

Física da Atmosfera

Variações na vertical até transformação de fase da água

Henrique de Melo Jorge Barbosa

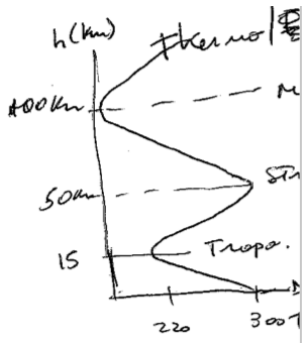
Universidade de São Paulo, Instituto de Física

26 de Março de 2018

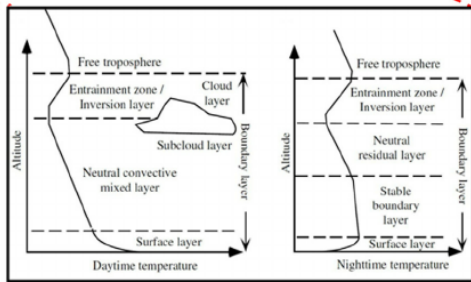
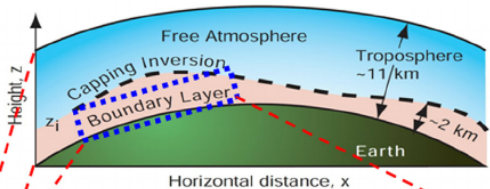
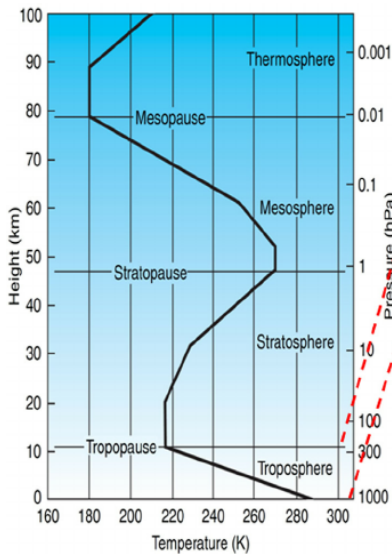
Variação da Temperatura

A temperatura varia na vertical devido a diversos tipos de trocas de calor que acontecem em diferentes regiões.

- Tropopausa
- Estratosfera
- Mesosfera
- Thermosfera



Troposfera e Estratosfera é que são resolvidas pelos modelos numéricos de tempo e clima.



Planetary Boundary Layer

Wallace & Hobbs

Troposfera

Troposfera Livre, acima de 500 m a 3 km

Pouca variabilidade, é influenciada pela PBL mas em uma escala de tempo maior.

PBL, sfc até 500 m a 3 km

É a região que sofre influência direta da superfície. A resposta é de ~ 1 h ou menos. A temperatura varia muito durante o dia.

A PBL é afetada pela condutividade térmica do solo, que determina a transferência de calor por condução; mas também por radiação, turbulência mecânica e térmica e advecção.

(1) Calor específico

É a energia necessária para elevar em 1°C , 1 g de certa substância.

	c $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$	K (298K) $\text{J}/\text{m}^2/\text{s}/\text{K}$
dry air	1004	.026
big water	4185	.600
argila	1360	.920
areia seca	827	.298

- Como o calor específico do solo é menor que da água, o ciclo diurno da temperatura é mais forte sobre a terra que sobre o oceano.
- A variação de temperatura ΔT no solo será transferida para o ar, por exemplo, por condução.

(2) Condução térmica

É a troca de calor por contato física entre duas superfícies. A taxa de troca é determinada pela condutividade térmica, que depende da temperatura:

$$\begin{cases} K_{dry} \simeq 0.0238 \frac{J}{msK} + 7.113 \times 10^{-5} \frac{J}{msK^2} (T - 273.15) \\ K_{vap} \simeq 0.0156 \frac{J}{msK} + 8.368 \times 10^{-5} \frac{J}{msK^2} (T - 273.15) \end{cases}$$

Como o ar é úmido, então será uma mistura:

$$K_a \simeq K_d \left[1 - \left(1.17 - 1.02 \frac{K_v}{K_d} \right) \frac{n_v}{n_v + n_d} \right]$$

Nota: na maioria das situações, $K_a \simeq K_d$ é uma boa aproximação.

(cont)

O coeficiente de condutividade térmica é usado para calcular a troca de calor por condução, sem considerar efeitos de turbulência. O fluxo de calor, em W/m^2 :

$$H^{cond} = -K_a \frac{\Delta T}{\Delta z}$$

A superfície vai esquentar o solo logo acima dela. Por exemplo, uma camada de 1 mm de ar seco acima do solo, com $\Delta T = -12K$ e $T = 298K$:

$$ar seco \Rightarrow K_d = K_a = 0.0256 J / (msK)$$

e

$$H = -0.0256 \frac{J}{msK} * \frac{-12K}{10^{-3}m} \simeq 300 W / m^2$$

(cont)

O fluxo de calor é grande porque $\partial T/\partial z$ é grande! Na troposfera, por exemplo, $\partial T/\partial z = -6.5K/km$, então:

$$T = 0^{\circ}C \Rightarrow H = -0.0238 \frac{J}{msK} * \frac{-6.5K}{10^3m} \simeq 1.5 \times 10^{-4} W/m^2$$

Ou seja, a condução só é importante na interface com a superfície, onde $\partial T/\partial z$ pode ser significativo!

(3) Radiação

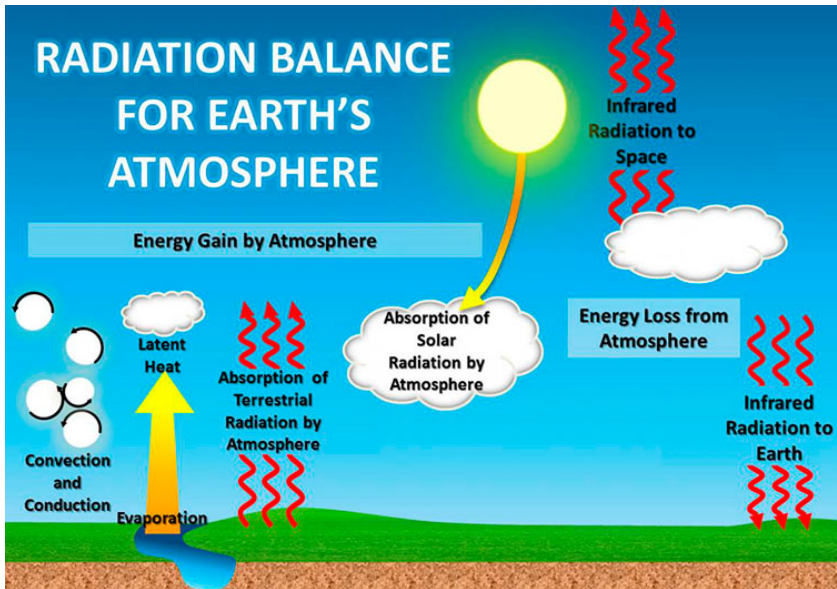
É a troca de energia através de ondas eletromagnéticas.

A radiação de onda curta recebida do Sol é absorvida pelas moléculas gasosas e pelas partículas de aerossol em suspensão no ar, e também é absorvida na superfície, transferindo a energia que elas carregam.

O mesmo ocorre com a radiação de onda longa, emitida por todos os corpos com $T > 0K$

Nota: a radiação é importante não só na PBL, mas em toda a coluna atmosférica.

RADIATION BALANCE FOR EARTH'S ATMOSPHERE



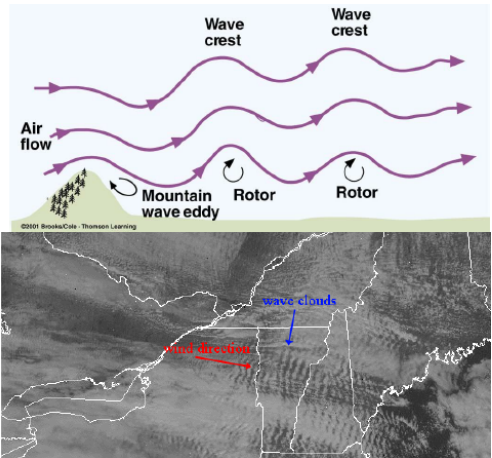
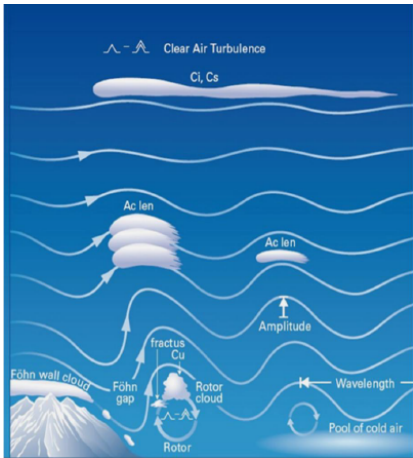
<http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/energy-budget.php>

(4) Turbulência mecânica e convecção forçada

- Convecção é um movimento predominantemente na vertical, que mistura e transporta propriedades da atmosfera
- Convecção forçada é quando o vento vertical é devido a algo mecânico.

Exemplo: turbulência mecânica, i.e., a interação do vento horizontal com elementos da superfície, produzindo vórtices.

Convecção forçada também pode ser quando o vento converge e sobe, ou passa sobre uma montanha, ou uma frente em cima da outra, ou quando há cisalhamento do vento na vertical.



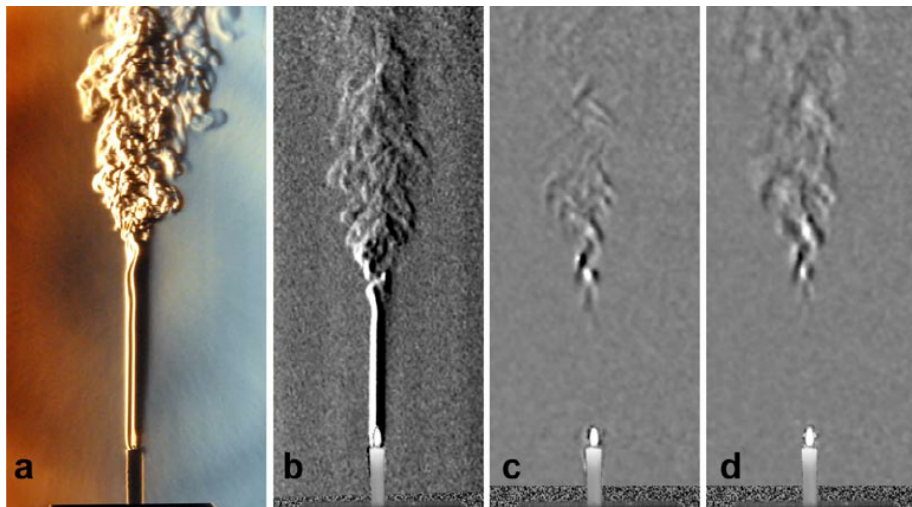
<https://www.weather.gov>

(5) Turbulência térmica

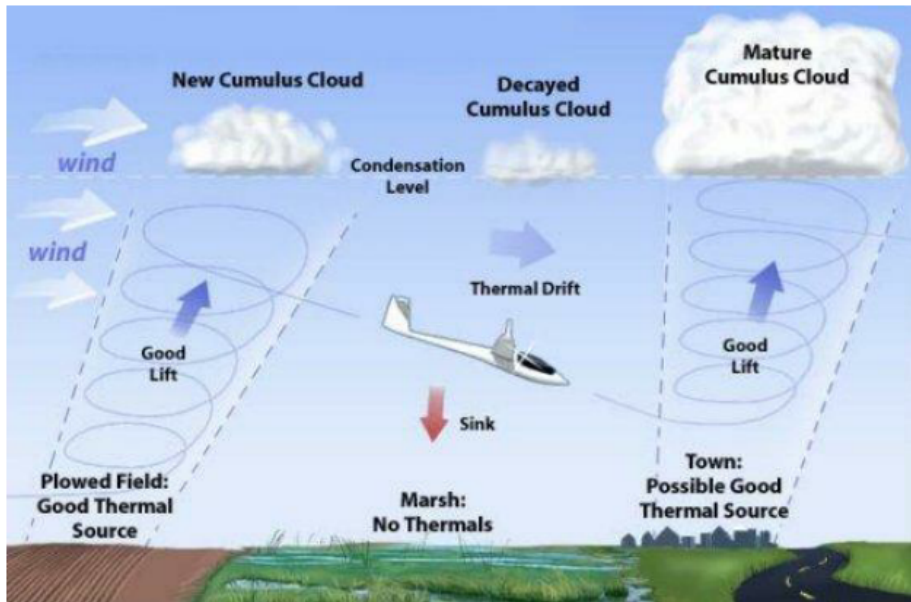
É quando o sol aquece a superfície de maneira diferente em locais diferentes. Exemplo: sombra de nuvens, diferenças na própria superfície, etc.

A região mais quente terá um ar mais quente em cima dela, que é menos denso e sobe (térmica). Envolve troca de massas de ar ao invés de troca de calor entre as moléculas.





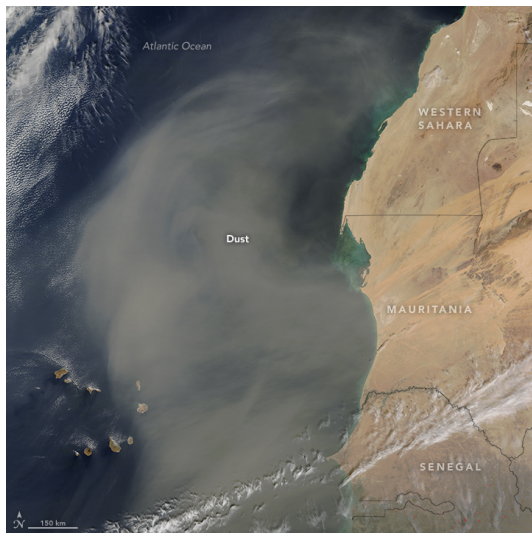
Hargather and Settles, HVAC&R RESEARCH (2011)



K. Andersson, AUVSI (2009)

(6) Advecção

É o transporte de energia, ou gases, ou partículas pelo vento. Se a massa de ar está se deslocando, a energia que ela carrega também está!



<https://earthobservatory.nasa.gov>

Troposfera

A temperatura diminui com a altitude

Porque a superfície é aquecida pelo Sol, e transfere energia por baixo, enquanto que o topo da troposfera está sempre perdendo calor por radiação.

Além disso, a troposfera não absorve SW ($< 20\%$). Ela absorve apenas LW (vapor de água e nuvens) que também vem de baixo.

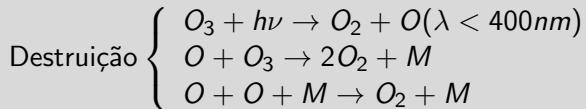
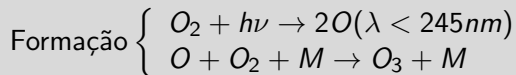
- 1 Térmica - IR
 - 2 Turbulência
 - 3 Condução
- } P/ a PBL depois p/ troposfera

Devido a pressão, H_2O e CO_2 tem mais massa próximo da superfície, a maior parte da LW será absorvida nesta região.

Estratosfera

Se fosse apenas isso, a temperatura continuaria sempre diminuindo. Acontece que na estratosfera existe a camada de ozônio que absorve a radiação UV e aquece a atmosfera localmente.

Chapman cycle



Camada de O_3

- A camada de ozônio tem seu máximo entre 25 e 32 km porque é preciso O_2 , que diminui com a altitude, e UV, que aumenta com a altitude.
- Então existe uma altura ótima onde há O_2 e $h\nu$ suficientes.

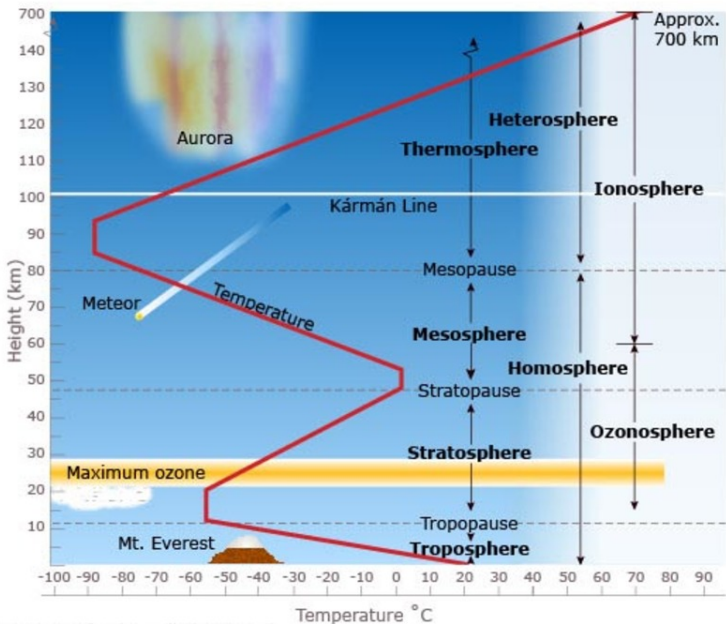
O máximo de T ocorre para o topo da estratosfera porque lá há maior absorção de radiação e a radiação é mais energética.

Mesosfera

Não há O_3 suficiente (densidade baixa, não há O_2) para absorver radiação em quantidade suficiente para esquentar o ar, então a temperatura diminui como na troposfera!

Termosfera

Há absorção de SW muito curta pelas poucas moléculas de O_2 e N_2 . São poucas moléculas, mas cada uma tem muito energia (K_{cin}) e por isso a temperatura é alta.



© Copyright. 2013. University of Waikato. All rights reserved.

Transformação de fase

Em uma transformação de fase há necessariamente troca de energia. É necessário absorver ou perder energia no processo.

Libera

condensação
solidificação
ressublimação

Absorve

vaporização
fusão
sublimação

Essa transferência de energia é chamada de calor latente. Pode ser de 3 tipos.

Calor latente

Se uma amostra de massa m sofre uma transformação de fase, então o calor trocado é proporcional a massa:

$$Q = Lm$$

A constante L é o calor de transformação, ou calor latente. É a quantidade de energia necessária, por unidade de massa, para a transformação de fase.

Em uma transformação de fase, a energia interna (U) do sistema muda, $T = cte$, e ainda pode haver realização de trabalho!

O calor latente é, na verdade, uma diferença na entalpia dos dois estados do sistema.

Ex: $L_{fusão} = \text{entalpia específica da água} - \text{gelo}$

Entalpia

Entalpia é uma função de estado termodinâmico:

$$H = U - pV$$

e entalpia específica (por massa) é:

$$h = \frac{H}{m} = u + pv = \frac{U}{m} + p\frac{V}{m}$$

Usando a lei dos gases, podemos reescrever a equação como:

$$h = c_v^p T + cte$$

Para um líquido seria:

$$h = c_l T + cte$$

Entalpia

$$\frac{dL}{dT} \propto \Delta \text{calor específico}$$

de vaporização / condensação

$$\frac{dL_e}{dT} = c_v^p - c_{liq}$$

$$L_e(0^\circ C) = 2510 J/g$$

$$L_e(100^\circ C) = 2259 J/g$$

de sublimação / ressublimação

$$\frac{dL_s}{dT} = c_v^p - c_{ice}$$

$$L_s(0^\circ C) = 2835 J/g$$

de fusão / solidificação

$$\frac{dL_m}{dT} = c_{liq} - c_{ice}$$

$$L_m(0^\circ C) = 333 J/g$$

O calor específico varia muito com a temperatura para $T < 0^{\circ}\text{C}$, e varia pouco para $T > 0^{\circ}\text{C}$.

$$L_e = L_e(T_0) - (c_l - c_v^p)(T - T_0)$$

- Bolton (1980) - $L_e \simeq 2.501 \times 10^6 \text{ J/kg} - 2370(T - T_0) \text{ J/kg/K}$
- List (1984) - $L_m \simeq 3.34 \times 10^5 \text{ J/kg} + T_c(2030 - 10.46 T_c) \text{ J/kg/K}$

Notem que:

$$L_s = L_e + L_m \simeq 2.835 \times 10^6 \text{ J/kg} - T_c(340 + 10.46 T_c)$$

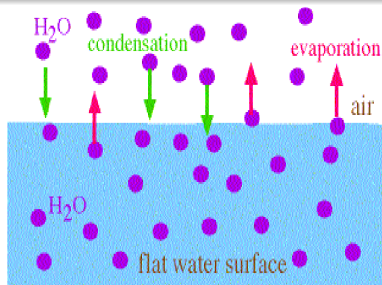
Agora podemos ver a equação de Clayperon.

Saturação

As taxas de formação e crescimento de gotas e cristais dependem de muitas coisas. Uma delas é a pressão de vapor de saturação.

É a pressão parcial de um gás que está em equilíbrio com sua fase líquida.

Em certa temperatura, o número de moléculas com E suficiente para escapar da superfície é igual ao número de moléculas do gás que colidem com a superfície.

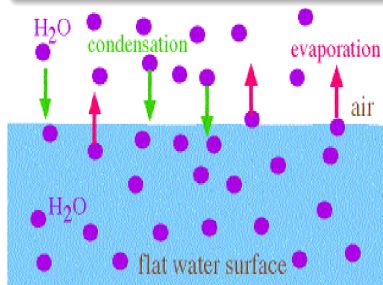


<https://astarmathsandphysics.com>

Saturação

↑ Para uma pressão maior, mais moléculas depositam do que evaporam, então a pressão parcial diminui.

↓ Para uma pressão menor, mais moléculas evaporam que depositam, então a pressão parcial aumenta.



<https://astarmathsandphysics.com>

Clausius-Clapeyron

A equação de Clausius-Clapeyron diz que a pressão de vapor de saturação varia com a temperatura segundo:

$$\frac{dP_v^{sat}}{dT} = \frac{\rho_v^{sat}}{T} L_e$$

usando a equação dos gases ideais para o vapor de água,

$$P_v^{sat} = \rho_v^{sat} R_v T,$$

$$\frac{dP_v^{sat}}{P_v^{sat}} = \frac{L_e}{R_v} \frac{dT}{T^2}$$

E devemos lembrar que o calor latente depende da temperatura:

$$L_e = L_e(T) = A - B * T$$

Integrando a equação anterior, entre T e T_0 , temos:

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{P_v^{sat}}{P_{v,0}^{sat}}\right) &= \int \frac{1}{R_v} \left(\frac{A}{T^2} - \frac{B}{T}\right) dT \\ &= -\frac{A}{R_v T} - \frac{B}{R_v} \ln T \Big|_{T_0}^T \\ &= \frac{A}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) + \frac{B}{R_v} \ln\left(\frac{T_0}{T}\right)\end{aligned}$$

Tomando a exponencial dos dois lados,

$$P_v^{sat}(T) = P_v^{sat}(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{B/R_v} \exp\left(\frac{A(T - T_0)}{R_v T_0 T}\right)$$

Bolton

Na prática, usamos expressões empíricas derivadas de experimentos, como a fornecida por Bolton (1980), bom para $-35^{\circ}\text{C} < T_c < 35^{\circ}\text{C}$:

$$P_v^{sat}(T_c) = 6.112\text{hPa} \exp\left(\frac{17.67T_c}{T_c + 243.5^{\circ}\text{C}}\right)$$

NOTE: As duas expressões anteriores são válidas para interfaces planas e puras de líquido / vapor. Na verdade, o valor da pressão de vapor de saturação depende

- da curvatura (tensão superficial),
- substâncias dissolvidas na água,
- taxa de aquecimento,
- etc.

valor → gelo

Para a interface vapor / gelo, a equação de Clausius-Clapeyron tem a mesma forma, só mudam as constantes:

$$\frac{dP_v^{ice}}{P_v^{ice}} = \frac{L_s}{R_v} \frac{dT}{T^2}$$

Como discutimos anteriormente, normalmente utiliza-se uma formula empírica experimental. Neste caso, segundo Pruppacher and Klett (1997), para $T < 273.15K$

$$P_v^i(T) = 6.1hPa \exp\left(\frac{21.88(T - 273.15K)}{T - 7.65K}\right)$$

Quem é maior? a pressão de vapor sobre o gelo ou sobre o líquido?

Água e Gelo

A pressão de vapor de saturação é crítica para determinar a formação de gotas e cristais de gelo.

Líquido

- Quando $T > 0^{\circ}\text{C}$ e $P_v > P_v^{sat}$ o vapor irá condensar em gotas.
- Quando $T > 0^{\circ}\text{C}$ e $P_v < P_v^{sat}$ as gotas irão evaporar.

Sólido

- Quando $T < 0^{\circ}\text{C}$ e $P_v > P_v^i$ o vapor irá ressublimar em gelo.
- Quando $T < 0^{\circ}\text{C}$ e $P_v < P_v^i$ o gelo irá sublimar.

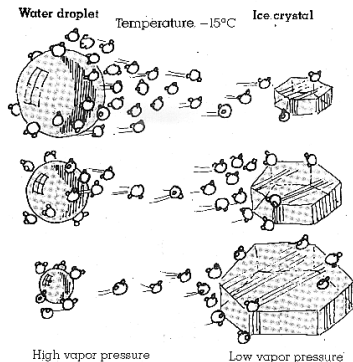
E se houver água e gelo ao mesmo tempo?

Bergeron

Nuvens de fase mista contém ao mesmo tempo água e gelo.

água e gelo,
 $-40^{\circ}\text{C} < T_c < 0^{\circ}\text{C}$

- Quando $P_v > P_v^{sat} > P_v^i$ há preferência por formar gelo, pois o ΔP_v é maior para o gelo.
- Quando $P_v^{sat} > P_v > P_v^i$ a água evapora das gotículas e se deposita nos cristais de gelo.



<http://www.meteo.psu.edu/>

Umidade Relativa

É a razão entre a razão de mistura em massa e a de saturação (WMO)

$$UR = 100\% \frac{\omega_v}{\omega_v^{sat}}$$

Mas a razão de mistura em massa era:

$$\omega_v = \frac{\rho_v}{\rho_d} = \frac{m_v P_v}{m_d P_d} = \epsilon \frac{P_v}{P_a - P_v}$$

Então:

$$UR = 100\% \frac{P_v}{P_a - P_v} \cdot \frac{P_a - P_v^{sat}}{P_v^{sat}} \simeq 100\% \frac{P_v}{P_v^{sat}}$$

Importante:

Por definição, a pressão de vapor é medida em relação a superfície plana e líquida.

A definição física (e correta) é P_v/P_v^{sat} e não ω_v/ω_v^{sat}

Temperatura

Definimos dois novos parâmetros, ou temperaturas:

T_D (ponto de orvalho)

Mantendo a pressão constante, e abaixando a temperatura, T_D é o ponto em que $P_v^{sat} \rightarrow P_v$, ou seja, começa a condensar.

Frost point (ponto de geada)

Mantendo a pressão constante e também P_v , T_{frost} é a temperatura na qual $P_v^i \rightarrow P_v$, ou seja, começa a congelar.

Para encontrar T_D , basta resolver a equação $P_v^{sat}(T_D) = P_v$.