Parametrização de Convecção

Convecção Profunda do Modelo

Paulo Kubota

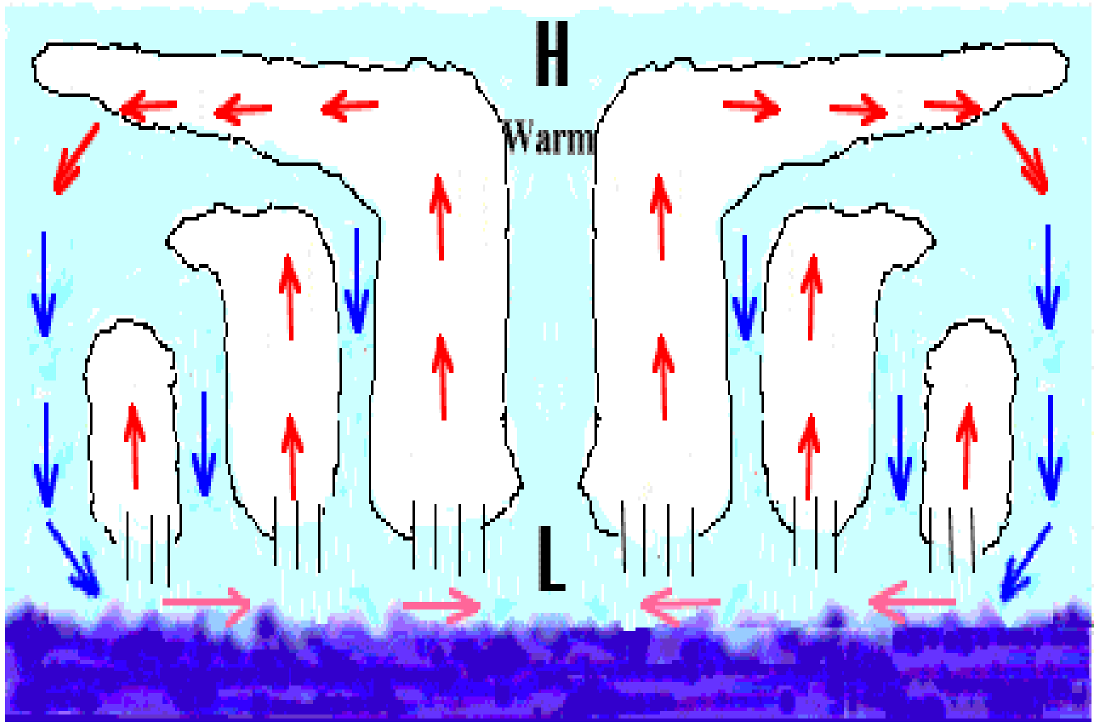
Cachoeira Paulista-SP
CPTEC/INPE
02 abril 2023

Problemas atuais na parametrização cumulus

1. breve introdução à parametrização de cúmulos;
2. uma visão geral dos problemas atuais na parametrização de cúmulos,
3. descrições da formulação de fluxo de massa da parametrização de cúmulos,

1.1 Background

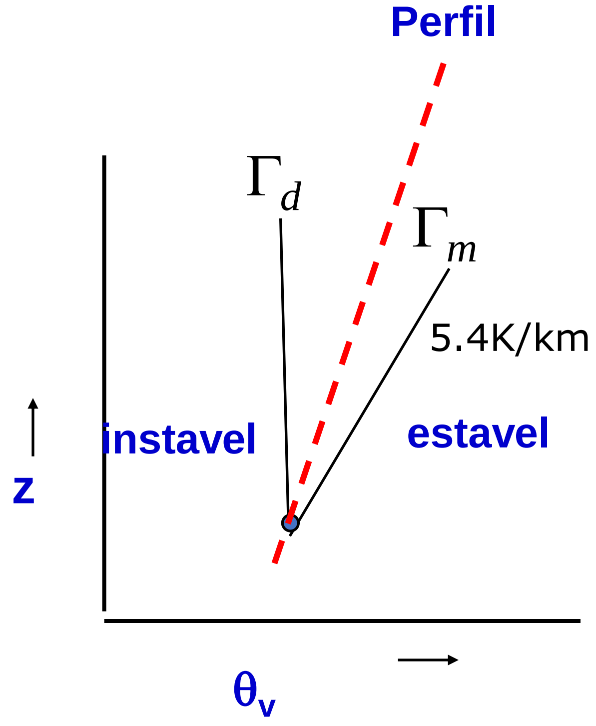
A convecção cumulus consiste em correntes ascendentes estreitas e saturadas (isto é, nuvens cumulus ou cumulonimbus), correntes descendentes estreitas e quase saturadas causadas por precipitação e correntes descendentes amplas e insaturadas na região ao redor das nuvens.



breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

A convecção cumulus ocorre quando a atmosfera é condicionalmente instável (isto é, instável em relação a deslocamentos de parcelas adiabáticas úmidas, mas estável a deslocamentos seco-adiabáticos).



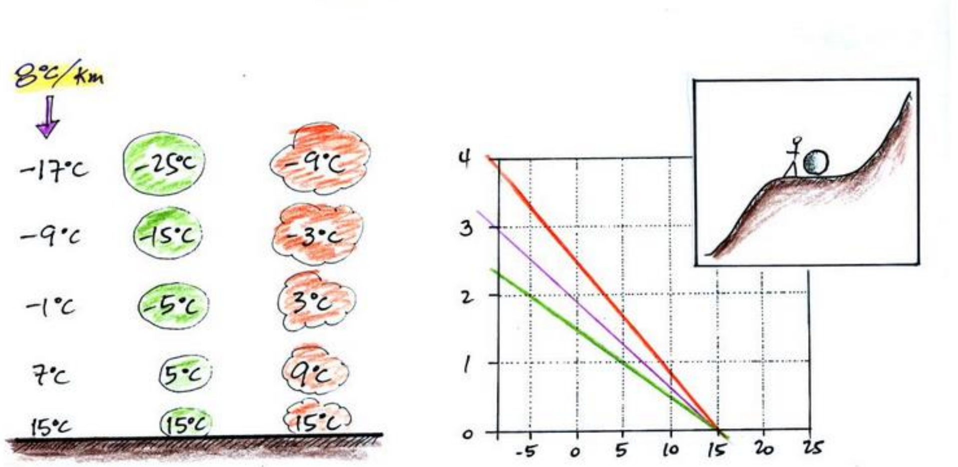
Estavel para parcelas insaturadas

Instavel para parcelas saturadas

$$B = \frac{g}{\theta_0}\left(\theta_{v,p} - \overline{\theta}_v\right)$$

Instabilidade condicional !!

$$\Gamma_d < \frac{\partial \overline{\theta}_v}{\partial z} < \Gamma_m$$



- **Levantamente de uma parcela (não)saturada de uma sondagem em z0 por dz**
- **Checa sobre a flutuabilidade com respeito a sondagem :**

breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

A convecção cumulus pode ser organizada em sistemas convectivos de mesoescala, como linhas de instabilidade.

- Nuvem Convectiva profunda
- Grande Precipitação
- Transporte Vertical Turbulento
- Com Produção de calor latente liquido
- Motor da Circulação de Hadley

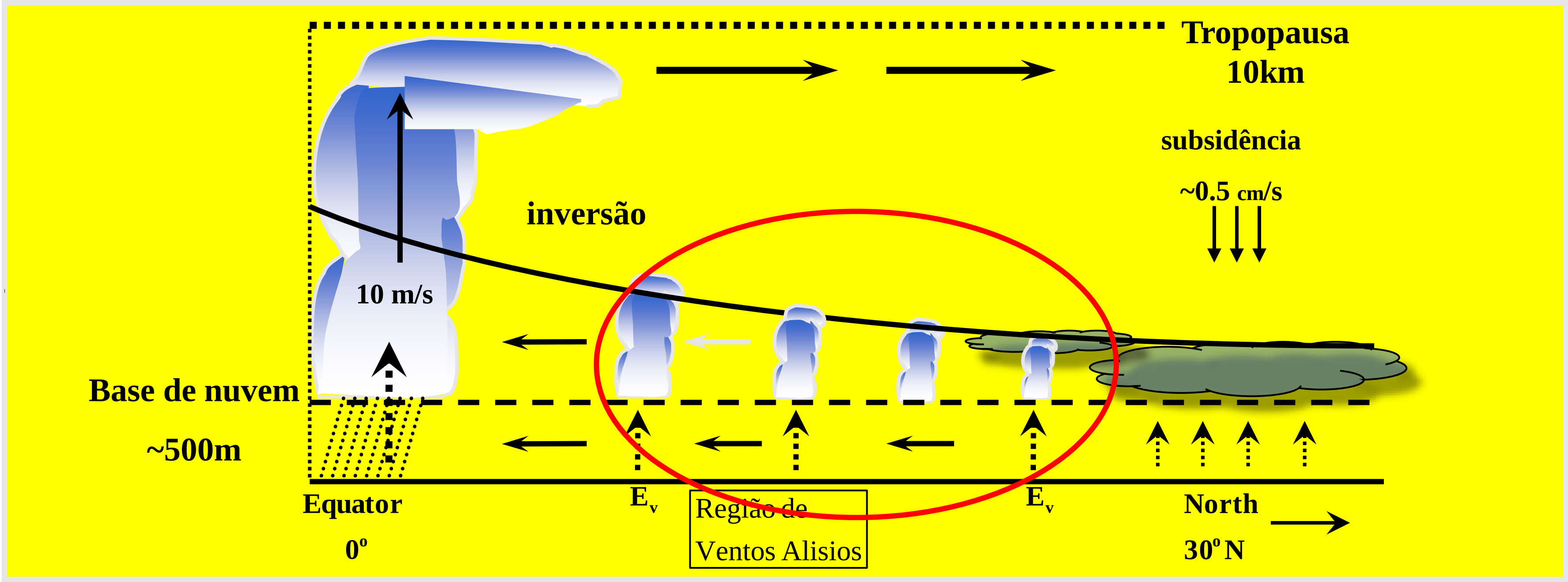
- Nuvem convectiva rasa
- Pequena Precipitação
- Transporte Vertical Turbulento
- Sem produção de calor latente liquido
- Fornece Conbustivel para a Circulação Hadley

- Estratocumulos
- Interação com a Radiação

breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

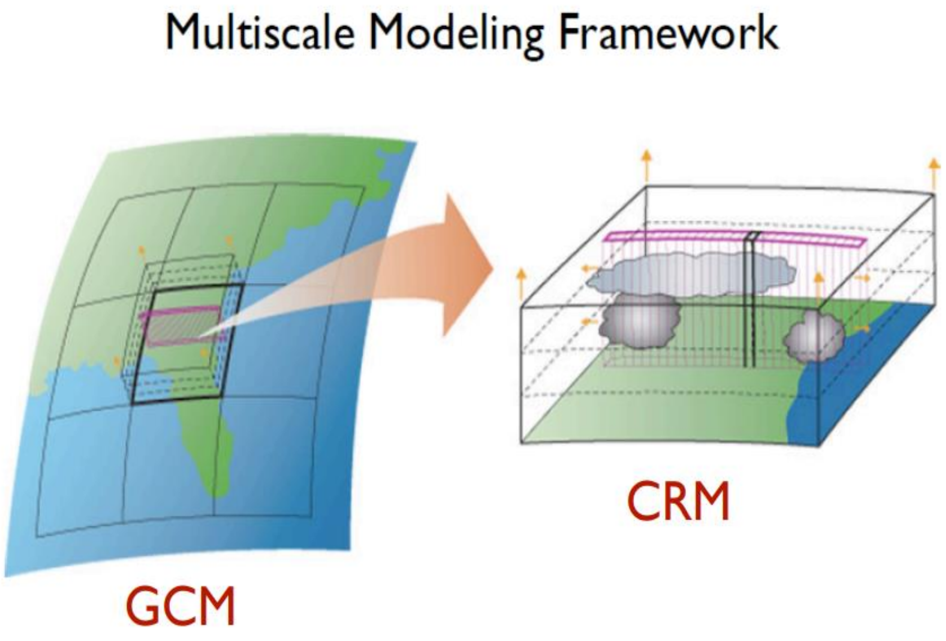
As escalas horizontais e verticais das correntes ascendentes cumulus são comparáveis. Eles variam de algumas centenas de metros para cúmulos rasos a vários quilômetros para cúmulos profundos.

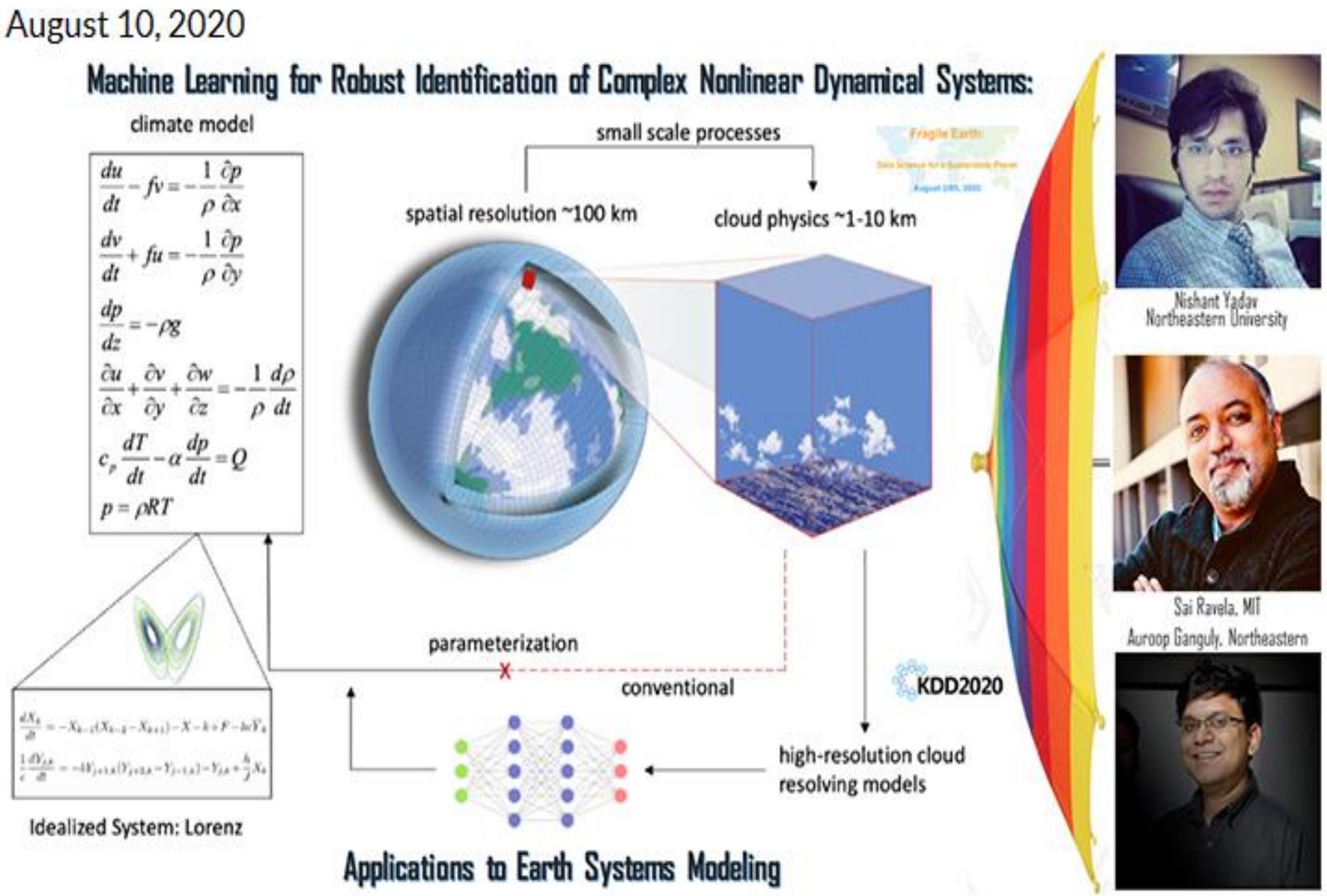


breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

Os tamanhos típicos de grade horizontal e vertical em modelos de grande escala (LSMs) usados para previsão numérica do tempo (NWP) são cerca de 50 km e 500 m, respectivamente, enquanto em modelos climáticos globais (GCMs), são cerca de 250 km e 1000 m.

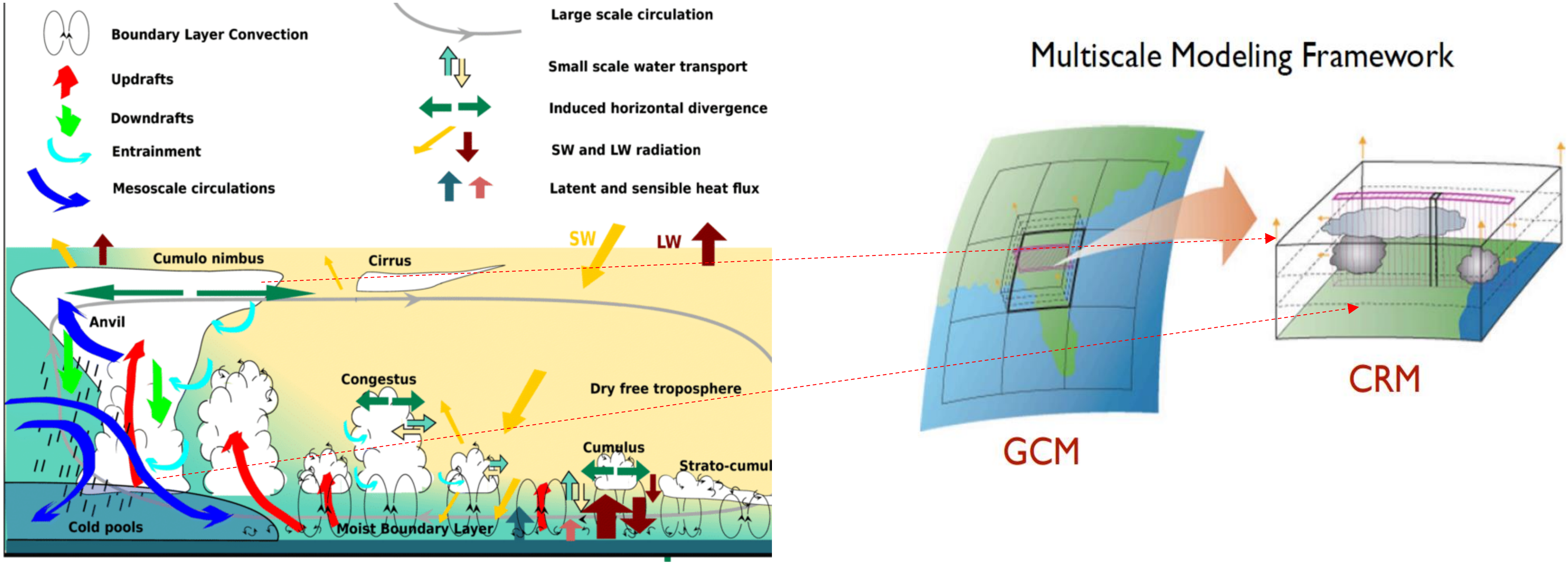




breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

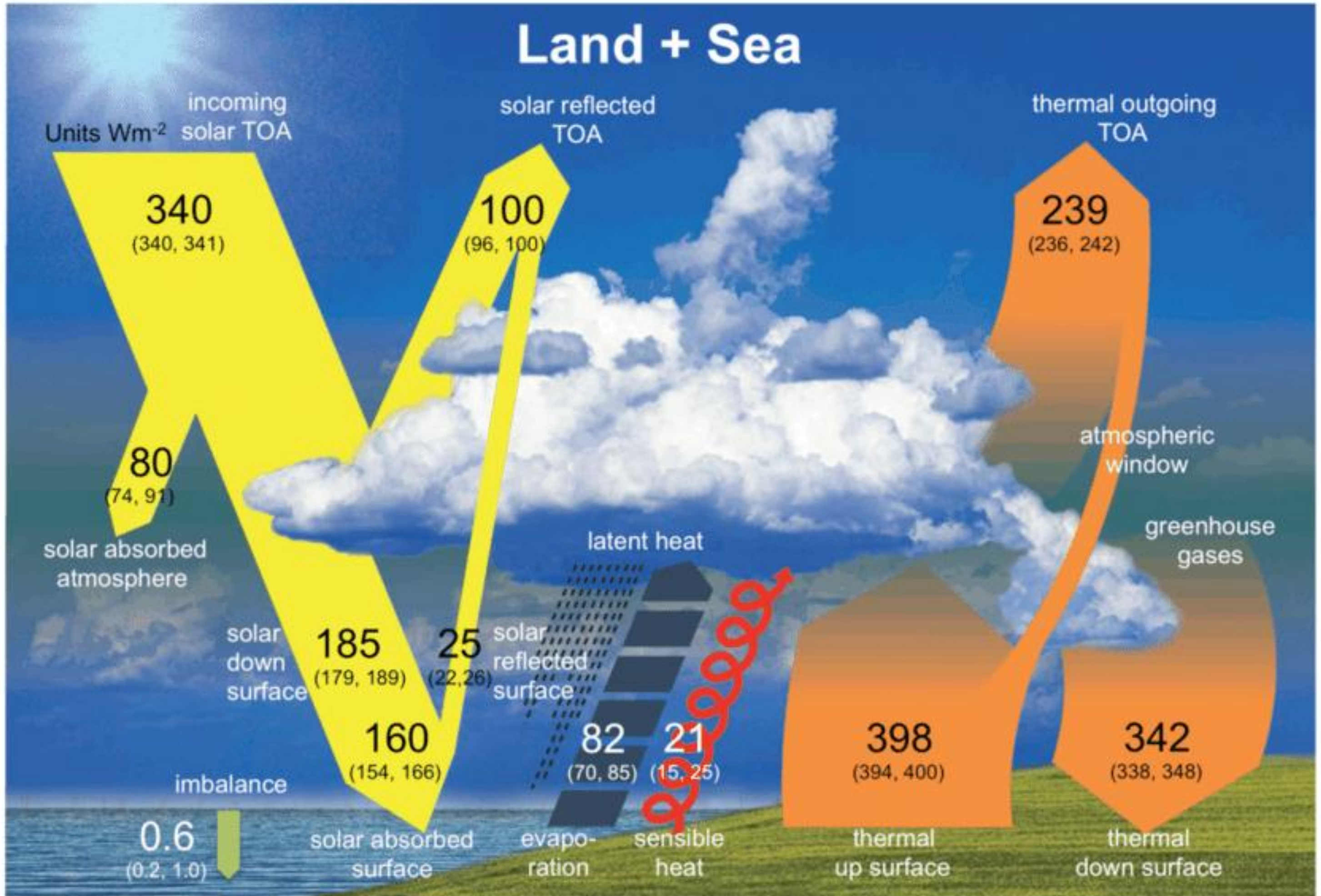
Em tais modelos, uma corrente ascendente cumulus se estenderia através (ou penetraria) de uma ou mais camadas do modelo, mas seria horizontalmente subgrid-escala (SGS).



Isso significa que as correntes ascendentes de cumulus individuais _não podem ser resolvidas por um LSM_ e que uma parametrização de cumulus é necessária para representar seus efeitos (coletivos).

1.1 Background

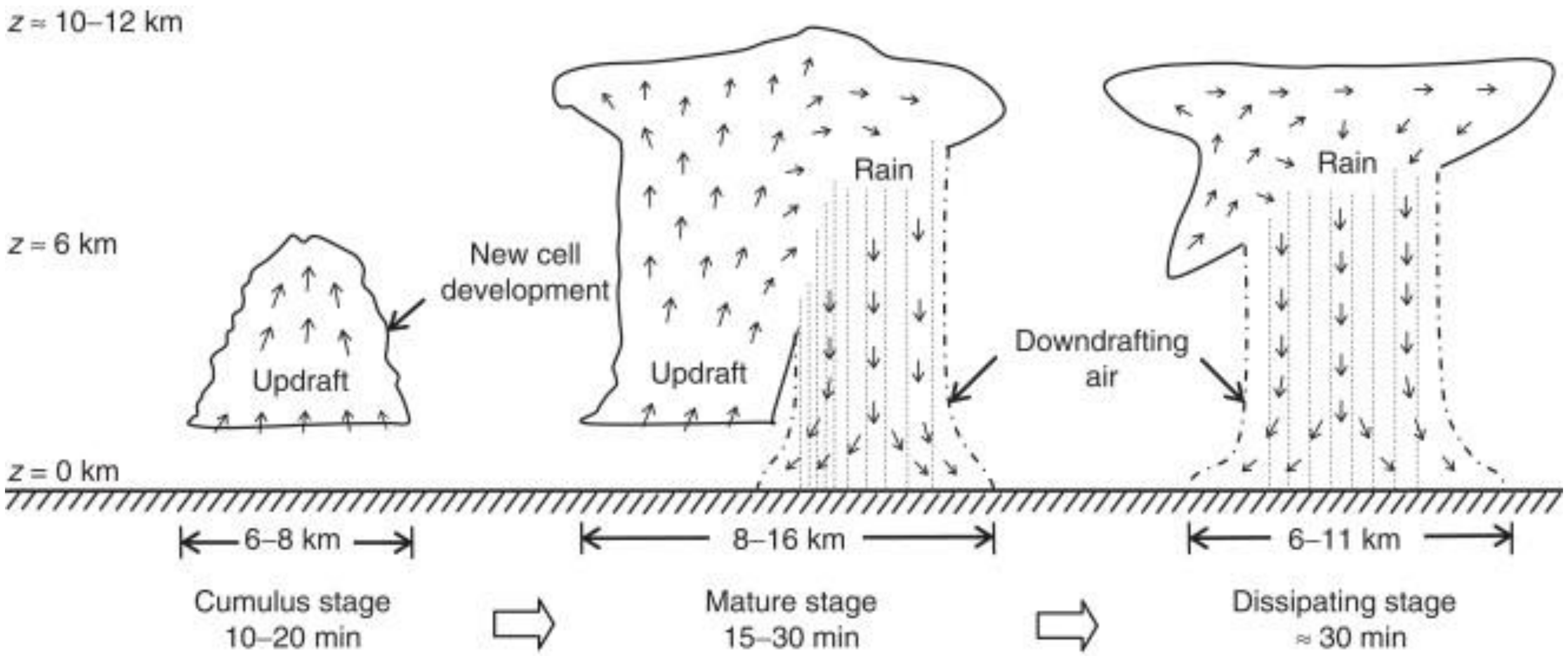
Em termos de balanço energético global, o papel da convecção cumulus é aquecer a troposfera.

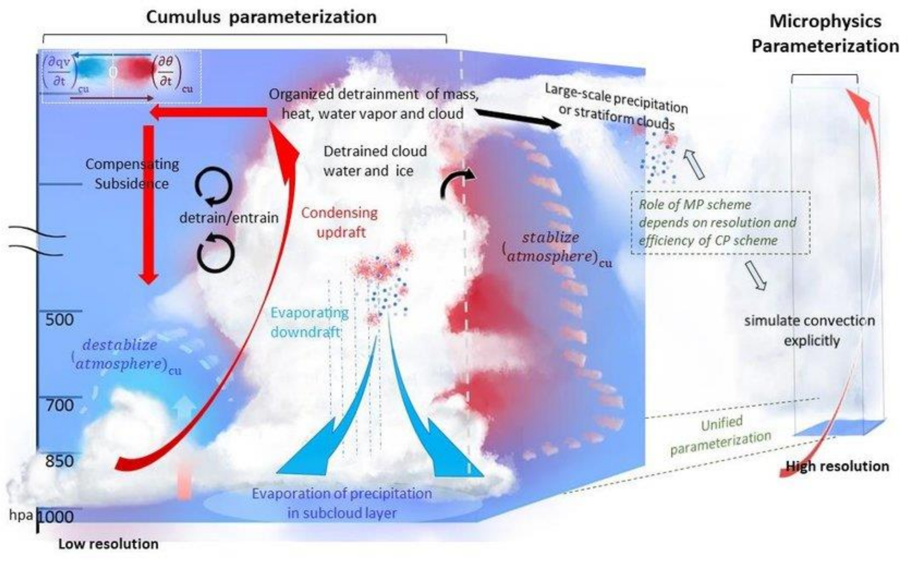


breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

Ele faz isso transportando energia, principalmente na forma de calor latente (ou seja, vapor d'água), verticalmente da camada limite para a troposfera livre, onde é convertido em calor sensível por condensação.

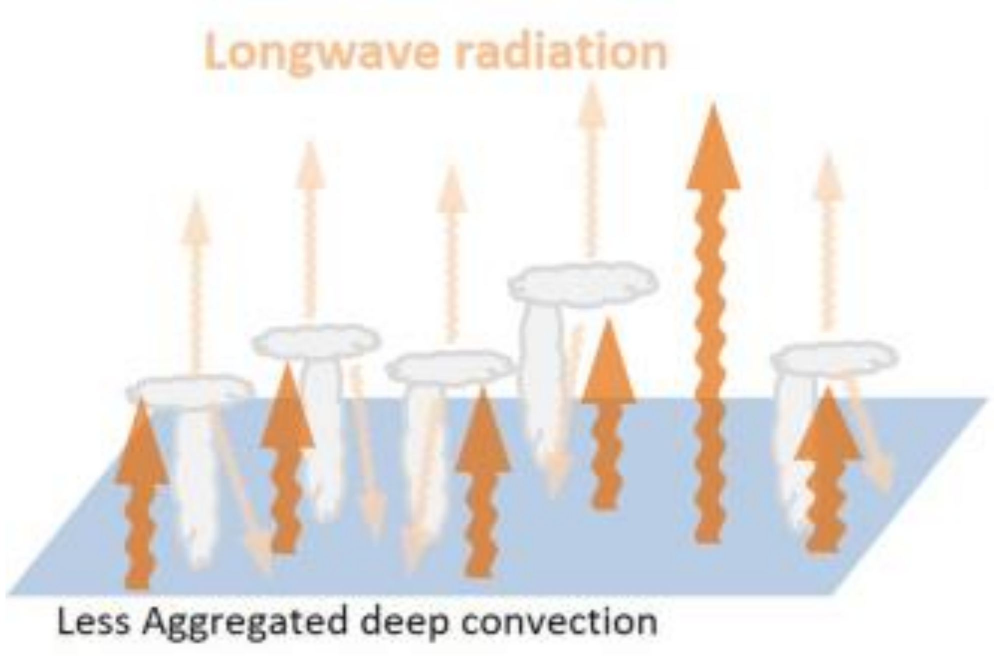


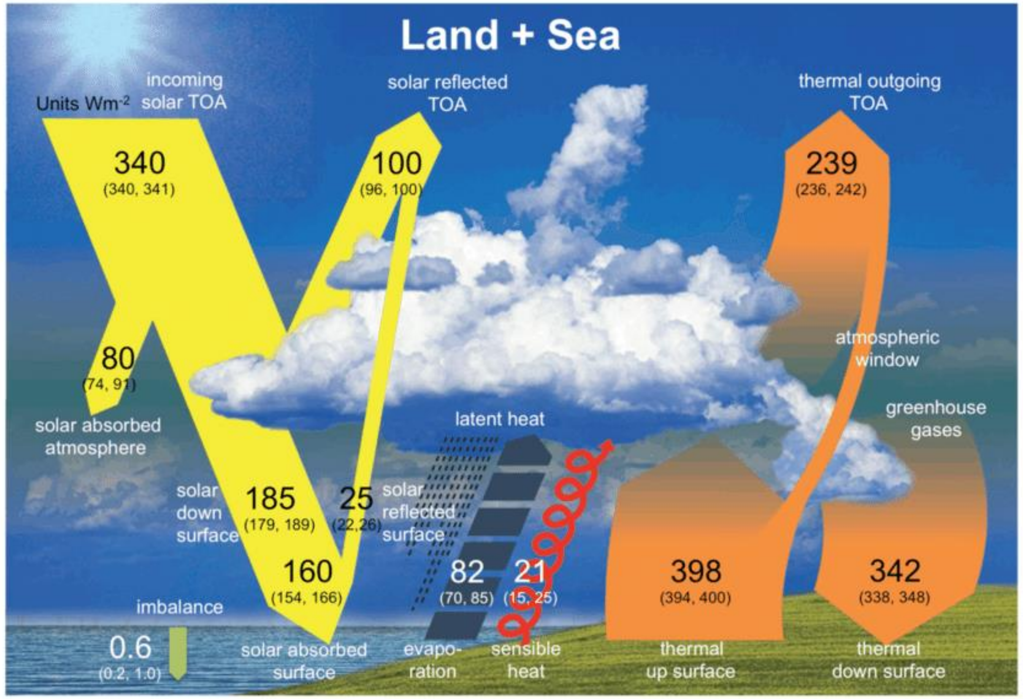


breve introdução à parametrização de cúmulos;

1.1 Background

Globalmente, o aquecimento por convecção cumulus *quase equilibra* o resfriamento radiativo líquido da troposfera.





Changes of deep convection organization and microphysics processes due to global warming

Este estado global é referido como equilíbrio radiativo-convectivo.

breve introdução à parametrização de cúmulos;

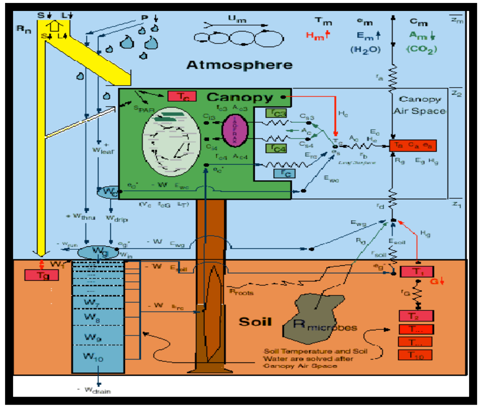
1.1 Background

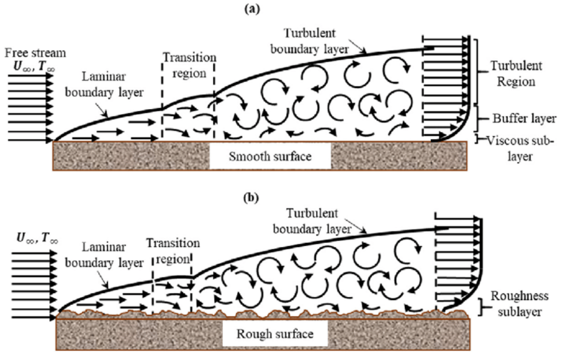
Sem a convecção cumulus, prevaleceria um equilíbrio puramente radiativo. No entanto, tal estado de equilíbrio é absolutamente instável (ou seja, é instável para deslocamentos adiabáticos secos), portanto não ocorre.

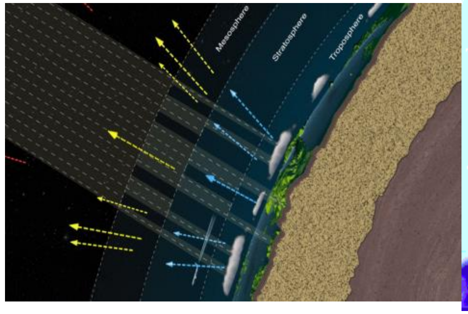
$$\Gamma_d < \frac{\partial \overline{\theta}_v}{\partial z} < \Gamma_m$$

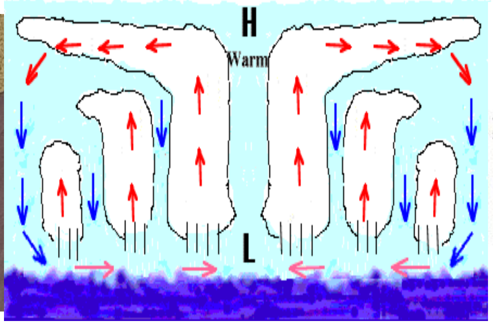
Instabilidade condicional !!

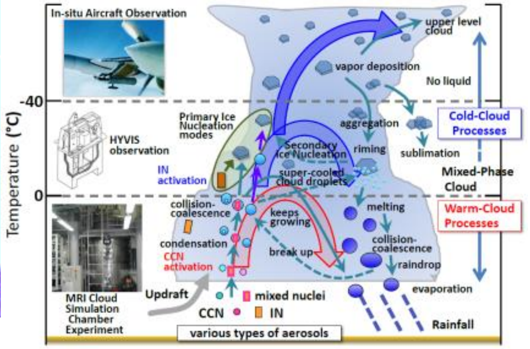
Assim, no nível mais fundamental, uma parametrização cumulus deve, em conjunto com parametrizações adequadas de transferência radiativa, transporte turbulento da camada limite e nuvens, ser capaz de reproduzir a estrutura termodinâmica vertical observada da troposfera.







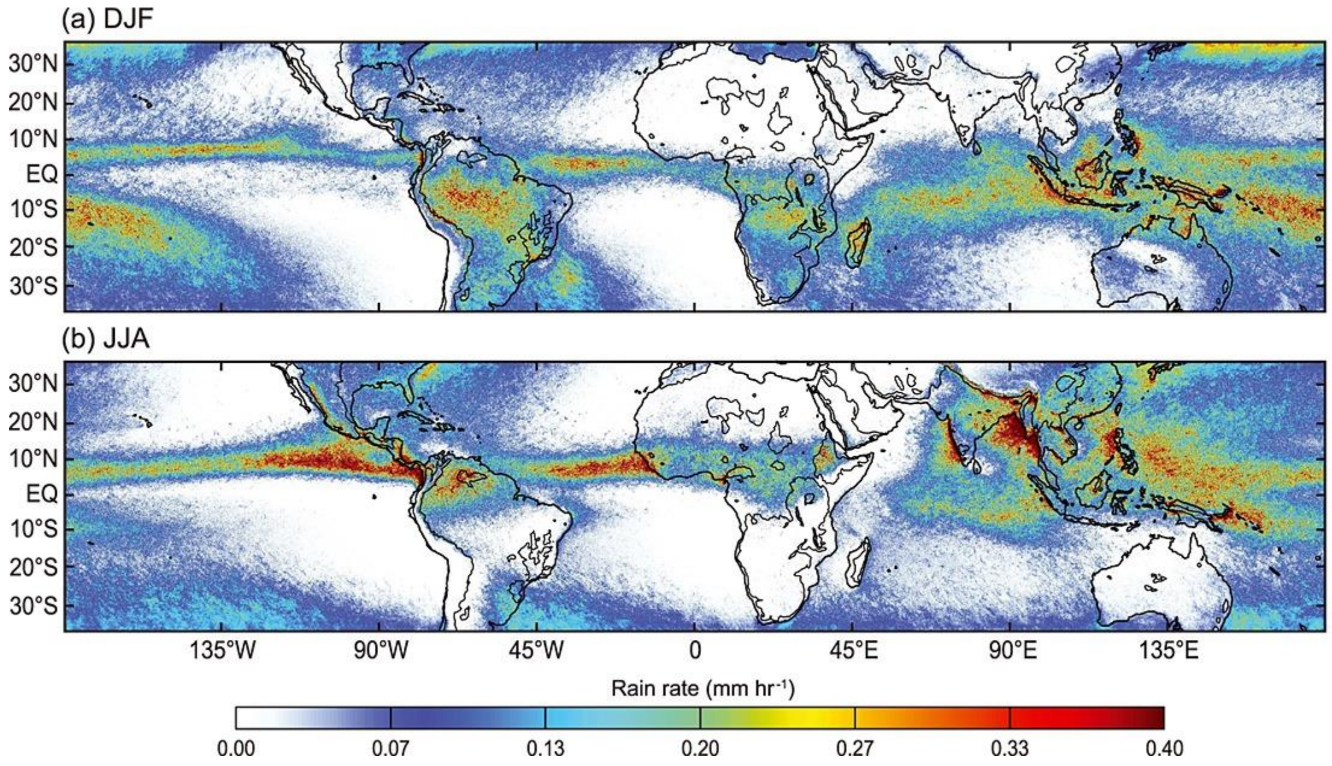


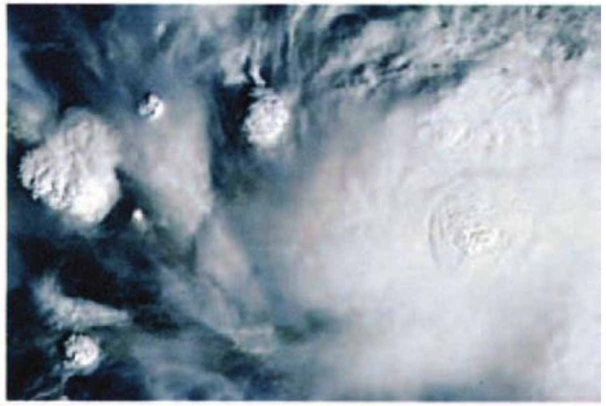


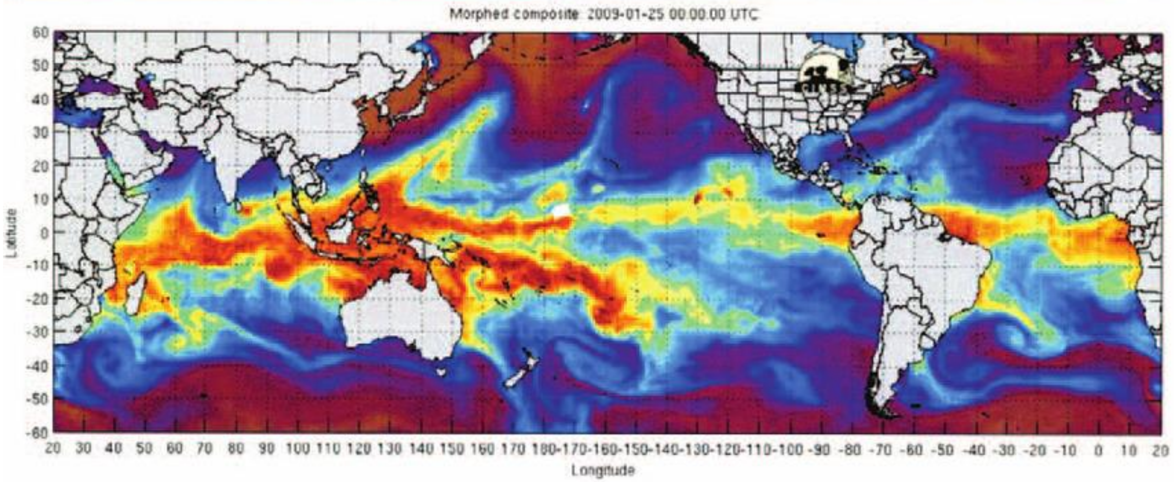
1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Sobre a Terra, a convecção cumulus tende a ocorrer com mais frequência em certas regiões, em certas horas do dia e do ano e sob certas condições de grande escala.

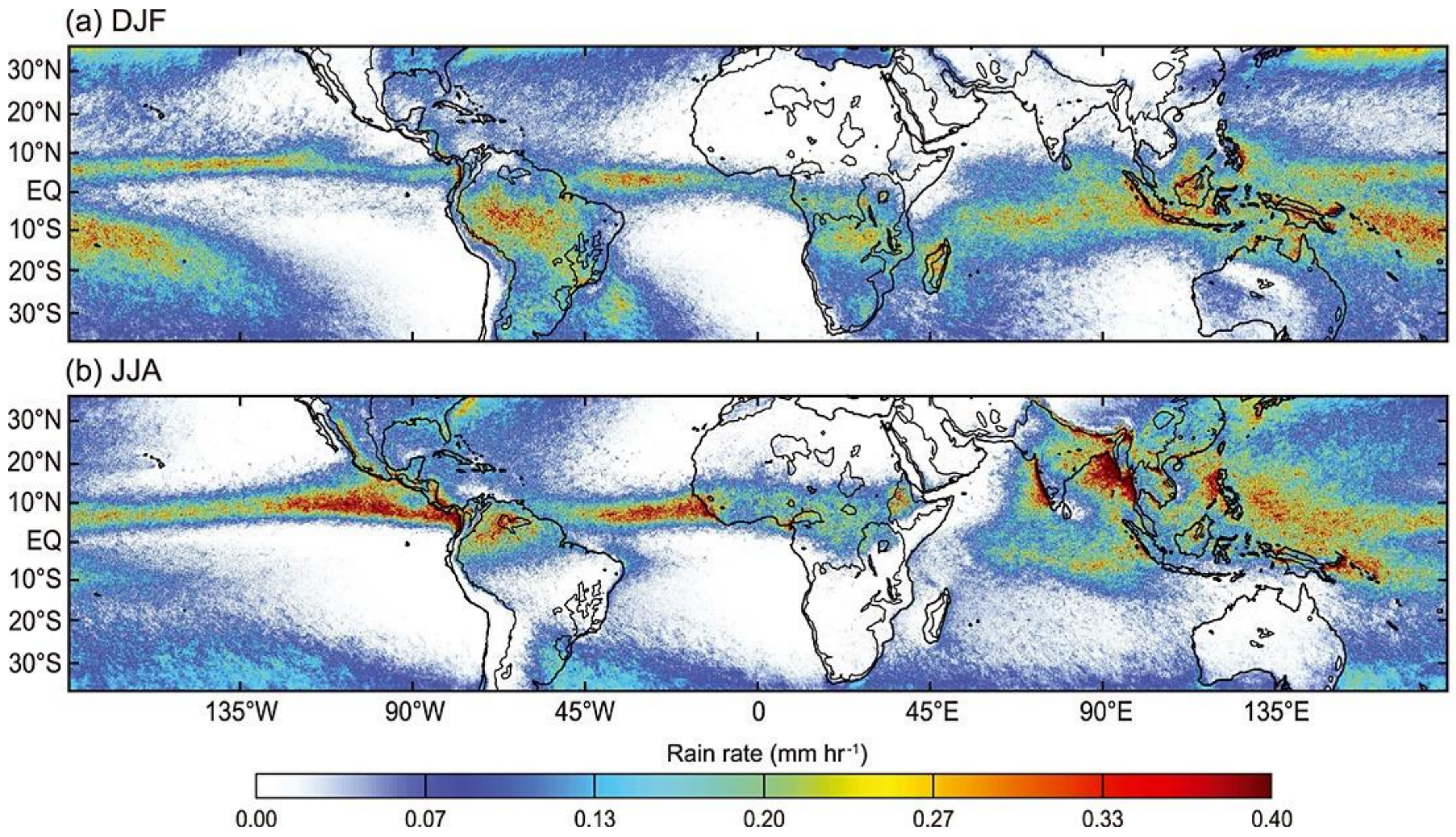






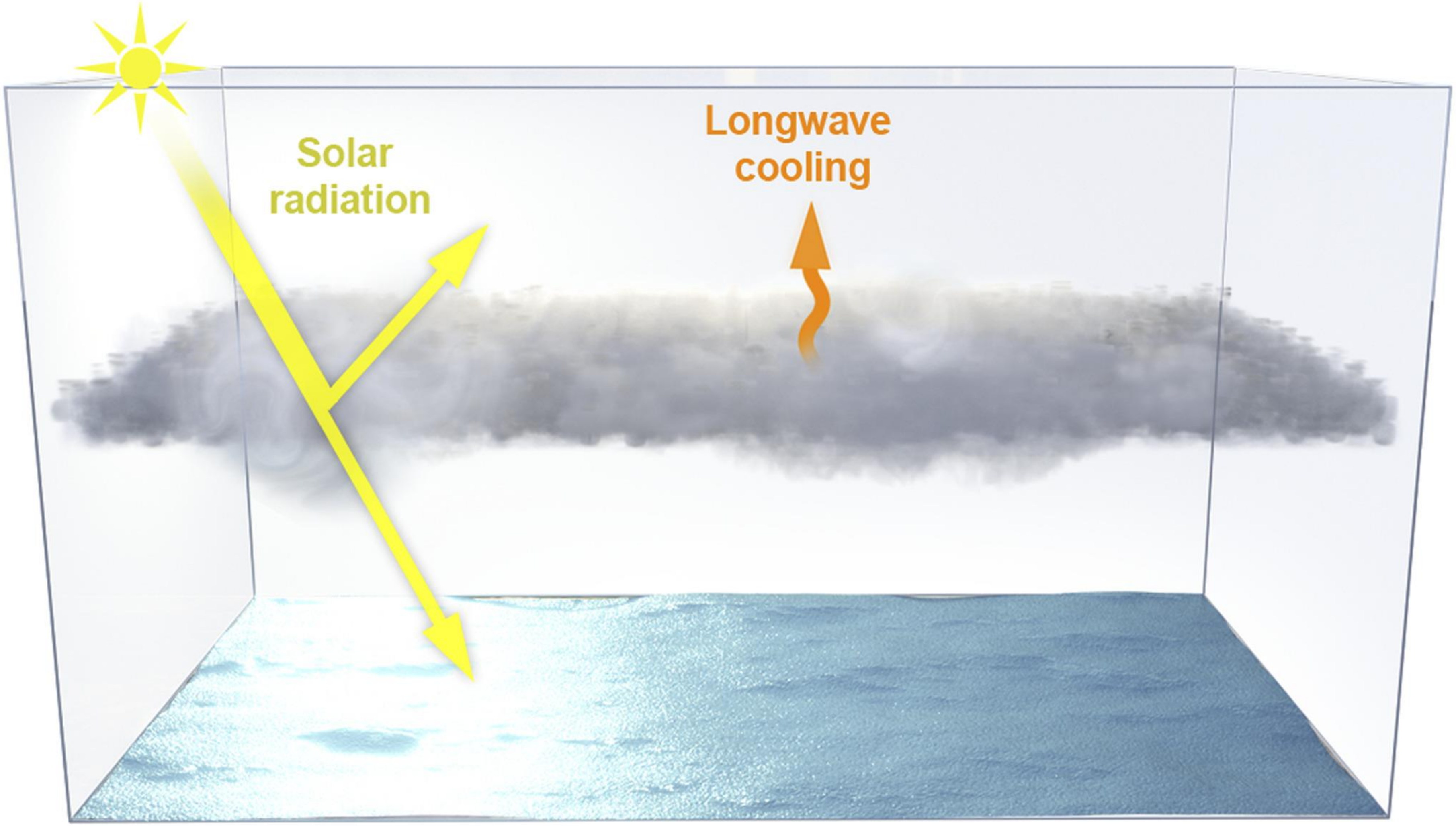
1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Isso sugere que uma tarefa básica de uma parametrização cumulus em um GCM é reproduzir a distribuição global observada da convecção cumulus.



1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

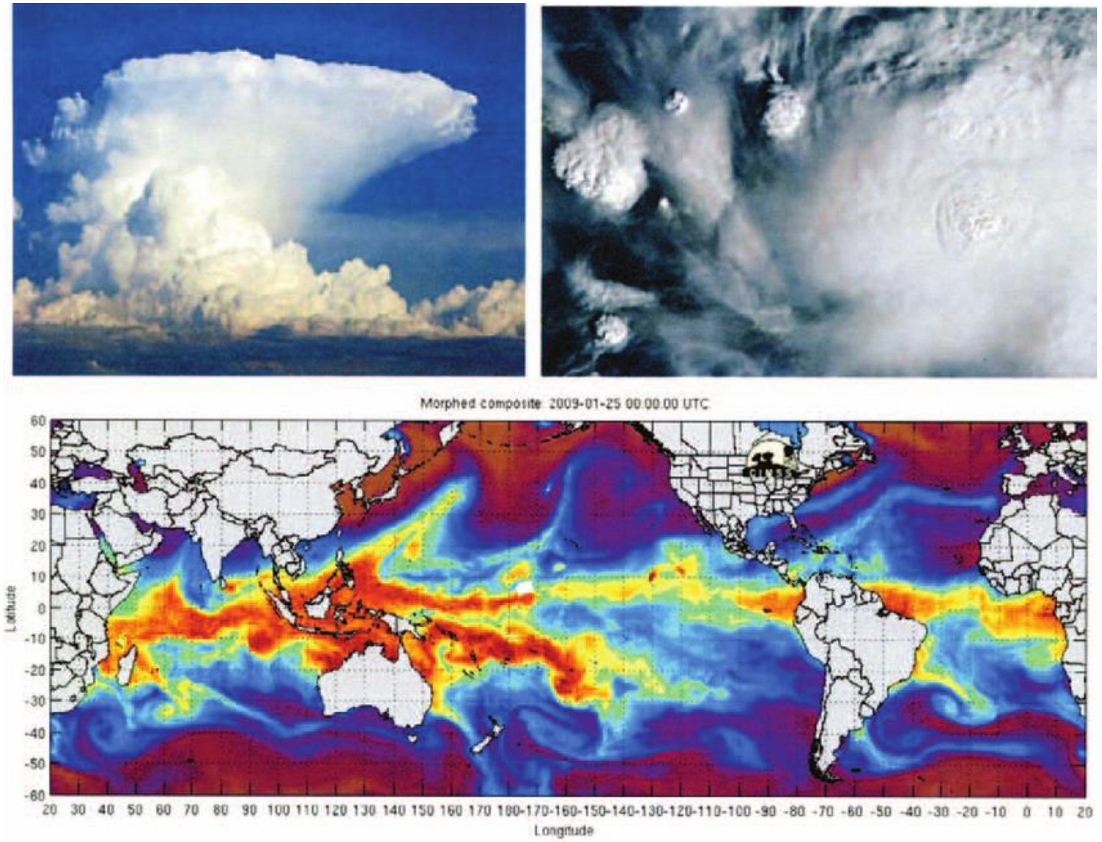
A convecção cumulus profunda e precipitação geralmente produz extensas nuvens estrato na troposfera superior que afetam significativamente a radiação.

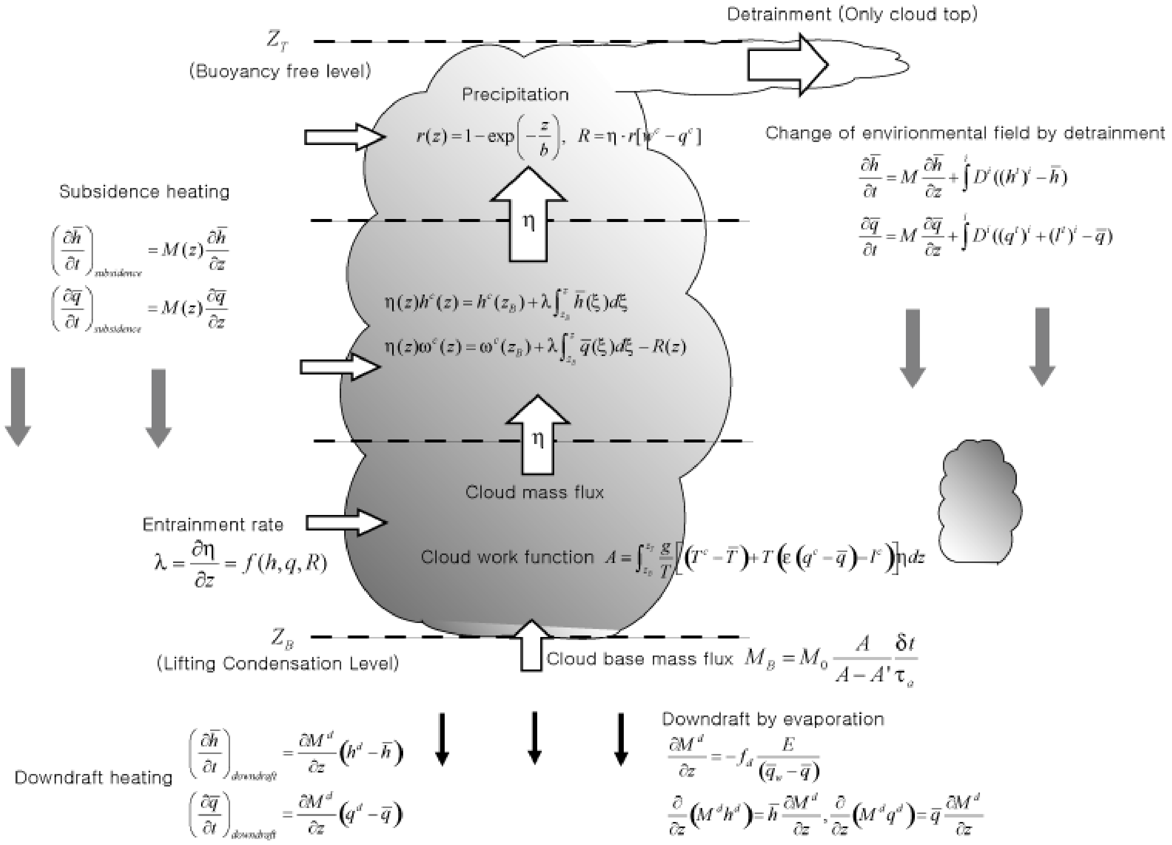


[Tapio Schneider]

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

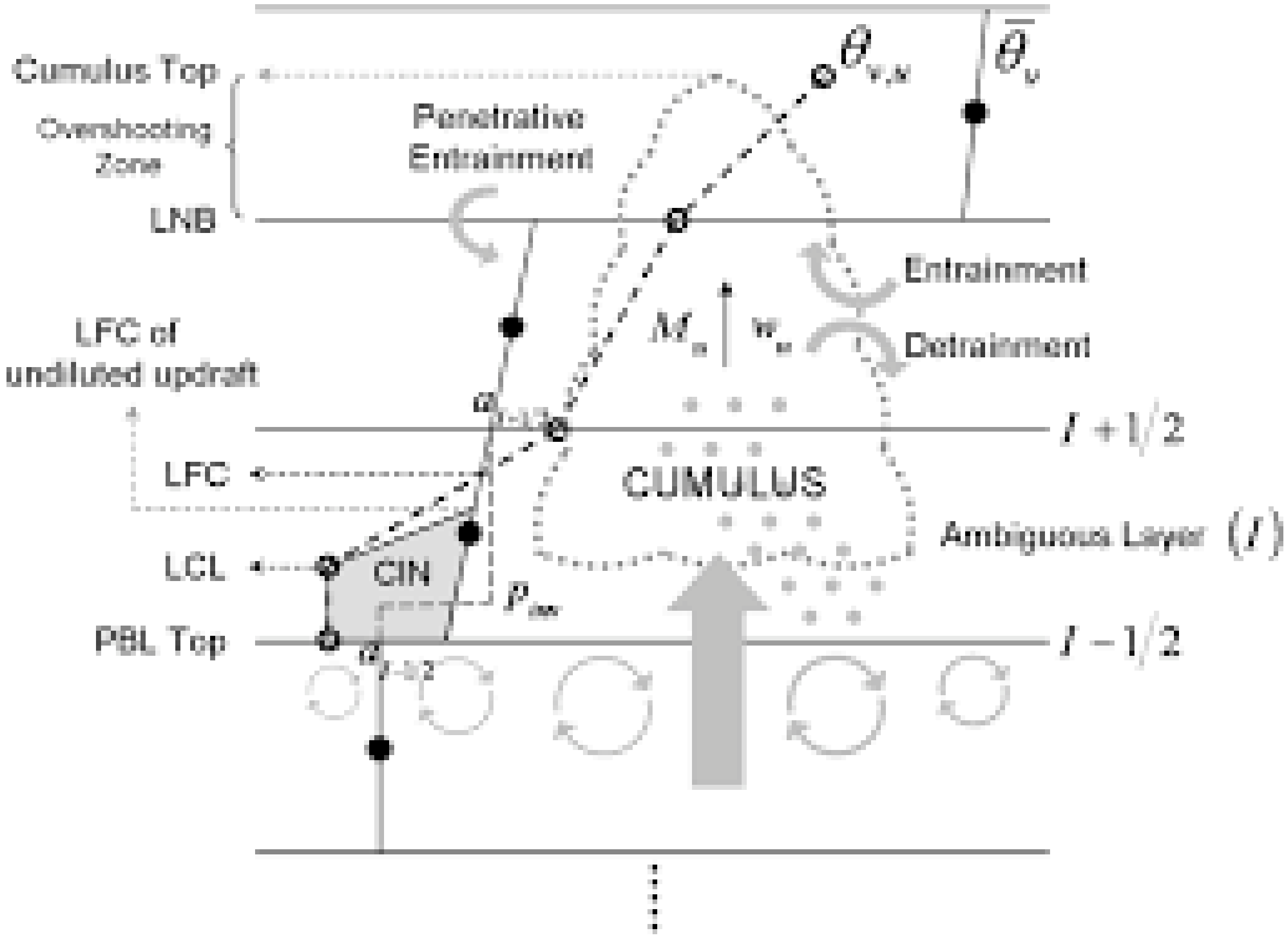
Portanto, um objetivo importante de uma parametrização de cumulus é determinar a ocorrência e as propriedades dessas nuvens.

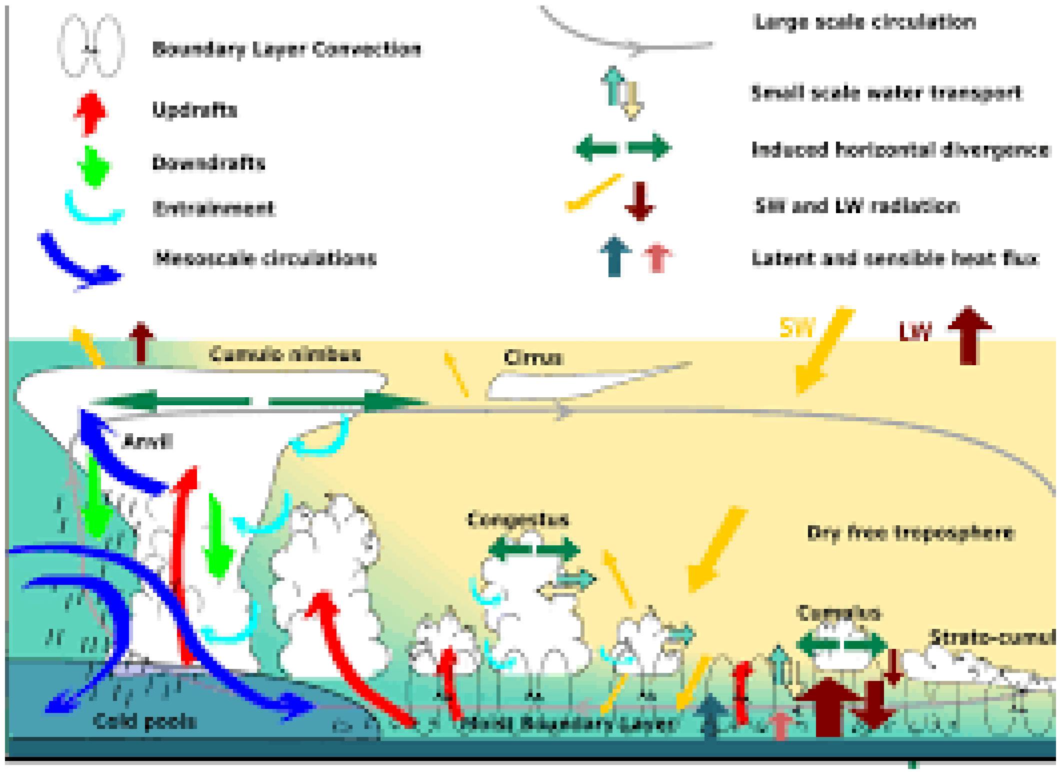




1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

A camada limite atmosférica pode ser fortemente **afetada pela convecção cumulus**, **então uma** ***parametrização cumulus deve representar os processos relevantes.***





1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Também está se tornando cada vez mais comum para parametrizações cumulus em GCMs estimar os efeitos cumulus no momento horizontal em larga escala, e até mesmo na química da atmosfera de várias espécies químicas.

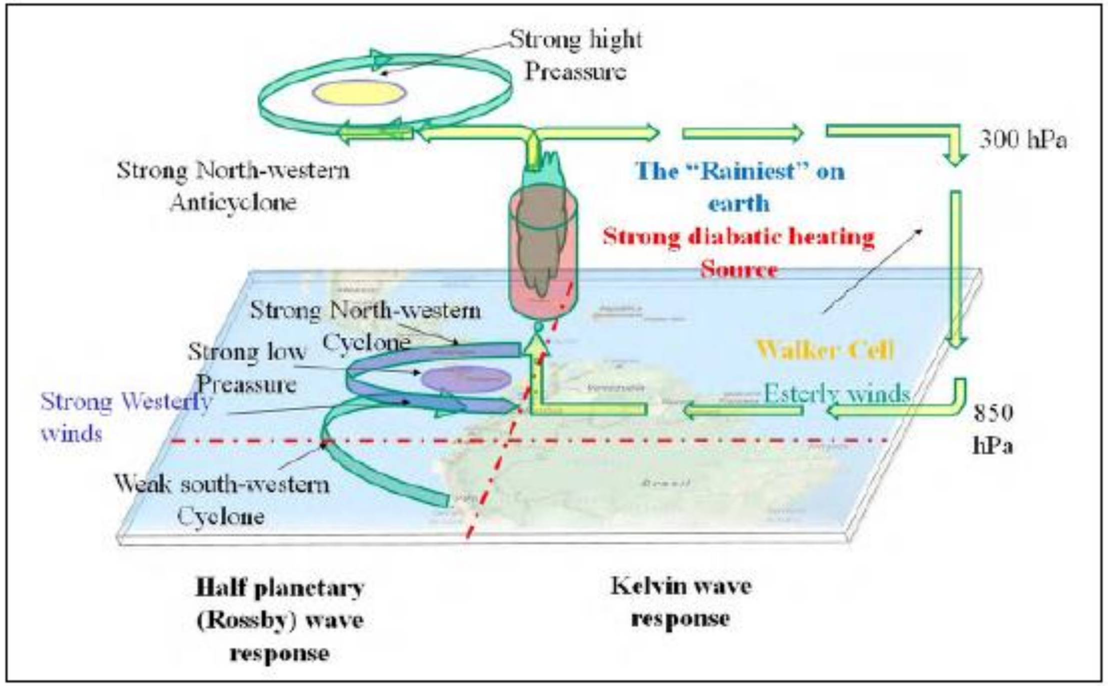
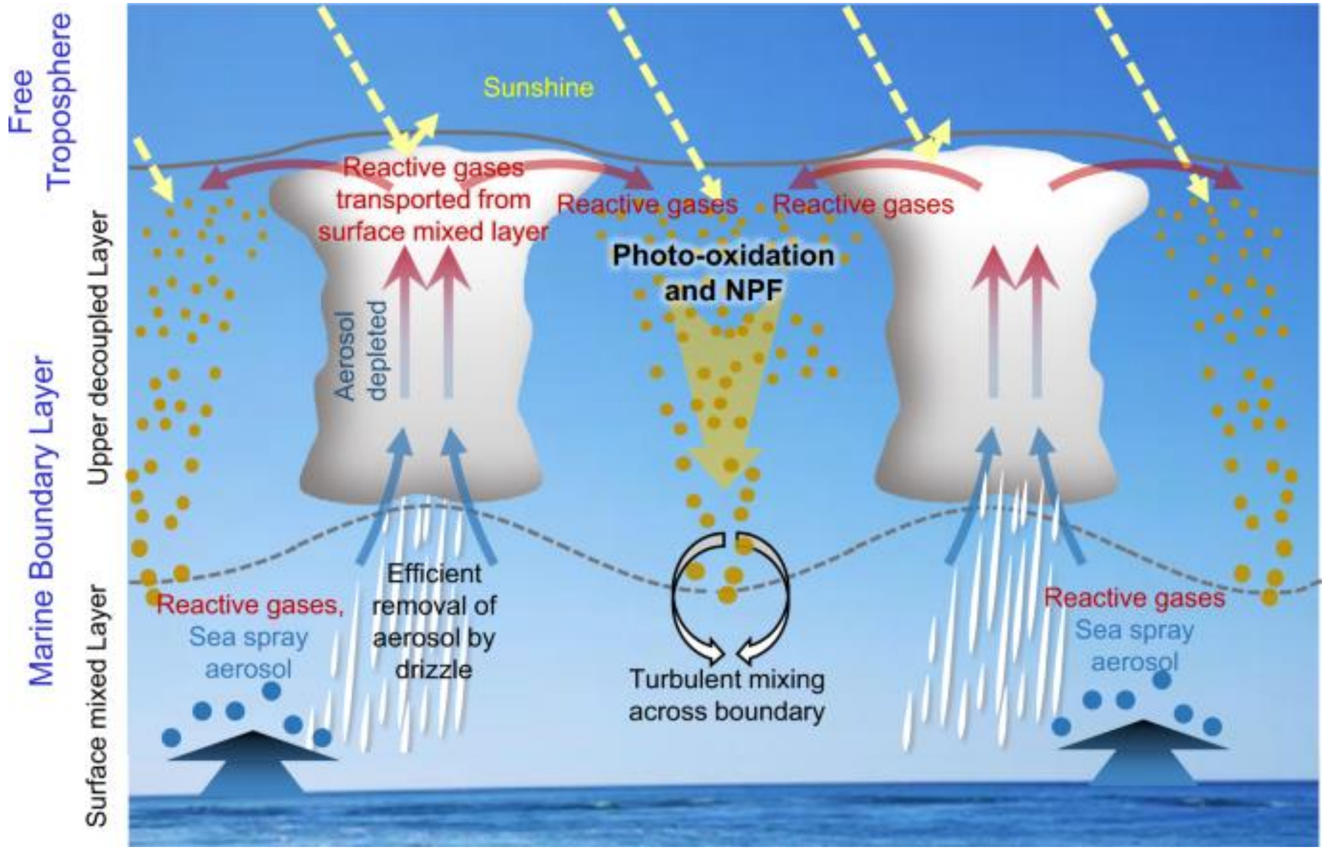


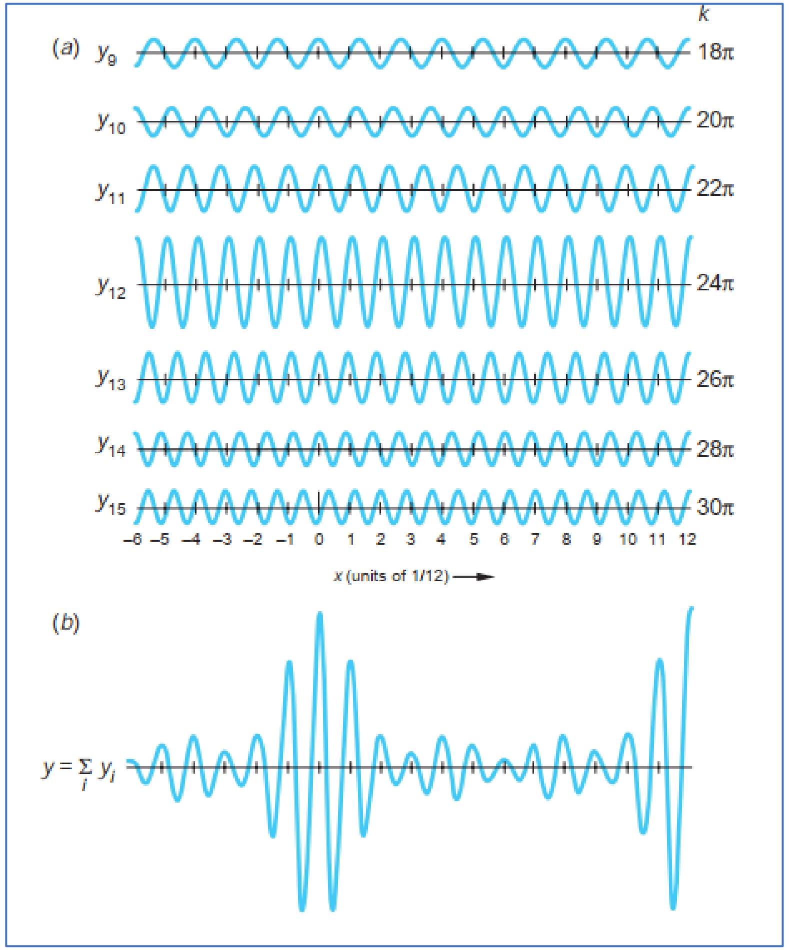
Figure 4. Schematic diagram of the general circulation of the atmosphere in northern South America and Mesoamerica using the heat-induced circulation

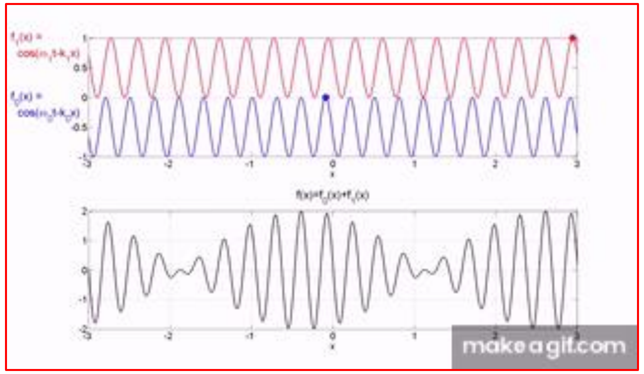


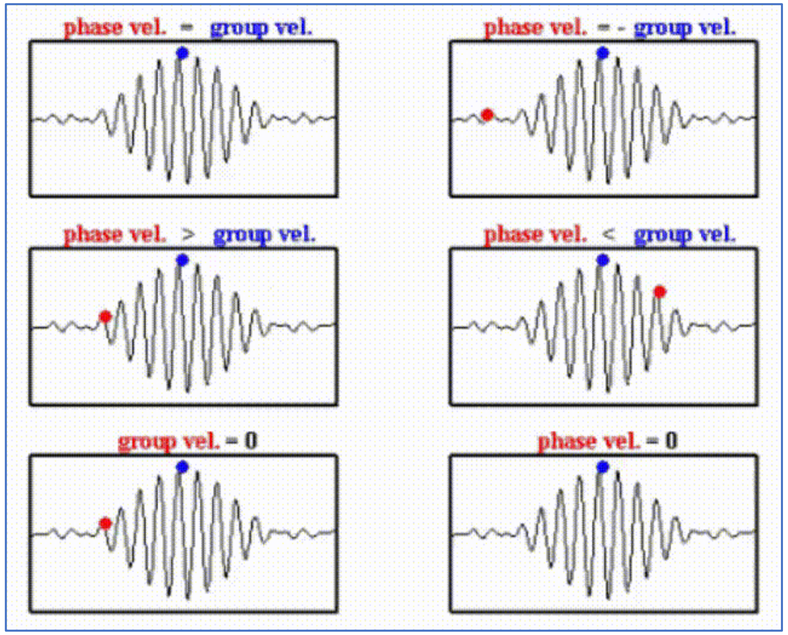
Guangjie Zheng,

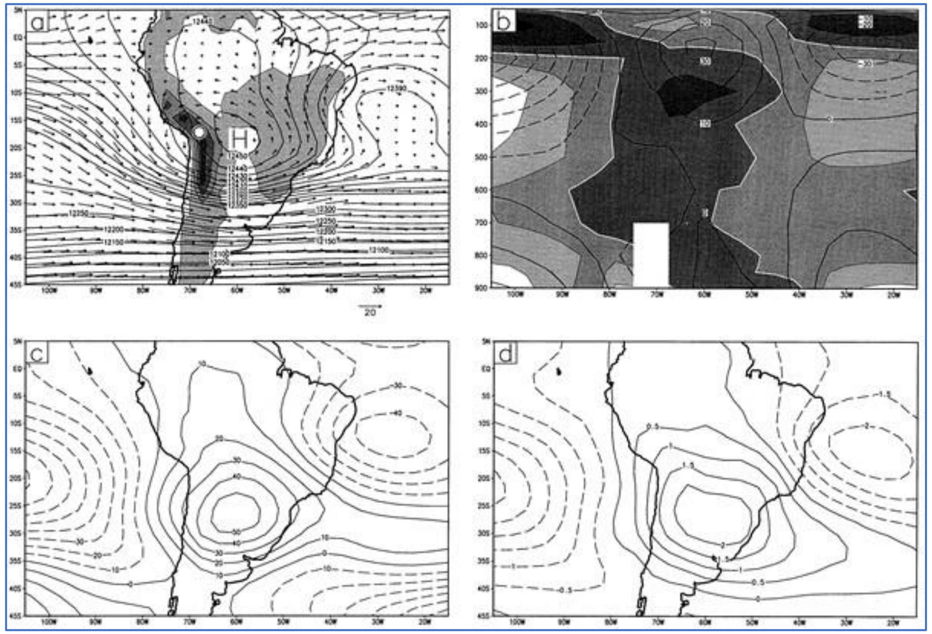
1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Também está se tornando cada vez mais comum para parametrizações cumulus em GCMs estimar os efeitos cumulus no momento horizontal em larga escala.









$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial t} + (\bar{u})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + (\bar{v})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial y} + (\bar{w})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial x} - 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial x^2} - \nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial y^2} - \nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'u'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'u'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t} + (\bar{u})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial x} + (\bar{v})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + (\bar{w})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial y} + 2\Omega\eta_3(\bar{v}) - \nu\frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial x^2} - \nu\frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial y^2} - \nu\frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'v'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{w})}{\partial t} + (\bar{u})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial x} + (\bar{v})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial y} + (\bar{w})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial z} + g\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} - \nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial x^2} - \nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial y^2} - \nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial z^2} = -\frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'w'})}{\partial z}$$

$$\frac{d\phi}{dP} = -\frac{RT}{P}$$

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial x} + (\bar{v})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial y} + (\bar{w})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial z} - S_p\bar{\omega} = -\frac{\partial(\overline{u'T'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'T'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'T'})}{\partial z} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial x} + (v)\frac{\partial(\bar{q})}{\partial y} + (\bar{w})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial z} = -\frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'q'})}{\partial z} + \bar{S}$$

Guangjie Zheng,

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Também está se tornando cada vez mais comum para parametrizações cumulus em GCMs estimar os efeitos cumulus no momento horizontal em larga escala, e até mesmo na química da atmosfera de várias espécies químicas.

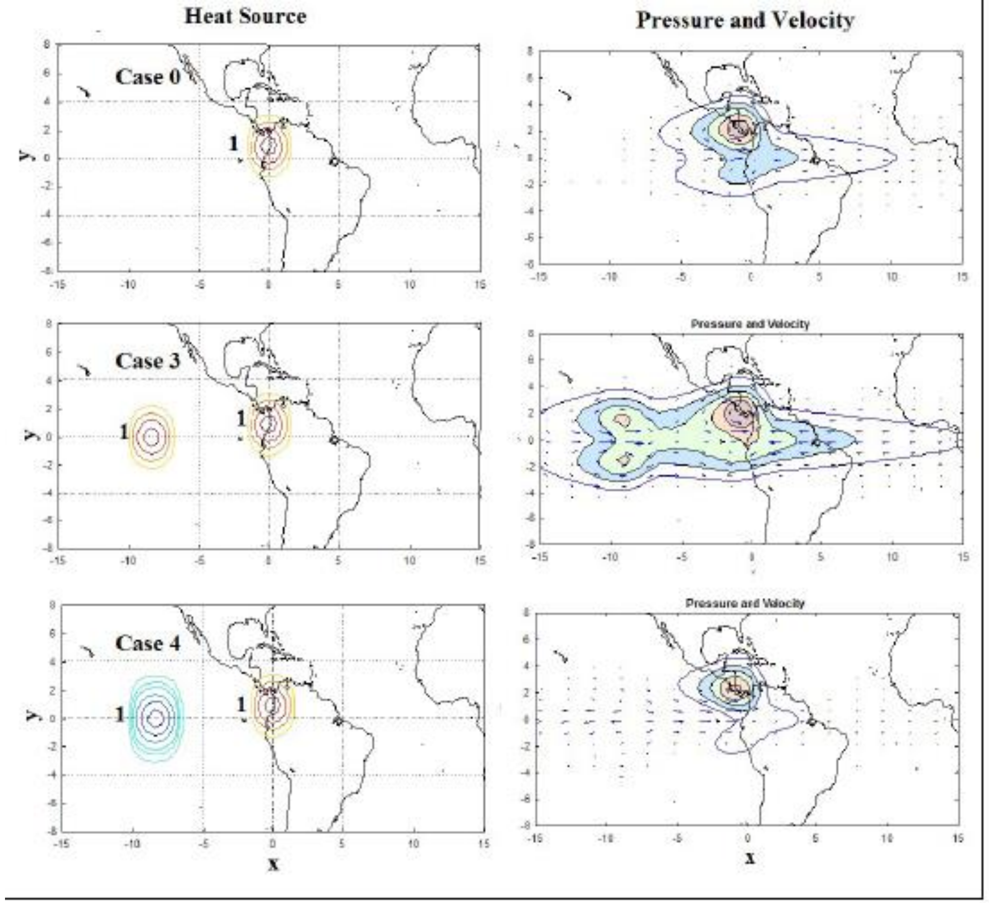


Figure 7. Comparisons of circulation in northern South America considering different scenarios. Case 0: Diabatic heating source located at 4 ° N; Case 3: Diabatic heat source located at 4 ° N and another with the same magnitude on the Central Pacific; Case 4: Diabatic heat source located at 4°N and a cooling zone on the Central Pacific

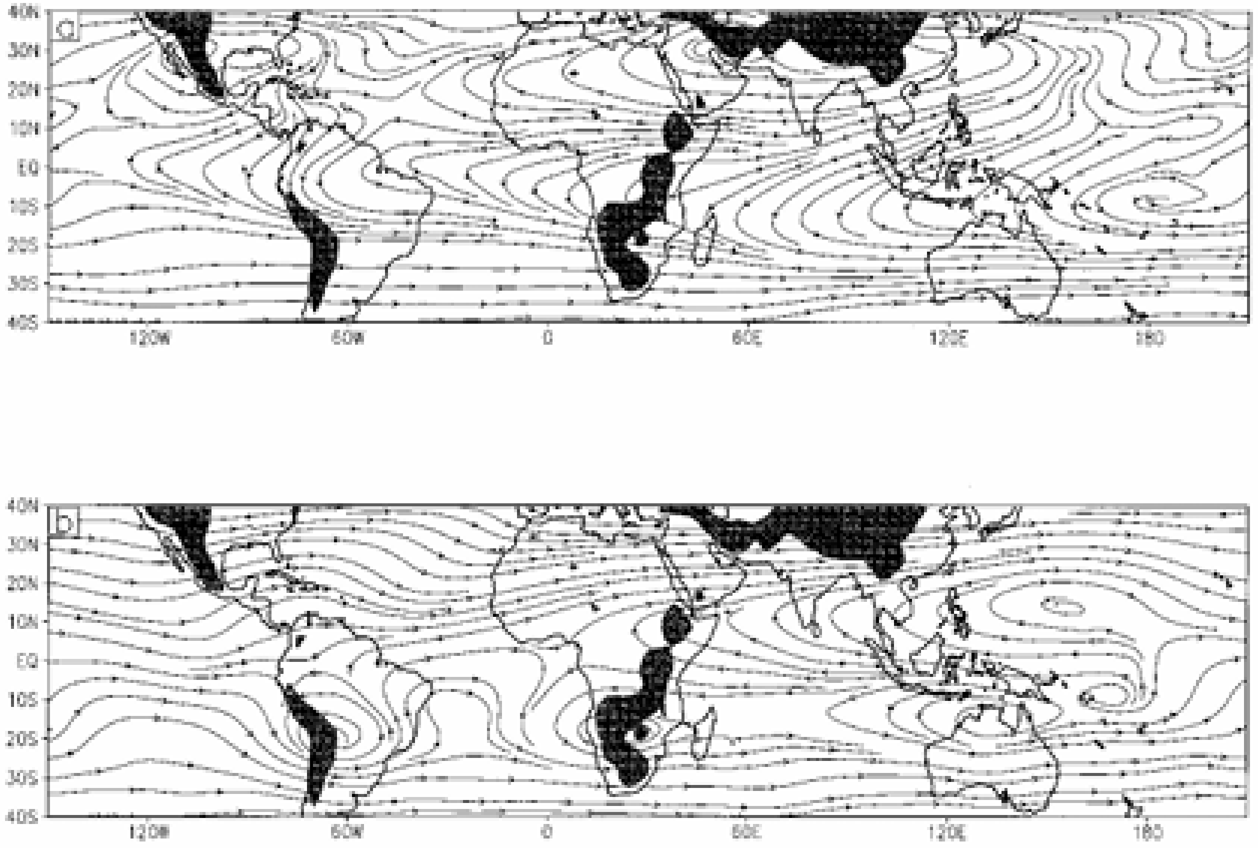


FIG. 1. (a) Climatological streamlines at 200 mb for July (from NASA/DAO 4D assimilation). Shaded regions indicate topography in excess of 1 km. (b) As in (a) but for January.

Guangjie Zheng,

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

A **fonte de calor aparente, Q1**, é o aquecimento resultante de **processos diabáticos não resolvidos** na atmosfera."

$$Q_1 = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \overline{\nabla \cdot (s\mathbf{V})} + \frac{\partial(\bar{s}\,\bar{\omega})}{\partial p}$$

$$= Q_R + L(c - e) - \frac{\partial(\overline{s'\omega'})}{\partial p},$$

Onde:
s é a energia estática seca, s = cpT + gz (ou seja, a soma da entalpia e da energia potencial),

QR é o aquecimento ou resfriamento radiativo atmosférico,

L(c - e) é o aquecimento ou resfriamento latente resultante das mudanças de fase da água (aqui indicado pelo calor latente de vaporização vezes condensação menos evaporação, mas, de forma mais geral, incluindo o calor latente de fusão vezes congelamento menos derretimento e o calor latente de sublimação vezes deposição menos sublimação),

s'w' é o transporte turbulento vertical de calor sensível.

"A capacidade de caracterizar as variações em Q1, especialmente sua estrutura vertical, ***permite um maior entendimento da relação entre os sistemas de nuvens convectivas tropicais e a circulação de grande escala*** (por exemplo, Hartmann et al., 1984)."

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

A **fonte de calor aparente, Q1**, é o aquecimento resultante de **processos diabáticos não resolvidos** na atmosfera."

$$Q_1 = \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \overline{\nabla \cdot (s\mathbf{V})} + \frac{\partial(\bar{s}\,\bar{\omega})}{\partial p}$$

$$= Q_R + \boxed{L(c - e) - \frac{\partial(\overline{s'\omega'})}{\partial p}},$$

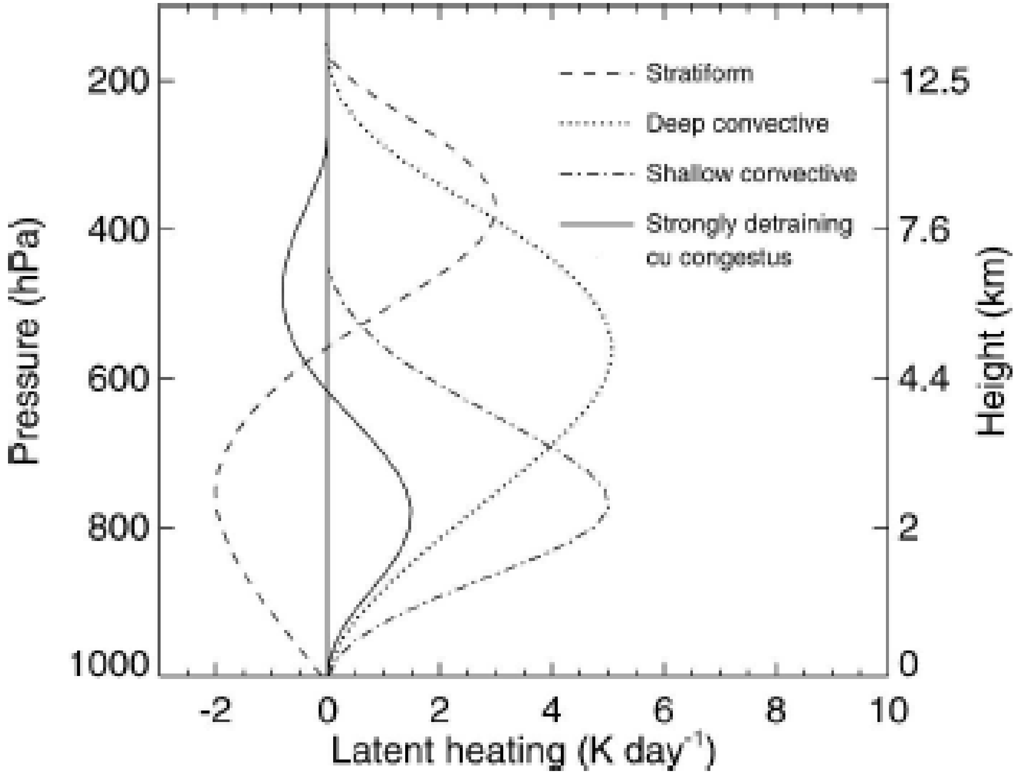


FIG. 1. Idealized latent heating profiles for different precipitating cloud types.

"A capacidade de caracterizar as variações em Q1, especialmente sua estrutura vertical, ***permite um maior entendimento da relação entre os sistemas de nuvens convectivas tropicais e a circulação de grande escala*** (por exemplo, Hartmann et al., 1984)."

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

A **fonte de calor aparente, Q1**, é o aquecimento resultante de **processos diabáticos não resolvidos** na atmosfera."

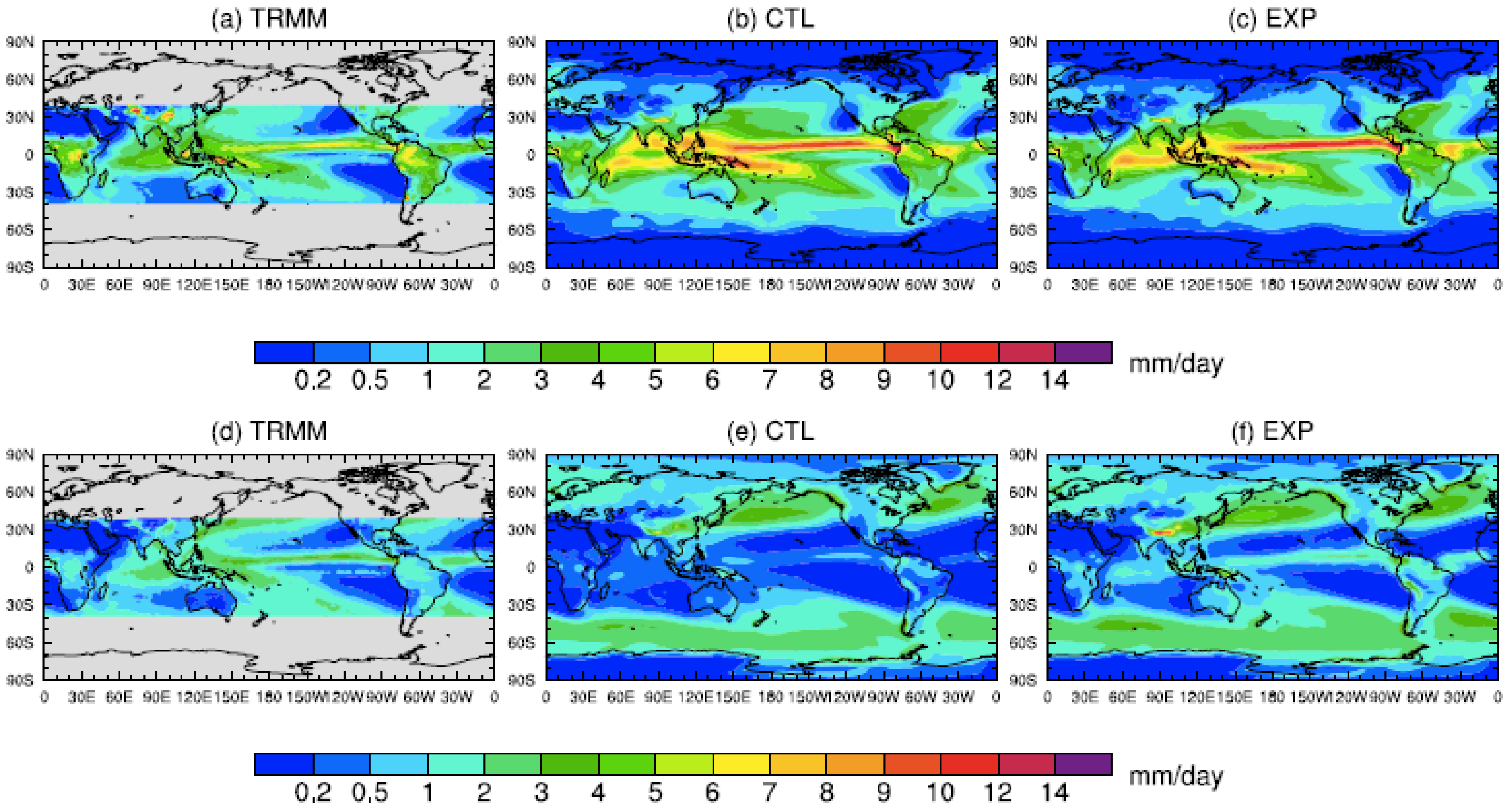


Figure 2. Convective (a-c) and large-scale (d-f) precipitation rates for TRMM (3A12), CTL and EXP, respectively.

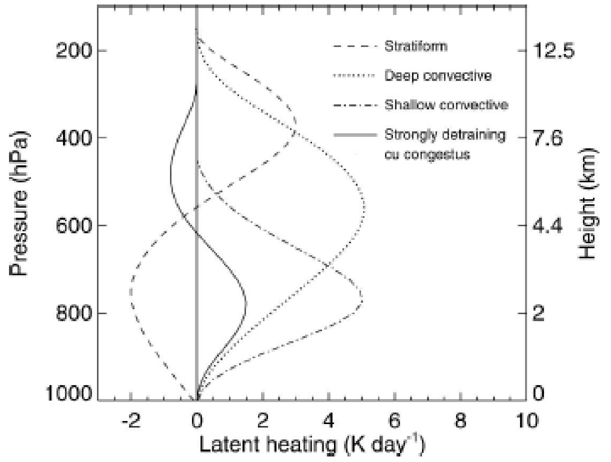
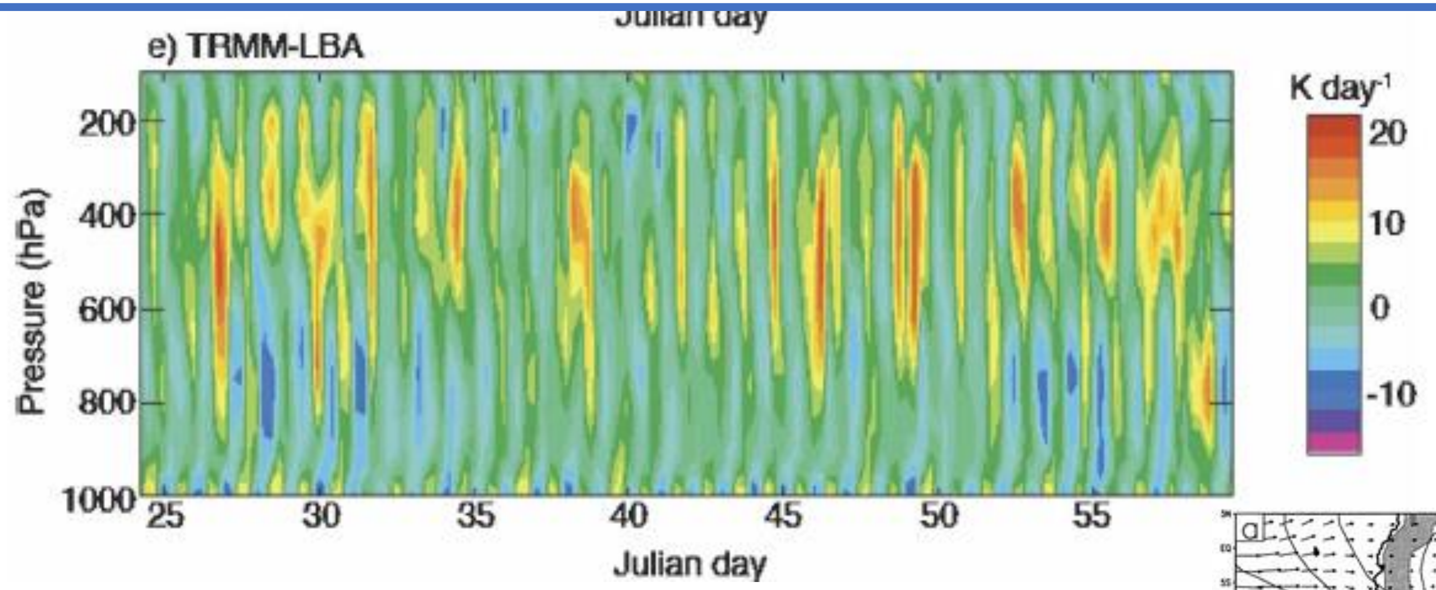
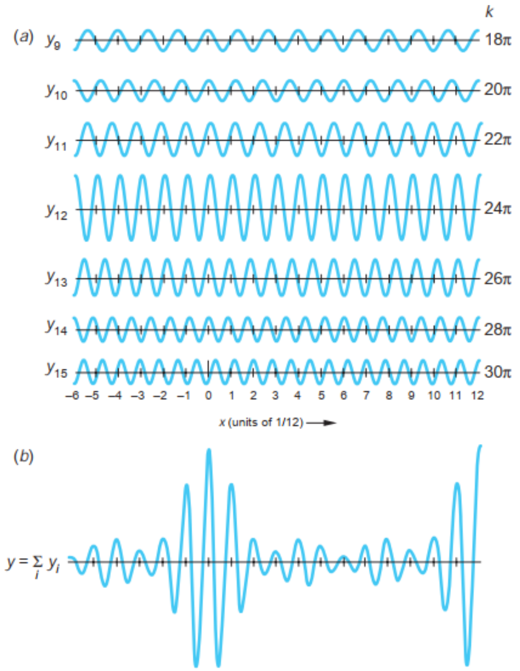
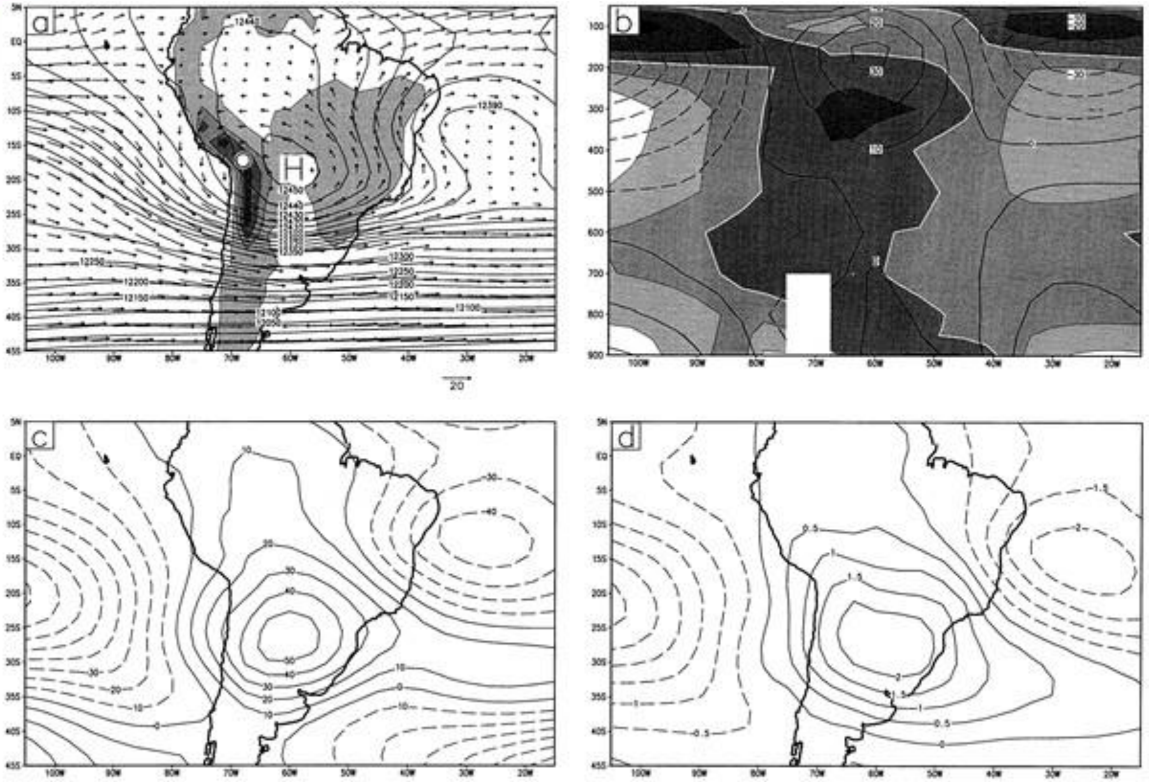


FIG. 1. Idealized latent heating profiles for different precipitating cloud types.

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus







$y_k = y_{0k} \cos(kx - \omega t)$

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

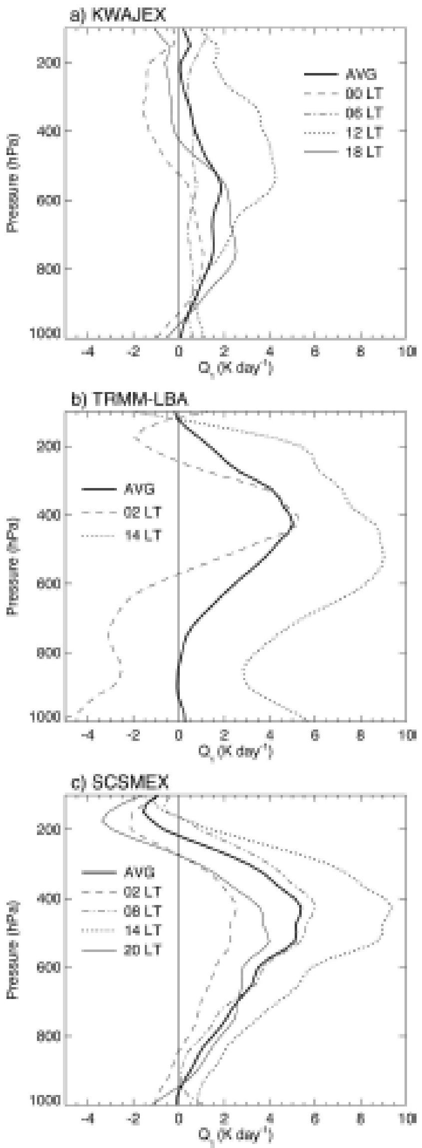
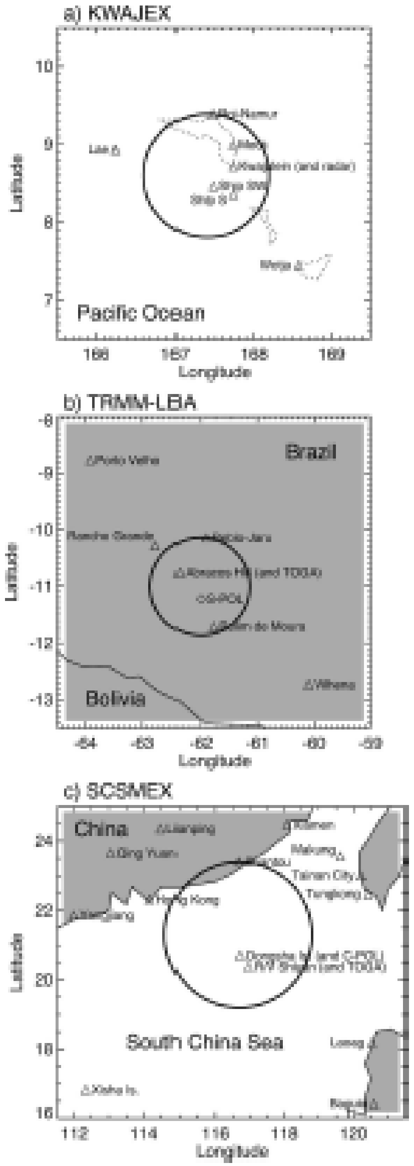


FIG. 5. Diurnal Q_1 variations for each field campaign. The thick, solid line represents each field campaign's average Q_1 profile.



"Perfis de Q1 para cada campanha de campo com base em limiares de :

taxas de chuva intensa (70% da chuva),
taxa moderada (25% da chuva)
leve/sem chuva (5% da chuva).

A linha grossa e sólida representa o perfil médio de Q1 para cada campanha de campo."

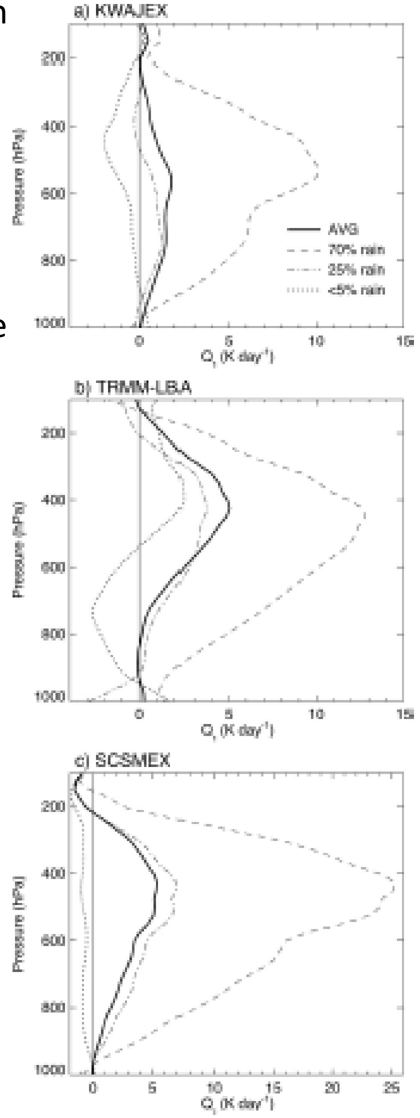


FIG. 9. Q_1 profiles for each field campaign based on thresholds of heavy (70% of rain), moderate (25% of rain), and light/no-rain (<5% of rain) rain rates. The thick, solid line represents each field campaign's average Q_1 profile.

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

1. Um dos principais objetivos do NWP é prever com precisão a precipitação.

2. Durante o verão sobre os continentes, grande parte da precipitação é convectiva.

3. Portanto, seria desejável que a parametrização do cumulus em um modelo NWP fosse capaz de determinar com precisão quando e onde a convecção do cumulus ocorrerá.

4. O ciclo diurno desempenha um papel importante na determinação de quando e onde ocorre a precipitação convectiva, especialmente sobre os continentes.

5. Isso geralmente envolve desestabilização e desencadeamento devido a processos locais da camada limite (fluxos de superfície, frentes de rajada).

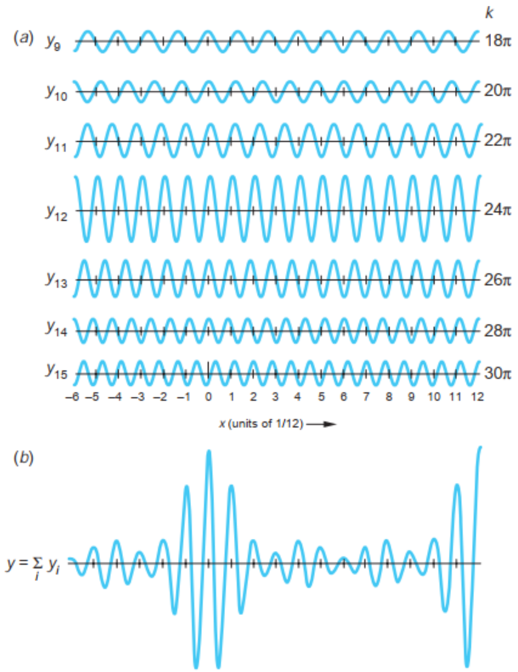
6. Além disso, circulações de mesoescala forçadas diariamente, como brisas marítimas e terrestres e circulações de planícies montanhosas, ***podem desencadear ou suprimir a convecção via subida ou descida de movimento de mesoescala*** .

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Em geral, as parametrizações cumulus atualmente usadas em GCMs e modelos NWP consistem em um modelo dos efeitos do conjunto cumulus nas equações de balanço de grande escala, um modelo de conjunto de cumulus e suposições de fechamento.

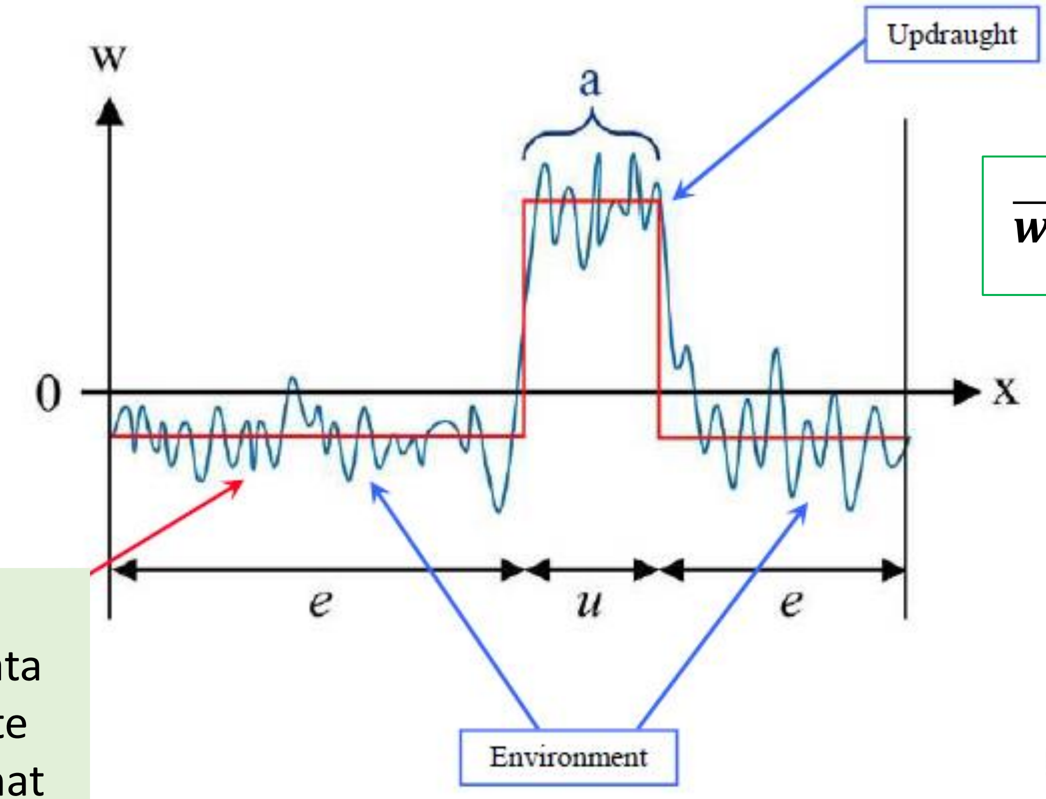
$$\frac{\partial(\overline{T})}{\partial t} + (\overline{u})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial x} + (\overline{v})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial y} + (\overline{w})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial z} - S_P\overline{\omega} = -\frac{\partial\left(\overline{u'T'}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(\overline{v'T'}\right)}{\partial y} - \frac{\partial\left(\overline{w'T'}\right)}{\partial z} + \frac{\overline{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\overline{q})}{\partial t} + (\overline{u})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial x} + (v)\frac{\partial(\overline{q})}{\partial y} + (\overline{w})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial z} = -\frac{\partial\left(\overline{u'q'}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(\overline{u'q'}\right)}{\partial y} - \frac{\partial\left(\overline{w'q'}\right)}{\partial z} + \overline{S}$$



1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Todos os três aspectos usam o conceito de cumulus Fluxo de massa em suas formulações.



$$\overline{w'X'} = \frac{1}{\bar{\rho}}\left[M_u X_u + M_d X_d - (M_u + M_d)\bar{X}\right]$$

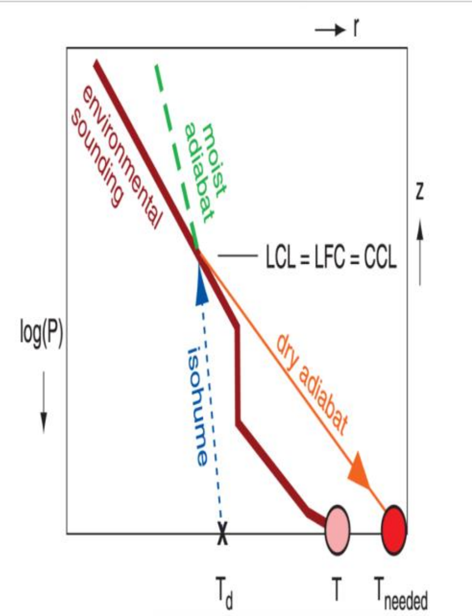
After M. Köhler (2005)

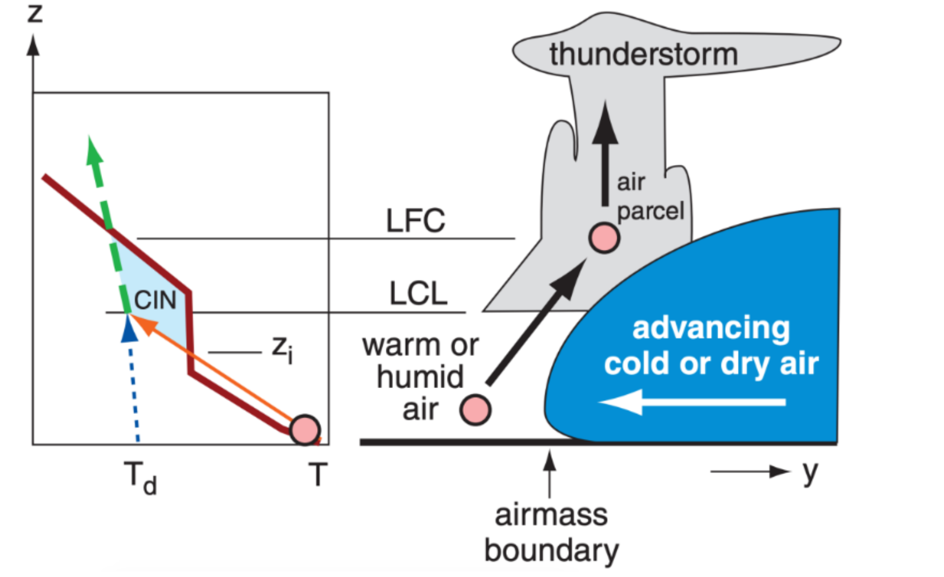
O esquema de convecção só trata da parte coerente do sinal do top hat

1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Além disso, a ocorrência de convecção cumulus deve ser diagnosticada.

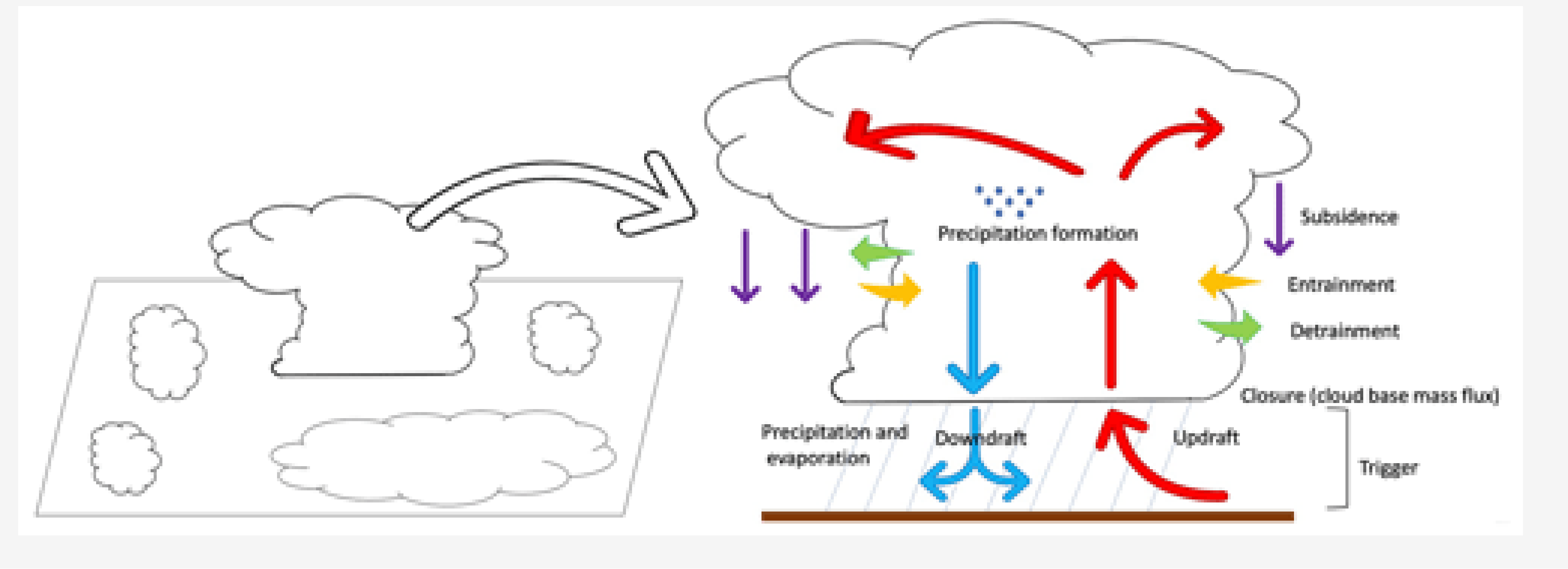
Isso geralmente é chamado de triggering "acionamento". O desencadeamento (triggering) é determinado pelos efeitos relativos dos processos que tendem a inibir a convecção e aqueles que tendem a promovê-la.





1.2 Visão geral dos problemas atuais na parametrização cumulus

Torna-se mais importante (e difícil) diagnosticar (triggering) à medida que o tamanho da grade horizontal do LSM diminui.



Anahí Villalba-Pradas

Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

2. Formulação Matemática das Equações

Esquemas de Parametrização de Convecção

2. Formulação Matemática das Equações

- • Esquema de Convergencia de Umindade (e.g. Kuo 1965, 1974)

- • Esquema de Ajustamento Convectivo (e.g. Betts 1986,Betts and Miller 1986) (**não abordado aqui**)

- • Esquema de Fluxo de Massa (e.g. Arakawa and Schubert 1974; Bougeault 1985; Tiedtke 1989; Gregory and Rowntree 1990; Kain and Fritsch, 1990, 1993, Kain 2004; Emanuel 2001; Bechtold et al. 2001, 2004, 2013, 2014)

Formulação Matemática das Equações

Esquema de Fluxo de Massa

(GREL e SAS)

2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

2.1 Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

$$\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}}\cdot\nabla\bar{\theta} - \bar{w}\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'\theta'} + \frac{L}{\pi c_p}(c-e) + Q_{rad}$$

$$\frac{\partial\bar{q}_v}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}}\cdot\nabla\bar{q}_v - \bar{w}\frac{\partial\bar{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'q_v'} - (c-e)$$

$$\frac{\partial\bar{q}_l}{\partial t} = -\bar{\mathbf{v}}\cdot\nabla\bar{q}_l - \bar{w}\frac{\partial\bar{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'q_l'} + (c-e) - P_r$$

Advecção de Larga escala

Subsidencia de Larga Escala

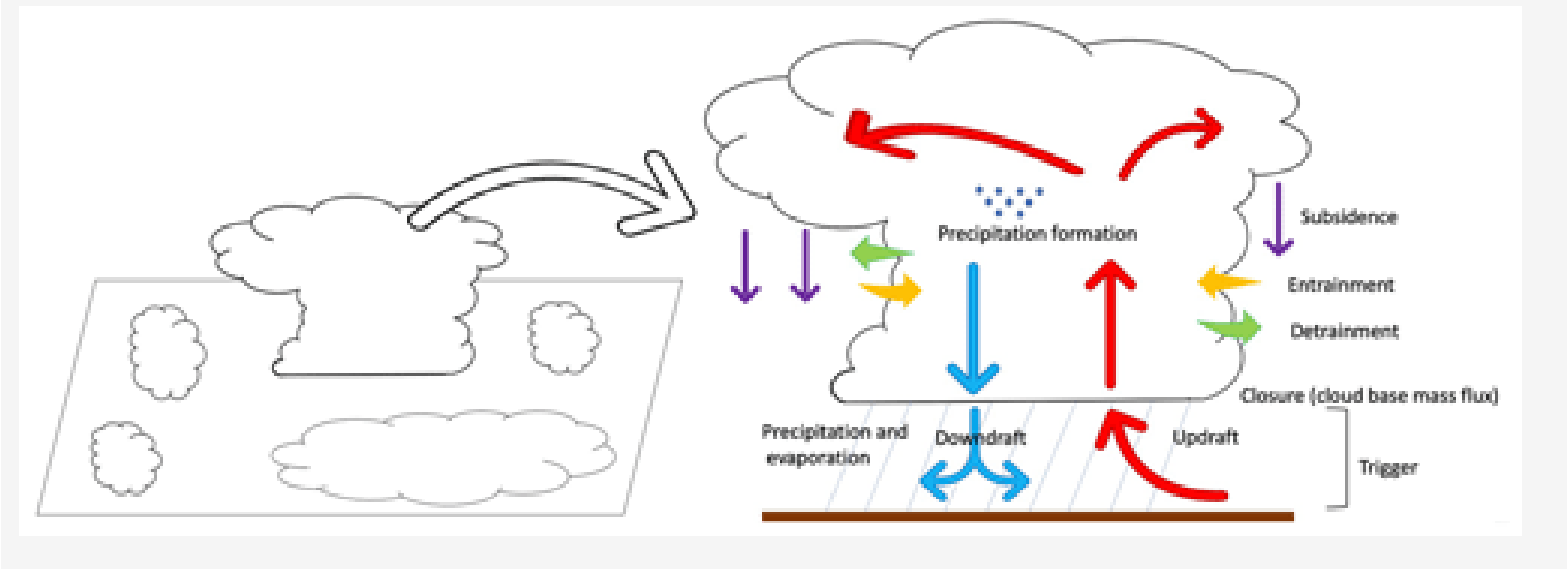
Transporte turbulento

Taxa de Condensação liquida

Taxa de Precipitação

2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

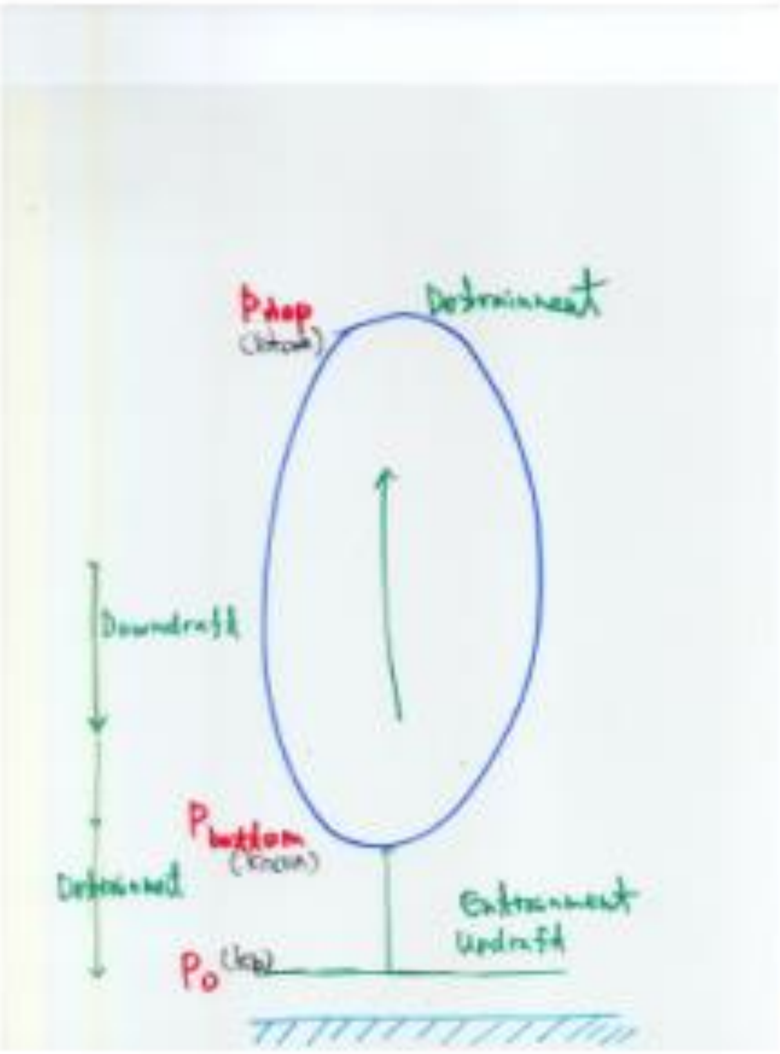
Em 1970, os meteorologistas começaram a reconhecer a importância da subsidência induzida por cúmulos e do detranhamento do ar da nuvem na modificação do ambiente em larga escala.

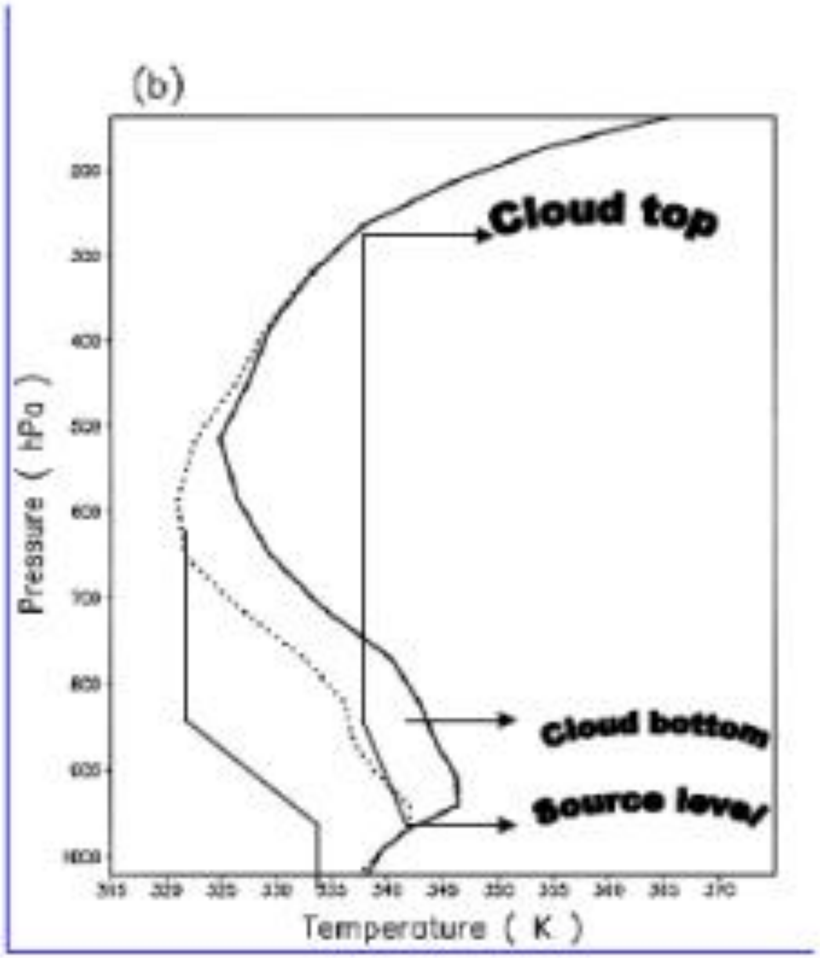


Arakawa e Schubert (1974) propuseram uma teoria para a interação de um conjunto cumulus com o ambiente de grande escala em que os papéis do fluxo de massa no conjunto cumulus e o detranhamento das nuvens foram explicitamente incluídos.

2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

c. Conceptual model

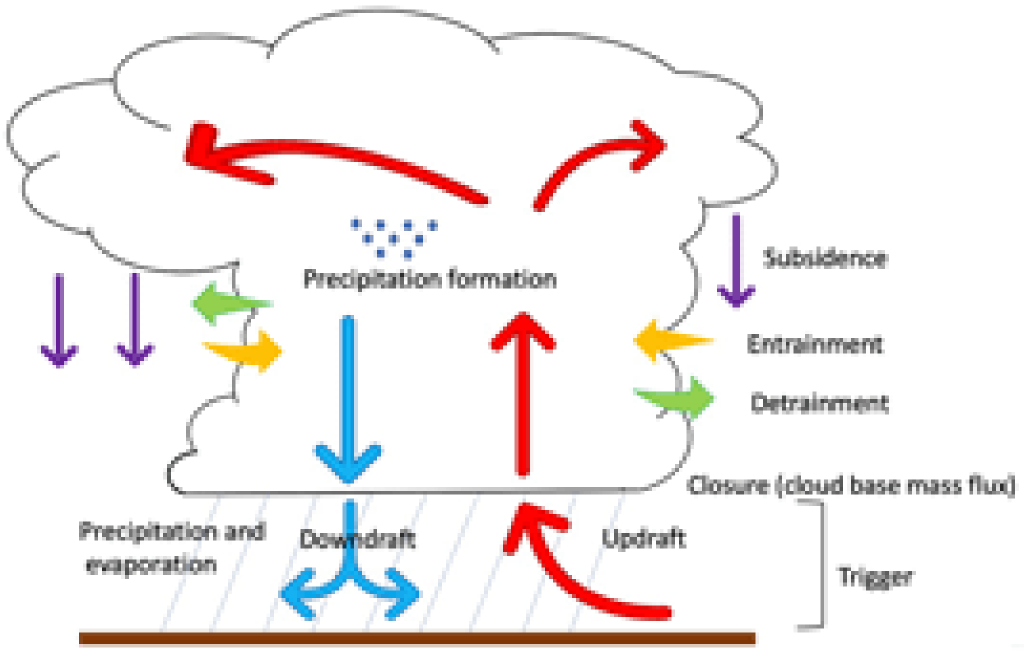




2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

Nesta seção, derivaremos esses efeitos usando a formulação de fluxo de massa para a situação simplificada em que todas as nuvens têm as mesmas características termodinâmicas em cada nível.

Em outras palavras, assumiremos que existe apenas um único tipo de nuvem.

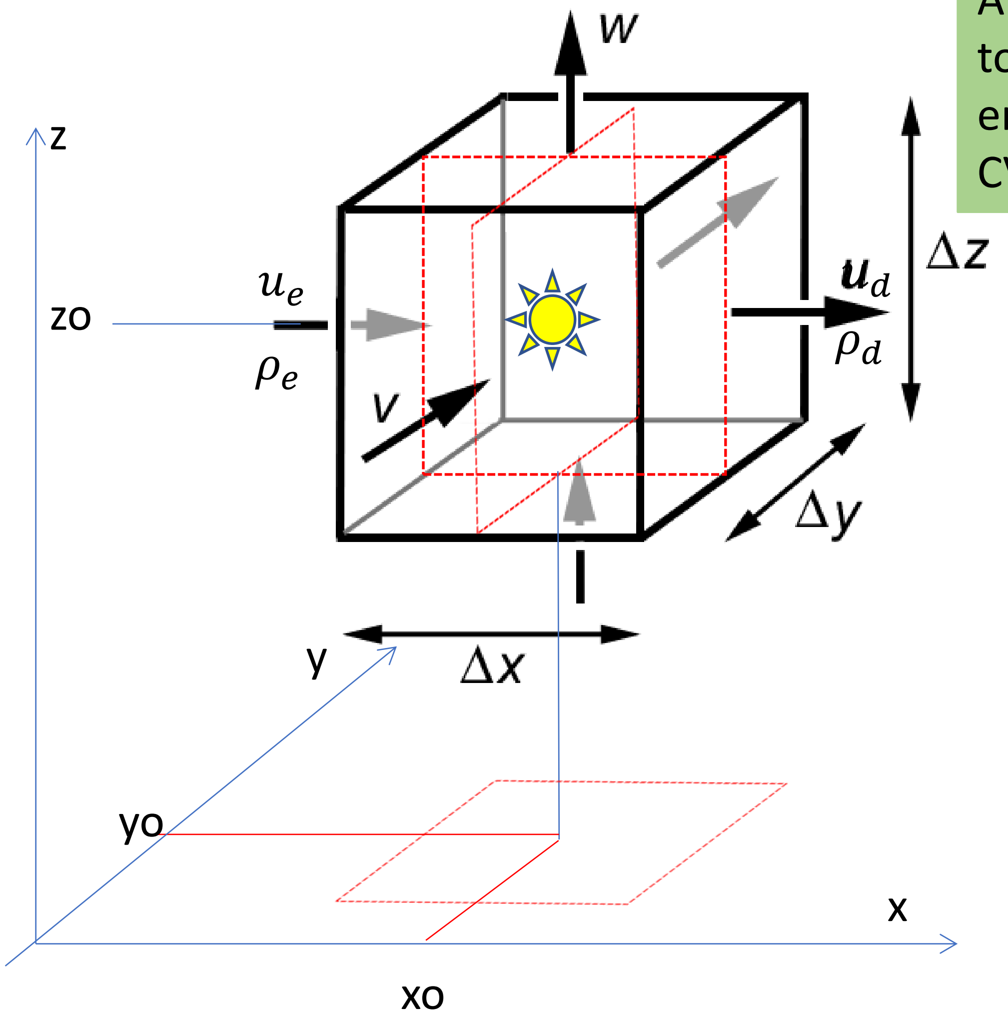


Arakawa e Schubert usaram a suposição mais realista de que nuvens cúmulos de vários tipos podem coexistir.

2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

PRINCIPIO → VC=CV → **Conservação de Energia**

A variação total da energia do CV	=	Variação da energia interna dentro do CV	+	Trabalho realizado nas face do CV



$$\Delta Q = \Delta U + W$$

Portanto:

$$\Delta U = \Delta Q - W$$

3.3 Aproximações por Diferenças Finitas da Equação de Advecção

$$\frac{\partial(\overline{u_i})}{\partial t} + (\overline{u_j})\frac{\partial(\overline{u_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'u_i{}'}\right)}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial x_i} - g\frac{\bar{\rho}}{\rho_0}\delta_{i3} - 2\Omega\varepsilon_{ijk}\eta_j(\overline{u_k}) + \nu\frac{\partial^2(\overline{u_i})}{\partial x_j{}^2}$$

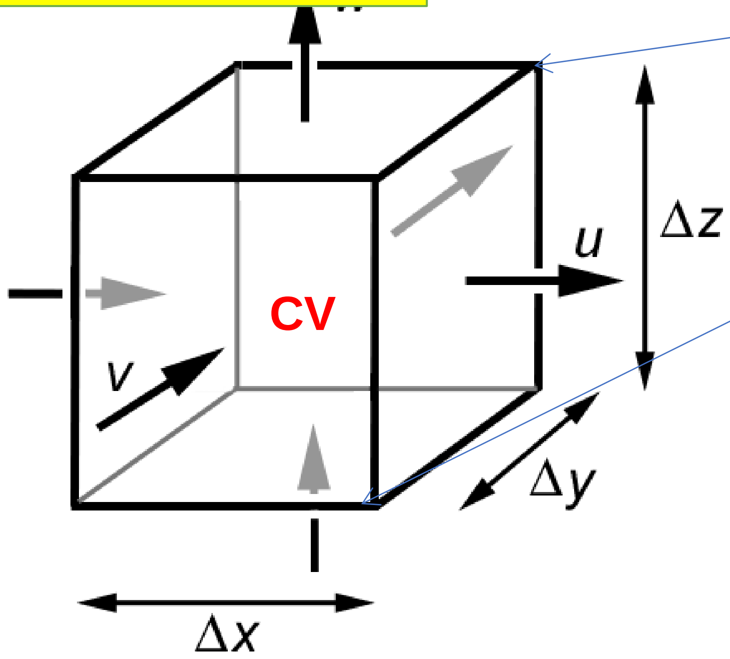
$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\overline{u_j})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial x_j} - S_P\bar{\omega} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'T'}\right)}{\partial x_j} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\overline{u_j})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'q'}\right)}{\partial x_j} + \bar{S}$$

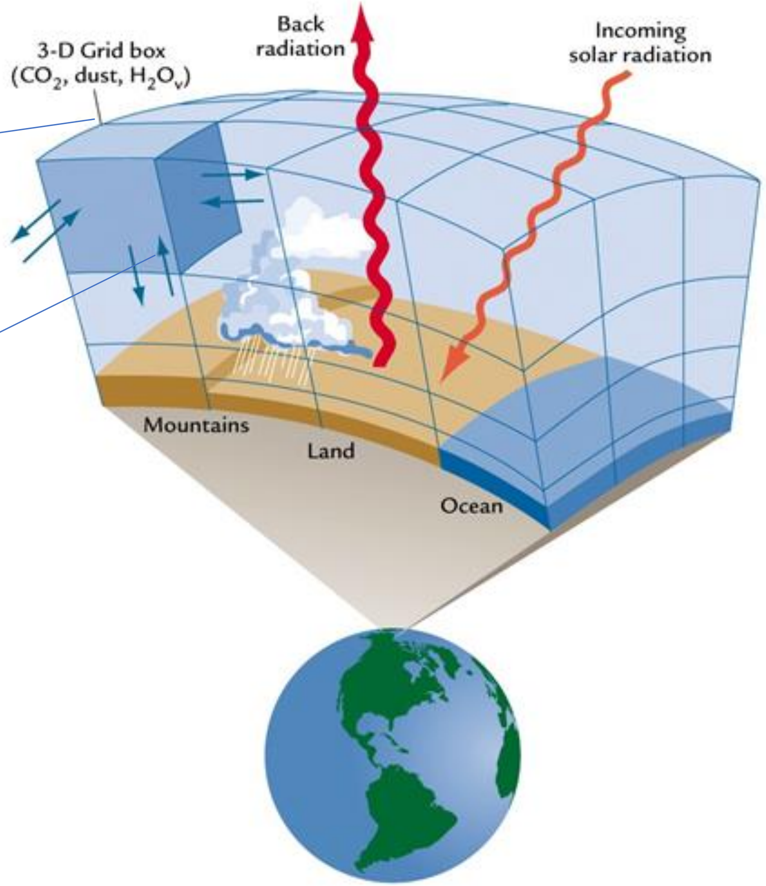
2. Formulação de fluxo de massa da parametrização cumulus

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u_j})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial x_j} - S_P\bar{\omega} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j'T'}\right)}{\partial x_j} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u_j})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j'q'}\right)}{\partial x_j} + \bar{S}$$



Volume de controle VC ou CV

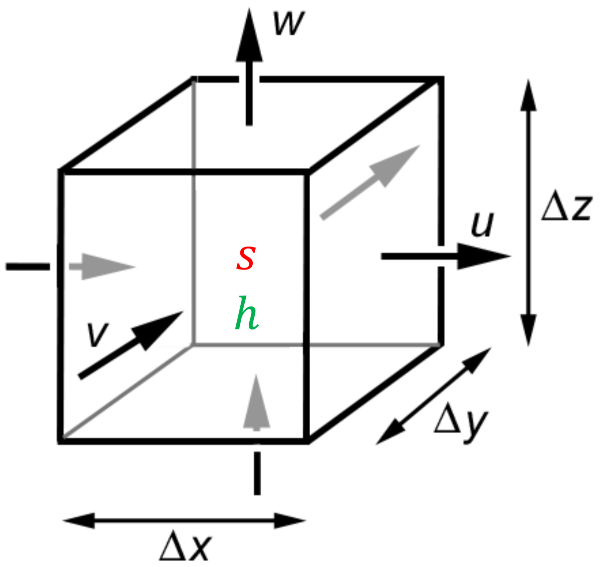


. GCMs divide Earth into grid cells and use laws of physics to represent real world climate [*Ruddiman,* 2001].

2.1 Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

(a) Considerações preliminares



Por conveniência, definimos a energia estática seca como

$$s \equiv c_p T + gz \tag{1}$$

e a energia estática úmida como

$$h \equiv c_p T + gz + Lq \tag{2}$$

onde s é a soma da entalpia e energia potencial, e h a soma de s e energia latente.

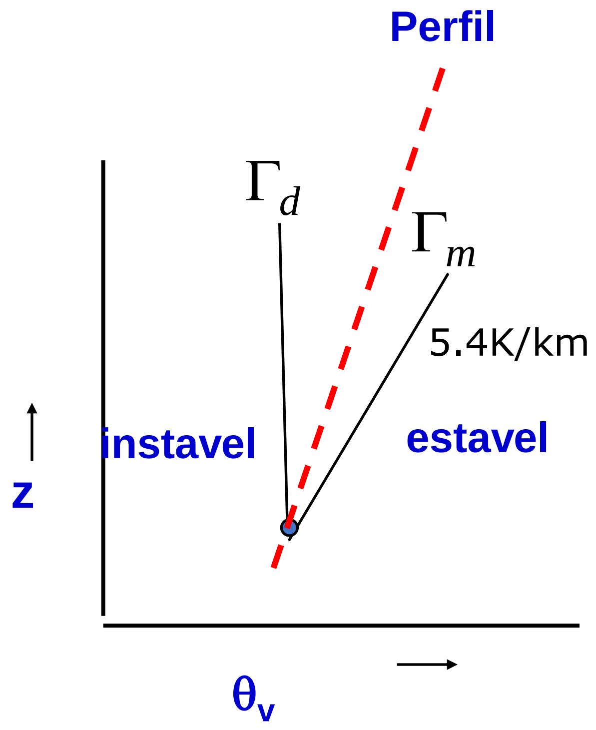
Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

Para processos adiabáticos secos, Γ_d

$$\frac{ds}{dt} \approx 0 \qquad (3)$$

enquanto que para processos adiabáticos secos e úmidos, Γ_m

$$\frac{dh}{dt} \approx 0 \qquad (4)$$



Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

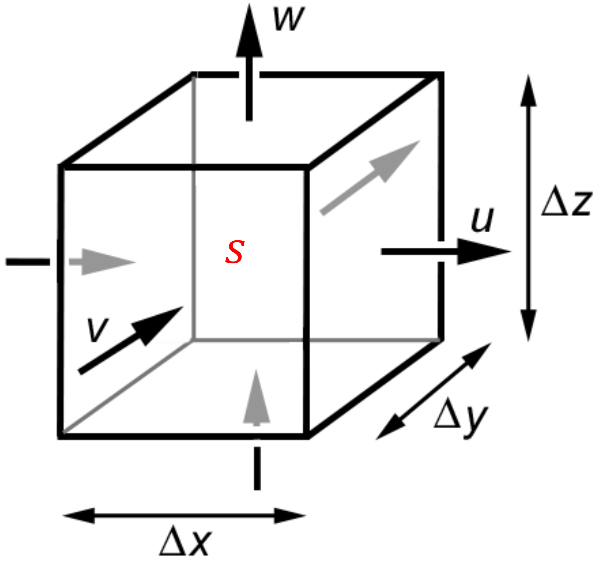
Consideramos um conjunto de nuvens cúmulos que está inserido em um sistema de movimento tropical de grande escala. A equação da energia termodinâmica é

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + (\bar{u_j})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial x_j} - S_P\bar{\omega} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'T'}\right)}{\partial x_j} + \frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$podemos\ ignorar\ estes\ termos\ \ -S_P\bar{\omega};\quad -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'T'}\right)}{\partial x_j}$$

$$\frac{d\left(\overline{c_p T}\right)}{dt} = \bar{J} = Q_r + L(c-e)$$

$$\frac{ds}{dt} = Q_r + L(c-e) \qquad (5)$$

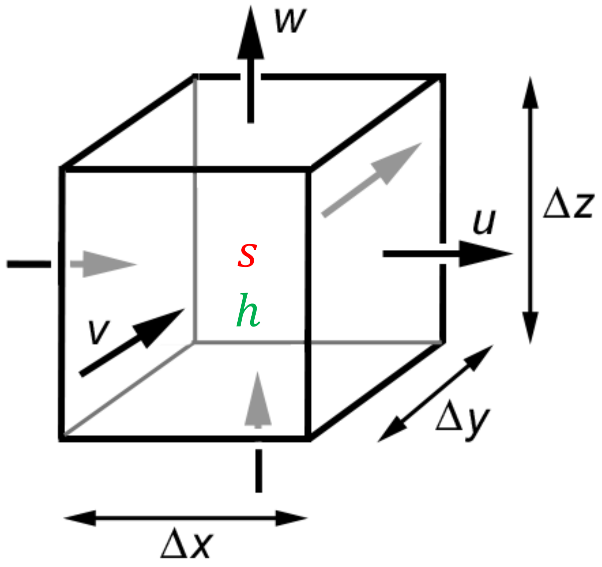


onde Q_r é a taxa de aquecimento radiativo, c a taxa de condensação, e a taxa de evaporação da nuvem condensada por unidade de massa de ar

2.1 Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

. A equação da continuidade para a umidade é

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t} + (\bar{u_j})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'q{}'}\right)}{\partial x_j} + \bar{S}$$



$$podemos\ ignorar\ este\ termo\ -\frac{\partial\left(\overline{u_j{}'q{}'}\right)}{\partial x_j}$$

$$\frac{d(\bar{q})}{dt} = \bar{S} = (e-c)$$

$$\frac{dq}{dt} = (e-c) \qquad (6)$$

onde c a taxa de condensação, e a taxa de evaporação da nuvem condensada por unidade de massa de ar

Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

para a camada de entranhamento onde $\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} > 0$ e $\tilde{s} = s_c$; $\tilde{q} = q_c$; $\tilde{h} = h_c$; $\sigma m_c = M_c$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\sigma h_c}{\partial t} = \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} h_c - \frac{\partial M_c h_c}{\partial z} = 0 \quad \textit{balanço de energia estatica umida} \qquad (29)$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i}{\partial t} = E_i - D_i - \frac{\partial M_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\sigma s_c}{\partial t} = \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} s_c - \frac{\partial M_c s_c}{\partial z} + \rho L\overline{(c)} = 0 \quad \textit{balanço de calor} \qquad (27)$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i s_i}{\partial t} = E_i s_i - D_i s_i - \frac{\partial M_i s_i}{\partial z} + L\rho c_i + \rho Q_{R_i}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\sigma q_c}{\partial t} = \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} q_c - \frac{\partial M_c q_c}{\partial z} - \rho\overline{(c)} = 0 \quad \textit{balanço de umidade} \qquad (28)$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i q_i}{\partial t} = E_i q_i - D_i q_i - \frac{\partial M_i q_i}{\partial z} + \rho c_i$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\sigma l_c}{\partial t} = \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} l_c - \frac{\partial M_c l_c}{\partial z} - \rho\overline{(c)} - R = 0 \quad \textit{balanço de agua liquida} \qquad (28)$$

$$\frac{\partial \rho \sigma_i l_i}{\partial t} = -D_i l_i - \frac{\partial M_i l_i}{\partial z} + \rho c_i - R_i$$

O $\boldsymbol{s_i = c_p T + gz}$ é a energia estática seca

Equações das Plumas

O $\boldsymbol{Q_R}$ é a taxa de aquecimento radiativo

O $\boldsymbol{R}$ é a taxa de conversão de agua liquida para precipitação

O $\boldsymbol{c}$ é a taxa de condensação

σ_i : fração a área coberta pela i-enésima nuvem

Efeitos de um conjunto de cumulus sobre campos de temperatura e umidade em larga escala induzidos pela subsidência e detranhamento

Equações das Plumas

$$\frac{\partial \overline{\rho s}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho s V_h)} + \frac{\partial \overline{(sm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (35)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho q}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho q V_h)} + \frac{\partial \overline{(qm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{q})}}{\partial z} - (q_c - \tilde{q}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (36)$$

Esquema de Fluxo de Massa :"Arakawa-Schubert"(1974)"

$$\frac{\partial \overline{\rho s}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho s V_h)} + \frac{\partial \overline{(sm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (35)$$

$$\overline{m} \equiv \sigma m_c + (1-\sigma)\tilde{m}$$

$$\overline{s} = \sigma s_c + (1-\sigma)\tilde{s}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}(\sigma s_c + (1-\sigma)\tilde{s})}{\partial t} = -\nabla_h \overline{(\rho[\sigma s_c + (1-\sigma)\tilde{s}]V_h)} - \frac{\partial(\sigma s_c m_c + (1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m})}{\partial z} + M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z}$$

$$\overline{q} = \sigma q_c + (1-\sigma)\tilde{q}$$

$$\overline{sm} = \sigma s_c m_c + (1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}(\sigma s_c)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}((1-\sigma)\tilde{s})}{\partial t} = -\nabla_h \overline{(\rho[\sigma s_c]V_h)} - \nabla_h \overline{(\rho[(1-\sigma)\tilde{s}]V_h)} - \frac{\partial(\sigma s_c m_c)}{\partial z} - \frac{\partial((1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m})}{\partial z} + M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}((1-\sigma)\tilde{s})}{\partial t} = -\nabla_h \overline{(\rho[(1-\sigma)\tilde{s}]V_h)} - \frac{\partial((1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m})}{\partial z} + M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}(\sigma s_c)}{\partial t} = -\frac{\partial(\sigma s_c m_c)}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z}$$

entranhamento

$$(s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} > 0 \qquad S_{ib} = \tilde{S}$$

Detranhamento

$$(s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} < 0 \qquad S_{ib} = S_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\,(1-\sigma_C)\tilde{s} = -\vec{\nabla}\cdot\overline{(\rho\tilde{V}S)} - \frac{\partial}{\partial Z}(\tilde{M}\tilde{S}) - \sum_i \left(\frac{\partial M_i}{\partial Z} + \rho\frac{\partial \sigma_i}{\partial t}\right) S_{i_b} - LE + \tilde{Q}_R$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho \sum \sigma_i s_i = -\frac{\partial}{\partial z}\left(\sum_i M_i s_i\right) + \sum_i \left(\frac{\partial M_i}{\partial z} + \rho\frac{\partial \sigma_i}{\partial t}\right) S_{ib} + \sum_x (LC_i + Q_{Ri})$$

Esquema de Fluxo de Massa :"Arakawa-Schubert"(1974)"

$$\frac{\partial \overline{\rho s}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho s V_h)} + \frac{\partial \overline{(sm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial (\bar{s})}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (35)$$

Fluxo de Larga-escala atavés do grid-box

Troca de S entre o ambiente e a nuvem

$$\overline{m} \equiv \sigma m_c + (1-\sigma)\tilde{m}$$

$$\bar{s} = \sigma s_c + (1-\sigma)\tilde{s}$$

$$\bar{q} = \sigma q_c + (1-\sigma)\tilde{q}$$

$$\overline{\phi} = a\overline{\phi_u}^u + (1-a)\overline{\phi_e}^e$$

$$\overline{\phi} = a\overline{\phi_u}^u + (1-a)\overline{\phi_e}^e$$

$$\overline{\phi} = a\overline{\phi_u}^u + \overline{\phi_e}^e - a\overline{\phi_e}^e$$

$$\overline{\phi} - \overline{\phi_e}^e = a\overline{\phi_u}^u - a\overline{\phi_e}^e$$

$$\overline{\phi_u}^u = \overline{\phi_e}^e$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}((1-\sigma)\tilde{s})}{\partial t} = -\nabla_h \overline{(\rho[(1-\sigma)\tilde{s}]V_h)} - \frac{\partial((1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m})}{\partial z} - (s_c - \tilde{s})\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} + M_c \frac{\partial (\bar{s})}{\partial z}$$

$$\overline{sm} = \sigma s_c m_c + (1-\sigma)\tilde{s}\tilde{m}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}(\sigma s_c)}{\partial t} = -\frac{\partial(\sigma s_c m_c)}{\partial z} - (s_c - \tilde{s})\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z}$$

S_i: $C_p + gz$ da i-enésima nuvem

S_{ib}: $C_p + gz$ do ar entranhando para dentro ou detranhando da i-enésima nuvem

C_i: condensação na i-enésima nuvem

E: evaporação da agua liquida no ambiente

Q_r: Aquecimento radiativo

Camada de Detranhamanto $\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} < 0$

Camada de Entranhamanto $\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} > 0$

entranhamento

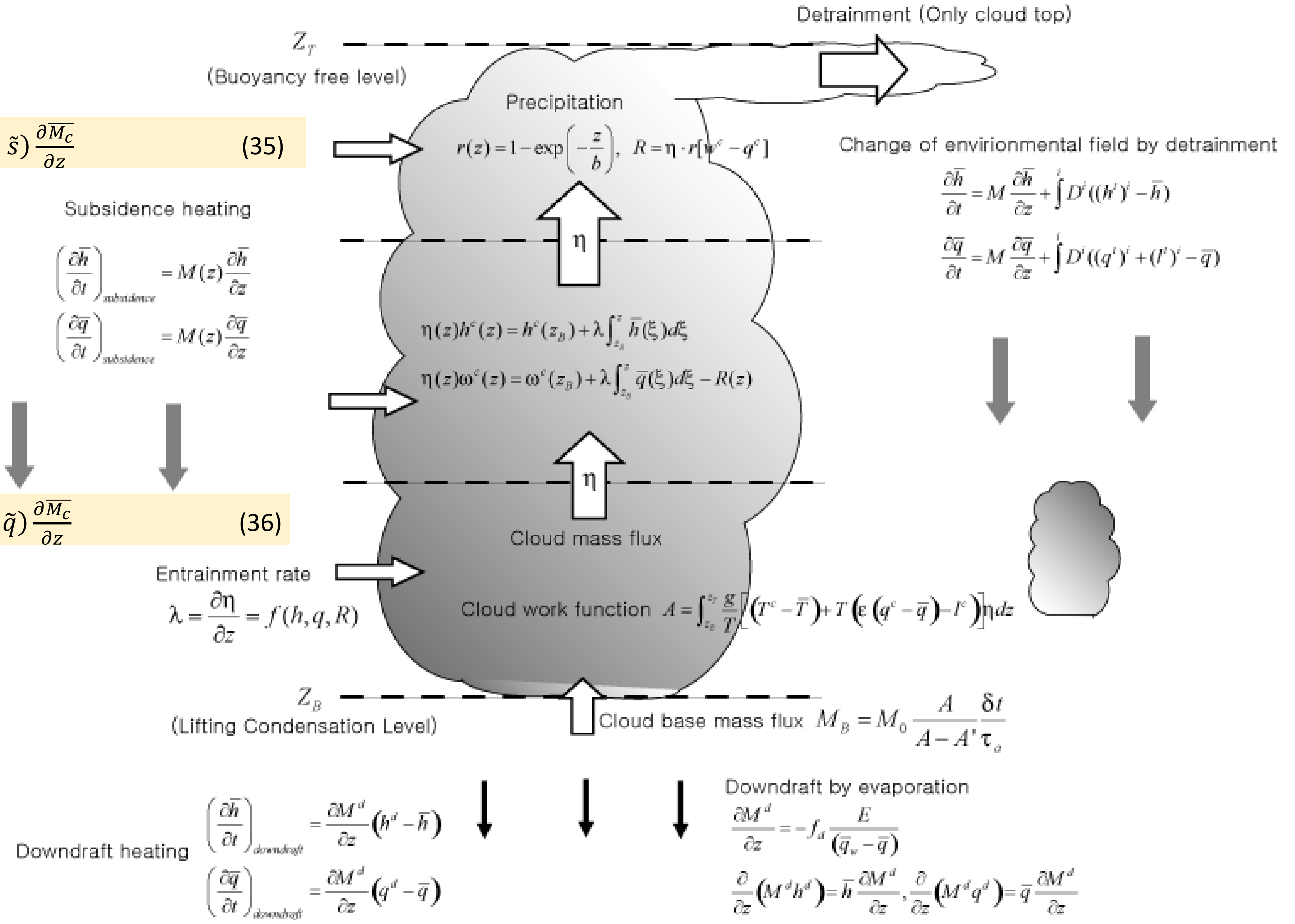
$$(s_c - \tilde{s})\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} > 0 \qquad S_{ib} = \tilde{S}$$

Detranhamento

$$(s_c - \tilde{s})\frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} < 0 \qquad S_{ib} = S_i$$

Esquema de Fluxo de Massa :"Arakawa-Schubert"(1974)"

$$\frac{\partial \overline{\rho s}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho s V_h)} + \frac{\partial \overline{(sm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{s})}}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (35)$$



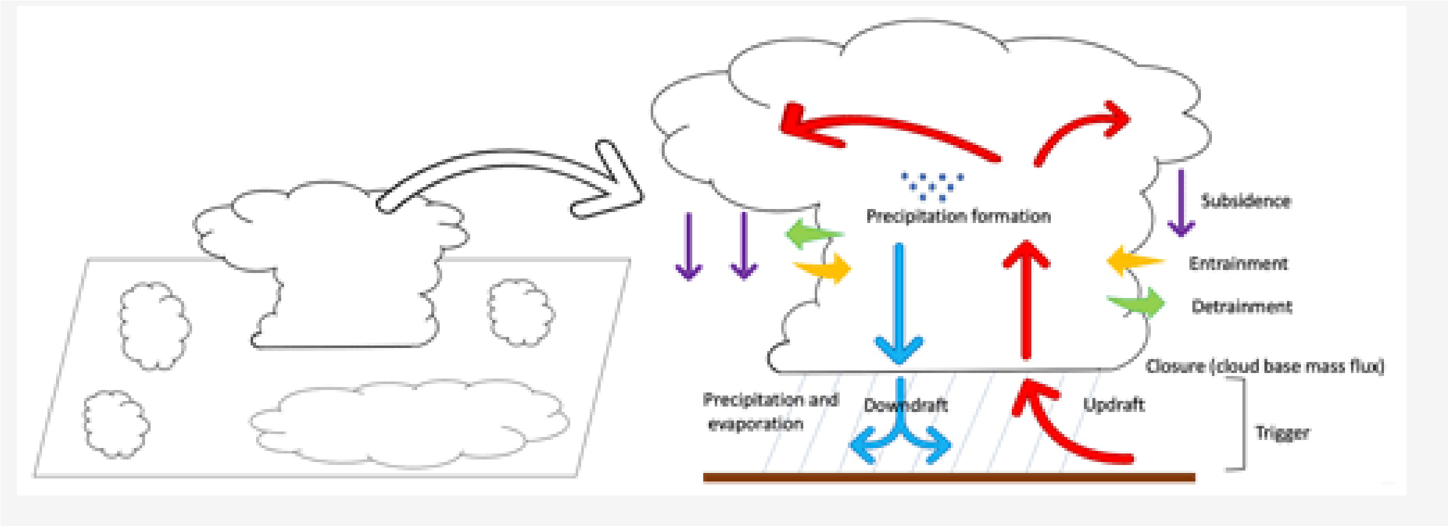
$$\frac{\partial \overline{\rho q}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho q V_h)} + \frac{\partial \overline{(qm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial \overline{(\tilde{q})}}{\partial z} - (q_c - \tilde{q}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (36)$$

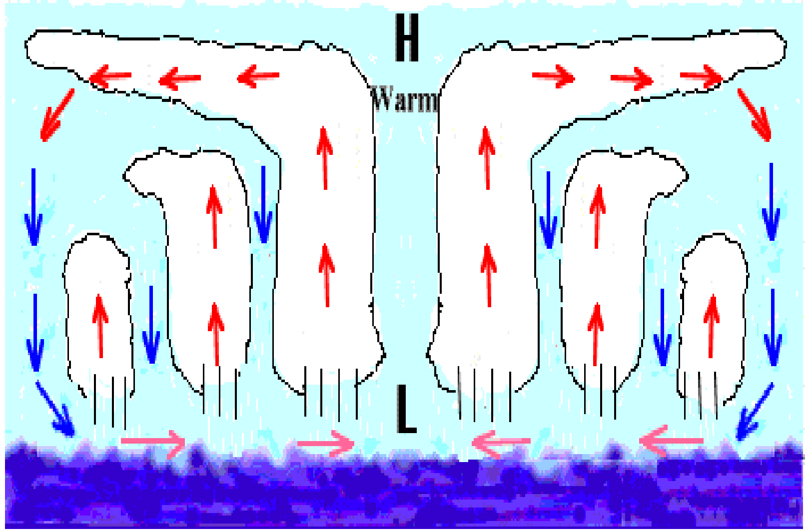
2.3 A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

Para fornecer uma interpretação física da suposição de fechamento, vejamos o balanço de energia cinética do conjunto de cumulus.

Para o caso de **um conjunto que consiste em um único tipo de nuvem**





A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

$$\frac{\partial \overline{\rho s}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho s V_h)} + \frac{\partial \overline{(sm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial (\tilde{s})}{\partial z} - (s_c - \tilde{s}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (35)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho q}}{\partial t} + \nabla_h \overline{(\rho q V_h)} + \frac{\partial \overline{(qm)}}{\partial z} = M_c \frac{\partial (\tilde{q})}{\partial z} - (q_c - \tilde{q}) \frac{\partial \overline{M_c}}{\partial z} \qquad (36)$$

$$\left[\frac{dA}{dt}\right]_{CU} + \left[\frac{dA}{dt}\right]_{LS} = \left[\frac{dA}{dt}\right] = 0 \qquad \text{para } M_B > 0$$

$$A = \int_{z_b}^{\hat{z}} \frac{g}{\bar{T}(z)} \eta(z)(T_{vc}(z) - \bar{T}_v(z))dz$$

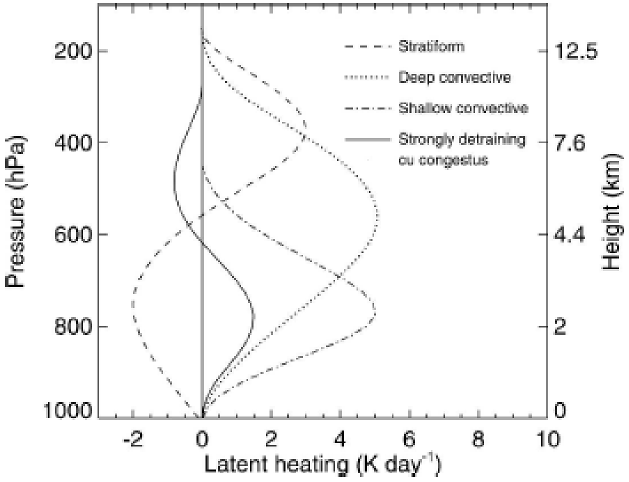
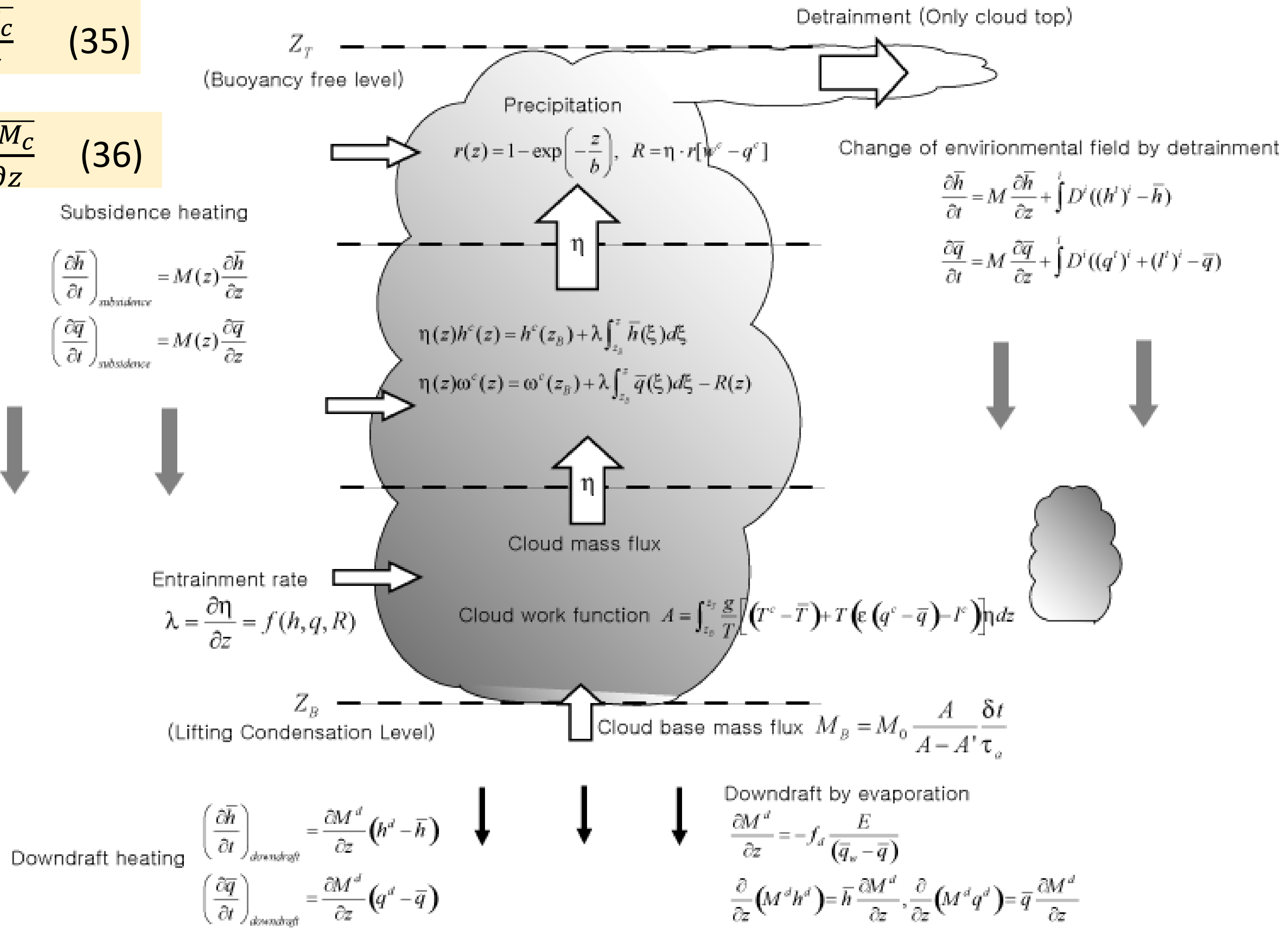


FIG. 1. Idealized latent heating profiles for different precipitating cloud types.



A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

$$\frac{\partial(\bar{u})}{\partial t}+(\bar{u})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial x}+(\bar{v})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial y}+(\bar{w})\frac{\partial(\bar{u})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial x}-2\Omega\eta_3(\bar{v})-\nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(\bar{u})}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'u'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'u'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t}+(\bar{u})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial x}+(\bar{v})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial y}+(\bar{w})\frac{\partial(\bar{v})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial y}+2\Omega\eta_3(\bar{v})-\nu\frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\bar{v})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(v)}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'v'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'v'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\bar{w})}{\partial t}+(\bar{u})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial x}+(\bar{v})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial y}+(\bar{w})\frac{\partial(\bar{w})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\bar{P})}{\partial z}+g\frac{\bar{\rho}}{\rho_0}-\nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(\bar{w})}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'w'})}{\partial z}$$

$$\frac{d\phi}{dP}=-\frac{RT}{P}$$

$$\frac{\partial(\bar{T})}{\partial t}+(\bar{u})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial x}+(\bar{v})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial y}+(\bar{w})\frac{\partial(\bar{T})}{\partial z}-S_P\bar{\omega}=-\frac{\partial\left(\overline{u'T'}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\overline{v'T'}\right)}{\partial y}-\frac{\partial\left(\overline{w'T'}\right)}{\partial z}+\frac{\bar{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\bar{q})}{\partial t}+(\bar{u})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial x}+(v)\frac{\partial(\bar{q})}{\partial y}+(\bar{w})\frac{\partial(\bar{q})}{\partial z}=-\frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'q'})}{\partial z}+\bar{S}$$

$$P=-\rho gz$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta z}=-\rho\frac{\Delta gz}{\Delta z}$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta z}=-\rho\frac{\Delta\phi}{\Delta z}$$

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\Delta P}{\Delta z}$$

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta P}=-\frac{1}{\rho}\frac{\Delta z}{\Delta z}$$

$$P=\rho RT \qquad \rho=\frac{P}{RT}$$

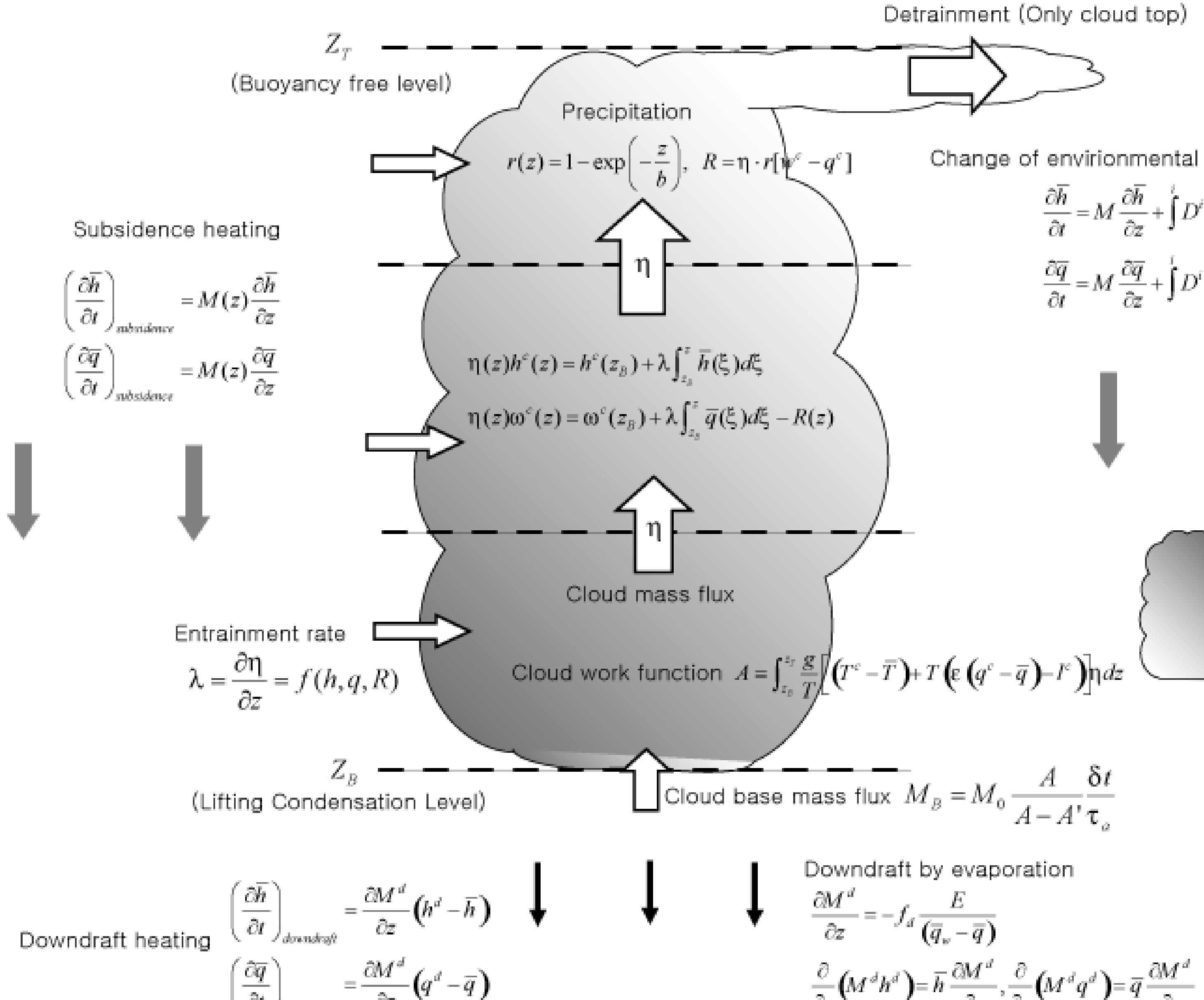
A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

A convecção e microfísica de nuvens não atualizam diretamente as equações de momentum

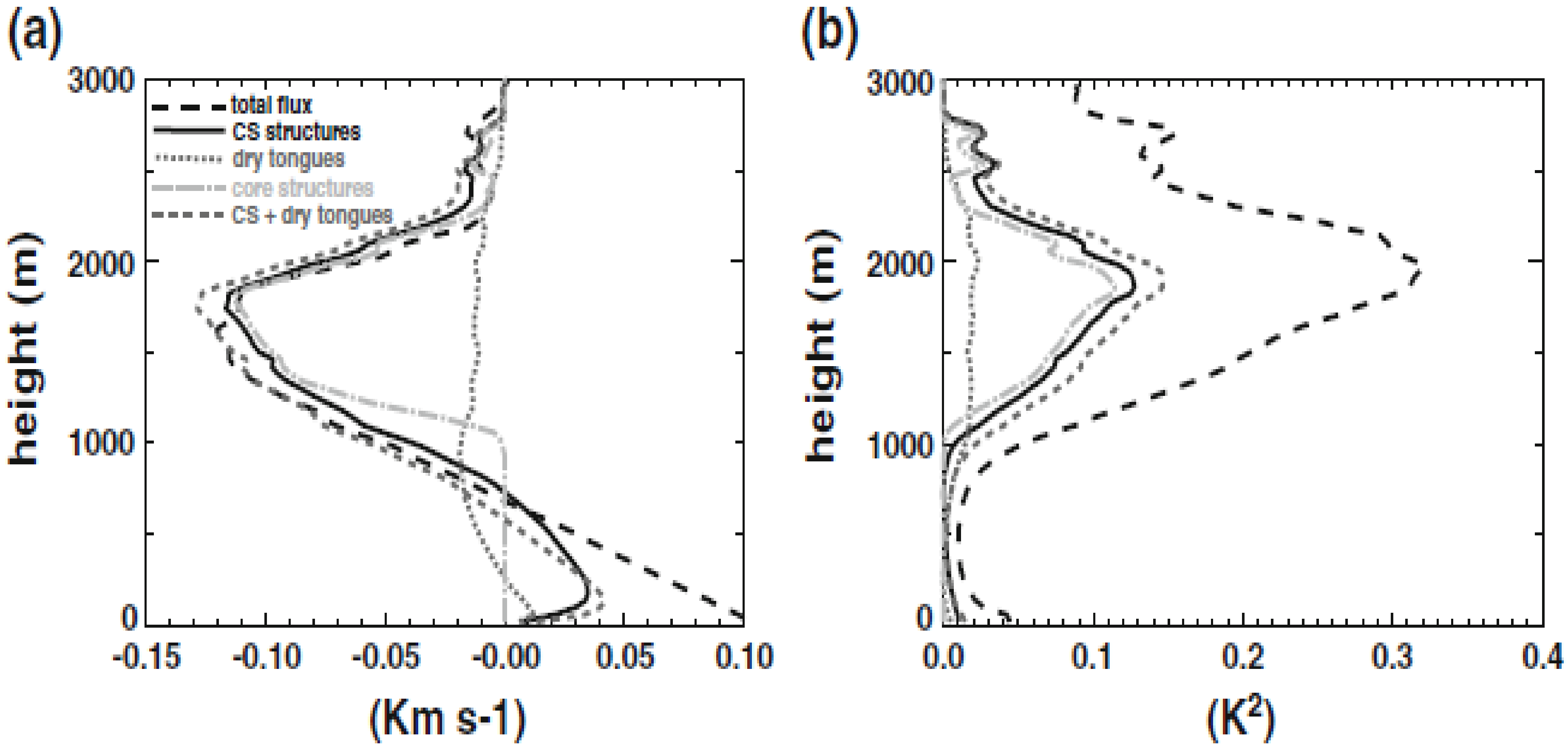
$$\frac{\partial(\overline{T})}{\partial t} + (\overline{u})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial x} + (\overline{v})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial y} + (\overline{w})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial z} - S_P\overline{\omega} = -\frac{\partial\left(\overline{u'T'}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(\overline{v'T'}\right)}{\partial y} - \frac{\partial\left(\overline{w'T'}\right)}{\partial z} + \frac{\overline{J}}{C_p}$$

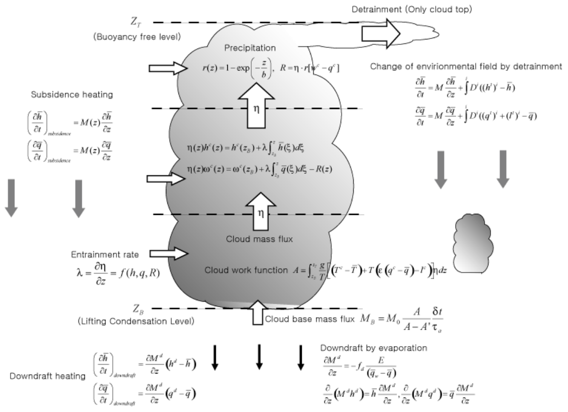
$$\frac{\partial(\overline{q})}{\partial t} + (\overline{u})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial x} + (v)\frac{\partial(\overline{q})}{\partial y} + (\overline{w})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial z} = -\frac{\partial\left(\overline{u'q'}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(\overline{u'q'}\right)}{\partial y} - \frac{\partial\left(\overline{w'q'}\right)}{\partial z} + \overline{S}$$

A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert

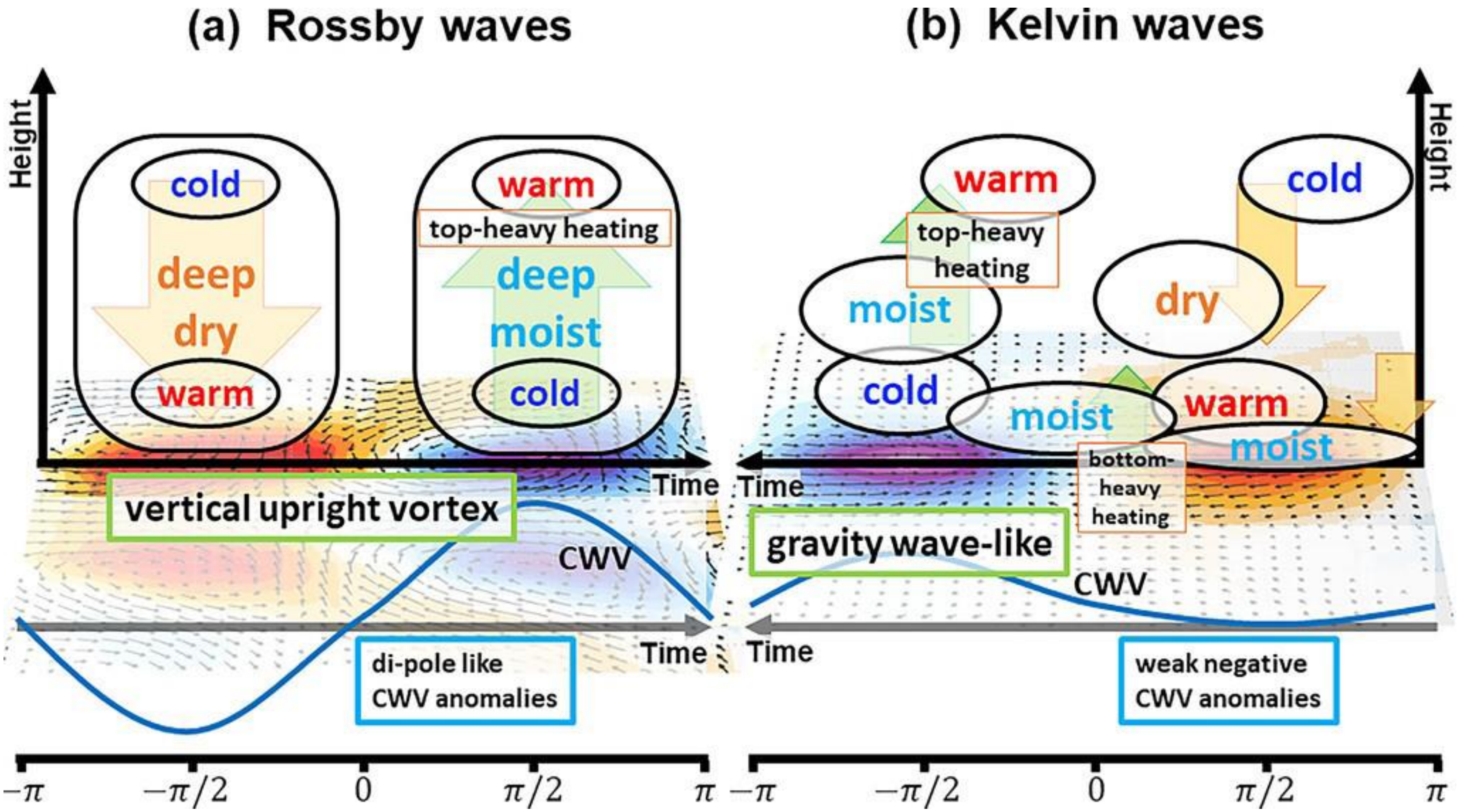


A suposição de fechamento para a parametrização do cumulus Arakawa Schubert





Previsão Numérica de Tempo e Clima



Previsão Numérica de Tempo e Clima

$$\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} = -\overline{\mathbf{v}} \cdot \nabla \overline{\theta} - \overline{w}\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'\theta'} + \frac{L}{\pi c_p}(c-e) + Q_{rad}$$

$$\frac{\partial \overline{q}_v}{\partial t} = -\overline{\mathbf{v}} \cdot \nabla \overline{q}_v - \overline{w}\frac{\partial \overline{q}_v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'q_v'} - (c-e)$$

$$\frac{\partial \overline{q}_l}{\partial t} = -\overline{\mathbf{v}} \cdot \nabla \overline{q}_l - \overline{w}\frac{\partial \overline{q}_l}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x_i}\overline{u_i'q_l'} + (c-e) - P_r$$

Advecção de Larga escala	Subsidencia de Larga Escala	Transporte turbulento	Taxa de Condensação liquida	Taxa de Precipitação

Previsão Numérica de Tempo e Clima

$$\frac{\partial(\overline{u})}{\partial t}+(\overline{u})\frac{\partial(\overline{u})}{\partial x}+(\overline{v})\frac{\partial(\overline{u})}{\partial y}+(\overline{w})\frac{\partial(\overline{u})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\overline{P})}{\partial x}-2\Omega\eta_3(\overline{v})-\nu\frac{\partial^2(\overline{u})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\overline{u})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(\overline{u})}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'u'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'u'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'u'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\overline{v})}{\partial t}+(\overline{u})\frac{\partial(\overline{v})}{\partial x}+(\overline{v})\frac{\partial(\overline{v})}{\partial y}+(\overline{w})\frac{\partial(\overline{v})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\overline{P})}{\partial y}+2\Omega\eta_3(\overline{v})-\nu\frac{\partial^2(\overline{v})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\overline{v})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(v)}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'v'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'v'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial(\overline{w})}{\partial t}+(\overline{u})\frac{\partial(\overline{w})}{\partial x}+(\overline{v})\frac{\partial(\overline{w})}{\partial y}+(\overline{w})\frac{\partial(\overline{w})}{\partial z}+\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial(\overline{P})}{\partial z}+g\frac{\overline{\rho}}{\rho_0}-\nu\frac{\partial^2(\overline{w})}{\partial x^2}-\nu\frac{\partial^2(\overline{w})}{\partial y^2}-\nu\frac{\partial^2(\overline{w})}{\partial z^2}=-\frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'w'})}{\partial z}$$

$$\frac{d\phi}{dP}=-\frac{RT}{P}$$

$$\frac{\partial(\overline{T})}{\partial t}+(\overline{u})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial x}+(\overline{v})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial y}+(\overline{w})\frac{\partial(\overline{T})}{\partial z}-S_P\overline{\omega}=-\frac{\partial\left(\overline{u'T'}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\overline{v'T'}\right)}{\partial y}-\frac{\partial\left(\overline{w'T'}\right)}{\partial z}+\frac{\overline{J}}{C_p}$$

$$\frac{\partial(\overline{q})}{\partial t}+(\overline{u})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial x}+(v)\frac{\partial(\overline{q})}{\partial y}+(\overline{w})\frac{\partial(\overline{q})}{\partial z}=-\frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial x}-\frac{\partial(\overline{u'q'})}{\partial y}-\frac{\partial(\overline{w'q'})}{\partial z}+\overline{S}$$

Previsão Numérica de Tempo e Clima

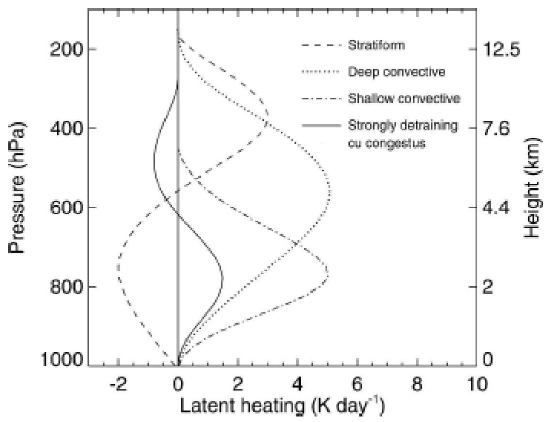


FIG. 1. Idealized latent heating profiles for different precipitating cloud types.