



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

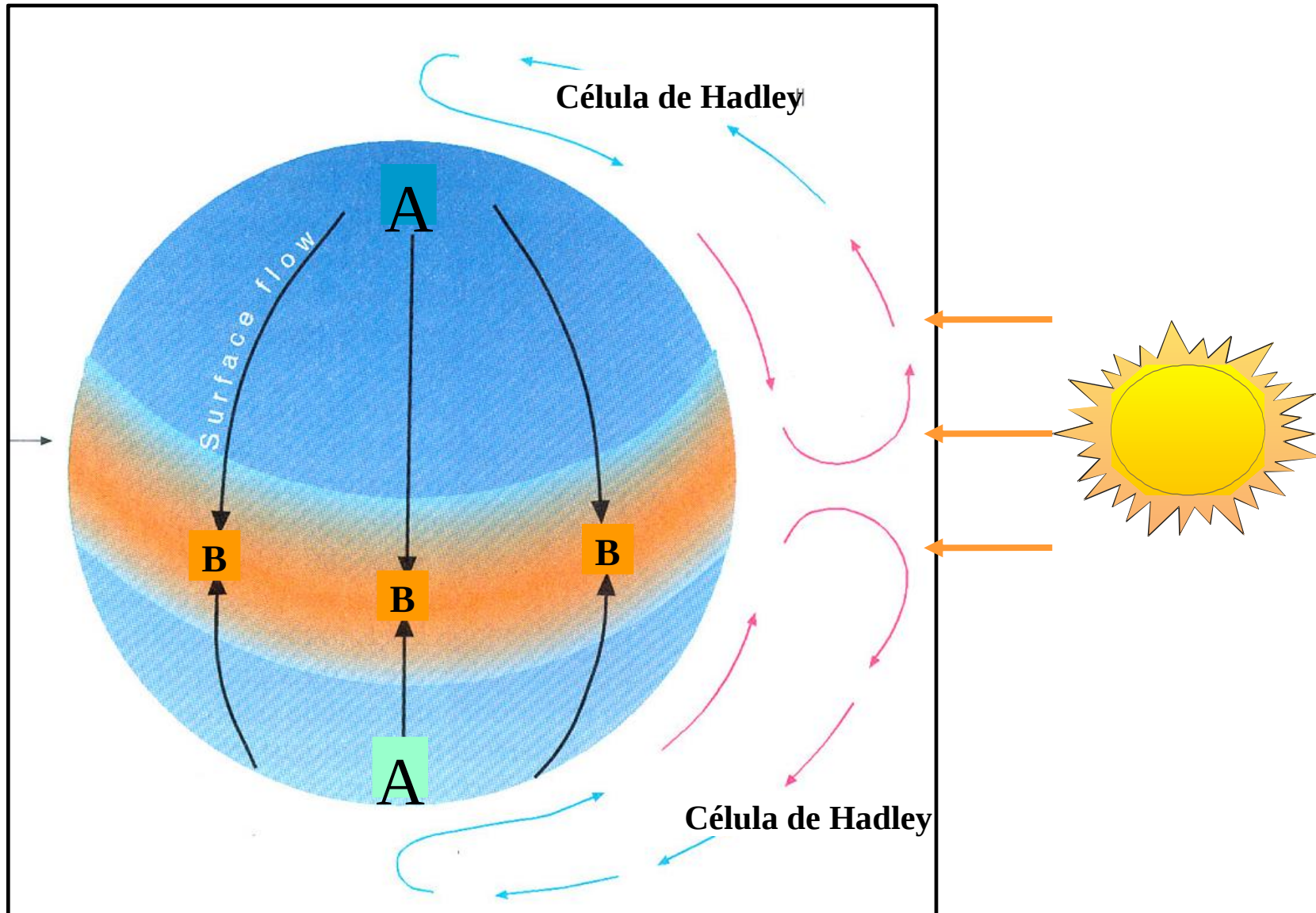
Modelagem Numérica da Atmosfera: Introdução

Chou Sin Chan

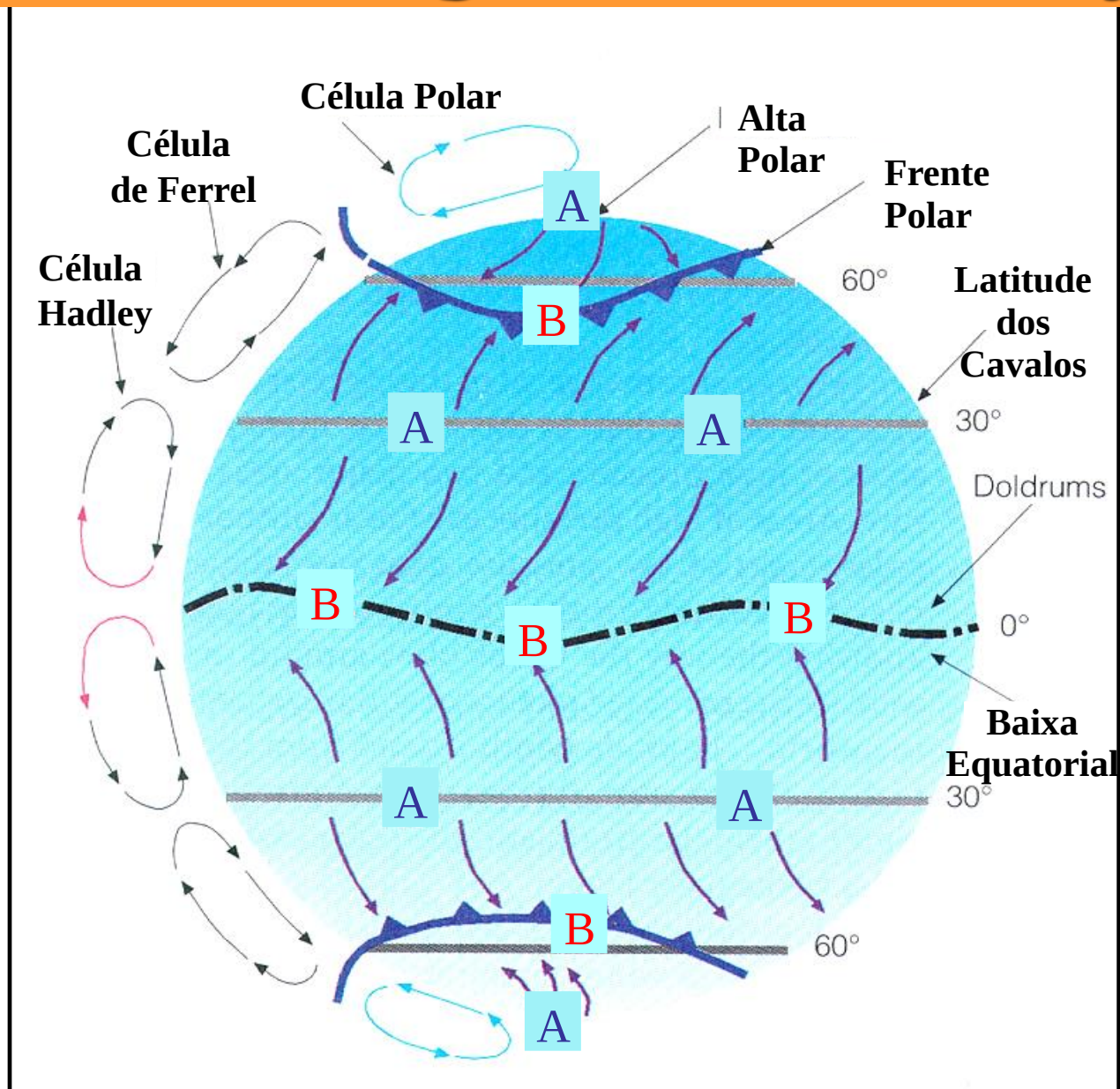
chou@cptec.inpe.br

**V WorkEta
São José dos Campos, SP**

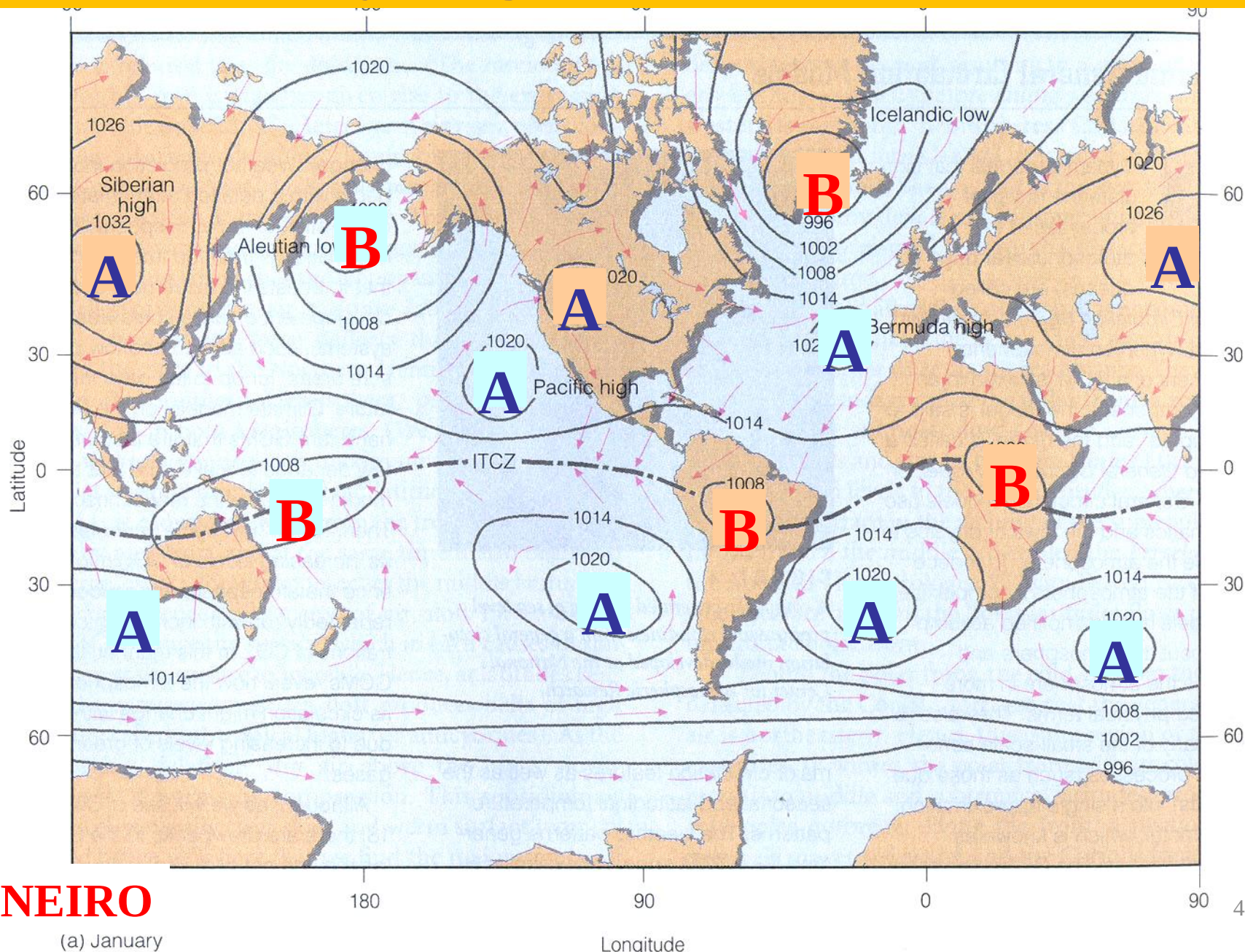
Terra homogênea sem rotação



Terra homogênea com rotação



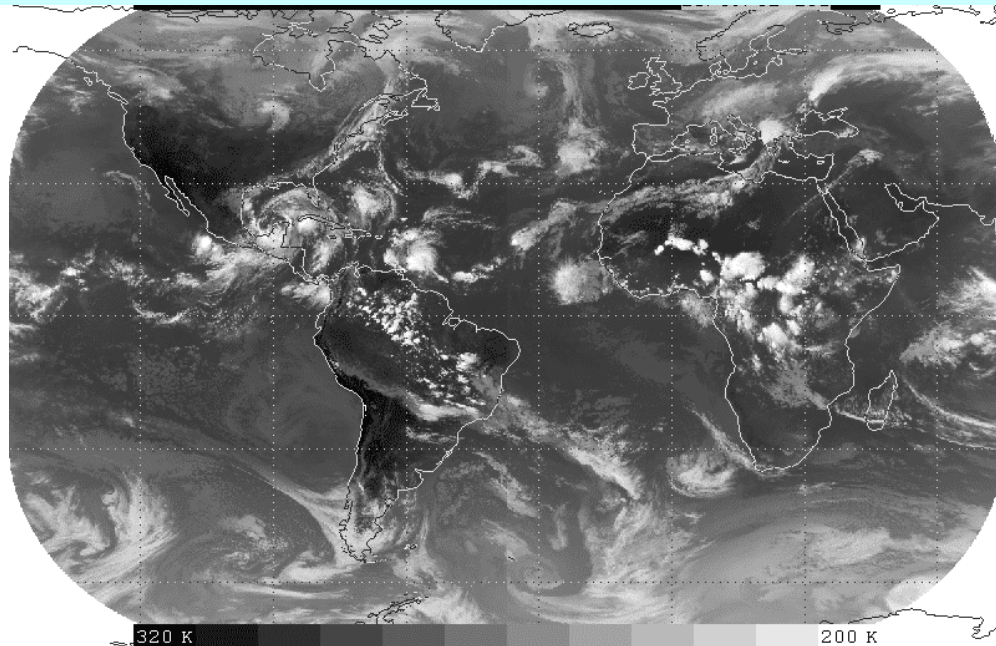
Circulação geral da atmosfera



MODELAGEM DA ATMOSFERA

Eq Navier Stokes

- Conservação do momentum angular
- Conservação da massa
- Conservação da energia total



Primitive Equations

1. Horizontal wind $\frac{DV_H}{Dt} = -2\Omega_z \times V_H - \frac{1}{\rho} \nabla_H p + F_H$

2. Hydrostatic $0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$

3. Continuity $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V$

4. Thermodynamic $c_v \frac{DT}{Dt} = -p \frac{D\alpha}{Dt} + Q$

5. Ideal gas $p = \rho RT$

6. Water vapor $\frac{Dq}{Dt} = Q'$

where

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\vec{\nabla}_H = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Non-linear partial differential equations

Para resolver numericamente as equações diferenciais parciais precisamos definir como representar uma função contínua por um conjunto discreto de valores.

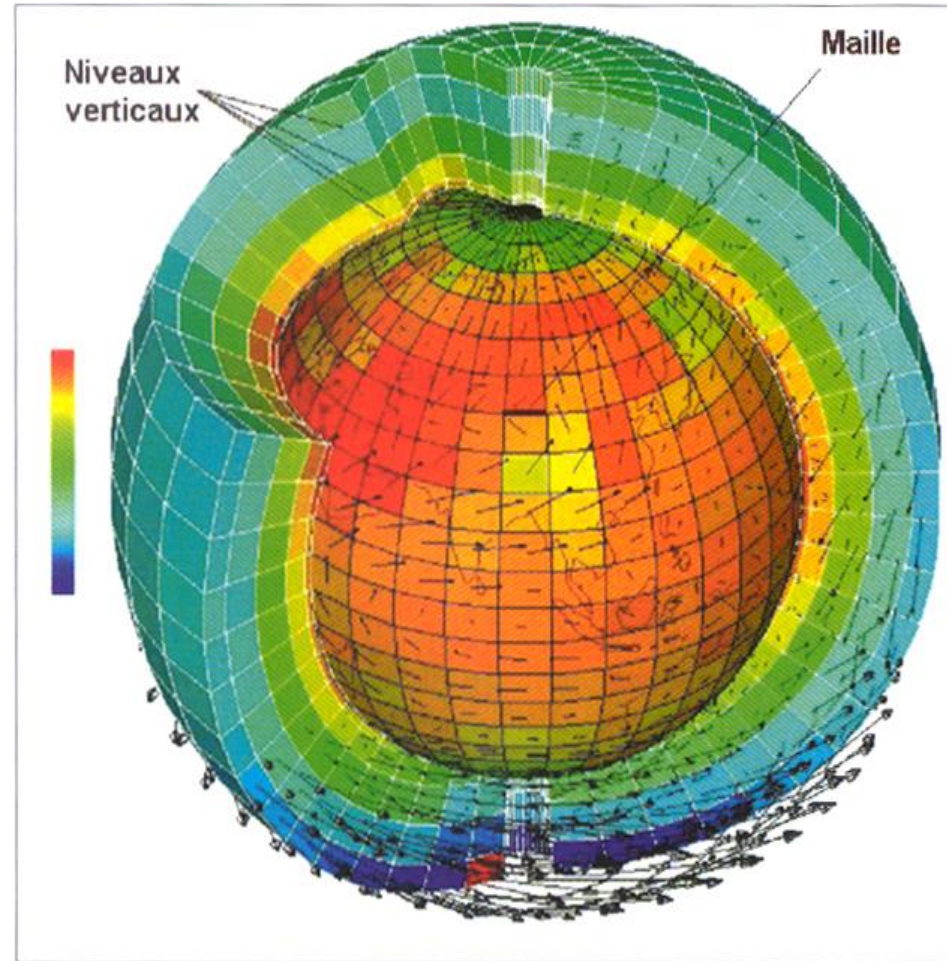
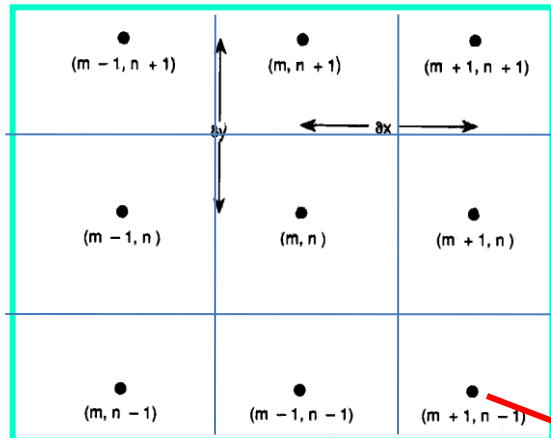
2 estratégias:

1. Métodos em pontos de grade (diferenças finitas, volumes finitos)
2. Métodos por expansão de séries (ex. série de fourier, etc)

Modelo em "ponto de grade"

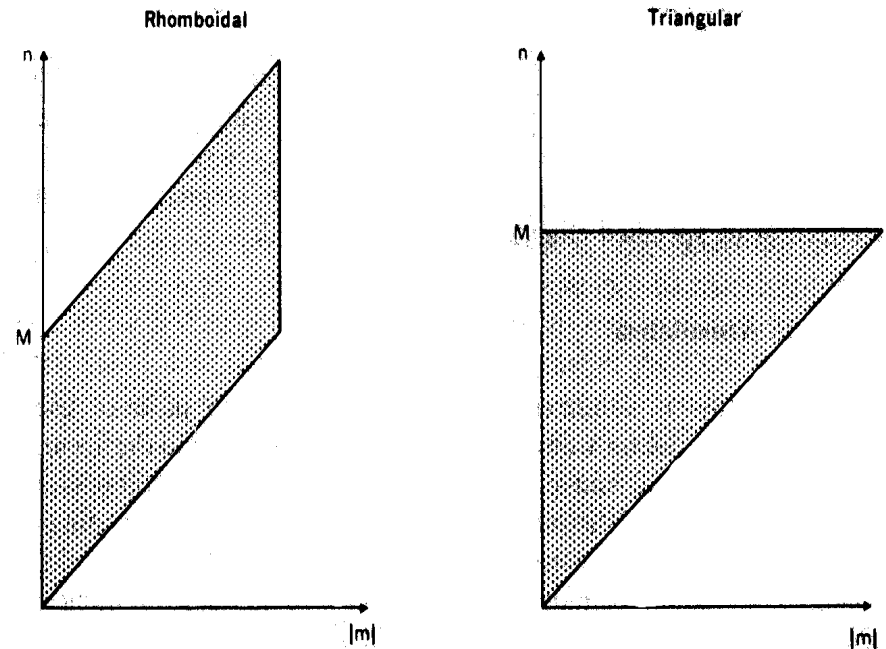
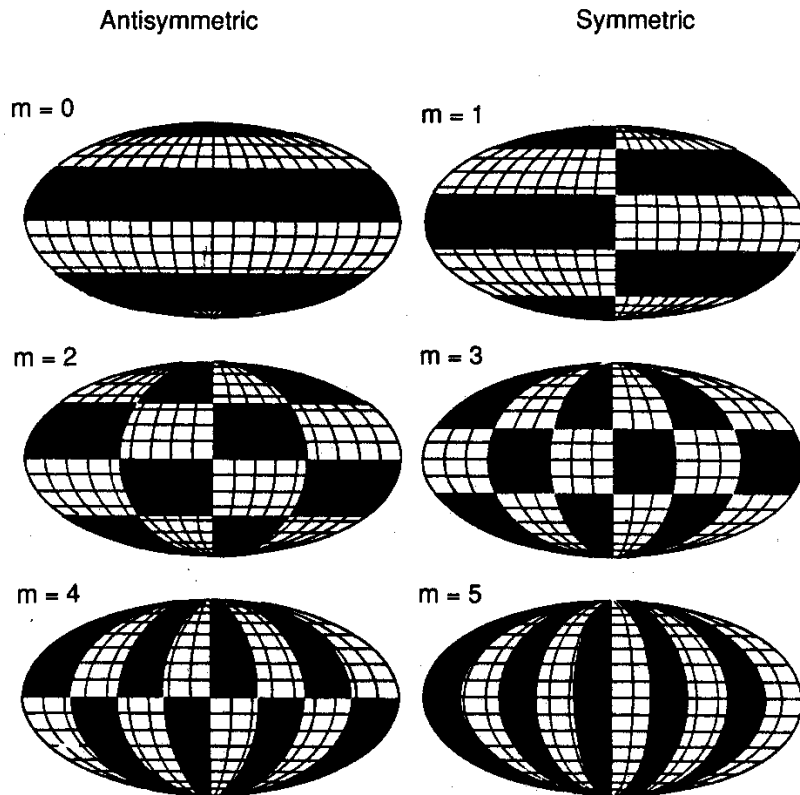
O espaço é dividido em caixas definidas por grades horizontais e níveis verticais.

Em cada caixa a atmosfera é homogênea e é suficiente conhecer o valor em 1 ponto da caixa.



(T, vento, umidade, pressão)

Modelo Espectral



truncamento

O campo espacial é representado por uma série finita de harmônicos esféricos

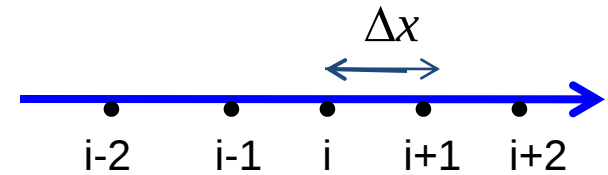
Por exemplo modelo global do CPTEC **T126L28**

Diferenças finitas

$\Delta x, \Delta y$: resolução horizontal (grid length)

$$x = i\Delta x$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x}$$



Expansão em série de Taylor:

$$u(x + \Delta x) = u(x) + \frac{du}{dx}\Delta x + \frac{d^2u}{dx^2}\frac{\Delta x^2}{2} + \frac{d^3u}{dx^3}\frac{\Delta x^3}{6} + O(\Delta x^4) \quad (1)$$

$$u(x - \Delta x) = u(x) - \frac{du}{dx}\Delta x + \frac{d^2u}{dx^2}\frac{\Delta x^2}{2} - \frac{d^3u}{dx^3}\frac{\Delta x^3}{6} + O(\Delta x^4) \quad (2)$$

$\frac{du}{dx}$: **Derivada Primeira (1-2):**

$$u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x) = 2\frac{du}{dx}\Delta x + O(\Delta x^3) \quad (3)$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (4)$$

$\frac{d^2u}{dx^2}$: **Derivada Segunda (1+2):**

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{u(x + \Delta x) - 2u(x) + u(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (5)$$

(Diferença centrada)

$$u(x - \Delta x, t) = u_{i-1}^n$$

$$u(x + \Delta x, t) = u_{i+1}^n$$

$$u(x, t) = u_i^n \rightarrow u(x, t + \Delta t) = u_i^{n+1}$$

Previsão de ***u*** no
tempo $t + \Delta t$

Diferenças finitas

Caso mais simples, advecção de um escalar u , por um escoamento de velocidade constant c :

Equação de Advecção:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -c \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

Forward:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -c \left(\frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) \quad (2)$$

Leapfrog:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^{n-1}}{2\Delta t} = -c \left(\frac{u_{i+1}^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) \quad (3)$$

Backward:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -c \left(\frac{u_{i+1}^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} \right) \quad (4)$$

Upstream-Forward:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -c \left(\frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (5)$$

Condição de ESTABILIDADE NUMÉRICA: $CFL < 1$

$$CFL = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6)$$

CFL: Courant-Friedrichs-Levy

O passo de tempo, Δt , deve ser escolhido de forma que a variável dependente (u) seja advecitada de uma distância menor que Δx no intervalo de tempo Δt .

GLOBAL ATMOSPHERIC RESEARCH PROGRAMME (GARP)
WMO-ICSU Joint Organizing Committee

NUMERICAL METHODS USED
IN ATMOSPHERIC MODELS

By F. Mesinger and A. Arakawa

VOLUME I

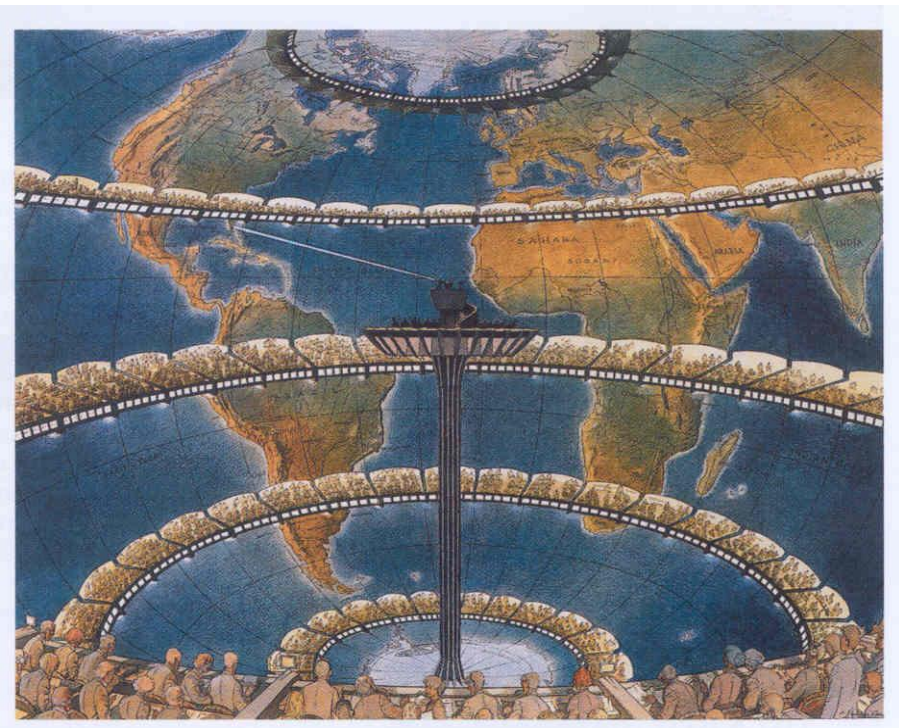
GARP PUBLICATIONS SERIES No. 17

August 1976

Métodos Numéricos em Modelos Atmosféricos

PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO - PNT

O sonho de Richardson, 1922



Equações de previsão de tempo foram resolvidas por métodos numéricos.

Uma previsão de somente 6h resultou numa previsão irrealista.

64000 pessoas seriam necessárias para efetuar os cálculos para produzir uma previsão de tempo sobre o globo.



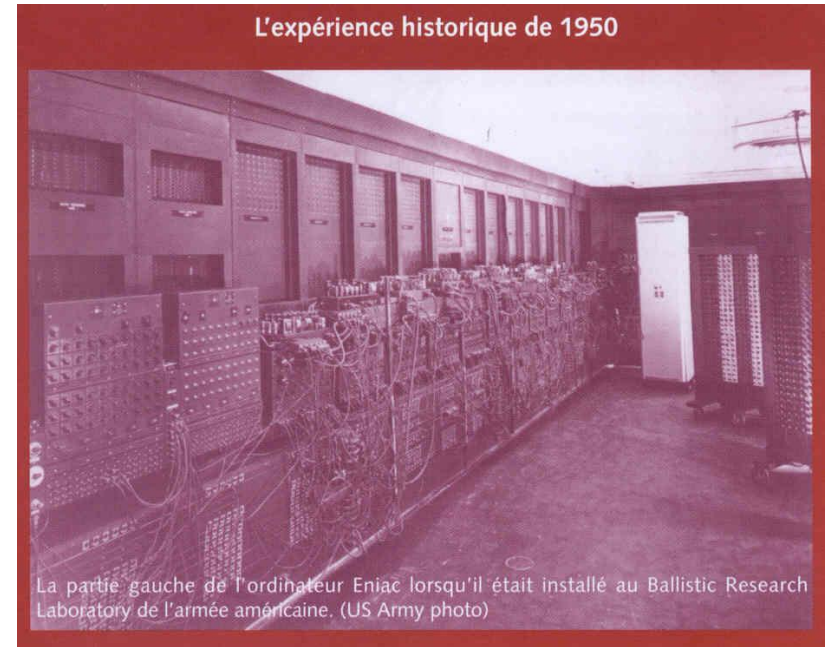
14
Lewis Fry Richardson (1881-1953). (Photo National Meteorological Library, Lafayette)

1945 - ENIAC - O 1o computador foi testado com modelo atmosférico.

1950 - Charney, Fjortoff, Von Neuman realizam a 1a. previsão numérica de tempo a partir da equação da vorticidade absoluta > *previsão da altura geopotencial de 500mb.*

1956 - Eliassen propõe a volta do sistema de equações utilizadas por Richardson (**Eqs primitivas**)

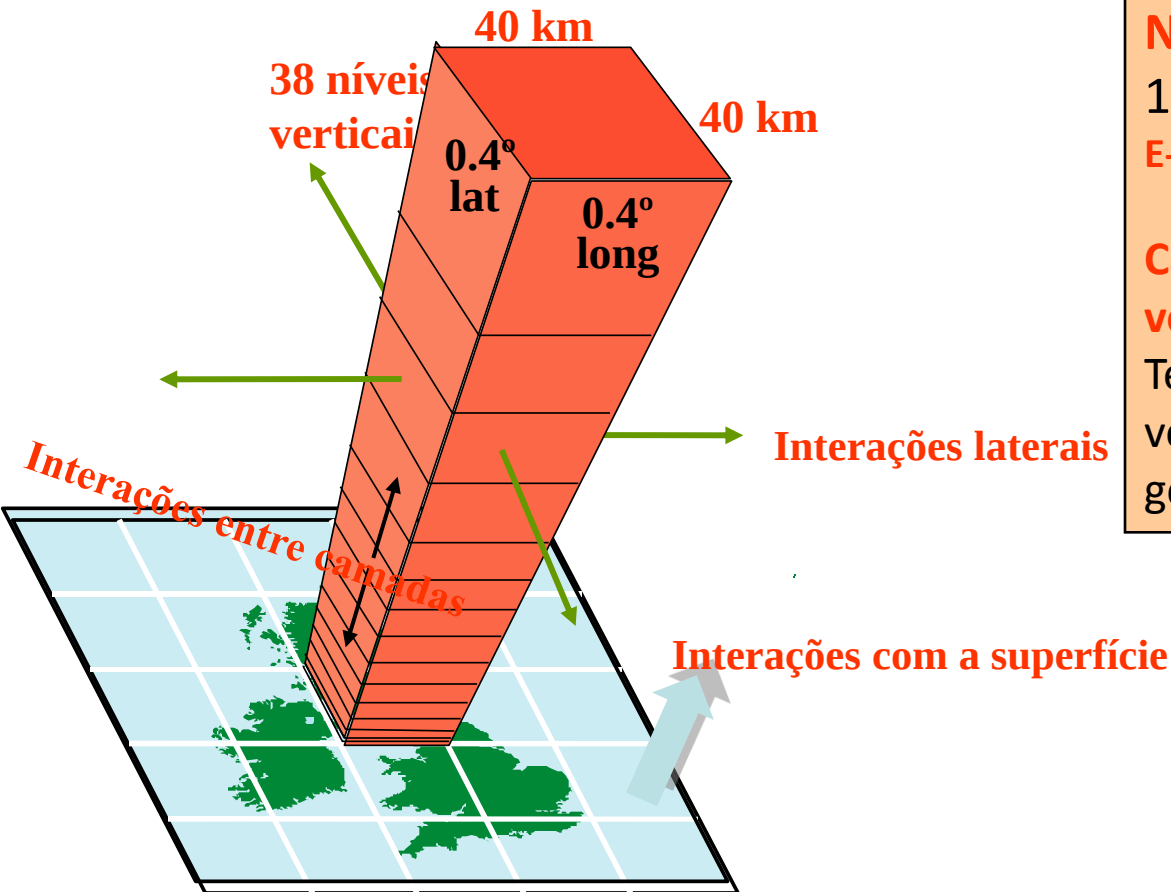
1966 - Previsão de tempo rodado em ambiente **operacional**.



Modelo Numérico Atmosférico

Código computacional (centenas de milhares de linhas de comando) que representa aproximações numéricas das equações matemáticas.

O cálculo é feito para alguns dias de previsão, uma estação do ano, vários anos, décadas, e para cenários de mudanças climáticas.



Número de elementos:

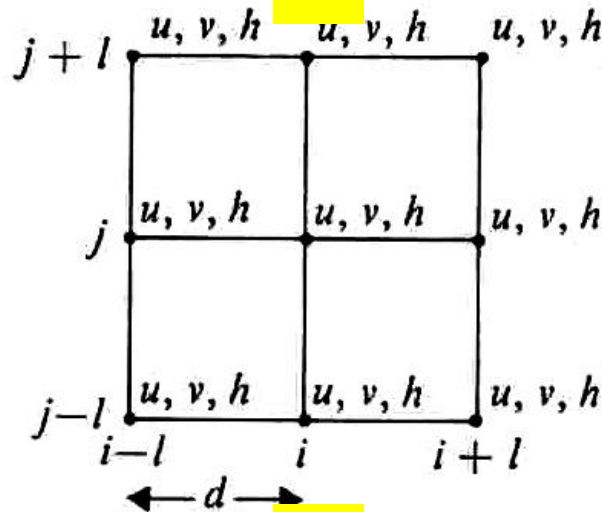
$119 \times 211 \times 38 = 954142$

E-W N-S Vertical

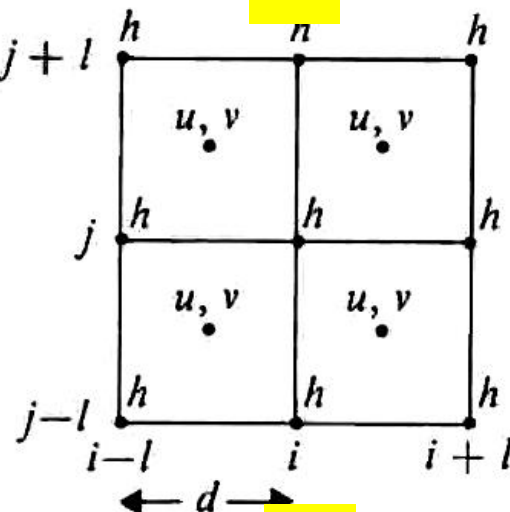
Calcula-se para cada um destes volumes:

Temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, altura geopotencial.

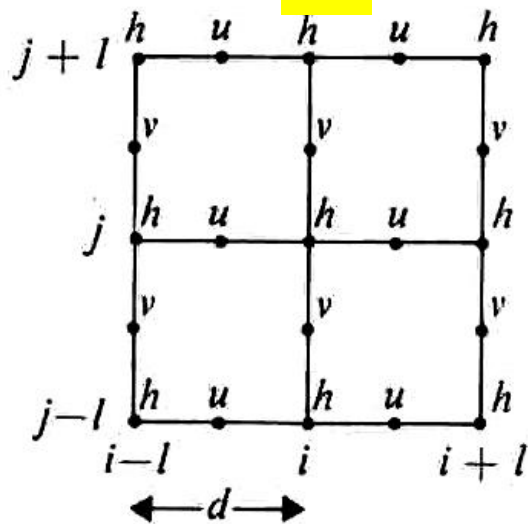
A



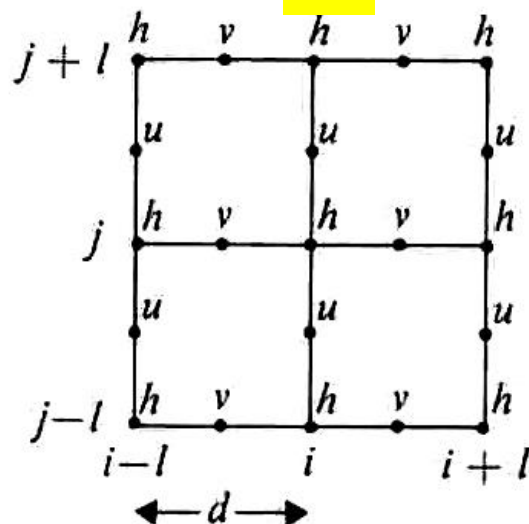
B



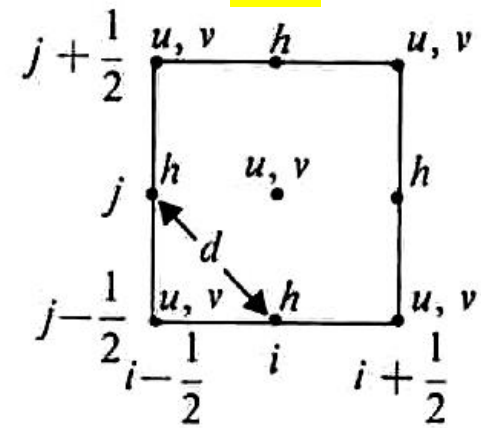
C



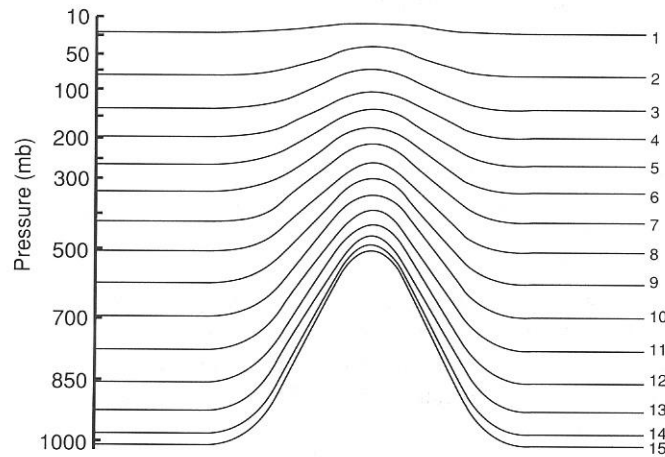
D



E



Coordenadas verticais

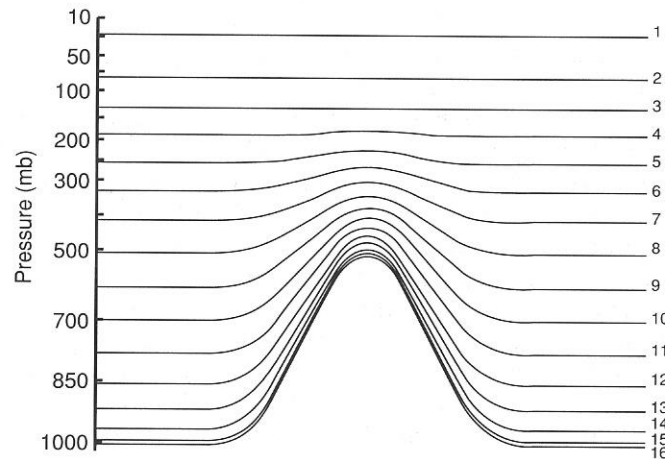


15-level sigma-coordinate model

sigma

$$\sigma = \left(\frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right)$$

$$\sigma = (0, 1)$$



16-level hybrid-coordinate model

híbrida

$$p(i,j,k) = A_k P_0 + B_k P_s(i,j)$$

$$\eta = (0, 1)$$

Fig. 13.7 Comparison of the ECMWF 15-level σ -coordinate model and the 16-level hybrid-coordinate model. (After Simmons *et al.*, 1989).

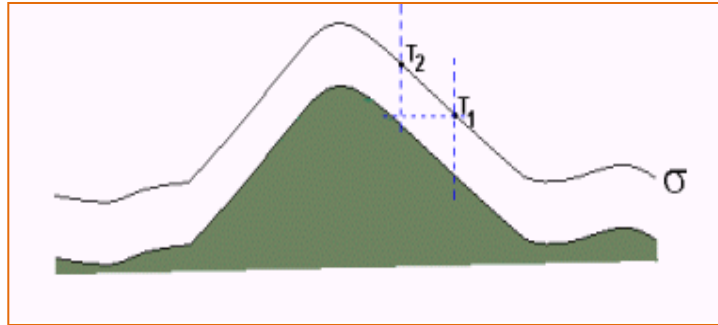
Coordenadas verticais

sigma

$$\sigma = \left(\frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right)$$

$$\sigma = (0,1)$$

$$\eta = (0,1)$$

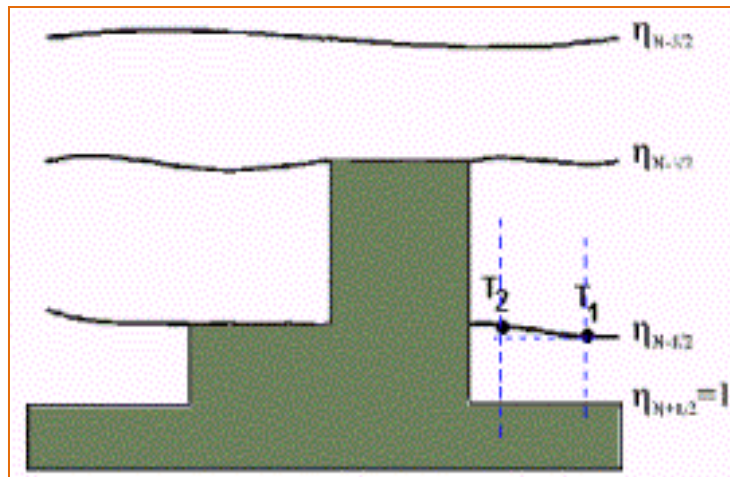


$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_\sigma + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_z + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_\sigma \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma} \right)$$

eta

$$\eta = \left(\frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right) * \eta_s$$

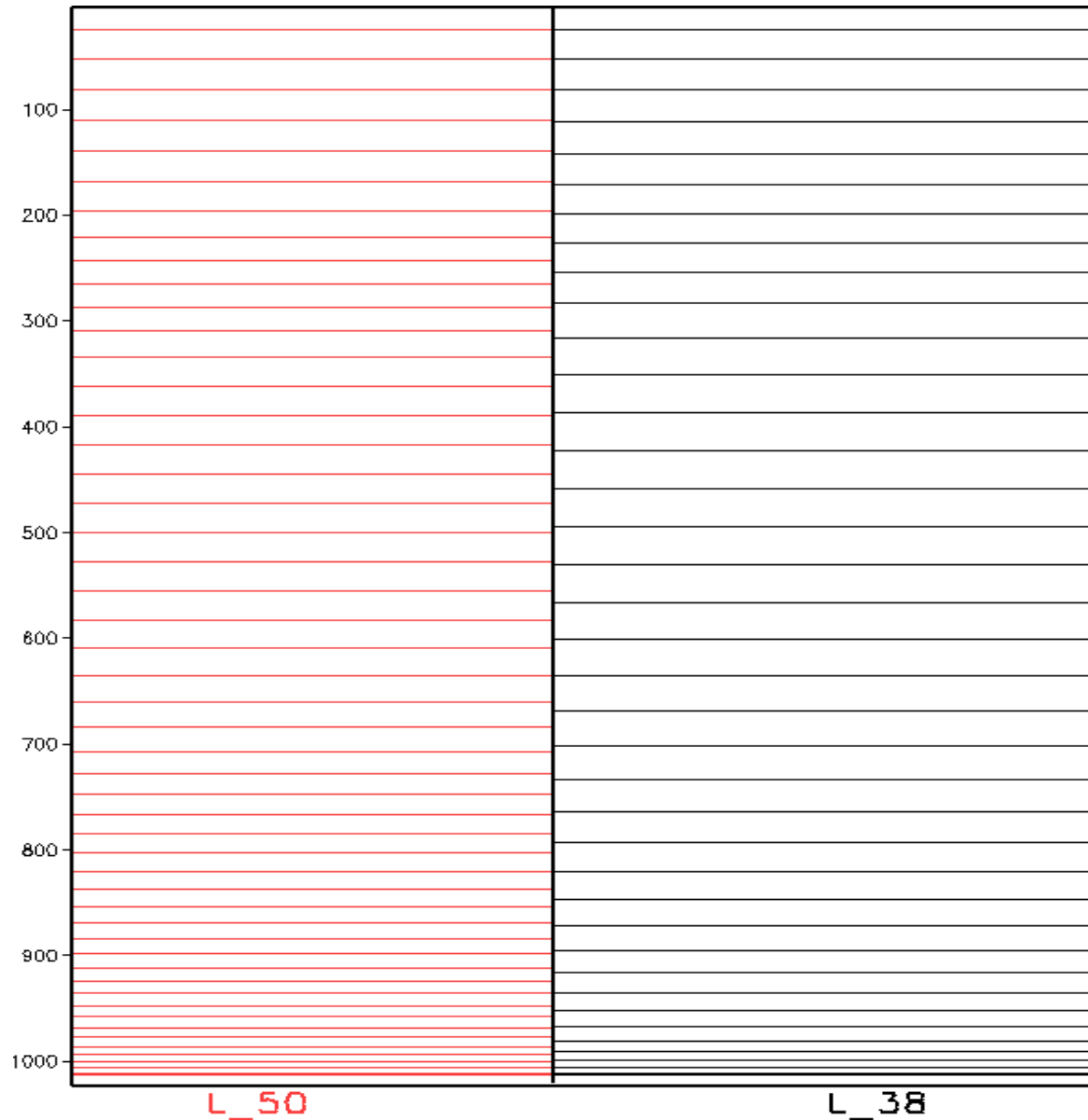
$$\eta_s = \frac{P_{ref}(z_S) - P_T}{P_{ref}(0) - P_T}$$



Desenvolvida por Mesinger (1984) para reduzir os erros no cálculos de derivadas horizontais próximas de montanhas, principalmente gradiente horizontal de pressão.

O topo das montanhas coincide com as superfícies de nível do modelo

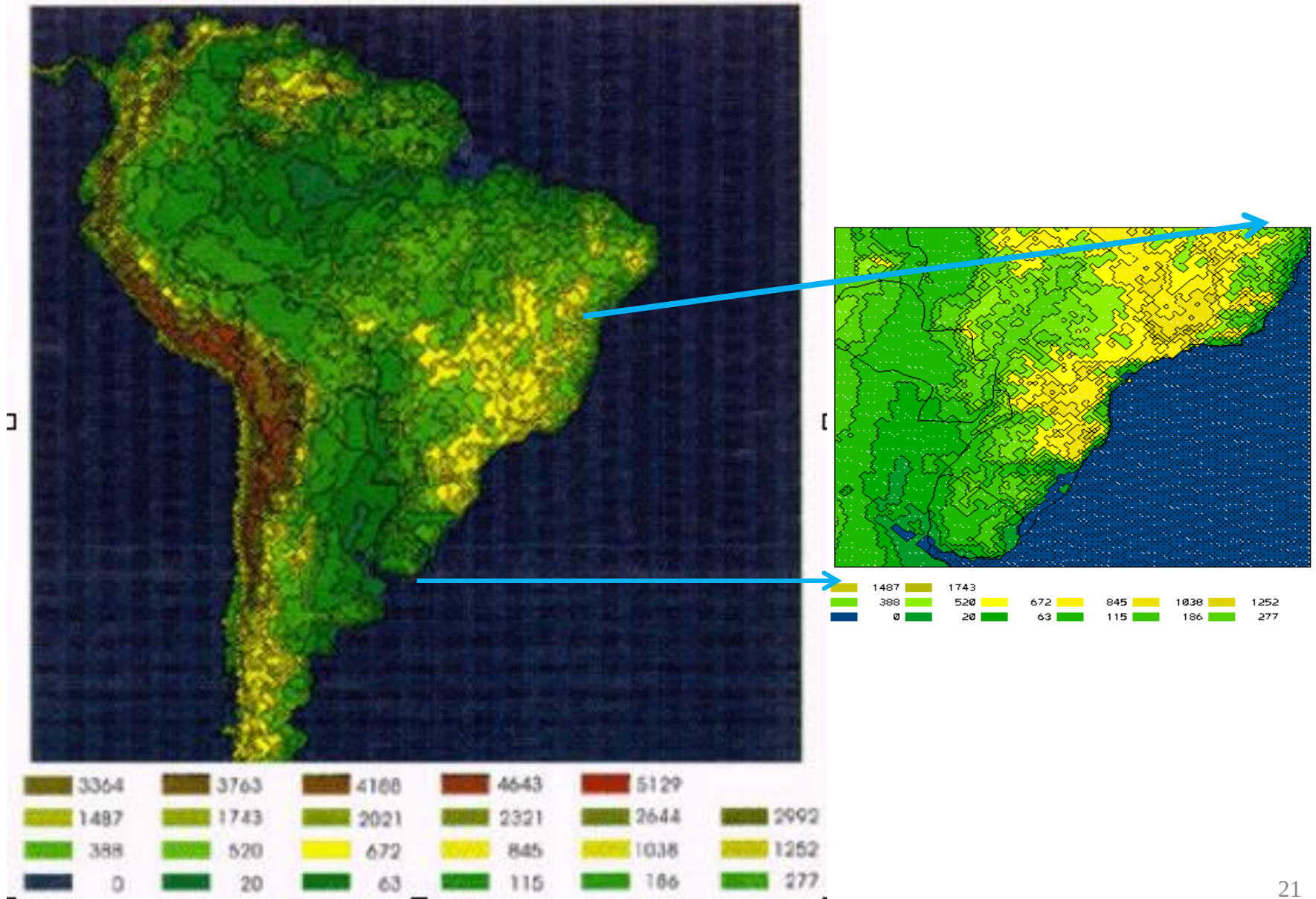
Distribuição Vertical das superfícies da coordenada vertical



Aumento
resolução
vertical para
capturar fortes
variações na
tropopausa

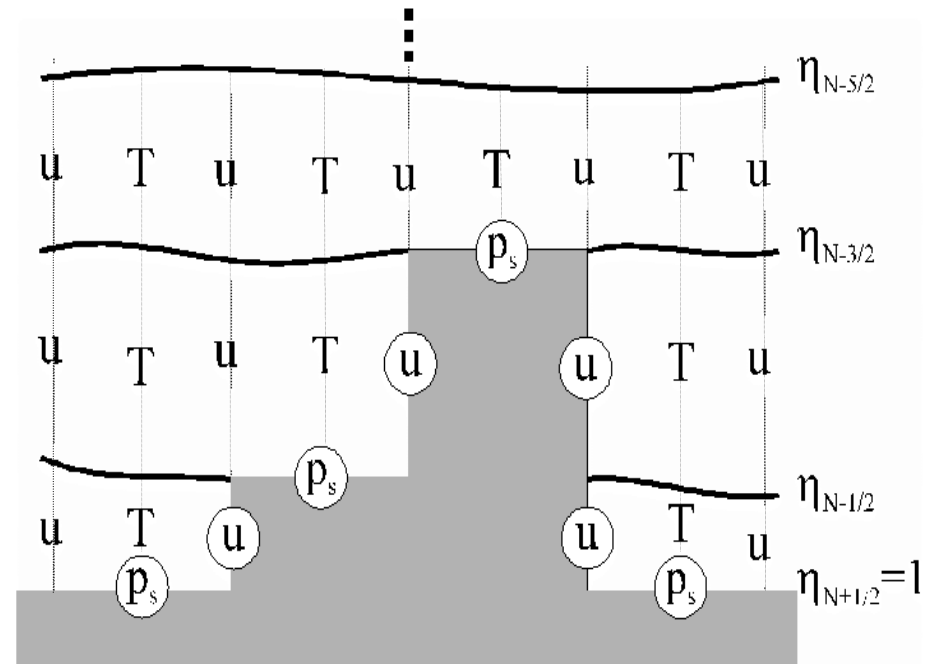
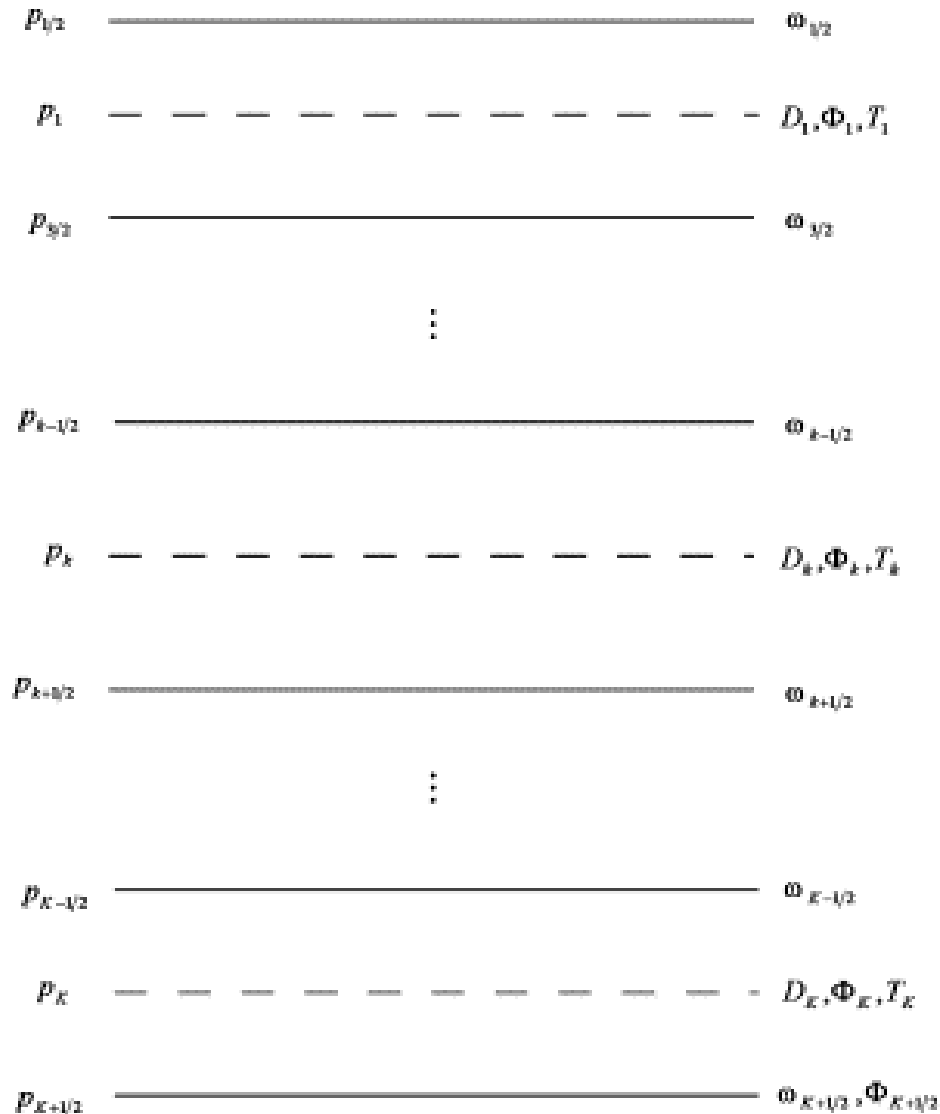
Maior resolução
vertical, captura
variações rápidas
e rasas

Step-topography



Topografia e distribuição vertical de variáveis

Grade vertical de Lorenz



Primitive Equations

1. Horizontal wind

$$\frac{DV_H}{Dt} = -2\Omega_z \times V_H - \frac{1}{\rho} \nabla_H p + F_H$$

2. Hydrostatic

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

3. Continuity

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V$$

4. Thermodynamic

$$c_v \frac{DT}{Dt} = -p \frac{D\alpha}{Dt} + Q$$

5. Ideal gas

$$p = \rho RT$$

6. Water vapor

$$\frac{Dq}{Dt} = Q'$$

Processos físicos
inseridos via
parametrização

where

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\vec{\nabla}_H = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Non-linear partial differential equations

Médias

- Os movimentos atmosféricos existem em várias escalas espaciais. Em um modelo numérico há processos resolvidos pela grade do modelo e outros processos "sub-grade".
- Há necessidade de descrever os processos **resolvidos** pelo sistema de observações e aqueles **não-resolvidos** e designados por perturbação ("eddy").
- Para identificar as propriedades estatísticas de um sistema, utiliza-se médias.

•1 Média no volume da grade (Grid-volume averaging):

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

Variável composta por uma média resolvida e uma perturbação

‘—’ se refere à média na grade do modelo

ϕ' perturbação subgrade

$$\bar{\phi} = \int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} \int_y^{y+\Delta y} \int_z^{z+\Delta z} \phi dz dy dx dt / (\Delta t \Delta x \Delta y \Delta z)$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ são as dimensões da grade do modelo e Δt o passo de tempo.

$$\overline{\bar{\phi}} = \bar{\phi}$$

$$\overline{\phi'} = 0$$

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

$$\overline{\phi' \bar{u}} = 0$$

$$\overline{\phi' w'} \neq 0$$

A média do produto da correlação das perturbações resulta em valor diferente de zero!!

$$\overline{T' w'} \neq 0$$

Equations of heat, moisture and continuity

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{\nabla \cdot \theta \mathbf{v}} + \frac{\partial \bar{\theta} \bar{w}}{\partial z} = \frac{Q_R}{c_p \pi} + \frac{L}{c_p \pi} (c - e) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho \theta' w'}$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \overline{\nabla \cdot q \mathbf{v}} + \frac{\partial \bar{q} \bar{w}}{\partial z} = -(c - e) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho q' w'}$$

$$\overline{\nabla \cdot \mathbf{v}} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

These subgrid terms need to be parameterized because their effects contribute to model grid scale

The vertical eddy fluxes are due mainly to the cumulus convection and turbulent motions in the boundary layer.

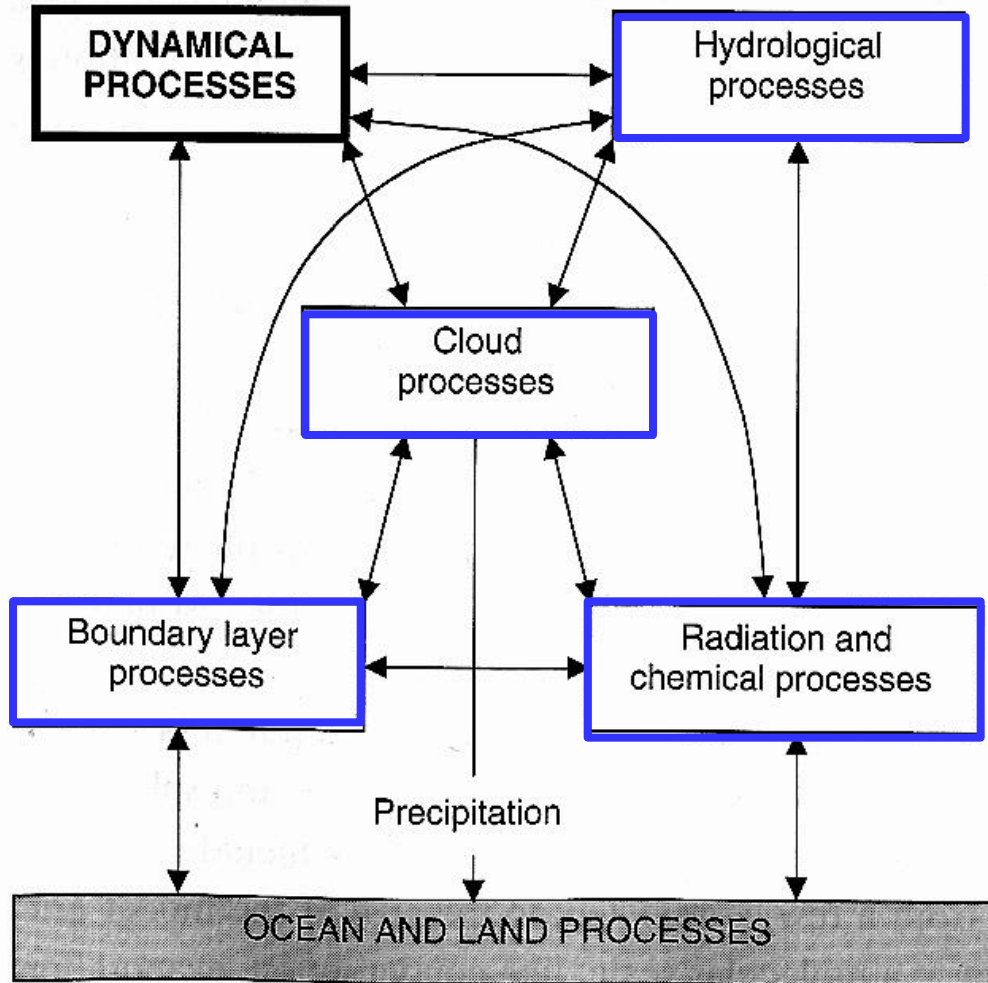
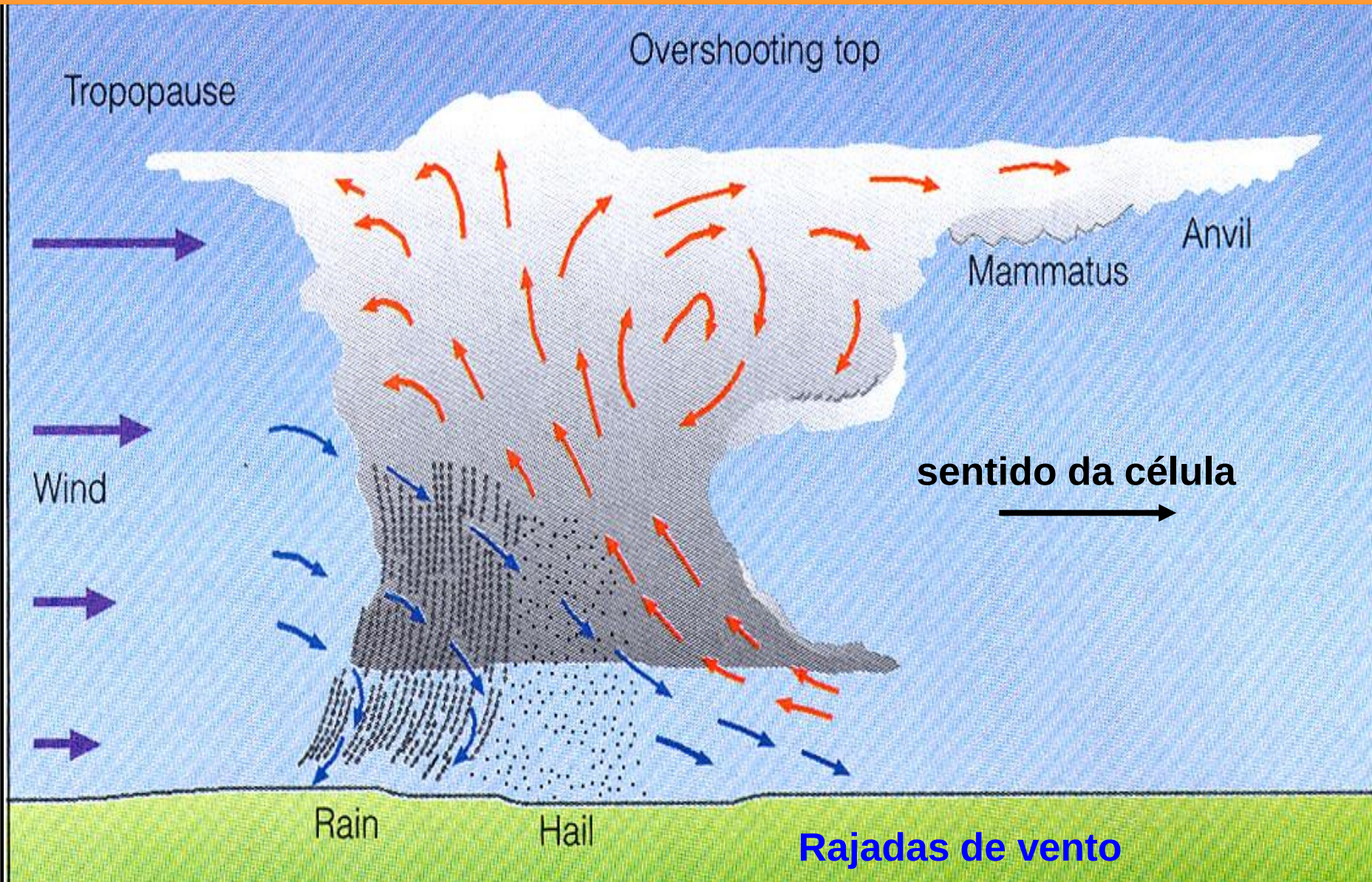


Figure 4.1.1: Physical processes in the atmosphere and their interactions. The dynamical processes for resolvable scales, in bold, are explicitly computed by the model “dynamics” (discussed in Chapters 2 and 3). The other subgrid-scale processes are parameterized in terms of the resolved-scale fields. (Adapted from Arakawa, 1997.)



Physical Processes

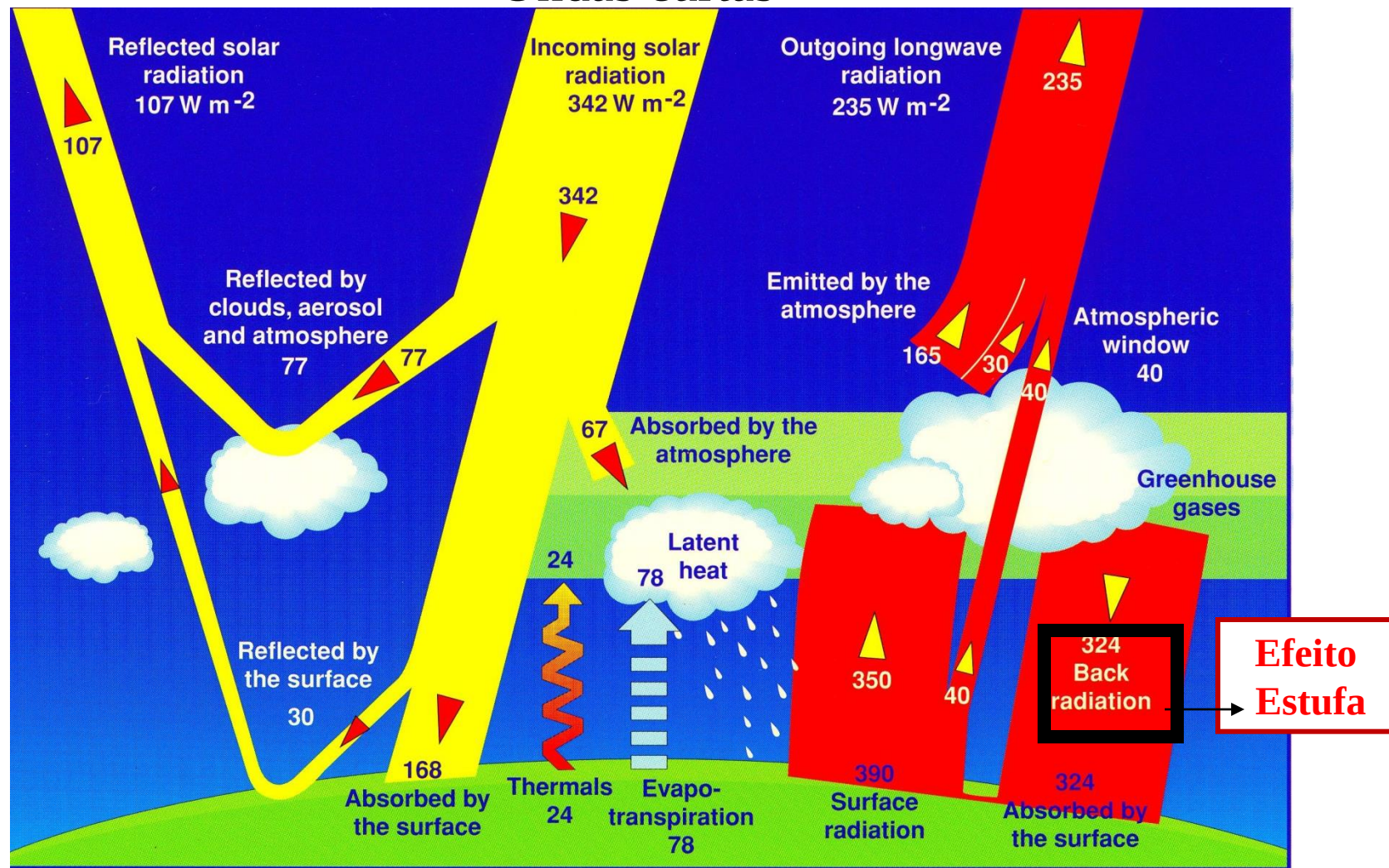
SISTEMAS CONVECTIVOS



Mecanismos da chuva

Interação entre a radiação solar e a atmosfera

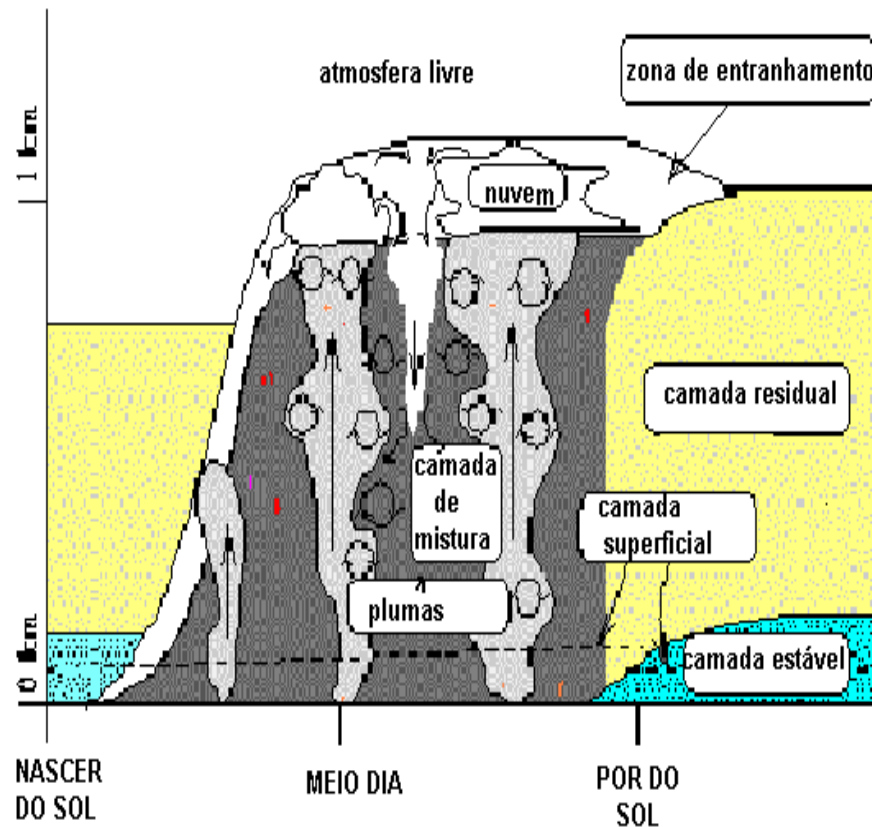
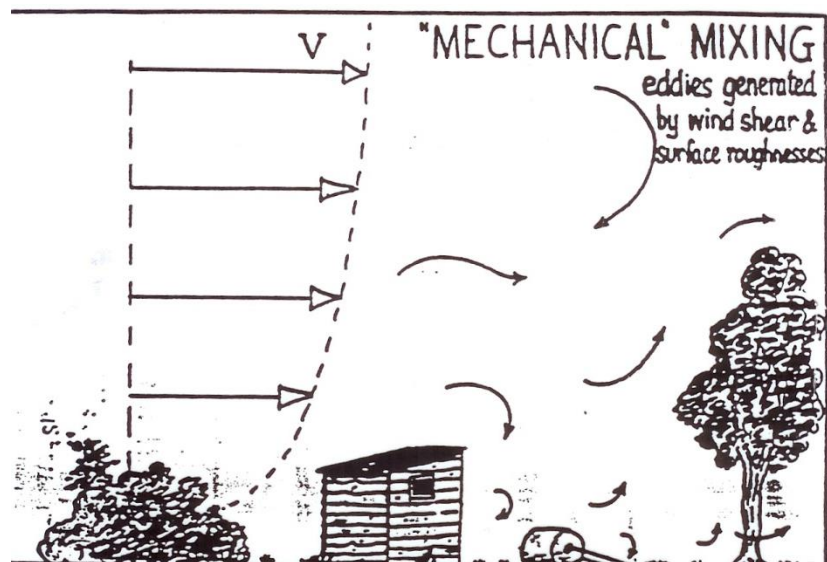
Ondas curtas



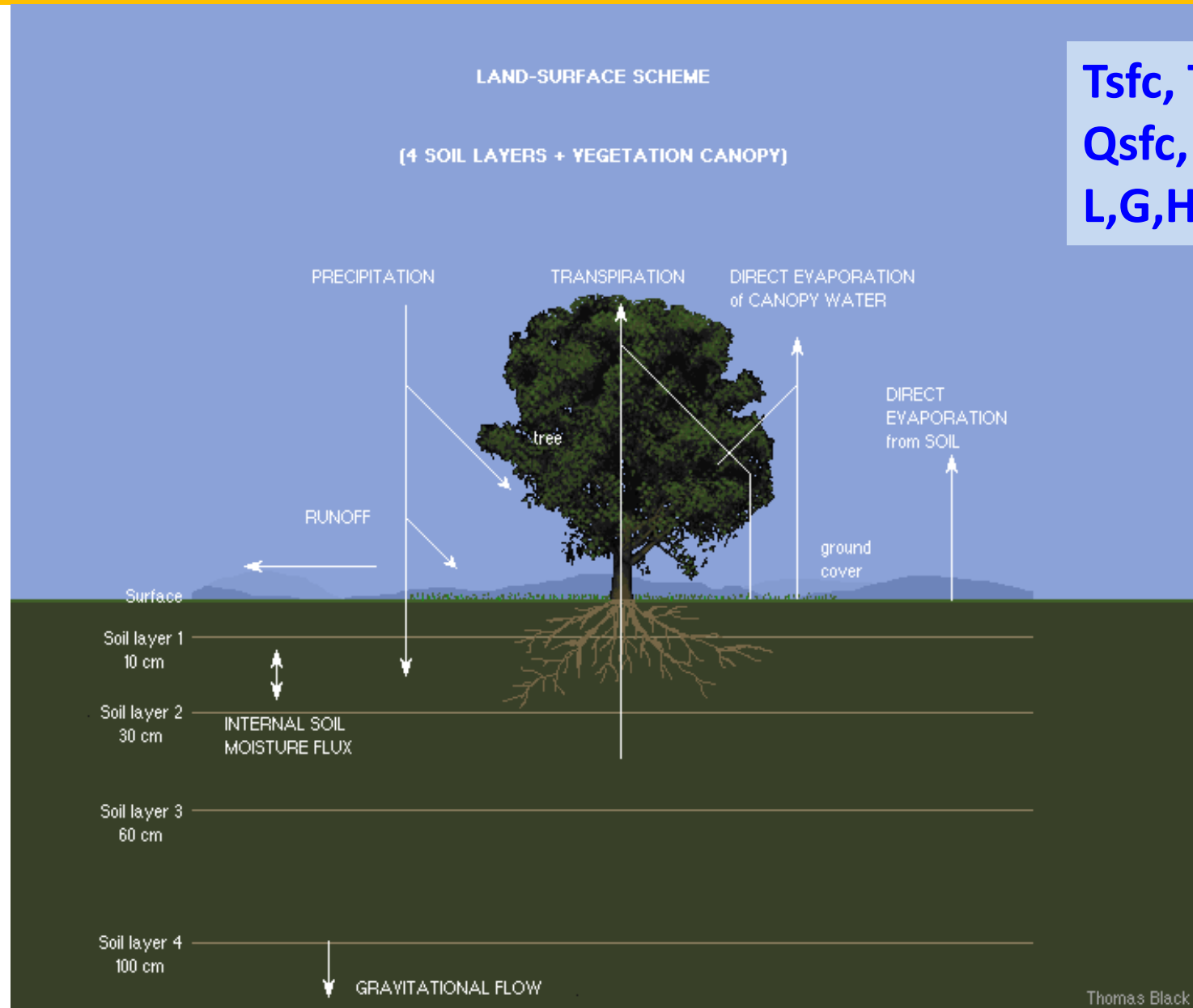
Radiation Balance of the Earth (Jeffrey T. Kiehl)

Ondas longas

TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA



Modelo de biosfera



T_{sfc} , T_{soil} ,
 Q_{sfc} , q_{soil} ,
 L , G , H , $Runoff$

Changes to temperature due to different subgrid processes

$$c_p \frac{DT}{Dt} = \alpha \frac{Dp}{Dt} + T'$$

$$T' = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{Cloud+Rain} + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{Radiation} + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{turbulence} + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{surface_fluxes}$$

Contributions from different Physics processes

Contributions included through parametrization schemes

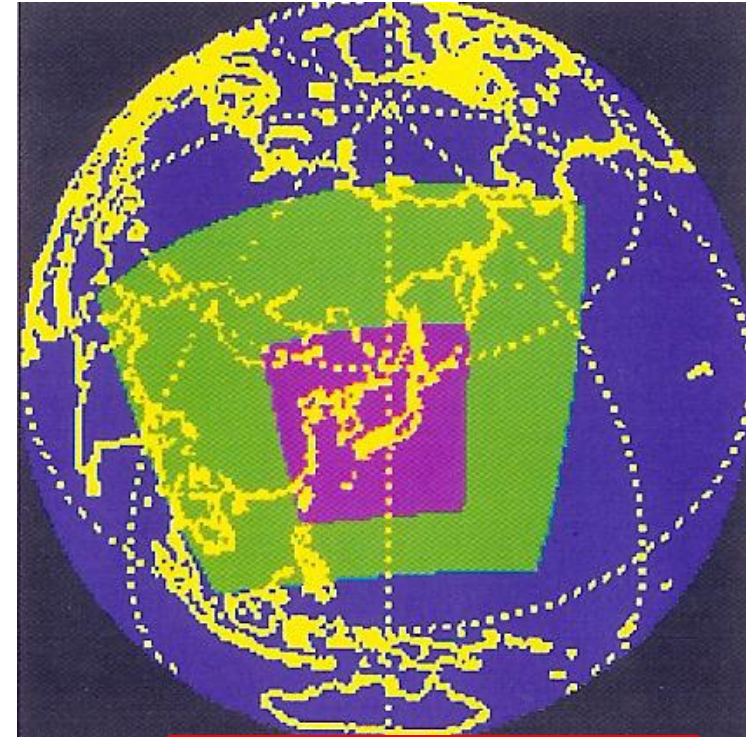
Parametrization schemes: submodels of the major atmospheric model –
Use model grid box values to obtain the contributions of subgrid processes

Hierarquia dos Modelos Numéricos Atmosféricos

Globais: Acompanhamento dos padrões de escala sinótica para todo o globo.

Regionais: Aplicação semelhante aos modelos globais, mas com resolução maior sobre uma área limitada de interesse.

Mesoescala: Acrescenta detalhes aos padrões de escala sinótica previstos no modelo regional.



Um **modelo numérico** constitui-se de:

1. **Pré-processamento**

Geração de **condições iniciais**, inicialização (controle das ondas de gravidade), TSM, umidade do solo, albedo, etc

2. **Dinâmica**

- Esquema de integração temporal
- Advecção horizontal
- Advecção vertical
- Termo de Coriolis
- Contorno lateral
- Difusão horizontal

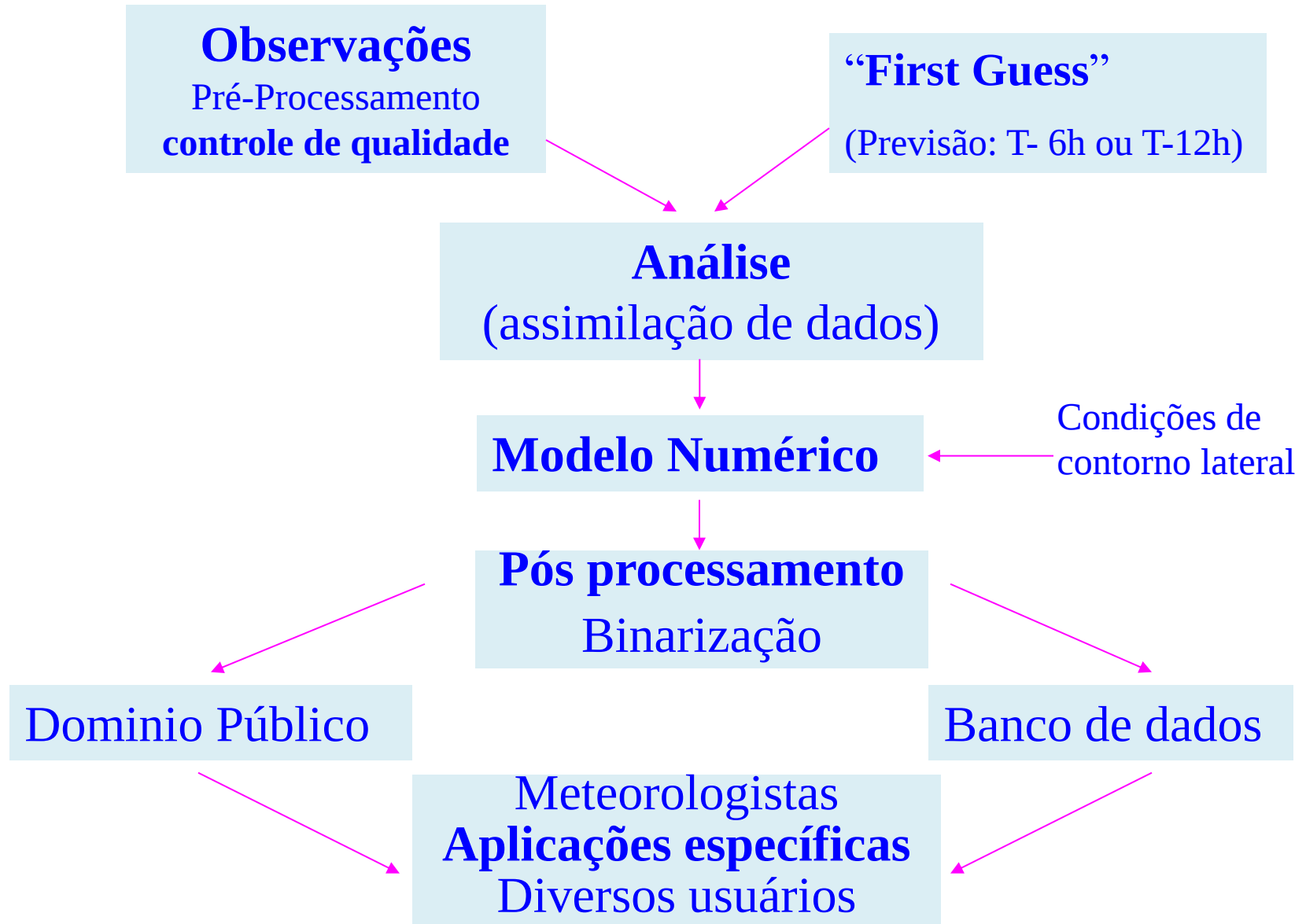
3. **Física**

- Precipitação convectiva (esquema de convecção profunda e rasa)
- Precipitação estratiforme (microfísica de nuvens),
- Turbulência atmosférica (PBL)
- Aquecimento/resfriamento radiativo (esquema de radiação)
- Transferência de água e energia na biosfera (esquemas de superfície continental)

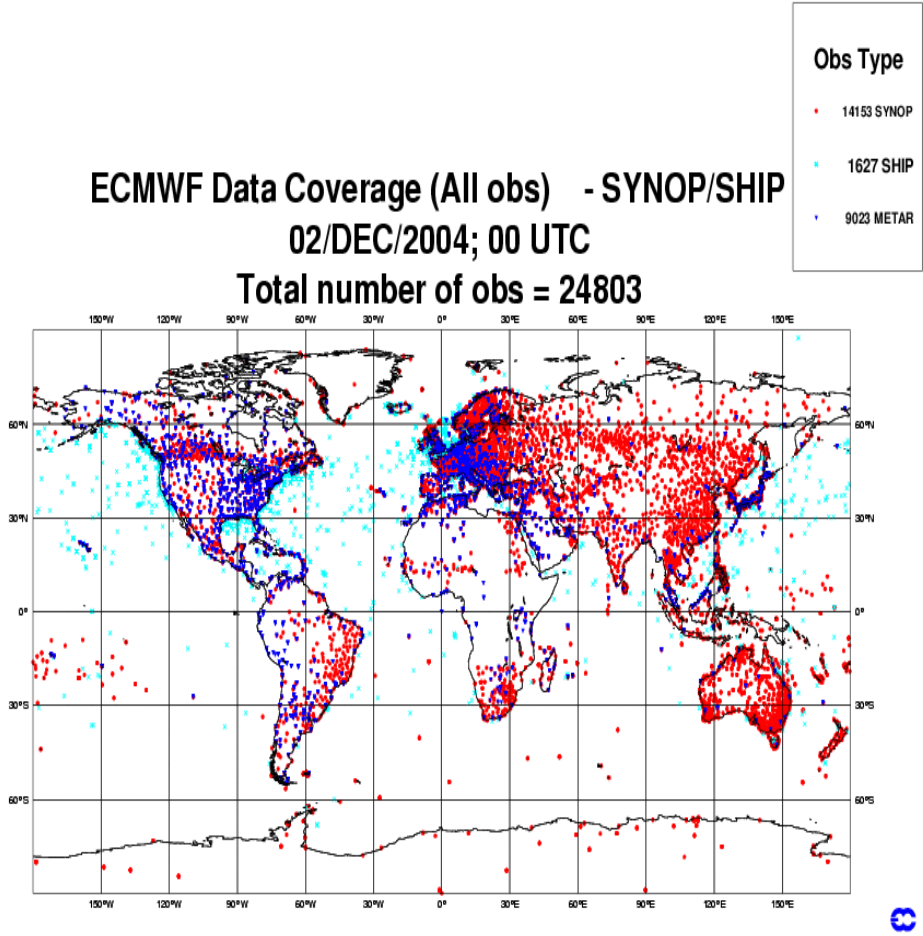
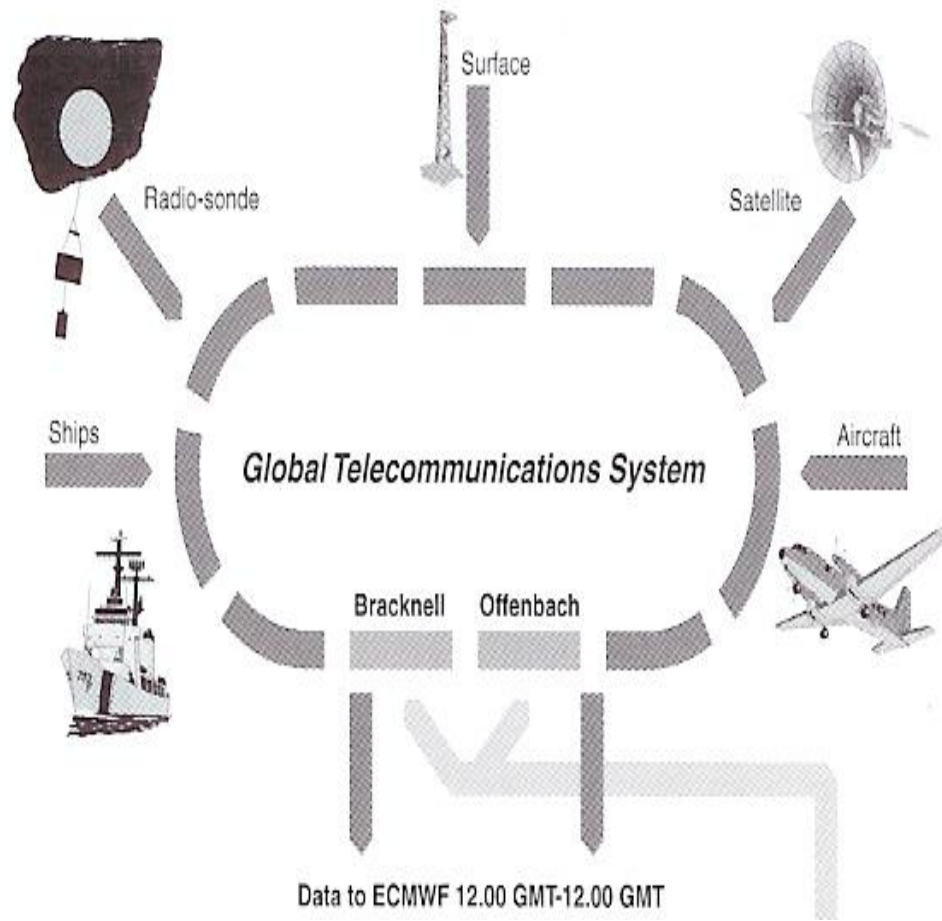
4. **Pós-processamento**

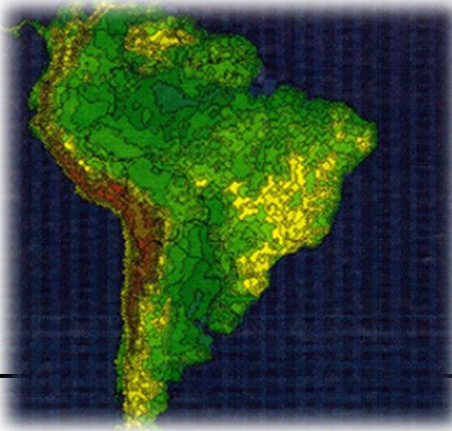
- Interpolação das variáveis do modelo para grade mais simples: lat/lon regular, níveis de pressão
- Cálculo de variáveis mais adequadas ao uso, ex: Pnmm, cape, li, convergência de umidade, etc.

Etapas para produzir PNT



OBSERVAÇÕES METEOROLÓGICAS SIMULTÂNEAS (SINÓTICAS)





Eta Model

Operational characteristics at INPE

• **Domains**

- Most part of South America
- Southeast Brazil
- Northeast Brazil

- **Resolution:**
 - 40 km/38 layers;
 - 15km/50 layers;
 - 10km/50 layers;
 - 5km/50 layers NH

• **Grid-point model**

- Arakawa E grid and Lorenz grid

• **Eta vertical coordinate** (Mesinger, 1984)

• **Prognostic variables:**

- T, q, u, v, p_s , TKE, cloud water/ice, hydrometeors

• **Time integration:**

- 2 level, split-explicit

- **Adjustmet:** forward-backward

- **Advection:** first forward and then centered

• **Convection:**

1. Betts-Miller-Janjic scheme,
2. Kain-Fritsch schme

• **Stratiform rain:**

1. Zhao scheme
2. Ferrier scheme

• **Turbulence:**

- Mellor Yamada 2.5, MO surface layer, Paulson functions

• **Radiation:**

- GFDL package

• **Land surface scheme:**

- NOAH scheme, 4 soil layers,

• **Initial conditions**

- NCEP T126L28 analyses, T213L42

• **L.B.C.**

- CPTEC T126L28 GCM, T213L42, updt 6/6 h,

- **Initial soil moisture:** monthly climatology

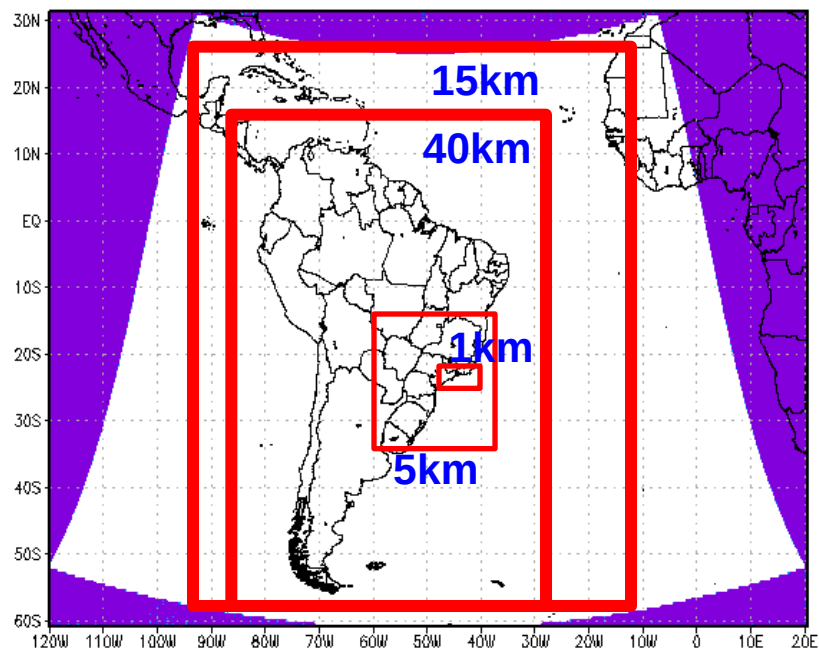
- **Initial albedo:** seasonal climatology

SUITE OPERACIONAL DO MODELO ETA

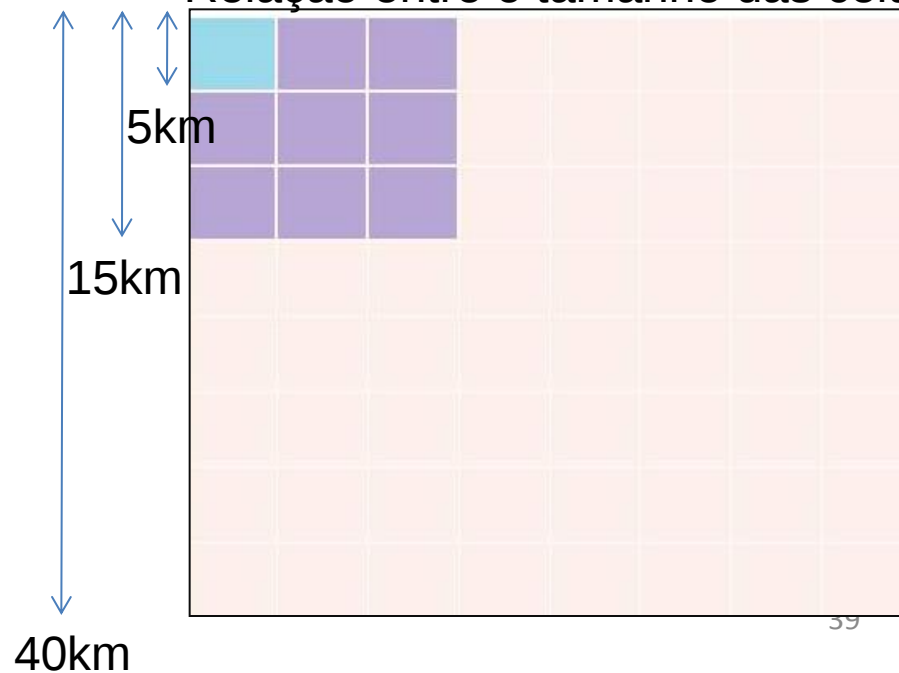
Versão	Prazo de previsão	Resolução horizontal	Frequência de atualização	Área de abrangência	Núm. de Membros
Altíssima resolução	3 dias	1km	1x/dia, 00UTC	Entre RJ e SP	1
Ensemble – curto prazo	3 dias	5km	2x/dia, 00 e 12UTC	Sul e Sudeste	5
Determinístico - médio prazo	11 dias	15 km	2x/dia, 00 e 12UTC	América do Sul e Central	1
Ensemble médio prazo	11 dias	40km	1x/dia, 12 UTC	América do Sul e Central	6
Subsazonal	60 dias	40km	1x/dia, 12 UTC	América do Sul e Central	1
Climática sazonal	135 dias	40km	1x/mês, 12 UTC	América do Sul e Central	5

SUITE OPERACIONAL DO MODELO ETA

Áreas cobertas do modelo



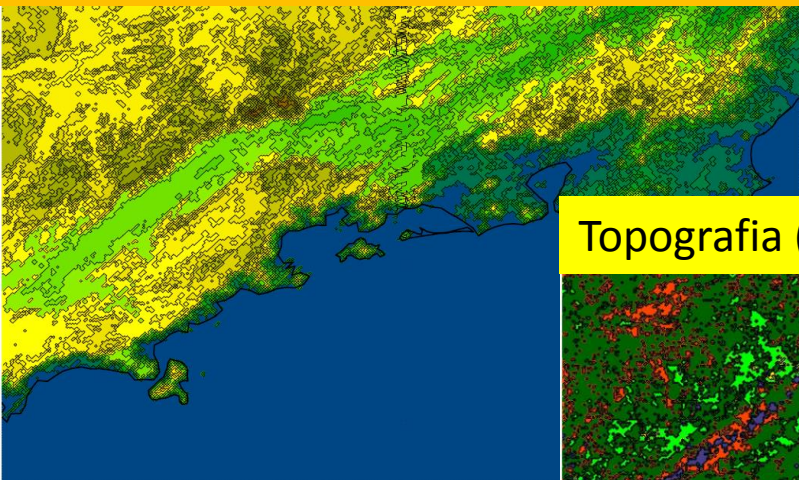
Relação entre o tamanho das células



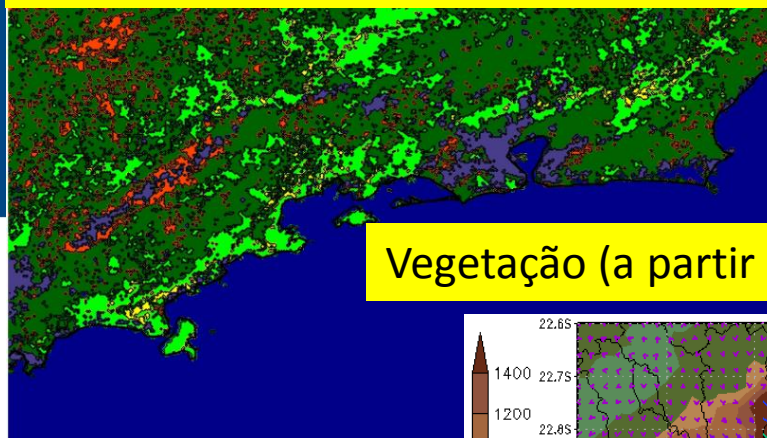
* Modelo Eta/INPE *

Previsão com antecedência de 3 dias, em altíssima resolução, 1 km, sobre região de topografia complexa, produzida 1x/dia.

Apoio ao sistema de emergência da Usina de Angra



Topografia (a partir de mapas INPE+USGS)

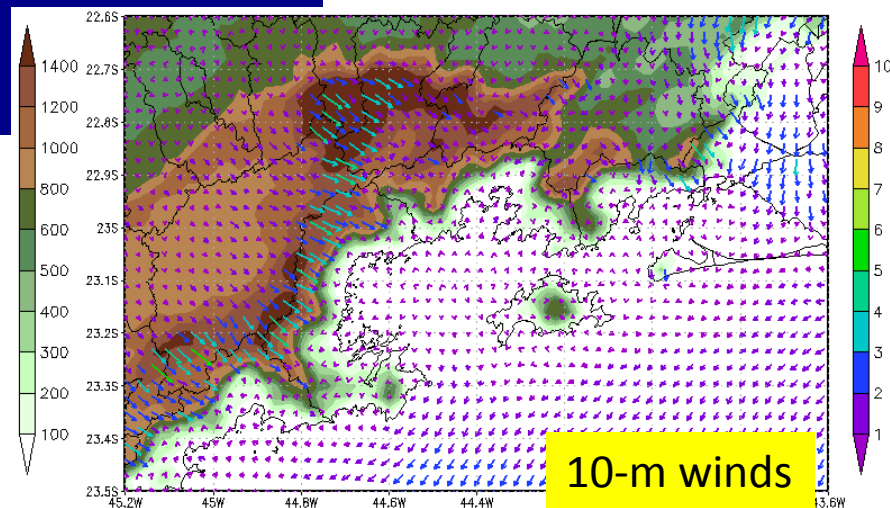


Vegetação (a partir de mapas USGS+INPE+CNEN)

- Convecção cumulus explícita
- Modificação na camada limite superficial
- Modificação no esquema de difusão
- Substituição das funções de estabilidade
- Modificação na microfísica de nuvens

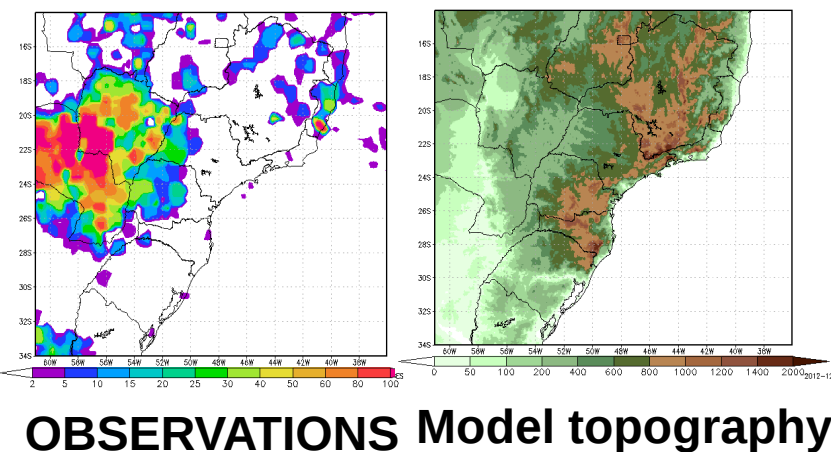
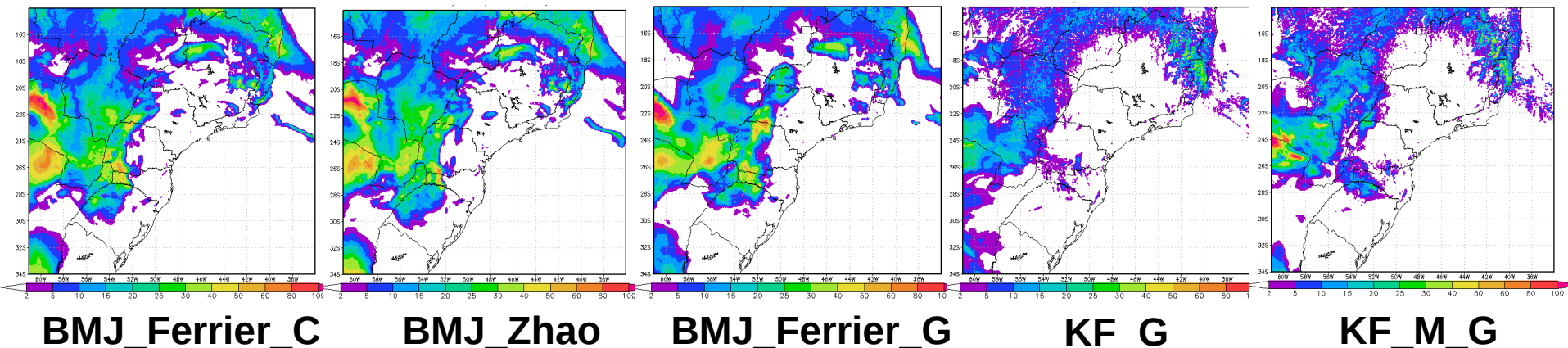
(Artigo em preparação)

número de pts: 309 x 433 x 50



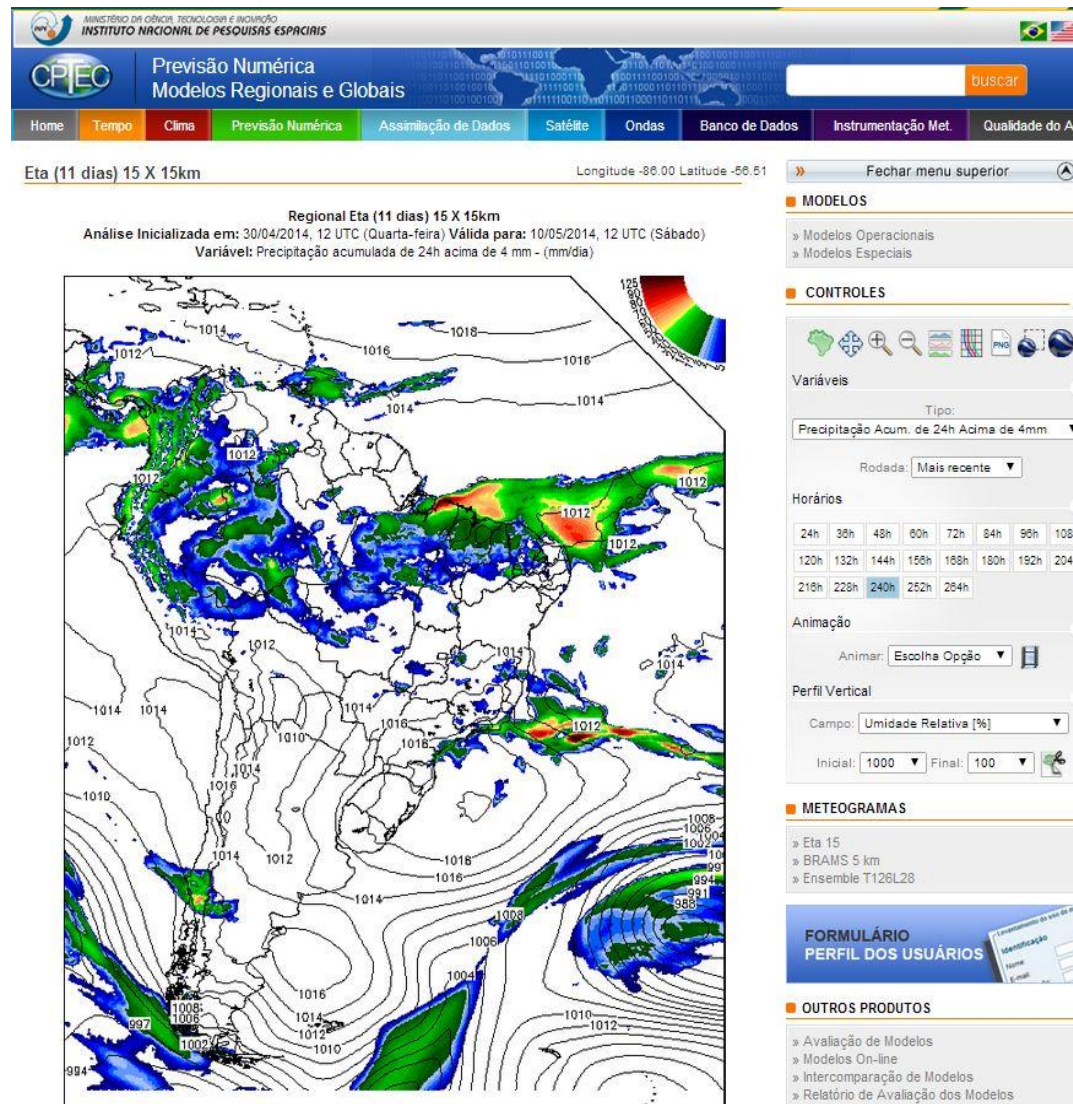
Previsão por ensemble, alta resolução, 5 km, antecedência de 3 dias.

5 membros, perturbação em processos físicos



Modelo Eta, versão Mesinger, Chou et al 2012

- Esquemas de convecção: BMJ, KF, KFM
- Esquemas de microfísica de nuvens: Ferrier, Zhao
- Condição de contorno lateral: Eta-40km, GFS
- Execução, 2x ao dia: 00 Z e 12 Z.
- Área coberta: Sul+Sudeste



- Previsão horizonte 11 dias
- Histórico para calibração de modelos de cultura ou hidrológicos:
 - 2005-2010 (1x/semana)
 - 2012-2015 (2x/dia)
- Variáveis:
 - Temperatura,
 - Precipitação,
 - Vento a 10m, 100m,,
 - Umidade relativa,
 - Radiação Solar,
 - Evaporação,
 - Umidade do solo,
 - Etc

* Modelo Eta/INPE *

Previsões sub-sazonais, 40-km, antecedência de 60 dias, atualização 1x/dia, aninhado ao Modelo Acoplado oceano-atmosfera CPTEC.

Apoio planejamento de recursos hídricos, etc.

Previsão do fim do período seco do verão de 2014 Antecedência 45 dias

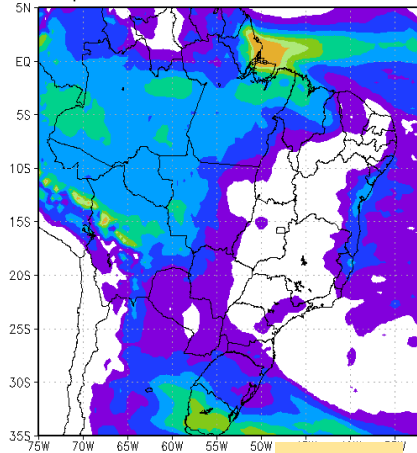
11-21/Feb2014

21/Feb-3/Mar2014

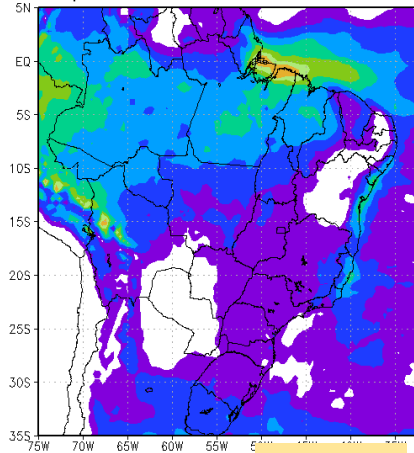
3-13/Mar2014

13-23/Mar2014

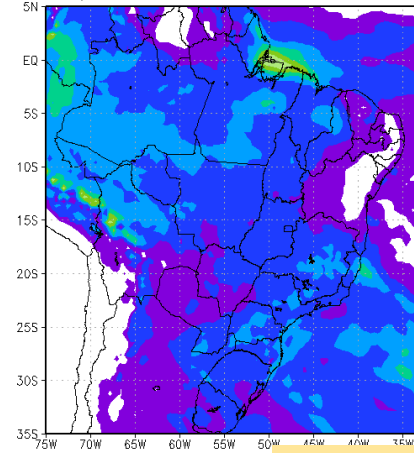
o Eta 40km, Média 201402 06/07/08/09 00 CC: OAGCM
dia Precip. 10d - Previsão 2014021100 a 2014022100
o Eta 40km, Média 201402 06/07/08/09 00 CC: OAGCM
dia Precip. 10d - Previsão 2014022100 a 2014030300
o Eta 40km, Média 201402 06/07/08/09 00 CC: OAGCM
dia Precip. 10d - Previsão 2014030300 a 2014031300
o Eta 40km, Média 201402 06/07/08/09 00 CC: OAGCM
dia Precip. 10d - Previsão 2014031300 a 2014032300



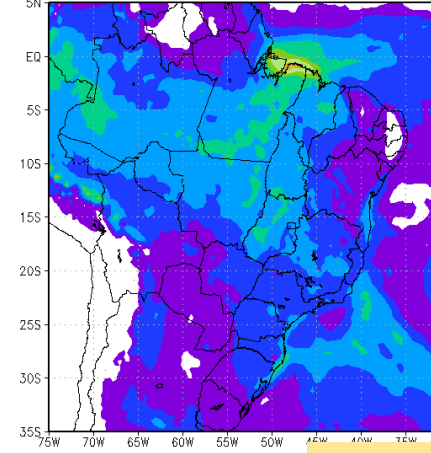
1-10



11-20



21-30



31-40

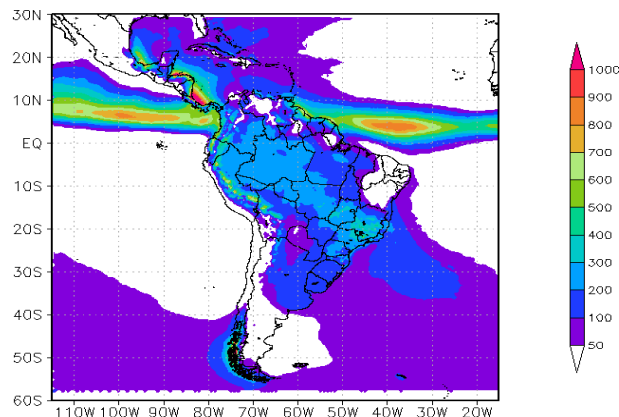
Média de 4 membros

* Modelo Eta/INPE *

Previsões sazonais (4,5 meses) com nova versão de modelo Eta climático, 40 km
Construção de previsões sazonais retrospectivas de 10 anos (2001-2010)

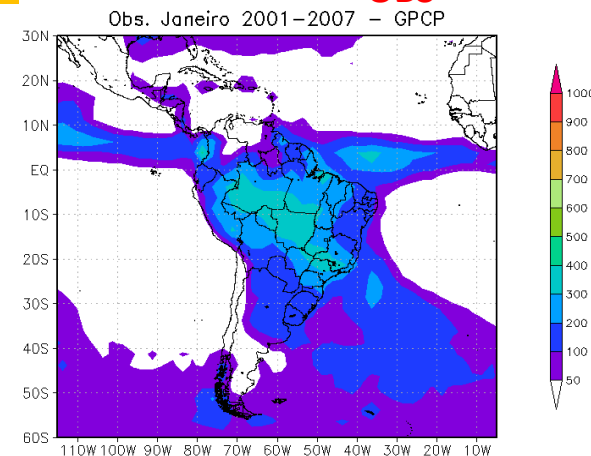
Previsão por ensemble: 9 membros

BMJ-Zhao-AGCM

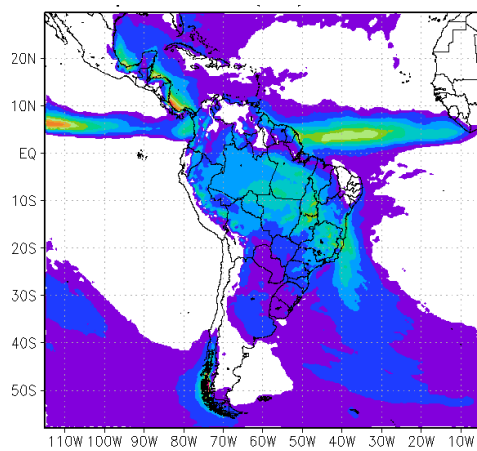


Média de 10 anos, 5
 membros da previsão
 para JANEIRO, a partir
 de perturbação de
 condição inicial

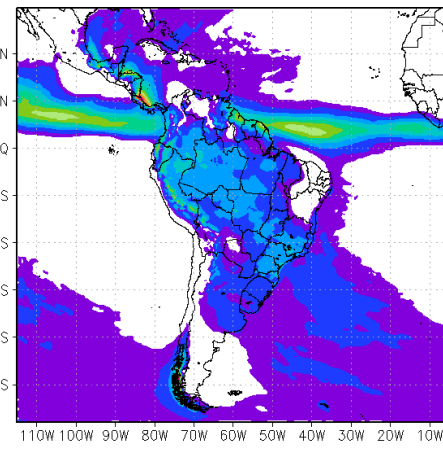
OBS



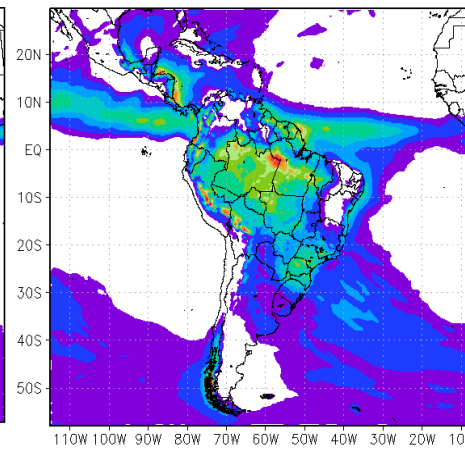
BMJ-Zhao-OGCM



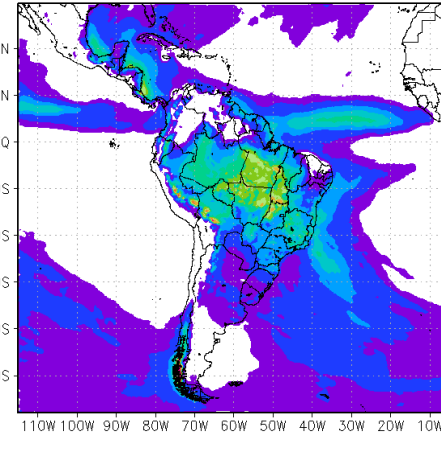
BMJ-FERR-AGCM



KF-FERRIER-AGCM



KF-FERRIER-OAGCM



Média de 10 anos da previsão para JANEIRO, a partir de perturbação de
 física e de condição de contorno inferior e lateral