



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Modelagem Numérica (Introdução a PNT)

Chou Sin Chan

chou@cptec.inpe.br

III WorkEta

Cachoeira Paulista, 25 a 29 de outubro de 2010

MODELAGEM DA ATMOSFERA

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

MODELAGEM DA ATMOSFERA

Equações Primitivas

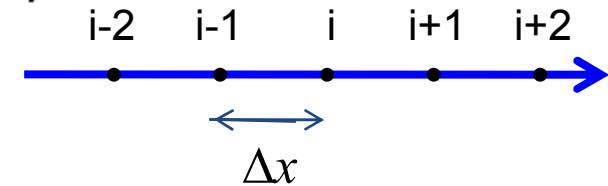
1. Vento horizontal $\frac{DV_H}{Dt} = -2\Omega_z \times V_H - \frac{1}{\rho} \nabla_H p + F_H$
2. Equil hidrostático $0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$
3. da continuidade $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V$
4. da termodinâmica $c_v \frac{DT}{Dt} = -p \frac{D\alpha}{Dt} + Q$
5. do estado $p = \rho RT$
6. umidade do ar $\frac{Dq}{Dt} = Q'$

Equações diferenciais parciais não-lineares

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:

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

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

Derivada Primeira (1-2):

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

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

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)

Diferenças finitas

Equação de Advecção:

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

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 advectada de uma distância menor que Δx no intervalo de tempo Δt .

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.



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

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

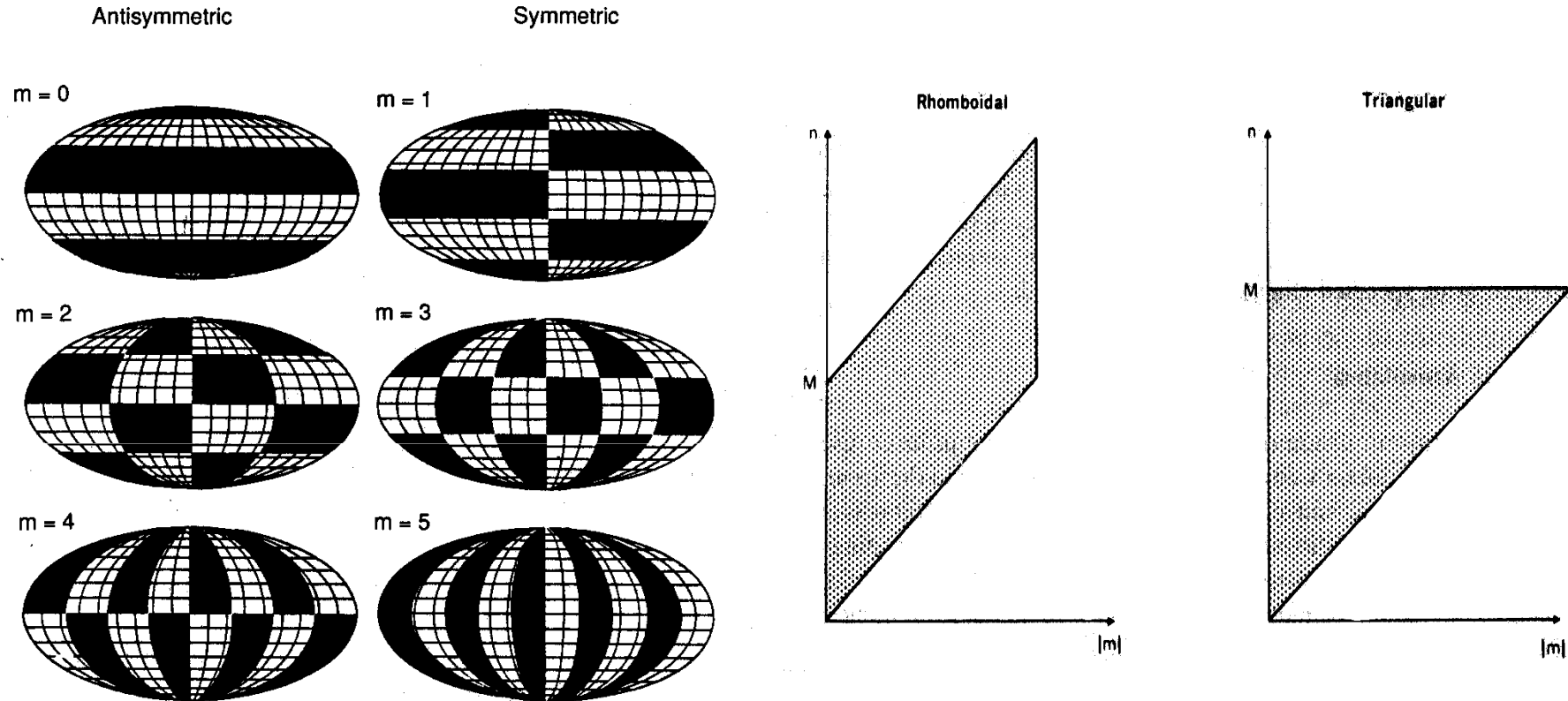
1950 - Charney, Fjortoff, Von Neuman realizam a 1a. previsão numérica de tempo a partir da equação da vorticidade absoluta > *previsão da altura geopotencial de 500mb.*

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

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



Modelo Espectral



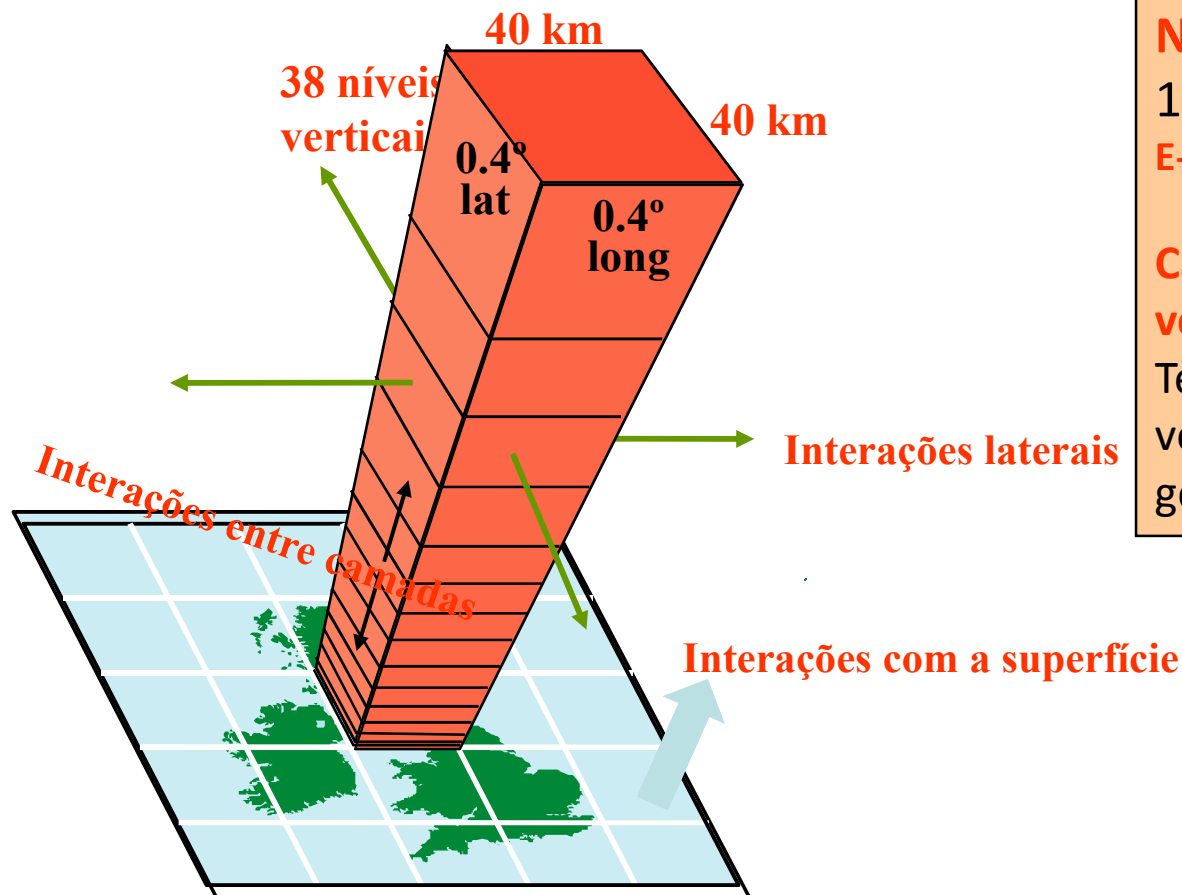
truncamento

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

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:

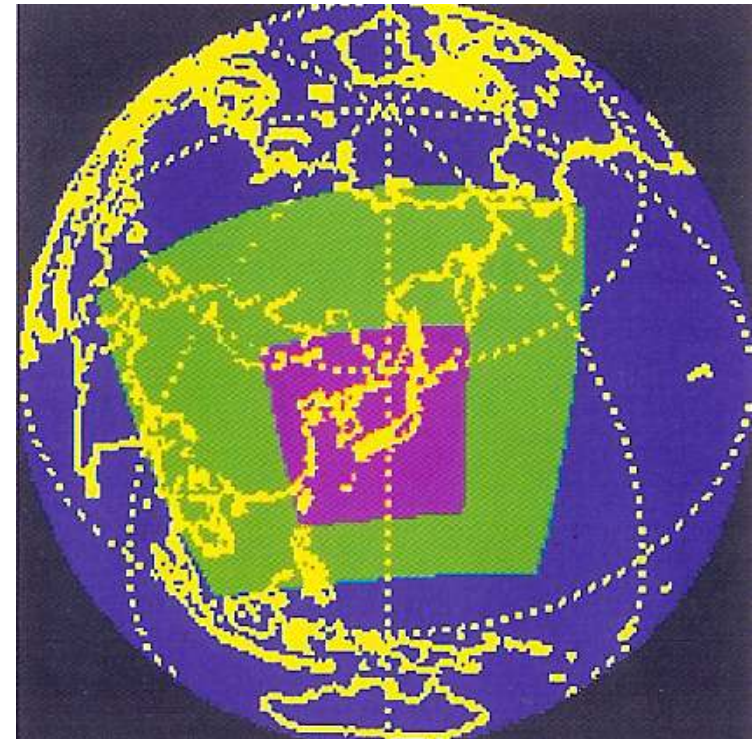
Temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, altura geopotencial.

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.

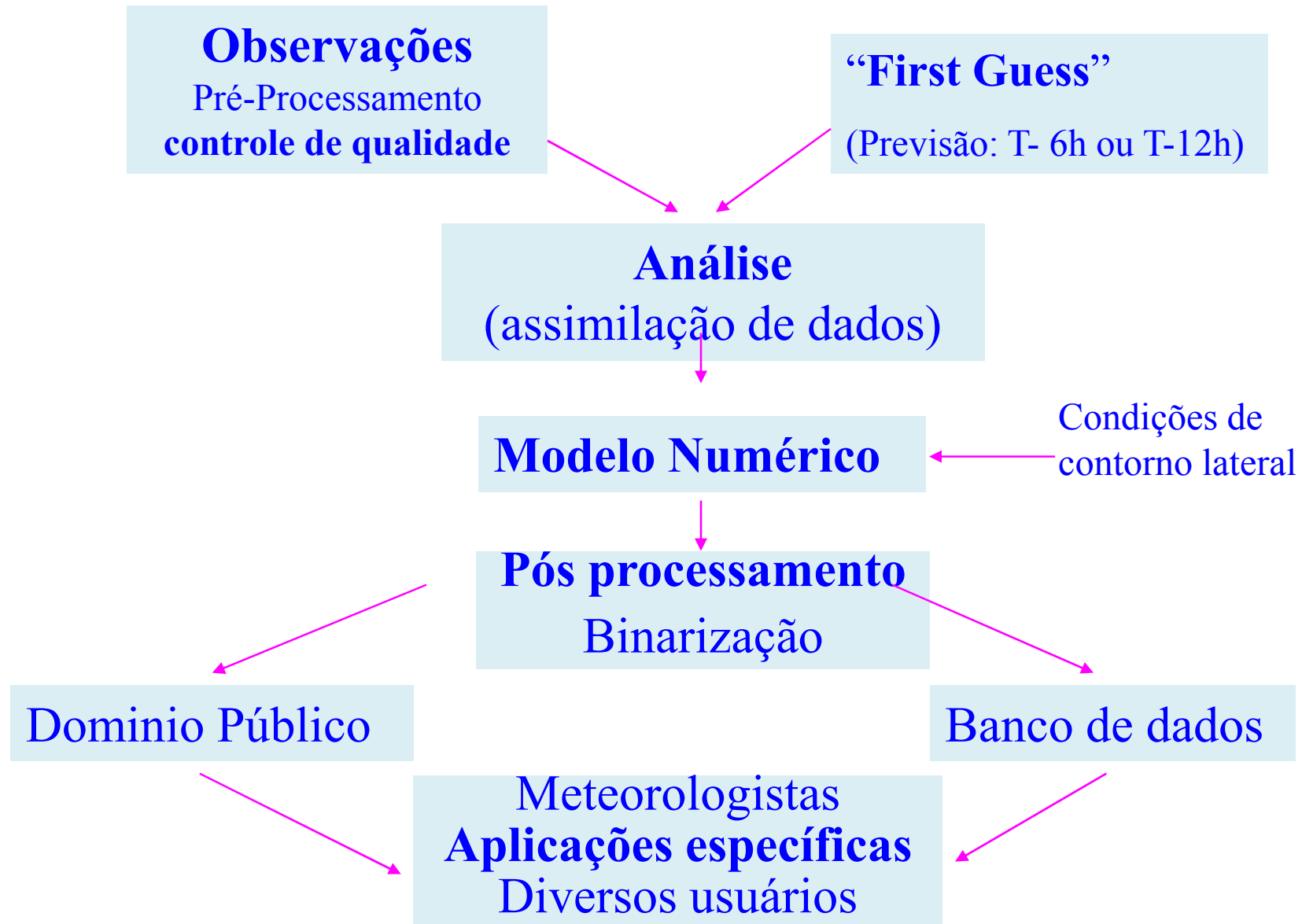
Mesoescala: Acrescenta detalhes aos padrões de escala sinótica previstos no modelo regional.



Interação entre os modelos

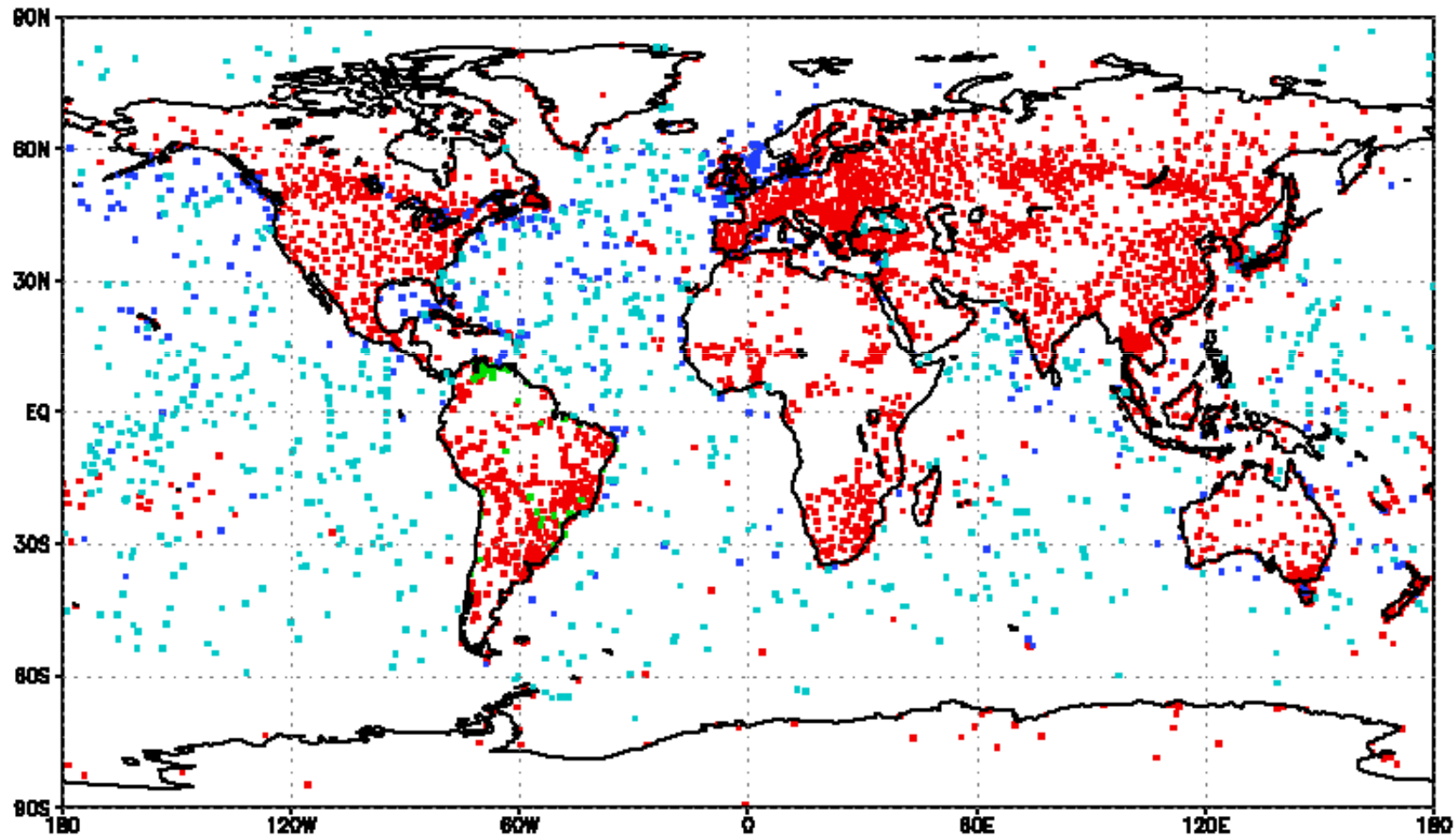


Etapas para produzir PNT



CPTEC Surface Observations on 12z 18 June 2002, $\pm 3h$

Distribuição dos dados: Superfície 18 Jun 2002 12Z [-3h:+3h]



Synop
4166

Metar
122

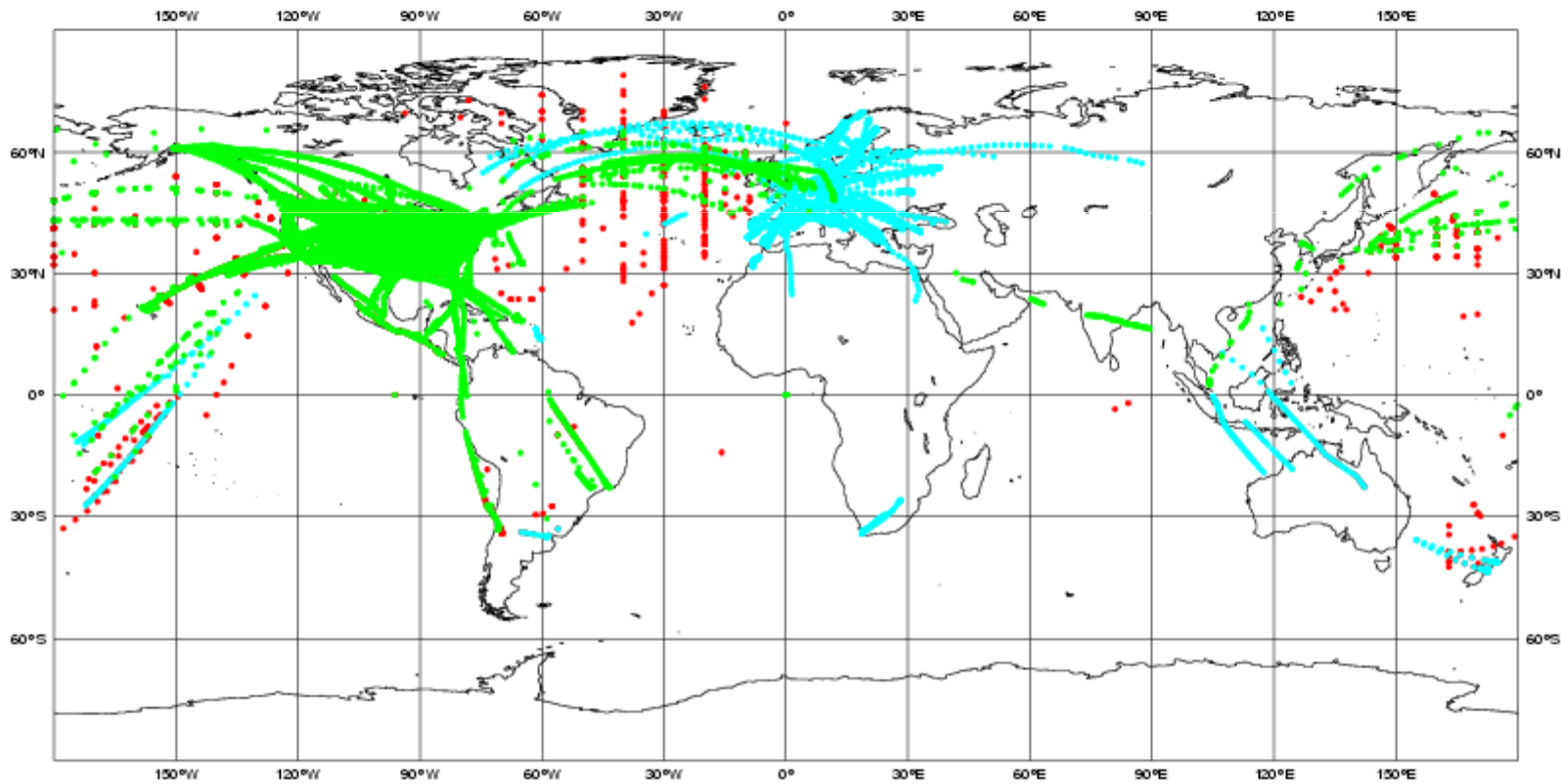
Ship
770

Buoy
3065

ECMWF Data Coverage (All obs) - AIRCRAFT
18/JUN/2002; 12 UTC
Total number of obs = 40854

Obs Type

- 5579 AIREP
- 7730 AMDAR
- 27545 ACARS



Assimilação de dados > Análises

- Verificação da acurácia dos dados: localização, sintaxe, erros grosseiros.
- Interpolação das observações (distribuídas irregularmente) em uma grade regular.

$$a = p + K(o - Lp)$$

$$L + K = 1$$

a=análise

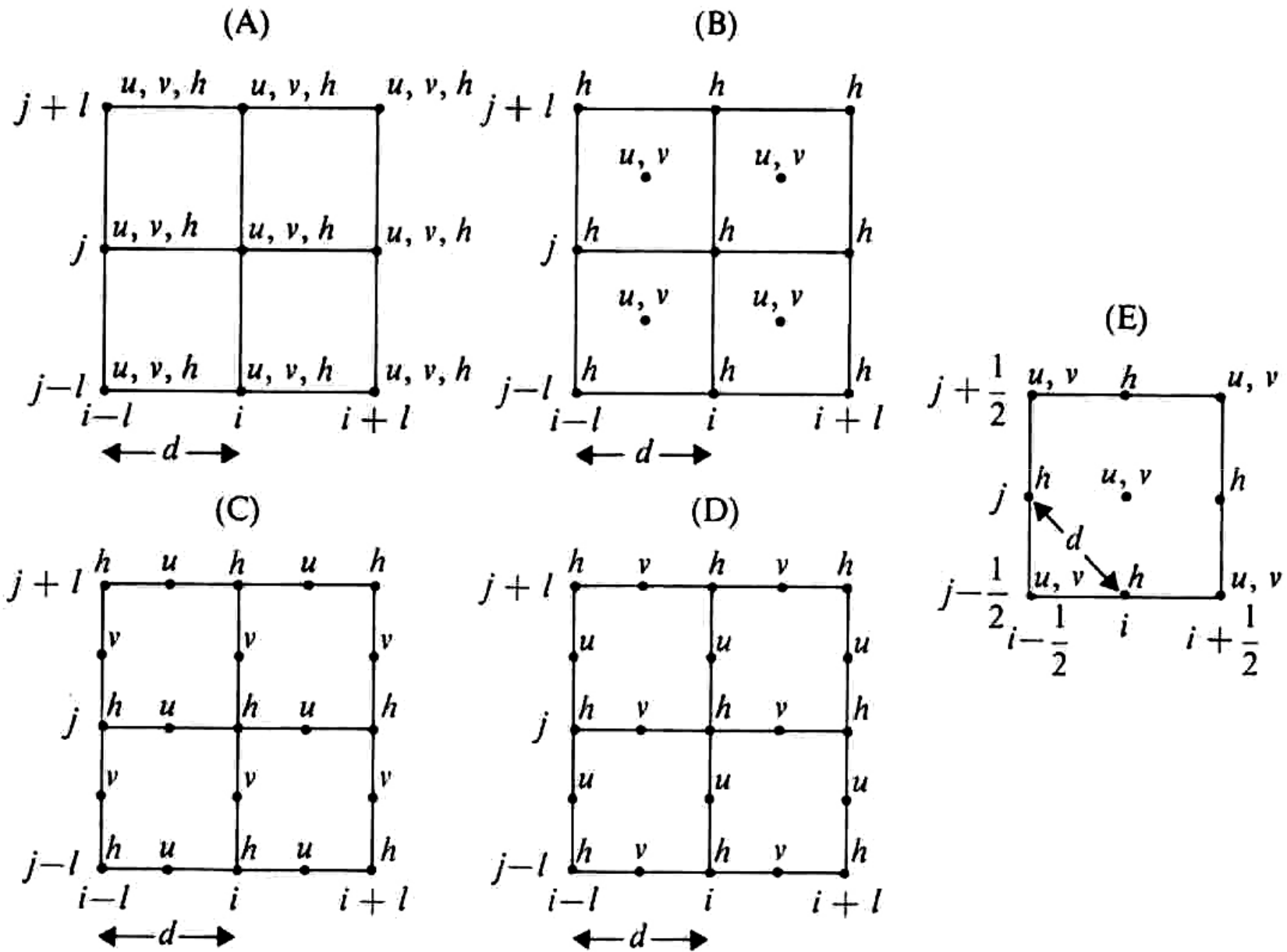
p= previsão

o= observação

L, K : pesos que indicam a acurácia da previsão e da observação

K: covariâncias de erros entre previsão e observação

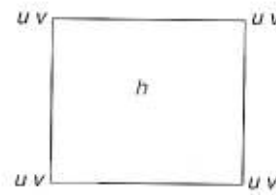
L: operador da observação



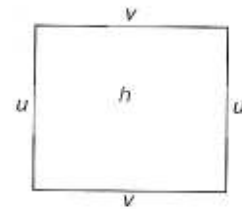
Grades propostos por Arakawa



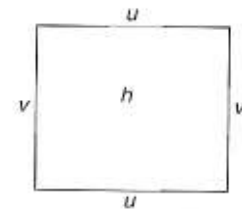
A



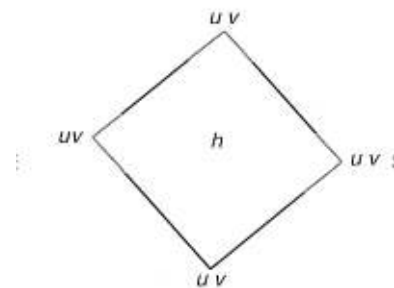
B



C



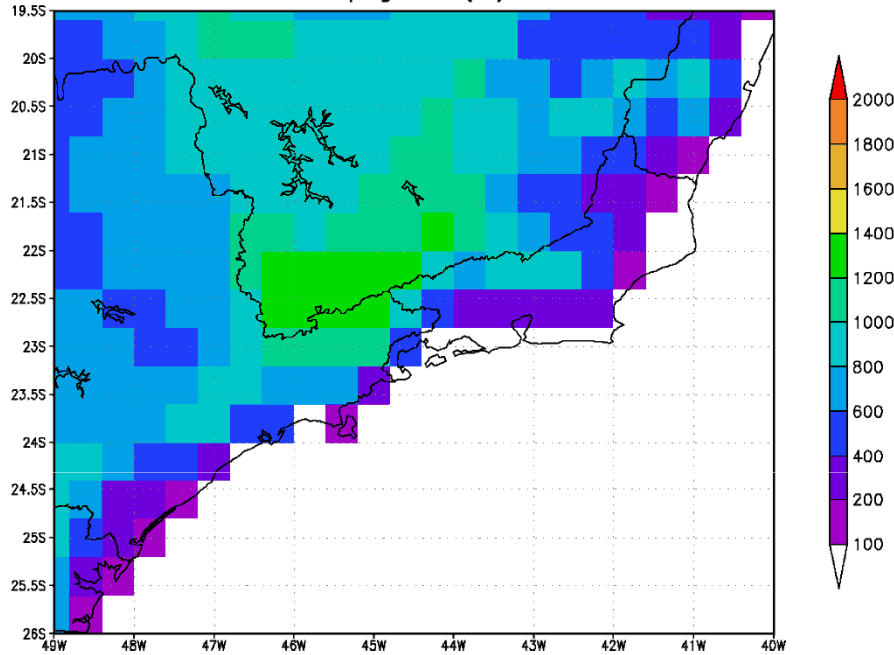
D



E

40 km

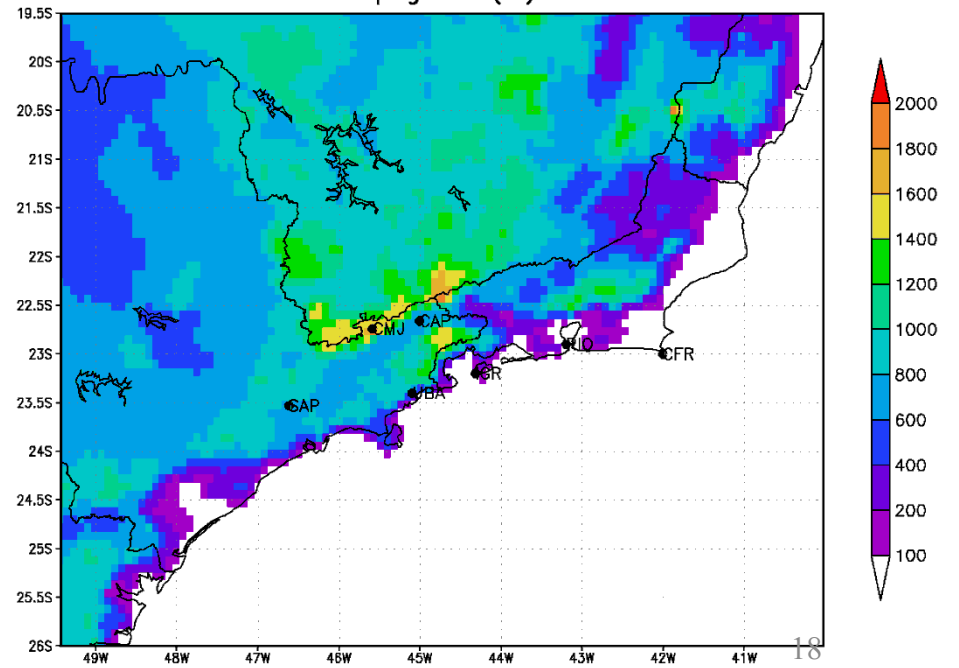
Modelo Regional Eta 40km
Topografia (m)



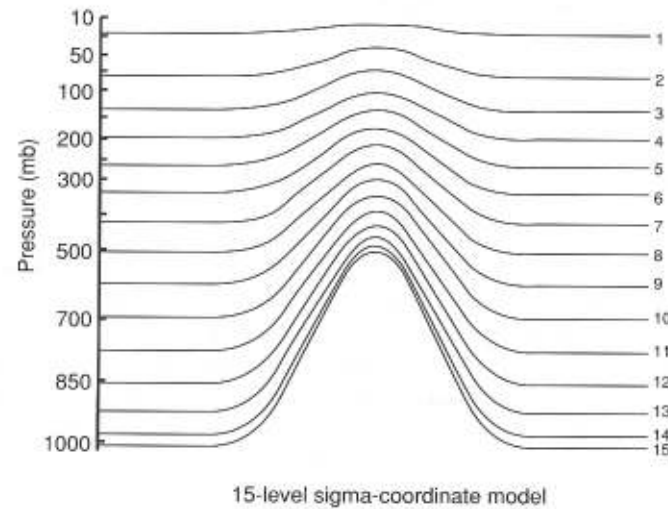
Escolha da resolução horizontal: Impacto sobre a caracterização da superfície

10 km

Modelo Regional Eta 10km
Topografia (m)



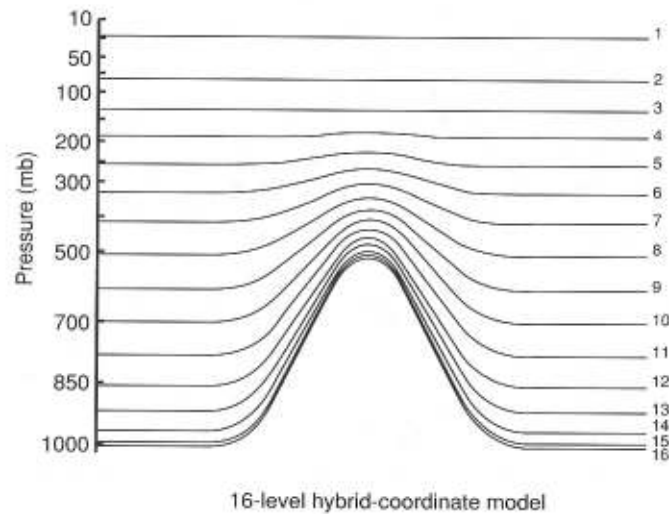
Coordenadas verticais



sigma

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

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



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

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

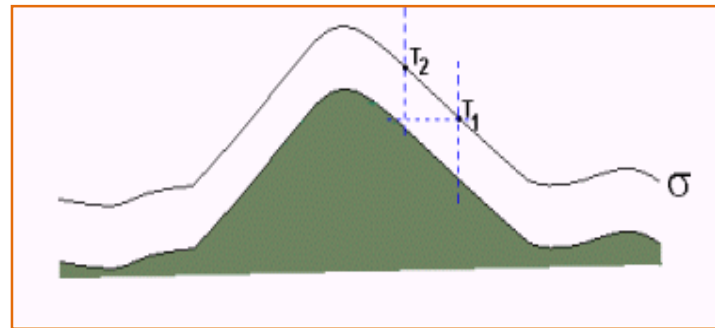
híbrida

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

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



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

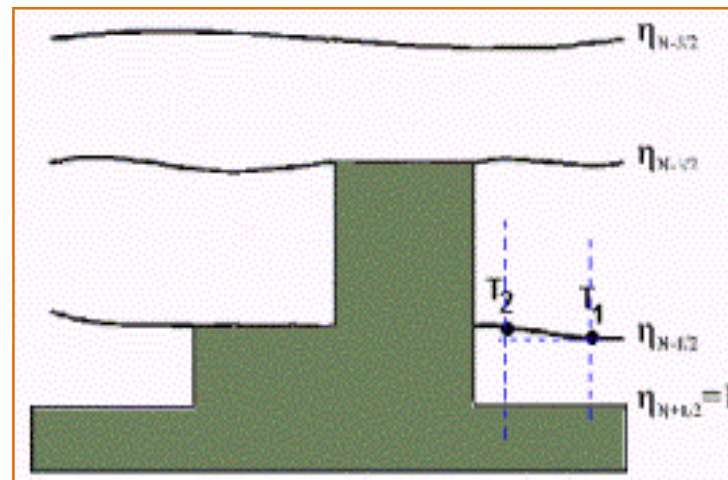
$$\eta = (0, 1)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_z \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} = \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \right)_z$$

eta

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

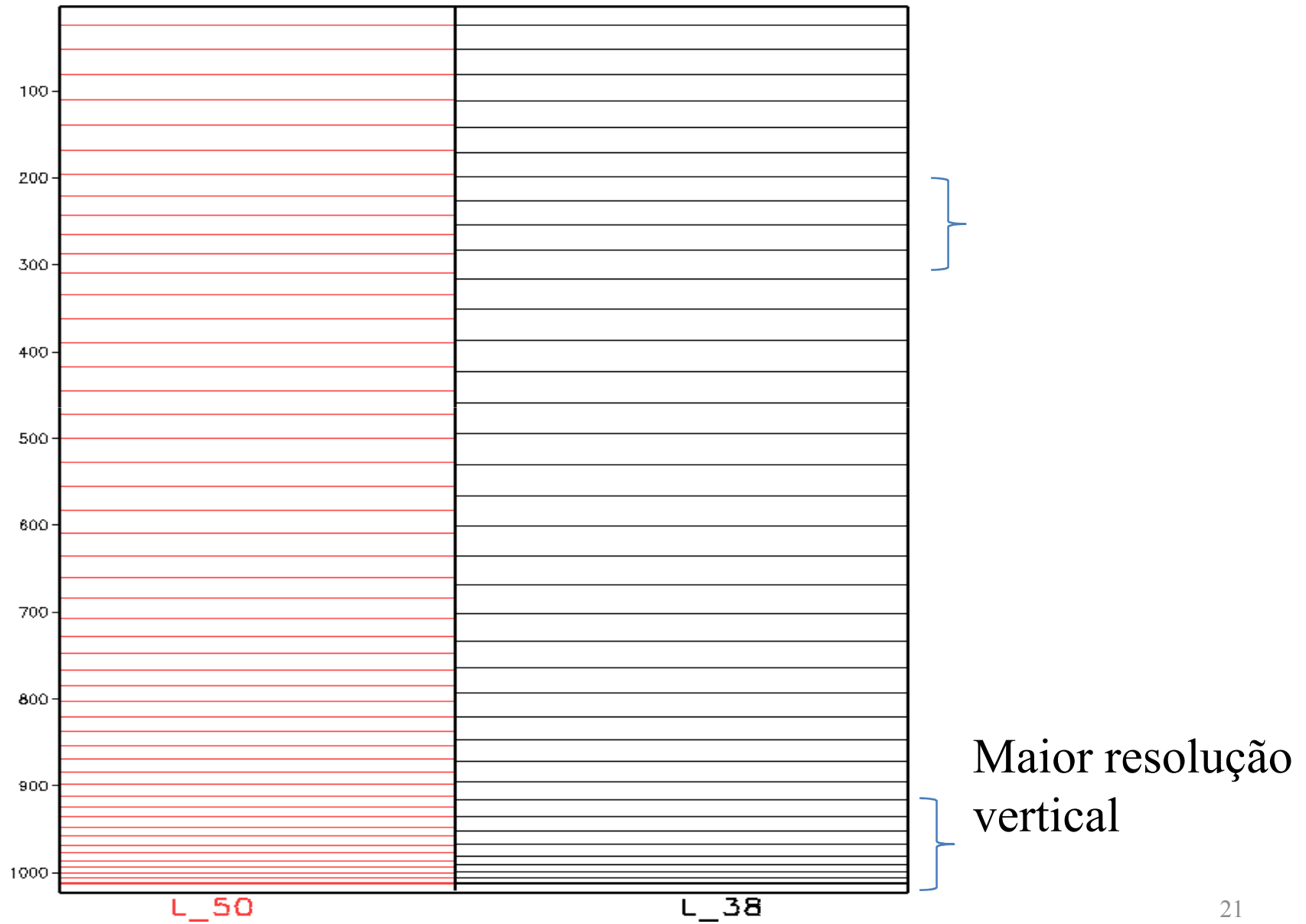
$$\eta_s = \frac{P_{ref}(z_S) - P_T}{P_{ref}(0) - P_T}$$



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

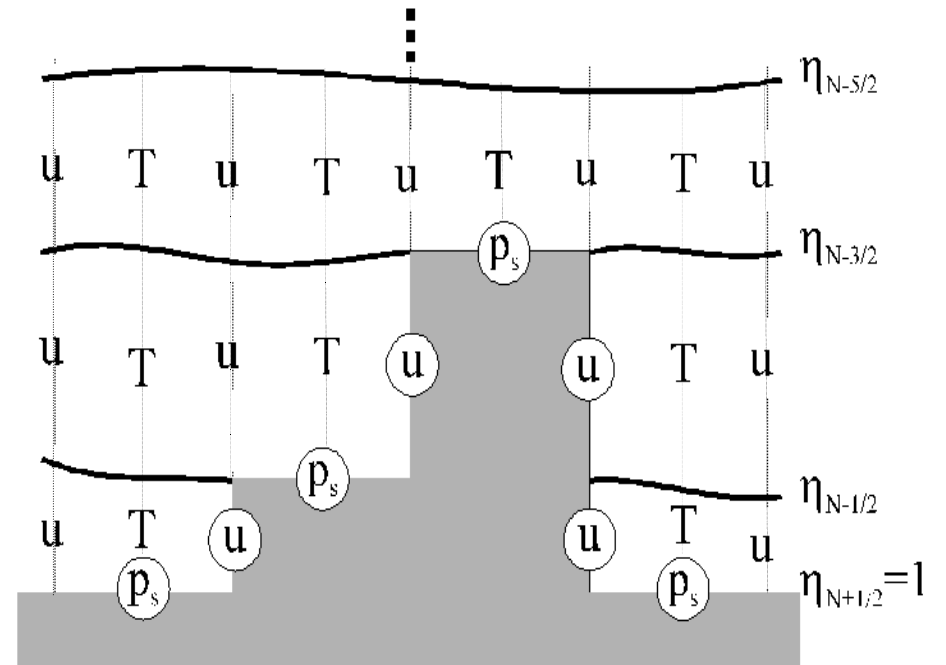
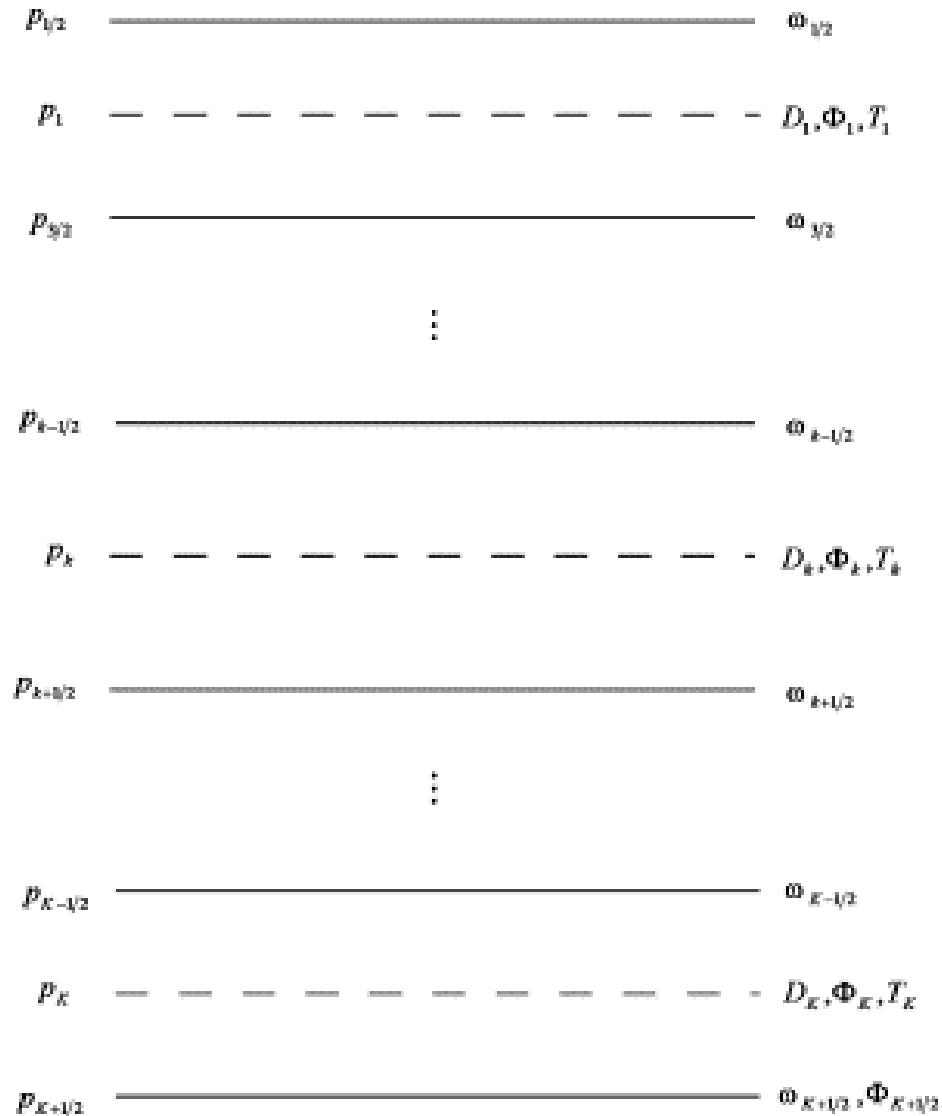
O topo das montanhas coincide com as superfícies de nível do modelo

Distribuição Vertical das superfícies eta

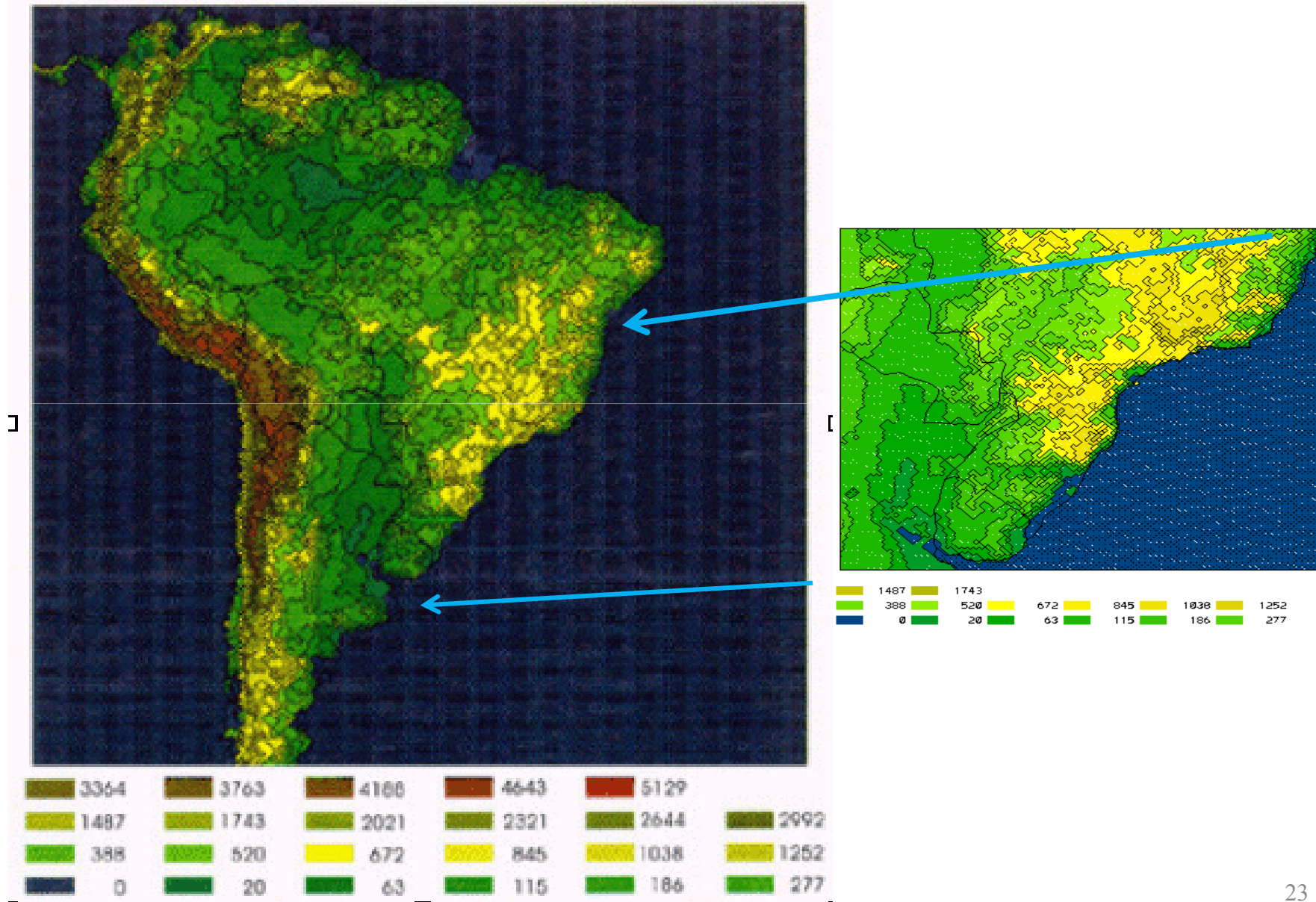


Topografia e distribuição vertical de variáveis

Grade vertical de Lorenz



Step-topography



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

1. **Pré-processamento**

Geração de **condições iniciais**, inicialização (controle das ondas de gravidade), SST, 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)

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.

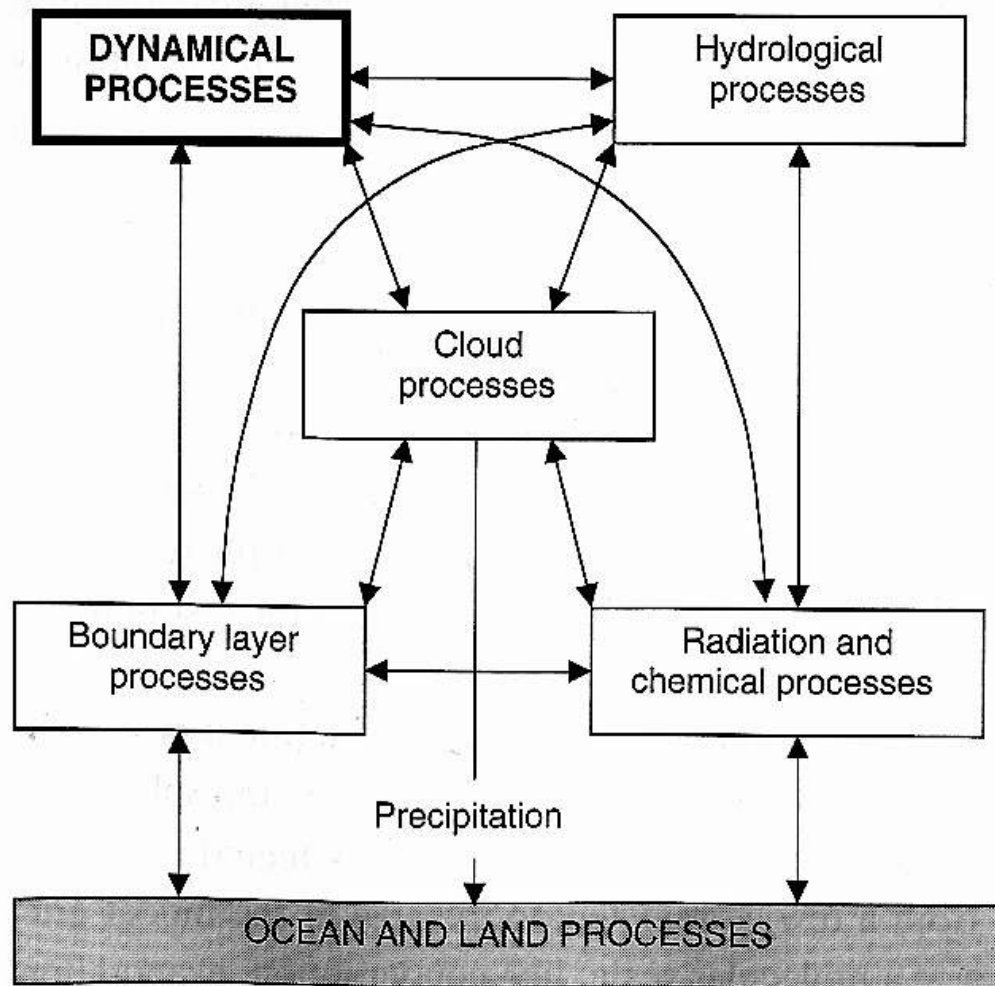
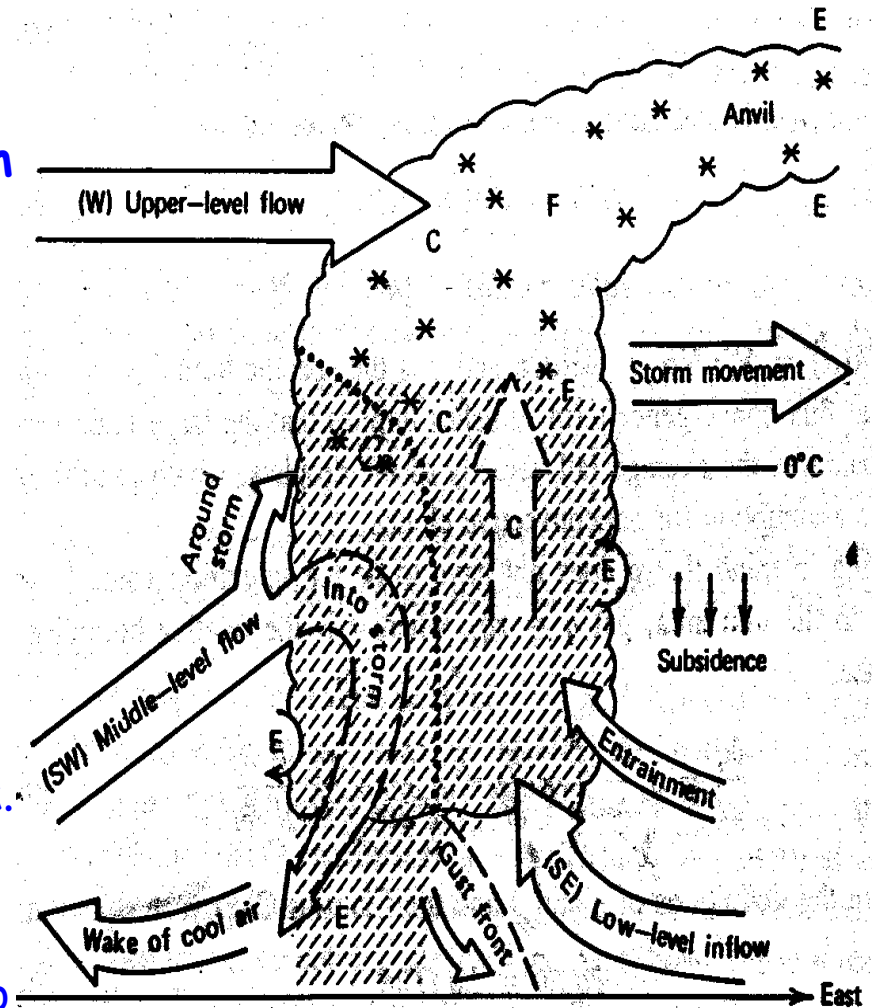


Figure 4.1.1: Physical processes in the atmosphere and their interactions. The dynamical processes for resolvable scales, in bold, are explicitly computed by the model “dynamics” (discussed in Chapters 2 and 3). The other subgrid-scale processes are parameterized in terms of the resolved-scale fields.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

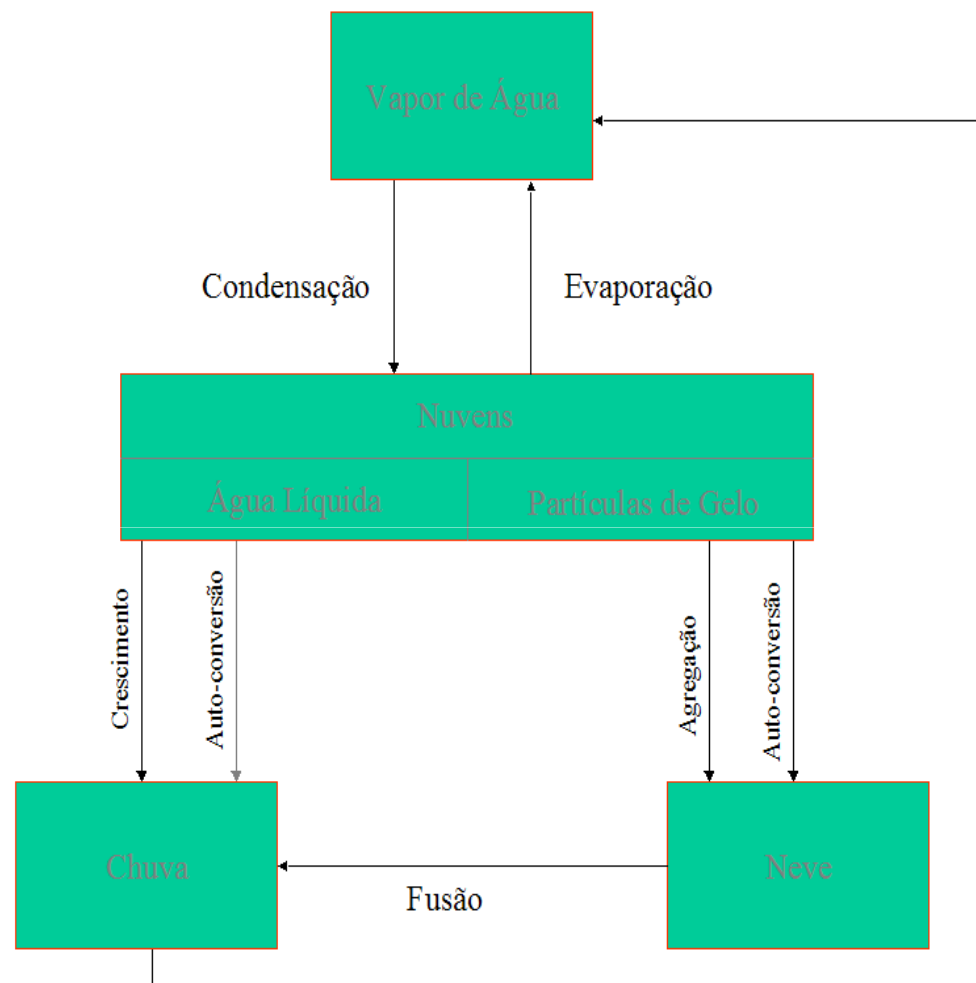
Parametrização de NUVENS CUMULUS

- Nuvens Cumulus podem se organizar em aglomerados e seus efeitos são percebidos na grade da resolução do modelo.
- Para o modelo a área ocupada pela nuvem é considerada grande o suficiente para conter o aglomerado, mas ainda pequeno em relação ao tamanho da grade do modelo.
- A grande escala estabiliza o ambiente, o esquema de convecção atua em remover a instabilidade convectiva.
- Os perfis de temperatura e umidade do modelo são alterados para perceber a atividade convectiva e produção de chuva.
- Os fluxos convectivos de umidade e calor são vistos a partir de médias numa área das equações da conservação de massa e do calor.



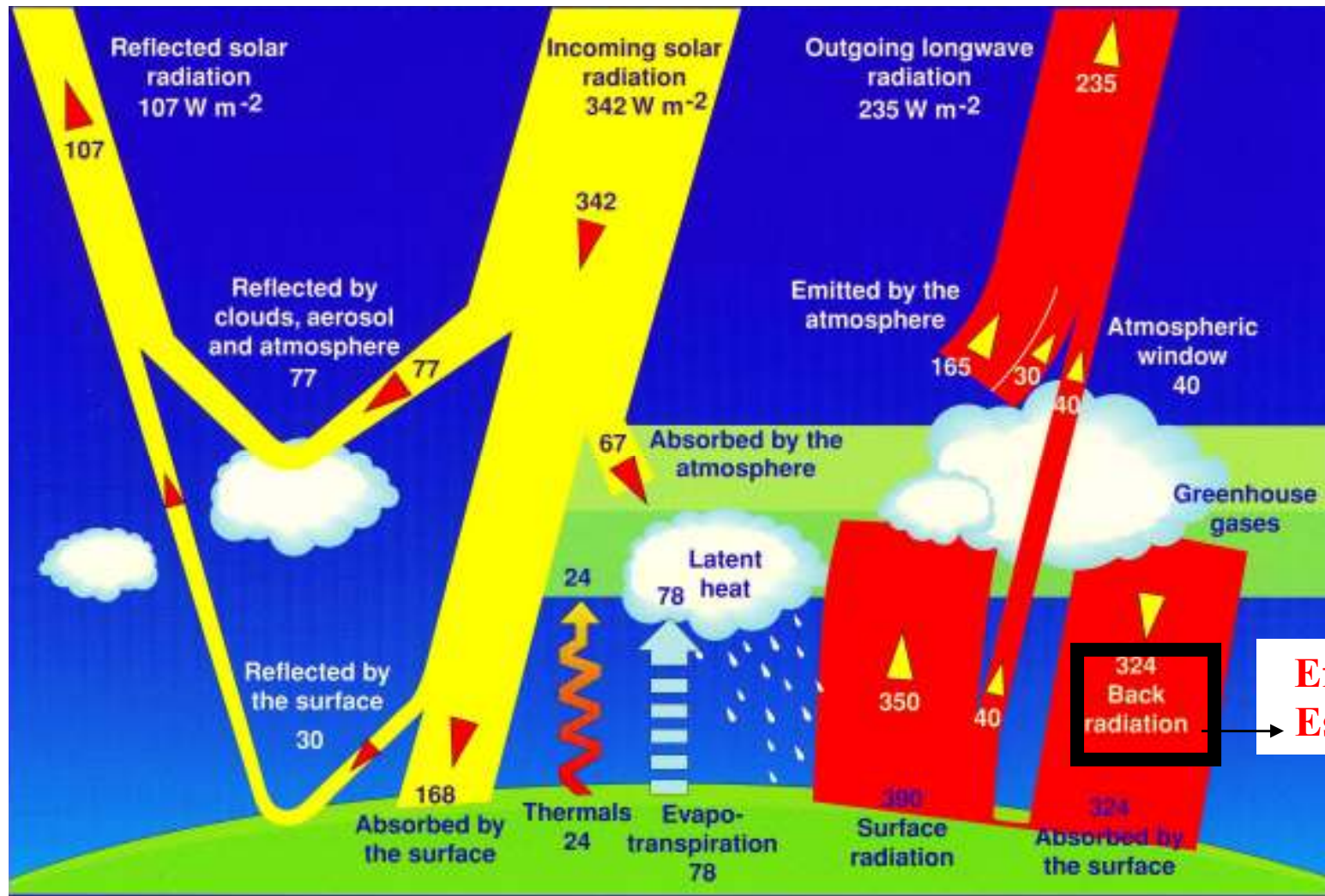
Parametrização de NUVENS ESTRATIFORMES (microfísica de nuvens)

1. A precipitação de grande ocorre quando: $RH > RH_c$
2. $RH < 100\%$; RH_c tende a 100% com o aumento da resolução do modelo;
3. Única variável a ser prevista \Rightarrow taxa de mistura de nuvens de água(/gelo);
4. As frações de nuvens calculadas nesse esquema são usadas na parametrização dos processos radiativos.
5. Esquemas mais complexos incluem processos microfísicos das nuvens: neve, granizo, saraiva, etc. (versão previsão de tempo do Modelo Eta)



Zhao et al 1997

Interação entre a radiação solar e a atmosfera



Efeito Estufa

Radiation Balance of the Earth (Jeffrey T. Kiehl)

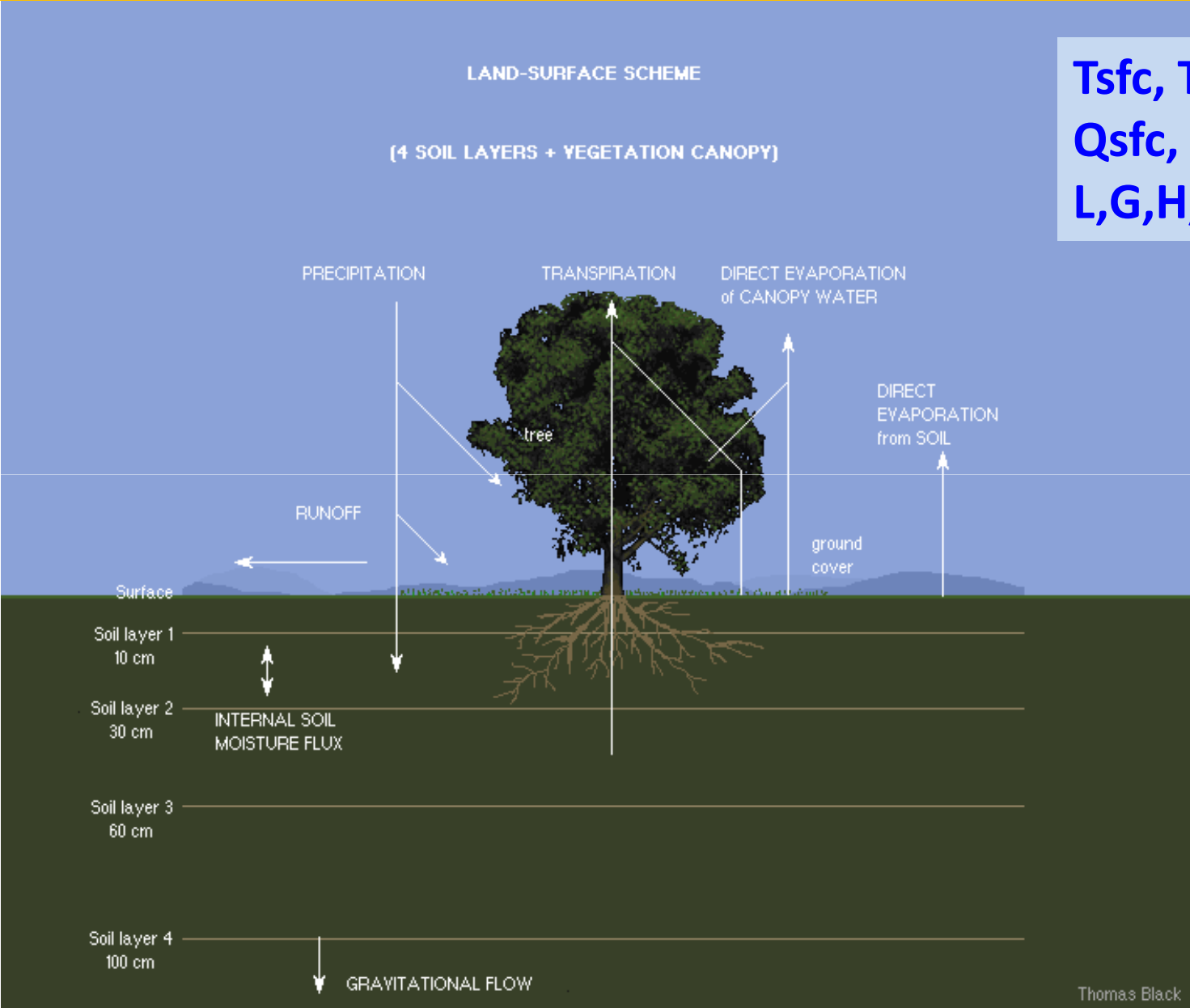
Processos Físicos: Radiação

Processos de transferência radiativa:

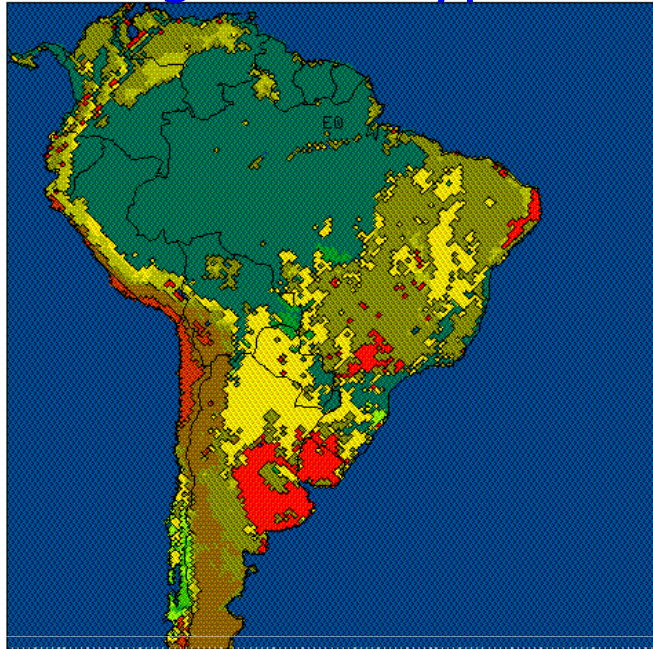
- Ondas Curtas: reflexão, absorção, transmissão e espalhamento
- Ondas Longas: ... ,+ Emissão
- Tendências aplicadas aos perfis de temperatura
- a Nuvens geradas pelo esquema de microfísica de nuvens
- CO₂, O₃ e Albedo climatológicos em modelos de curto prazo.
- Fluxos radiativos alteram o perfil de Temperatura

Modelo de biosfera

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



Vegetation types

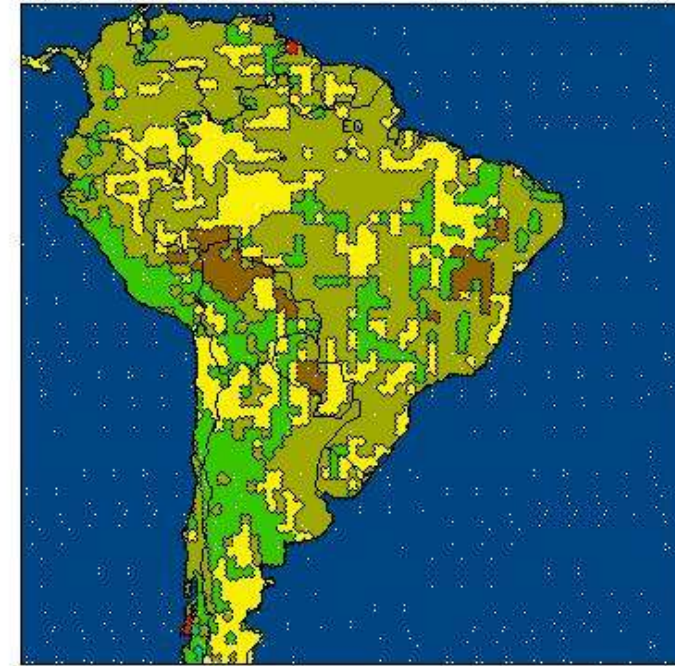


SSiB Vegetation Types (Dorman and Sellers, 1989; JAM)

- 1: Broadleaf-evergreen trees (tropical forest)
- 2: Broadleaf-deciduous trees
- 3: Broadleaf and needleleaf trees (mixed forest)
- 4: Needleleaf-evergreen trees
- 5: Needleleaf-deciduous trees (larch)
- 6: Broadleaf trees with groundcover (savanna)
- 7: Groundcover only (perennial)
- 8: Broadleaf shrubs with perennial groundcover
- 9: Broadleaf shrubs with bare soil
- 10: Dwarf trees and shrubs with groundcover (tundra)
- 11: Bare soil
- 12: Cultivations (the same parameters for the Type 7)
- 13: Glacial

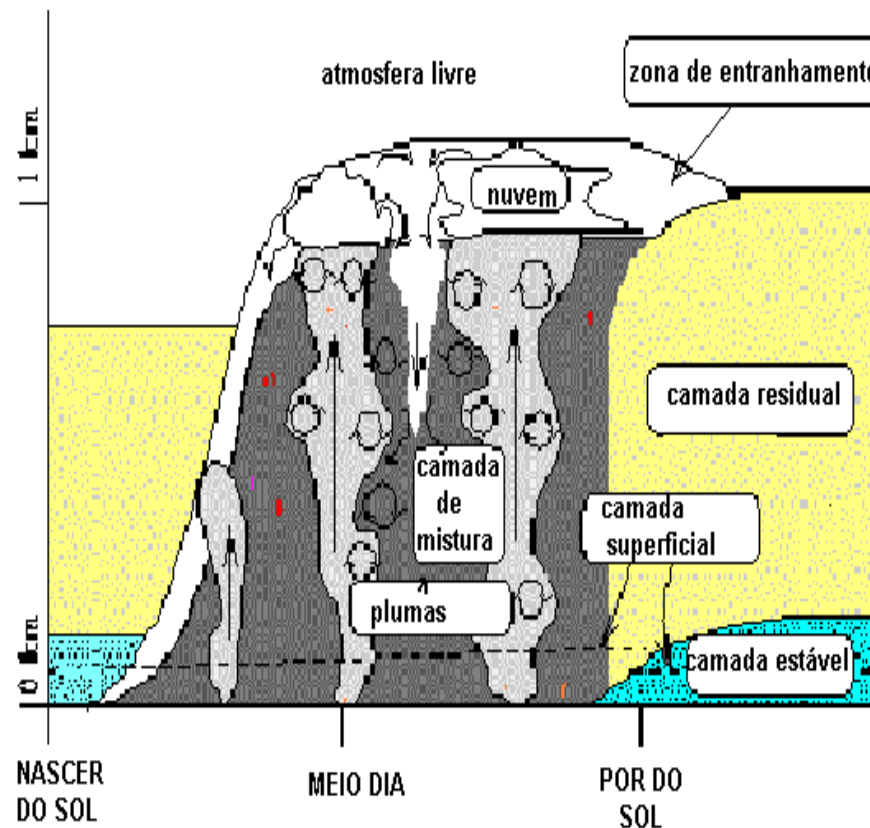
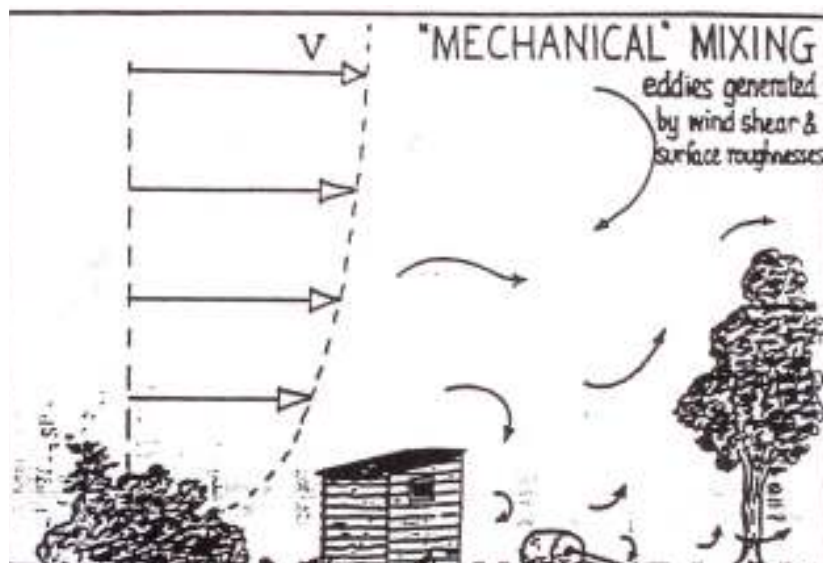
Land surface scheme maps

Soil Types



TYPES	Zobler (1986)	Cosby et al (1984)
1	COARSE	LOAMY SAND
2	MEDIUM	SILTY CLAY LOAM
3	FINE	LIGHT CLAY
4	COARSE-MEDIUM	SANDY LOAM
5	COARSE-FINE	SANDY CLAY
6	MEDIUM-FINE	CLAY LOAM
7	COARSE-MED-FINE	SANDY CLAY LOAM
8	ORGANIC	LOAM
9	LAND ICE	LOAMY SAND

TURBULENCIA ATMOSFERICA



Esquemas de Turbulência

1. Monin-Obukhov - Camada superficial

2. Mellor e Yamada 2.5 - Prognóstico de TKE

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{q^2}{2} \right) - \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial z} \right) \left[l q S_q \left(\frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{q^2}{2} \right) \right]}_{\text{Difusao}} = \underbrace{P_s + P_b + \varepsilon}_{\text{Producao / dissipacao}}$$

$q^2/2$ = energia cinética turbulenta

l = escala de comprimento

ε = dissipação

P_s = Produção de TKE por cisalhamento

P_b = Produção de TKE por flutuabilidade

K_M e K_H = coeficientes de troca turbulenta de momentum e calor

Fatores que afetam a qualidade das simulações

Diferenças entre qualidade das previsões do HN e HS

- Regimes meteorológicos (verão e inverno)
- Densidade de dados
- Método de assimilação de dados
- Topografia, percentagem de oceanos e continentes

Dificuldades nos trópicos

- Sensibilidade a estabilidade estática
- Predomina a representação dos **processos físicos** como turbulência, convecção, radiação, processos de superfície, etc. **Mais incertezas.**

•A natureza caótica do sistema atmosférico limita a nossa capacidade de prever com exatidão a evolução da atmosfera.

A previsão determinística (baseada em uma única realização) pode levar a resultados que divergem da realidade.

•Pequenos erros na condição inicial tendem a dobrar em 3 dias de previsão.

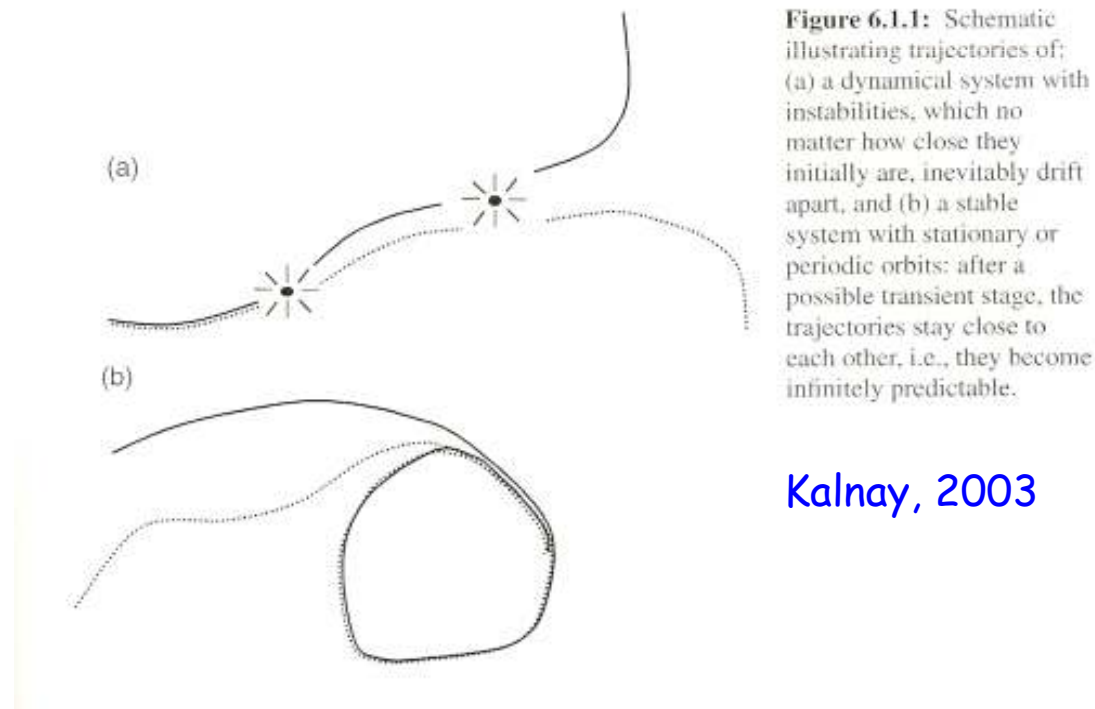


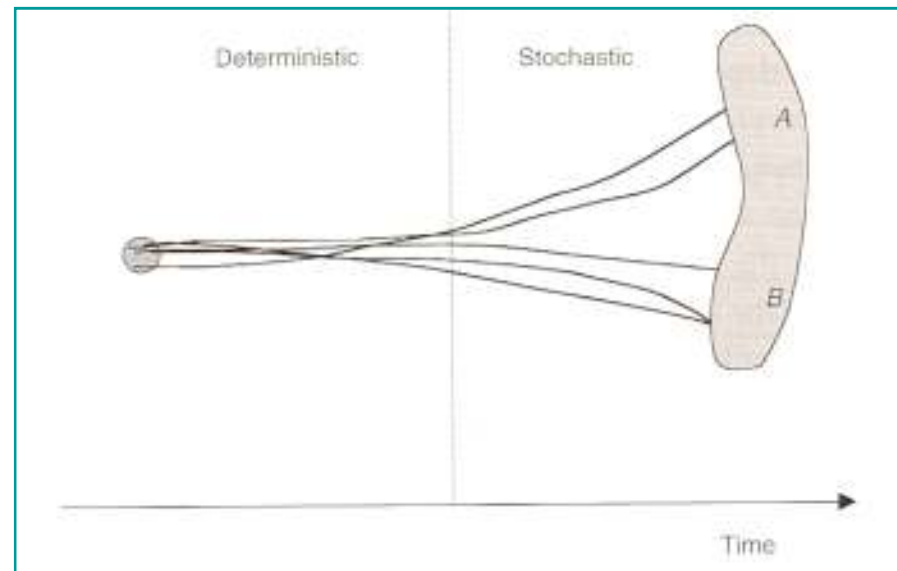
Figure 6.1.1: Schematic illustrating trajectories of; (a) a dynamical system with instabilities, which no matter how close they initially are, inevitably drift apart, and (b) a stable system with stationary or periodic orbits: after a possible transient stage, the trajectories stay close to each other, i.e., they become infinitely predictable.

Kalnay, 2003

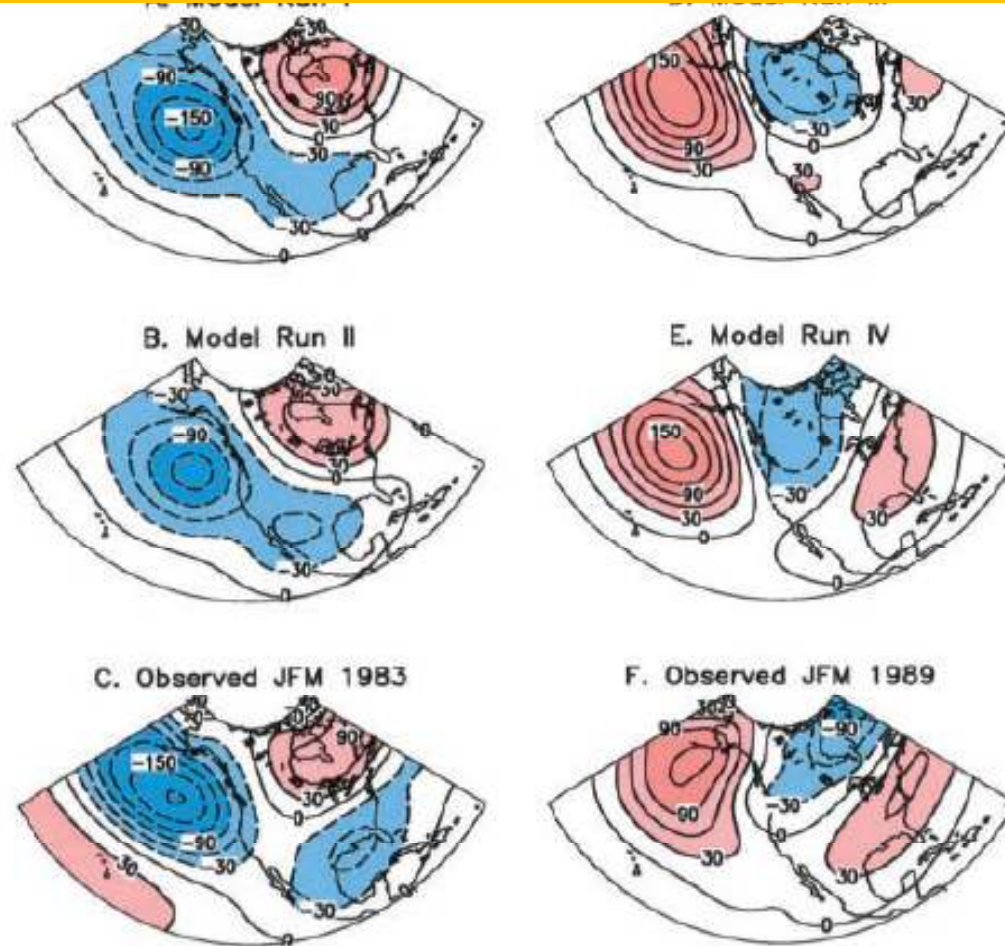
MÉTODOS de GERAÇÃO da PREVISÃO POR CONJUNTO:

- 1 - Diferentes perturbações nas condições iniciais;
 - 2 - **Multi-model ensemble;**
 - 3 - Diferentes perturbações em parâmetros do modelo.
 - 4. Diferentes condições de contorno lateral (RCMs)
- O conjunto de integrações fornece um conjunto de cenários possíveis da projeção.

A média do conjunto de simulações tende a reduzir os erros das simulações.



Predictability of Second Kind Controle da TSM sobre o clima tropical



Predictability in the Midst of
Chaos: A Scientific Basis for
Climate Forecasting
(Shukla et al, 1998)

Fig A e D; B e E
utilizam iguais CIs e
CCs (TSM) diferentes
-> padrões diferentes

“Therefore, it should be possible to predict the large-scale tropical circulation and rainfall for as long as the ocean temperature can be predicted.”

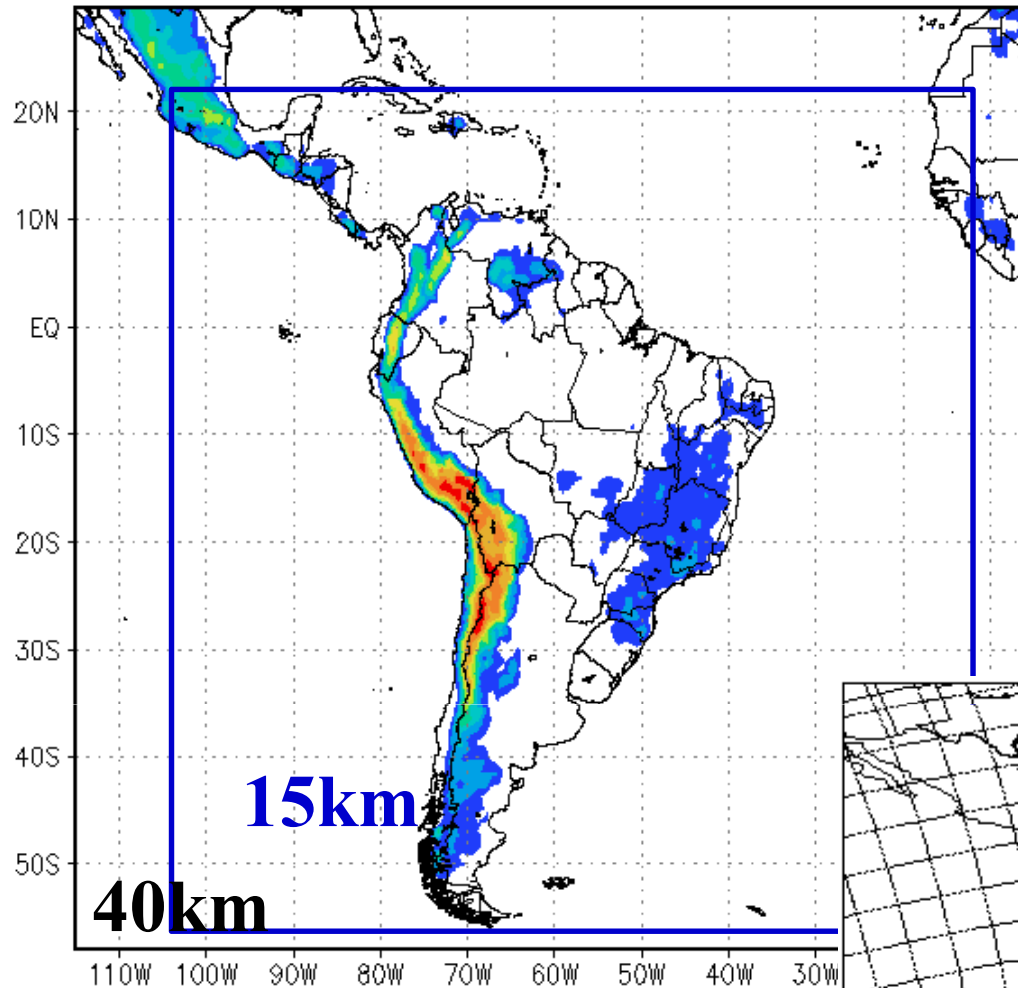
Upgraded version of Eta Model

- 1. Sloping Eta**
- 2. Vertical advection: Piecewise linear scheme**
- 3. Liquid water included in Ps calculation**
- 4. Cloud microphysics, Ferrier scheme**
- 5. BMJ scheme, changes**
- 6. KF scheme, changes**
- 7. KF scheme, momentum fluxes**
- 8. Increased mixing in 10-m wind**
- 9. Output 50 and 100-m winds**
- 10. Molecular layer over sea, changes**
- 11. New soil map over South America**

Work in progress at CPTEC:

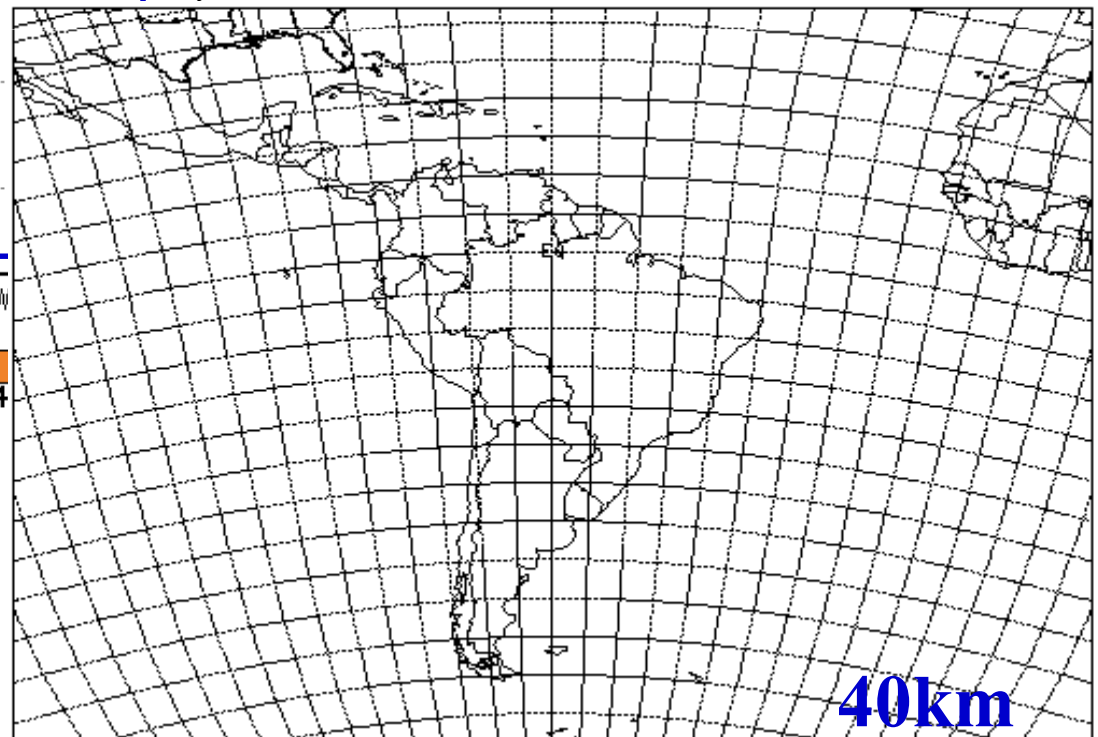
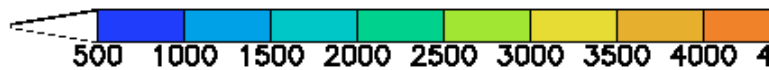
1. Increase horizontal and vertical resolutions, and domain
2. Increase the number of members in Short-range Ensemble forecasts and in seasonal forecasts. Inclusion of physics perturbation;
3. Forecasts from OAGCM lateral boundary conditions, and coupling
4. Coupling with hydrological model of small catchment (DHSVM)
5. Evaluation of BMJ scheme and its variations (precip efficiency, CAPE dependence)
6. Evaluation of Kain-Fritsch scheme and its variations (F_{ct}, CMF)
7. Evaluation of 3 microphysics schemes: Zhao scheme, Ferrier scheme and Ristic scheme.
8. Evaluation of forecasts with initialized soil moisture
9. New Radiation scheme (Edwards and Slingo 1996) with more gases and aerosols
10. Introduce refinement to Eta PBL turbulence parameterizations

New domains



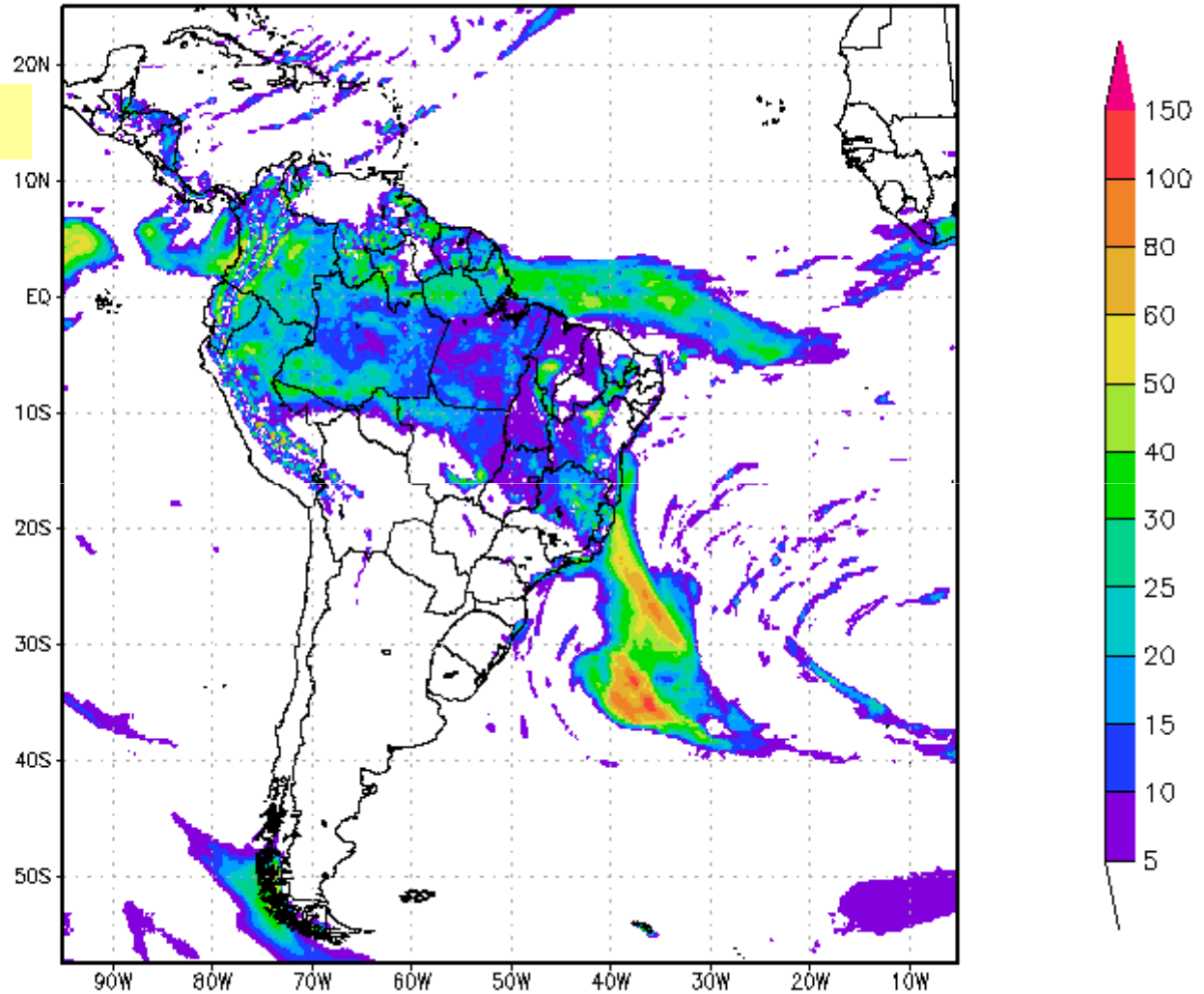
Very large domain, 40km res:
227x355x38 (IMxJMxLM)->
T+ 168h in **15 min** using 200 cpu

Smaller domain, deterministic run, 15km/L50
481x801x50 ->
T+168h in **1h10min** using 200 cpu



CI=2010040312 - FCT +72h
Precipitacao Acumulada em 24 horas - Eta 15km

Domínio da versão Eta
15 km



<http://etamodel.cptec.inpe.br>

The screenshot shows the home page of the Eta Model website. The browser address bar displays <http://www.cptec.inpe.br/etaweb/>. The page features a navigation menu with links for Home, Documentation, Download, Installation, Sample Data, Topography, Forum, References, and Contacts. The main content area is titled "EtaModel" and contains a detailed introduction to the model, its history, and a list of countries where it is used. A large "Download" button is visible on the right side of the page.

The Eta Model is a state-of-the-art atmospheric model used for research and operational purposes. The model is a descendent of the earlier HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University) model, developed in the seventies in the former Yugoslavia (the earliest reference being Mesinger and Janjic, 1974). In the eighties, the code has been upgraded to the Arakawa-style horizontal advection scheme of Janjic (1984), then rewritten to use the eta vertical coordinate (Mesinger et al. 1988), and subsequently, at NCEP, supplied with an advanced physics package (Janjic 1990, Mesinger and Loboeki 1991). It became officially operational at NCEP on 8 June 1993 (Black 1994). In its various versions, the model has been and/or is widely used in numerous countries, including Algeria, Argentina, Belgium, Brazil, Cameroon, China, Costa Rica, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Egypt, Finland, Germany, Greece, Iceland, India, Israel, Italy, Malta, Tunisia, Turkey, Peru, Philippines, Serbia and Montenegro, South Africa, Spain, Sweden, and the United States.

The code is available for downloading at the [NCEP site](#), and, in an updated version, [at this site](#). It is a very efficient code which can run on small personal computers in UNIX or LINUX systems.

The name of the model derives from the Greek letter (η) which denotes the vertical coordinate (Mesinger 1984), one of the model features, defined as

$$\eta = \left[\frac{(p - p_s)}{(p_s - p_r)} \right] \cdot \left[\frac{(p_{ref}(z) - p_r)}{(p_{ref}(0) - p_r)} \right]$$

where p_s is the atmospheric pressure. The indices s and t refer to the surface and the top of the model atmosphere, respectively. The index ref refers to a prescribed reference atmosphere, and z is the surface height. The model orography is formed of steps. The steps can have slopes in the version downloadable here (Mesinger and Jovic 2004).

The screenshot shows the "Download" page of the Eta Model website. The browser address bar displays <http://www.cptec.inpe.br/etaweb/download/>. The page features a navigation menu with links for Home, Documentation, Download, Installation, Sample Data, Topography, Forum, References, and Contacts. The main content area is titled "EtaModel" and contains a section for "Model Code and scripts". A large "Download" button is visible on the right side of the page.

Model Code and scripts

worketa_all.tar.gz: version ICTP, Trieste 2005. Sloping Eta.

Features included that are considered improvements/refinements compared to the NCEP WS Eta:

- Sloping steps eta discretization (e.g., Mesinger and Jovic 2004);
- Changes in the continuity and hydrostatic equations to account for mass removal and addition due to precipitation and evaporation, and the presence of condensates (Mesinger and Lazić, "Blue Book" 2004);
- Changes in the BMJ convection to remove/ameliorate the problem of undergoing intense convection (reversed DSPs, and no extension of relaxation time);
- Averaging of all four surrounding velocities at h points (including those that are zero at vertical sides) to do turbulence quantities (improves lowest layer winds over topography);

updates

Copyright ©INPE/CPTec©1995 - 2006
Comentários e/ou sugestões:
webmaster@cptec.inpe.br