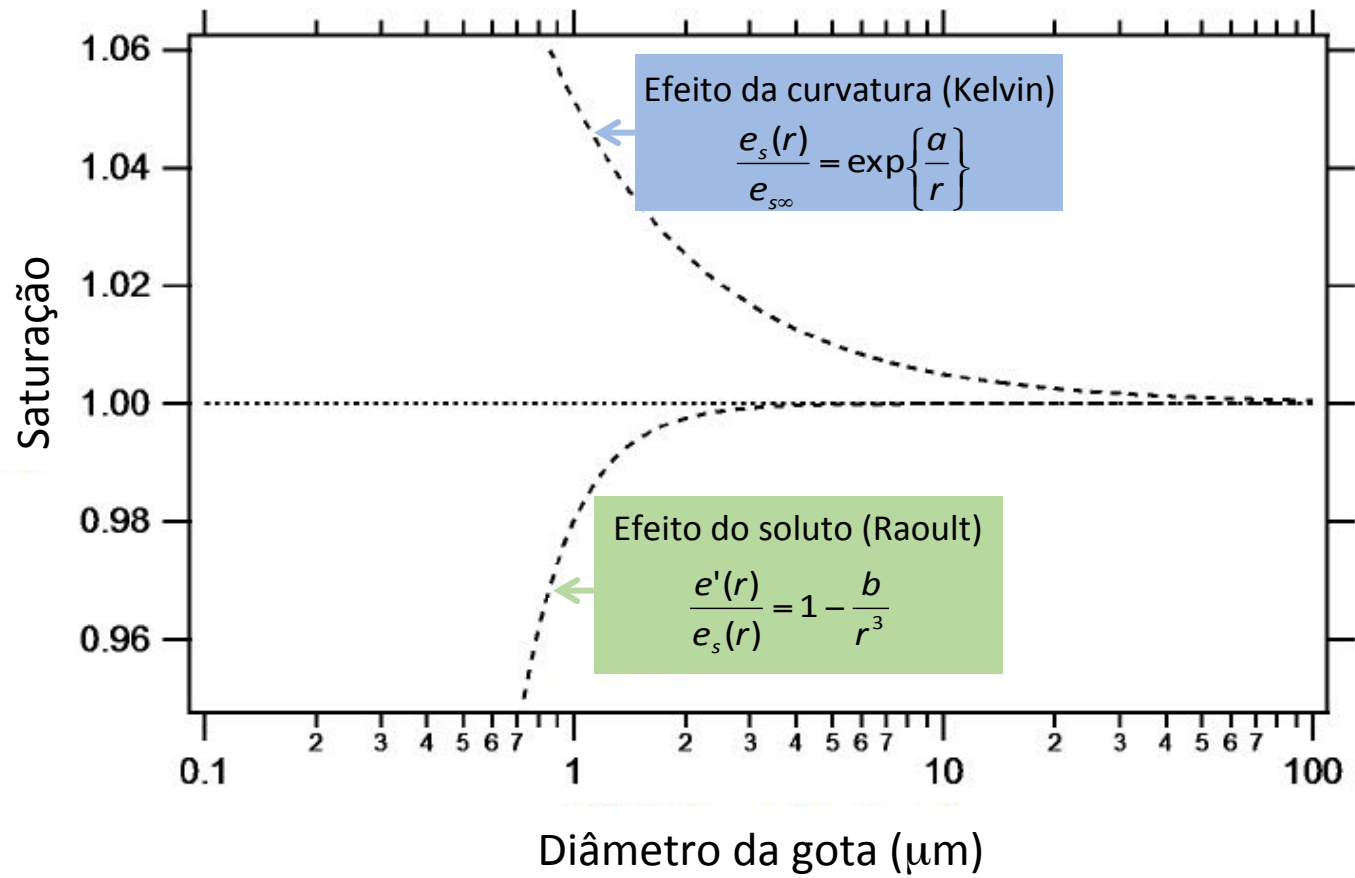
- Redução de S devido ao soluto
  - Lei de Raoult

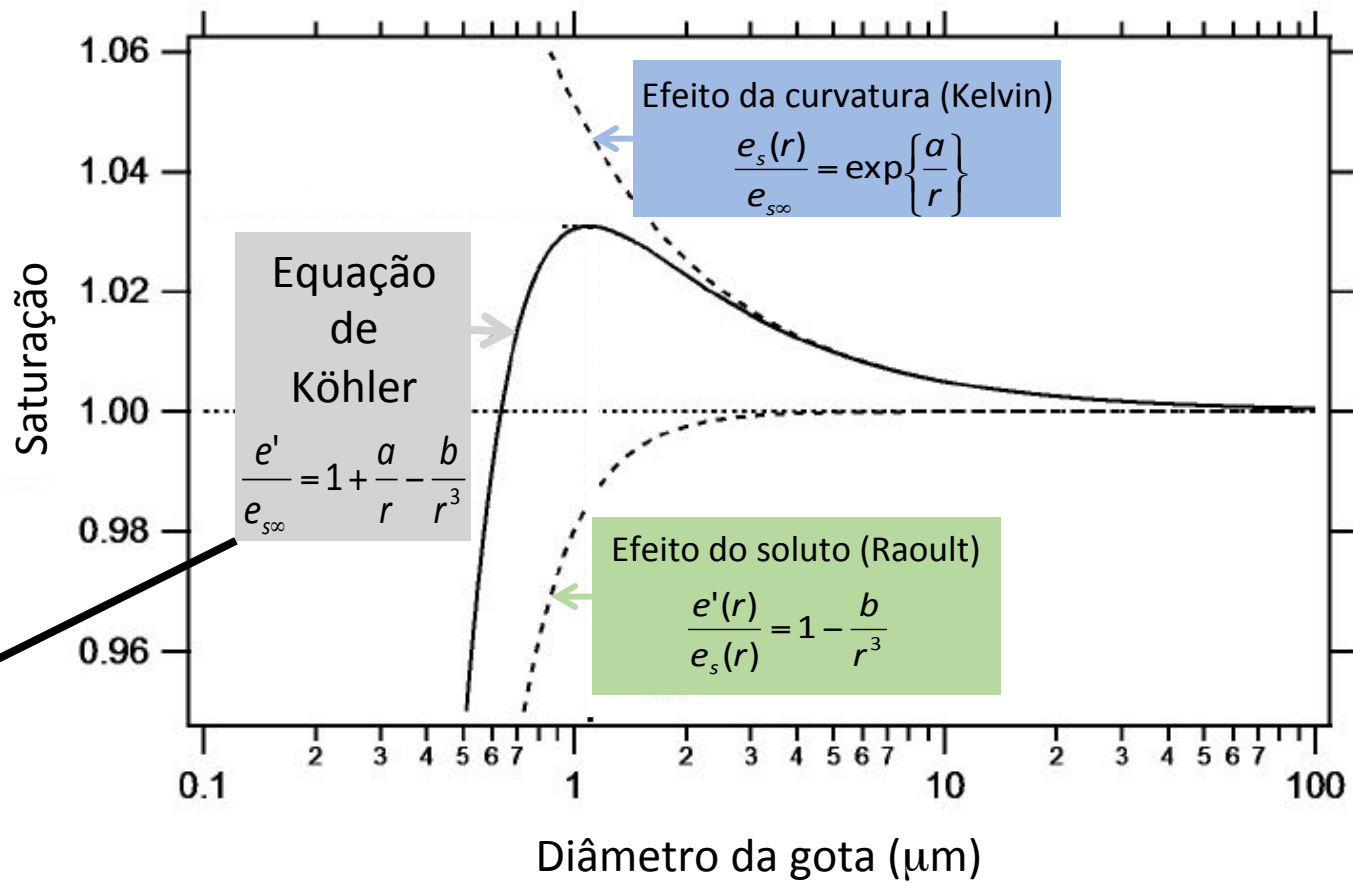
$$S = 1 - \frac{3iM_L m_s}{4\rho_L M_s r^3} \\ = 1 - b/r^3$$

- M: massa molar (L – líquido; S – soluto)
- $m_s$ : massa soluto
- i: nível de dissociação iônica
  - Quantos íons são liberados por molécula de soluto
  - Fator van't Hoff
- Köhler (1936): combinou Kelvin (curvatura) + Raoult (soluto):

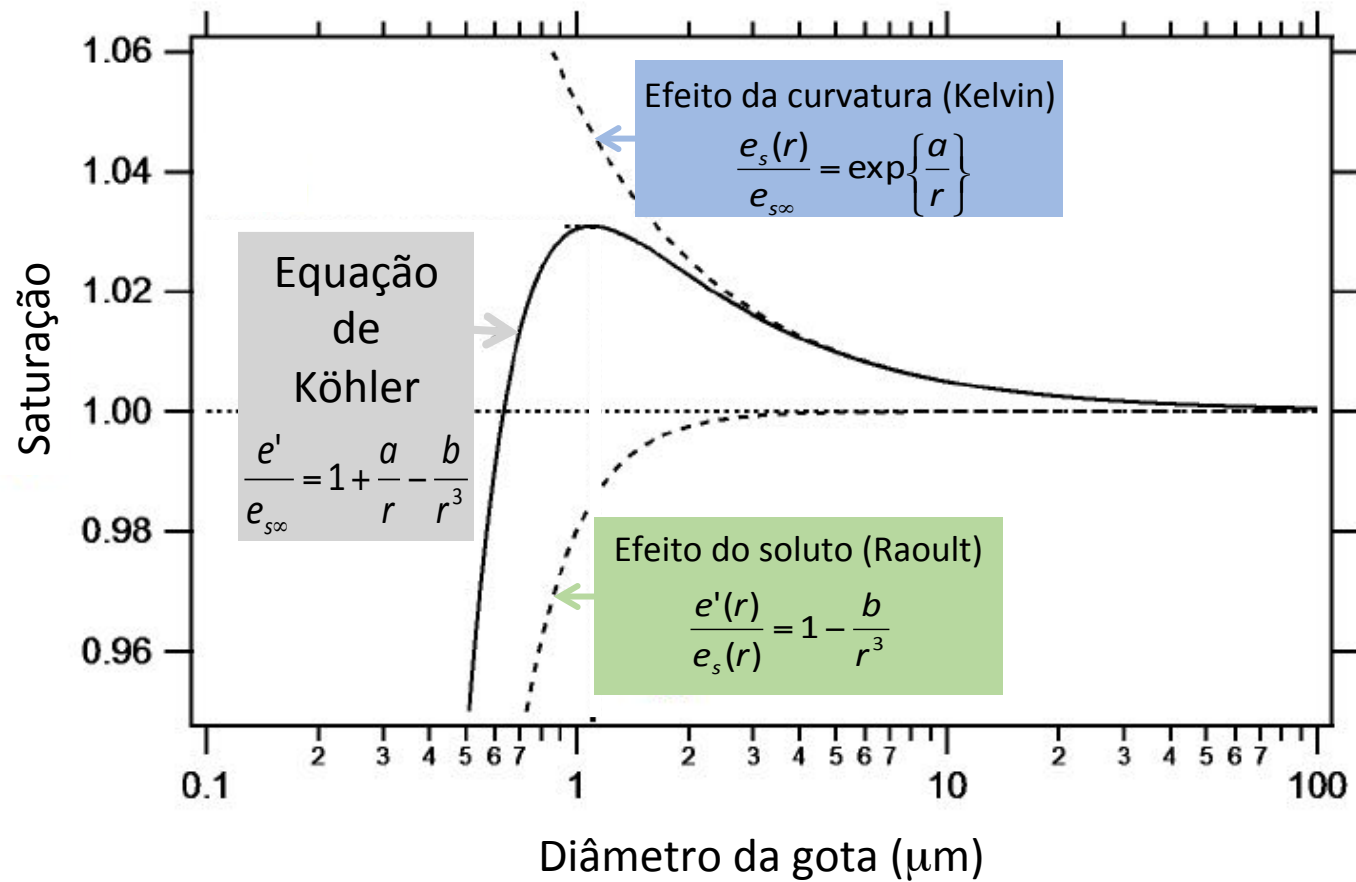
$$e_{ls}(r)/e_{ls,\infty} = (1 - b/r^3) \exp(a/r)$$



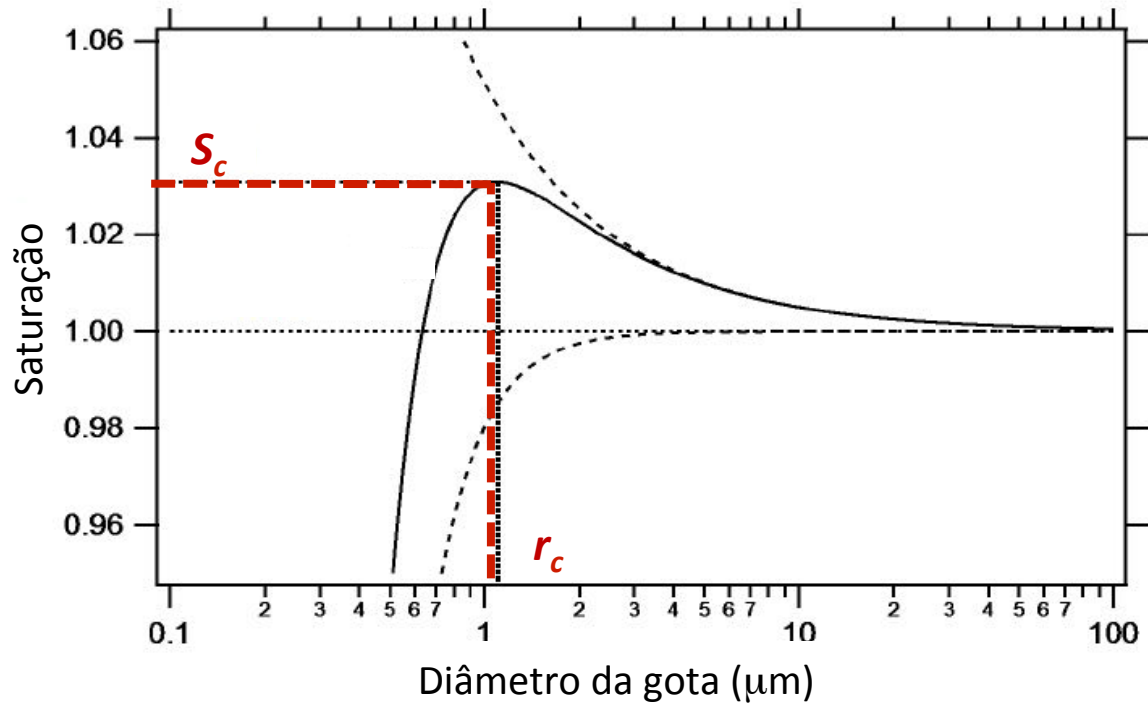




Aproximação para r não muito pequeno



- Efeito do soluto predomina em r pequeno
- Para r grande, só importa a curvatura
- Curva Köhler varia
  - Com o tamanho inicial do aerossol
  - Com a massa do aerossol
  - Com a química do aerossol



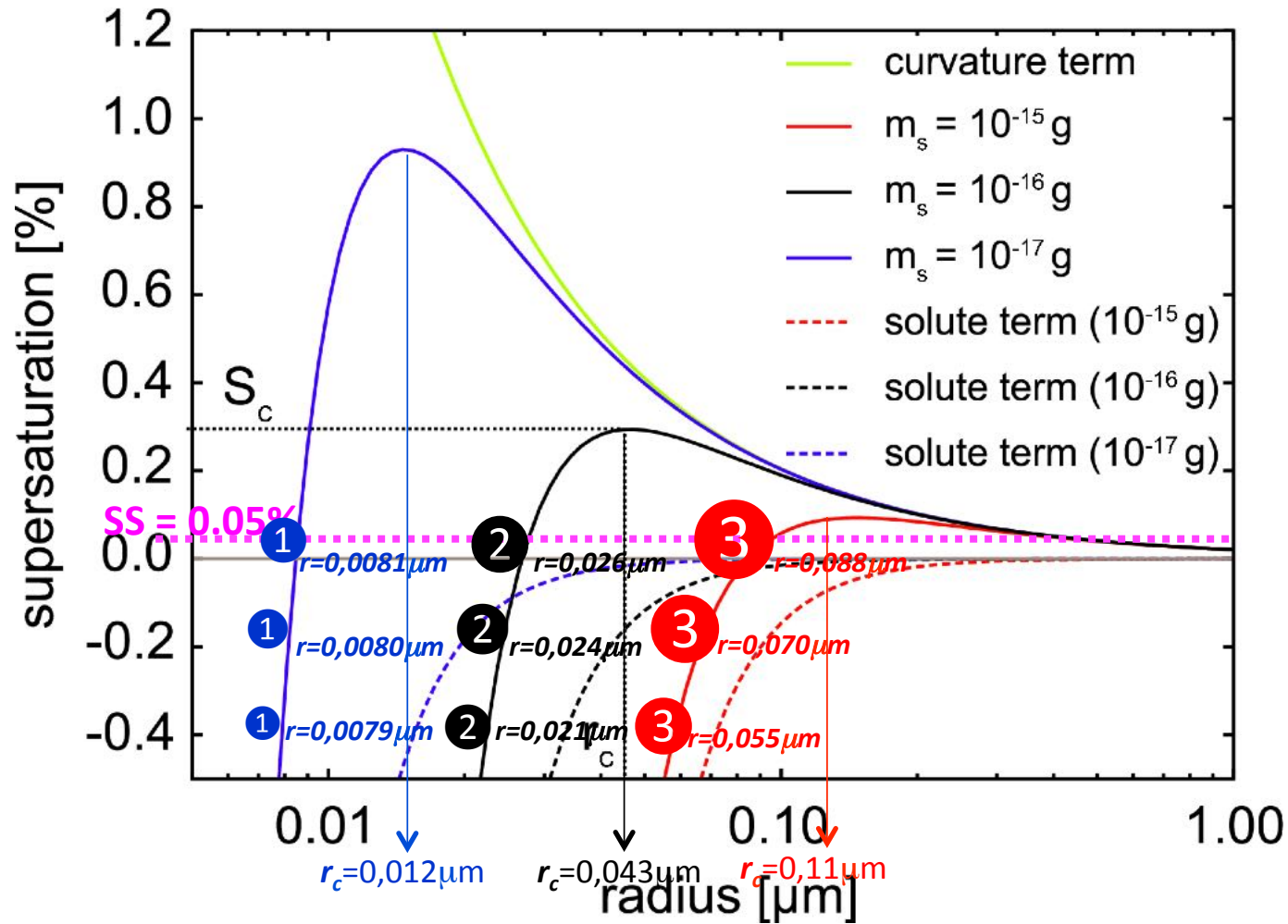
- Para cada curva há um  $r_c$  e uma  $S_c$
- Gotas que ultrapassam  $r_c$  são consideradas *ativadas*

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{e_r}{e_s} \right) = \frac{dS}{dr} = 0$$

$$r_c = \sqrt{\frac{3b}{a}}$$

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



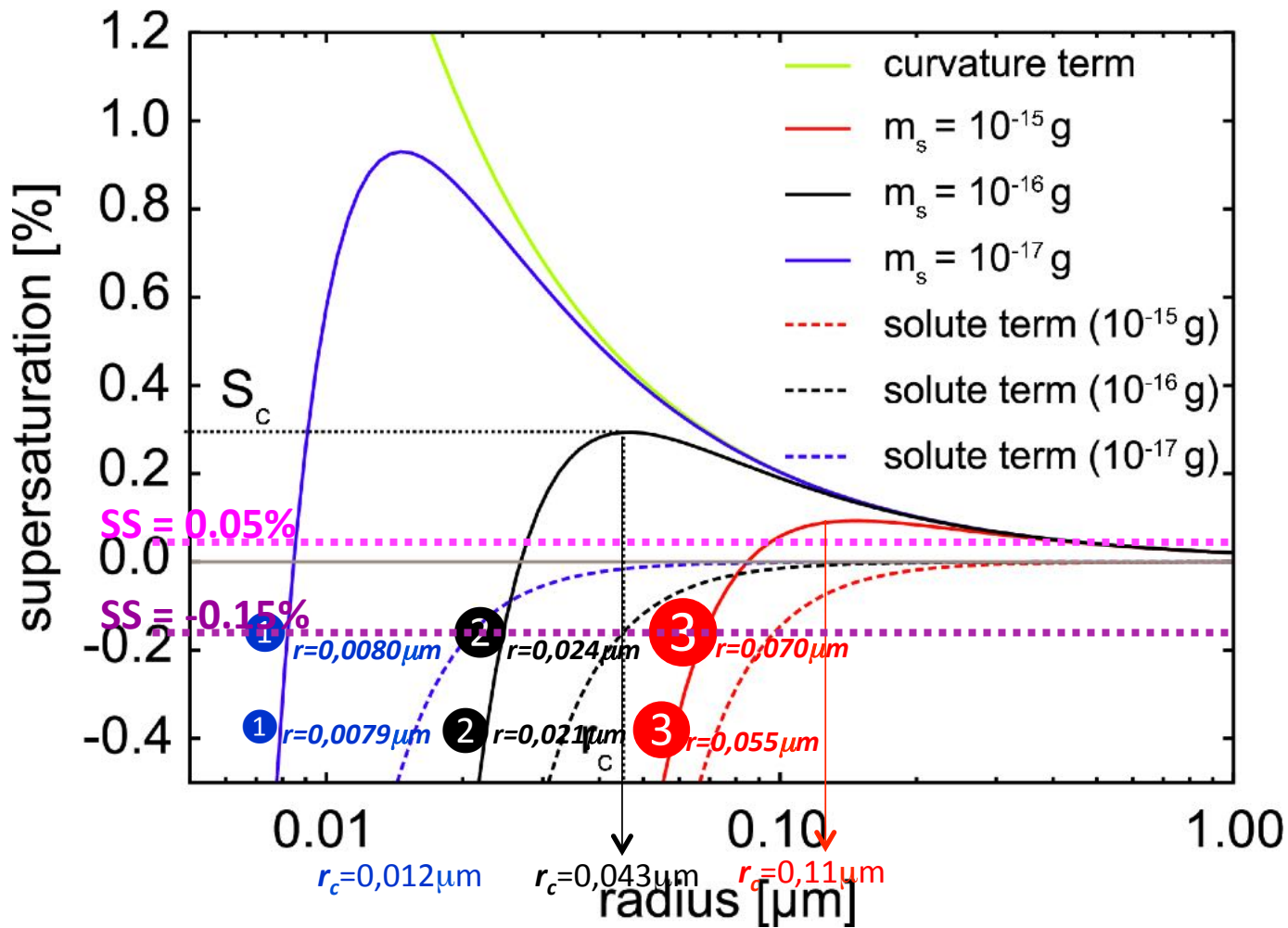


- ①:  $m_s = 10^{-17} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,012 \mu\text{m}$
- ②:  $m_s = 10^{-16} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,043 \mu\text{m}$
- ③:  $m_s = 10^{-15} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,11 \mu\text{m}$

Se a SS permanecer constante, as três gotículas irão crescer até o tamanho:

- ①:  $r = 0,0081 \mu\text{m}$
- ②:  $r = 0,026 \mu\text{m}$
- ③:  $r = 0,088 \mu\text{m}$

e permanecerão deste tamanho enquanto SS não mudar.



- ①:  $m_s = 10^{-17} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,012 \mu\text{m}$
- ②:  $m_s = 10^{-16} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,043 \mu\text{m}$
- ③:  $m_s = 10^{-15} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,11 \mu\text{m}$

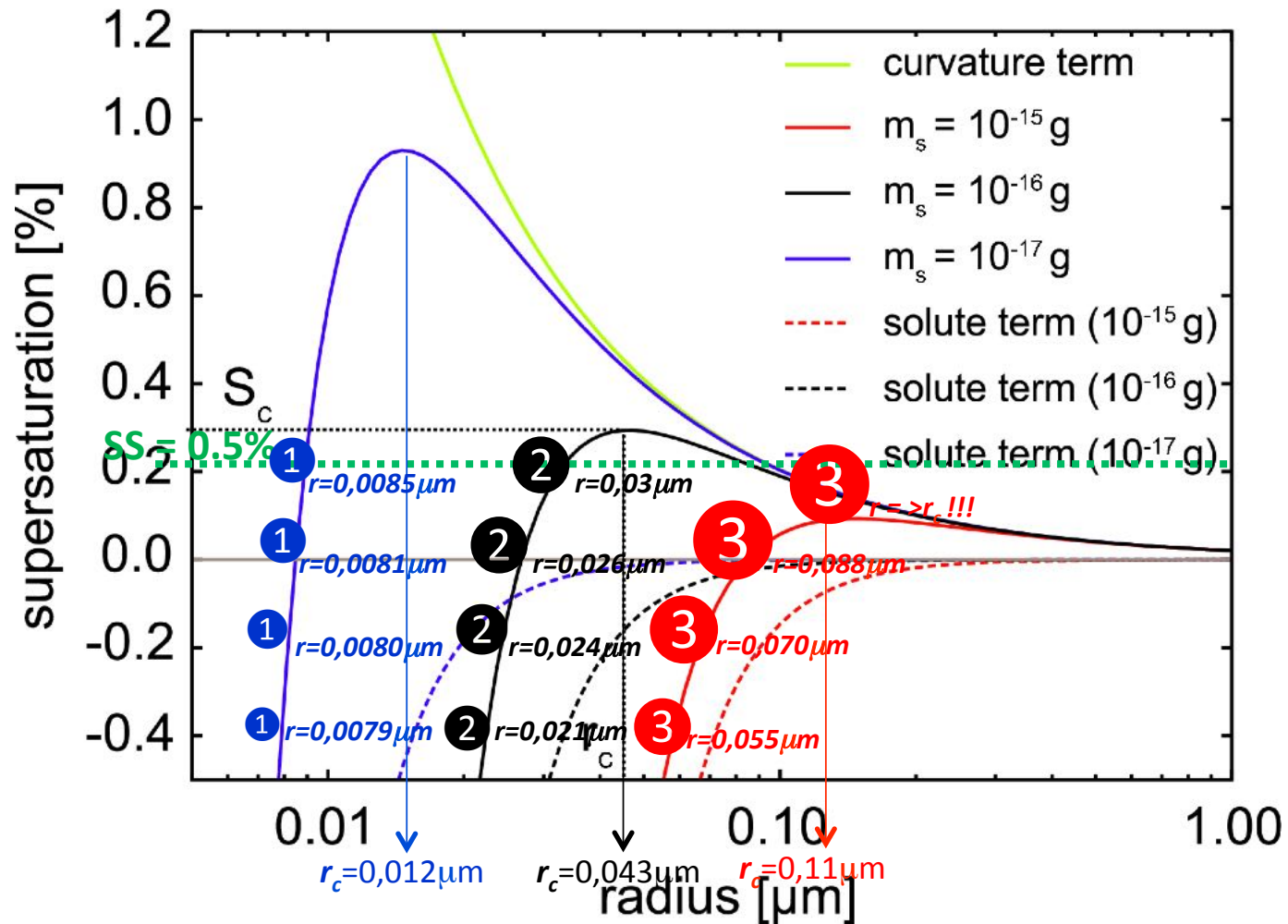
Se a SS permanecer constante, as três gotículas irão crescer até o tamanho:

- ①:  $r = 0,0081 \mu\text{m}$
- ②:  $r = 0,026 \mu\text{m}$
- ③:  $r = 0,088 \mu\text{m}$

e permanecerão deste tamanho enquanto SS não mudar.

Se a SS diminuir para  $SS = -0.15\%$ , as gotas evaporarão até o tamanho:

- ①:  $r = 0,0080 \mu\text{m}$
- ②:  $r = 0,024 \mu\text{m}$
- ③:  $r = 0,055 \mu\text{m}$

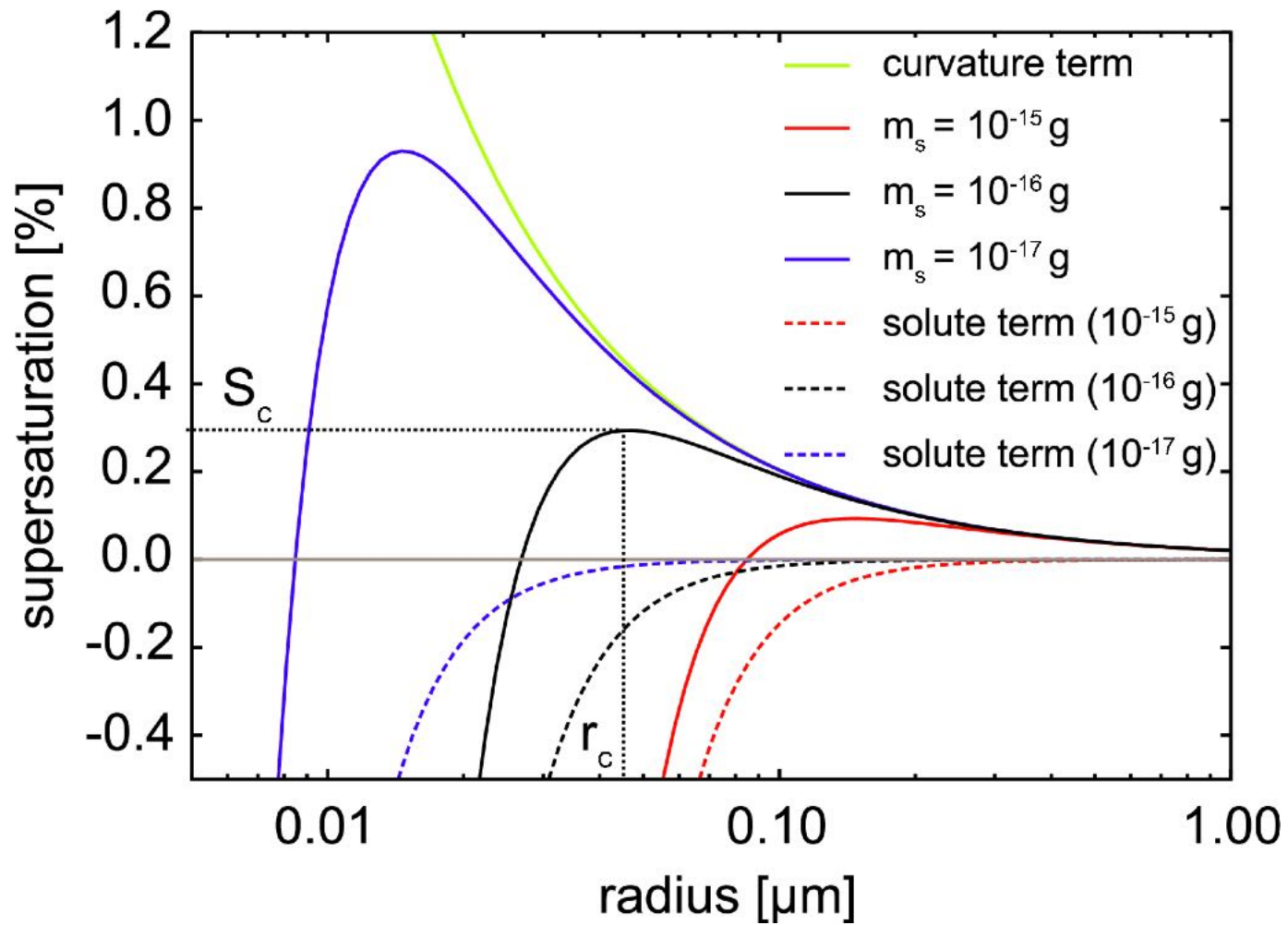


- ①:  $m_s = 10^{-17} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,012 \mu\text{m}$
- ②:  $m_s = 10^{-16} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,043 \mu\text{m}$
- ③:  $m_s = 10^{-15} \text{ g}$ ,  $r_c = 0,11 \mu\text{m}$

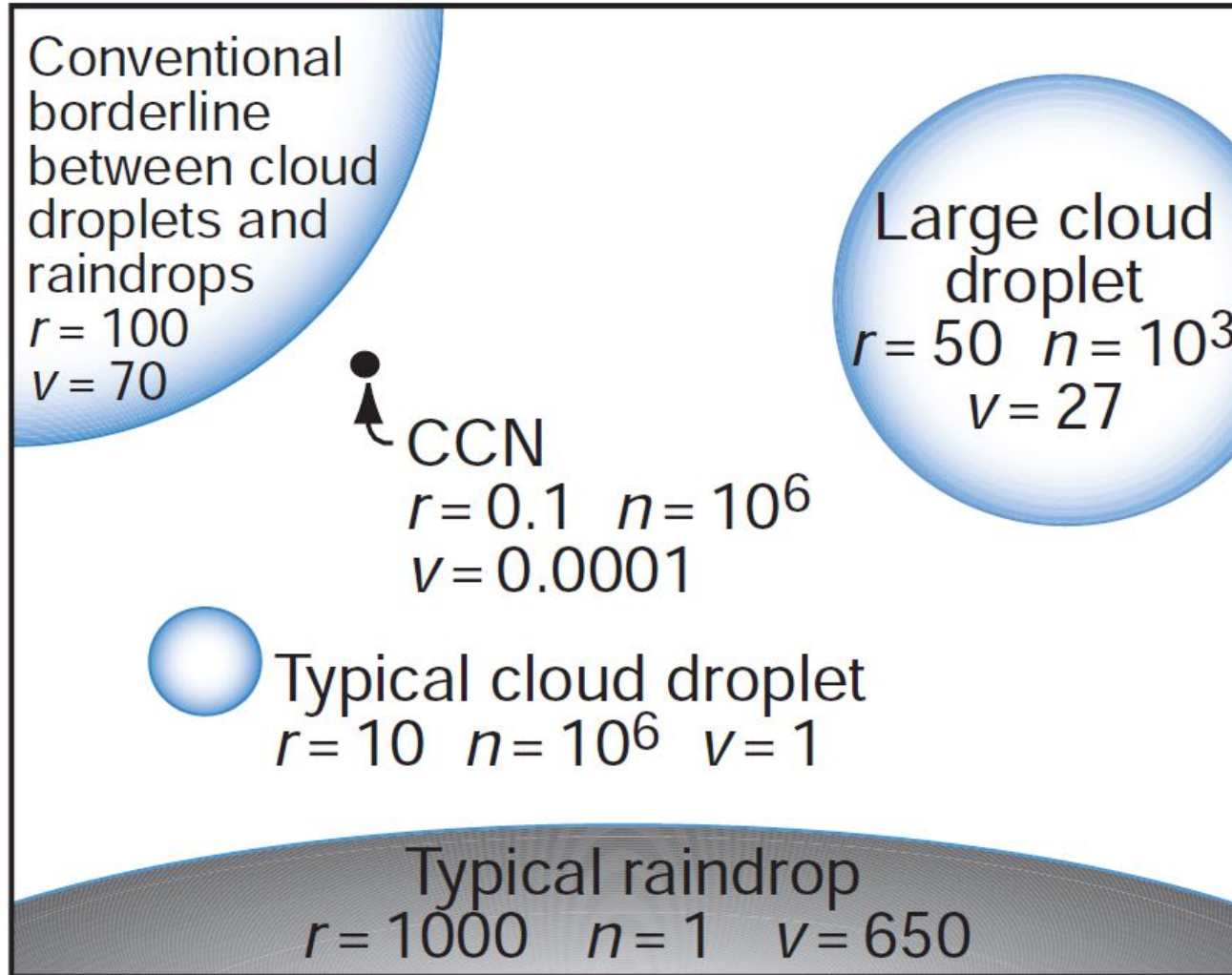
Se a SS permanecer constante, as três gotículas irão crescer até o tamanho:

- ①:  $r = 0,0085 \mu\text{m}$
- ②:  $r = 0,030 \mu\text{m}$
- ③:  $r > r_c !!!$

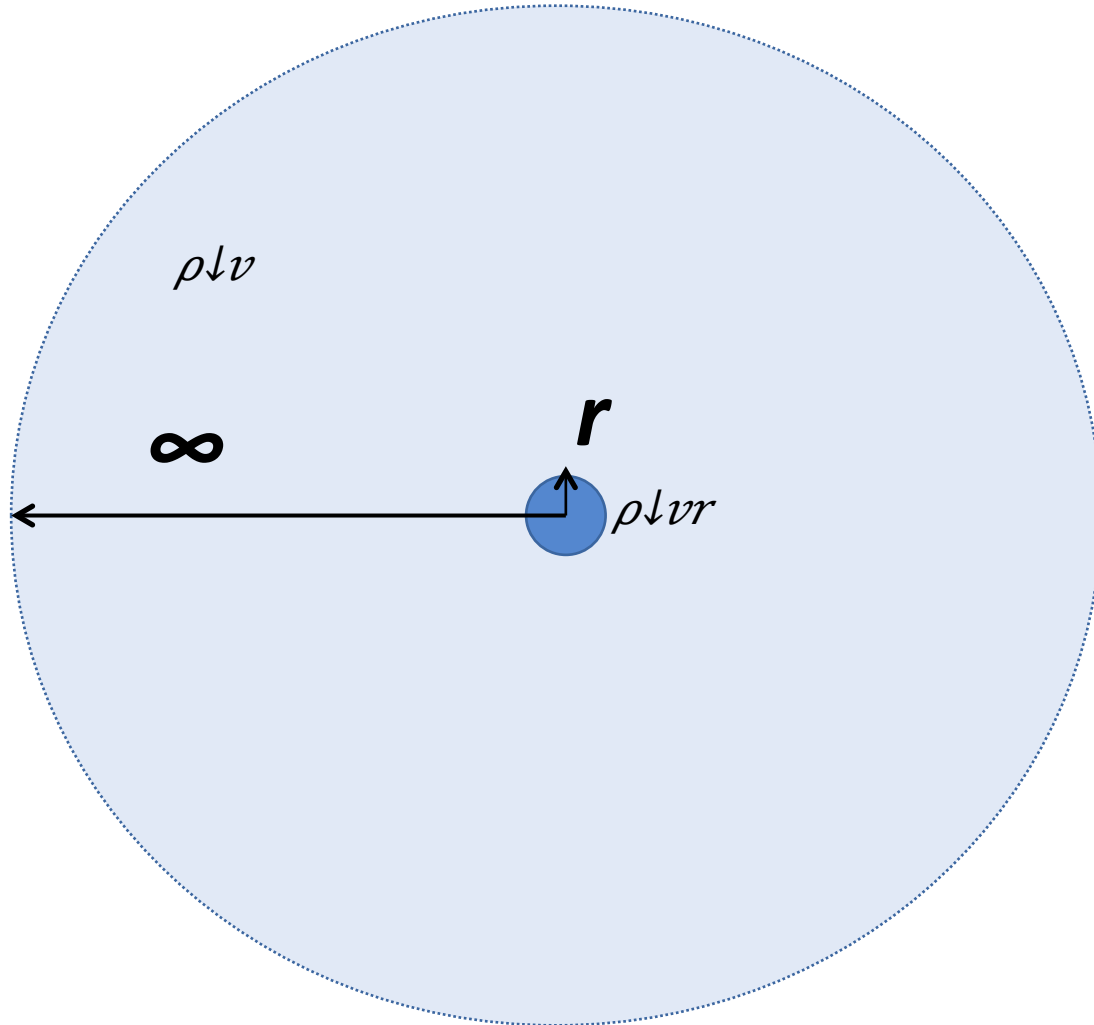
e ① e ② permanecerão deste tamanho enquanto SS não mudar, enquanto que ③ continuará crescendo.



- A gota irá crescer indefinidamente?
  - Se SS se manter acima de 0 sim!
- Isso quer dizer que as gotas de chuva se formam por condensação?
  - Gotas de chuva: O(mm)
- Vamos ver!



- Só para ter uma noção das dimensões de aerossóis, gotas de nuvem e de chuva
- Nucleação e crescimento de gotas envolvem ao menos 4 ordens de grandeza!
  - 0.1 a 1000  $\mu\text{m}$



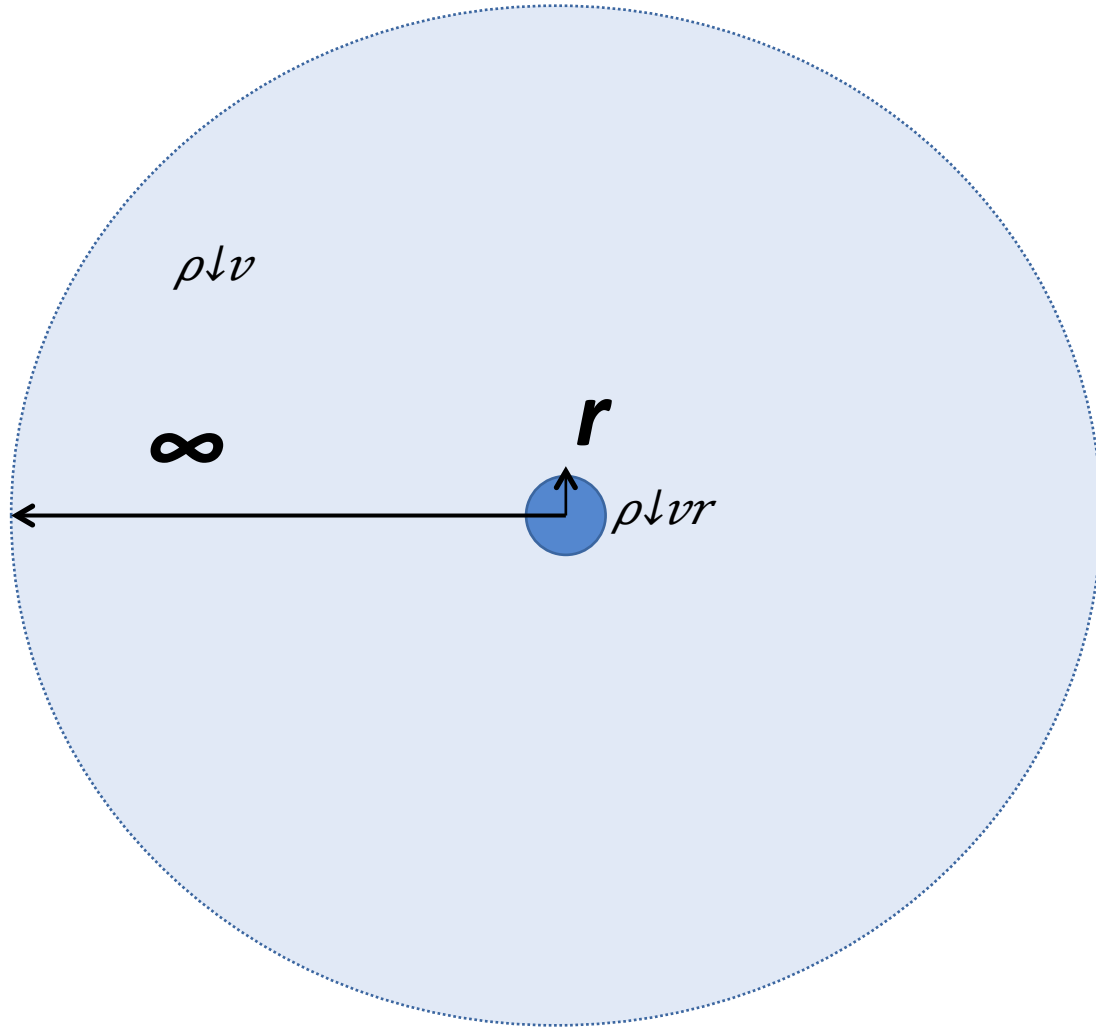
- Vamos focar em apenas uma gota
- Crescimento por difusão de vapor:

$$dm/dt = 4\pi D v r (\rho v - \rho vr)$$

- $D_v$ : coeficiente de difusão do vapor
- $P$ : densidade do vapor no ambiente ( $v$ ) e na superfície da gota ( $vr$ )
- Crescimento depende do gradiente de densidade de vapor
  - Quanto mais vapor no ambiente, maior será o crescimento
- Em função do raio, a relação é (derivação combina difusão de vapor, condução de calor, Clausius-Clapeyron e Köhler)

$$r dr/dt = 1/F_K + F_D (S - 1 - a/r + b/r^3) \quad (7)$$

- $F_K$  e  $F_D$  são termos associados à condução de calor e difusão de vapor, respectivamente



- Pela Eq. 7: taxa de crescimento decai com  $r$
- Se a gotícula é suficientemente grande (e.g.  $r > 1 \mu\text{m}$ )
  - $S \gg -a/r + b/r^3$
- Considerando  $S$  constante e integrando, temos

$$\int_{r_0}^r r(t) \cdot r dr = \frac{1}{F} \left( \frac{K}{D} + (S-1) \right) \int_0^t dt$$

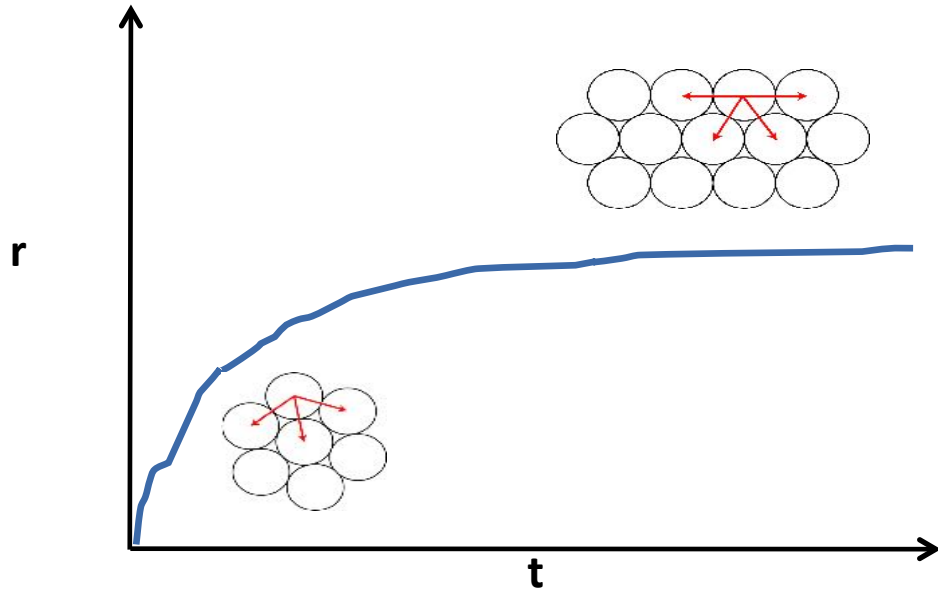
$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t} \quad (8)$$

- Onde

$$\xi = \frac{1}{F} \left( \frac{K}{D} + (S-1) \right)$$

- Eq. 8: equação parabólica de crescimento

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t} \quad (8)$$



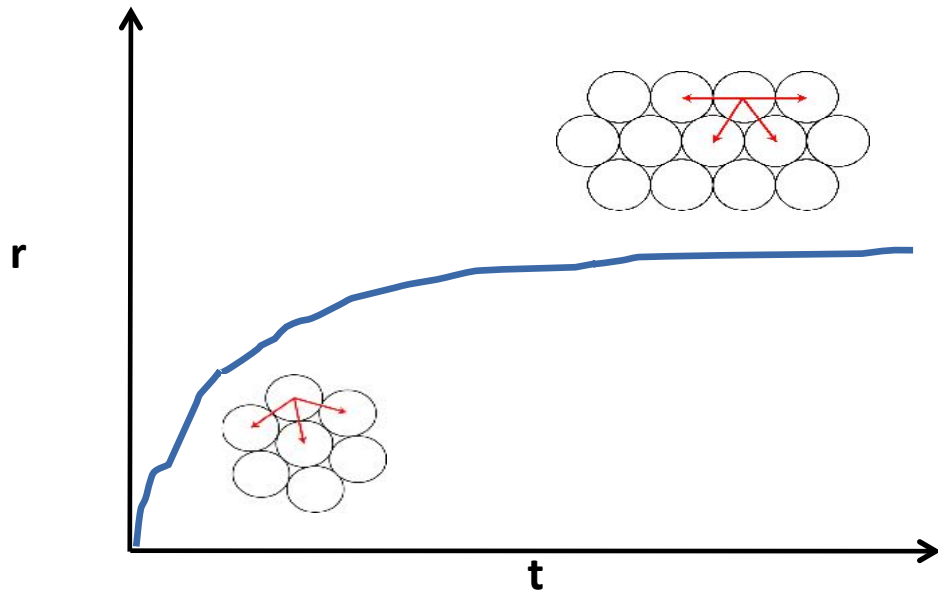
- Se eu considerar uma gota de chuva com  $r = 0.5 \text{ mm}$ 
  - Quanto tempo leva para condensar desde  $1 \mu\text{m}$ ?
- Para  $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $p = 800 \text{ hPa}$ ,  $1/F \downarrow K + F \downarrow D = 100 \mu\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Considerando  $S = 1,02$  ( $SS = 2\%$ )
- $t = \sim 17 \text{ horas!}$
- Conclusão: embora a condensação tenha papel fundamental na formação da nuvem, ela não é a responsável pela chuva



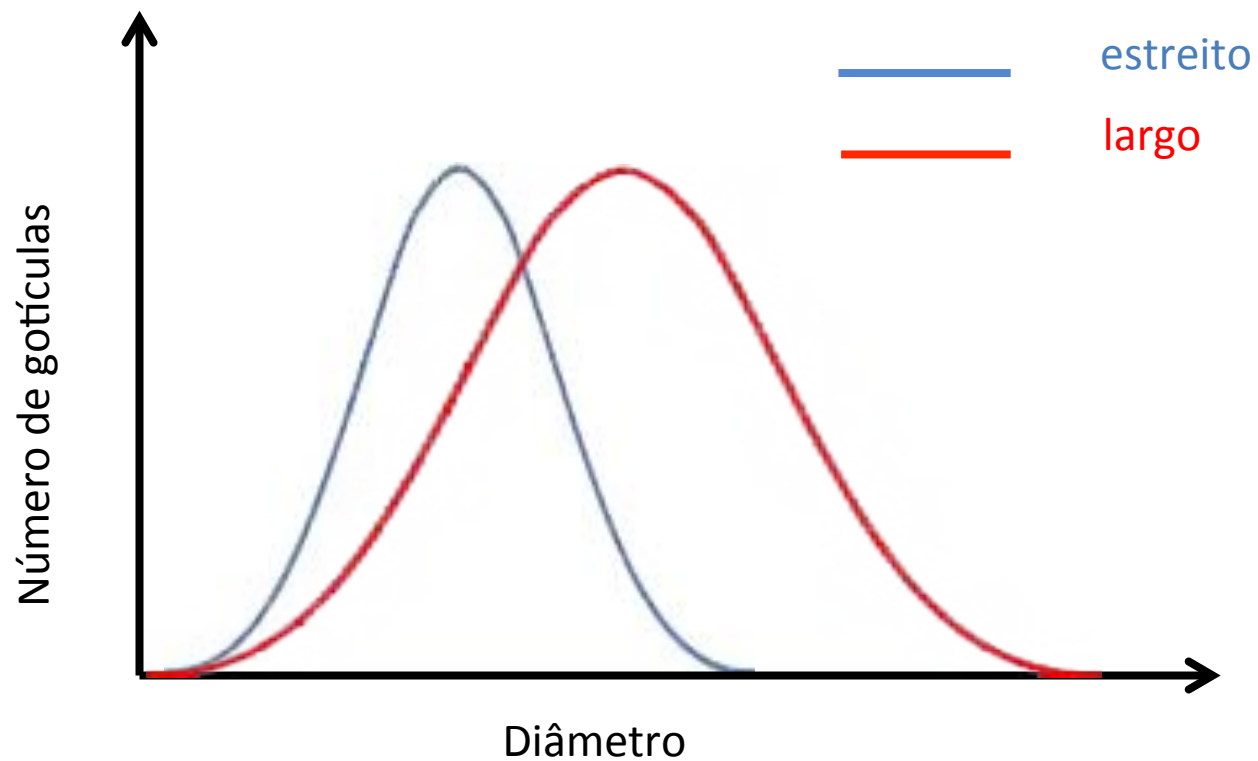
- Outros pontos a se considerar
  - Em uma nuvem, S não é constante

$$dS/dt = P - C$$

- P: produção -> depende de w
- C: consumo -> depende da condensação
- O vapor consumido por uma gota não estará disponível para as outras -> competição por vapor!

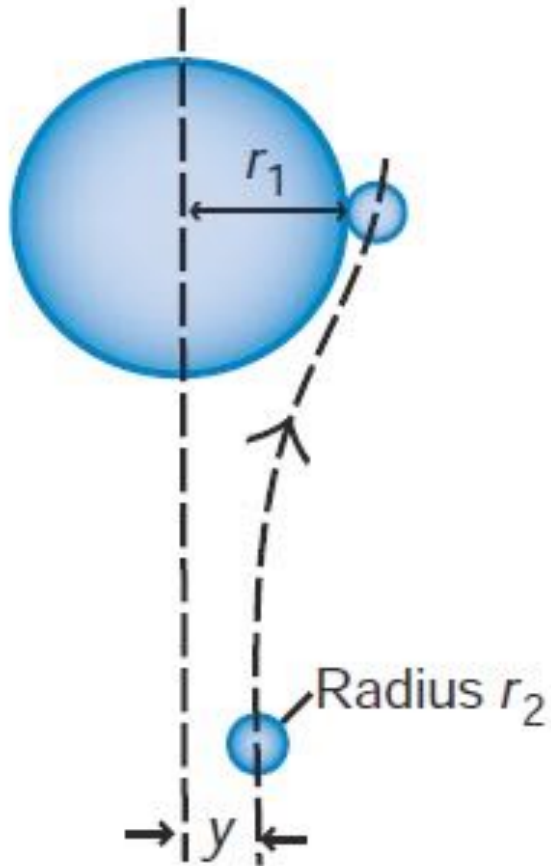


## Crescimento por colisão-coalescência



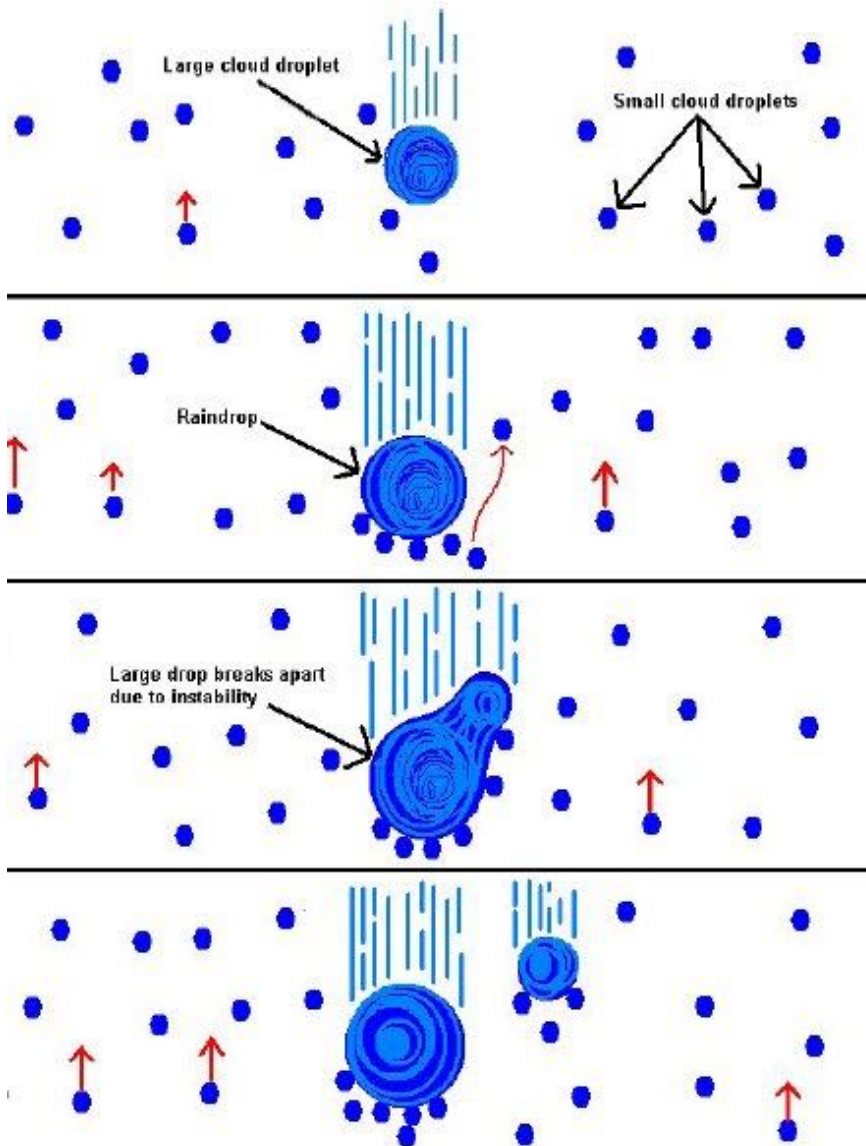
- Em uma nuvem coexistem gotas de diversos tamanhos
  - Conceito de distribuição de tamanho (DSD, em inglês)
- Quanto mais larga a DSD, maior o contraste entre o tamanho das gotas

## Crescimento por colisão-coalescência



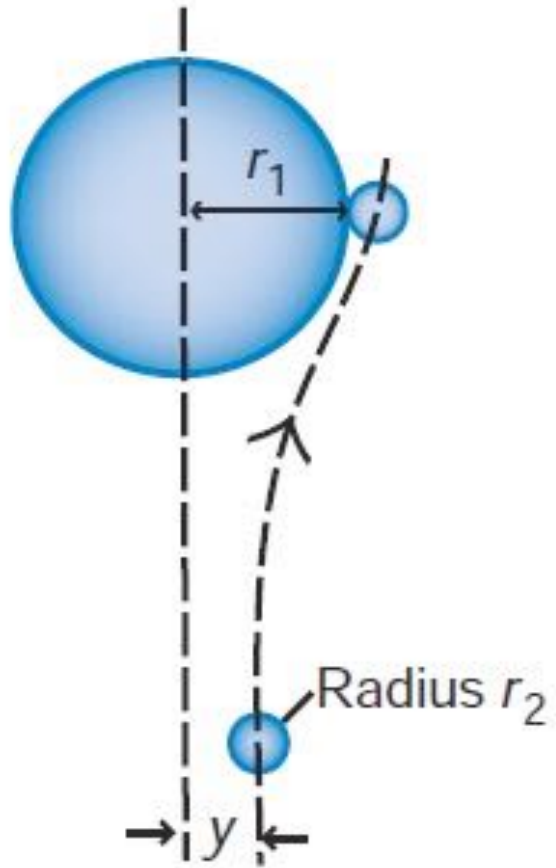
- Contraste de tamanho -> contraste na velocidade terminal
  - Balanço entre aceleração da gravidade e resistência do ar
  - Quanto maior a gota, mais rápido ela cai
- Portanto, haverá interação entre as gotas de diferentes tamanhos
  - Geralmente as gotas maiores caem mais rápido e interagem com as gotas menores no caminho

## Crescimento por colisão-coalescência



- Possíveis cenários de interação entre gotas grandes e pequenas:
  1. Gotas não colidem
    - A gota menor desvia, seguindo a corrente de ar ao redor da gota grande
  2. Elas colidem e se juntam -> coalescência
  3. Se juntam temporariamente, mas depois se separam (retendo características iniciais)
  4. Se juntam temporariamente e depois se dividem em várias gotas menores
- O caso 2 é o processo responsável pela chuva em nuvens quentes
  - Colisão-coalescência

## Crescimento por colisão-coalescência

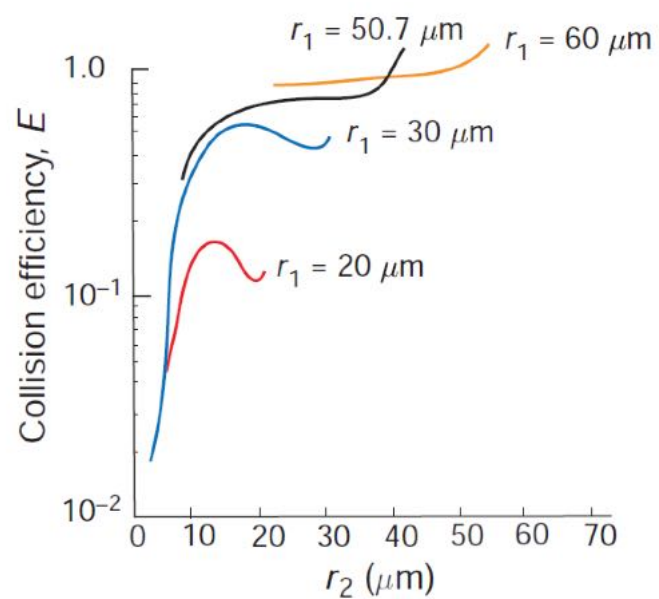


- Eficiência de colisão:

$$E(r_1, r_2) = y^2 / (r_1 + r_2)^2$$

- $y$ : distância crítica
  - Colisões não ocorrem para distâncias maiores

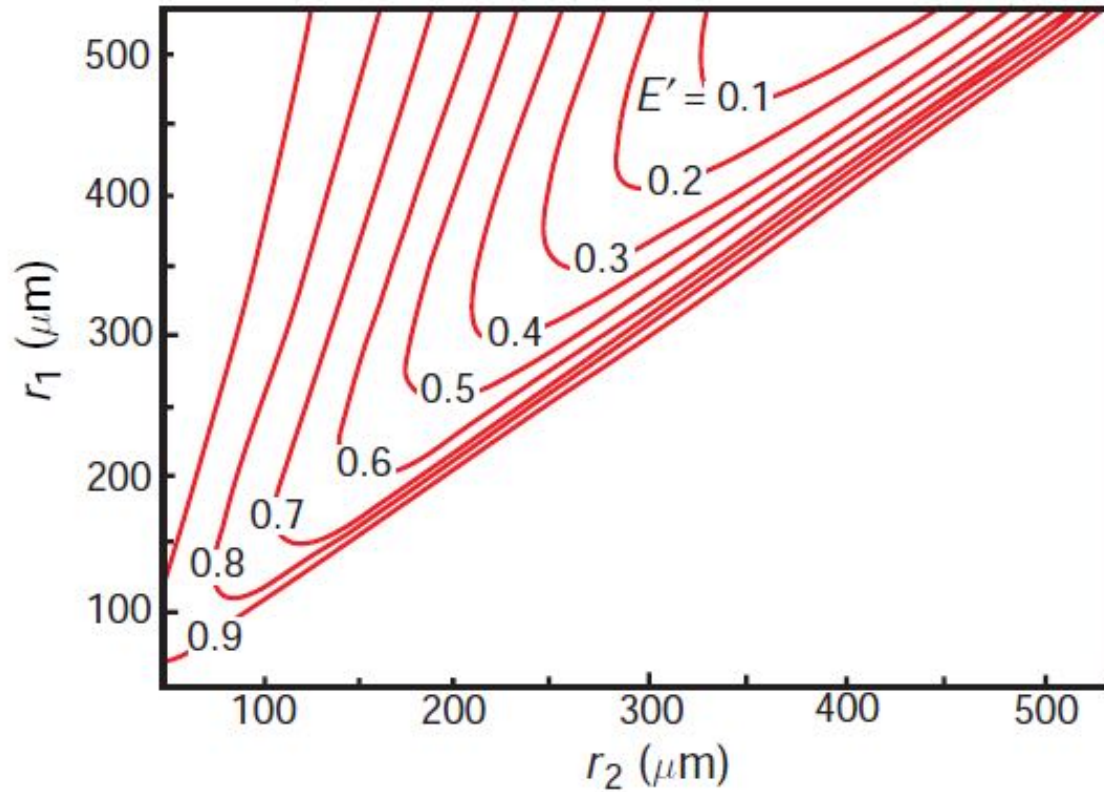
## Crescimento por colisão-coalescência



**Fig. 6.20** Calculated values of the collision efficiency,  $E$ , for collector drops of radius  $r_1$  with droplets of radius  $r_2$ . [Adapted from H. R. Pruppacher and J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Kluwer Academic Pub., 1997, Fig. 14-6, p. 584, Copyright 1997, with kind permission of Springer Science and Business Media. Based on *J. Atmos. Sci.* **30**, 112 (1973).]

- Essa eficiência geralmente aumenta com  $r_1/r_2$ 
  - Ou seja, quanto mais parecidas as gotas, maiores serão as chances de colidirem
- Se  $r_2 \ll r_1$ 
  - A gota menor tem pouca massa e segue a corrente de ar ao redor da gota grande
- Se  $0.6 < r_2/r_1 < 0.9$ 
  - Há uma redução na eficiência devido a velocidades terminais semelhantes
- Se  $r_2 \sim r_1$ 
  - Mesmo com velocidades terminais parecidas,  $E$  aumenta de novo pois as gotas vão colidir prontamente caso se aproximem
- Note que  $E$  tende a aumentar com  $r_1$

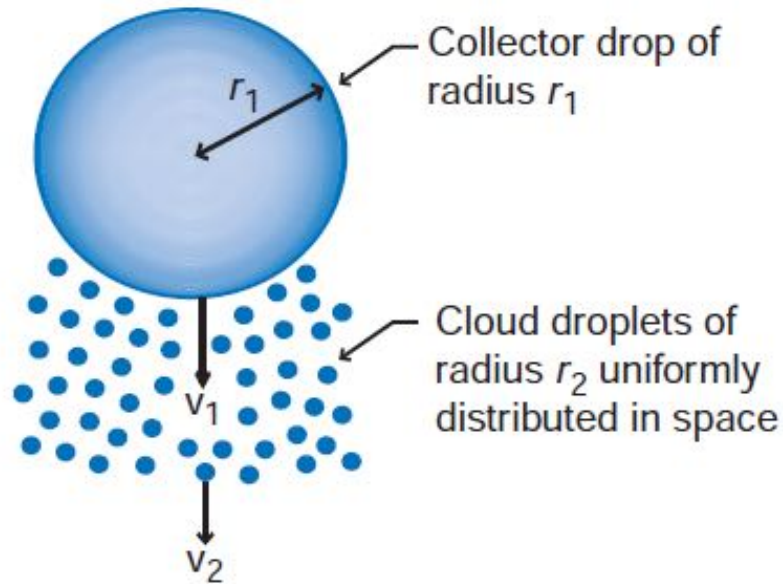
## Crescimento por colisão-coalescência



**Fig. 6.22** Coalescence efficiencies  $E'$  for droplets of radius  $r_2$  with collector drops of radius  $r_1$  based on an empirical fit to laboratory measurements. [Adapted from *J. Atmos. Sci.* 52, 3985 (1995).]

- Caso as gotas colidam, ainda haverá uma probabilidade  $E'$  de elas coalescerem
- Novamente, maior probabilidade para  $r_2 \sim r_1$ 
  - Altas probabilidades quando um raio é bem maior que o outro também
- Entre os dois extremos,  $E'$  reduz pois pode haver a adição de ar na hora da coalescência
  - Gotas intermediárias geram deformação na gota coletora
- Juntando as duas probabilidades, temos a probabilidade de coleta  $E_c = EE'$

## Crescimento por colisão-coalescência



**Fig. 6.23** Schematic illustrating the continuous collection model for the growth of a cloud drop by collisions and coalescence.

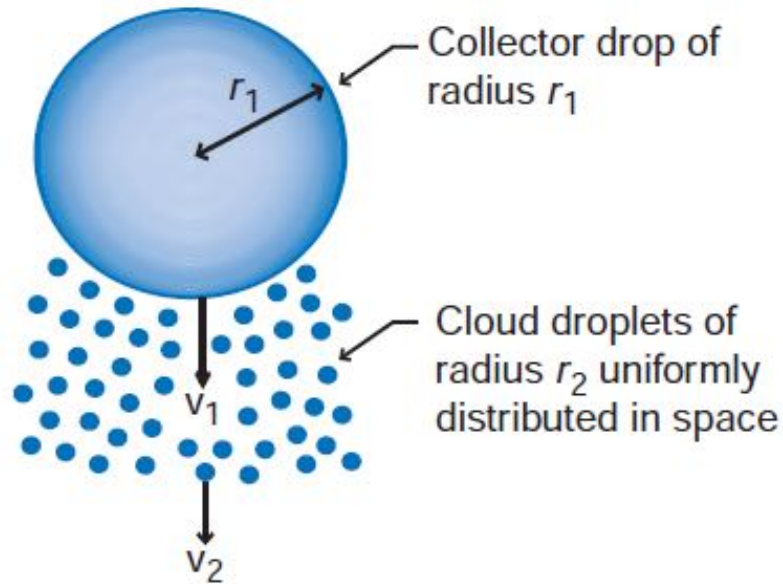
- Considerando uma nuvem uniforme com gotas de raio  $r_2$ 
  - Mais uma gota coletora de raio  $r_1$
- A taxa de crescimento por colisão-coalescência fica

$$dM/dt = \pi r_1^2 (v_1 - v_2) w_L E_c$$

- $w_L$  é o conteúdo de água líquida das gotas  $r_2$  (em  $\text{kg m}^{-3}$ )
- Quanto maior a diferença  $(v_1 - v_2)$  e  $w_L$ , maior será o crescimento
  - $E_c$  também é alto nesse caso



## Crescimento por colisão-coalescência



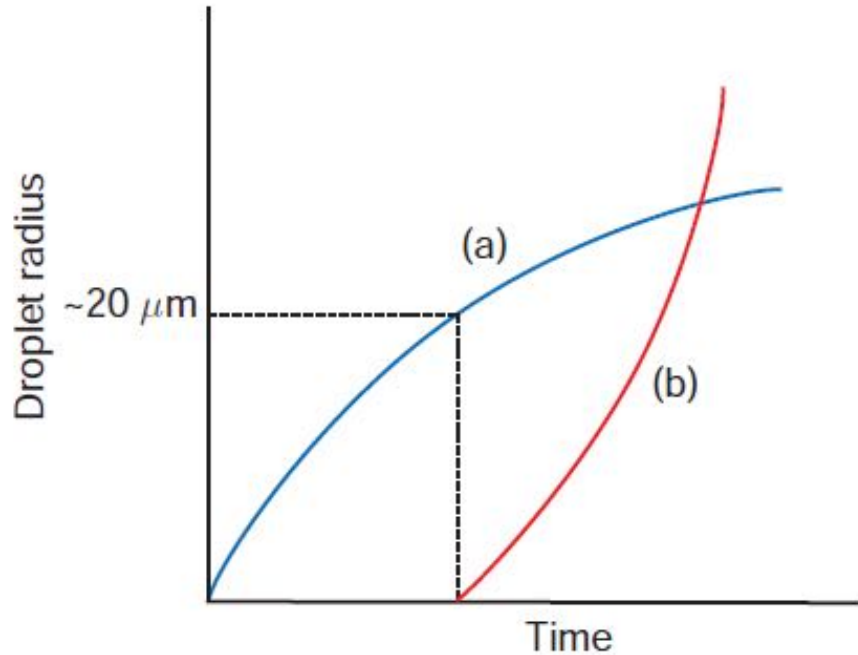
**Fig. 6.23** Schematic illustrating the continuous collection model for the growth of a cloud drop by collisions and coalescence.

- Se assumirmos que  $v_1 \gg v_2$ ,  $E_c \sim E$ 
  - Eficiência de coalescência  $E' = 1$
- Passando para crescimento do raio ( $M = 4/3 \pi r_1^3 \rho$ )

$$\frac{dr_1}{dt} = v_1 w E / 4 \rho$$

- Tanto  $v_1$  quanto  $E$  aumentam com  $r_1$ 
  - Colisão-coalescência só é eficiente para gotas já relativamente grandes

## Crescimento por colisão-coalescência



**Fig. 6.15** Schematic curves of droplet growth (a) by condensation from the vapor phase (blue curve) and (b) by collection of droplets (red curve).

- Se assumirmos que  $v_1 \gg v_2$ ,  $E_c \sim E$ 
  - Eficiência de coalescência  $E' = 1$
- Passando para crescimento do raio ( $M = 4/3 \pi r^3 \rho$ )

$$\frac{dr}{dt} = v w E / 4 \rho$$

- Tanto  $v_1$  quanto  $E$  aumentam com  $r_1$ 
  - Colisão-coalescência só é eficiente para gotas já relativamente grandes
- Ativa para  $r \sim 20 \mu\text{m}$
- Condensação (inicialmente) + colisão-coalescência (posteriormente) = chuva!

## Observações de microfísica na Amazônia – interação aerossóis-nuvens



- Como se mede o tamanho das gotas dentro da nuvem?
- O método mais direto é equipar aviões com sondas abaixo das asas
- Esse tipo de sonda emite um laser entre as duas pontas
- Quando uma gota passa entre as pontas, ela gera uma sombra em um dos detectores
- Portanto, mede-se o tamanho da gota em proporção ao tamanho da sombra





- Geralmente são usadas mais de uma sonda
  - Até  $r = 25 \mu\text{m}$  (gotas de nuvem)
  - $25 \mu\text{m}$  a centenas de  $\mu\text{m}$  (gotas de garoa)
  - Centenas de  $\mu\text{m}$  a alguns mm (gotas de chuva)
- Gotas grandes são menos numerosas
  - Necessitam de maior volume de amostragem no instrumento

- Experimento GoAmazon2014/5 – Fev/Mar e Set/Out de 2014

G-1

Americana, voa até 7 km, autonomia ~4 horas



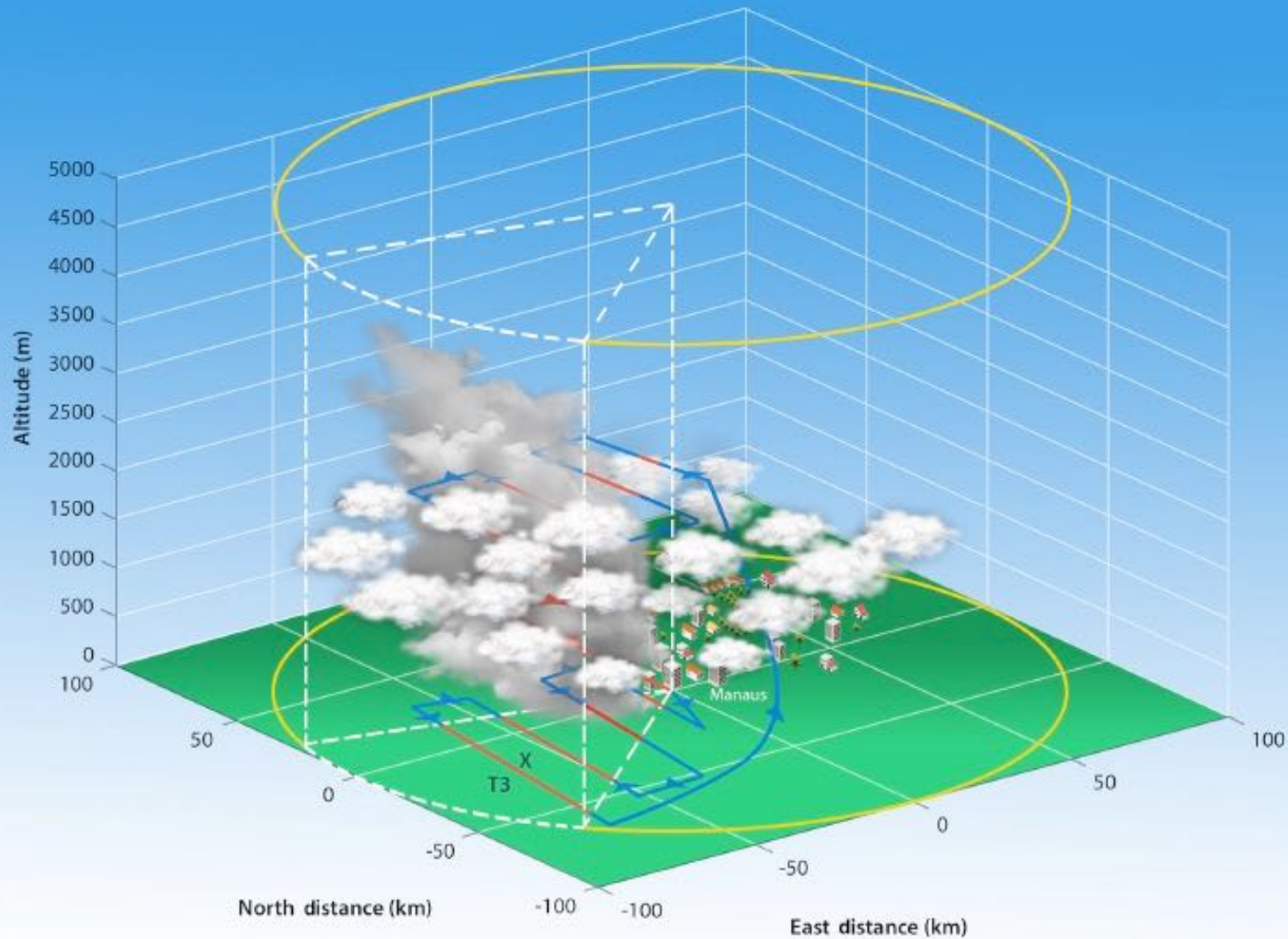
HALO

Alemã, voa até 15 km, autonomia ~9 horas





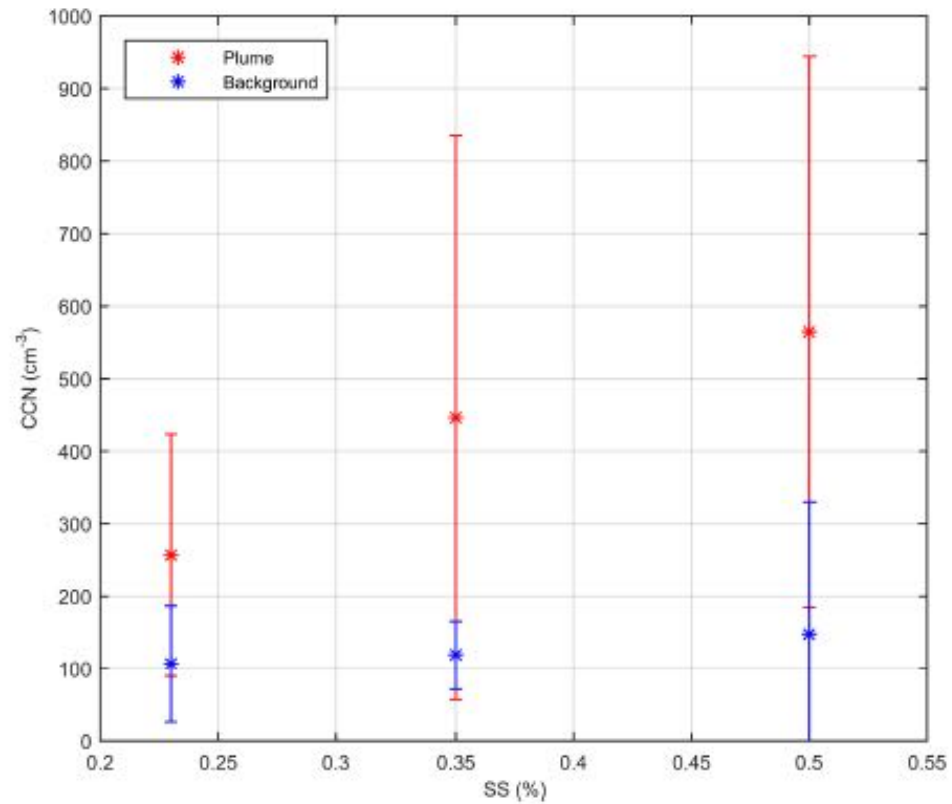




- Poluição de Manaus se dispersa para SO, conforme o vento dominante
- Zig-zag do avião entrando e saindo da pluma
  - Nuvens limpas e poluídas
  - O que muda?

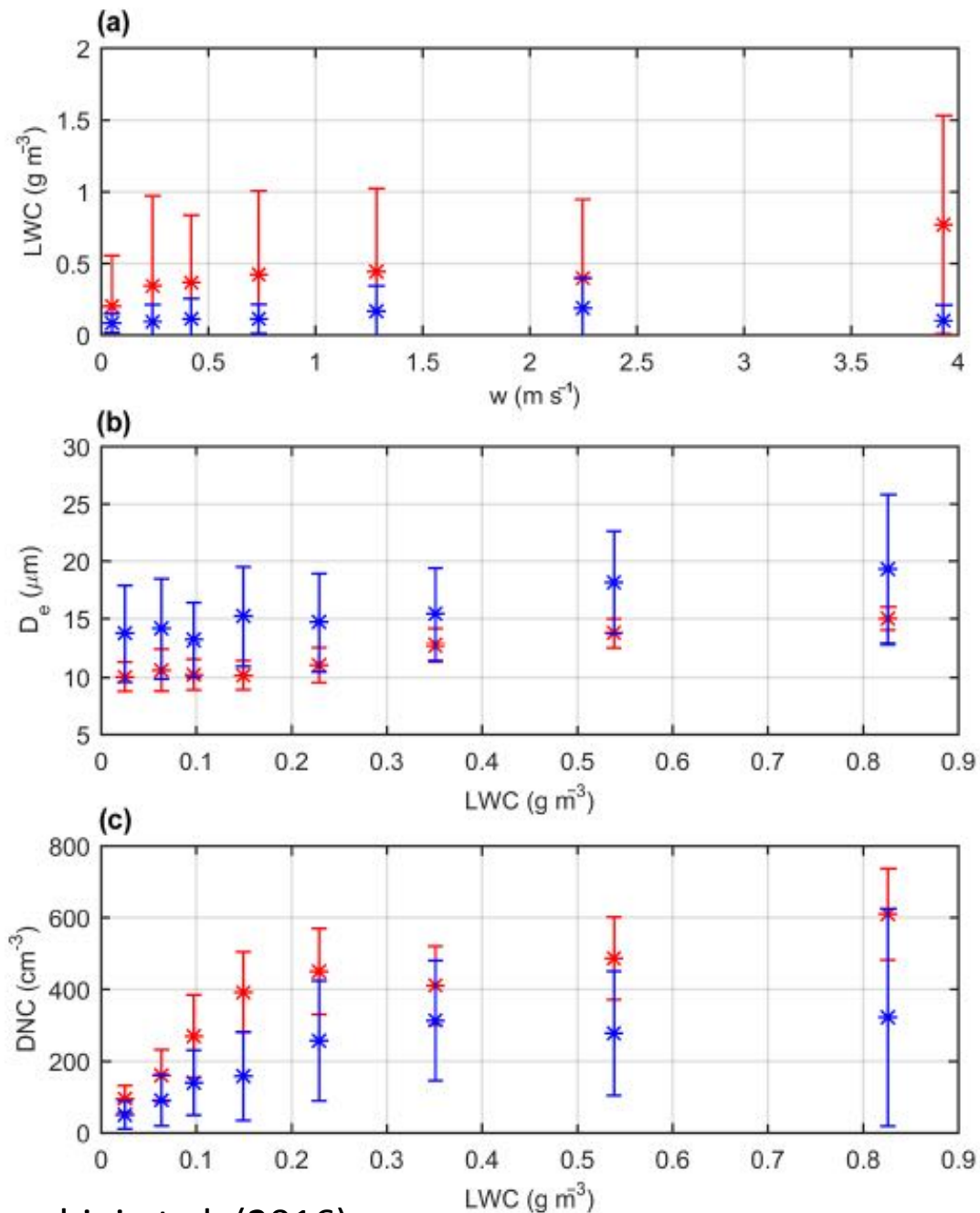


- Número de CCN 2-4 vezes maior na pluma
  - Dependendo da SS

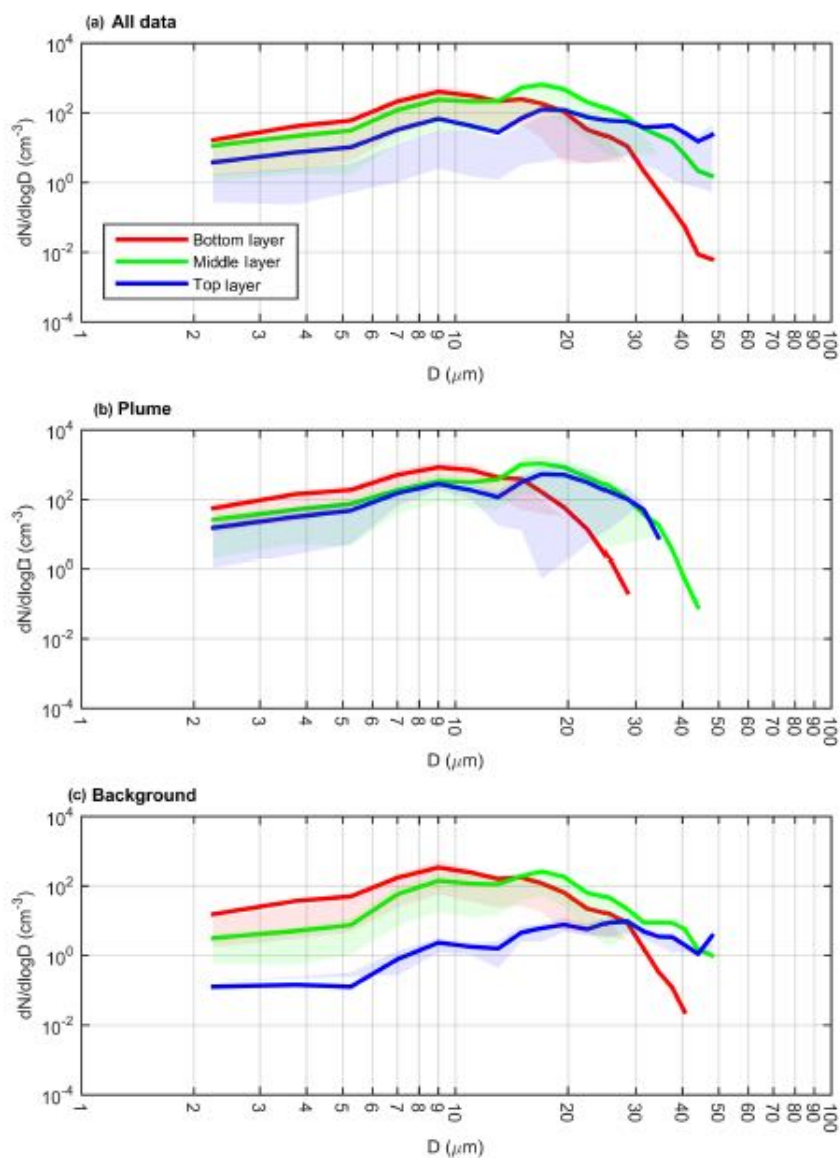


**Figure 5.** CCN concentrations as function of supersaturation. Measurements inside the plume are shown in red, while background conditions are represented in blue.

Cecchini et al. (2016)

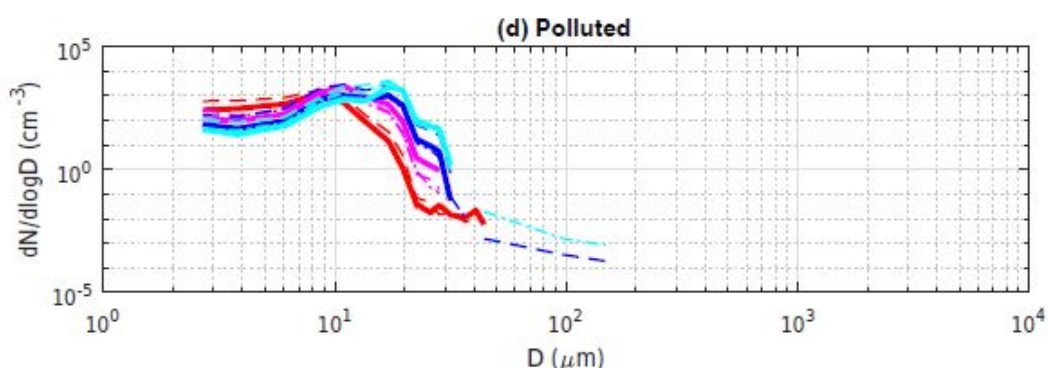
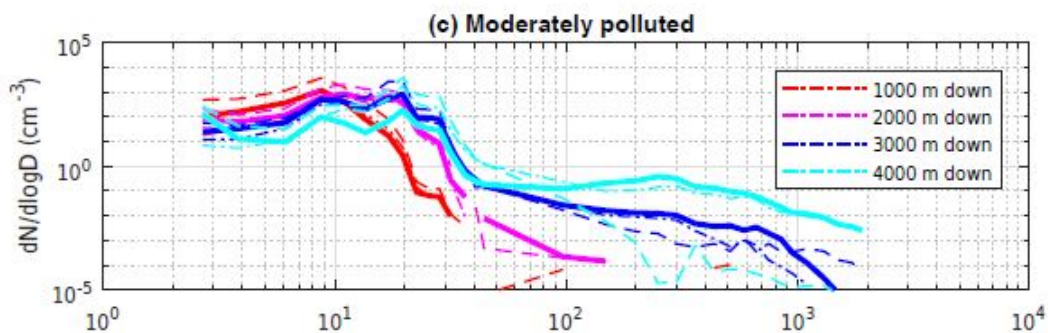
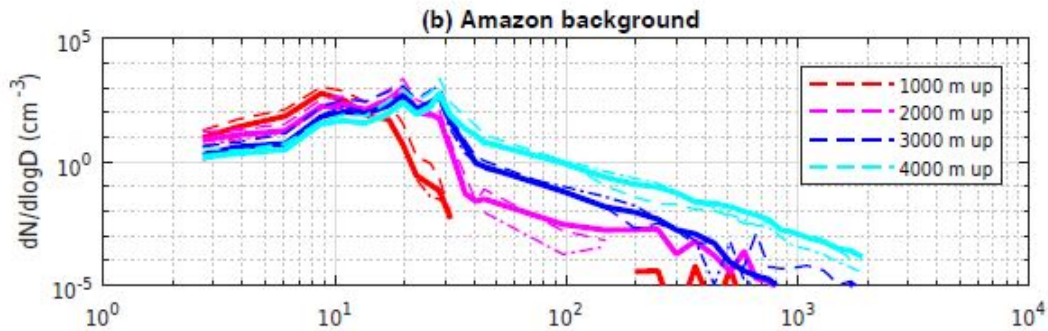
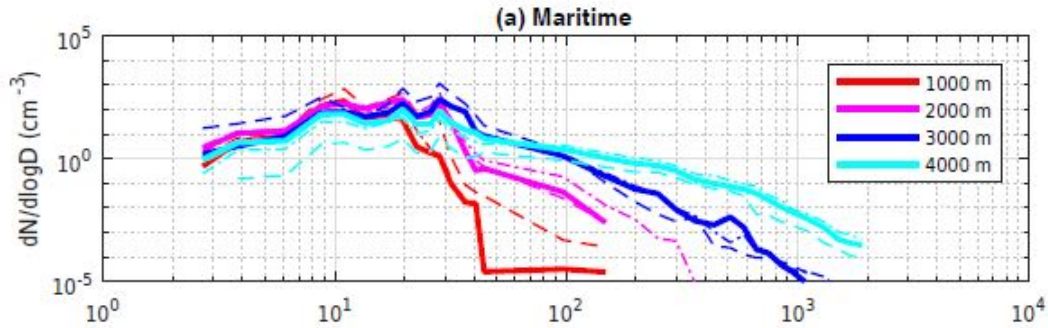


- Número de CCN 2-4 vezes maior na pluma
  - Dependendo da SS
- Gráfico à esquerda se referem ao primeiro km desde a base da nuvem
- Nuvem poluída
  - ~Dobro de número de gotas
  - Gotas menores (para mesmo LWC)
  - Competição pelo vapor
  - Espera-se menor SS em nuvens poluídas -> maior consumo do vapor
- Gráfico a)
  - Como as gotas poluídas são menores, elas crescem mais rapidamente por condensação
  - Isso aumenta LWC



**Figure 8.** Averaged DSDs for three different cloud layers: bottom, middle, and top of the warm layer. Graph (a) shows the results for all DSDs irrespective of classification, while (b) is for polluted DSDs only, and (c) for background. Lines represent averages, while the shaded areas represent the dispersion between the 25 and 75 % quantiles.

- DSDs dentro e fora da pluma
  - Maiores alturas acima da base -> proxy para a evolução temporal
- Nuvem poluída
  - Menor diferença entre as DSDs (b)
  - Principalmente diâmetros pequenos
- Note que nas nuvens limpas (c) as gotas grandes crescem consumindo as pequenas
  - Consistente com o crescimento por colisão-coalescência
- Gotas menores em nuvens poluídas
  - Atraso do início da coalescência-coalescência
  - Atrasa a formação da chuva por processos quentes



Costa  
CCN ~ 120 cm<sup>-3</sup>

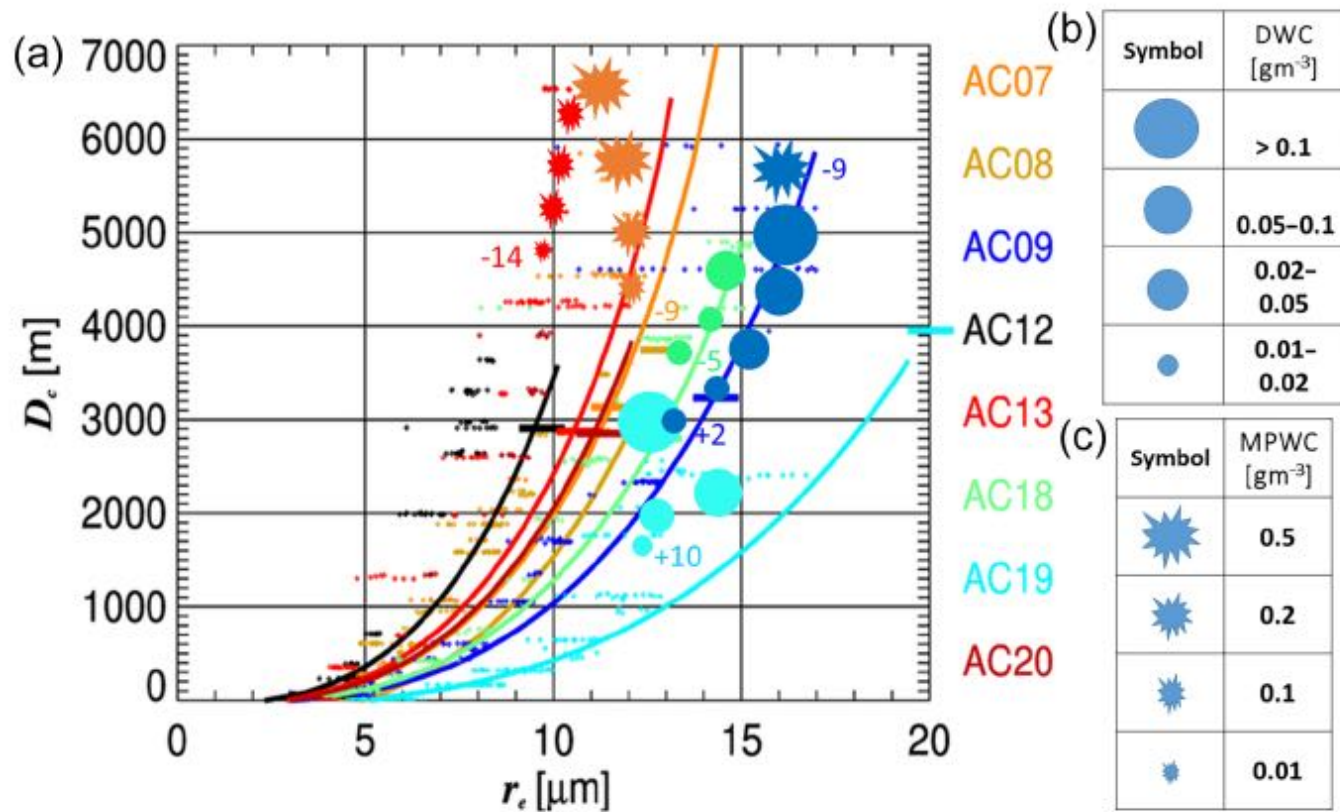
Norte  
Amazônia  
CCN ~ 400 cm<sup>-3</sup>

Sul  
Amazônia  
CCN ~ 1200 cm<sup>-3</sup>

Arco  
Desmatamento  
CCN ~ 2000 cm<sup>-3</sup>

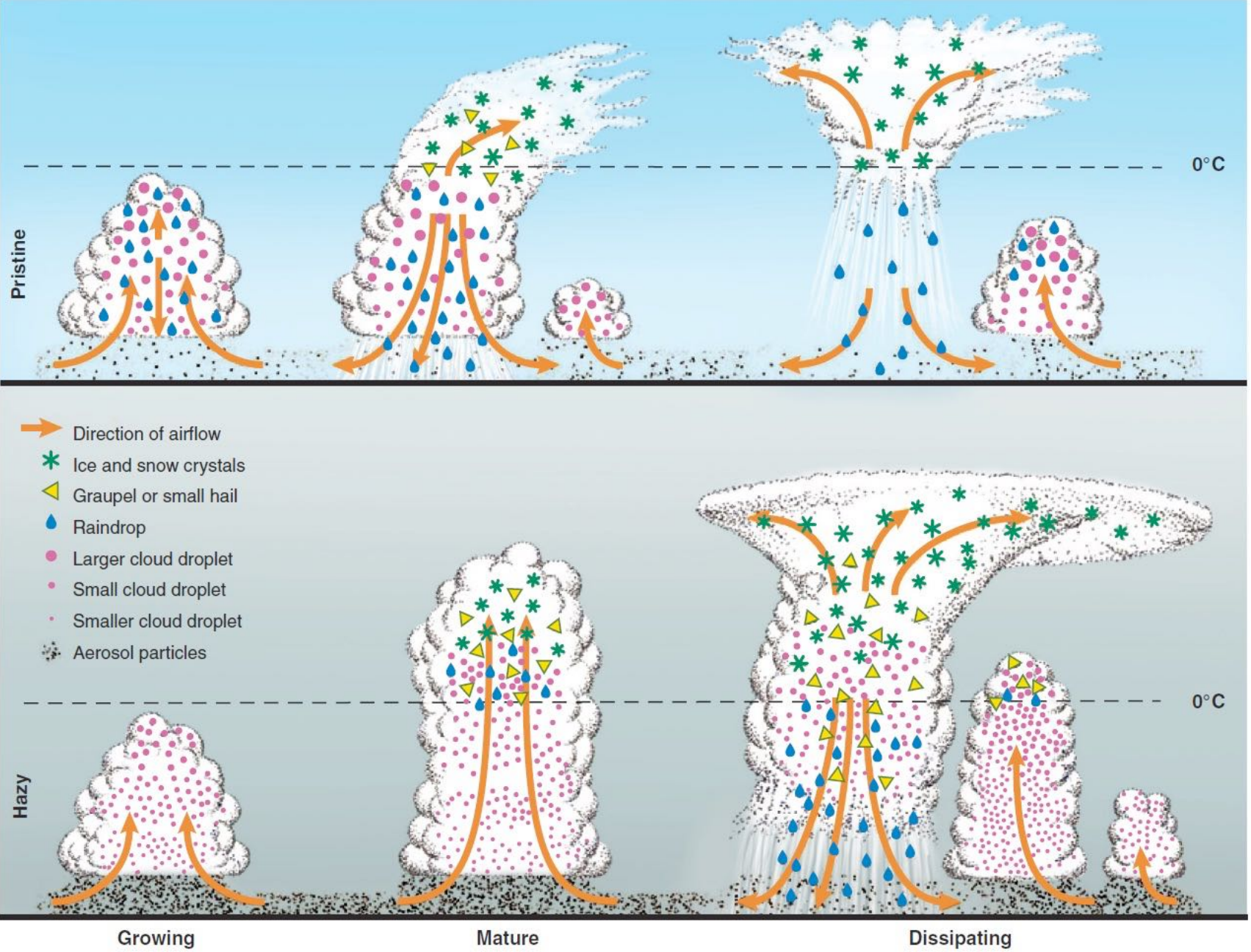
Cecchini et al. (2017)

- O mesmo padrão é observado em outras regiões da Amazônia
  - Independente do tipo de poluição, o efeito qualitativo é o mesmo
- Se a poluição atrasa a chuva em nuvens quentes, as gotas permanecem por mais tempo dentro das nuvens
  - São carregadas até níveis mais altos
  - Início da formação da chuva mais acima
  - Pode acontecer de não formar chuva quente -> mais massa para os processos mistos e frios



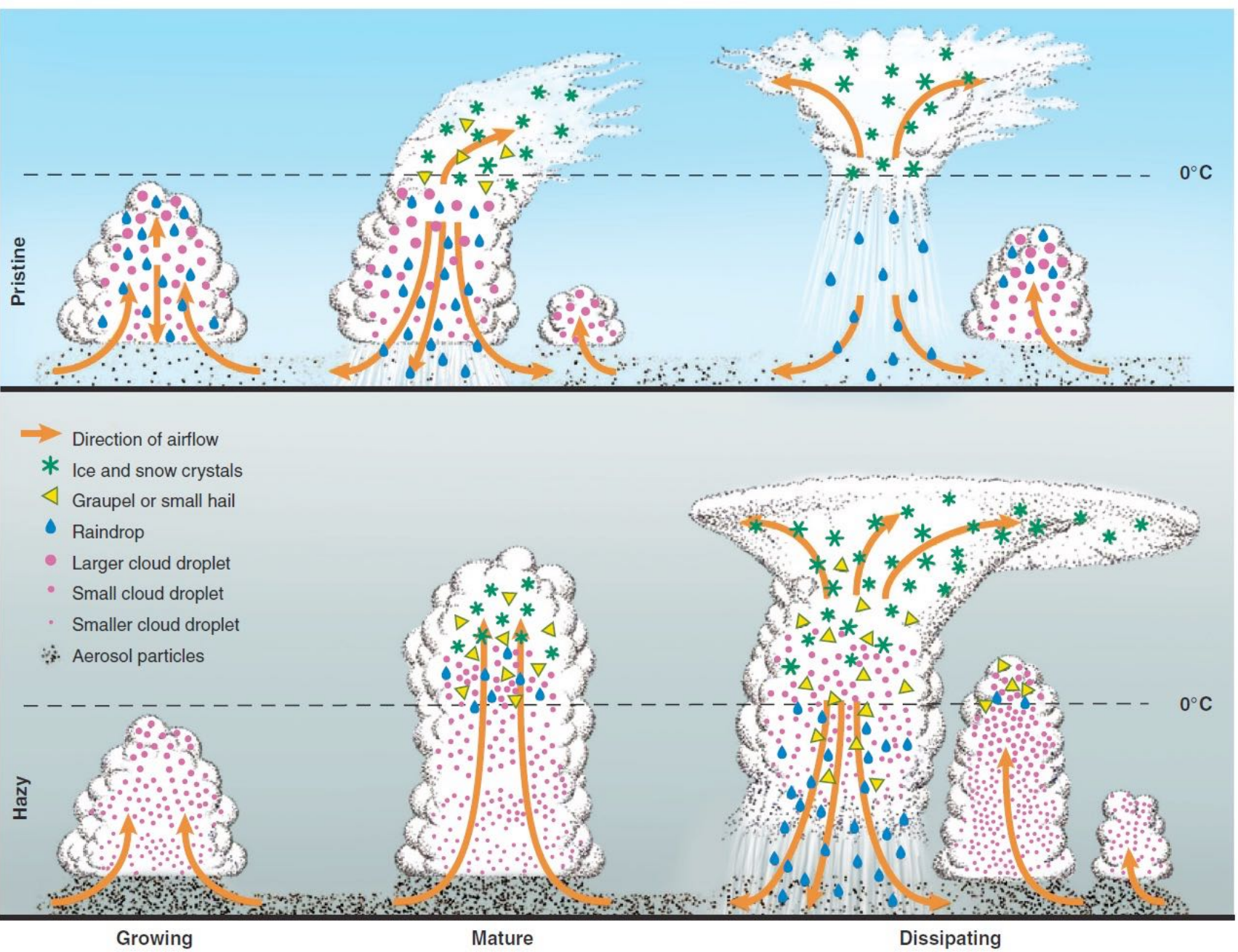
Braga et al. (2017)

- Iniciação da precipitação
  - $\text{LWC} > 0.01 \text{ g m}^{-3}$  para  $75 \mu\text{m} < D < 250 \mu\text{m}$
  - Definição pode variar dependendo da aplicação
- Temperatura iniciação
  - $10 \text{ }^\circ\text{C}$  -> marítimas
  - $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  -> N Amazônia
  - Não foi detectada chuva na fase quente das nuvens poluídas
- Detectamos coexistência entre gotas super-resfriadas e gelo nas nuvens poluídas
  - Nuvens limpas praticamente só gelo acima da isoterma de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (não mostrado aqui)



- Resumo da intensificação da convecção pelos aerossóis
- Não é uma visão completa do problema
  - Muitos desenvolvimentos depois de 2008
- Gotas menores crescem mais rápido por condensação
- Mas também evaporam mais rápido!
- Condensação ocorre primariamente no centro da nuvem
- Evaporação nas bordas
- A nuvem ficará mais intensa dependendo de qual for dominante

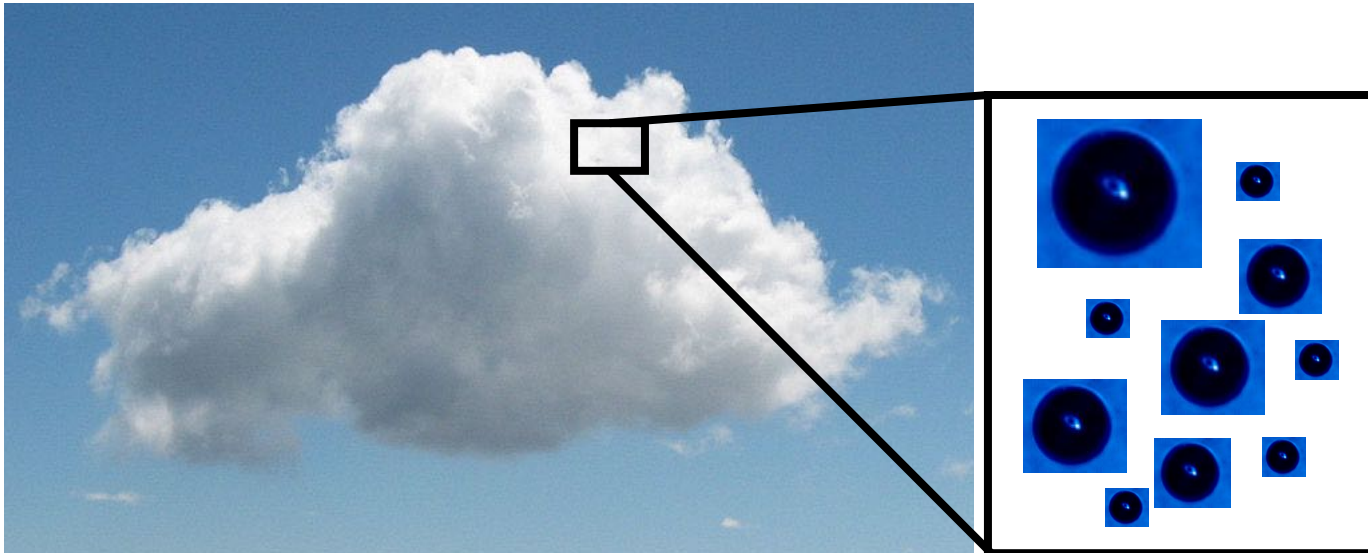
Rosenfeld et al. (2008)



- O que determina se os aerossóis irão intensificar ou enfraquecer as nuvens?
- Tamanho da nuvem
  - Nuvens pequenas -> dominam os efeitos na borda
  - Nuvens grandes -> dominam os efeitos no centro
- Umidade do ambiente
  - Ambiente seco -> favorece evaporação
  - Ambiente úmido -> favorece condensação
- Relação entre aerossóis e nuvens é altamente não-linear
  - Ainda não compreendemos muito bem
  - Motivo das incertezas mencionadas no IPCC

Rosenfeld et al. (2008)

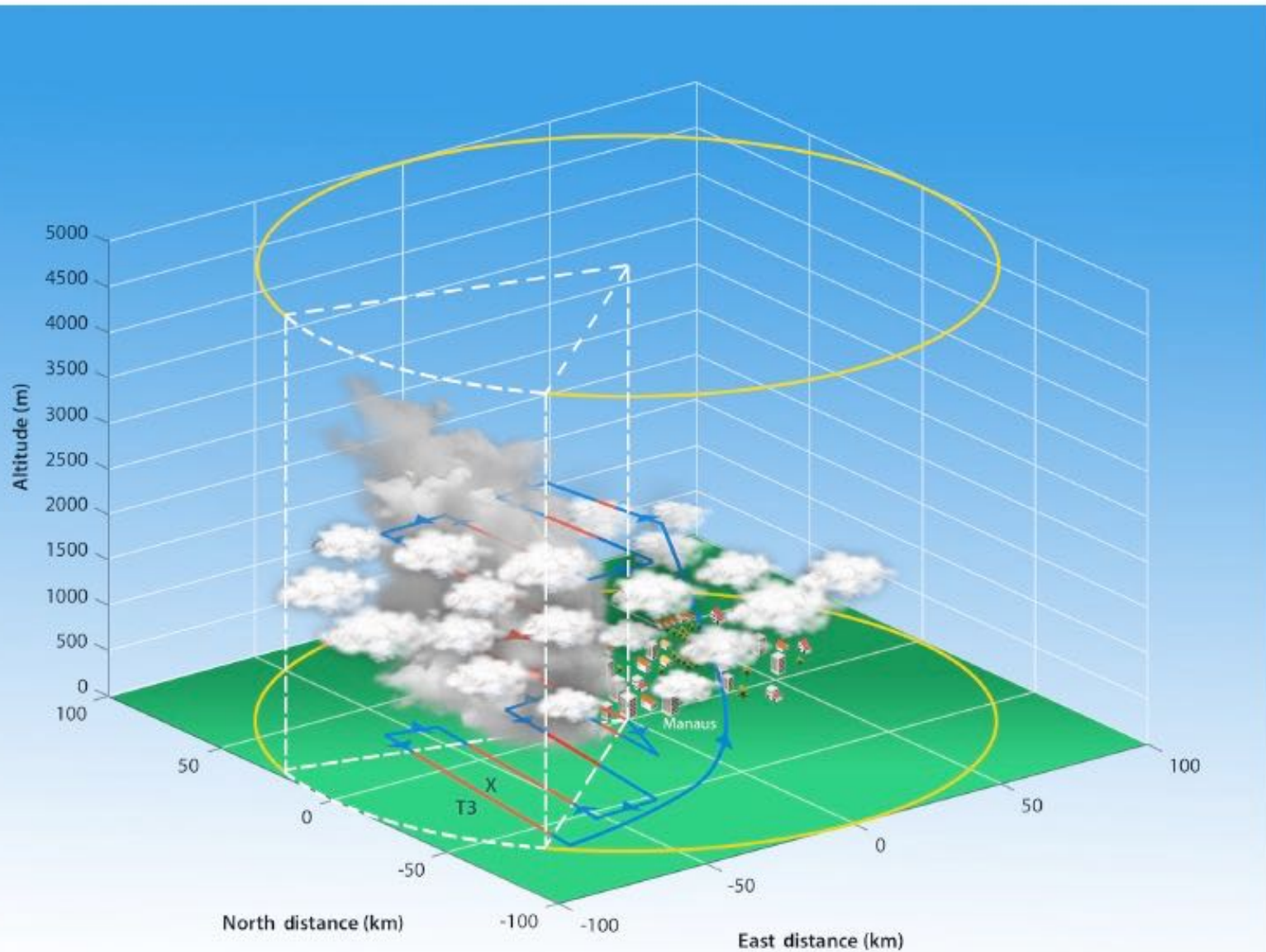
## CONCLUINDO



- Hoje vimos como as gotas se formam e crescem
  - Só pode haver nucleação heterogênea na atmosfera
- Crescimento por condensação
  - Inversamente proporcional a  $r$
  - Não gera chuva
- Crescimento por colisão-coalescência
  - Proporcional a  $r$
  - Mas só começa a partir de  $r \sim 20 \mu\text{m}$



## CONCLUINDO



- Estudos na Amazônia mostram os efeitos dos aerossóis nas DSDs
- Efeito dos aerossóis na fase quente geram consequências para todo o ciclo de vida da nuvem
- Podem intensificar ou enfraquecer a convecção, dependendo da correlação de diversos fatores
  - Características físicas das nuvens
  - Termodinâmica do ambiente