

MICROFÍSICA DA PRECIPITAÇÃO

Capítulo 9 – Parametrização da Microfísica de Nuvens e Modelagem Numérica

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
- ❑ **Parametrização da Microfísica de Nuvens e Modelagem Numérica**
- ❑ O sensoriamento remoto da precipitação
 - O espectro de tamanho de gotas
 - A taxa de precipitação e os parâmetros integrais e suas variabilidades

Capítulo 9 – Parametrização da Microfísica de Nuvens e Modelagem Numérica

- Parametrização da Microfísica de Nuvens
- Modelagem Numérica utilizando o ARPS

Material elaborado pelo aluno Ricardo Hallak

Modelagem numérica de microfísica de nuvens no ARPS

(Advanced Regional Prediction System)

Introdução

Referências básicas

•ARPS User's Guide em:

<ftp://ftp.caps.ou.edu/pub/ARPS/ARPS.docs/ARPS40DOC.PDF>

•Lin et al. (1983), “Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 22, 1065-1092.

Introdução

ARPS

- **Modelo de área limitada**
- **Equações primitivas**
- **Não-hidrostático**
- **Totalmente compressível**

Variáveis atmosféricas no ARPS

$$u(x, y, z, t) = \bar{u}(z) + u'(x, y, z, t)$$

$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v'(x, y, z, t)$$

$$w(x, y, z, t) = w'(x, y, z, t)$$

$$\theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(z) + \theta'(x, y, z, t)$$

$$p(x, y, z, t) = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \bar{\rho}(z) + \rho'(x, y, z, t)$$

$$q_v(x, y, z, t) = \bar{q}_v(z) + q'_v(x, y, z, t)$$

$$q_{li}(x, y, z, t) = q'_{li}(x, y, z, t)$$

Variáveis atmosféricas explicitamente prognosticadas no ARPS

$$\begin{aligned} &u(x, y, z, t) \\ &v(x, y, z, t) \\ &w(x, y, z, t) \\ &\theta'(x, y, z, t) \\ &p'(x, y, z, t) \\ &q_{\psi}(x, y, z, t) \end{aligned}$$

Categorias da substância ÁGUA consideradas

- **Vapor d'água (water vapor)**
- **Água de nuvem (cloud water)**
- **Água de chuva (rainwater)**
- **Gelo em nuvem (cloud ice)**
- **Neve (snow)**
- **Granizo (hail)**

Equações de conservação

- **Momento**
- **Massa**
- **Energia Termodinâmica**

Equação da conservação da energia térmica

$$\frac{\partial(\rho\theta')}{\partial t} = - \left[u \frac{\partial\theta'}{\partial x} + v \frac{\partial\theta'}{\partial y} + w \frac{\partial\theta'}{\partial z} \right] - \left[\rho w \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z} \right] + D_{\theta} + S_{\theta}$$

onde

$D_{\theta} \equiv$ termos de mistura

e

$S_{\theta} \equiv$ fontes/sorvedouros

Equação da conservação para as razões de mistura de q_v , q_c , q_r , q_i , q_s , q_h

$$\frac{\partial(\rho q_\psi)}{\partial t} = - \left[u \frac{\partial q_\psi}{\partial x} + v \frac{\partial q_\psi}{\partial y} + w \frac{\partial q_\psi}{\partial z} \right] + \frac{\partial(\rho V_{q_\psi} q_\psi)}{\partial z} + D_{q_\psi} + S_{q_\psi}$$

onde

$D_{q_\psi} \equiv$ termos de mistura,

$S_{q_\psi} \equiv$ termos fonte/sorvedouro

e

$V_{q_\psi} \equiv$ velocidade terminal dos hidrometeoros em queda

“Fallout term”

Equação de estado para uma atmosfera contendo diversos constituintes de água

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left(1 - \frac{q_v}{\varepsilon + q_v} \right) \left(1 + q_v + q_{\text{líquido+gelo}} \right)$$

onde

$q_{\text{líquido+gelo}} \equiv$ conteúdo total de água líquida e gelo
e

$$\varepsilon = R_d / R_v \approx 0.622$$

Equação do momento horizontal

Componente zonal

$$\frac{\partial}{\partial t}(u) = - \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] -$$

$$- \left[\frac{\partial}{\partial x} (p' - \alpha DIV) + \frac{\partial}{\partial z} (p' - \alpha DIV) \right] + [\rho f v - \rho f w] + D_v$$

Componente meridional

$$\frac{\partial}{\partial t}(v) = - \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] -$$

$$- \left[\frac{\partial}{\partial y} (p' - \alpha DIV) + \frac{\partial}{\partial z} (p' - \alpha DIV) \right] - \rho f u + D_v$$

Equação do momento vertical

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) = - \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] -$$

$$- \frac{\partial}{\partial z} (p' - \alpha \text{DIV}) + \rho B + \rho f u + D_w$$

$$B = -g \frac{\rho'}{\bar{\rho}} = g \left[\frac{\theta'}{\bar{\theta}} - \frac{p'}{\bar{\rho} c_s^2} + \frac{q'_v}{\varepsilon + \bar{q}_v} - \frac{q'_v + q_{\text{líquido+gelo}}}{1 + \bar{q}_v} \right]$$

$$c_s = \sqrt{\gamma R_d \bar{T}}$$

$$\gamma \equiv \frac{C_p}{C_v}$$

Modelagem numérica da microfísica de nuvens no Advanced Regional Prediction System (ARPS)

Parametrização de Nuvens Quentes

A parametrização de microfísica para chuva de origem em nuvens quentes de Kessler (Klemp e Wilhelmson, 1978)

Considera 3 categorias da substância água

- Vapor d'água: q_v
- Água de nuvem: q_c
- Água de chuva: q_r

Fluxograma (WARM RAIN)

AUTOCAC

Calcula a autoconversão de água de nuvem para água de chuva e a acreção de gotículas de água de nuvem para gotas de chuva

REVAP

Aplica a evaporação de água de chuva para as equações de q_v , q_r e θ' .

MICROPH

Aplica a parametrização de chuva quente para os campos de vapor d'água, água líquida e temperatura

QRFALL

Calcula a taxa de chuva e aplica para a equação de água de chuva

SATADJ

Ajusta os campos de q_v , q_c e θ' para eliminar a supersaturação ou subsaturação na presença de água de nuvem

Seqüência de eventos na parametrização de nuvens quentes

- Cada forma de água líquida é implicitamente caracterizada por uma **distribuição de gotículas**;
- Pequenas gotículas de nuvem são primeiramente formadas quando o ar fica **saturado** e a **condensação ocorre**;
- Se a razão de mistura de água de nuvem excede um valor limite pré-determinado, gotas de chuva são formadas pela **autoconversão** de gotículas de nuvem;
- As gotas de chuva então **coletam** gotículas de nuvem menores por **acresção** enquanto elas **caem** com sua própria **velocidade terminal**;
- Se as gotículas de nuvem entram em ar **subsaturado** elas **evaporam** até o ar ficar saturado ou até as gotículas se exaurirem;
- Gotas de chuva também evaporam em um ambiente subsaturado a uma **taxa** que depende da sua **concentração** e do déficit de saturação;
- Obs.: quando a fase de gelo é incluída, outros processos são envolvidos.

Função distribuição de tamanhos de partículas de água

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$$

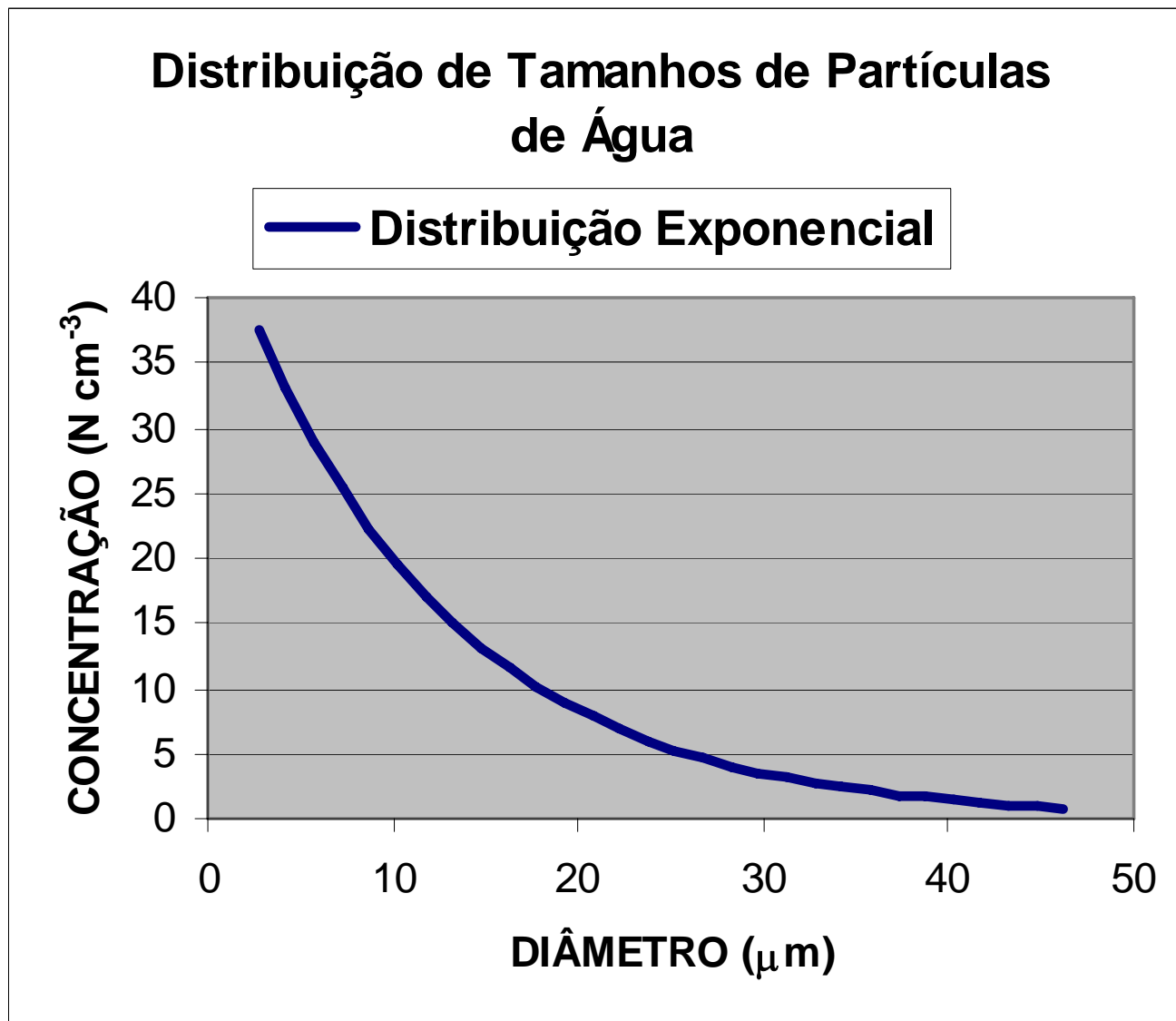
onde

D \equiv diâmetro das partículas e $N(D)$ o número de partículas de diâmetro entre D e $D + \delta D$ na unidade de volume do espaço;

N_0 \equiv parâmetro de intercepção;

$$\lambda = \left(\frac{\pi \rho_x N_0}{\rho q_x} \right)^{0.25}$$

é a inclinação da distribuição de tamanho das partículas.



Função distribuição gama generalizada

$$f_{mg}(D) = \frac{c}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{D}{D_n} \right)^{c\nu-1} \frac{1}{D_n} \exp \left[- \left(\frac{D}{D_n} \right)^c \right]$$

onde:

mg \equiv subscrito que indica “modified gamma”;

c e ν \equiv parâmetros de forma da função;

D \equiv diâmetro da partícula

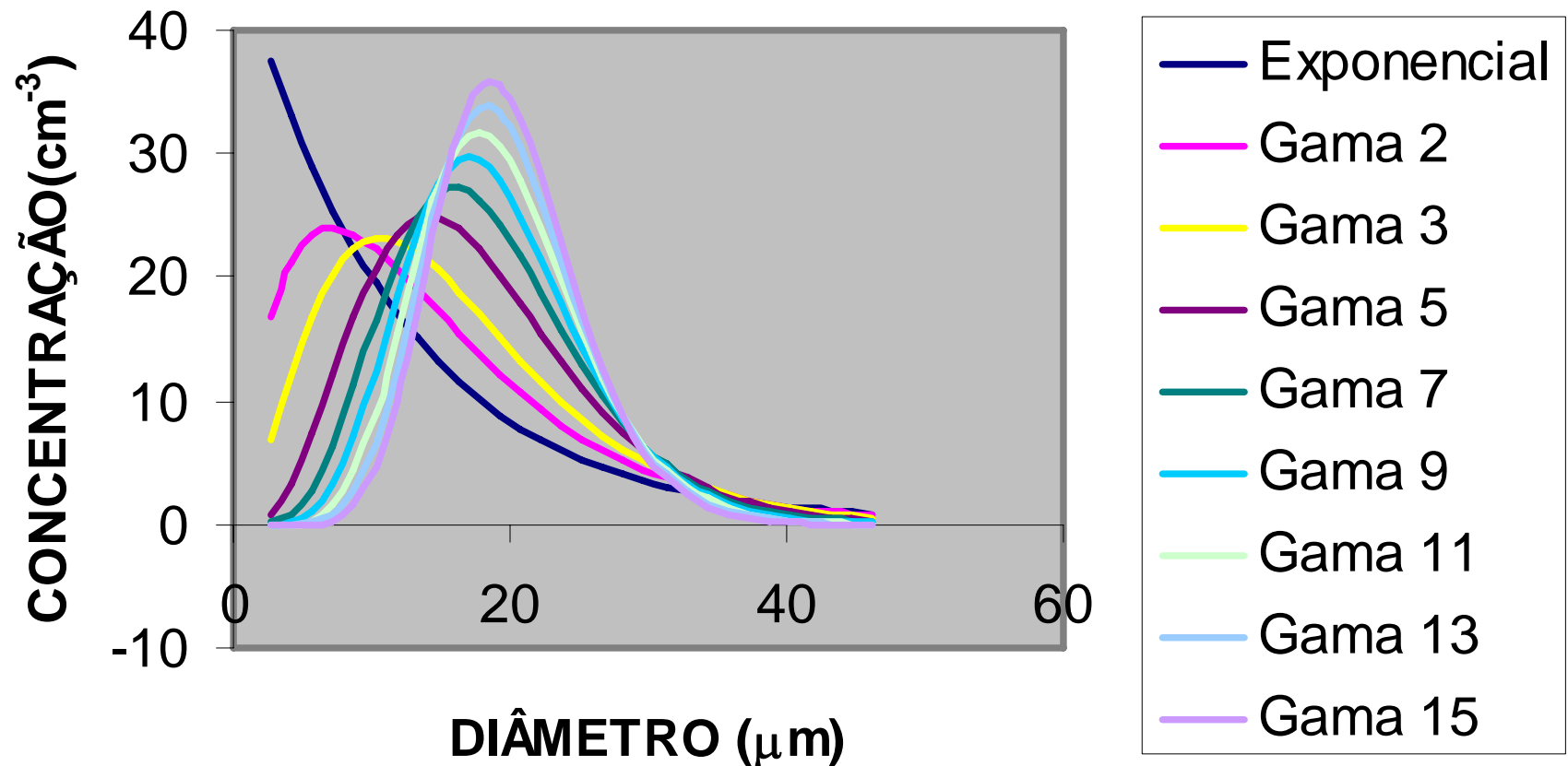
D_n \equiv diâmetro de escala (“scaling diameter”)

Quando **c = ν = 1** $\Rightarrow \Gamma(\nu) = 1$ e

$$f_{mg}(D) = \frac{1}{D_n} \exp \left[- \left(\frac{D}{D_n} \right) \right]$$

que é a distribuição exponencial.

Função distribuição de tamanhos de partículas de água e gelo



Taxa de autoconversão de água de nuvem para água de chuva

$$A_r = C_{ar} (q_c - q_{ccrit})$$

onde

$A_r \equiv$ é a taxa de autoconversão ($\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$q_c \equiv$ razão de mistura de água de nuvem kg kg^{-1}

$q_{c \text{ crit}} = 1 \times 10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$ é o limite crítico da razão de mistura da água de nuvem

$C_{ar} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ é a constante de autoconversão

Taxa de acreção (coleta) de água de nuvem pela água de chuva

$$C_r = C_{cr} q_c q_r^{0.875}$$

onde

C_r ≡ é a taxa de acreção de água de nuvem por água de chuva ($\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

q_r ≡ razão de mistura de água de chuva kg kg^{-1}

$C_{cr} = 2.2 \text{ s}^{-1}$ é a constante de acreção

Velocidade terminal de gota de chuva

$$V_{tr} = 36.34 \left(0.001 \bar{\rho} q_r \right)^{0.1364} \left(\rho_0 / \bar{\rho} \right)^{0.5}$$

onde

$V_r \equiv$ é a velocidade terminal da gota de chuva (m s^{-1})

$q_r \equiv$ razão de mistura de água de chuva kg kg^{-1}

$\rho_0 = 1.225 \text{ kg m}^{-3}$ é a densidade do ar de referência (superfície)

$\bar{\rho} \equiv$ é a densidade do ar no estado básico (kg m^{-3})

Taxa de evaporação de água de chuva

$$E_r = \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{C \left[1 - q_v / q_{vs} \right] \left[\bar{\rho} q_r \right]^{0.525}}{2.030 \times 10^4 + 9.584 \times 10^6 / \left[q_{vs} \bar{p} \right]}$$

onde

$E_r \equiv$ taxa de evaporação ($\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$q_{vs} \equiv$ razão de mistura do vapor d'água de saturação (kg kg^{-1})

$\bar{p} \equiv$ pressão (Pa)

$\bar{\rho} \equiv$ densidade do ar no estado básico (kg m^{-3})

e

$$C = 1.6 + 30.3922 \left(\bar{\rho} q_r \right)^{0.2046}$$

é o coeficiente de ventilação

Razão de mistura de saturação (fórmula de Tetten)

$$q_{vs} = \frac{380}{p} \exp \left(a_w \frac{T - 273.16}{T - b_w} \right)$$

onde

$$a_w = 17.27$$

e

$$b_w = 35.5$$

para

$$T \geq 273.16 \text{ K}$$

e

$$a_w = 21.875$$

e

$$b_w = 7.5$$

para

$$T < 273.16 \text{ K}$$

Esquema de ajustamento de saturação

- Calcula a quantidade de vapor d'água convertida para água de nuvem se existe supersaturação ($q_v > q_{vs}$)
- Calcula a quantidade de água de nuvem evaporada se existe subsaturação ($q_v < q_{vs}$)

$$\delta q_{vs} = \frac{-(q_v^* - q_{vs}^*)}{1 + \frac{a_w (273.15 - b_w) q_{vs}^* L_v / C_p}{(T^* - b_w)^2}}$$

$\delta q_{vs} \equiv$ quantidade de ajustamento para q_v , está sujeita ao seguinte teste:

$$\delta q_{vs} = \min [\delta q_{vs}, q_c]$$

← Teste para evitar que haja $q_c < 0 \text{ g kg}^{-1}$

Ajustamento na temperatura potencial correspondente à variação em q_v

$$\delta \theta' = -\bar{\Gamma} \delta q_{vs}$$

onde $\bar{\Gamma}$ é definido como:

$$\bar{\Gamma} = L_v / (\bar{\Pi} C_p) \quad \text{onde}$$

$$L_v = 2.500.780,0 \left(273.15 \bar{T}^{-1} \right)^{\left(0.167 + 3.67 \times 10^{-4} \bar{T} \right)}$$

com T [K] e L_v [J Kg⁻¹].

$$\bar{\Pi} = \left(\bar{p} / p_0 \right)^{R_d / C_p} \quad \text{(Função de Exner), onde:}$$

$R_d = 286.04$ J/(Kg K), $C_p = 1004.0$ J/(Kg K) e $p_0 = 1000$ hPa é a pressão de referência (constante).

Diferenciando o esquema de microfísica

Os valores ajustados para θ' , q_v , q_c e q_r são obtidos a partir de:

$$\begin{aligned}\theta'^{n+1} &= \theta'^{*n+1} - \bar{\Gamma} \left(\delta q_{vs} + 2 \Delta t E_r \right) \\ q_v^{n+1} &= q_v^{*n+1} + \delta q_{vs} + 2 \Delta t E_r \\ q_c^{n+1} &= q_c^{*n+1} - \delta q_{vs} - 2 \Delta t \left(A_r + C_r \right) \\ q_r^{n+1} &= q_r^{*n+1} + 2 \Delta t \left(A_r + C_r - E_r \right)\end{aligned}$$

onde Δt é o passo de tempo de integração.

Modelagem numérica de microfísica de nuvens no Advanced Regional Prediction System (ARPS)

Parametrização de Nuvens Frias

Fluxograma (ICE MICROPHYSICS)

MICROPH_ICE

Aplica a parametrização de microfísica de gelo para os campos de vapor d'água, água líquida, água de gelo e temperatura

SETCSTICE

Define os valores numéricos das constantes usadas nas equações de parametrização

ICECVT*

Calcula os termos de conversão entre o vapor d'água e as substâncias água líquida e água de gelo e ajusta apropriadamente os campos

QHFALL

Calcula as taxas de crescimento de água de chuva, neve e granizo e aplica os termos de precipitação nas respectivas equações

*Código desenvolvido no Goddard Cumulus Ensemble Modeling Group (NASA)

Resumo dos processos microfísicos considerados na parametrização de nuvens frias (Lin et al., 1983)

- São simuladas 6 diferentes formas da substância água: vapor d'água, água de nuvem, gelo de nuvem, água de chuva, neve e granizo (hail/graupel);
- Assume-se uma função exponencial de distribuição de tamanho para as partículas que precipitam (água de chuva, neve e granizo);
- Os conceitos de autoconversão são utilizados para parametrizar os processos de colisão-coalescência e colisão-agregação;
- São simulados pelo modelo os processos de acreção que envolvem as várias formas de hidrometeoros líquidos e sólidos;

Resumo dos processos microfísicos considerados na parametrização de nuvens frias (Lin et al., 1983)

- São simulados também a transformação de gelo de nuvem para neve por meio de autoconversão (agregação) e os processos de Bergeron e o subsequente crescimento por acreção ou agregação para a formação de granizo;
- Granizo é produzido também por vários mecanismos de contato e via congelamento probabilístico de gotas de chuva;
- Evaporação (sublimação) é levada em consideração para todas as partículas que caem fora da nuvem;
- O derretimento de gelo e neve é incluída na parametrização;
- O crescimento úmido e seco de granizo é simulado pelo modelo.

Equação da conservação para as razões de mistura de $q_v, q_c, q_r, q_i, q_s, q_h$

$$\frac{\partial(\rho q_\psi)}{\partial t} = \left[u \frac{\partial q_\psi}{\partial x} + v \frac{\partial q_\psi}{\partial y} + w \frac{\partial q_\psi}{\partial z} \right] + \frac{\partial(\rho V_{q_\psi} q_\psi)}{\partial z} + D_{q_\psi} + S_{q_\psi}$$

onde

$D_{q_\psi} \equiv$ termos de mistura,

$S_{q_\psi} \equiv$ termos fonte/sorvedouro

e

$V_{q_\psi} \equiv$ velocidade terminal dos hidrometeoros em queda

Alterados pela microfísica

Termos fontes/sorvedouros das diversas classes da substância água

$$S_{qc} = \bar{\rho} (c - e_c) - T_{qc} + D_{qc}$$
$$S_{qr} = \bar{\rho} (-e_r + m - f) - T_{qr} + D_{qr}$$
$$S_{qi} = \bar{\rho} (d_i - s_i) - T_{qi} + D_{qi}$$
$$S_{qs} = \bar{\rho} (d_s - s_s - m_s + f_s) - T_{qs} + D_{qs}$$
$$S_{qg} = \bar{\rho} (d_g - s_g - m_g + f_g) - T_{qg} + D_{qg}$$

onde:

$$m = m_s + m_g$$

$$f = f_s + f_g$$

c ≡ taxa de condensação

e ≡ taxa de evaporação de gotículas

f ≡ taxa de congelamento (freezing) de gotas de chuva

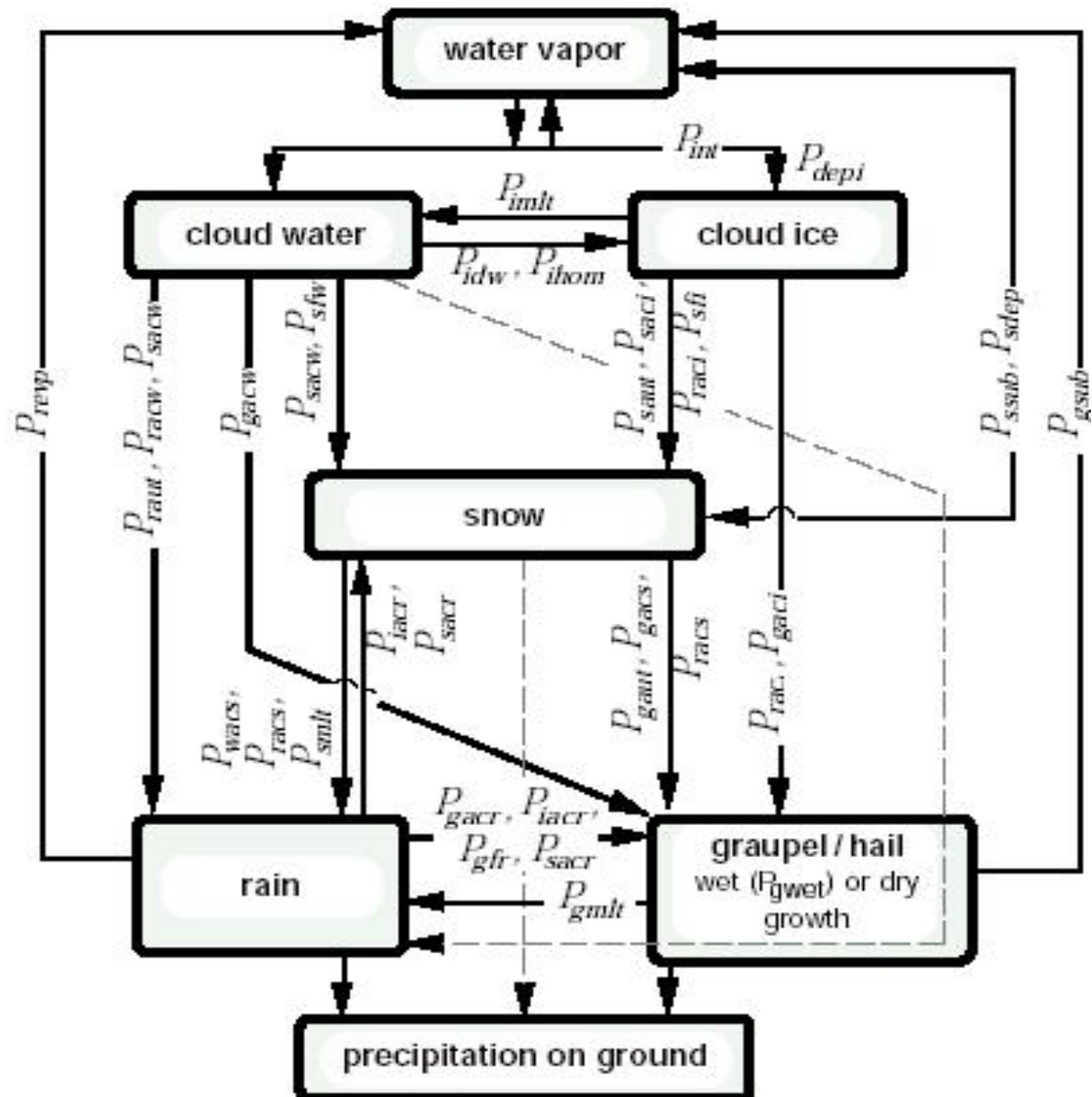
m ≡ taxa de derretimento de neve e granizo

d ≡ taxa de deposição sobre partículas de gelo

s ≡ taxa de sublimação de partículas de gelo

D_{qc}, **D_{qr}**, **D_{qi}**, **D_{qs}** e **D_{qh}** são termos de difusão subgrade para **q_c**, **q_r**, **q_i**, **q_s** e **q_g** respectivamente. **T_{qc}**, **T_{qr}**, **T_{qi}**, **T_{qs}** e **T_{qh}** são as taxas de transferência microfísicas entre as espécies de hidrometeoros e sua soma é zero.

Processos de microfísica de nuvens considerados no esquema de parametrização de microfísica de gelo (após Lin et al., 1983)



Symbol	Definition
P_{depl}	Depositional growth of cloud ice.
P_{ini}	Initiation of cloud ice.
P_{imlt}	Melting of cloud ice to cloud water.
P_{idw}	Depositional growth of cloud ice at the expense of cloud water.
$P_{i hom}$	Homogeneous freezing of cloud water to cloud ice.
P_{iacr}	Accretion of rain by cloud ice; producing snow or graupel depending on the amount of rain.
P_{ract}	Accretion of cloud ice by rain; producing snow or graupel depending on the amount of rain.
P_{rain}	Autoconversion of cloud water to rain.
P_{racw}	Accretion of cloud water by rain.
$P_{resp(e_r)}$	Evaporation of rain.
P_{racs}	Accretion of snow by rain; producing graupel if rain or snow exceeds threshold and $T < 273.16$ or rain if $T > 273.16$.
$P(Q)_{sacr}$	Accretion of cloud water by snow; producing snow (P_{sacr}) if $T < 273.16$ or rain (Q_{sacr}) if $T > 273.16$.
P_{sacr}	Accretion of rain by snow; producing graupel if rain or snow exceeds threshold; if not, produces snow.
P_{sact}	Accretion of cloud ice by snow.
P_{saut}	Autoconversion (aggregation) of cloud ice to snow.

Tabela I:
Definição dos
símbolos
usados na
parametrização
de microfísica

P_{sfr}	Bergeron process (deposition and riming) - transfer of cloud water to snow.
P_{sft}	Bergeron process embryos (cloud ice) used to calculate transfer rate of cloud water to snow (P_{sfr}).
$P_{sdep}(d_s)$	Deposition growth of snow.
$P_{sub}(S_s)$	Sublimation of snow.
$P_{smt}(m_s)$	Melting of snow to rain, $T > 273.16$.
P_{uncc}	Accretion of snow by cloud water to form rain, $T > 273.16$.
P_{gnat}	Autoconversion (aggregation) of snow to graupel.
$P_{gr}(r_g)$	Probabilistic freezing (B_{gg}) of rain to graupel.
$D(Q)_{gacw}$	Accretion of cloud water by graupel.
$D(W)_{gact}$	Accretion of cloud ice by graupel.
$D(W)_{gacr}$	Accretion of rain by graupel.
$P_{gmt}(m_g)$	Melting of graupel to form rain, $T > 273.16$. (In this regime, Q_{gacw} is assumed to be shed as rain.)
P_{gwet}	Wet growth of graupel; may involve W_{gacw} and W_{gact} and must include D_{gacw} or W_{gacr} , or both. The amount of W_{gacw} which is not able to freeze is shed to rain.

Continuação da Tabela I

Definições

$$T_{qc} = - \left(P_{sacw} + P_{raut} + P_{racw} + P_{sfw} + D_{gacw} + Q_{sacw} + Q_{gacw} \right) - P_{ihom} + P_{imlt} - P_{idw}$$

$$T_{qi} = - \left(P_{saut} + P_{saci} + P_{raci} + P_{sfi} + D_{gaci} + W_{gaci} \right) + P_{ihom} - P_{imlt} + P_{idw}$$

$$T_{qr} = Q_{sacw} + P_{raut} + P_{racw} + Q_{gacw} - \left(P_{iacr} + D_{gacr} + W_{gacr} + P_{sacr} + P_{gfr} \right)$$

$$T_{qs} = P_{saut} + P_{saci} + P_{sacw} + P_{sfw} + P_{sfi} + \delta_3 P_{raci} + \delta_3 P_{iacr} + \delta_2 P_{sacr} - \left[P_{gacs} + D_{gacs} + W_{gacs} + P_{gaut} + (1 - \delta_2) P_{racs} \right]$$

$$T_{qg} = (1 - \delta_3)P_{raci} + D_{gaci} + W_{gaci} + D_{gacw} + (1 - \delta_3)P_{iacr} + \\ + P_{gacs} + D_{gacs} + W_{gacs} + P_{gaut} + (1 - \delta_2)P_{racs} + D_{gacr} + \\ + W_{gacr} + (1 - \delta_2)P_{sacr} + P_{gfr}$$

onde

$$W_{gacr} = P_{wet} - D_{gacw} - W_{gaci} - W_{gacs}$$

Para $T > 273.16$ °K,

$$P_{saut} = P_{saci} = P_{sacw} = P_{raci} = P_{iacr} = P_{sfi} = P_{sfw} = \\ = D_{gacs} = W_{gacs} = D_{gacw} = D_{gacr} = P_{gwet} = \\ = P_{racs} = P_{sacr} = P_{gfr} = P_{gaut} = P_{imlt} = 0$$

Para $T < 273.16 \text{ °K}$,

$$Q_{sacw} = Q_{gacw} = P_{gacs} = P_{idw} = P_{i\text{hom}} = 0$$

Nas equações anteriores, $\delta_2 = 1$ para uma caixa de grade na qual q_r e $q_s < 1 \times 10^{-4} \text{ g g}^{-1}$ e, caso contrário, é definido como zero (Lin et al., 1983). D_{gaci} , D_{gacr} e D_{acs} (W_{gaci} , W_{gacr} e W_{acs}) são os termos de produção para as taxas de crescimento seco (úmido) para granizo.

Nota: Um modelo não-hidrostático de nuvens necessita de um esquema de ajustamento que calcule a quantidade de condensação (e/ou deposição) necessária para remover qualquer supersaturação de vapor, ou a quantidade de evaporação (e/ou sublimação) necessário para remover qualquer subsaturação na presença de água de nuvem (gelo em nuvem). Assim, a região de nuvens estará sempre saturada (100% de umidade relativa).

Hipótese de distribuição de tamanhos exponencial inversa (Marshall-Palmer)

$$\begin{aligned}n_R(D) &= n_{0R} \exp(-\lambda_R D_R) \\n_S(D) &= n_{0S} \exp(-\lambda_S D_S) \\n_G(D) &= n_{0G} \exp(-\lambda_G D_G)\end{aligned}$$

onde

n_{0R} , n_{0S} e n_{0G} são os parâmetros de intercepção de chuva, neve e granizo, respectivamente;

$n_{0R} = 8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-4}$ (Marshall-Palmer, 1948);

$n_{0S} = 3 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-4}$ (Gunn and Marshall, 1958);

$n_{0G} = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-4}$ (Federer and Waldvogel, 1975);

D_R , D_S e D_G são diâmetros das partículas de chuva, neve e granizo respectivamente.

$$\lambda_R = \left(\frac{\pi \rho_R n_{0R}}{\rho q_R} \right)^{0.25}$$

$$\lambda_S = \left(\frac{\pi \rho_S n_{0S}}{\rho q_S} \right)^{0.25}$$

$$\lambda_G = \left(\frac{\pi \rho_G n_{0G}}{\rho q_G} \right)^{0.25}$$

Parâmetros de inclinação λ_x

onde

ρ_x são as respectivas densidades das espécies de água, ρ é a densidade do ar e q_x as respectivas razões de mistura de cada espécie. (x = R, S ou G)

λ_x são obtidos multiplicando-se as equações de $N_x(D_x)$ pela massa da partícula e integrando sobre todos os diâmetros, igualando-se o resultado pelo apropriado conteúdo de água na coluna.

Obs.: As partículas de gelo de nuvem têm um tamanho único (monodispersa). Diâmetro: 2×10^{-3} cm. Densidade: 0.917 g cm^{-3}

Velocidade terminal para uma partícula precipitante de diâmetro D_{R1} D_S ou D_G

$$U_{DR} = aD_R^b \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$U_{DS} = cD_S^d \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$U_{DG} = \left(\frac{4g\rho_G}{3C_D\rho} \right)^{1/2} D_G^{1/2}$$

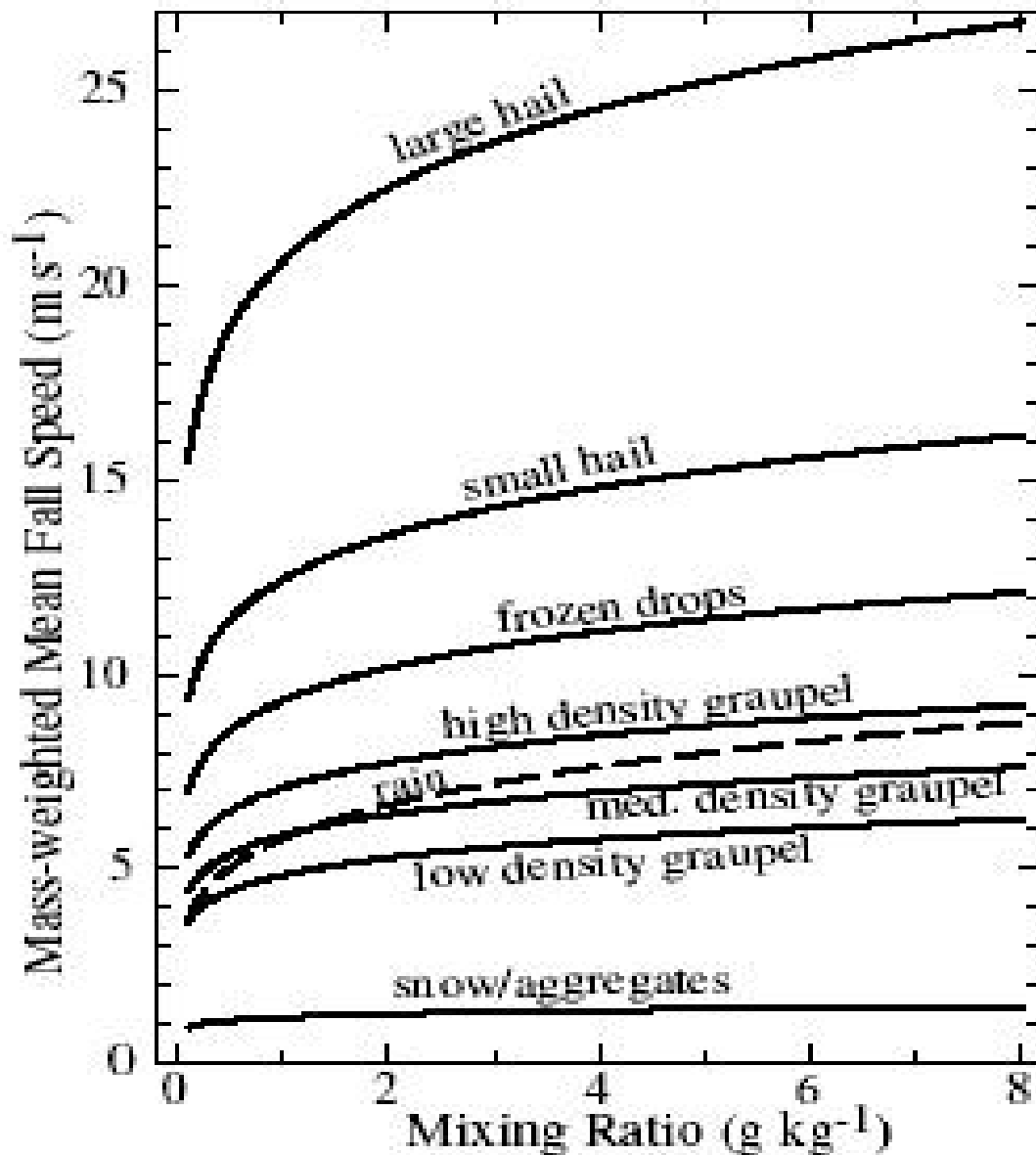
onde

$a = 2115 \text{ cm}^{1-b}$ e $b = 0.8$ (Liu and Orville, 1969);

$c = 152.93 \text{ cm}^{1-d}$ e $d = 0.25$ (Locatelli and Hobbs, 1974);

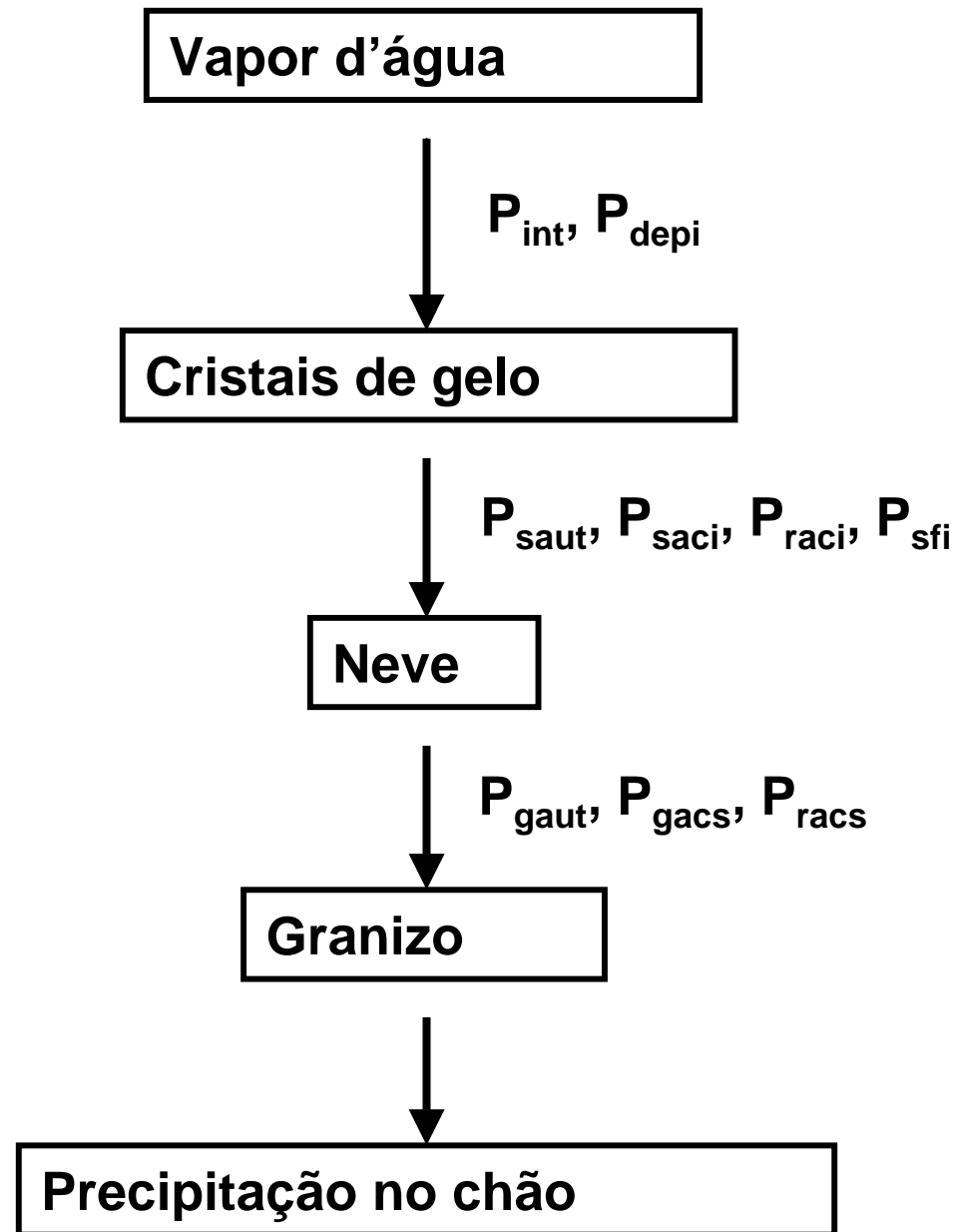
$C_D = 0.6$ (Wisner et al., 1972).

Nota: O fator de raiz quadrada envolvendo densidades permite o aumento das velocidades com o aumento da altitude, similar ao considerado em Foote and Toit (1969).



Velocidade terminal média ponderada pela massa.

Exemplo de
aplicação:



Nota: A iniciação de gelo em nuvem (P_{int}) e crescimento de gelo em nuvem por deposição de vapor d'água (P_{depi}) são discutidos em Rutledge and Hobbs (1984) e são usados para iniciar o gelo em nuvem num ambiente saturado. Este procedimento pondera a razão de mistura de saturação em favor do gelo em níveis acima do nível de congelamento ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Agregação de cristais de gelo para formar neve:

$$P_{saut} = \alpha_1 (q_i - q_{i0})$$

onde q_{i0} é uma quantidade limítrofe a partir da qual há ocorrência da agregação de cristais de gelo. ($q_{i0} = 10^{-3} \text{ g g}^{-1}$)

$$\alpha_1 = 10^{-3} \exp[0.025(T - T_0)] \quad (\text{s}^{-1}) \text{ e } T_0 = 273.16 \text{ K}$$

Acresção de cristais de gelo pela neve:

$$P_{saci} = \frac{\pi E_{SI} n_{0S} c q_i \Gamma(3+d)}{4 \lambda_S^{3+d}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2}$$

onde E_{SI} é a eficiência de coleta de cristais de gelo pela neve, que é função da temperatura:

$$E_{SI} = \exp[0.025(T - T_0)]$$

Acréscimo de cristais de gelo pela água de chuva:

$$P_{raci} = \frac{\pi E_{RI} n_{0R} a q_i \Gamma(3+b)}{4 \lambda_R^{3+b}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2}$$

onde E_{RI} é a eficiência de coleta de cristais de gelo pela água de chuva, que assume-se ser 1 em Lin et al. (1983).

NOTA:

Nesta parametrização permite-se a coexistência de água de nuvem e cristais de gelo entre as temperaturas de 0 e -40 °C.

P_{sfi} é a taxa de produção para os processos de Bergeron usado no cálculo da taxa de transferência de cristais de gelo para neve por deposição e “riming”:

$$P_{sfi} = q_i / \Delta t_1$$

onde Δt_1 é a escala de tempo, dependente da temperatura. Maiores detalhes são encontrados em Hsie et al. (1980).

Agregação de cristais de neve para formar granizo:

$$P_{gaut} = \alpha_2 (q_s - q_{s0})$$

onde q_{s0} é uma quantidade limítrofe a partir da qual há ocorrência da agregação de cristais de gelo. ($q_{s0} = 10^{-3} \text{ g g}^{-1}$)

$$\alpha_2 = 10^{-3} \exp[0.09(T - T_0)] \quad (\text{s}^{-1}) \text{ e } T_0 = 273.16 \text{ K}$$

Interação entre flocos de neve e gotas de chuva

Taxa de acreção de neve pela chuva:

$$P_{racs} = \pi^2 E_{SR} n_{0R} n_{0S} |U_R - U_S| \left(\frac{\rho_S}{\rho} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{5}{\lambda_S^6 \lambda_R} + \frac{2}{\lambda_S^5 \lambda_R^2} + \frac{0.5}{\lambda_S^4 \lambda_R^3} \right)$$

onde assume-se que E_{SR} , a eficiência de coleta de neve pela chuva, é 1 em Lin et al. (1983).

Interação entre flocos de neve e granizo

Taxa de acreção de neve por granizo:

$$P_{gacs} = \pi^2 E_{GS} n_{0S} n_{0G} |U_G - U_S| \left(\frac{\rho_S}{\rho} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{5}{\lambda_S^6 \lambda_G} + \frac{2}{\lambda_S^5 \lambda_G^2} + \frac{0.5}{\lambda_S^4 \lambda_G^3} \right)$$

onde assume-se que E_{GS} , a eficiência de coleta de partículas de neve por partículas de granizo, é função da temperatura dada por:

$$E_{GS} = \begin{cases} \exp[0.09(T - T_0)] & T < T_0 \\ 1.0 & T \geq T_0 \end{cases}$$

Modelagem numérica de microfísica de nuvens no Advanced Regional Prediction System (ARPS)

Exemplos de Simulações Numéricas

Características básicas das simulações

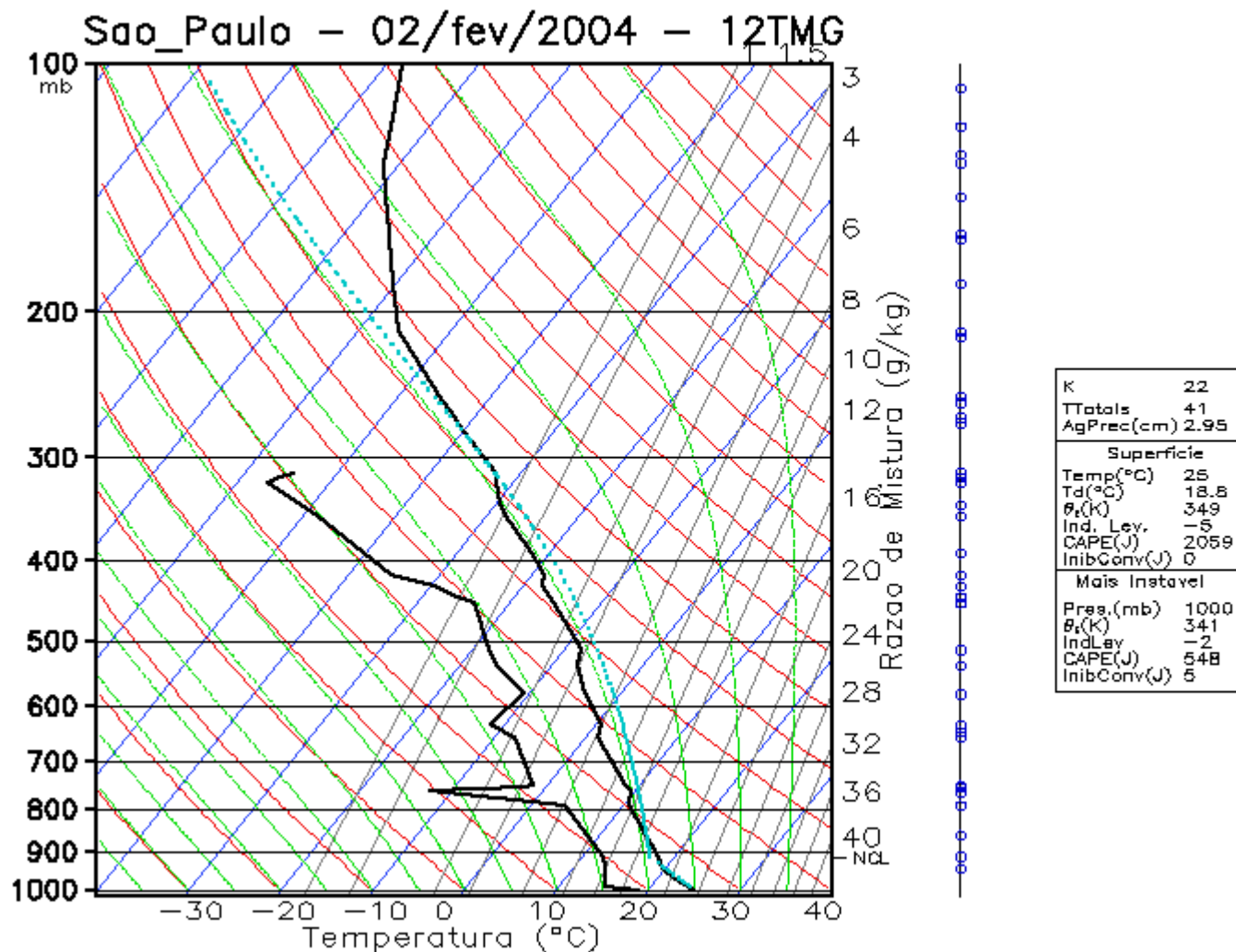
GRADE:

- número de pontos: 99 x 99 na horizontal e 72 na vertical
- resolução espacial horizontal: 1000 m x 1000 m
- resolução espacial vertical: 300 m em média e 50 m nos 8 primeiros níveis do modelo
- área total: 10^4 km² na horizontal e topo em 21 km

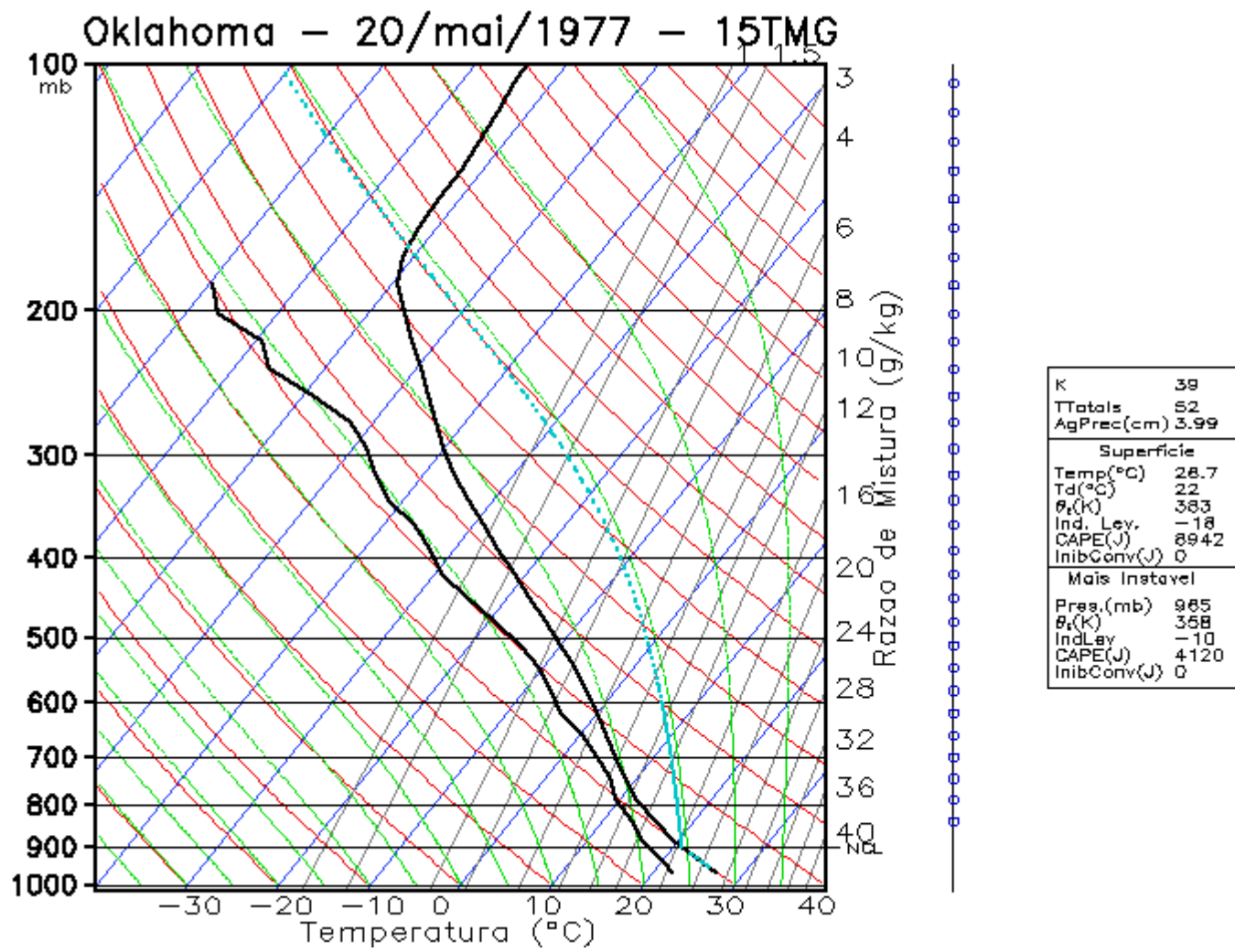
INICIALIZAÇÃO:

- homogênea na horizontal, com valores iniciais obtidos por sondagens verticais reais da atmosfera
- forçante térmica por meio de inserção de uma “bolha de ar quente” de formato elipsóide com centro no ponto central da grade do modelo. Dimensões da bolha: 15 km x 15 km na horizontal e 1500 m na vertical e perturbação inicial de 1.6 K

Sondagem levemente instável

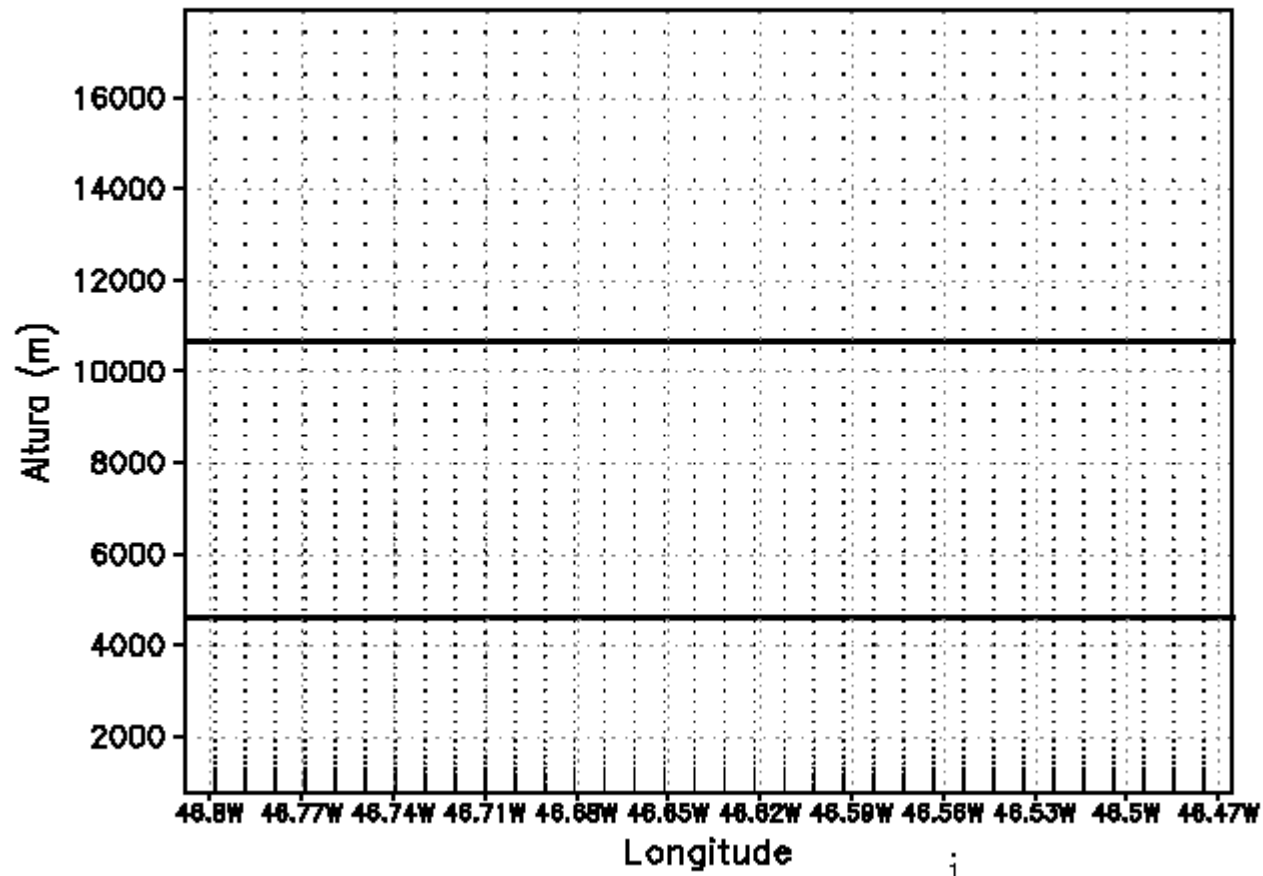


Sondagem fortemente instável



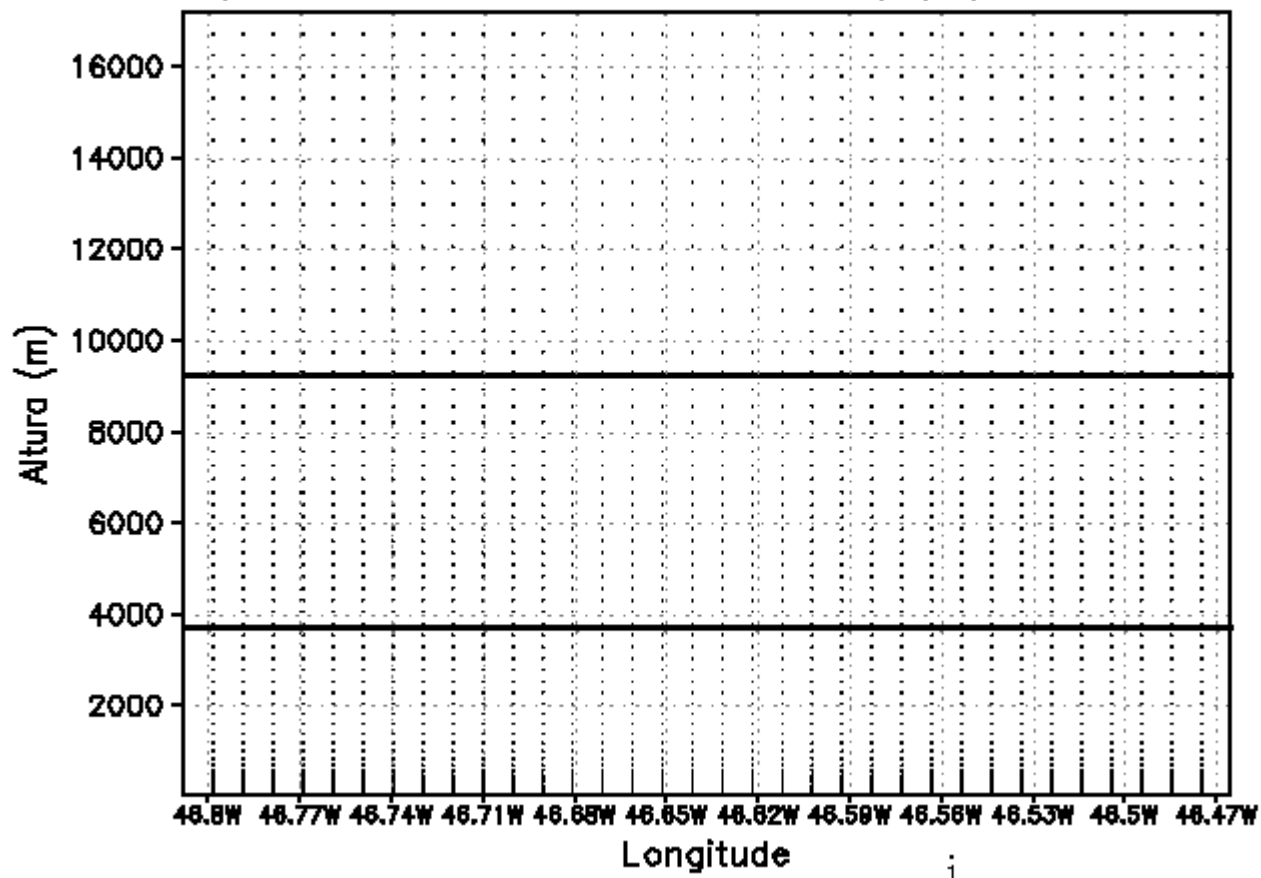
Caso levemente instável

Razao de Mist. Agua de Nuvem + Gelo (g/kg) [Param. de Microf.]
Componentes u e w do Vetor Vento (m/s) 12Z02FEB2004



Caso fortemente instável

Razao de Mist. Agua de Nuvem + Gelo (g/kg) [Param. de Microf.]
Componentes u e w do Vetor Vento (m/s) 12Z02FEB2004



Resumo de eventos no caso mais instável

t = 0 min: todas as variáveis têm distribuição homogênea na horizontal, com a isolinha de $T = 0\text{ °C}$ em $z \approx 3800\text{ m}$

t = 20 min: nuvem quente atinge altura de $T = 0\text{ °C}$

t = 28 min: nuvem atinge altura de $T = -40\text{ °C}$ em meio a um crescimento rápido explosivo

t = 31 min: $w_{\text{máx}} \approx 50\text{ m s}^{-1}$

t = 35 min: início da formação de bigorna em altos níveis pelos cristais de gelo

t = 38 min: pode-se identificar efeito de entranhamento em altos níveis

t = 44 min: novos pulsos de movimento vertical reforçam o Cb

t = 60 min: início da perda de simetria e início da fase de lento decaimento

