



Modelagem Numérica da Atmosfera

Modelagem Numérica da Atmosfera

Dr. Paulo Yoshio Kubota

Esquema de Camada Limite Planetária

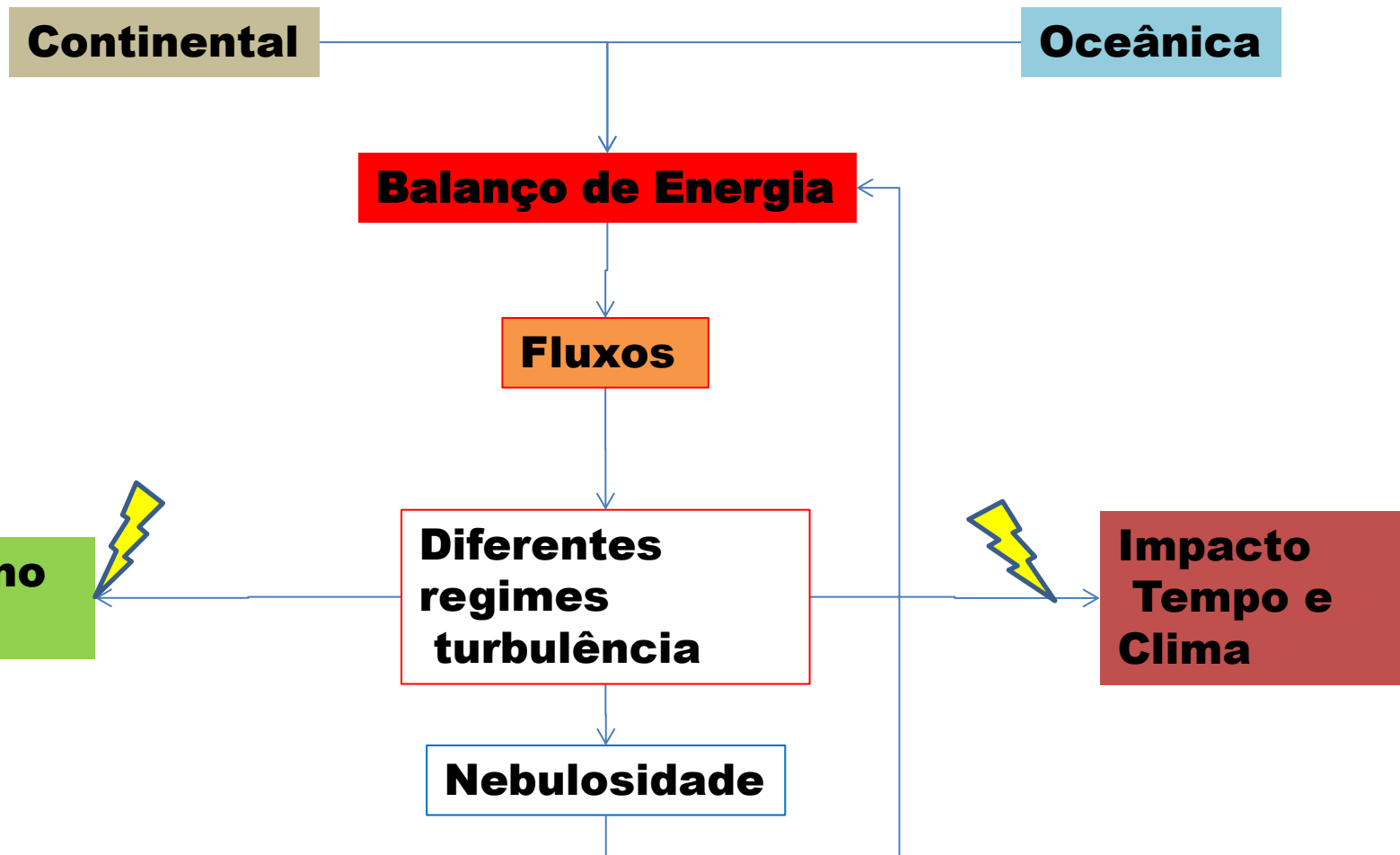
INPE, São Jose dos Campos



Modelagem Numérica da Atmosfera

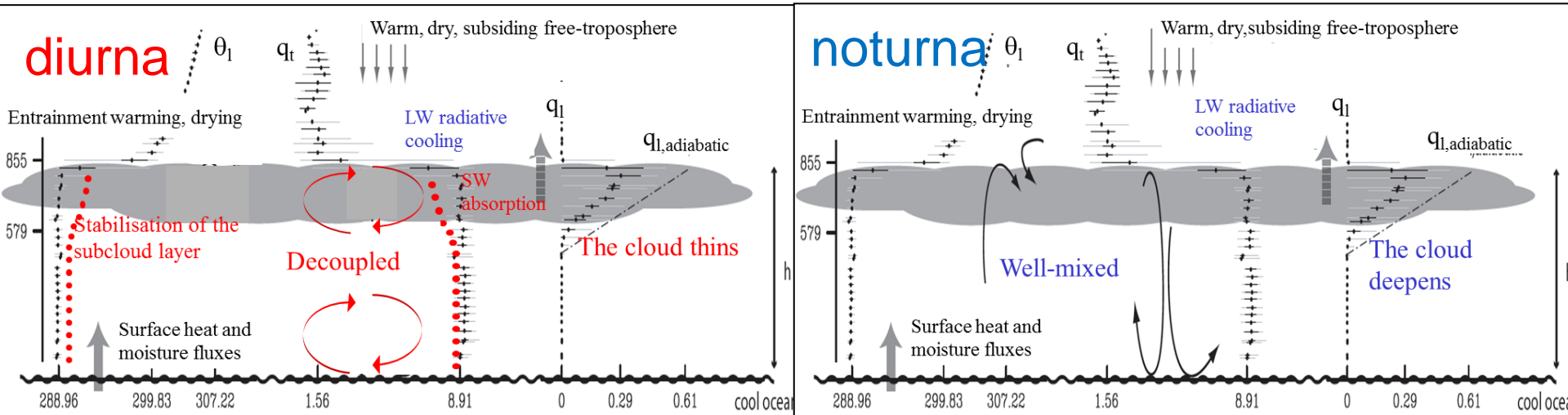
Conceito Básico de um modelo de camada limite Planetária

Conceito Básico de um modelo PBL

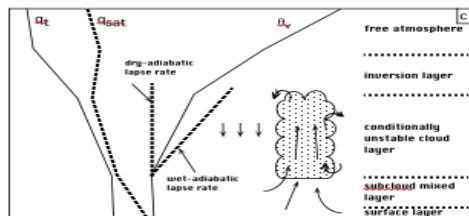
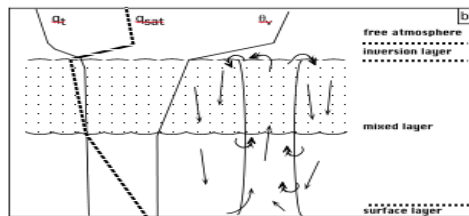


Processos de aquecimento diabáticos internos

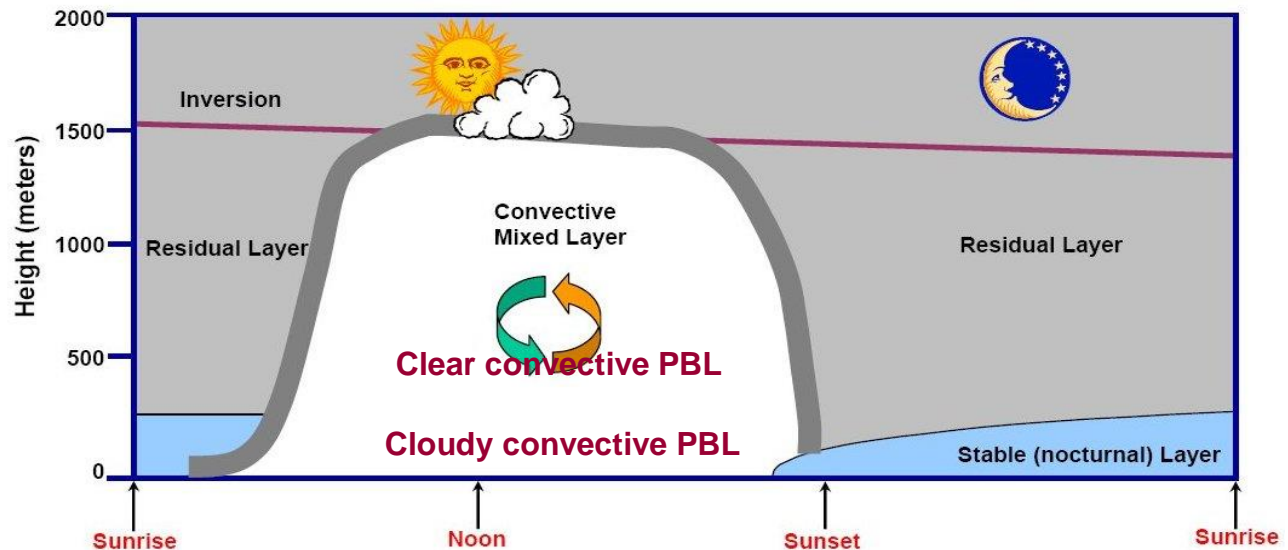
Variação Diária da PBL



Estratocumulos PBL



Cumulos PBL





Introdução

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

Lei dos gases

$$\bar{p} = \bar{\rho} R_d \bar{T}_v$$

$$\bar{T}_v = T(1 + 0.61q_v - q_l)$$

Necessita ser parameterizado !

Temperatura virtual

2nd ordem

Conservação de momentum

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j}$$

Advecção media

gravidade

Coriolis

Grad. Pressão

Viscous stress

Transporte Turbulento

Eq. continuidade

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

Conservação de calor

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho} c_p} \frac{\partial \bar{F}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}'_j \bar{\theta}'}{\partial x_j} - \frac{L_v E}{\bar{\rho} c_p}$$

Advecção media

Radiação

Transporte Turbulento

Liberação Calor Latente

Conservação de agua total

$$\frac{\partial \bar{q}_t}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}_t}{\partial x_j} = \frac{S_{q_t}}{\bar{\rho}} - \frac{\partial \bar{u}'_j \bar{q}'_t}{\partial x_j}$$

Advecção media

Precipitação

Transporte Turbulento



PBL: Equações para a energia cinetica turbulenta

Conceito Básico de um modelo PBL

TKE: medida da intensidade da mistura turbulenta

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

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} = \underbrace{\frac{g}{\theta_0} \overline{w' \theta_v'}}_{\text{produção flutuabilidade}} - \underbrace{\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}}_{\text{cisalhamento mecânico}} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u_j' e}}{\partial x_j}}_{\text{transporte turbulento}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i' p'}}{\partial x_i}}_{\text{transporte pressão}} - \underbrace{\varepsilon}_{\text{dissipação}}$$

$$\theta_v = \theta (1 + 0.61 q_v - q_l) \quad \text{virtual potential temperature}$$

$$\underline{\theta_v' < 0, w' < 0}$$

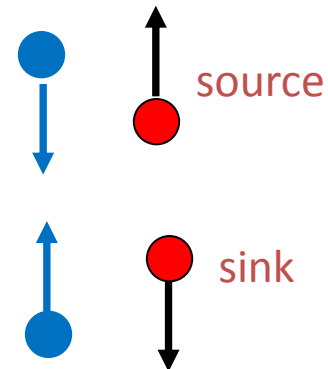
$$\underline{\theta_v' > 0, w' > 0}$$

$$w' \theta_v' > 0$$

$$\underline{\theta_v' < 0, w' > 0}$$

$$\underline{\theta_v' > 0, w' < 0}$$

$$w' \theta_v' < 0$$





Introdução

Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

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



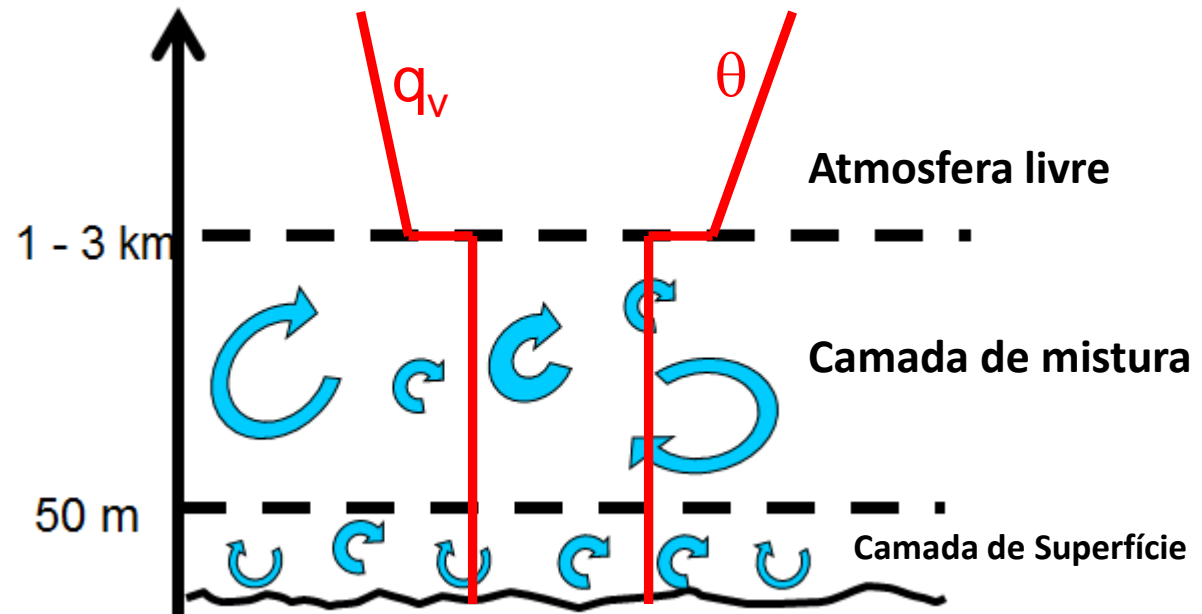
PBL: A camada em que o fluxo é turbulento

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.

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





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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3}g + f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu \partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \overline{u'_i u'_i}}{\partial x_i}$$

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

Teoria do transporte gradiente ou teoria K

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



Introdução

Qual a importância numérica da PBL nos MCGAs?

**Como Parametrizar os Fluxos
Turbulentos na camada limite
superficial**



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

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

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

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 :

$$\varphi_1 - \varphi_s = \int_{z_{0\varphi}}^{z_1} \frac{F_{0\varphi}}{\rho K(z)} dz$$

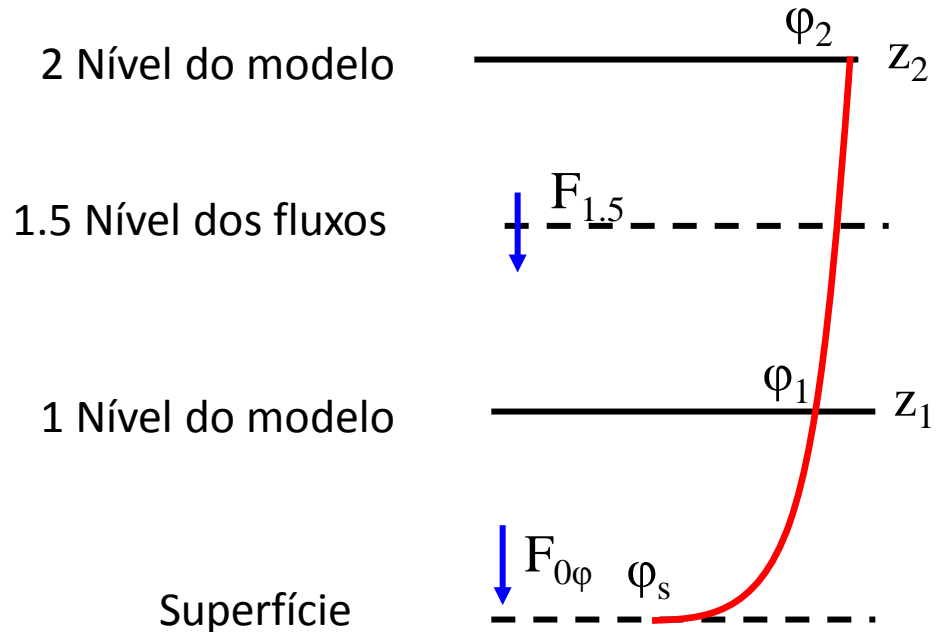
Camada
de fluxo
constante:

$$\varphi_1 - \varphi_s \approx \frac{F_{0\varphi}}{\rho} \int_{z_{0\varphi}}^{z_1} \frac{1}{K(z)} dz$$

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

$$\varphi_1 - \varphi_s \approx \frac{F_{0\varphi}}{\rho \kappa u_*} \int_{z_{0\varphi}}^{z_1} \frac{dz}{z} \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_s = \frac{F_{0\varphi}}{\rho \kappa u_*} \ln \left(\frac{z_1}{z_{0\varphi}} \right)$$

u, v, T, q



κ : Von Karman constant (0.4)
 u_* : Friction velocity
 ρ : Density



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

Coeficientes de difusão de acordo com a similaridade MO

Conceito Básico de um modelo PBL

$$K_M = \frac{l^2}{\phi_m^2} \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \quad K_H = \frac{l^2}{\phi_m \phi_h} \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet$$

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

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

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

$$R_i = \frac{g}{\theta_v} \frac{\frac{\partial \theta_v}{\partial z}}{\left| \frac{\partial U}{\partial z} \right|^2} = \frac{g}{\theta_v} \frac{z \theta_* \phi_h}{u_*^2 \phi_m^2} = \frac{z}{\kappa L} \frac{\phi_h}{\phi_m^2}$$

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

Resolver para $\frac{z}{L}$



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

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

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

Coeficientes de difusão de acordo com a similaridade MO

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

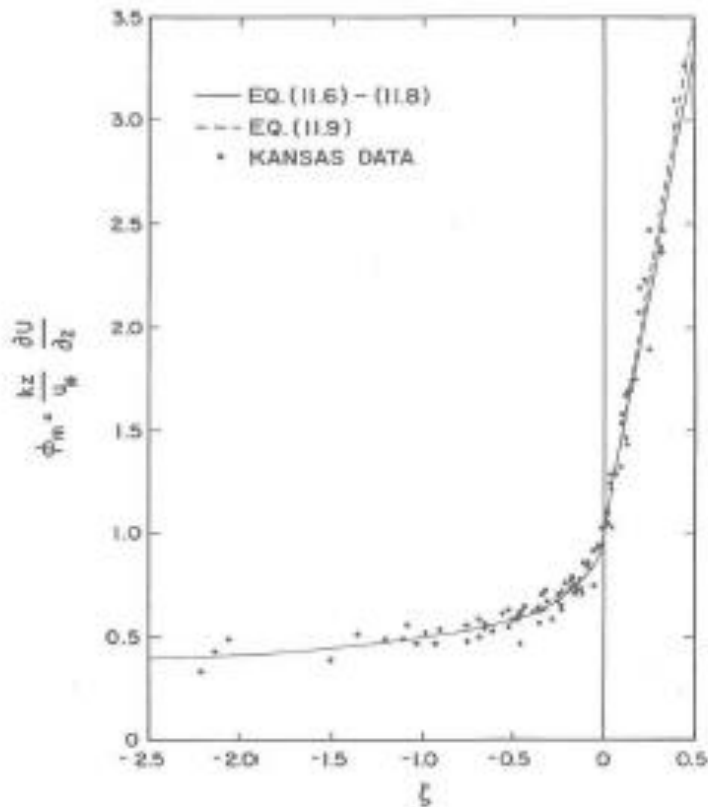


Figure 11.2 Dimensionless wind shear as a function of the M-O stability parameter. [Kansas data from Izumi (1971).]

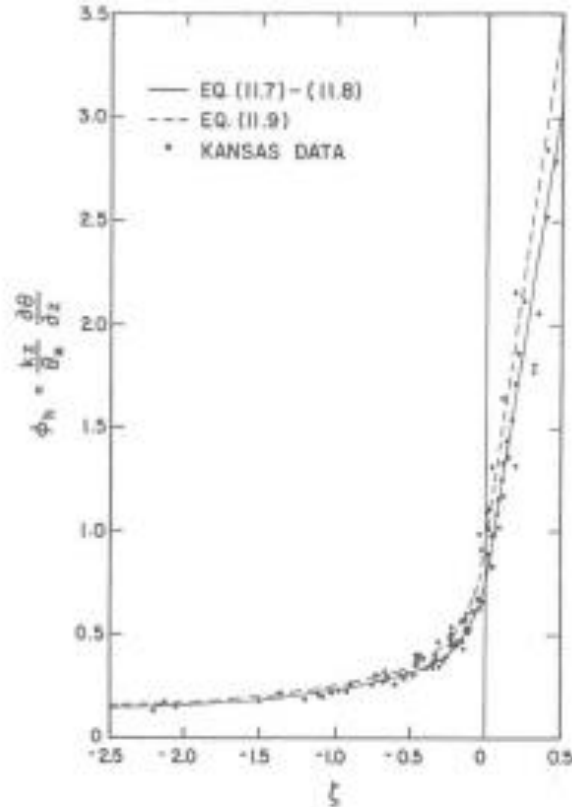


Figure 11.3 Dimensionless potential temperature gradient as a function of the M-O stability parameter. [Kansas data from Izumi (1971).]



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 $\sim kz$ ou l
Onde $\lambda \propto h$

Camada de Superfície – Monin Obukhov

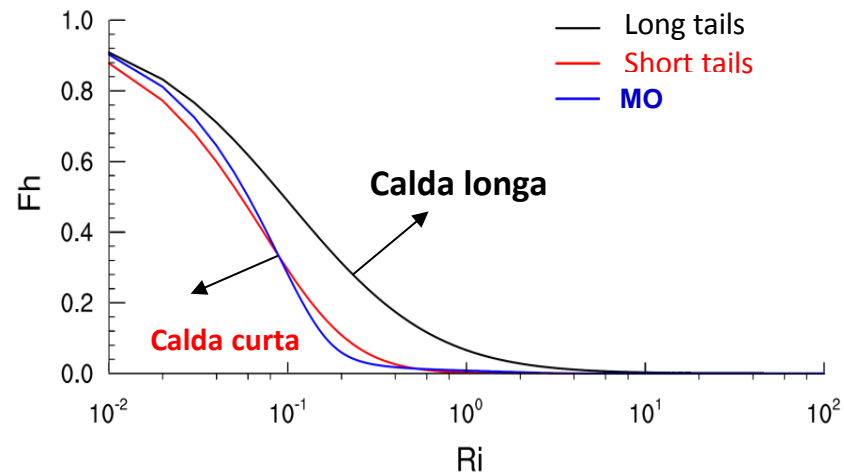
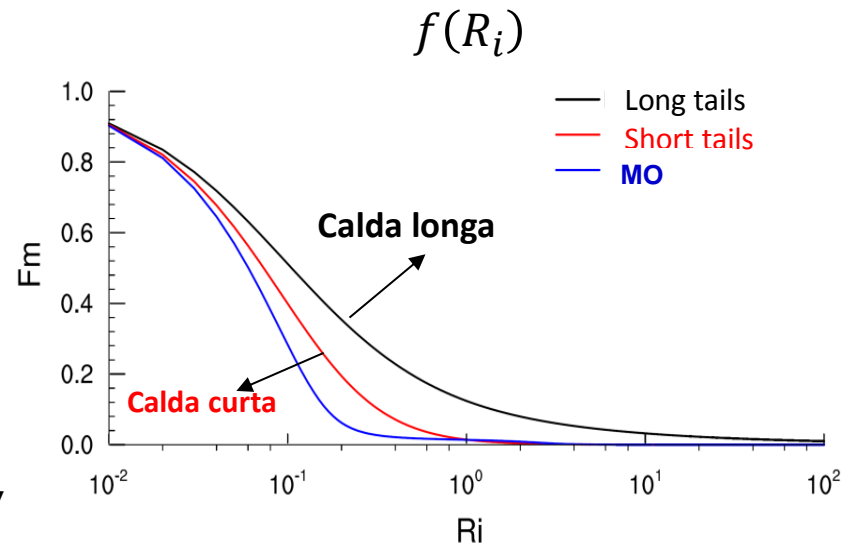
Acima: $f = \alpha^* f_{LT} + (1 - \alpha) * f_{ST}$

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

$$\lambda = 150 \text{ m}$$

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 $w'\varphi'$

Impacto da redução da difusão em condições estáveis

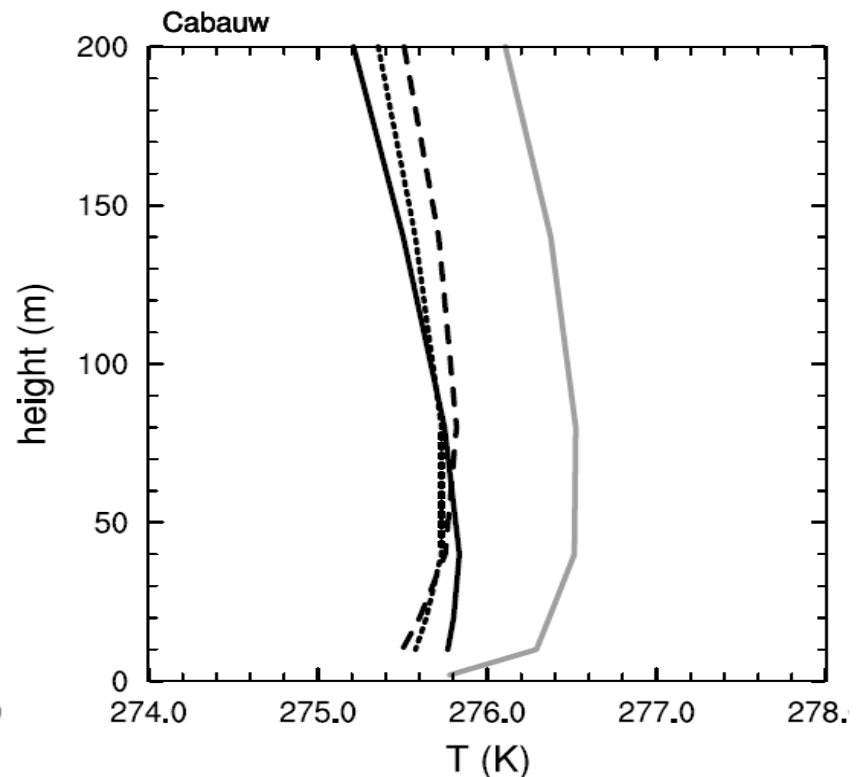
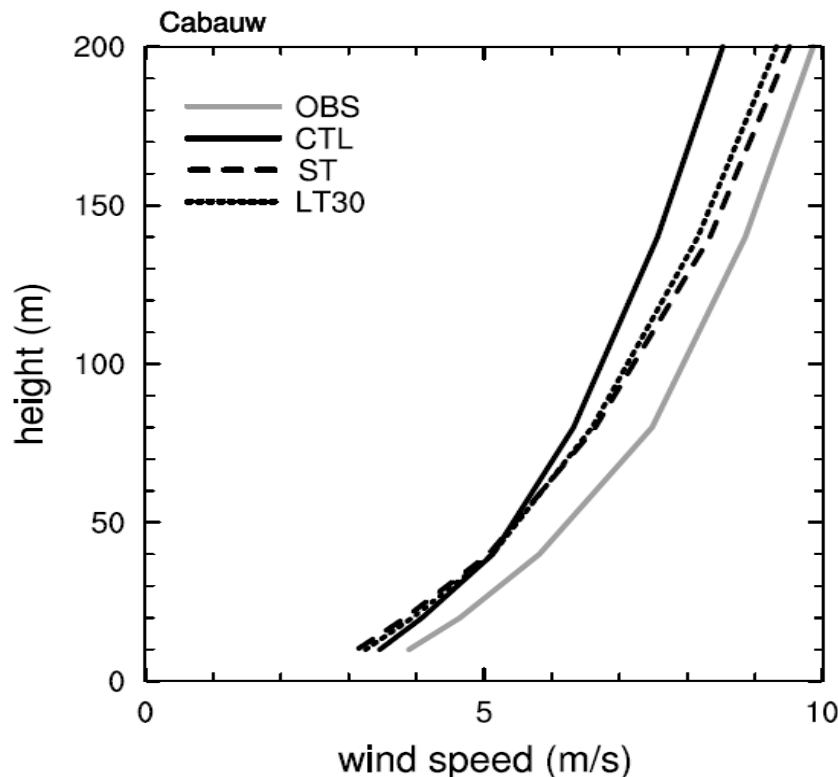
Conceito Básico de um modelo PBL

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

ST : calda longa \rightarrow calda curta

LT30 : $\lambda = 150 \text{ m} \rightarrow \lambda = 30 \text{ m}$

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



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



Introdução

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

$$K_C = kw_i z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2$$

Hostslag e Boville, 1993

$$K_M = lqS_M$$

$$K_H = lqS_H$$

Mellor e Yamada -2.0, 1982

$$K_h = \begin{cases} q\ell S_H(G_M, G_H) & \text{para decaimento da turbulência} \\ \frac{q^2}{q_*} \ell S_H(G_{M_*}, G_{H_*}) & \text{para crescimento da turbulência} \end{cases}$$

$$K_m = \begin{cases} q\ell S_M(G_M, G_H) & \text{para decaimento da turbulência} \\ \frac{q^2}{q_*} \ell S_M(G_{M_*}, G_{H_*}) & \text{para crescimento da turbulência} \end{cases}$$

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)

Hostslag e Boville, 1993

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

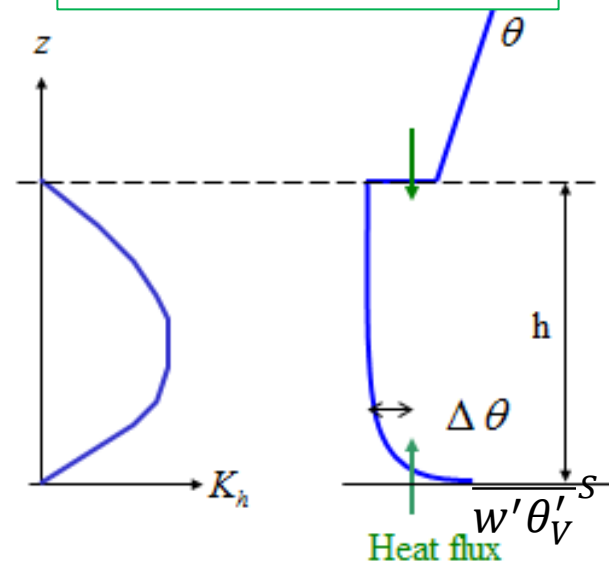
Perfil dos coeficientes de difusão:

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

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

$$\gamma_\theta = \frac{C \overline{\theta'w'}^S}{w_S h}$$

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



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

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

Tal que:

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



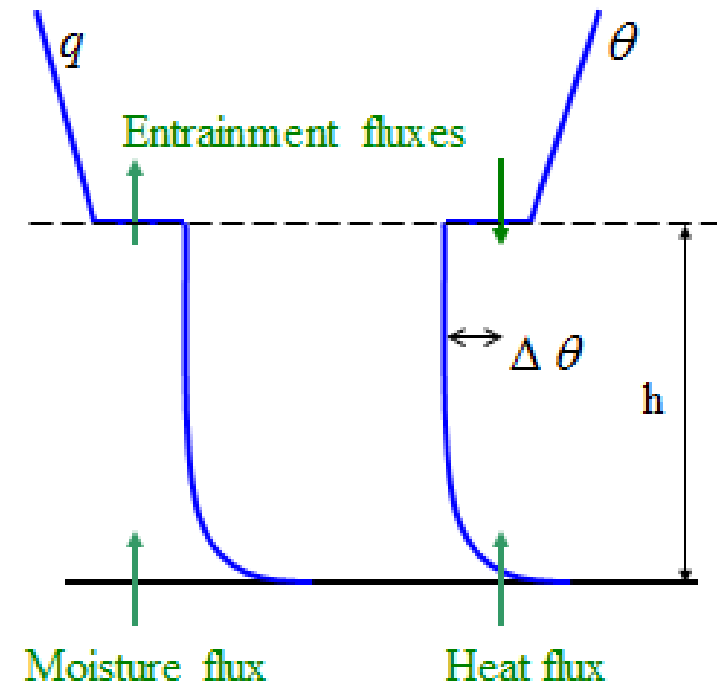
Parametrização de fluxos turbulentos na camada externa

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**

$$K_{hi} = \frac{(w'\theta'_v)_0}{\left(\frac{\partial\theta_v}{\partial x}\right)_i} C_E$$



	ECMWF	Troen/Mahrt
C_1	0.6	0.6
D	2.0	6.5
C_E	0.2	-



Parametrização de fluxos massa

ED/MF closure

K-diffusion versus Mass flux method

?



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

Time Line



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local

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

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} = \underbrace{\frac{g}{\theta_0} \overline{w' \theta_v'}}_{\text{produção flutuabilidade}} - \underbrace{\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{cisalhamento mecânico}} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u_j' e}}{\partial x_j}}_{\text{transporte turbulento}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i' p'}}{\partial x_i}}_{\text{transporte pressão}} - \underbrace{\varepsilon}_{\text{dissipação}}$$

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

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



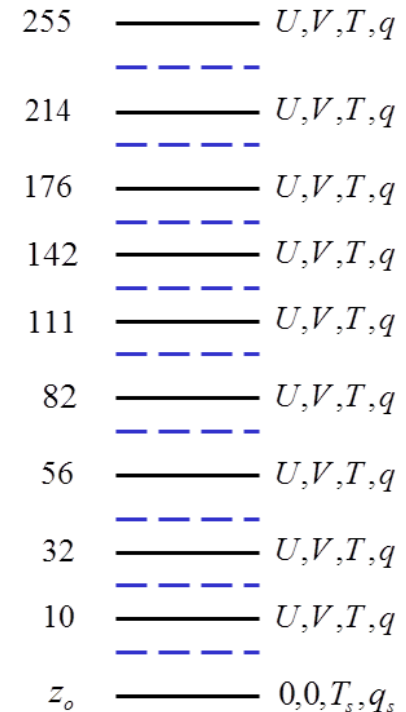
MY Camada Limite Fechamento 2.0

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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} &= - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = K_m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial^2 z} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = K_m \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial^2 z} \\ \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} &= - \frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \right) = K_q \frac{\partial^2 \bar{q}}{\partial^2 z} \\ \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= - \frac{\partial \overline{\theta'w'}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_\theta \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) = K_\theta \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial^2 z} \end{aligned}$$

137-level
model





MY Camada Limite Fechamento 2.0

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**.

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

$$\begin{aligned} \overline{u'w'} &= -K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, & \overline{v'w'} &= -K_M \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ \overline{\theta'w'} &= -K_H \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}, & \overline{q'w'} &= -K_H \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \end{aligned}$$

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

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).

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

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

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

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

por exemplo:

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

137-level
model

255	—————	U, V, T, q

214	—————	U, V, T, q

176	—————	U, V, T, q

142	—————	U, V, T, q

111	—————	U, V, T, q

82	—————	U, V, T, q

56	—————	U, V, T, q

32	—————	U, V, T, q

10	—————	U, V, T, q

z_o	—————	$0, 0, T_s, q_s$



MY Camada Limite Fechamento 2.0

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.



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

$$K_M = lqS_M \quad K_H = lqS_H$$

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

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

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

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

$$\begin{cases} a_1 = 0.92 \\ a_2 = 0.17 \\ b_1 = 16.6 \\ b_2 = 10.1 \end{cases} \quad \begin{cases} c_1 = 0.08 \\ vk0 = 0.4 \\ sfrac = 0.01 \\ r_2 = 10.1 \end{cases}$$

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

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

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

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\alpha} \\ r_2 = \frac{\beta}{\gamma} \\ r_3 = 2 * \frac{(2 * \alpha * \delta - \gamma * \beta)}{(\gamma * \gamma)} \\ r_4 = r_2 * r_2 \end{cases}$$

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

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

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

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

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

$$s_1 = 3 * a_2 * gam1$$

$$s_2 = 3 * a_2 * (gam1 + gam2)$$



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

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

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

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

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

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

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

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

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

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

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

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

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Fechamento local MY 2.0

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

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

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

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

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

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

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

$$K_H = lqS_H$$

$$K_M = lqS_M$$



MY Camada Limite Fechamento 2.0

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:.

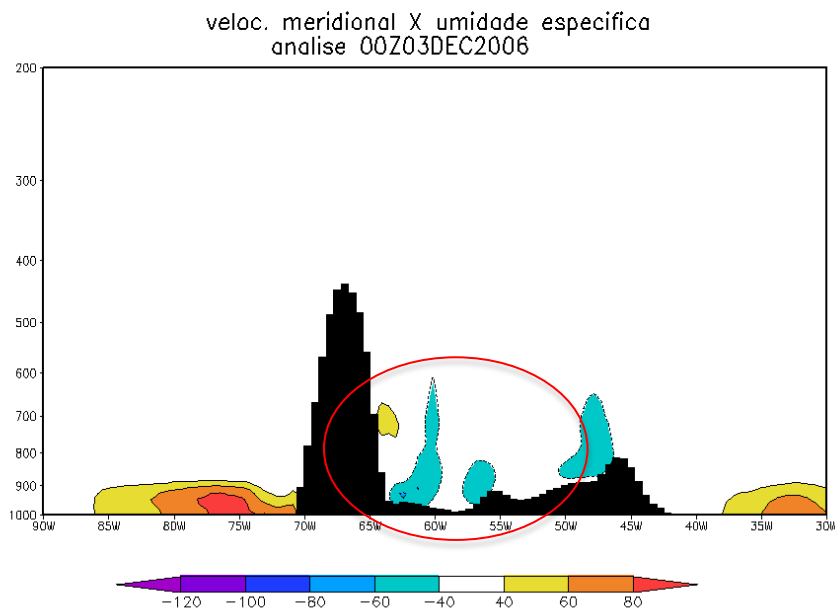
$$1 \leq (K_M = lqS_M) \leq 300$$

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

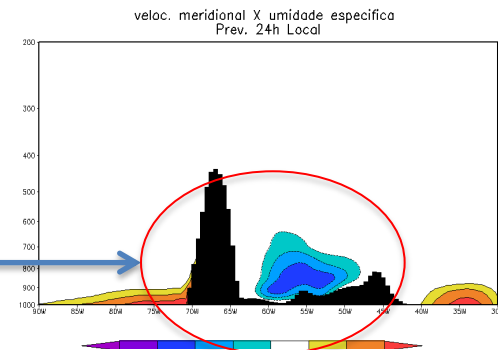


MY Camada Limite Fechamento 2.0

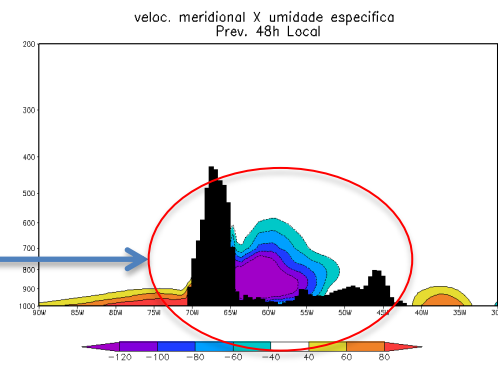
Fechamento local MY 2.0



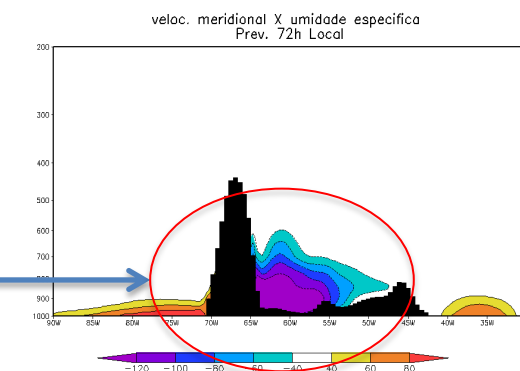
Simulação 1.8x1.8 graus
Superestima o transporte de umidade



24 hrs



48 hrs



72 hrs



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Acoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

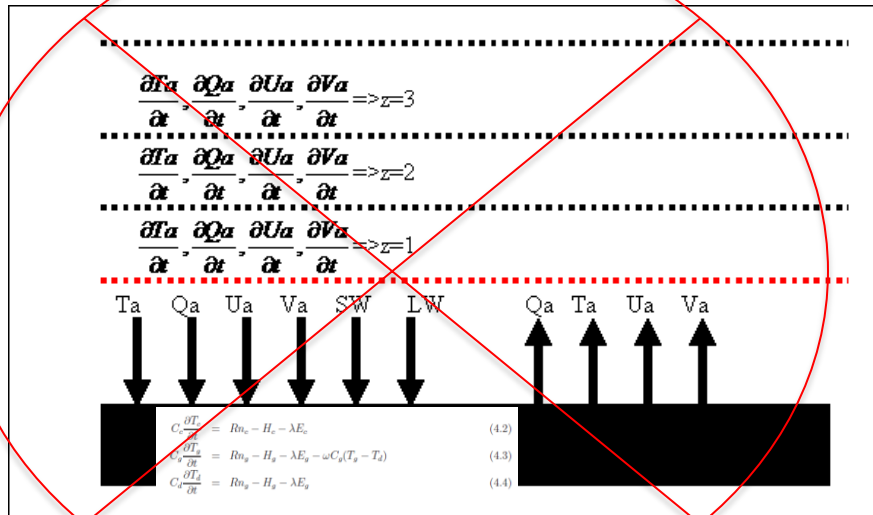
(2) A equação da energia cinética turbulenta (TKE) é fechada assumindo **que a produção e a dissipação do TKE sejam instantaneamente equilibradas em cada ponto.**

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 superfície.

Acoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

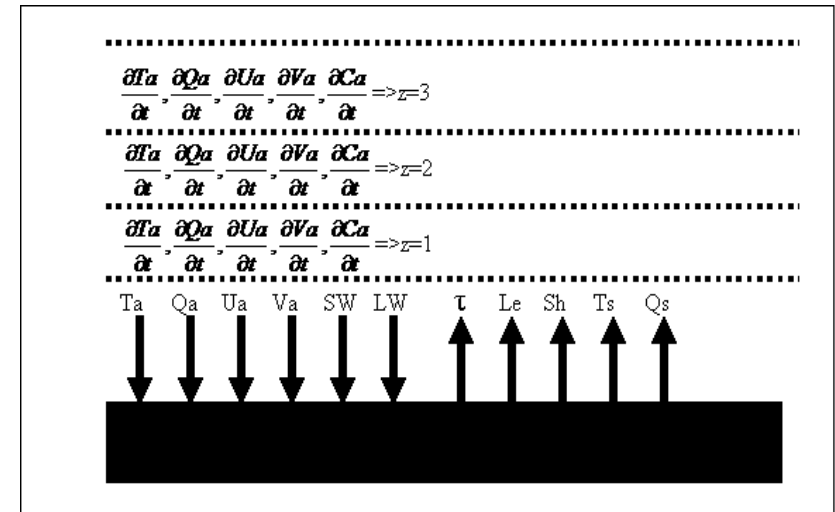
As equações prognósticas para temperaturas e umidade atmosféricas são então **acopladas às equações SSiB** para a superfície do solo e a copa.

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



Mellor e Yamada 2.0

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



Hostlag e Boville

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

**Desacoplamento das equações
prognóstica da PBL e a Superfície**

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

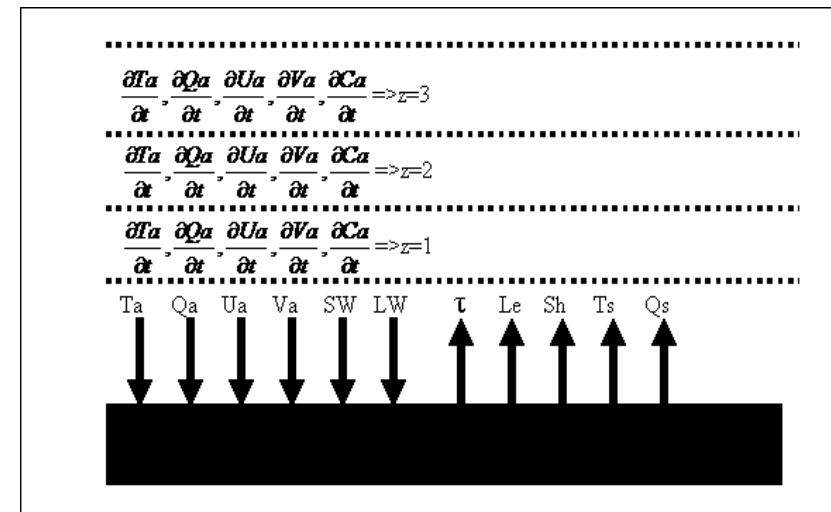
Time Line



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 1ª camada



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

Pontos Estável e neutros

define a difusividade

termo contra gradiente é zero para o caso estável

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

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

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

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

$$\beta_s = 5$$

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



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

Instável para camada de superfície

Termo contra-gradiente é zero

$$\beta_m = 15$$

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



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

Time Line

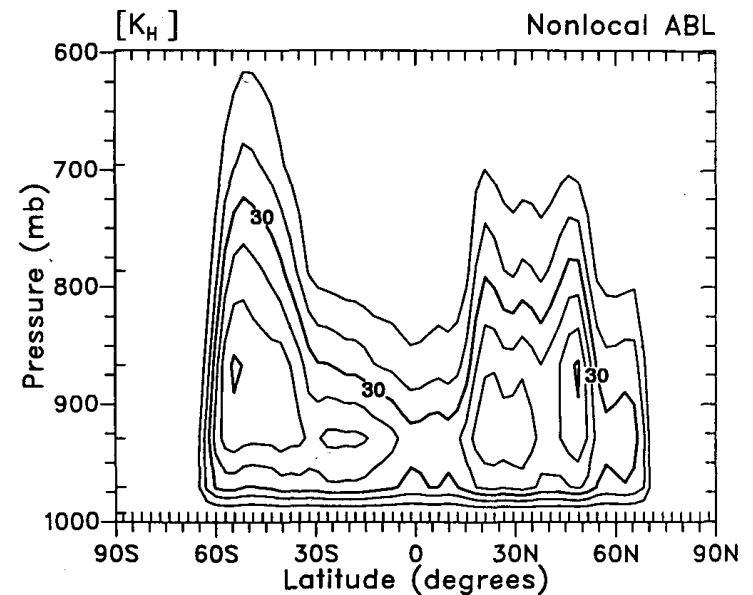
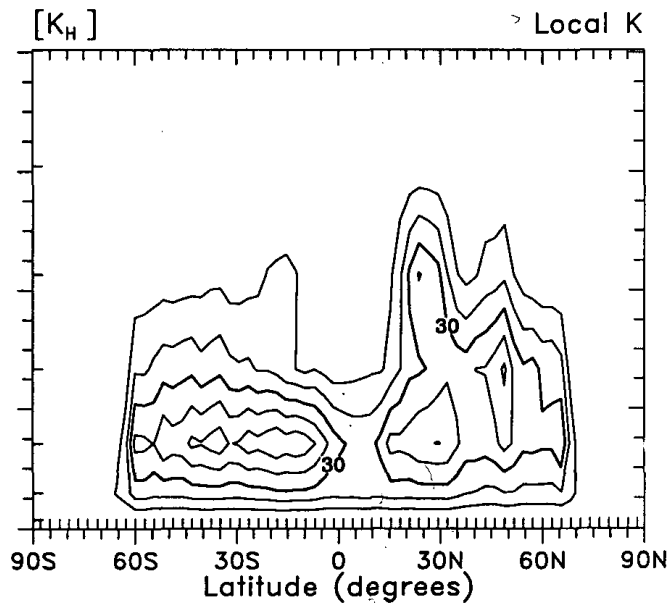


Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

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

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





Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Metodologia utilizada no esquema de Hostlag e Boville

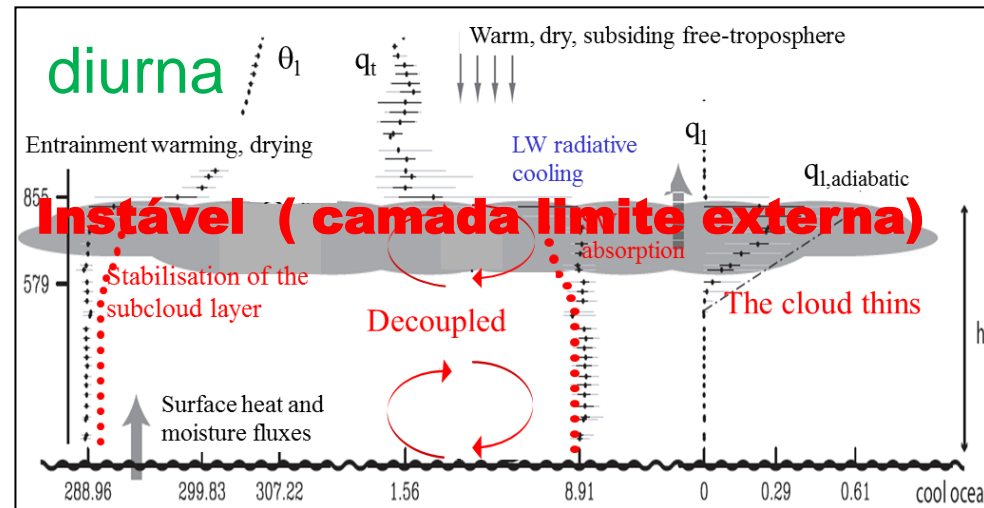
Instável (camada limite externa)

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

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





Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Metodologia utilizada no esquema de Hostslag e Boville, 1993

Instável (camada limite externa)

Termo contra-gradiente não é zero

$$\gamma_c = d \frac{w C_0}{w_* * h} = 7.2 * \frac{w_*}{w_m} * \frac{1}{h * w_m}$$

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

Escala de velocidade turbulenta para momentum

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

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



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

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

1) Pode ser acoplada a diferentes esquemas de superfície



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

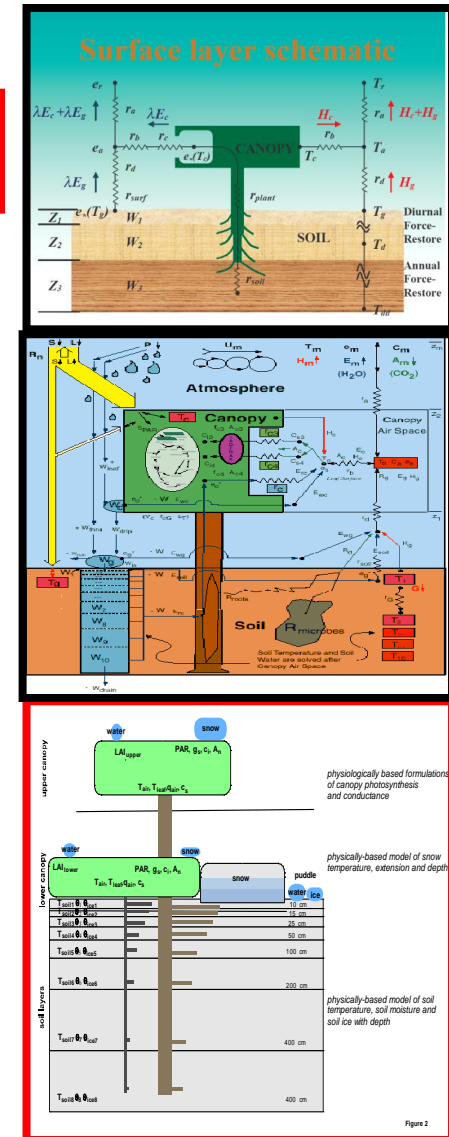
MODELO DO CPTEC:

PBL-HB

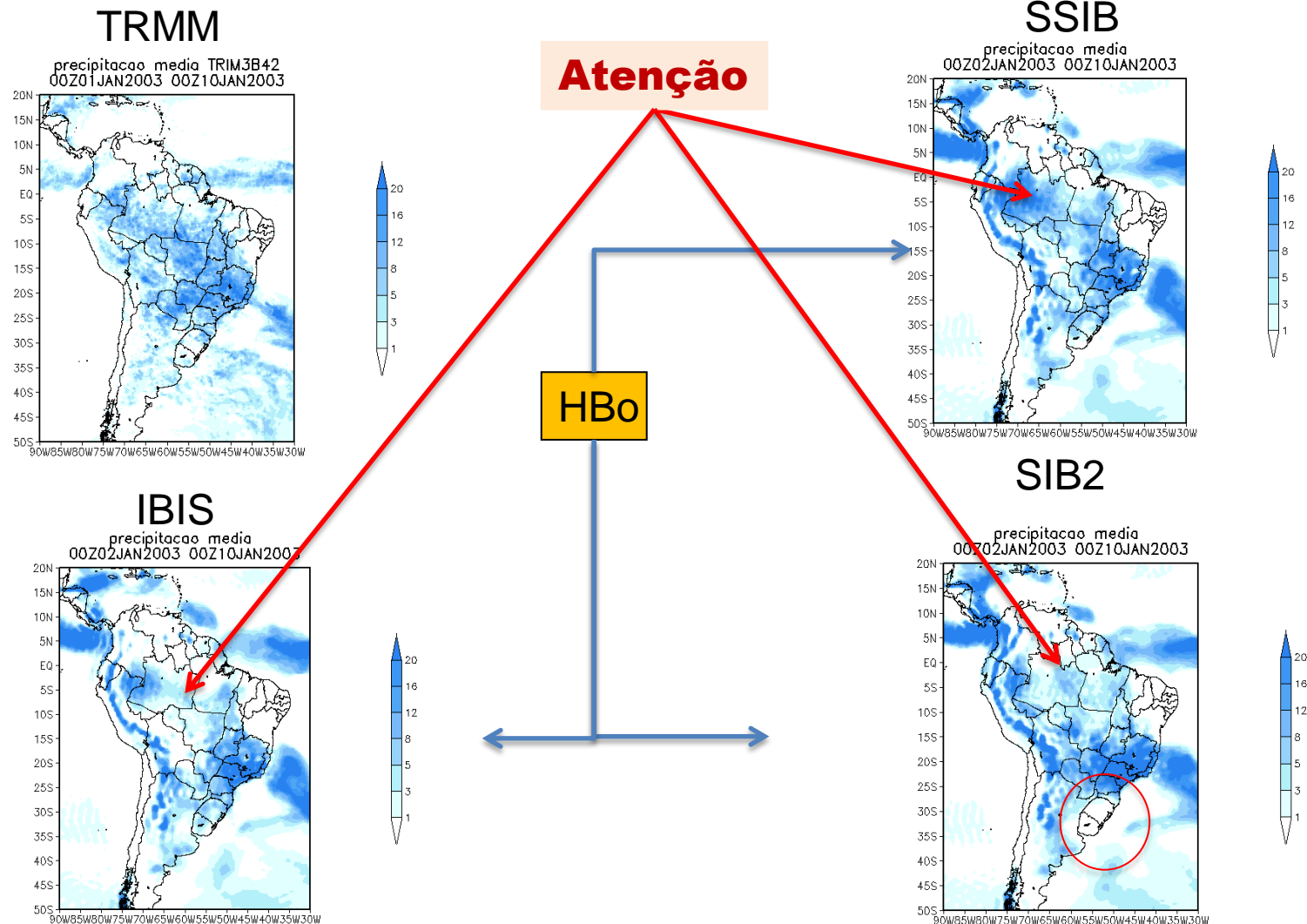
SSiB

SiB

IBIS



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície





Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

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

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



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Opções de parametrização do coeficiente de difusão

$$K_C = kw_i z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2$$

Hostslag e Boville, 1993

$$K_M = lqS_M$$

$$K_H = lqS_H$$

Mellor e Yamada -2.0, 1982

$$K_h = \begin{cases} q\ell S_H(G_M, G_H) & \text{para decaimento da turbulencia} \\ \frac{q^2}{q_*} \ell S_H(G_{M_*}, G_{H_*}) & \text{para crescimento da turbulencia} \end{cases}$$

$$K_m = \begin{cases} q\ell S_M(G_M, G_H) & \text{para decaimento da turbulencia} \\ \frac{q^2}{q_*} \ell S_M(G_{M_*}, G_{H_*}) & \text{para crescimento da turbulencia} \end{cases}$$

Mellor e Yamada -2.5, 1982

Esquema de PBL Modificado

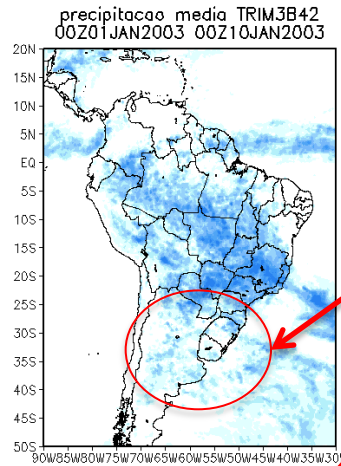
$$K_h = w_1 K_{h_{MY}} + w_2 K_{h_{TKE}} + w_3 K_{h_{HB}}$$

$$K_m = w_1 K_{m_{MY}} + w_2 K_{m_{TKE}} + w_3 K_{m_{HB}}$$

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

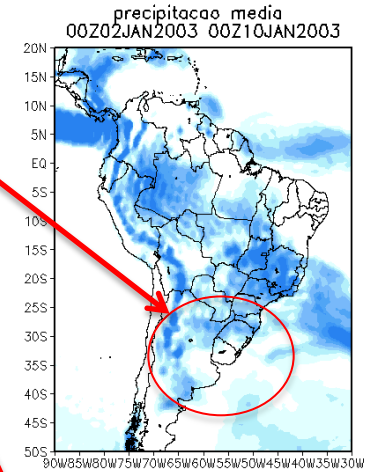
SSIB

TRMM

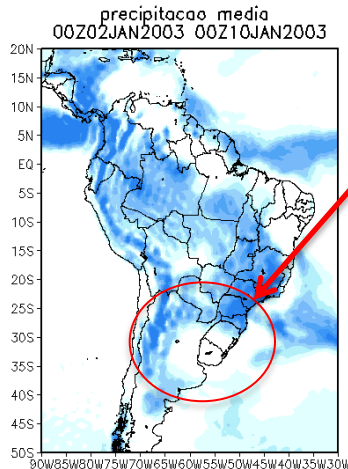


Transporte de
umidade

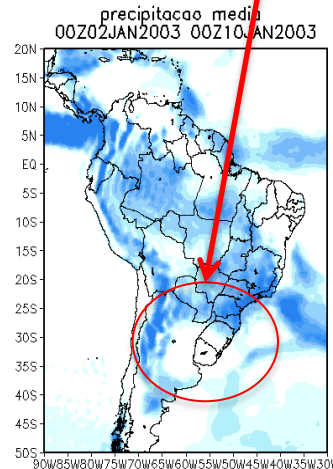
Ens



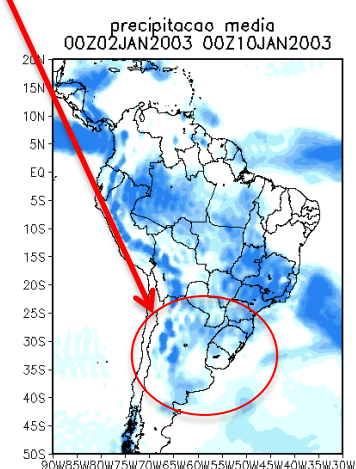
MY2.0



MY2.5



HBo

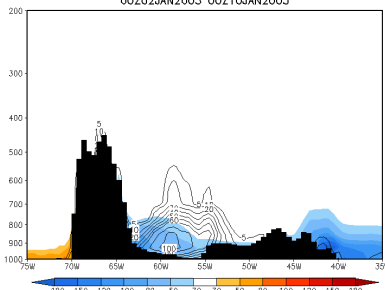


SSIB

UTC
00hrs

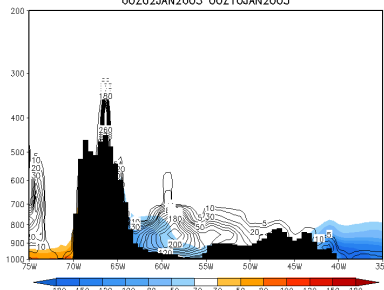
MY2.0

transp. umidade e difusao vertical media
00Z01JAN2003 00Z10JAN2003



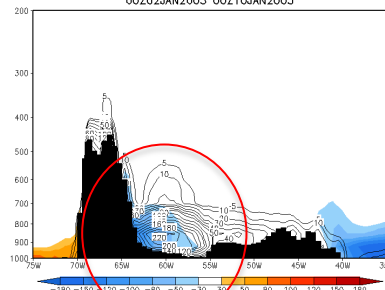
MY2.5

transp. umidade e difusao vertical media
00Z01JAN2003 00Z10JAN2003



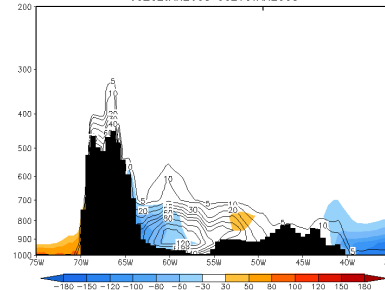
HBo

transp. umidade e difusao vertical media
00Z01JAN2003 00Z10JAN2003



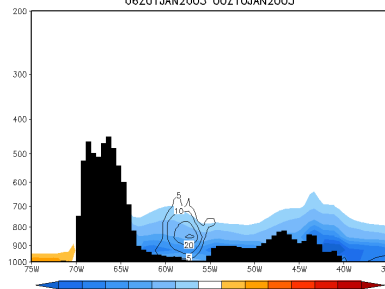
Ens

transp. umidade e difusao vertical media
00Z01JAN2003 00Z10JAN2003

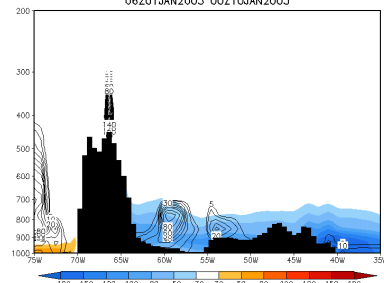


UTC
06hrs

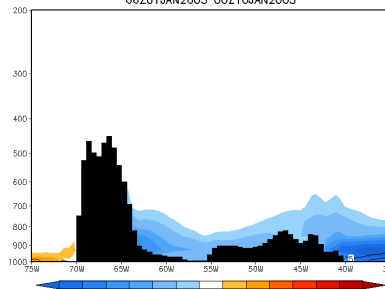
transp. umidade e difusao vertical media
06Z01JAN2003 00Z10JAN2003



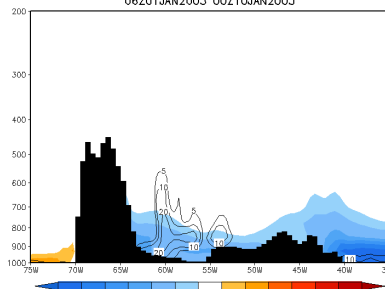
transp. umidade e difusao vertical media
06Z01JAN2003 00Z10JAN2003



transp. umidade e difusao vertical media
06Z01JAN2003 00Z10JAN2003

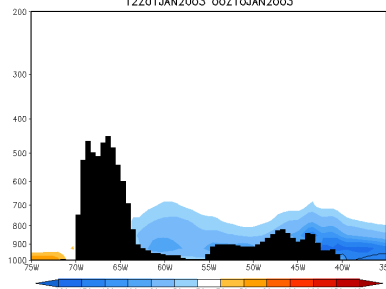


transp. umidade e difusao vertical media
06Z01JAN2003 00Z10JAN2003

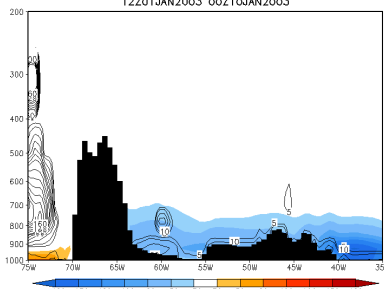


UTC
12hrs

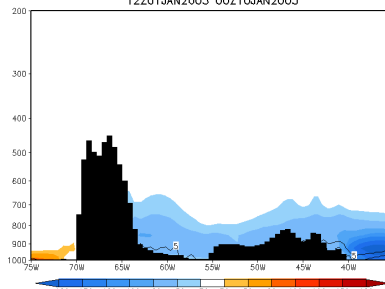
transp. umidade e difusao vertical media
12Z01JAN2003 00Z10JAN2003



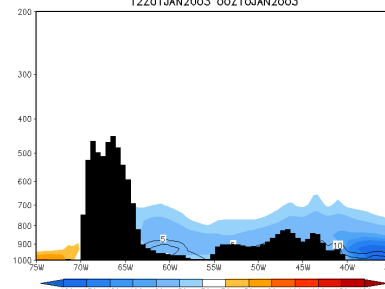
transp. umidade e difusao vertical media
12Z01JAN2003 00Z10JAN2003



transp. umidade e difusao vertical media
12Z01JAN2003 00Z10JAN2003

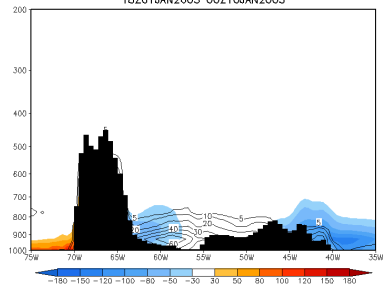


transp. umidade e difusao vertical media
12Z01JAN2003 00Z10JAN2003

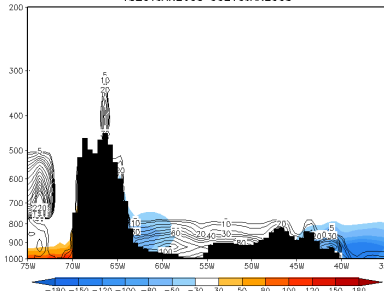


UTC
18hrs

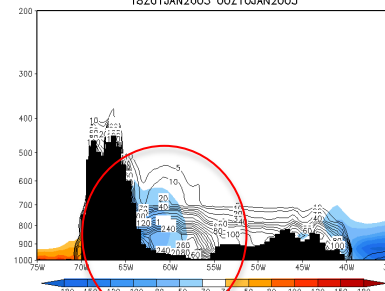
transp. umidade e difusao vertical media
18Z01JAN2003 00Z10JAN2003



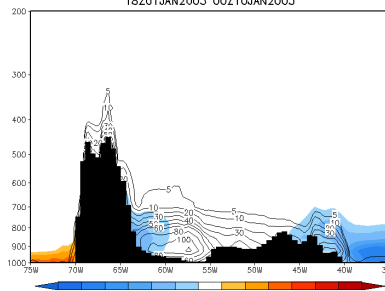
transp. umidade e difusao vertical media
18Z01JAN2003 00Z10JAN2003



transp. umidade e difusao vertical media
18Z01JAN2003 00Z10JAN2003



transp. umidade e difusao vertical media
18Z01JAN2003 00Z10JAN2003

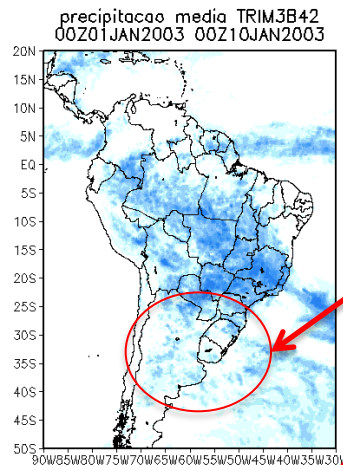


Ciclo Diurno

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

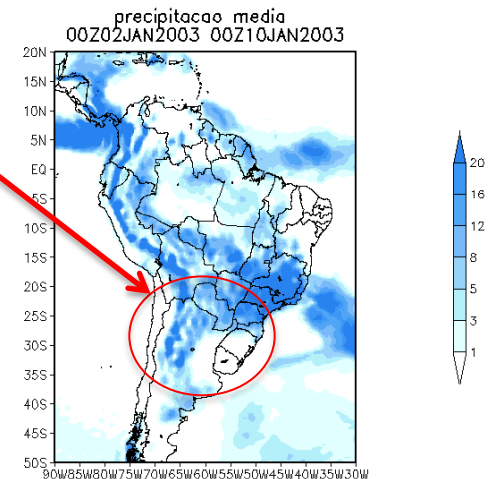
SIB2

TRMM

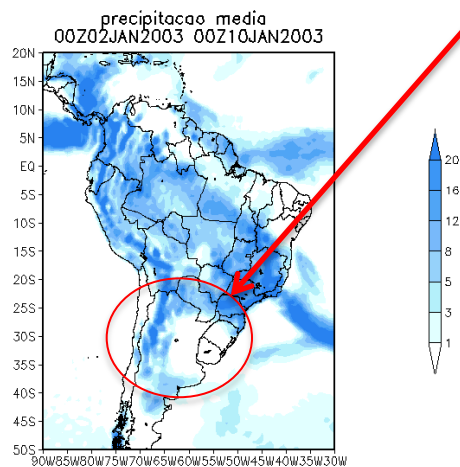


Transporte de
umidade

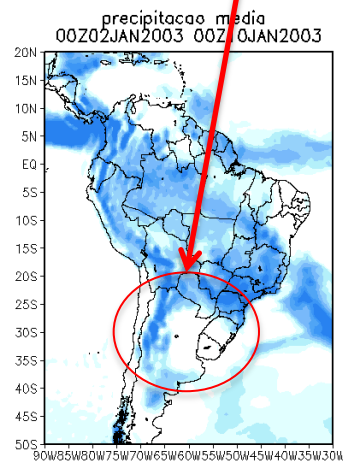
Ens



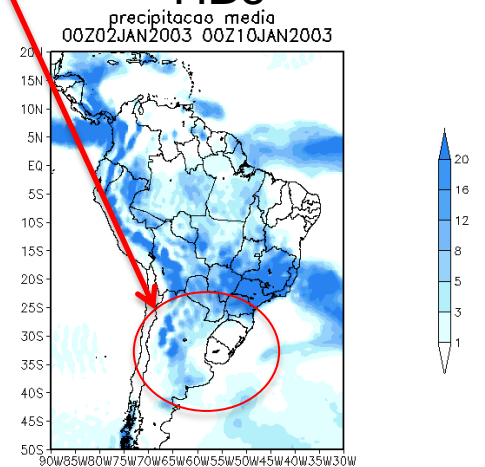
MY2.0



MY2.5



HBo



SIB2

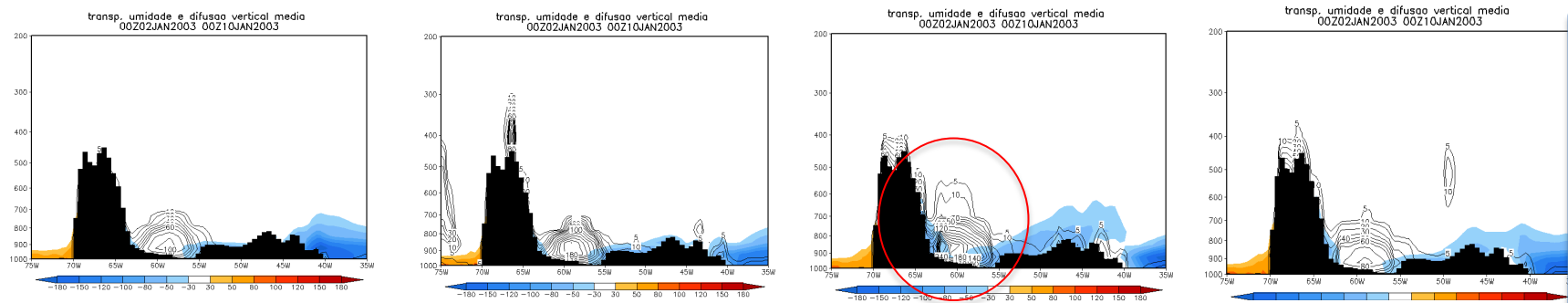
MY2.0

MY2.5

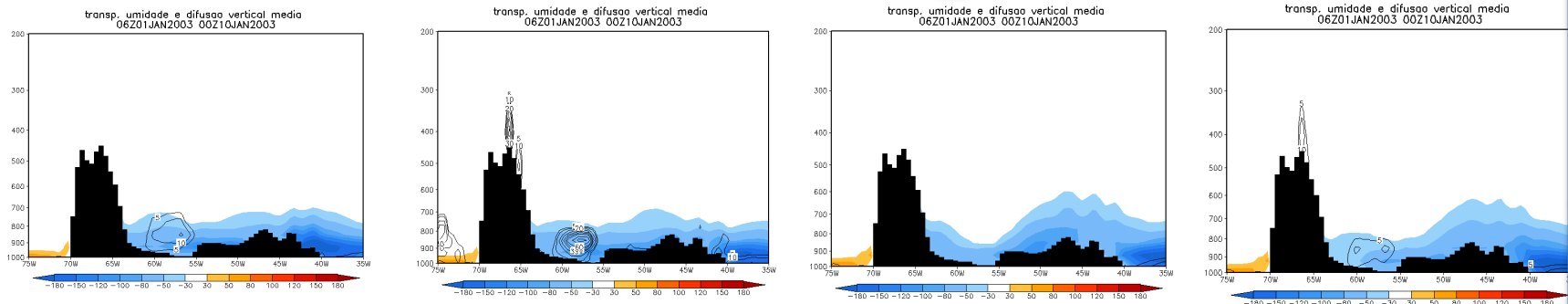
HBo

Ens

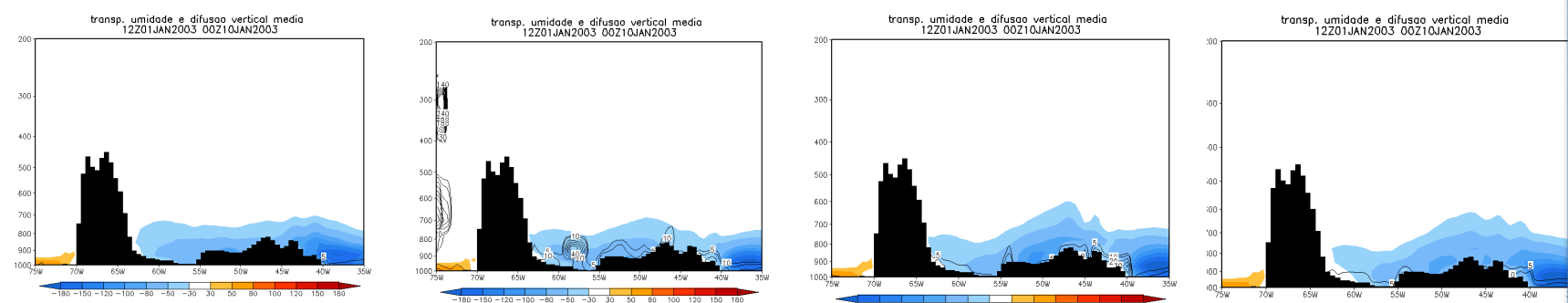
UTC
00hrs



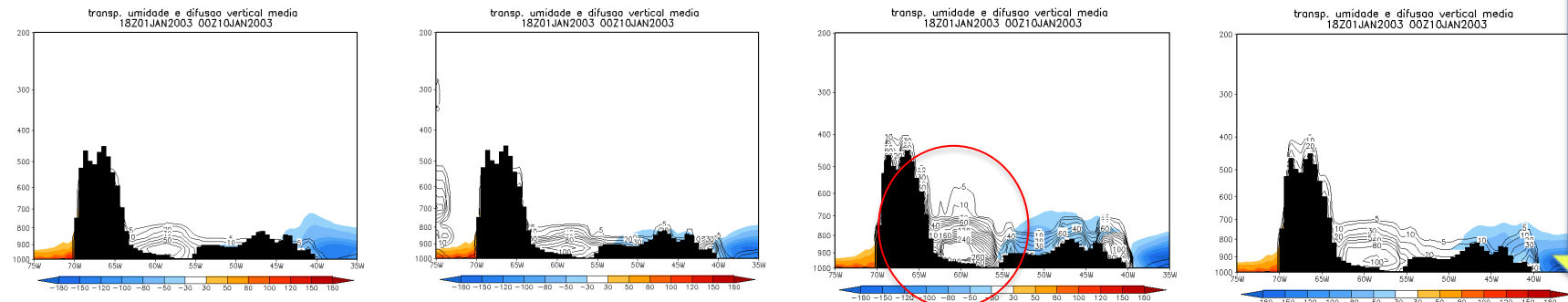
UTC
06hrs



UTC
12hrs



UTC
18hrs



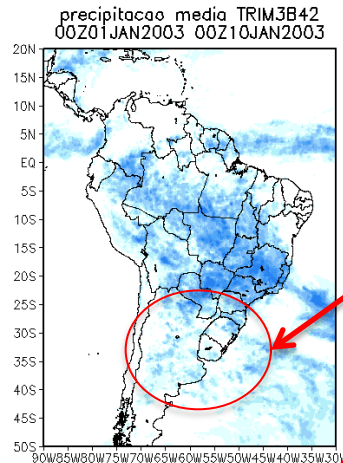
Ciclo Diurno



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

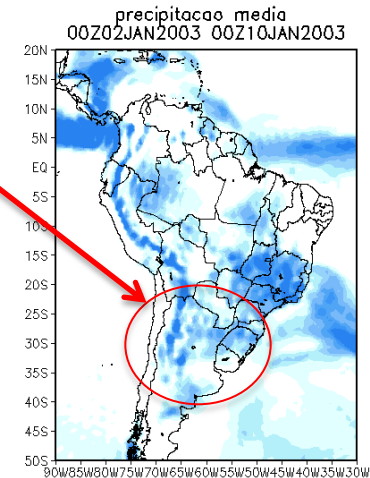
IBIS

TRMM

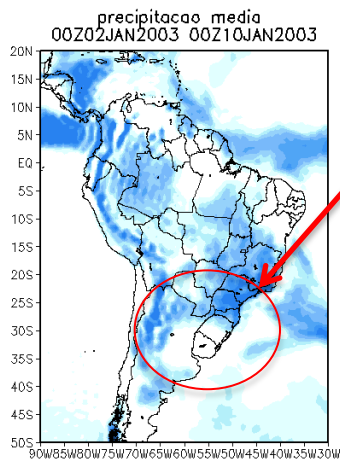


Transporte de
umidade

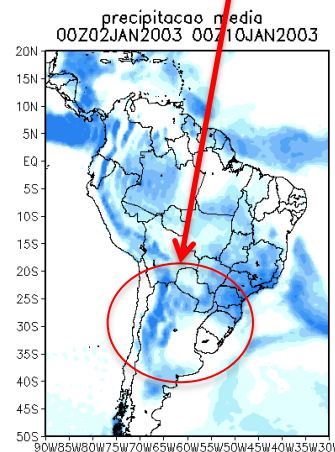
Ens



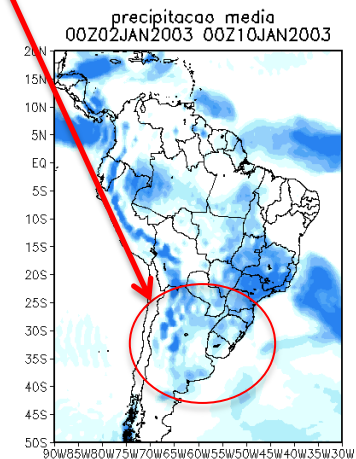
MY2.0



MY2.5



HBo

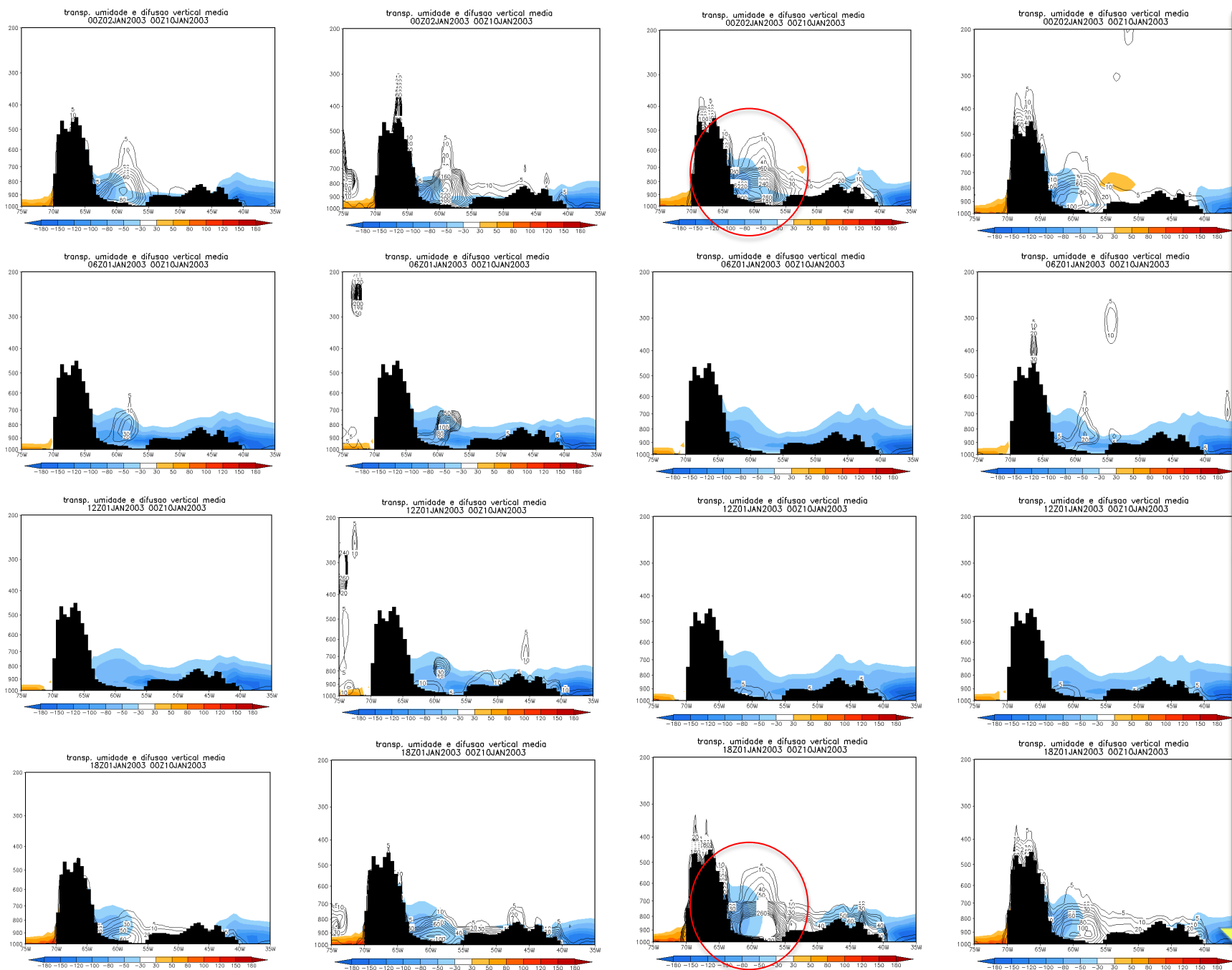


UTC
00hrs

UTC
06hrs

UTC
12hrs

UTC
18hrs



Ciclo Diurno



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

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

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

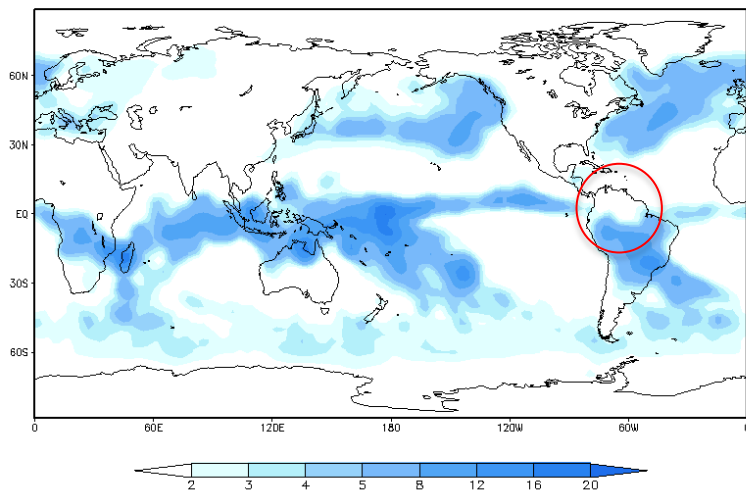
“ACOPLAMENTO” DO MCGA-CPTEC COM O IBIS “Precipitação”

$$K_h = w_1 K_{h_{MY}} + w_2 K_{h_{TKE}} + w_3 K_{h_{HB}}$$

$$K_m = w_1 K_{m_{MY}} + w_2 K_{m_{TKE}} + w_3 K_{m_{HB}}$$

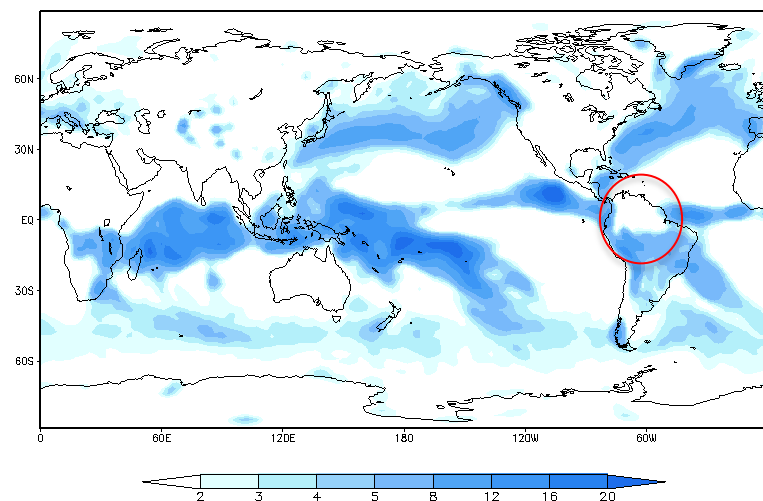
Observado GPCP

00Z01JAN2003 GPCP



Simulação com o mesmo peso para cada coeficiente de difusão

00Z01JAN2003 EN-IBIS



Norte da AMAZ.:sul

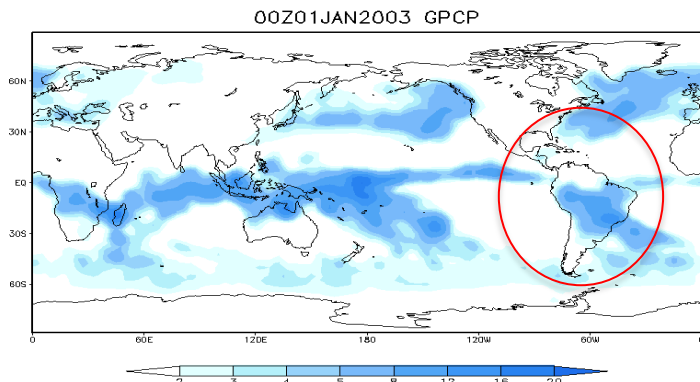
NE:super.



Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

“ACOPLAMENTO” DO MCGA-CPTEC COM O IBIS
“Precipitação”

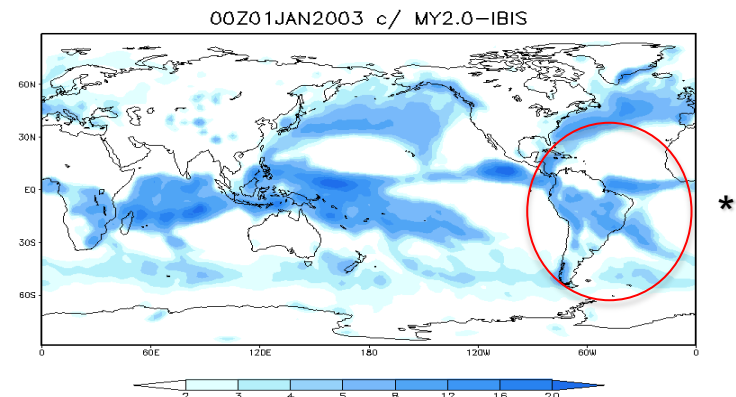
Observado GPCP



Mellor Yamada 2.0

$$K_m = K_{m_{MY}}$$

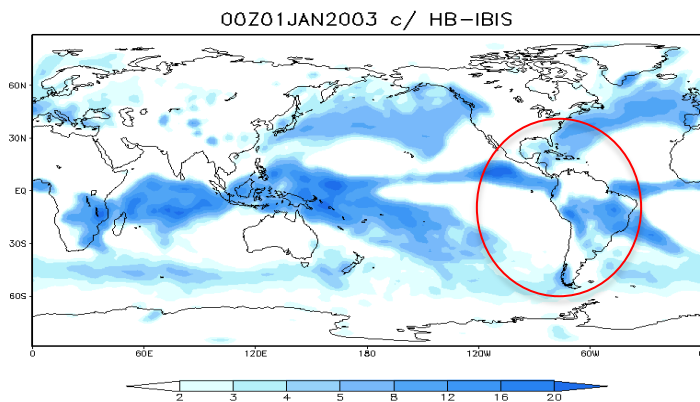
$$K_h = K_{h_{MY}}$$



Hostlag Boville

$$K_h = K_{h_{HB}}$$

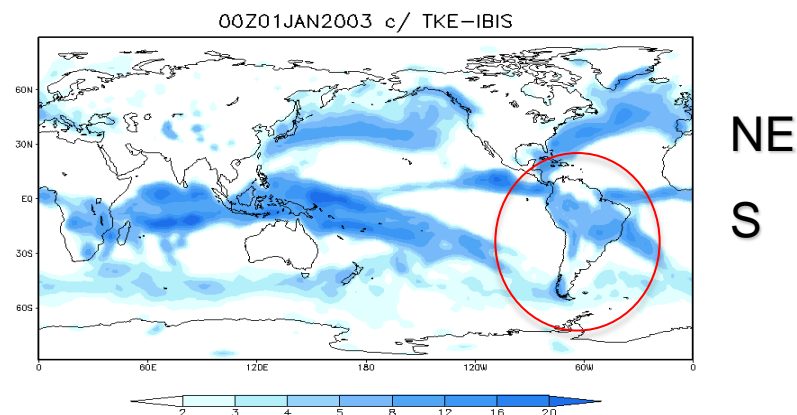
$$K_m = K_{m_{HB}}$$



Mellor Yamada 2.5

$$K_h = K_{h_{TKE}}$$

$$K_m = K_{m_{TKE}}$$



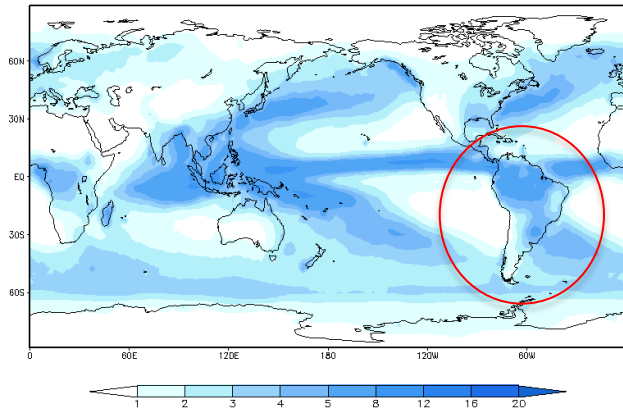


Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

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

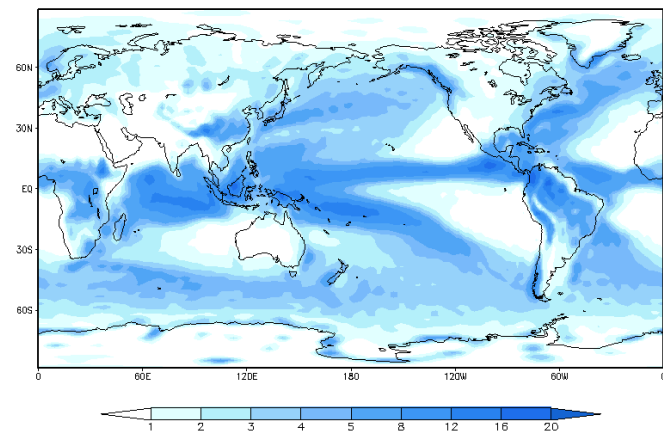
Observado GPCP

GPCP



Modelo Original

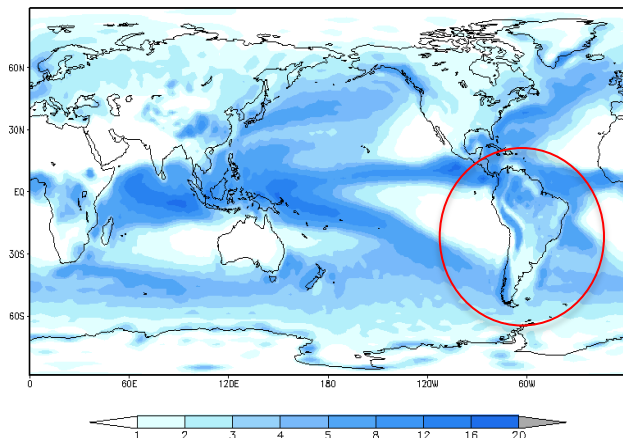
MY2.0-SSIB



Sup N e NE

Modelo ESTÁTICO-IBIS

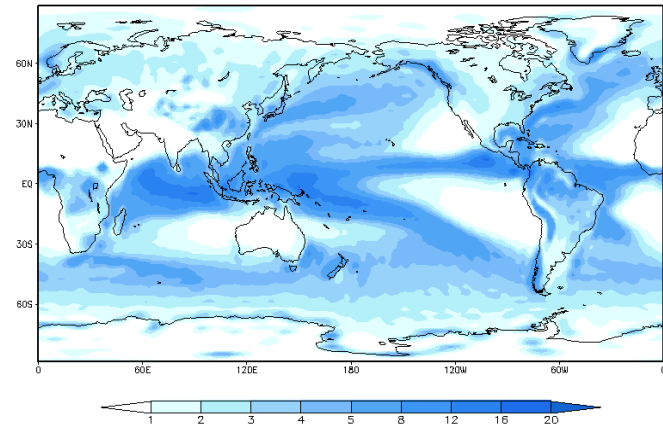
STAT-IBIS



Sub PRP

Modelo DINÂMICO-IBIS

DYNA-IBIS



N
S



MY Camada Limite Fechamento 2.0

Desacoplamento das equações prognostica da PBL e a Superfície

Fechamento Local x Não Local

Contra Gradiente

Camada Limite Úmida.

Time Line

A large, light blue arrow pointing downwards, indicating a timeline or progression from top to bottom.

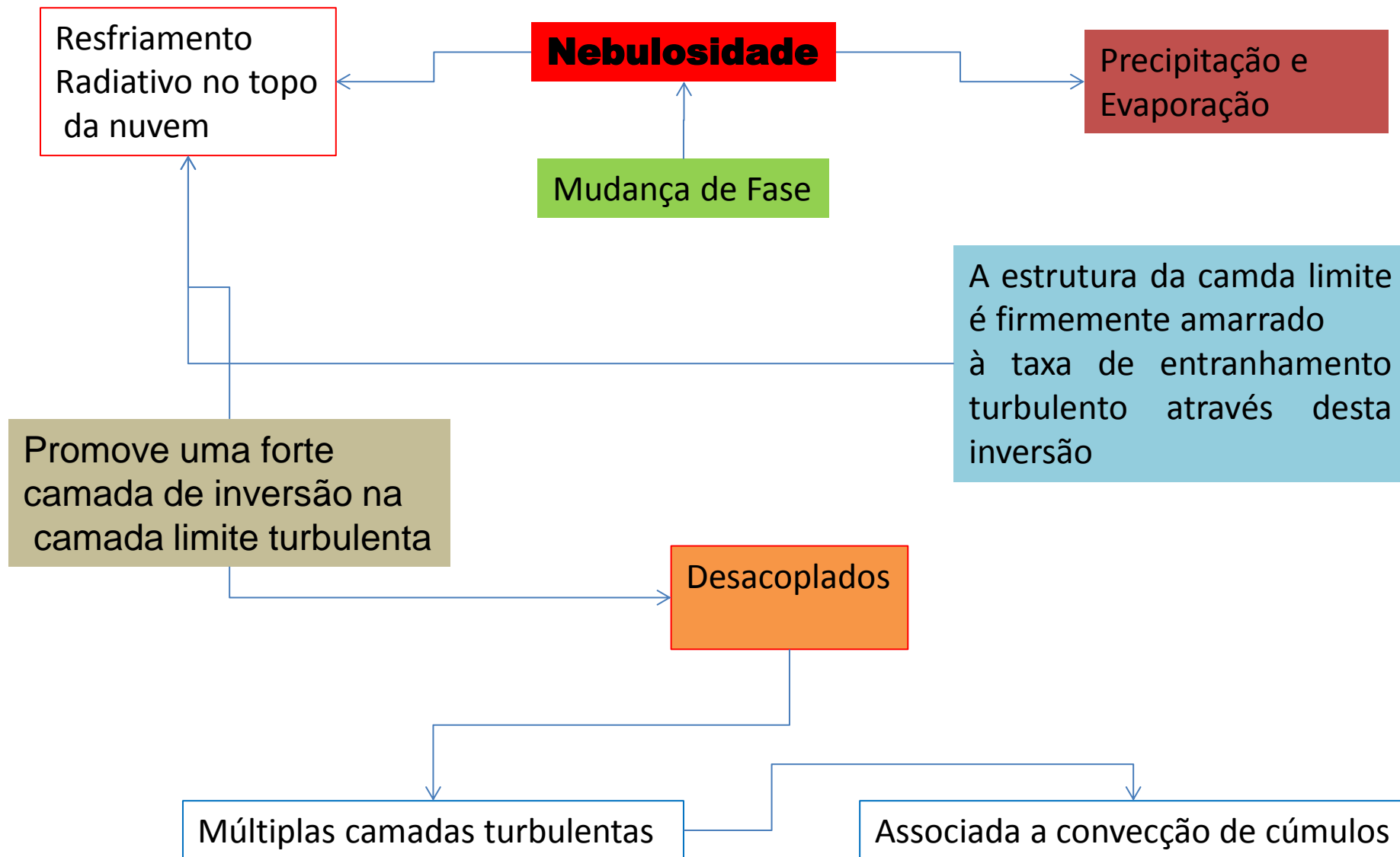


Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA (BRETHERTON e PARK , 2009)

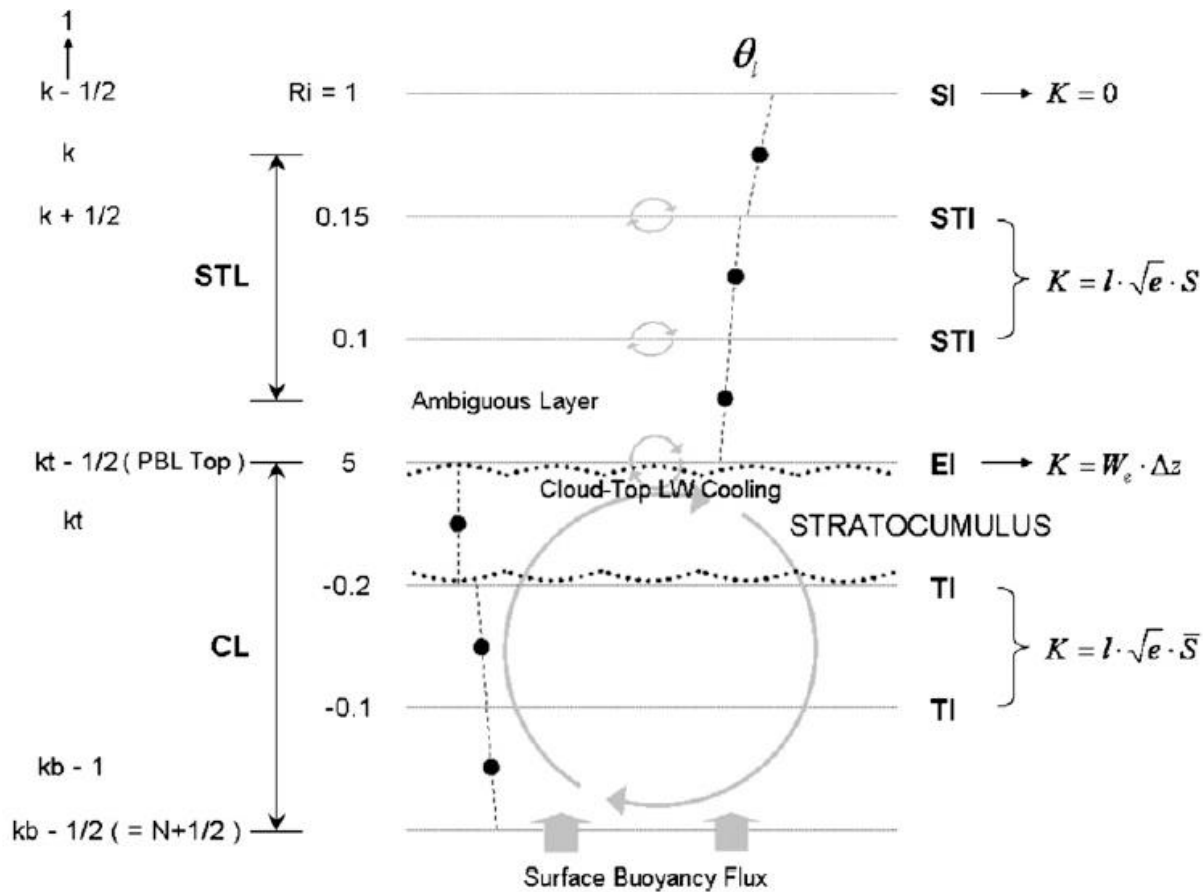
Parametrização de turbulência úmida



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)

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.55600; \\ \alpha_2 &= -4.3649; \\ \alpha_3 &= -34.6764; \\ \alpha_4 &= -6.1272; \\ \alpha_5 &= 0.698600\end{aligned}$$

Processos turbulentos da PBL-ÚMIDA

(BRETHERTON e PARK , 2009) Formulação



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

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

Nós restringimos $G_h < 0.0233$,

Esta é uma condição teórica para manter a produção de cisalhamento positiva em turbulência homogeneamente estratificada, com cisalhamento instávelmente.

O verdadeiro limite superior de G_h 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 ser calculados a partir dos perfis médios termodinâmicos e de cisalhamento

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

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

$$(b_1 = 5.8)$$

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

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

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

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

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

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

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

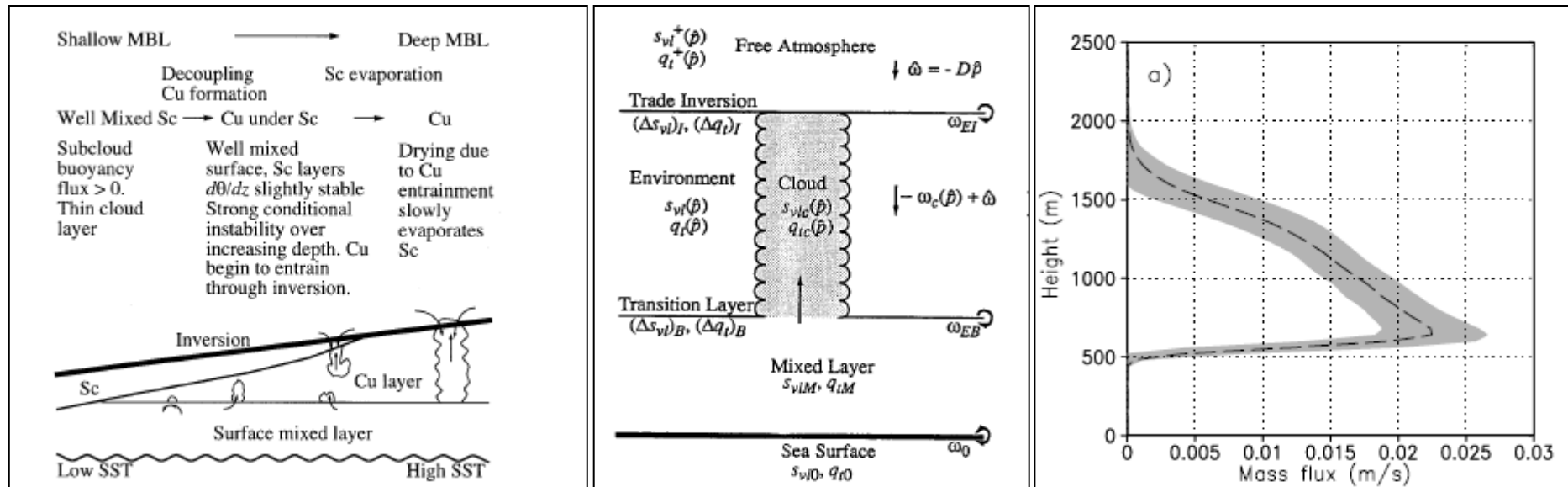


Fig. 6. A conceptual model of the subtropical stratocumulus to trade Cu transition

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

$$\overline{u_i'' u_j''} - \frac{2}{3} e \delta_{ij} = -K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\overline{u_i'' \theta''} = -K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_i}$$

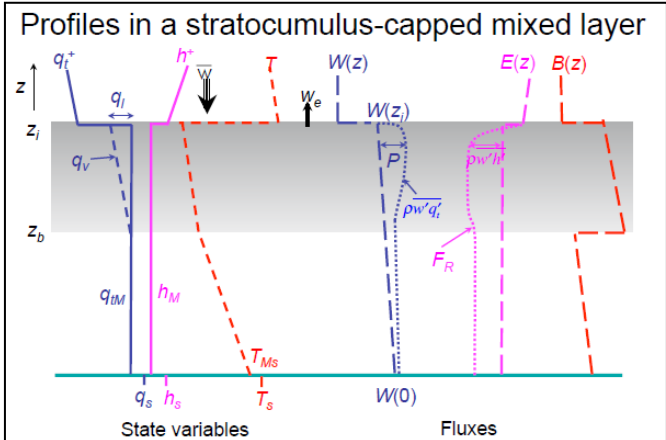
$$\overline{u_i'' q_v''} = -K_h \frac{\partial q_v}{\partial x_i}$$

$$\overline{u_i'' s''} = -K_h \frac{\partial s}{\partial x_i},$$

$$K_m = c_m l \sqrt{e},$$

$$K_h = \left(1 + \frac{2l}{\Delta} \right) K_m.$$

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



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

$$c_m = 0.1$$

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

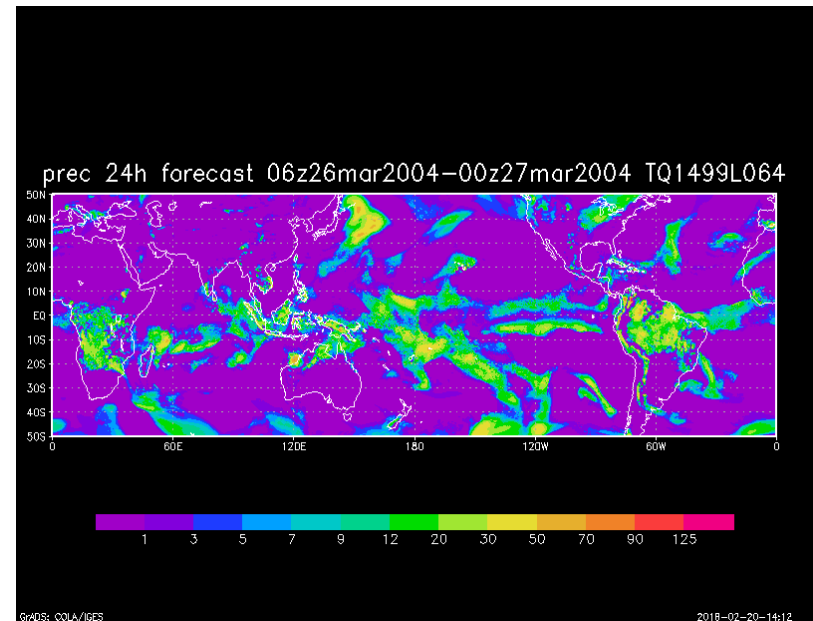
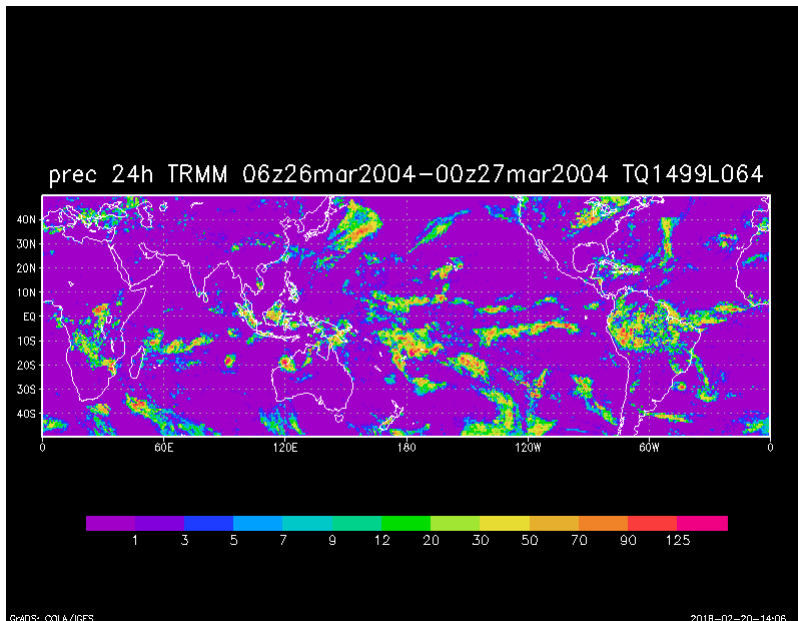
(1) foi implementada uma nova equação para o cálculo da pressão de vapor de saturação.



Dinâmica 17/09/2019 a 11/10/2019

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Versão Operacional do modelo BAM

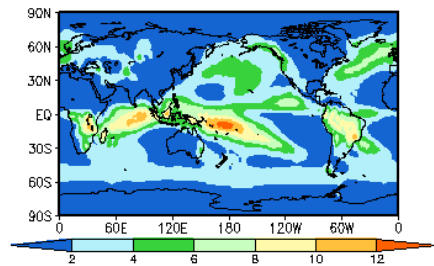




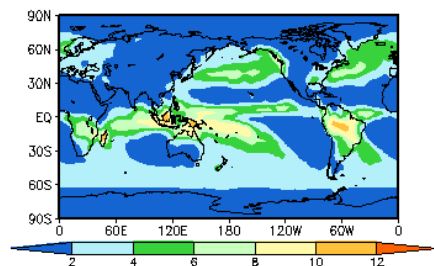
Dinâmica 17/09/2019 a 11/10/2019

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

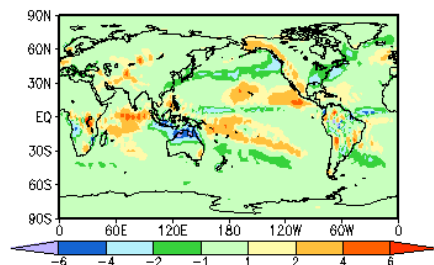
Exp1 (verao/p.umida/c.terma/ara/clir)



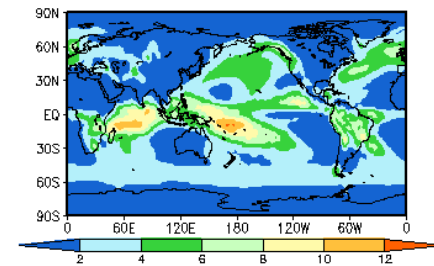
GPCP(yrs 1997–2007)



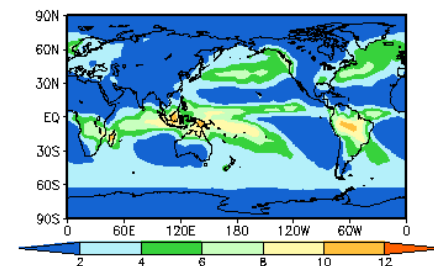
Exp1 – GPCP



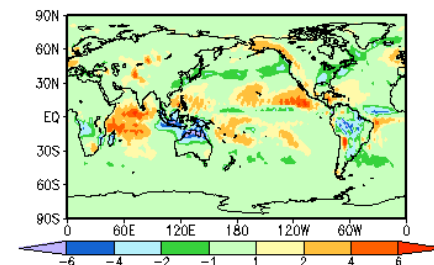
Exp2 (verao/p.seca/c.terma/ara/clir)



GPCP(yrs 1997–2007)

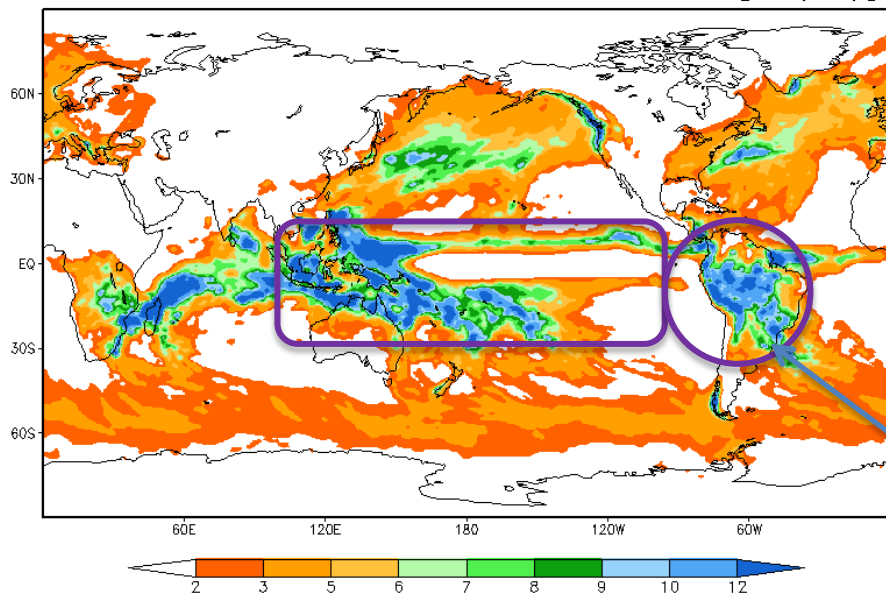


Exp2 – GPCP

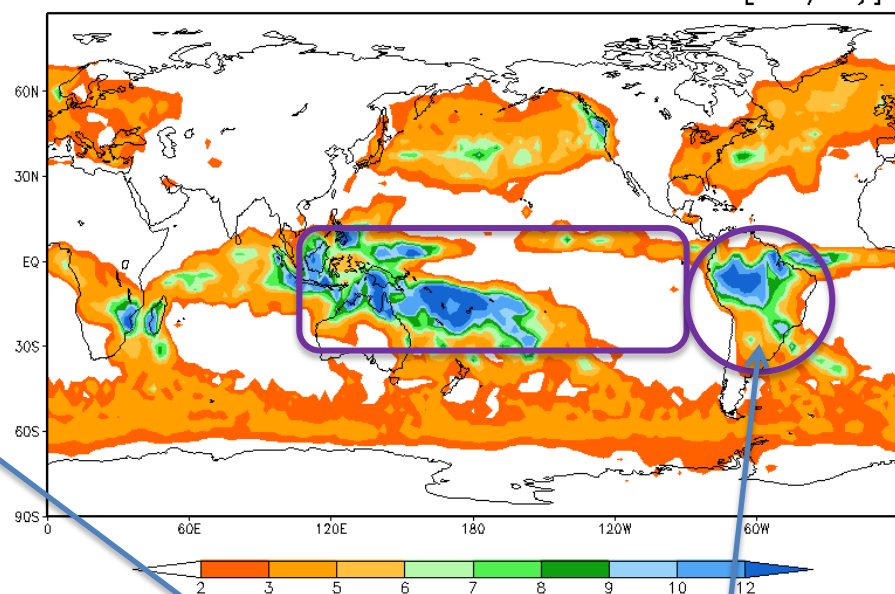


V
E
R
Ã
O

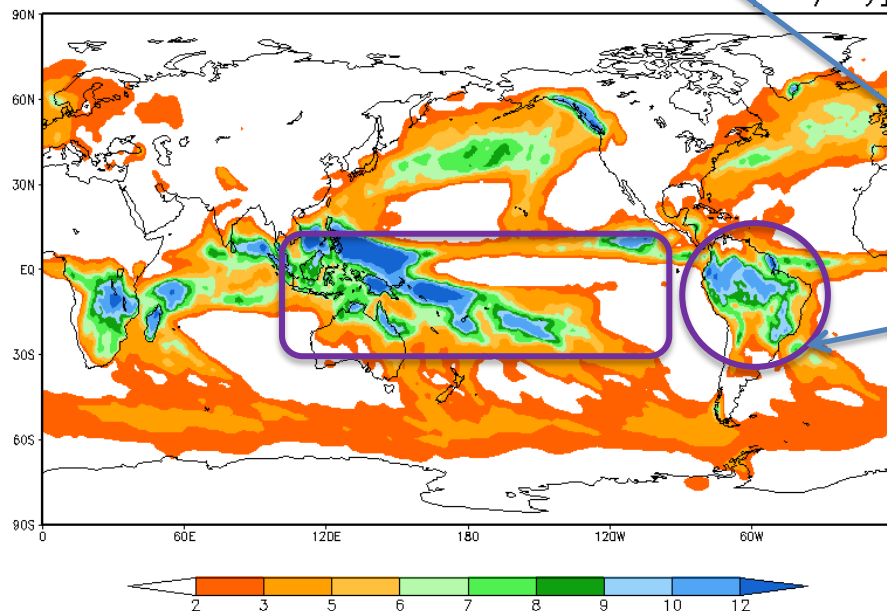
UKMET-Media DJF dec1998-feb1999 TOTAL RAIN [mm/day]



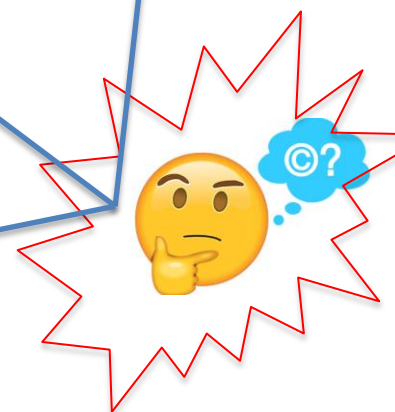
GPCP-Media DJF dec1998-feb1999 Chuva Total [mm/day]



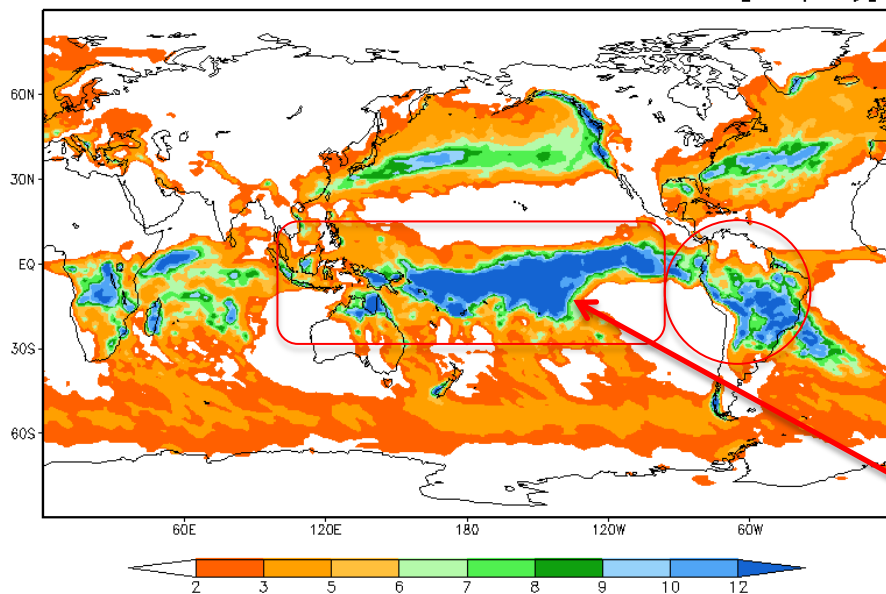
BAM126-Media DJF dec1998-feb1999 TOTAL RAIN [mm/day]



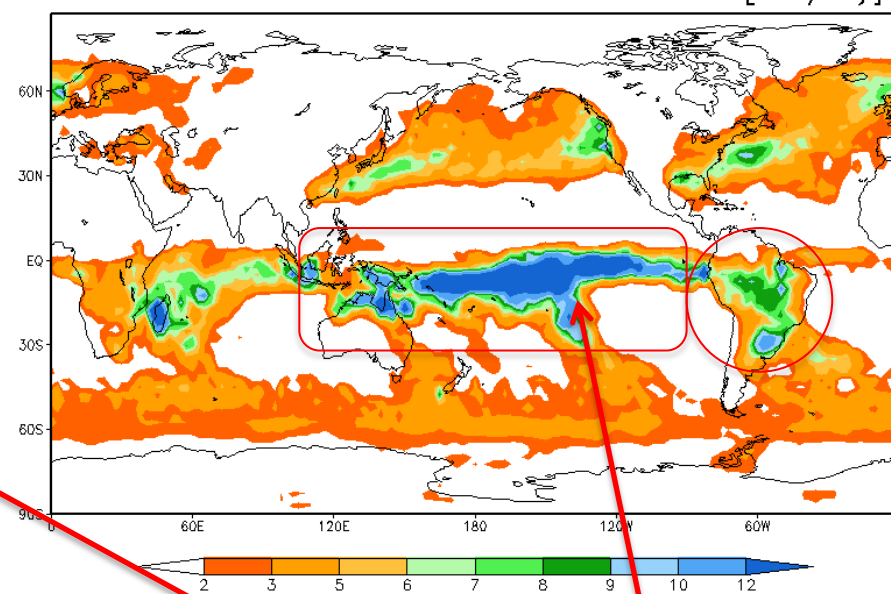
La Nina



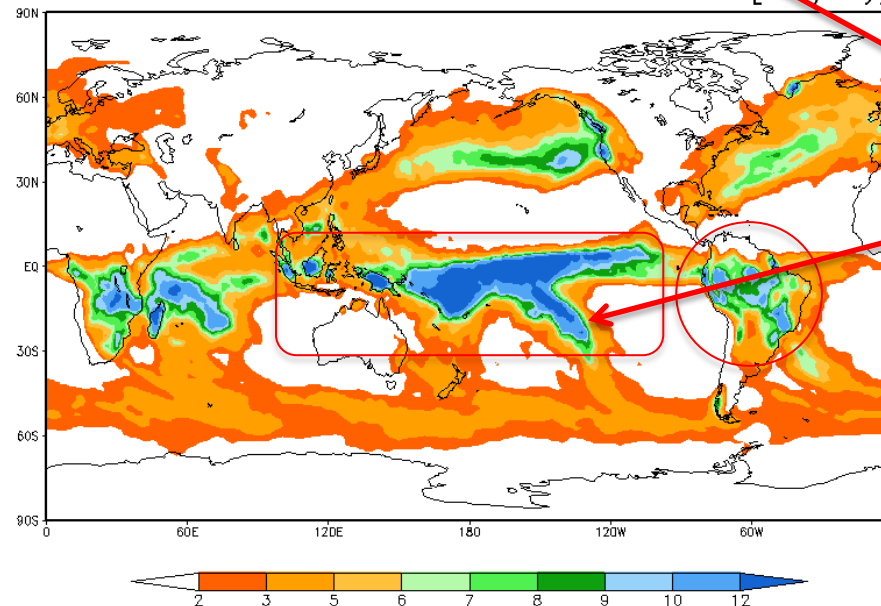
UKMET-Media DJF dec1997-feb1998 TOTAL RAIN [mm/day]



GPCP-Media DJF dec1997-feb1998 Chuva Total [mm/day]



BAM126-Media DJF dec1997-feb1998 TOTAL RAIN [mm/day]



El Nino

ZCPS



Dinâmica 17/09/2019 a 11/10/2019

Desacoplamento das equações prognóstica da PBL e a Superfície

Fim