

Modelagem Numérica da Atmosfera

Modelagem Numérica da Atmosfera

Dr. Paulo Yoshio Kubota

Esquema de Camada Limite Planetária

INPE, São Jose dos Campos



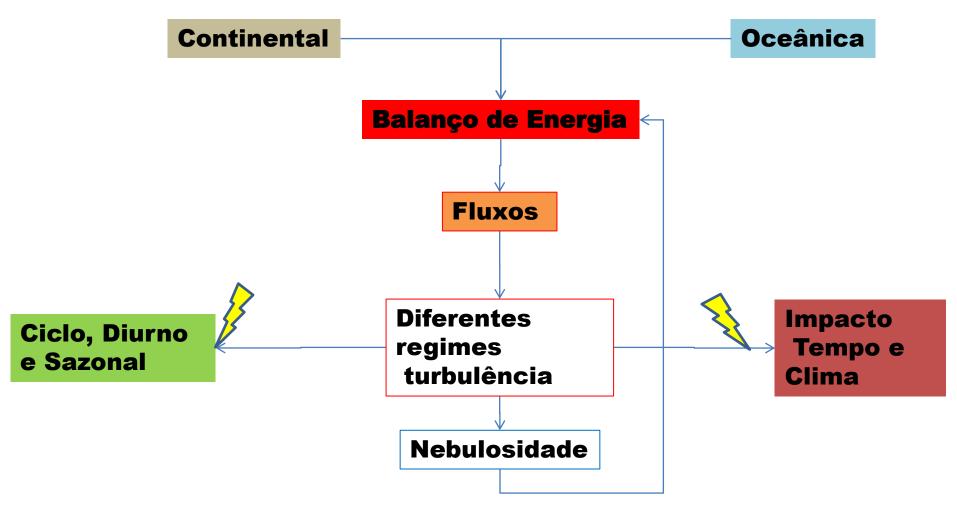
Modelagem Numérica da Atmosfera

Conceito Básico de um modelo de camada limite Planetária



Introdução Qual a importância da PBL?

Conceito Básico de um modelo PBL

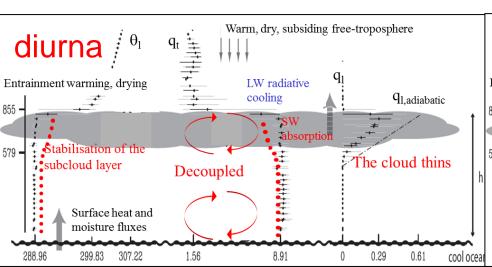


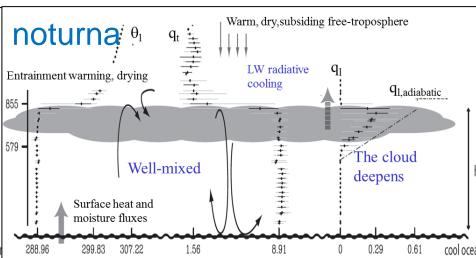
Processos de aquecimento diabáticos internos

Introdução

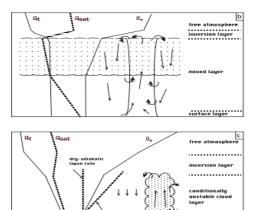


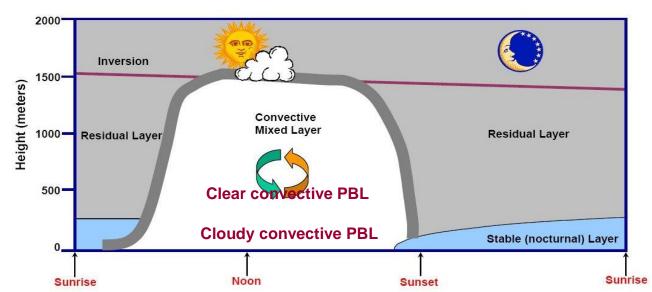
Variação Diária da PBL





Estratocumulos PBL





Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

Equações Governantes para o estado médio da Atmosfera

PBL: Equações Governantes pra o estado medio da **Atmosfera**

Media de Reynolds A = A + A'

$$A = \overline{A} + A'$$

Lei dos gases

$$\bar{p} = \bar{\rho} R_d \overline{T_v}$$

$$\overline{T_v} = T(1 + 0.61q_v - q_l)$$
 parameterizado!

Necessita ser

Temperatura virtual

2nd ordem

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \overline{u_j} - \frac{1}{\overline{\rho}} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{v \partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{(u_i' u_j')}_{sfc}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{(u_i' u_j')$$

superfície

Eq. continuidade

$$\frac{\partial u_i}{\partial \mathbf{r}_i} = \mathbf{0}$$

$$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{array}\right)$$

$$+\overline{u_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$
Advecção

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\overline{\rho} c_p} \frac{\partial \overline{F_j}}{\partial x_j} - \frac{L_v E}{\overline{\rho} c_p} - \frac{\partial \overline{(u_i' \theta')}_{sfc}}{\partial x_j}$$
Advecção
Radiação
Color Letonto
Turbulento de

$$ho c_p$$
Liberação
Calor Latente

$$-\frac{\partial\overline{\left(u_i'\theta'\right)}_{sfc}}{\partial x_i}$$

$$\underbrace{\left(\frac{\partial \overline{\left(u_i'\theta'\right)}_{pbl}}{\partial x_j}\right)}_{pbl}$$

Transporte Turbulento pbl

Conservação de agua total

$$\left(\frac{\partial \overline{q_t}}{\partial t}\right)$$

$$+\overline{u_j}\frac{\partial \overline{q_t}}{\partial x_j} = \frac{S_{q_t}}{\overline{\rho}} - \frac{\partial \left(\overline{u_j'q_t'}\right)_{sfc}}{\partial x_j}$$

$$\partial x_j$$
Processos
Turbulento de
Superfície

$$\begin{array}{c|c}
\hline
\partial x_j \\
\hline
\text{Transporte} \\
\text{Turbulento} \\
\text{pbl}
\end{array}$$

CPEC

PBL: Equações para a energia cinetica turbulenta

Conceito Básico de um modelo PBL

TKE: medida da intensidade da mistura turbulenta

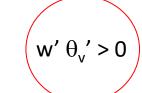
$$\overline{e} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

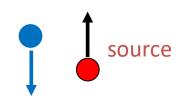
$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} = \underbrace{\left(\frac{g}{\theta_0} \overline{w'} \theta_{v'} \right)}_{\text{produção}} - \underbrace{\overline{u_i' u_j'}}_{\text{dav}_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u_j'} e}{\partial x_j}}_{\text{transporte}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i'} p'}{\partial x_i}}_{\text{dissipação}} - \underbrace{\epsilon}_{\text{dissipação}}_{\text{dissipação}}$$

$$\theta_{v} = \theta \left(1 + 0.61 q_{v} - q_{1}\right)$$
 virtual potential temperature

$$\theta_{v}{}^{\prime} < 0$$
 , $w^{\prime} < 0$

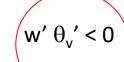
$$\theta_{v}' > 0$$
 , $w' > 0$





$$\theta_{v}' < 0$$
 , $w' > 0$

$$\theta_{v}' > 0$$
 , $w' < 0$



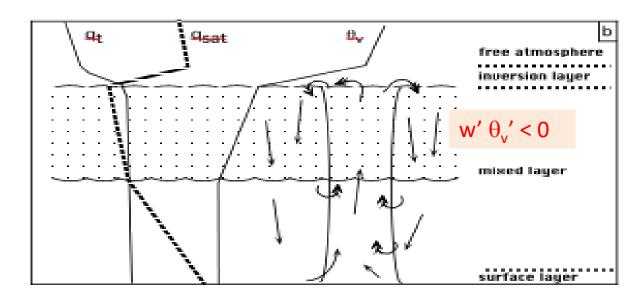


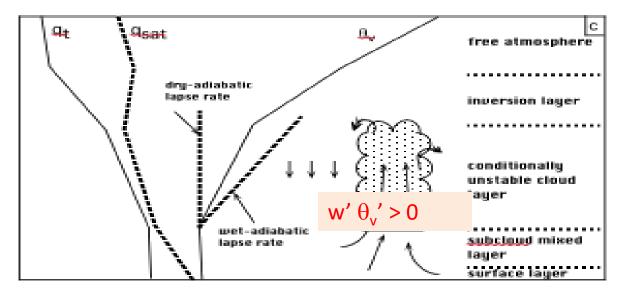




PBL: Equações para a energia cinetica turbulenta

Conceito Básico de um modelo PBL





Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

Como Parametrizar os Fluxos Turbulentos nas Equações Governantes para o estado médio da Atmosfera



PBL: A camada em que o fluxo é turbulento

Conceito Básico de um modelo PBL

Os efeitos da mistura de calor, momento e umidade por turbulência em pequena escala podem representados por difusão vertical.

Os fluxos de momento, calor ou matéria são difundidos por movimentos turbulentos dentro da camada limite.

1 - 3 km

Camada de mistura

50 m

Camada de Superfície

Os efeitos da superfície (atrito, resfriamento, aquecimento ou umedecimento) são sentidos em escalas de tempo <1 dia.

CPEC

Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w' \varphi'$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \overline{u_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\upsilon \partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{(u_i' u_j')}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} = \frac{\partial \overline{u_i' u_i'}}{\partial x_i}$$

$$\overline{w' \varphi'} = \mathbf{K}(\mathbf{z}) \frac{d\varphi}{dz}$$

$$\mathbf{Teoria} \qquad \mathbf{do}$$

$$\mathbf{transporte}$$

$$\mathbf{gradiente} \qquad \mathbf{ou}$$

$$\mathbf{teoria} \qquad \mathbf{K}$$

Os fluxos de momento, calor ou matéria são difundidos por movimentos turbulentos dentro da camada limite.

Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

Como Parametrizar os Fluxos Turbulentos na camada limite superficial

Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w' \varphi'$

$$F = \rho K(z) \frac{d\varphi}{dz}$$
 $(F = \overline{w'\varphi'})$

Formulação em diferenças finitas

$$F_{1.5} = \rho K(z_{1.5}) \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{z_2 - z_1}$$

Integral da camada superfície:

$$\varphi_1$$
- φ_s = $\int_{z_{o\varphi}}^{z_1} \frac{F_{o\varphi}}{\rho K(z)} dz$

 φ_1 - $\varphi_S \approx \frac{F_0}{\rho} \int_{Z_{0/\rho}}^{Z_1} \frac{1}{K(z)} dz$ Camada de fluxo constante:

Escoamento $K(\mathbf{z}) = \kappa \mathbf{z} u_*$ neutro:

$$\rho_1 - \varphi_s \approx \frac{F_{0\phi}}{\rho \kappa u_*} \int_{Z_{0\phi}}^{Z_1} \frac{dz}{z}$$

- κ: Von Karman constant (0.4)
- u_{*}: Friction velocity

ρ: Density

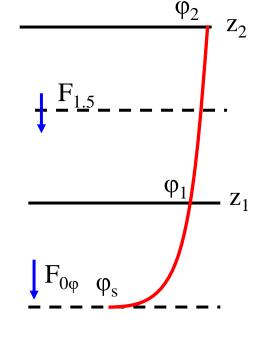
Calcular $K(z_{1.5})$???

2 Nível do modelo

1.5 Nível dos fluxos

1 Nível do modelo

Superfície



$$\phi_{1} - \phi_{s} \approx \frac{F_{0\phi}}{\rho \kappa u_{*}} \int_{Z_{0\phi}}^{Z_{1}} \frac{dz}{z} \qquad \Rightarrow \quad \phi_{1} - \phi_{s} = \frac{F_{0\phi}}{\rho \kappa u_{*}} \ln \left(\frac{Z_{1}}{Z_{o\phi}}\right)$$

$$u, v, T, q$$



Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w' \varphi'$

Coeficientes de difusão de acordo com a similaridade MO

Conceito Básico de um modelo PBL

$$K_M = \frac{1}{\phi_m^2} l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|$$

$$K_{M} = \frac{1}{\frac{d^{2}}{dm}} l^{2} \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \qquad K_{H} = \frac{1}{\frac{d^{2}}{dm}} l^{2} \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \qquad \bullet$$



Usando a relação entre R_i e $\frac{z}{I}$

$$R_{i} = \frac{g}{\theta_{v}} \frac{\frac{\partial \theta_{v}}{\partial z}}{\left|\frac{\partial U}{\partial z}\right|^{2}} = \frac{g}{\theta_{v}} \frac{z\theta_{*}\phi_{h}}{u_{*}^{2}\phi_{m}^{2}} = \frac{z}{\kappa L} \frac{\phi_{h}}{\phi_{m}^{2}}$$

$$\frac{1}{\phi_m^2} = \frac{\kappa L}{z \, \phi_h} R_i$$

$$\frac{1}{\phi_m \phi_h} = \frac{\phi_m \kappa L}{\phi_h^2} R_i$$

Resolver para
$$\frac{Z}{L} = \xi$$



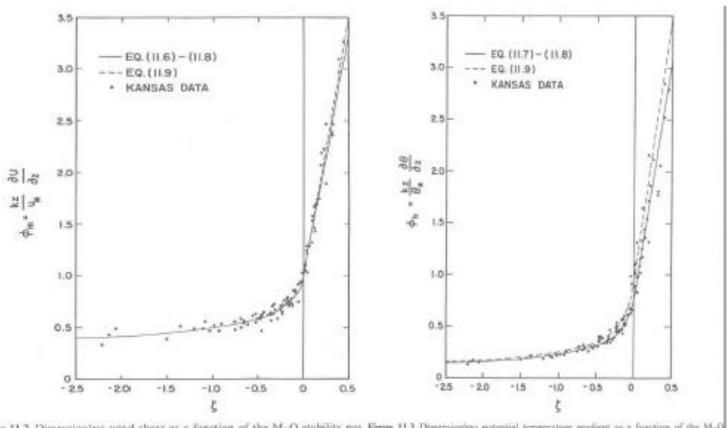
$$K_{M} = l^{2} \left| \frac{dU}{dz} \right| f_{M}(R_{i})$$

$$K_H = l^2 \left| \frac{dU}{dz} \right| f_H(R_i)$$



Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w'\phi'$ Coeficientes de difusão de acordo com a similaridade MO

Onde as Funções ϕ_m (esquerda) e ϕ_h (direita):



ne II.2 Dimensionless wind shear as a function of the M-O stability par Figure II.3 Dimensionless potential temperature gradient as a function of the M-O sas data from Izumi (1971).]
sas data from Izumi (1971).]

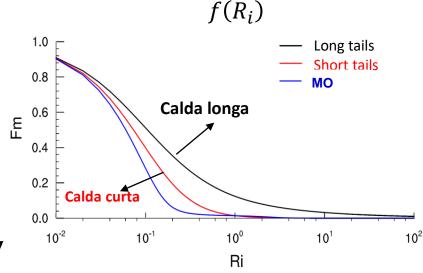


Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w' \varphi'$ Camada limite estável: fechamento e ressalvas

Conceito Básico de um modelo PBL

$$K = l^2 \left| \frac{dU}{dz} \right| f(R_i)$$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\lambda}$$
 Tamanho típico dos eddy ~ kz ou l
Onde $\lambda \propto h$



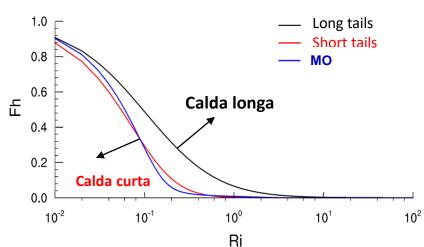
Camada de Superfície – Monin Obukhov

Acima:
$$f = \alpha^* f_{LT} + (1 - \alpha) * f_{ST}$$

$$f_{LT} \approx \begin{cases} \alpha = e^{-\frac{H}{150}} \Rightarrow f_{ST} \approx \begin{cases} \alpha = e^{-\frac{H}{30}} \\ \lambda = 150 \ m \end{cases} \Rightarrow f_{ST} \approx \begin{cases} \alpha = e^{-\frac{H}{30}} \end{cases}$$

Os modelos de PNT,

a difusão mantida em condições estáveis é mais forte do que indicam o LES ou as observações





Como parameterizar os momentum de 2 ordem $w'\phi'$

Impacto da redução da difusão em condições estáveis

Conceito Básico de um modelo PBL

 $f = \alpha^* f_{LT} + (1 - \alpha) * f_{ST}$

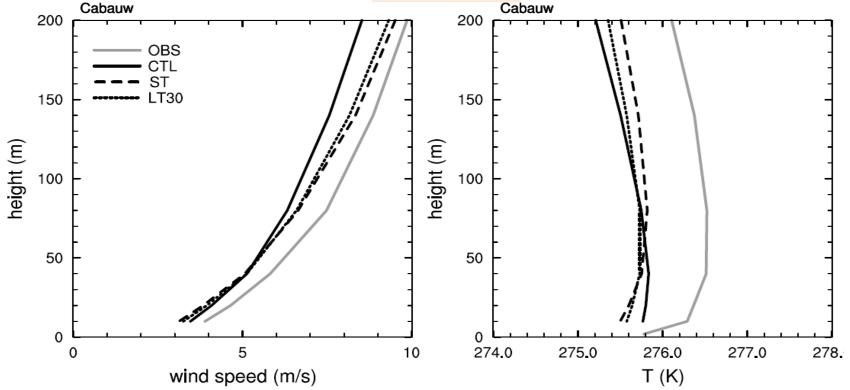
 $K = l^2 \left| \frac{dU}{dz} \right| f(R_i)$

ST : calda longa--→calda curta

LT30 : $\lambda = 150 \ m$ $\rightarrow \lambda = 30 \ m$

 $\alpha = e^{-\frac{H}{\lambda}}$ $\lambda = 150 \ m$

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\lambda}$$



Quase reduz pela metade os erros no jato de baixo nível, também aumenta o giro do vento

Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

Como Parametrizar os Fluxos Turbulentos acima da camada limite superficial



Fechamento K com dependência da estabilidade local ()

Fechamento K Local

$$K = l^2 \left| \frac{dU}{dz} \right| f(R_i)$$

O esquema é simples e fácil de implementar.

Totalmente consistente com a escala local para a camada limite estável.

É necessário um número suficiente de níveis para resolver o BL, ou seja, para localizar a inversão.

O entranhamento na parte superior da camada limite não é representado



Fechamento K com dependência da estabilidade local ()

Opções de parametrização do coeficiente de difusão

$$K_{C} = k w_{i} z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{2}$$

$$K_{M} = lqS_{M}$$

$$K_H = lqS_H$$

Hostslag e Boville,1993

Mellor e Yamada -2.0,1982

$$K_{h} = egin{cases} q\ell S_{H}ig(G_{\!\!\!M},G_{\!\!\!H}ig) & para \, decaimento \, da \, turbulencia \ & rac{q^{2}}{q_{*}}\ell S_{H}ig(G_{\!\!\!M_{*}},G_{\!\!\!H_{*}}ig) \, para \, \, crescimento \, \, da \, \, turbulencia \end{cases}$$

$$K_{_{m}} = egin{cases} q\ell S_{_{M}}ig(G_{_{M}},G_{_{H}}ig) & para \, decaimento \, da \, turbulencia \ rac{q^{2}}{a_{*}}\ell S_{_{M}}ig(G_{_{M_{*}}},G_{_{H_{*}}}ig) \, para \, \, crescimento \, \, da \, \, turbulencia \end{cases}$$

Mellor e Yamada -2.5,1982

Esquema de PBL Modificado

$$K_{h} = w_{1}K_{h_{MY}} + w_{2}K_{h_{TKE}} + w_{3}K_{h_{HB}}$$

$$K_{m} = w_{1}K_{m_{MY}} + w_{2}K_{m_{TKE}} + w_{3}K_{m_{HB}}$$



Parametrização de fluxos turbulentos na camada externa

Fechamento do Perfil-K



Parametrização de fluxos turbulentos na camada externa

K-profile closure Troen and Mahrt (1986)

$$\overline{\theta'w'} = -K_h \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_\theta \right)$$

Perfil dos coeficientes de difusão:

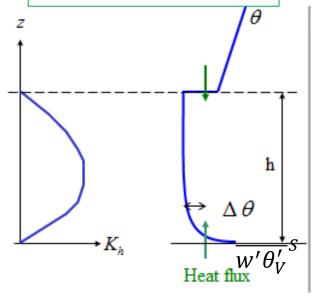
$$K_H = w_S \kappa z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2$$

$$w_S = \sqrt[3]{(u_*^3 + C_1 w_*^3)}$$

$$\gamma_{\theta} = \frac{\widehat{C\theta'w'}^{S}}{w_{S}h}$$

Encontra inversão levantando a parcela de ar com excesso de T:





$$\theta_{VS} = \theta_S + \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = \frac{D\overline{w'\theta_V'}^S}{w_S}$$

$$Ri_c = h \frac{g}{\theta_V} \frac{\theta_{vh} - \theta_{vs}}{U_h^2 + V_h^2 - U_s^2 - V_s^2} = 0.25$$

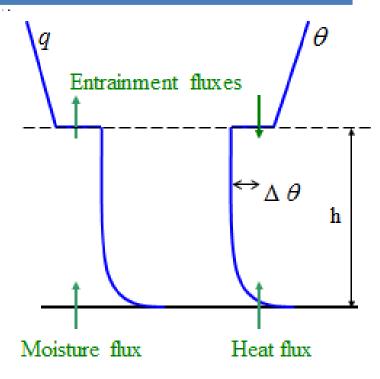


Parametrização de fluxos turbulentos na camada externa

A interação de inversão foi muito agressiva no esquema original e muito dependente da resolução vertical:

Forma da implementação do ECMWF:

- ✓ Sem termos de contra-gradiente .
- ✓ Não usado para camada limite estável.
- ✓ Elevação do T. virtual mínima
- √ Constantes diferentes.
- ✓ Formulação implícita de entranhamento



| K_{hi} | _ | $(w'\theta'_v)_0$ | |
|----------|---|---|------------------------|
| | | $\frac{\overline{\left(\frac{\partial\theta_{v}}{\partial x}\right)}$ | $^{\prime}$ $^{L}_{E}$ |

| | ECMWF | Troen/Mahrt |
|---------------------------|--------------|-------------|
| \mathbf{C}_1 | 0.6 | 0.6 |
| D | 2.0 | 6.5 |
| $\mathbf{C}_{\mathbf{E}}$ | 0.2 | - |



Parametrização de fluxos massa

ED/MF closure

K-diffusion versus Mass flux method



Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.



Fechamento local

Este método supoem-se um equilíbrio local entre produção e dissipação de energia cinética turbulenta.

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} = \underbrace{\left(\frac{g}{\theta_0} \overline{w'} \theta_{v'}\right)}_{\text{produção}} - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j'} e}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i'} p'}{\partial x_i} - \varepsilon$$

$$\underbrace{\frac{g}{\theta_0} \overline{w'} \theta_{v'}}_{\text{produção}} + \underbrace{\frac{g}{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}}_{\text{produção}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i'} p'}{\partial x_i}}_{\text{dissipação}} - \varepsilon$$

$$\underbrace{\frac{g}{\theta_0} \overline{w'} \theta_{v'}}_{\text{produção}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i'} p'}{\partial x_j}}_{\text{produção}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i'} p'}{\partial x_i}}_{\text{dissipação}} - \varepsilon$$

$$\frac{g}{\theta_0} \overline{w' \theta_v'} - \varepsilon = 0$$

$$\varepsilon = \frac{g}{\theta_0} \overline{w' \theta_v'} = = \Rightarrow dissipação por difusão$$



Fechamento local

Não há variáveis prognósticas explícitas para descrever a camada limite planetária (PBL); em vez disso, toda a atmosfera é representada em camadas discretas que podem ou não fazer parte do PBL.

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \overline{q}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z}$$

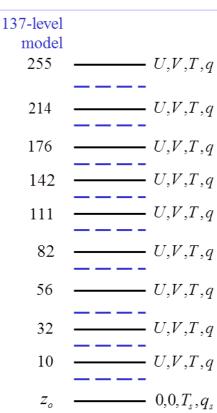
$$\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{\theta'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = K_m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial^2 z}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = K_m \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial^2 z}$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \right) = K_q \frac{\partial^2 \bar{q}}{\partial^2 z}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-K_\theta \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) = K_\theta \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial^2 z}$$





Fechamento local

Os fluxos verticais que são expressos como termos quadráticos nas quantidades turbulentas são representados pela difusão vertical ao longo do gradiente das quantidades em grande escala.

$$-(\overline{uw}) = K_M \frac{\partial \overline{U}}{\partial z}$$

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}, \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial \overline{v}}{\partial z}$$

$$\overline{\theta'w'} = -K_H \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z}, \quad \overline{q'w'} = -K_H \frac{\partial \overline{q}}{\partial z}$$

u e w são os componentes turbulentos da velocidade zonal e vertical

 $\it U$ é o componente da velocidade zonal em grande escala e

 K_M é um coeficiente de difusão do momento.



PBL: Equações para a energia cinetica turbulenta Fechamento Local K

Conceito Básico de um modelo PBL

Os coeficientes de mistura são calculados de acordo com o esquema de fechamento "nível 2.0" **exemplo: Mellor e Yamada (1982).**

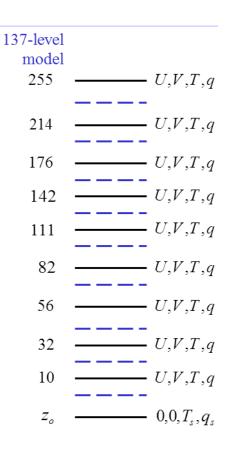
$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}, \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial \overline{v}}{\partial z}$$

$$\overline{\theta'w'} = -K_H \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z}, \quad \overline{q'w'} = -K_H \frac{\partial \overline{q}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \overline{\phi'w'}}{\partial z} \approx \frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial z} \right) \approx -K \frac{\partial^2 \overline{\phi}}{\partial z^2}$$

Os coeficientes de difusão $[K_x]$ precisam ser especificados em função das características do fluido por exemplo:

- cisalhamento,
- estabilidade,
- · escalas de comprimento.





Fechamento local MY 2.0

O método de Fechamento local MY 2.0 de turbulência envolve duas suposições.

(1) Os coeficientes de difusão são expressos como:

$$K_M = lqS_M$$

$$K_H = lqS_H$$

 K_M e K_H são os coeficientes de difusão para momento e calor, l é a escala mestre de comprimento de turbulência, q^2 é a energia cinética turbulenta . q é a magnitude da velocidade turbulenta do vento. S_M e S_H são fluxo de momento S_H e parâmetros de estabilidade do fluxo de calor.



$$K_M = lqS_M \qquad K_H = lqS_H$$

$$\frac{q}{l} = \left[\frac{1}{GM} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \right]^{1/2} \qquad \frac{q}{l} = -\left[\frac{1}{GH} \left[\beta * g \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] \right]^{1/2}$$

$$R_{iB} = \frac{\frac{g}{\theta} * \frac{d\theta}{dz}}{\left(\frac{dU}{dz}\right)^{2} + \left(\frac{dV}{dz}\right)^{2}} = \frac{Stabil}{Shear}$$

$$R_{iF} = r_1 \left(R_{iB} + r_2 - \sqrt{(R_{iB}(R_{iB} - r_3) + r_4)} \right)$$



$$R_{iF} = r_1 \left(R_{iB} + r_2 - \sqrt{(R_{iB}(R_{iB} - r_3) + r_4)} \right)$$

$$\begin{cases} alfa = b_1(gam1 - c_1) + 3 * (a_2 + 2 * a_1) \\ beta = b_1(gam1 - c_1) \\ gama = \frac{a_2}{a_1}(b_1(gam1 + gam2) - 3 * a_1) \\ delta = \frac{a_2}{a_1} * b_1 * gam1 \end{cases}$$

$$r_1=rac{1}{2}rac{gama}{alfa}$$
 $r_2=rac{beta}{gama}$ $r_3=2*rac{(2*alfa*delta-gama*beta)}{(gama*gama)}$ $r_4=r_2*r_2$

$$\begin{cases} a_1 = 0.92 \\ a_2 = 0.17 \\ b_1 = 16.6 \\ b_2 = 10.1 \end{cases} \begin{cases} c_1 = 0.08 \\ vk0 = 0.4 \\ sffrac = 0.01 \\ r_2 = 10.1 \end{cases}$$
$$gam1 = \frac{1}{3} - 2\left(\frac{a_1}{b_1}\right)$$
$$gam2 = \frac{(b_2 + 6 * a_1)}{b_1}$$

$$R_{iB} = \frac{\frac{g}{\theta} * \frac{d\theta}{dz}}{\left(\frac{dU}{dz}\right)^{2} + \left(\frac{dV}{dz}\right)^{2}} = \frac{Stabil}{Shear}$$



$$\begin{cases} a_1 = 0.92 \\ a_2 = 0.17 \\ b_1 = 16.6 \\ b_2 = 10.1 \end{cases}$$

$$S_H = \frac{s_1 - s_2 R_{iF}}{(1 - R_{iF})}$$

$$gam1 = \frac{1}{3} - 2\left(\frac{a_1}{b_1}\right)$$

$$gam2 = \frac{(b_2 + 6 * a_1)}{b_1}$$

$$s_1 = 3 * a2 * gam1$$

$$s_2 = 3 * a2 * (gam1 + gam2)$$



$$R_{iF} = r_1 \left(R_{iB} + r_2 - \sqrt{(R_{iB}(R_{iB} - r_3) + r_4)} \right)$$

$$S_H = \frac{s_1 - s_2 R_{iF}}{(1 - R_{iF})}$$

$$R_{iF} = -\frac{GH}{GM} = \frac{S_M}{S_H} * R_{iB}$$

$$S_M = S_H * \frac{R_{iF}}{R_{iB}}$$



Fechamento local MY 2.0

$$G_{M} = \frac{l^{2}}{q^{2}} \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^{2} + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^{2} \right] \qquad G_{M} = \frac{l^{2}}{q^{2}} \beta g \left[\left[\frac{\partial theta}{\partial z} \right]^{2} \right] \qquad l = \frac{k_{0}z}{1 + \frac{k_{0}z}{l_{0}}}$$

$$G_{M} = \frac{l^{2}}{q^{2}} \beta g \left[\left[\frac{\partial theta}{\partial z} \right]^{2} \right]$$

$$l = \frac{k_0 z}{1 + \frac{k_0 z}{l_0}}$$

O comprimento mistura máximo $l_0 = 10 \ metros$ na formula de blackerdar é usado como primeira aproximação do calculo interativo

$$l = \frac{l_0 k_0 z}{l_0 + k_0 z}$$

$$\frac{q^2}{l^2} = \frac{1}{G_M} \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right] \qquad \frac{1}{G_M} = b_1 S_M (1 - R_{iF})$$

$$\frac{1}{G_M} = b_1 S_M (1 - R_{iF})$$

$$\frac{q}{l} = \sqrt{b_1 S_M (1 - R_{iF}) \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right]}$$



Fechamento local MY 2.0

O comprimento mistura máximo $l_0=10\ metros$ na fórmula de blackerdar é usado como primeira aproximação do cálculo interativo

$$l = \frac{l_0 k_0 z}{l_0 + k_0 z}$$

$$l = \frac{l_0 k_0 z}{l_0 + k_0 z}$$

$$\frac{q^2}{l^2} = \frac{1}{G_M} \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right]$$

$$\frac{1}{G_M} = b_1 S_M (1 - R_{iF})$$

$$\frac{q}{l} = \sqrt{b_1 S_M (1 - R_{iF}) \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right]}$$

$$\frac{q}{l} * l = \sqrt{b_1 S_M (1 - R_{iF}) \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right] * l}$$

$$q = \sqrt{b_1 S_M (1 - R_{iF}) \left[\left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial z} \right]^2 \right] * l}$$

$$K_H = lqS_H$$

$$K_M = lqS_M$$



Fechamento local MY 2.0

A razao de SH para SM é igual à razão do número de Richardson do fluxo turbulento pelo número de Richardson Bulk (larga escala)

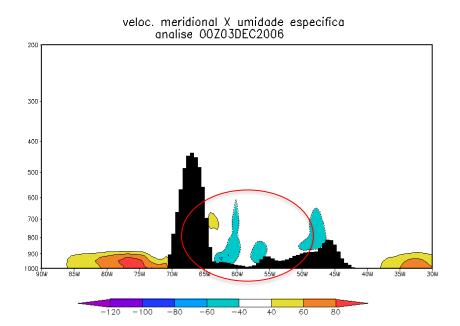
KM e KH são restritos a:.

$$1 \le (K_M = lqS_M) \le 300$$

$$0.1 \le (K_H = lqS_H) \le 300$$

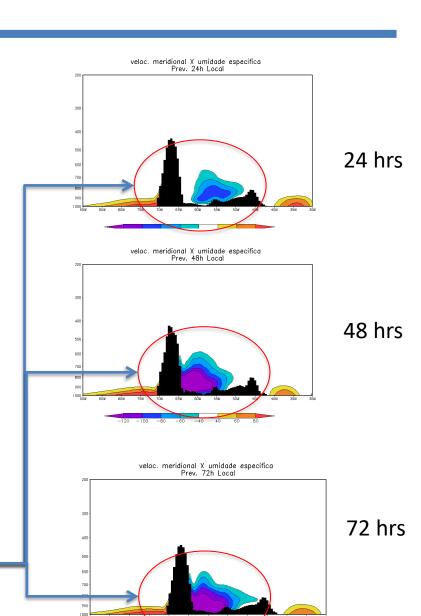


Fechamento local MY 2.0



Analise

Simulação 1.8x1.8 graus Superestima o transporte de umidade





Acoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

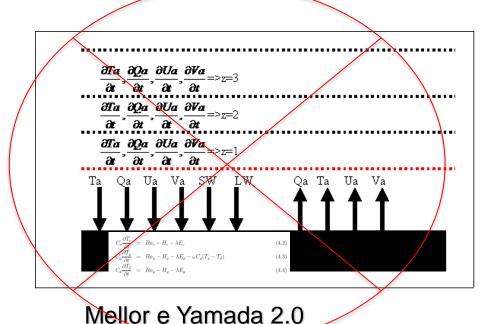
(2) A equação da energia cinética turbulenta (TKE) é fechada assumindo que a produção e a dissipação do TKE sejam instantaneamente equilibradas em cada ponto.

Essa suposição leva a um sistema de equações para l, q, SM e SH que podem ser resolvidas simultaneamente para fornecer os coeficientes de difusão vertical usados para acoplar as camadas discretas do GCM e as camadas superficiais do modelo de superficie.

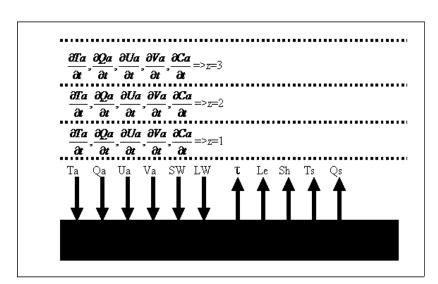


As equações prognósticas para temperaturas e umidade atmosféricas são então acopladas às equações SSIB para a superfície do solo e a copa.

E o sistema de equações acopladas é resolvido simultaneamente com a difusão vertical de calor, umidade e momento, conforme Mellor e Yamada (1982).).



Forte dependência dos parâmetros específicos do esquema SSiB na 1º camada



Hostlag e Boville

Não existe forte dependência do tipo específico de esquema de superfície na 1º camada



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

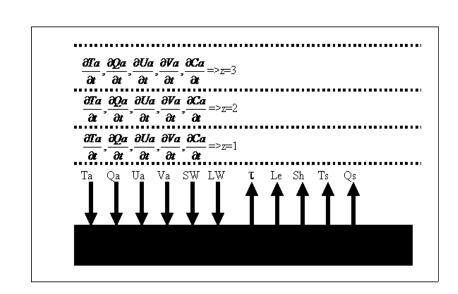


Conceito Basico de um modelo PBL

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

- Separa o sistema de Equações Prognósticas da camada limite e da superfície.
- Assim a camada limite pode ser numericamente tratada de forma independente.



Hostlag e Boville

Não existe forte dependência do tipo específico de esquema de superfície na 1º camada



Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

Pontos Estável e neutros

define a difusividade termo *contra gradiente é zero* para o caso estável

$$\frac{z_k - z_{k-1}}{2 * L} = zl \le 1$$

$$K_c = ku_* \frac{z_k - z_{k-1}}{2} \frac{\left[1 - \frac{z_k - z_{k-1}}{2 * h}\right]^2}{\left[1 + \beta_s \frac{z_k - z_{k-1}}{2 * L}\right]}$$

$$\frac{z_k - z_{k-1}}{2 * L} = zl > 1$$

$$K_c = ku_* \frac{z_k - z_{k-1}}{2} \frac{\left[1 - \frac{z_k - z_{k-1}}{2 * h}\right]^2}{\left[\beta_S + \frac{z_k - z_{k-1}}{2 * L}\right]}$$

$$\beta_s$$
=5

$$L = \frac{u_*^3}{k * \frac{g}{T_0} \frac{H_0}{\rho_{air} cp}}$$

Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

Instável para camada de superfície

Termo *contra-gradiente é zero*

$$\beta_m$$
=15

$$K_c = u_* k \frac{z_{k-Z_{k-1}}}{2} \left[1 - \frac{z}{h} \right]^2 \left[1 - \beta_m \frac{z_{k-Z_{k-1}}}{2 * L} \right]^{1/3}$$



Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

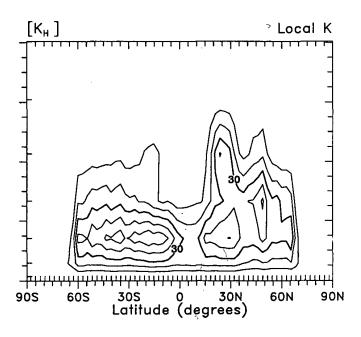
Contra Gradiente

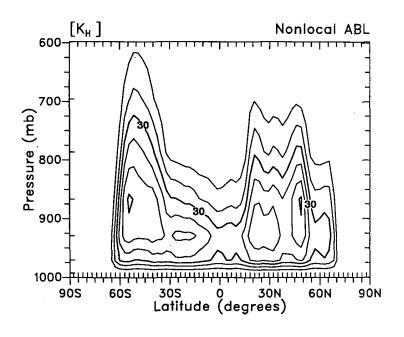
Camada Limite Úmida.

Fechamento Local x Não Local

$$\overline{w'C'} = -K_c \frac{\partial C}{\partial z}, \qquad (3.1)$$

$$\overline{w'C'} = -K_c \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right). \tag{3.8}$$





Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

Instável (camada limite externa)

Termo contra-gradiente não é zero

$$K_c = w_m k \frac{z_{k-Z_{k-1}}}{2} \left[1 - \frac{z_k - z_{k-1}}{2 * h} \right]^2$$

Escala de velocidade turbulenta para momentum

Warm, dry, subsiding free-troposphere

$$w_m = \left[u_*^3 - u_*^3 * 0.1 * 15 * \frac{h}{L} \right]^{\frac{1}{3}}$$



Metodologia utilizada no esquema de Hostslag e Boville, 1993

Instável (camada limite externa)

Termo contra-gradiente *não é zero*

$$\gamma_c = d \frac{wC_0}{w_* * h} = 7.2 * \frac{w_*}{w_m} * \frac{1}{h * w_m}$$

$$\gamma_{\theta} = \frac{H}{\rho_{air}c_p}\gamma_c$$

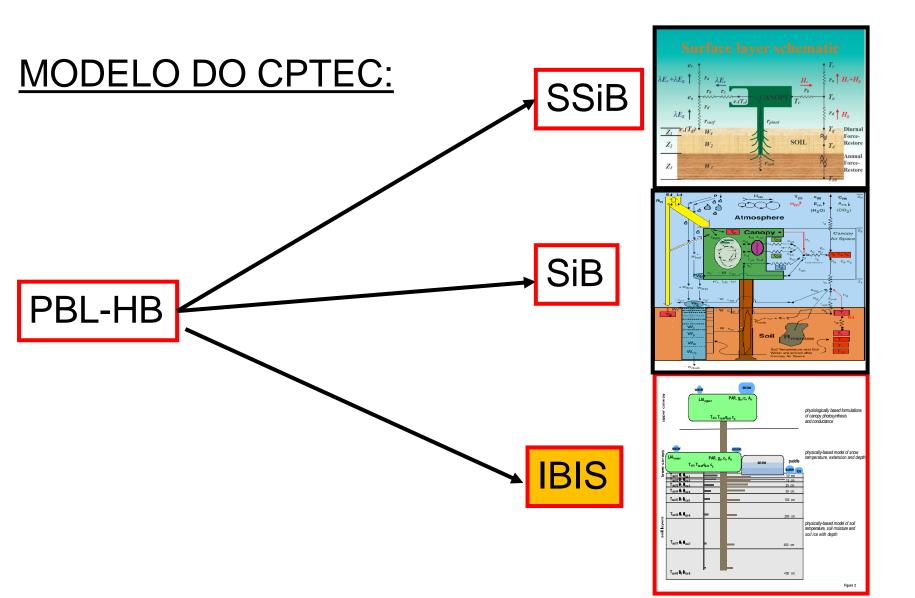
Escala de velocidade turbulenta para momentum $w_{m} = \left[u_{*}^{3} - u_{*}^{3} * 0.1 * 15 * \frac{h}{L} \right]^{\frac{1}{3}}$

$$w_* = \left[\frac{H_0}{\rho_{air}c_p} * \frac{g * h}{T_0}\right]^{\frac{1}{3}}$$

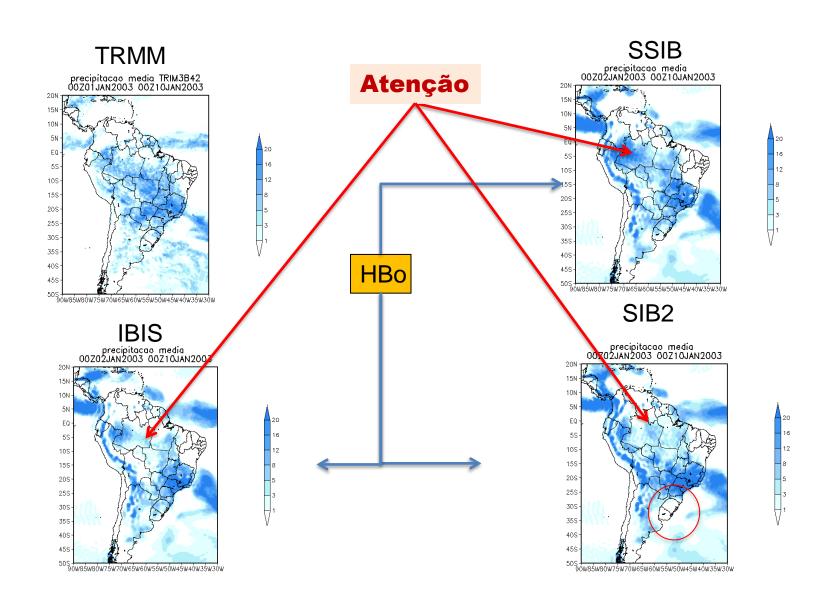
Quais as vantagens de realizar o desacoplamento das equações prognostica da PBL:

1) Pode ser acoplada a diferentes esquemas de superfície









Quais as vantagens de realizar o desacoplamento das equações prognostica da PBL:

2) Pode ser introduzir diferentes tipos de fechamento da camada limite.



Opções de parametrização do coeficiente de difusão

$$K_{C} = k w_{i} z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{2}$$

$$K_M = lqS_M$$

$$K_H = lqS_H$$

Mellor e Yamada -2.0,1982

$$K_{h} = egin{cases} q\ell S_{H}ig(G_{\!_{M}}, G_{\!_{H}}ig) & ext{para decaimentoda turbulencia} \ rac{q^{2}}{q_{*}}\ell S_{H}ig(G_{\!_{M_{*}}}, G_{\!_{H_{*}}}ig) & ext{para crescimento da turbulencia} \end{cases}$$

$$K_{_{m}} = egin{cases} q\ell S_{_{M}}ig(G_{_{M}},G_{_{H}}ig) & para decaimento da turbulencia \ rac{q^{2}}{q_{*}}\ell S_{_{M}}ig(G_{_{M_{*}}},G_{_{H_{*}}}ig) & para crescimento da turbulencia \end{cases}$$

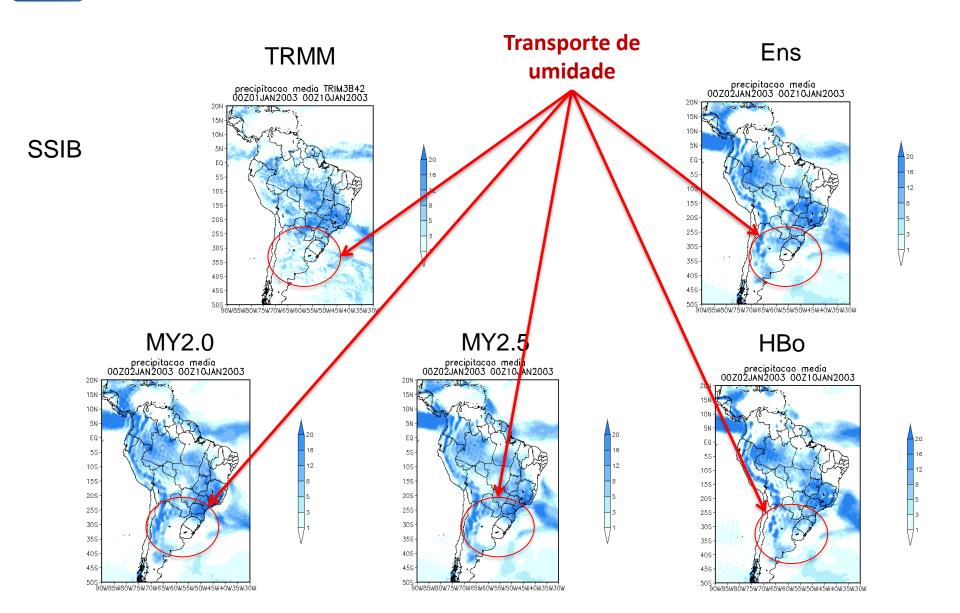
Mellor e Yamada -2.5,1982

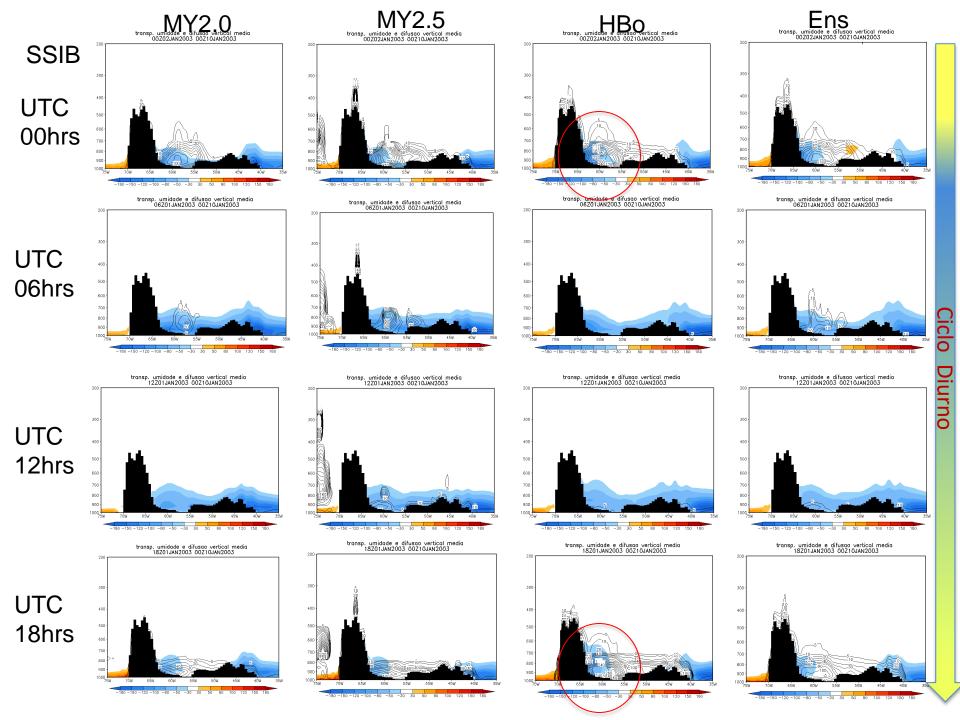
Esquema de PBL Modificado

$$K_{h} = w_{1}K_{h_{MY}} + w_{2}K_{h_{TKE}} + w_{3}K_{h_{HB}}$$

$$K_{m} = w_{1}K_{m_{MY}} + w_{2}K_{m_{TKE}} + w_{3}K_{m_{HB}}$$

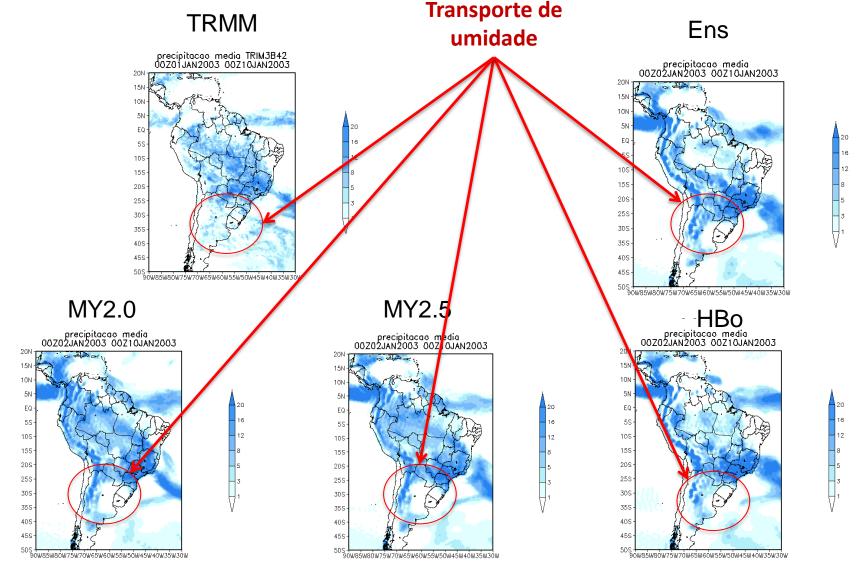


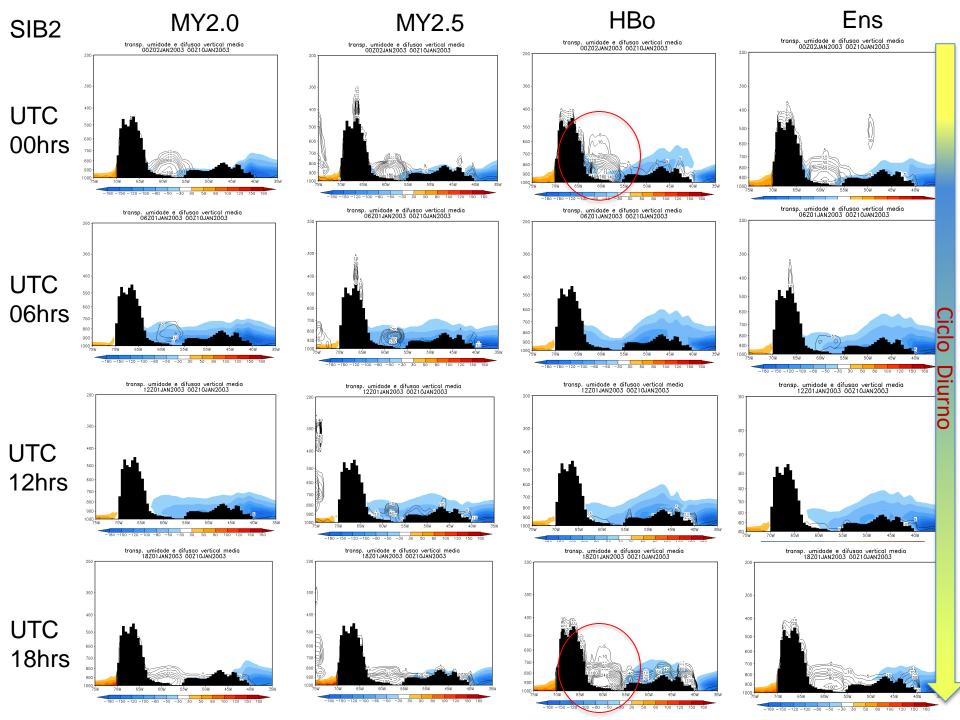




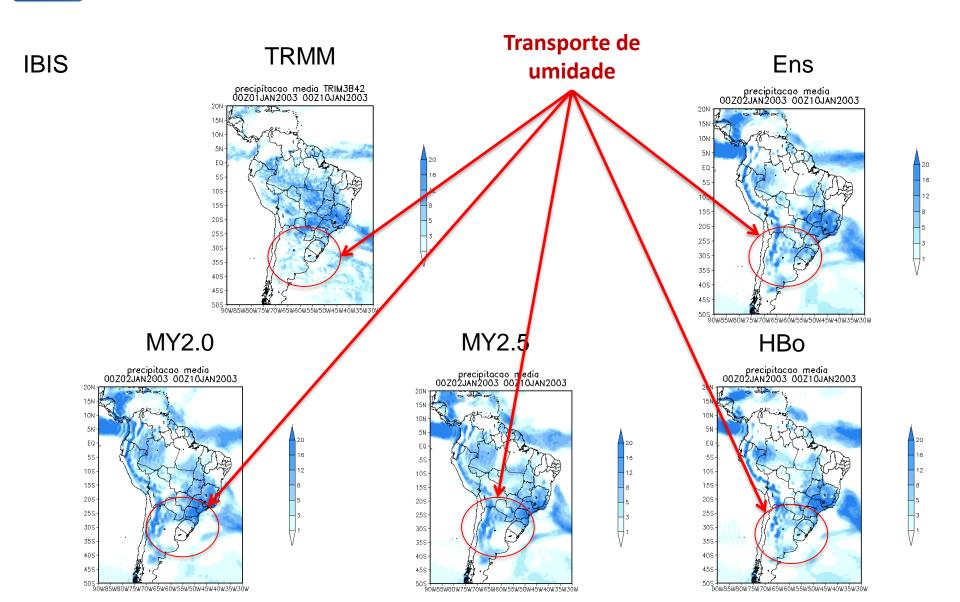


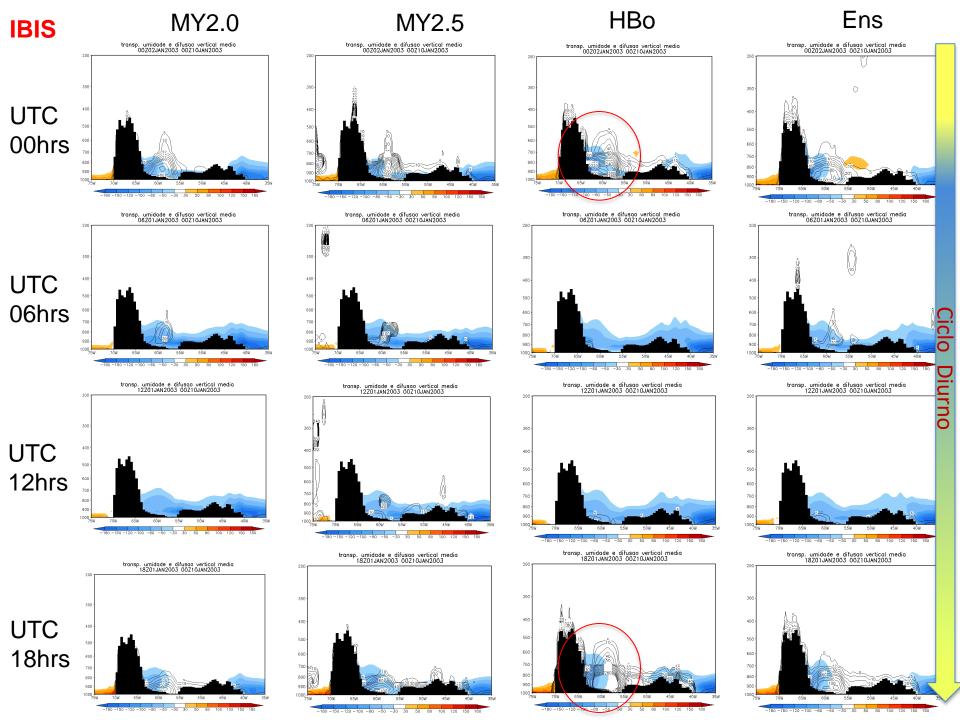














Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Experimento teste com a nova PBL e o esquema IBIS

- Tempo de integração de 1 mês p/ dezembro de 2003
- Resolução TQ0062L028 (dt = 1200 seg)
- Condição inicial do NCEP (00/01/01/2003), SST observada do NCEP.
- Simulação com:
- Dinâmica Euleriana Grade gaussiana regular
- Convecção profunda de Grell
- Convecção Rasa de Tiedke
- Radiação de onda curta de Lacis e Hansen
- Radiação de Onda Longa de Harshvardham
- Camada Limite de Hostlag e Boville
- Arrasto por onda de gravidade de Alpert
- Esquema de Superfície IBIS-DYNA

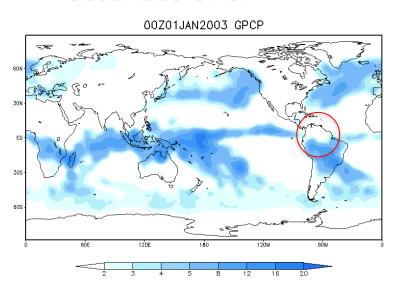


"ACOPLAMENTO" DO MCGA-CPTEC COM O IBIS "Precipitação"

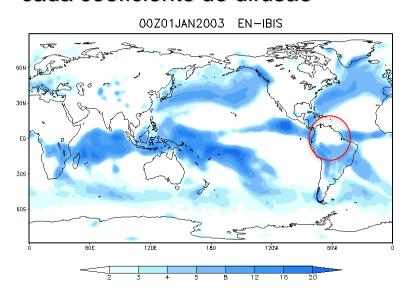
$$K_{h} = w_{1}K_{h_{MY}} + w_{2}K_{h_{TKE}} + w_{3}K_{h_{HB}}$$

$$K_{m} = w_{1}K_{m_{MY}} + w_{2}K_{m_{TKE}} + w_{3}K_{m_{HB}}$$

Observado GPCP



Simulação com o mesmo peso para cada coeficiente de difusão



Norte da AMAZ.:sul

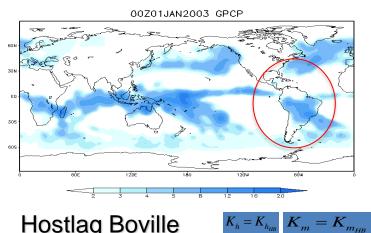
NE:super.



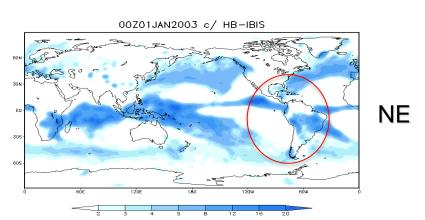
"ACOPLAMENTO" DO MCGA-CPTEC COM O IBIS

"Precipitação"

Observado GPCP

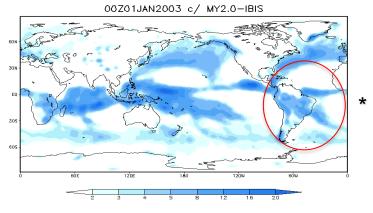


Hostlag Boville



Mellor Yamada 2.0 $K_m = K_{m_{MY}} K_h = K_{h_{MY}}$

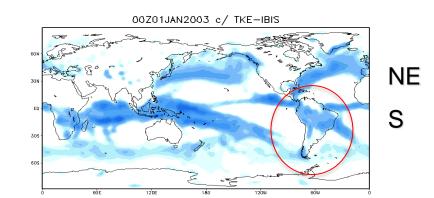




Mellor Yamada 2.5 $K_h = K_{h_{TKF}}$



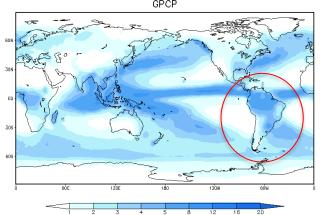




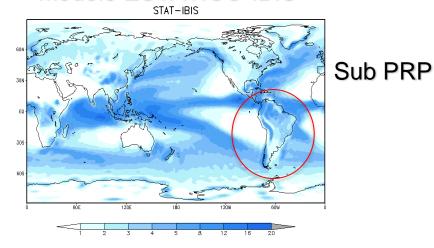


"RESULTADO" DO MCGA-CPTEC COM O IBIS (Média Anual de Precipitação)



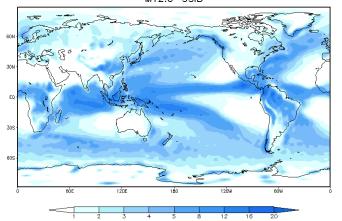


Modelo ESTÁTICO-IBIS

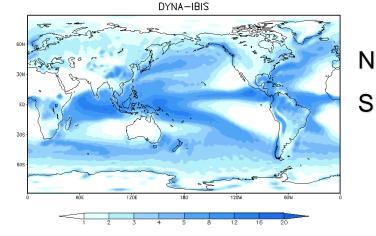


Modelo Original





Modelo DINÂMICO-IBIS





Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

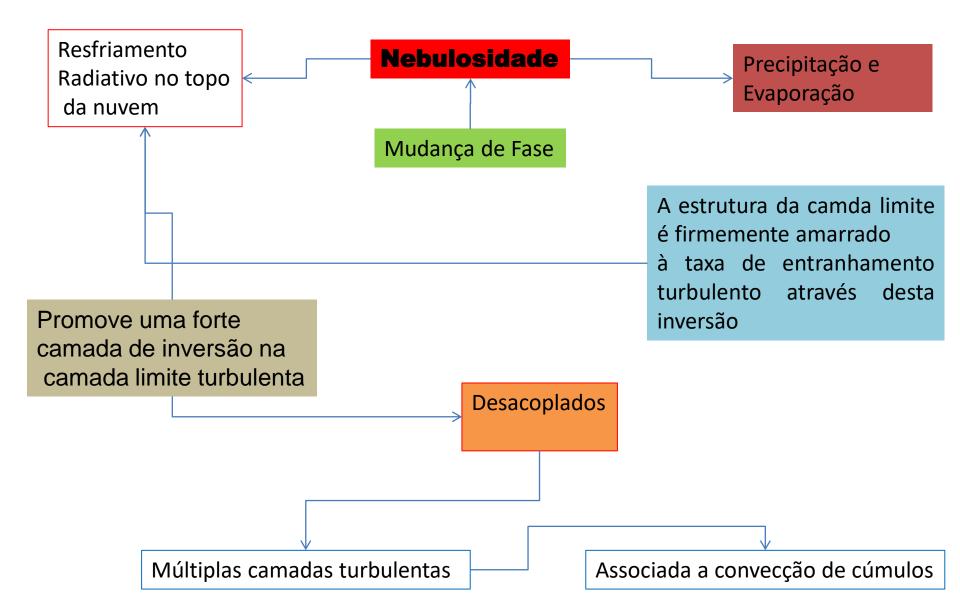


Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (BRETHERTON e PARK, 2009)

Parametrização de turbulência úmida

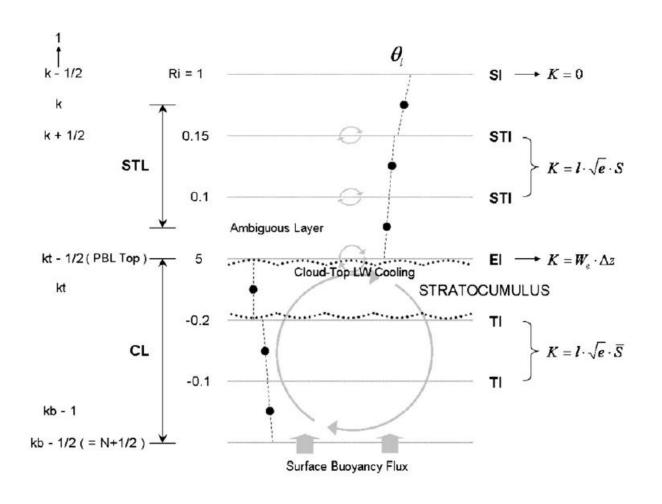


Processos relacionados a nebulosidade





Processos relacionados a nebulosidade



$$\overline{w'\chi'} = -K_{\chi} \frac{\partial \chi}{\partial z}$$

$$K_m = l S_m e^{1/2}$$

$$K_h = l S_h e^{1/2}$$

$$l = \frac{e^{3/2}}{b_1 D}$$

$$D = \frac{e^{3/2}}{b_1 l}$$

$$(b_1 = 5.8)$$

e e D derivada do LES



Formulação

Processos relacionados a nebulosidade

Funções de estabilidade adimensional $S_{h,m}$ (Galperin, 1988)

$$S_h = \frac{\alpha_5}{1 + \alpha_3 G_h}$$

$$S_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 G_h}{(1 + \alpha_3 G_h)(1 + \alpha_4 G_h)}$$

$$K_h = {}^{l}S_h e^{1/2}$$

$$K_h = lS_h e^{1/2}$$

$$K_m = lS_m e^{1/2}$$

Estas funções são expressos em termos de uma razão de estabilidade adimensional

$$G_h = \frac{N^2 l^2}{(2e)}$$

 N^2 é o quadrado da frequência de flutuabilidade úmida

$$\alpha_1 = 0.55600;$$
 $\alpha_2 = -4.3649;$
 $\alpha_3 = -34.6764;$
 $\alpha_4 = -6.1272;$
 $\alpha_5 = 0.698600$



Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (BRETHERTON e PARK, 2009) Formulação

Estas funções são expressos em termos de uma razão de estabilidade adimensional

$$G_h = \frac{N^2 l^2}{(2e)}$$
 N^2 é o quadrado da frequência de flutuabilidade úmida

Nós restringimos $G_h < 0.0233$,

Esta é uma condição teórica <u>para manter a produção de cisalhamento</u> <u>positiva em turbulência homogeniamente estratificada, com cisalhamento instávelmente.</u>

O verdadeiro limite superior de Gh na estratificação instável é $\frac{-1}{\alpha_3} = 0.0288$, onde as funções de estabilidade se tornam infinitas,.

Nosso limite superior $G_h < 0.0233$ mantém $S_h = 3.64$. Comparado com um valor neutro ($G_h = 0$) onde $S_h = 0.70$



Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (PARK e BRETHERTON, 2009)

Transporte de TKE e metodo de solução na camada limite convectiva

$$\langle e \rangle = b_1(-S_h \langle W_b \rangle + S_m \langle W_s \rangle)$$

Todos os termos no lado direito desta equação podem calculados a partir dos perfis médios termodinâmicos e de cisalhamento

$$K_m = lS_m e^{1/2}$$

$$K_h = lS_h e^{1/2}$$

$$(b_1 = 5.8)$$

$$\langle \mathbf{e} \rangle = b_1 (-S_h \langle W_b \rangle + S_m \langle W_s \rangle)$$

$$G_h = \frac{N^2 l^2}{(2e)}$$

$$l = \frac{e^{3/2}}{b_1 D}$$

$$D = \frac{e^{3/2}}{b_1 l}$$

$$S_h = \frac{\alpha_5}{1 + \alpha_3 G_h}$$

$$D = \frac{e^{3/2}}{b_1 l} \qquad S_h = \frac{\alpha_5}{1 + \alpha_3 G_h} \qquad S_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 G_h}{(1 + \alpha_3 G_h)(1 + \alpha_4 G_h)}$$



Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (BRETHERTON e PARK, 2009)



(1)o cálculo da interação da nebulosidade estratiforme com o coeficiente de difusão vertical.

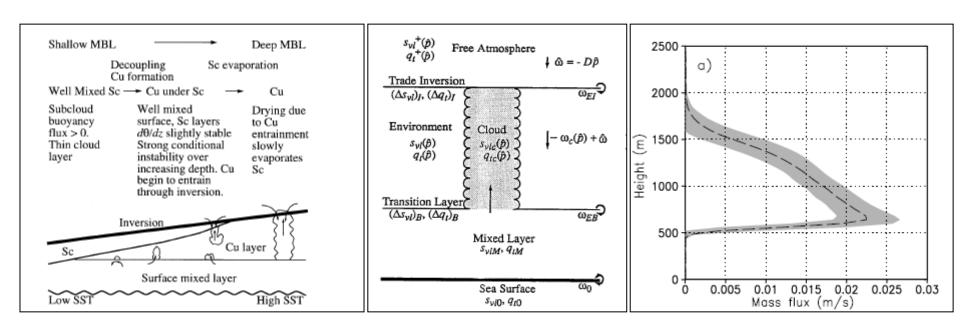


Fig. 6. A conceptual model of the subtropical stratocumulus to trade Cu transition

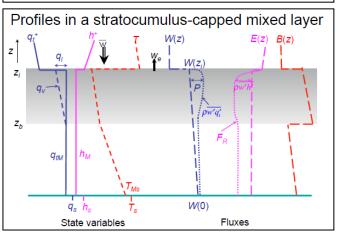


Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (BRETHERTON e PARK, 2009)



(1)o cálculo da interação da nebulosidade estratiforme com o coeficiente de difusão vertical.

$$\overline{u_i''u_j''} - \frac{2}{3}e\delta_{ij} = -K_{\rm m}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)
\overline{u_i''\theta''} = -K_{\rm h}\frac{\partial \theta}{\partial x_i}
\overline{u_i''q_v''} = -K_{\rm h}\frac{\partial q_{\rm v}}{\partial x_i}
\overline{u_i''s''} = -K_{\rm h}\frac{\partial s}{\partial x_i},$$



$$K_{\rm m} = c_{\rm m} \, l \sqrt{e},$$

$$K_{\rm h} = \left(1 + \frac{2l}{\Delta}\right) K_{\rm m}.$$

$$l = 0.76\sqrt{e} \left(\frac{g}{\theta_{\rm v,0}} \frac{\partial \theta_{\rm v}}{\partial z}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$l = \begin{cases} \min\left(1.8z, \Delta, 0.76\sqrt{e}\left(\frac{g}{\theta_{v,0}}\frac{\partial\theta_{v}}{\partial z}\right)^{-\frac{1}{2}}\right) & \text{for } \frac{\partial\theta_{v}}{\partial z} > 0, \\ \min\left(1.8z, \Delta\right) & \text{for } \frac{\partial\theta_{v}}{\partial z} \leq 0. \end{cases}$$

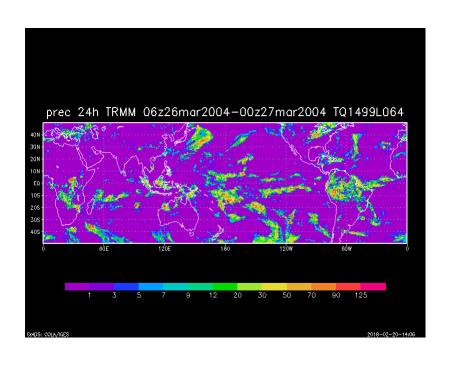
$$c_{\rm m} = 0.1$$
$$\mathbf{\Delta} = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

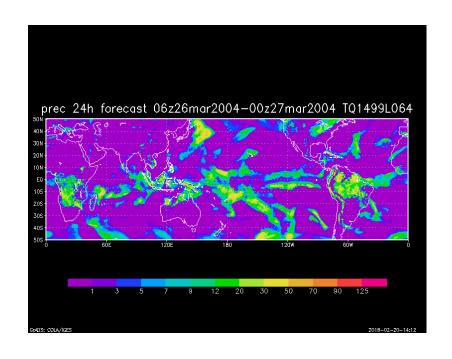
(1) foi implementada uma nova equação para o cálculo da pressão de vapor de saturação.



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Versão Operacional do modelo BAM

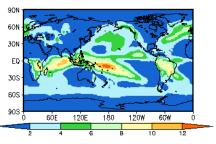




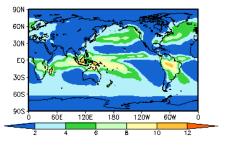


Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

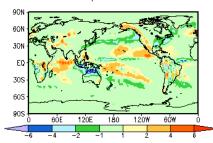




GPCP(yrs 1997-2007)



Exp1-GPCP



V

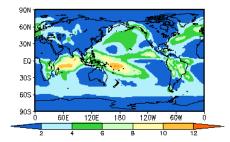
E

R

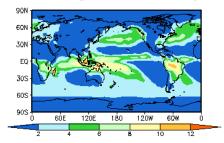
Ã



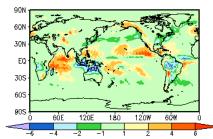
Exp2 (verao/p.seca/c.terma/ara/clir)

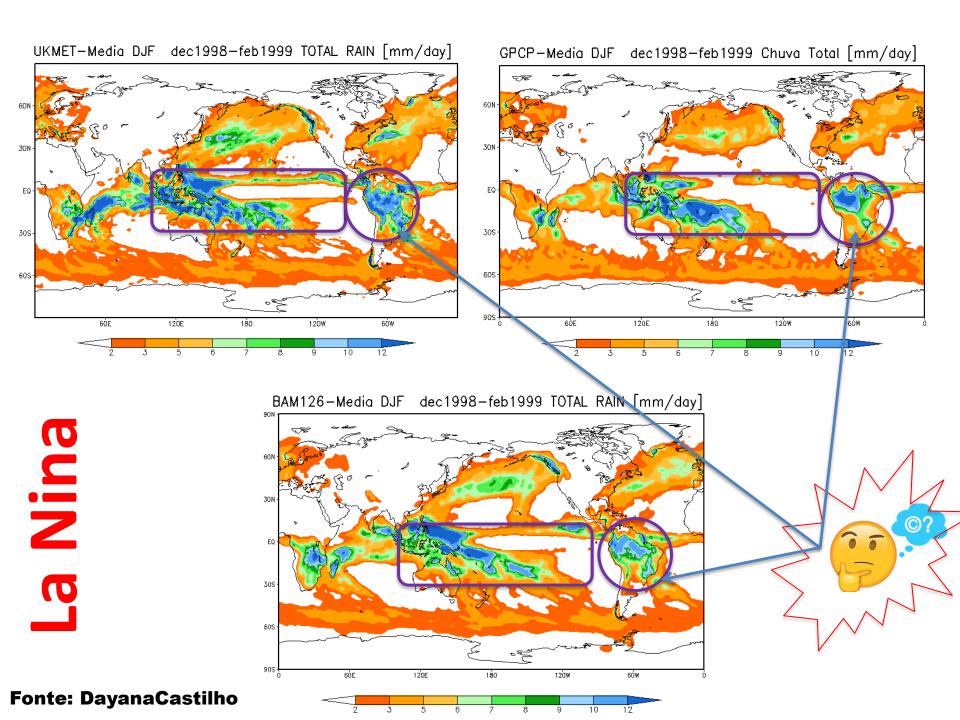


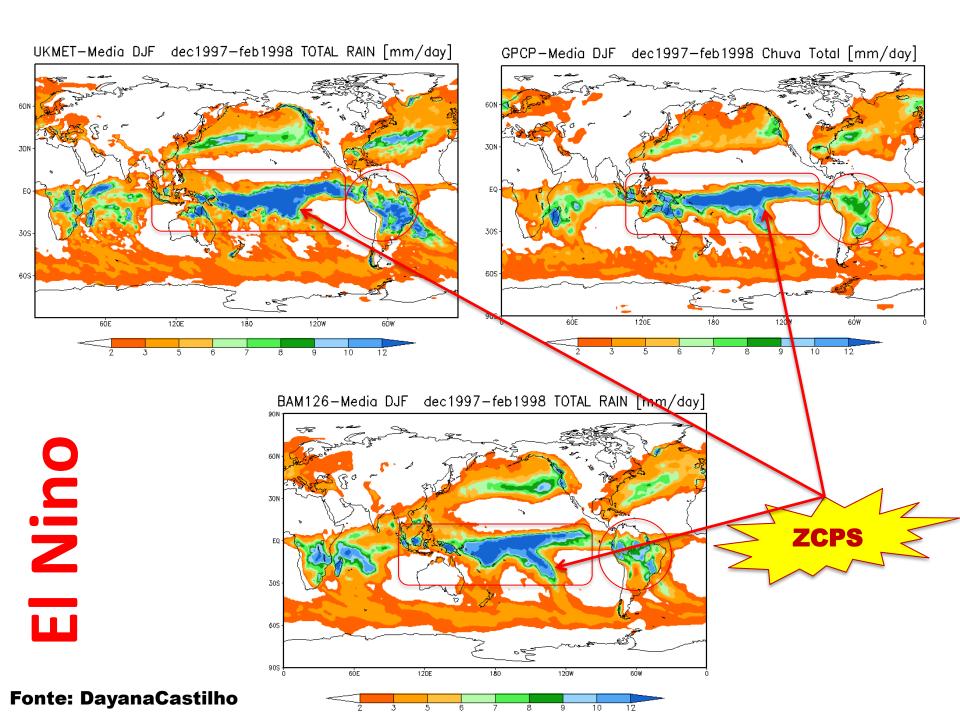
GPCP(yrs 1997-2007)



Exp2-GPCP









Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Fim