



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Modelado Numérico: Introducción

Chou Sin Chan

chou@cptec.inpe.br

**Entrenamiento em Modelado de Escenários de Cambio Climático
Cachoeira Paulista, 30 de agosto a 4 de setembro de 2008**

Cachoeira Paulista, Entrenamiento II,
30/08-04/09/2008

MODELAGEM DA ATMOSFERA

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

MODELAGEM DA ATMOSFERA

Equações Primitivas

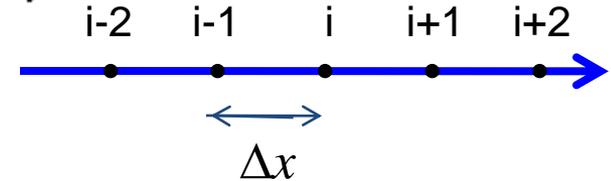
1. Vento horizontal $\frac{DV_H}{Dt} = -2\Omega_z \times V_H - \frac{1}{\rho} \nabla_H p + F_H$
2. Equil hidrostático $0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$
3. da continuidade $\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot V$
4. da termodinâmica $c_v \frac{DT}{Dt} = -p \frac{D\alpha}{Dt} + Q$
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):

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

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:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -c \left(\frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) \quad (5)$$

Condição de ESTABILIDADE NUMÉRICA: CFL < 1

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

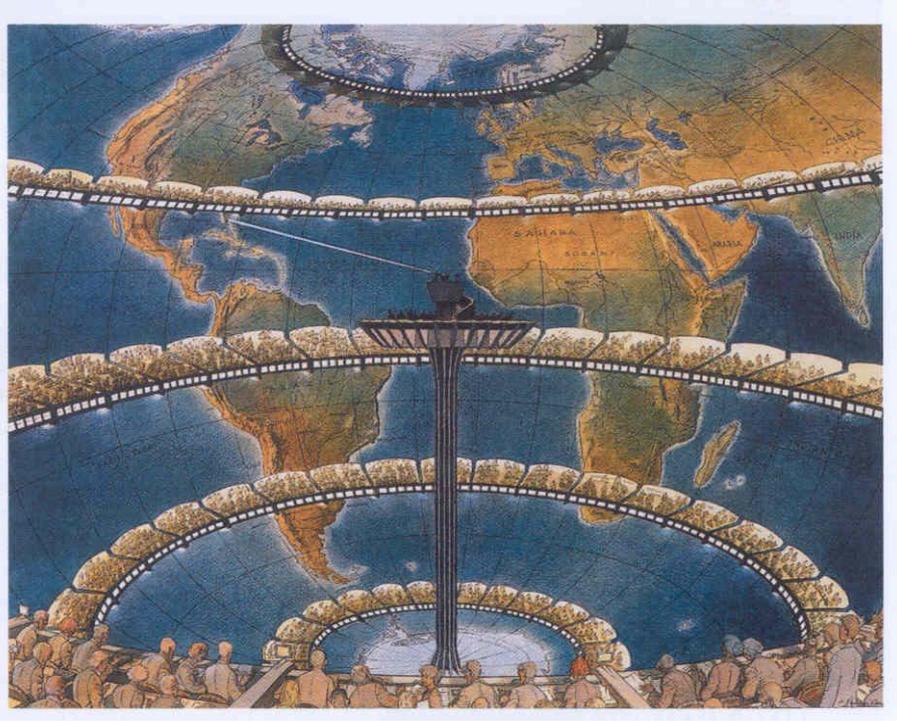
CFL: Courant-Friedrichs-Levy

O passo de tempo, Δt , deve ser escolhido de forma que a variável dependente (u) seja advecçada 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.



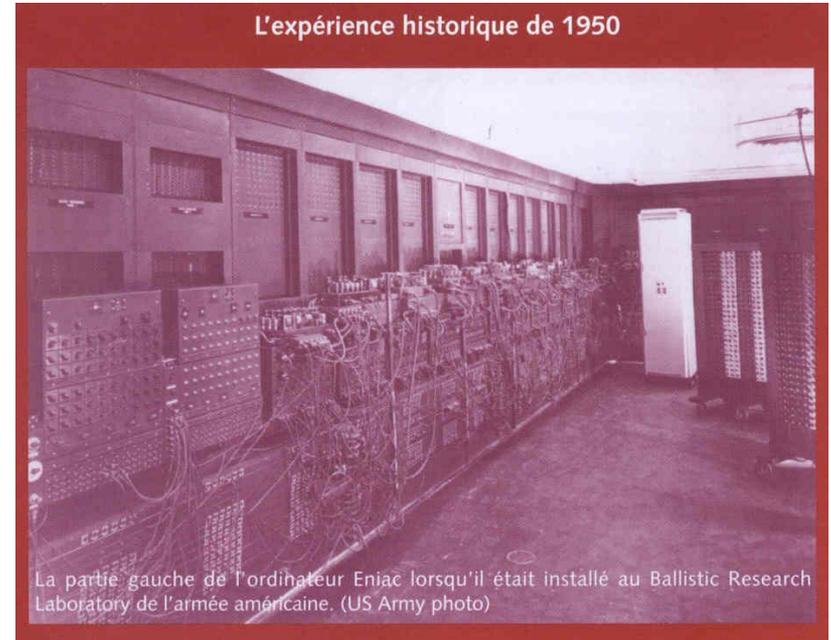
Lewis Fry Richardson (1881-1953). (Photo National Meteorological Library, Lafayette)

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)

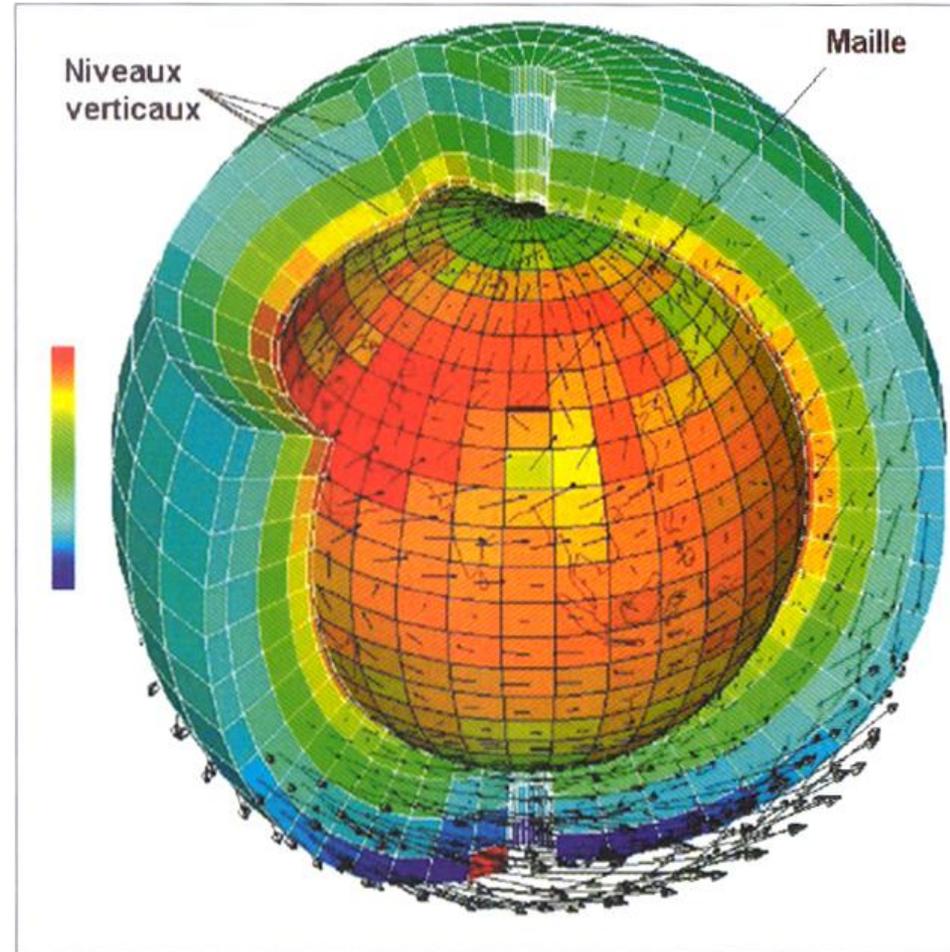
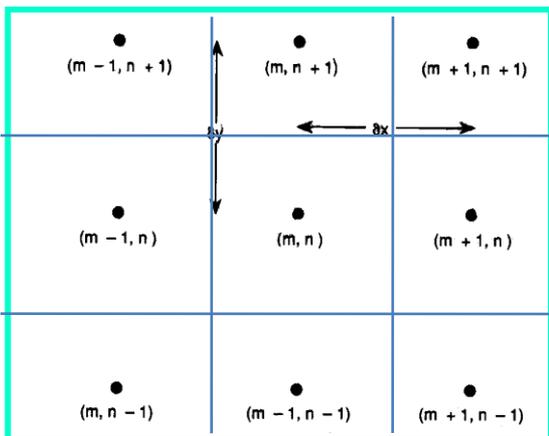
1966 - Previsão de tempo rodado em ambiente **operacional**.



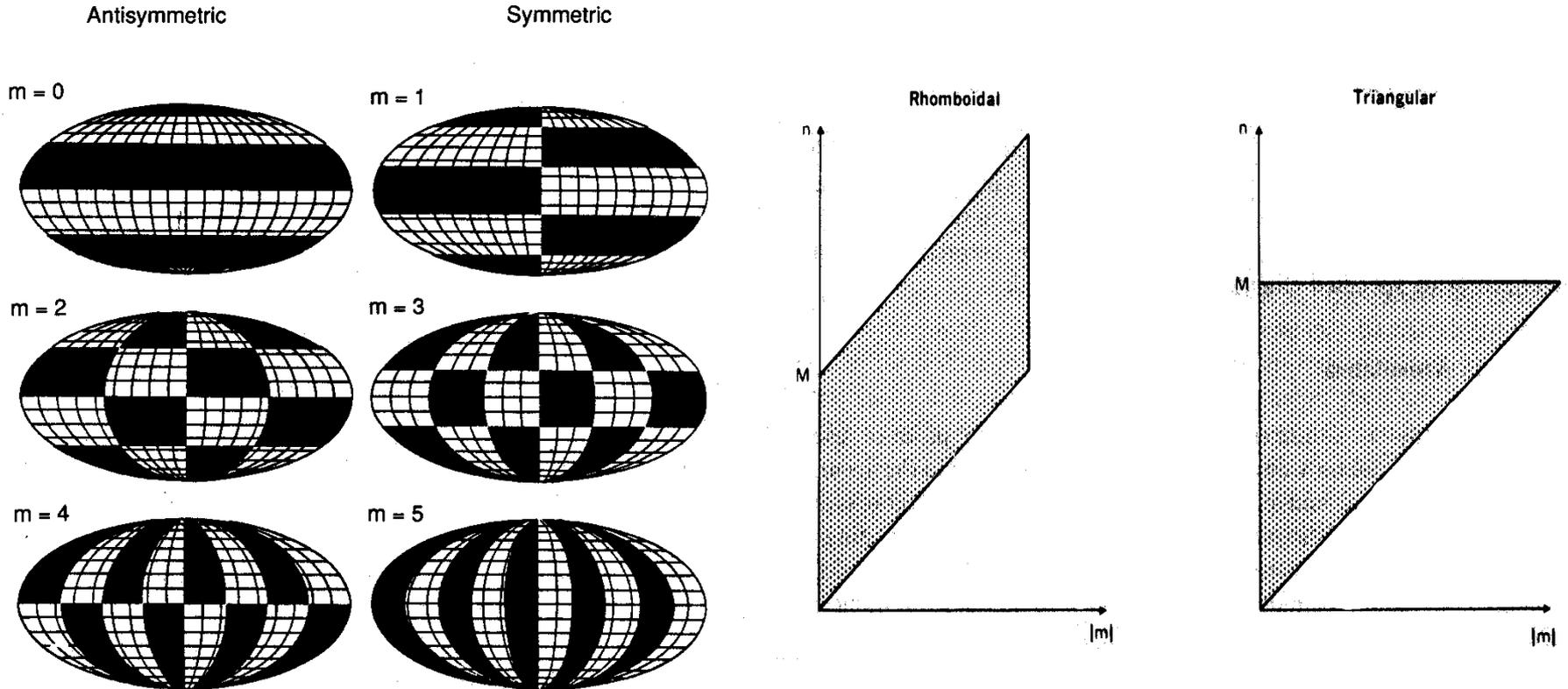
Modelo em "ponto de grade"

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.



Modelo Espectral



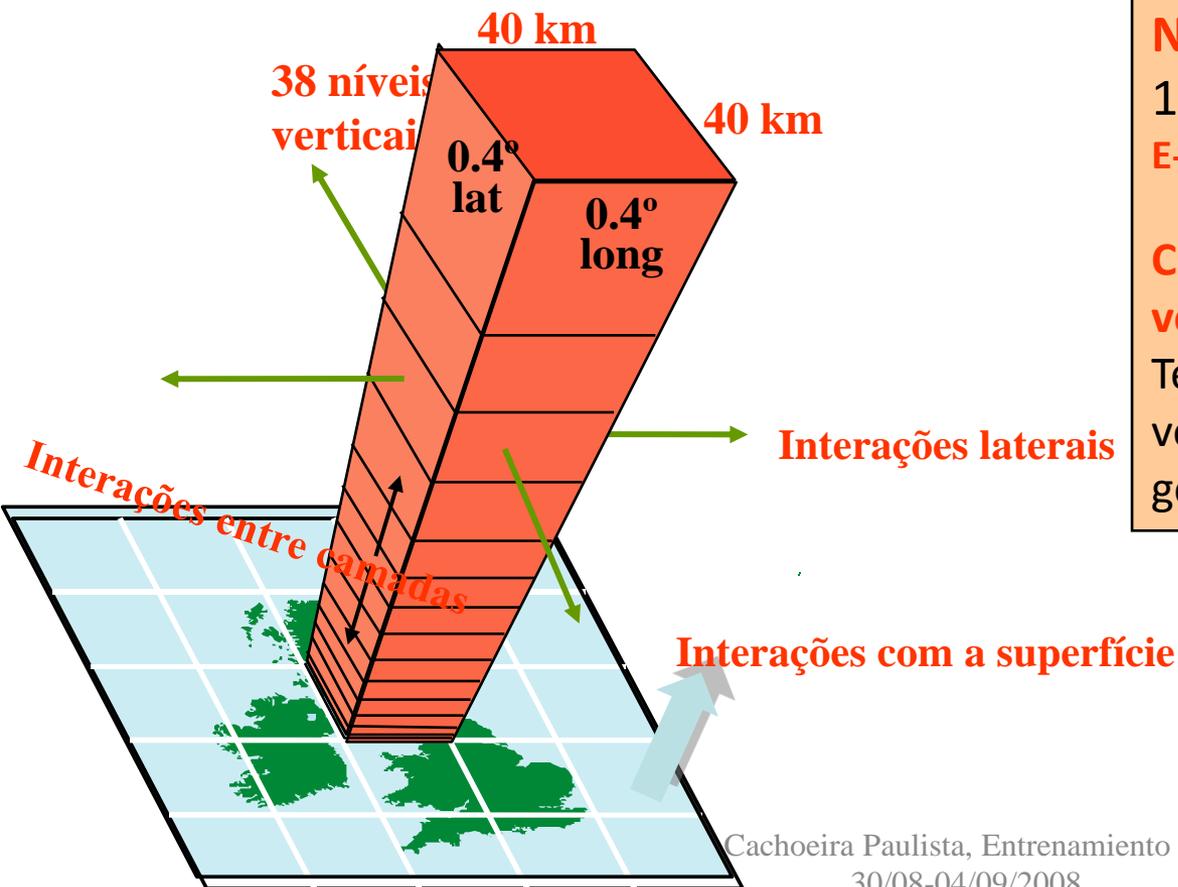
truncamento

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 x 211 x 38 = **954142**

E-W N-S Vertical

Calcula-se para cada um destes volumes:

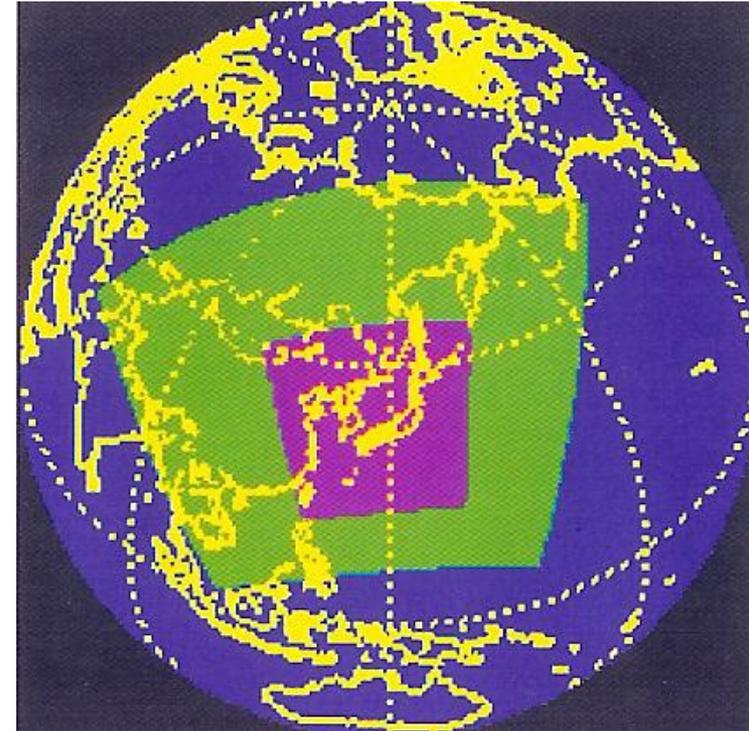
Temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, altura geopotencial.

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.

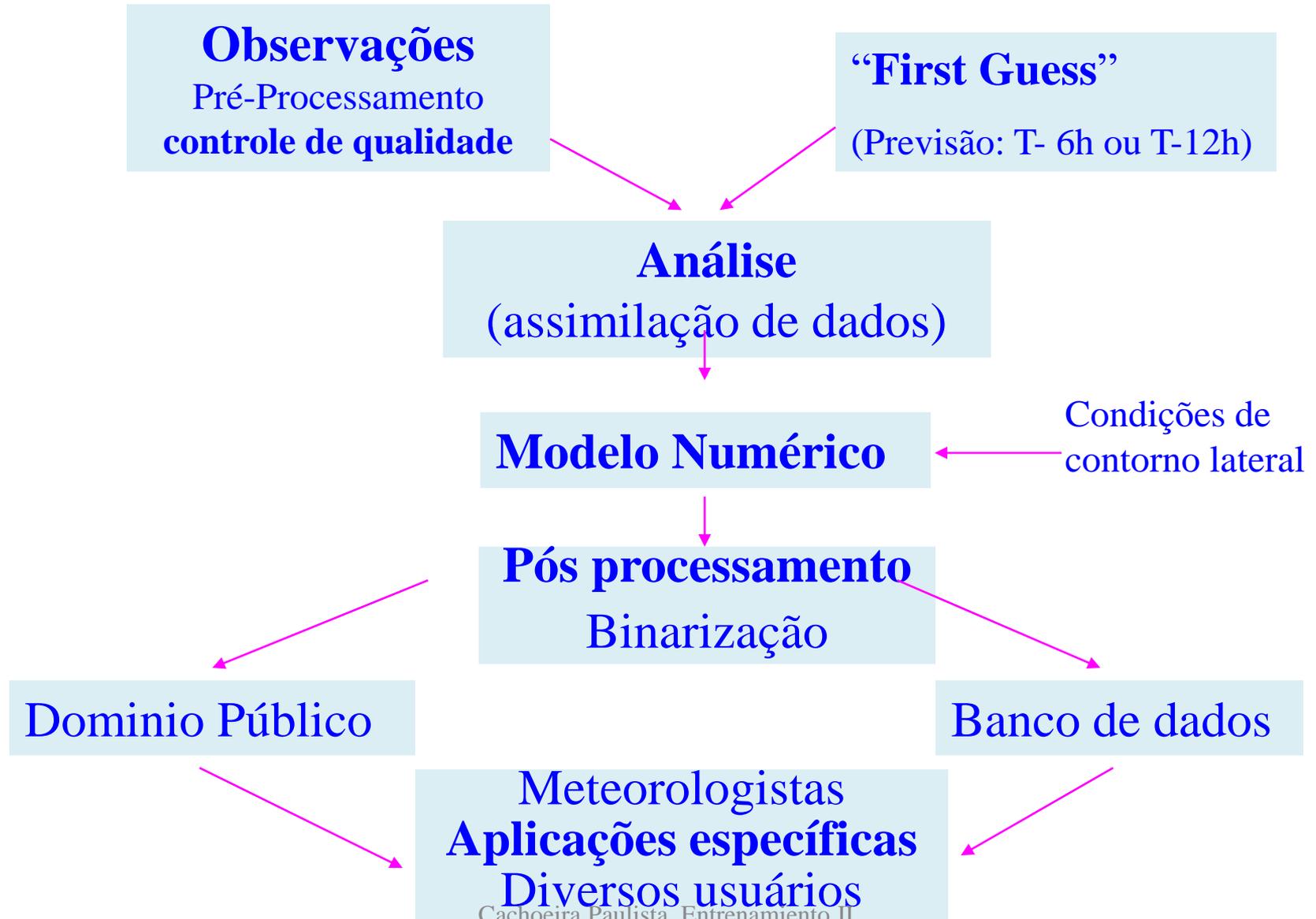
Mesoescala: Acrescenta detalhes aos padrões de escala sinótica previstos no modelo regional.



Interação entre os modelos

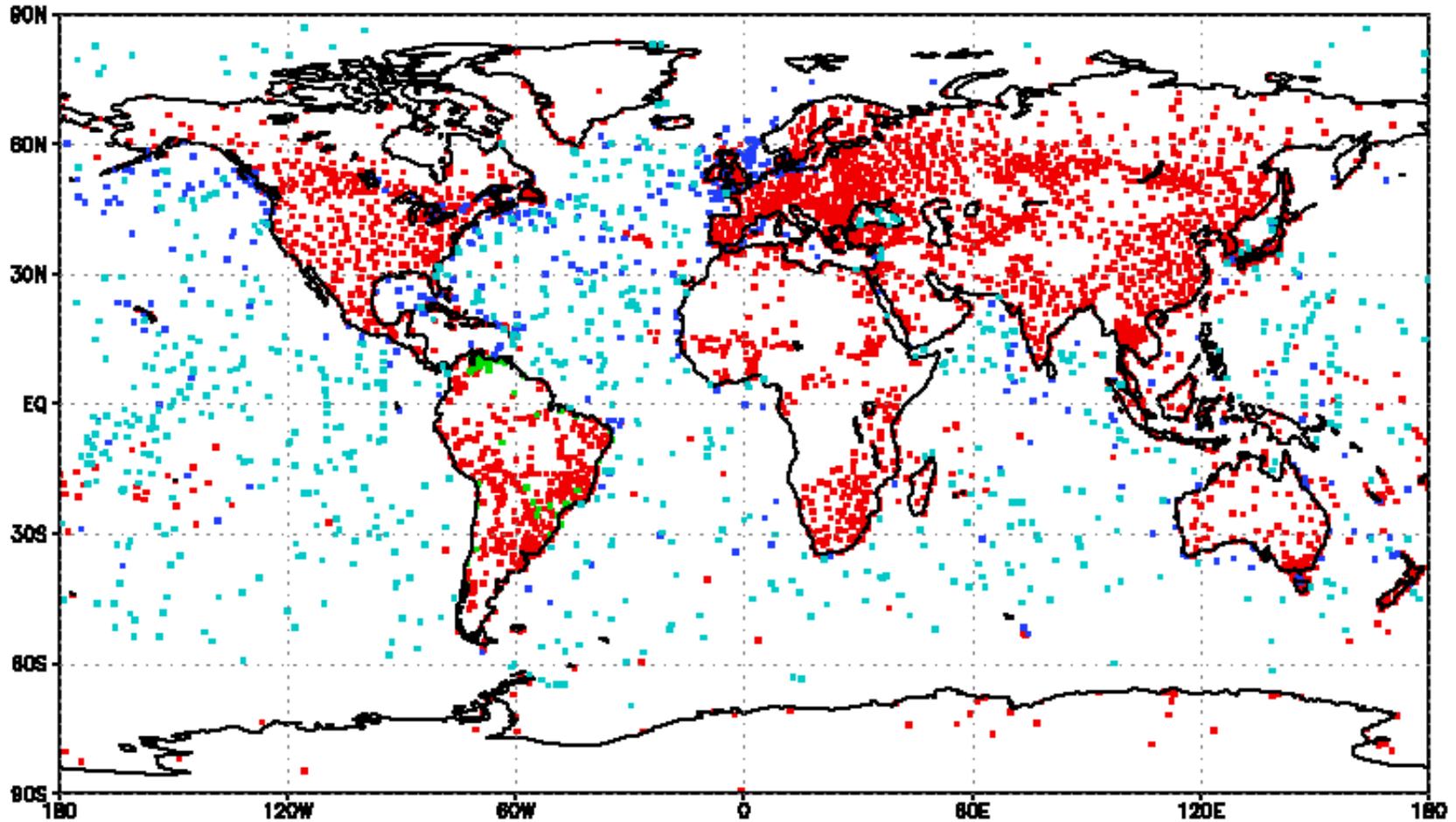


Etapas para produzir PNT



CPTEC Surface Observations on 12z 18 June 2002, ±3h

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



Synop
4166

Metar
122
Cachoeira Paulista, Entrenamiento II,
30/08-04/09/2008

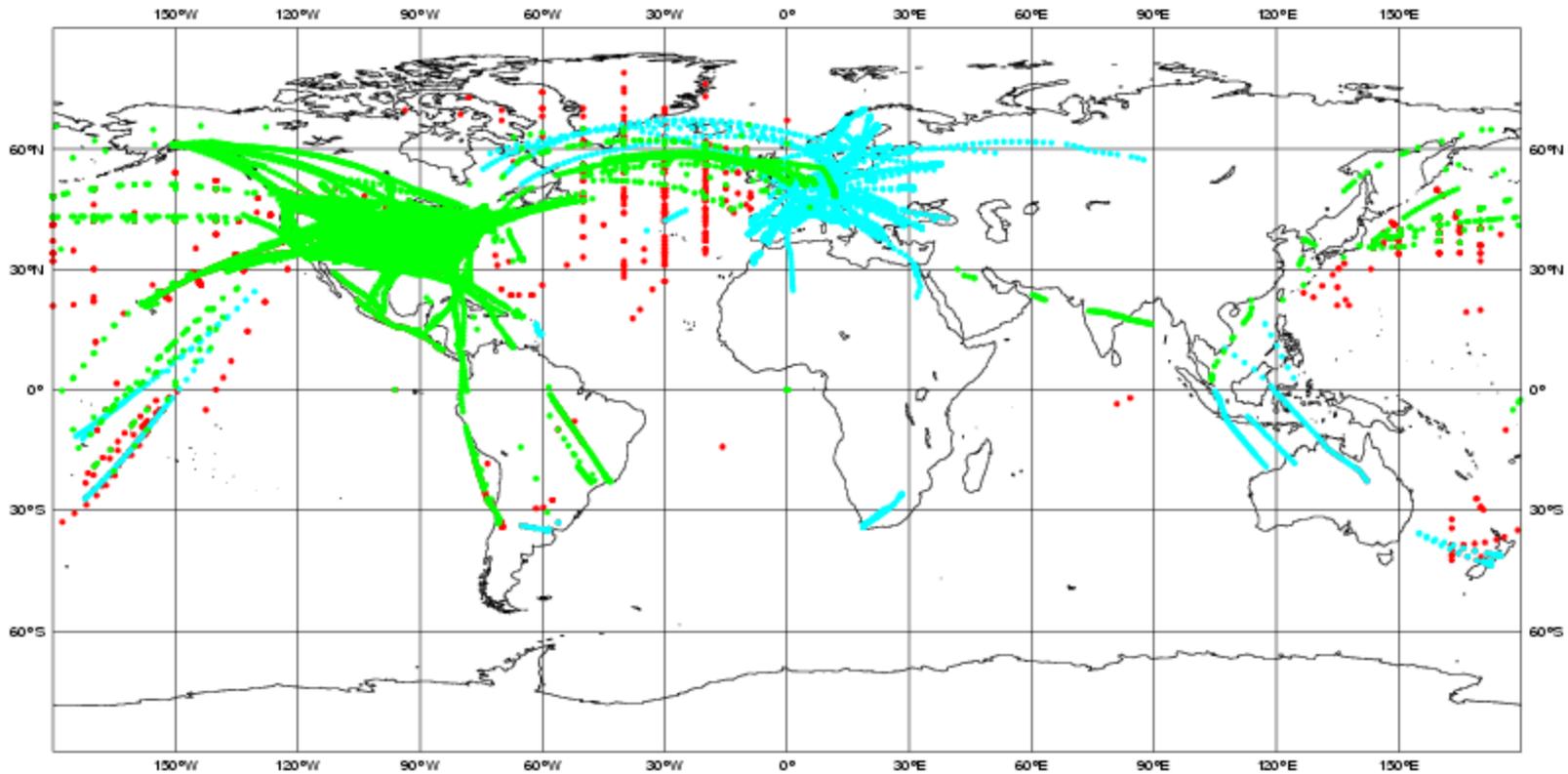
Ship
770

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.

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

$$L + K = I$$

a=análise

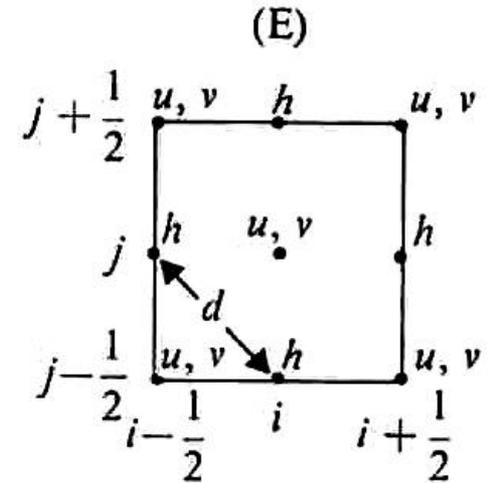
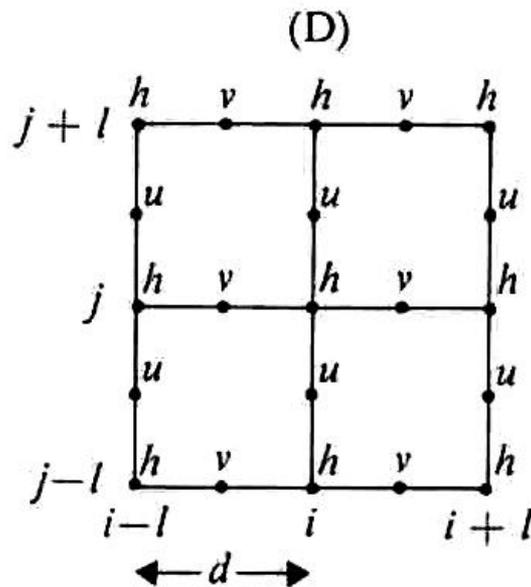
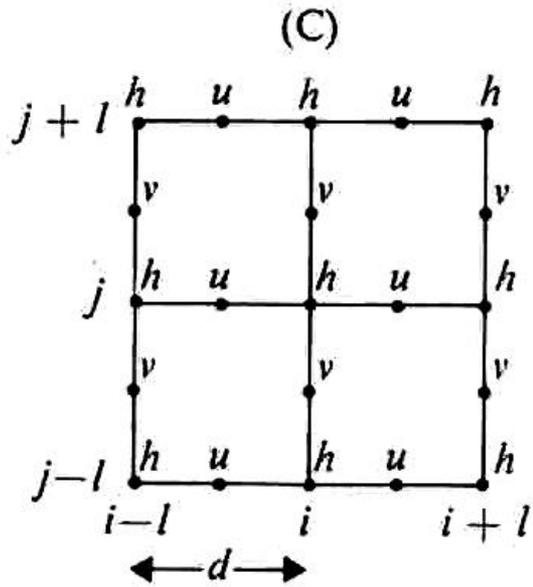
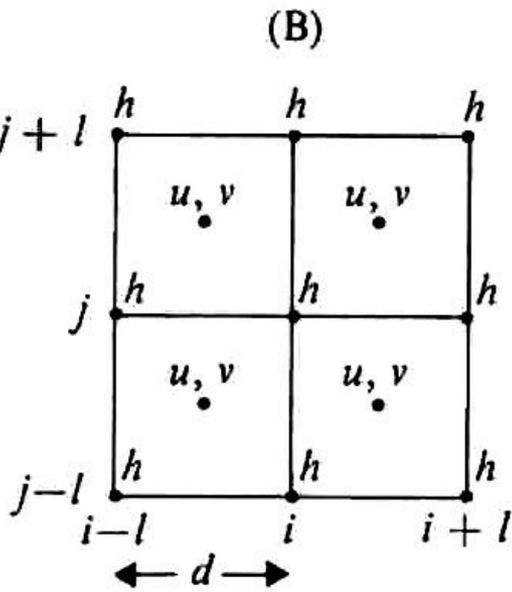
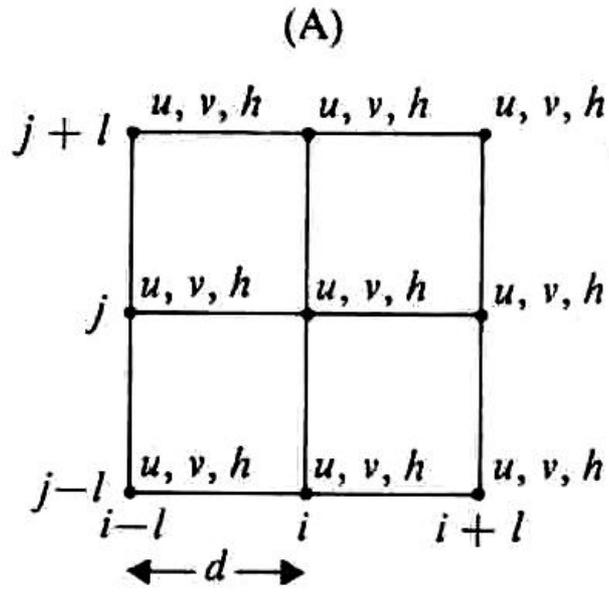
f= previsão

o= observação

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

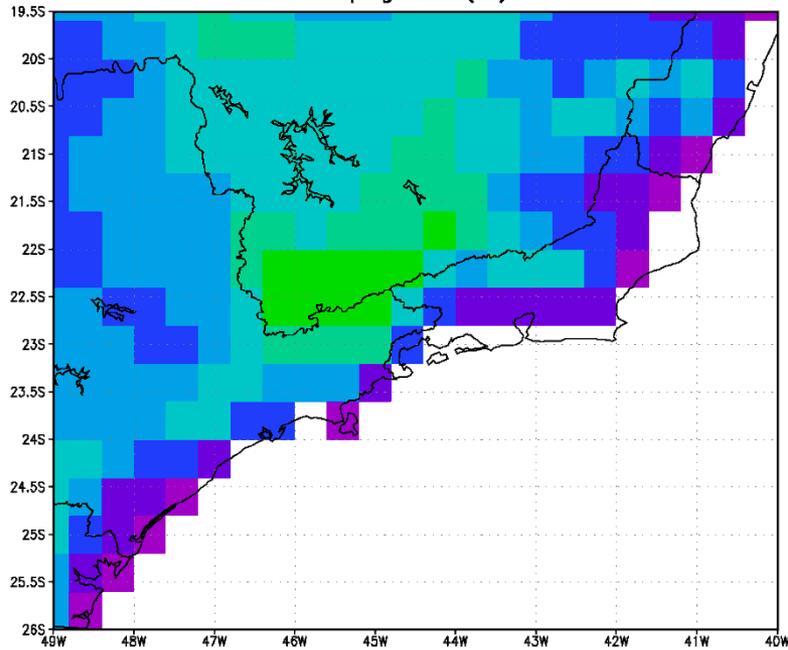
K: covariâncias de erros entre previsão e observação

L: operador da observação



40 km

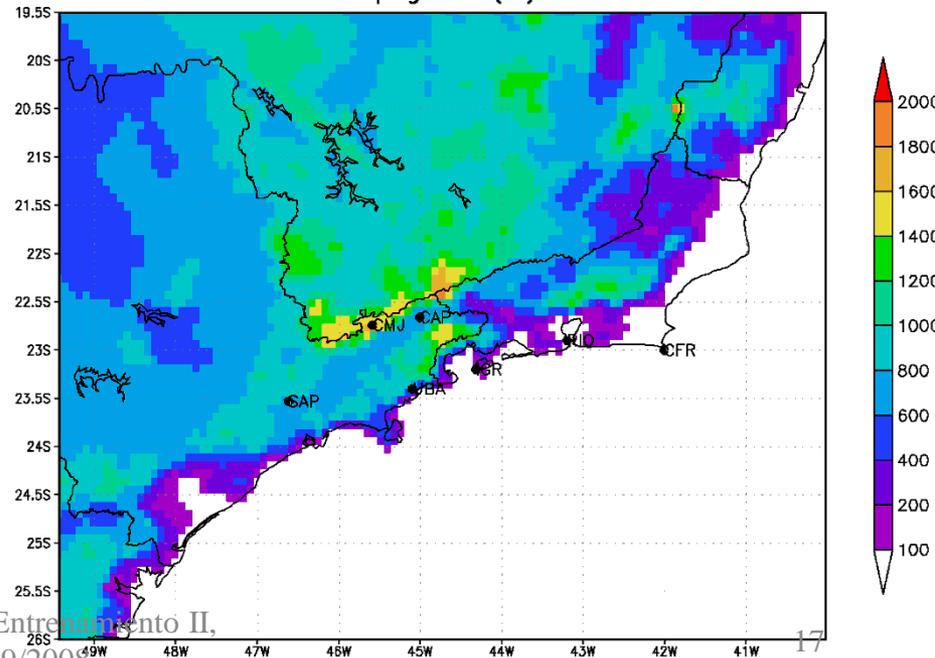
Modelo Regional Eta 40km
Topografia (m)



**Escolha da resolução horizontal:
Impacto sobre a caracterização
da superfície**

10 km

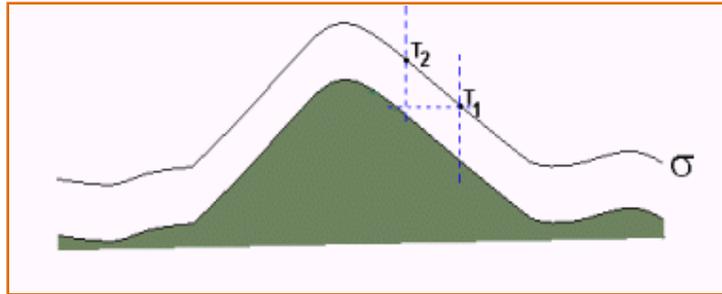
Modelo Regional Eta 10km
Topografia (m)



Coordenadas verticais

sigma

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



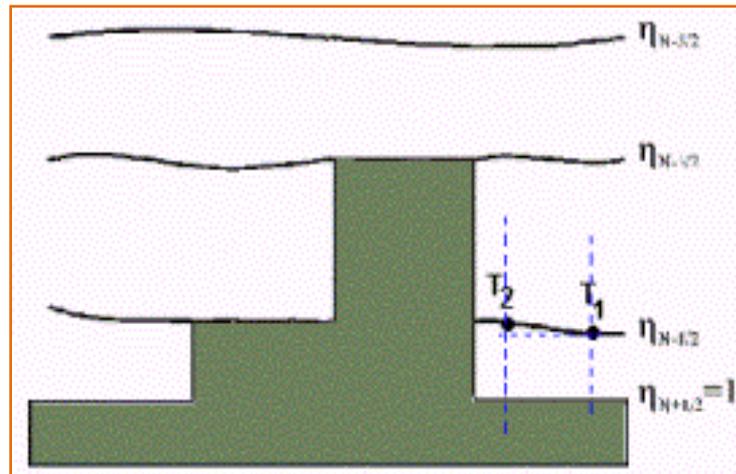
$$\sigma = (0, 1)$$

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

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

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

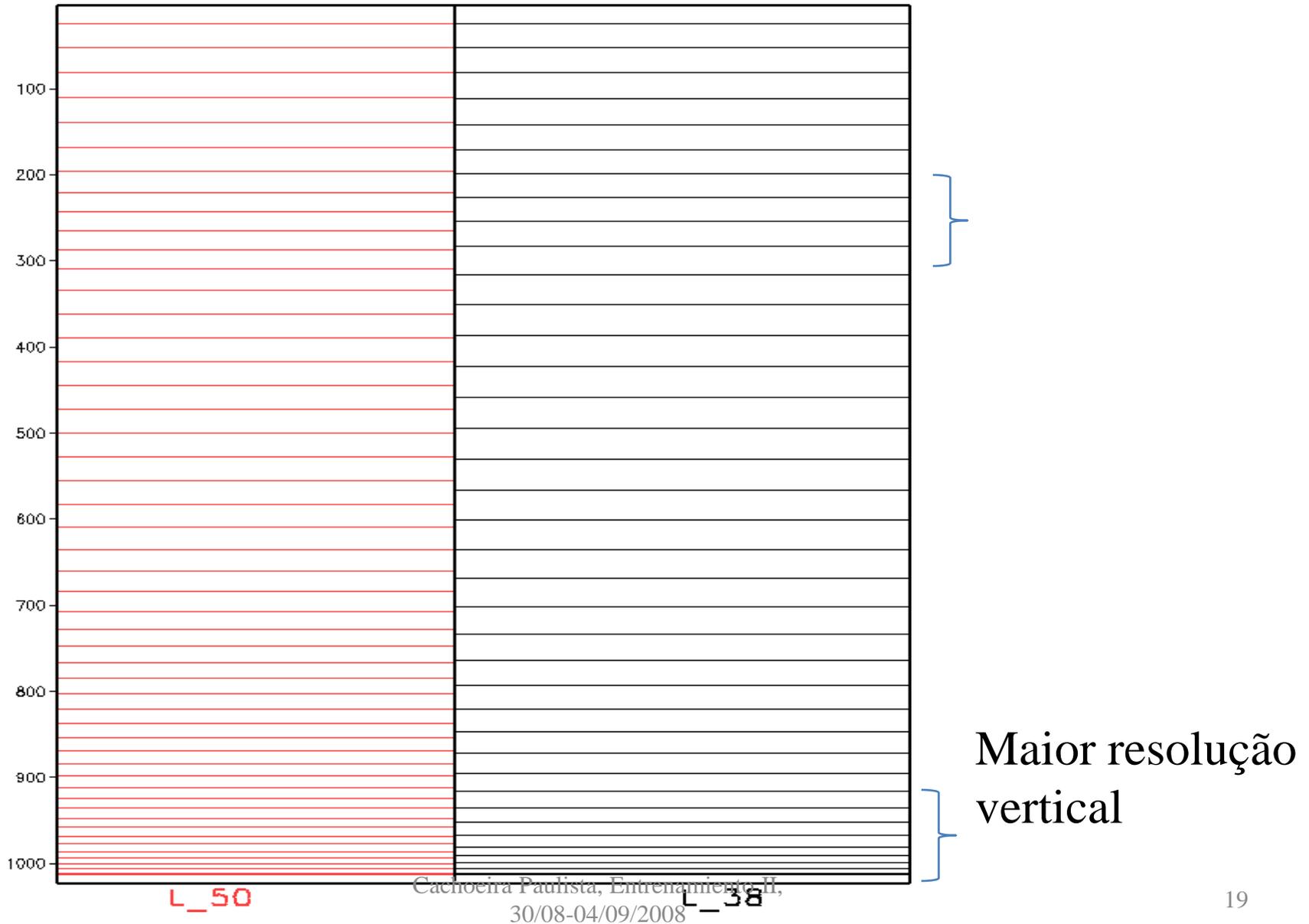
eta



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

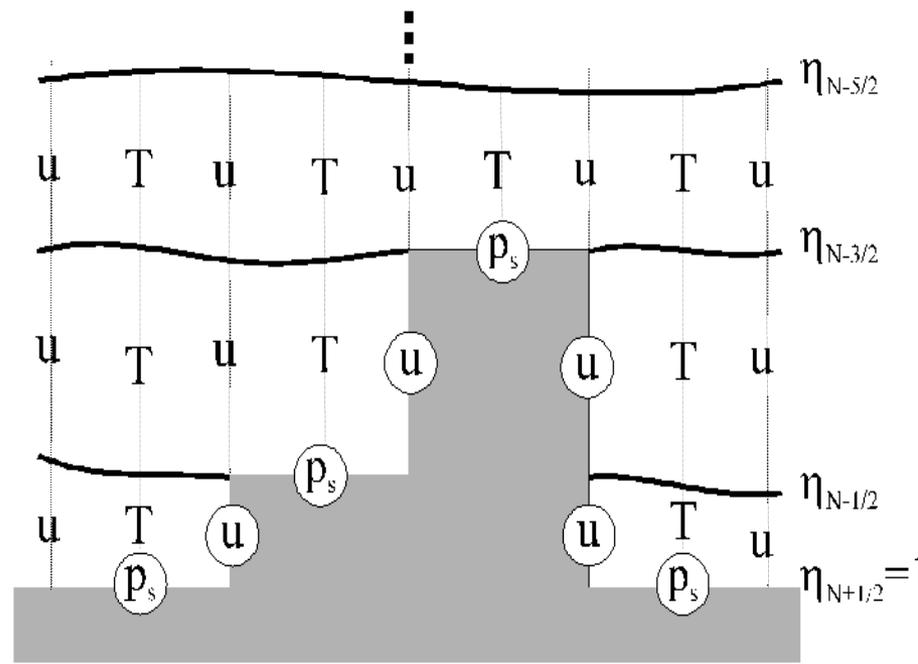
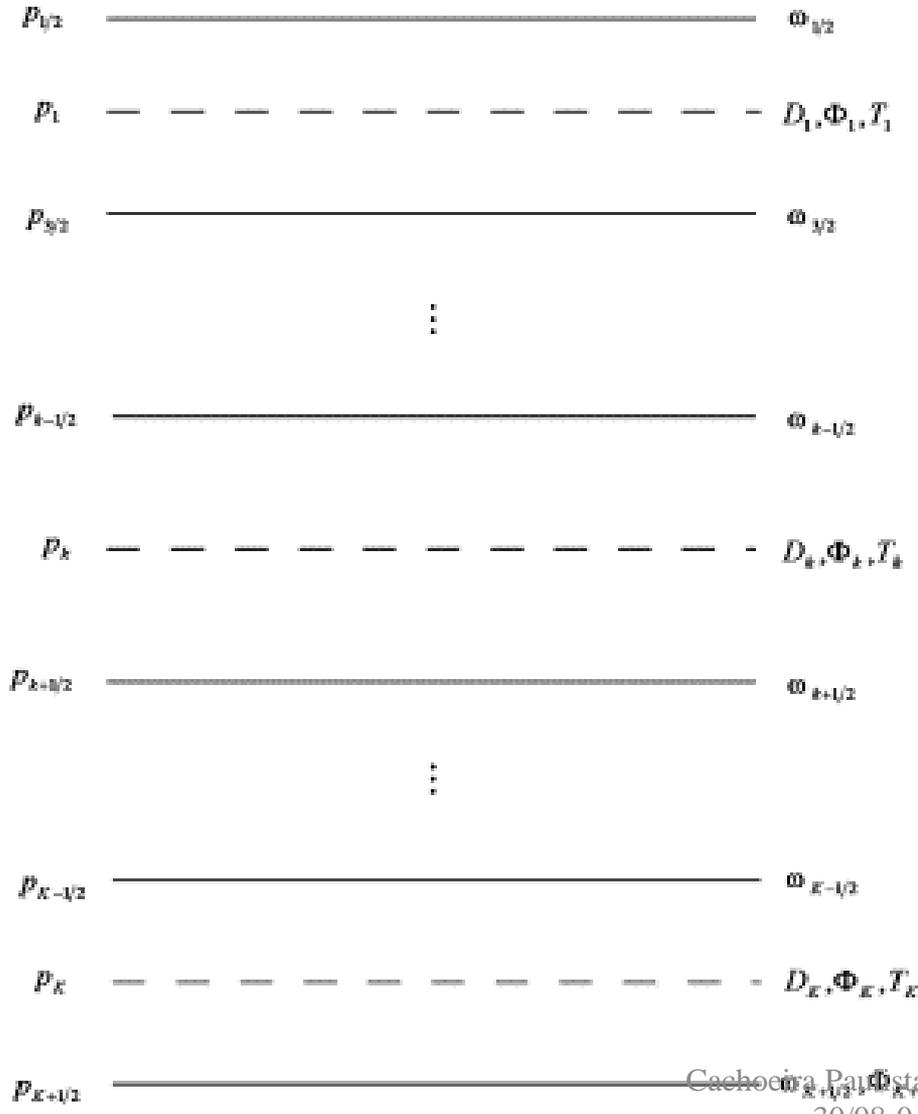
O topo das montanhas coincide com as superfícies de nível do modelo

Distribuição Vertical das superfícies eta

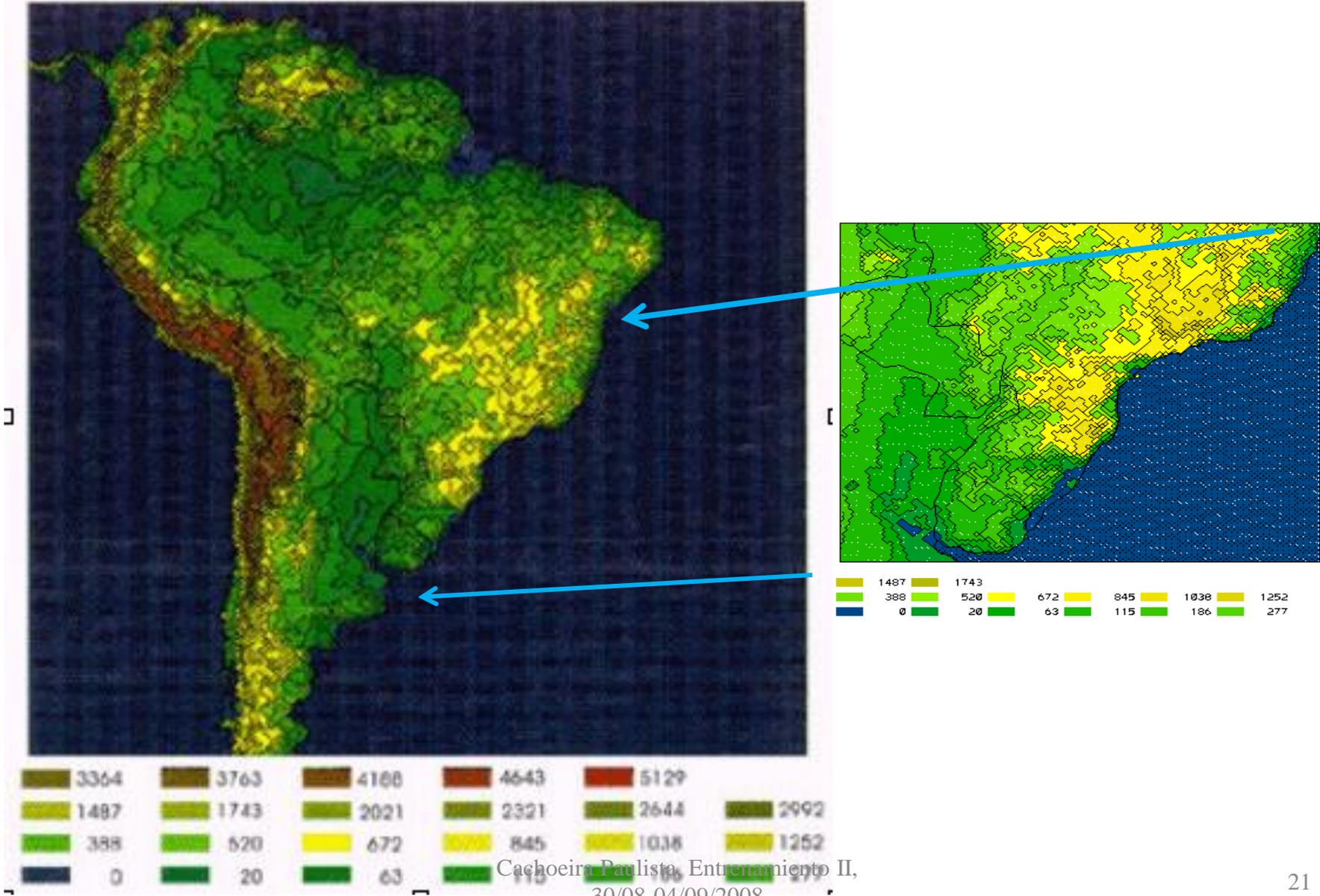


Topografia e distribuição vertical de variáveis

Grade vertical de Lorenz



Step-topography



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

1. 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
- 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.

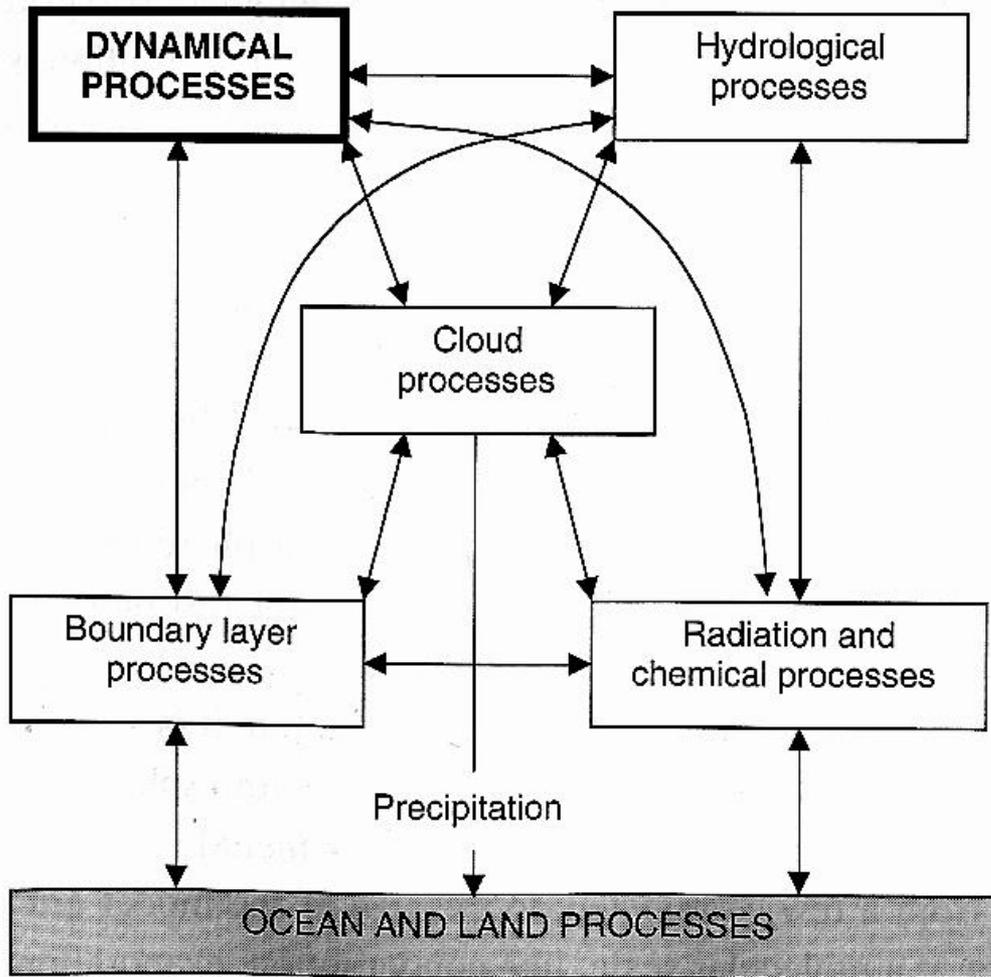
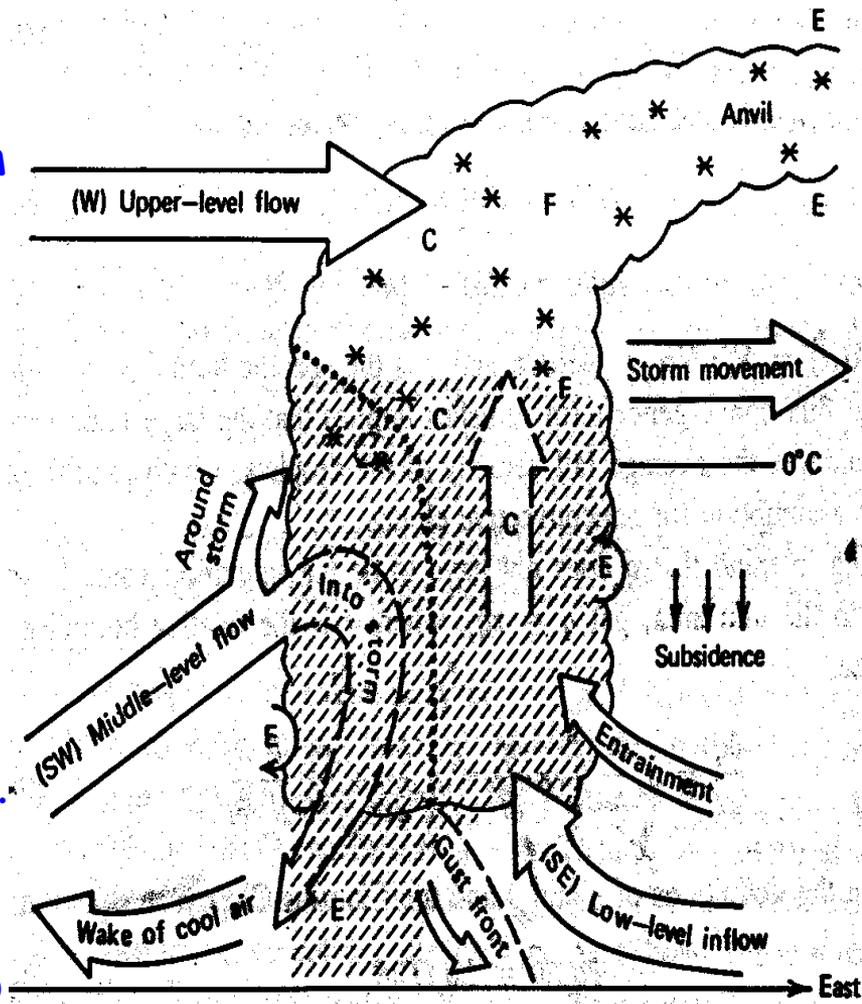


Figure 4.1.1: Physical processes in the atmosphere and their interactions. The dynamical processes for resolvable scales, in bold, are explicitly computed by the model “dynamics” (discussed in Chapters 2 and 3). The other subgrid-scale processes are parameterized in terms of the resolved-scale fields.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

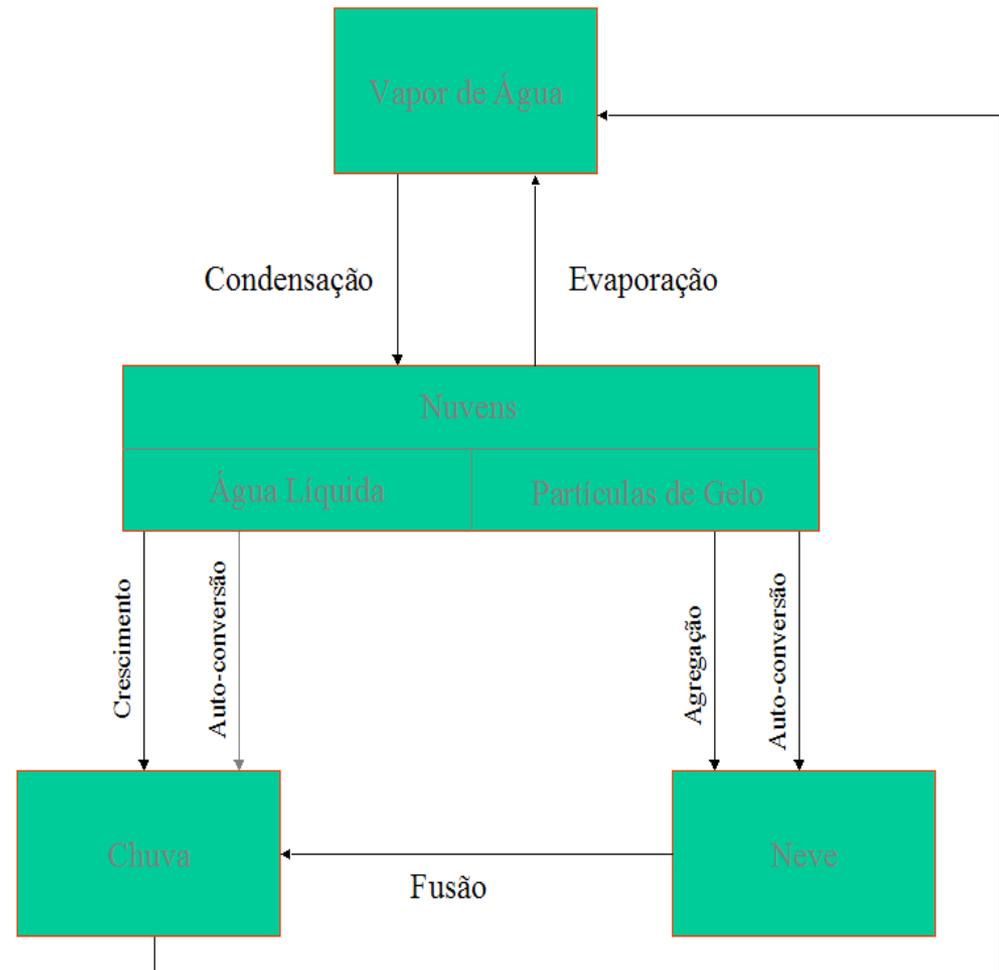
Parametrização de NUVENS CUMULUS

- 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 instabiliza 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.



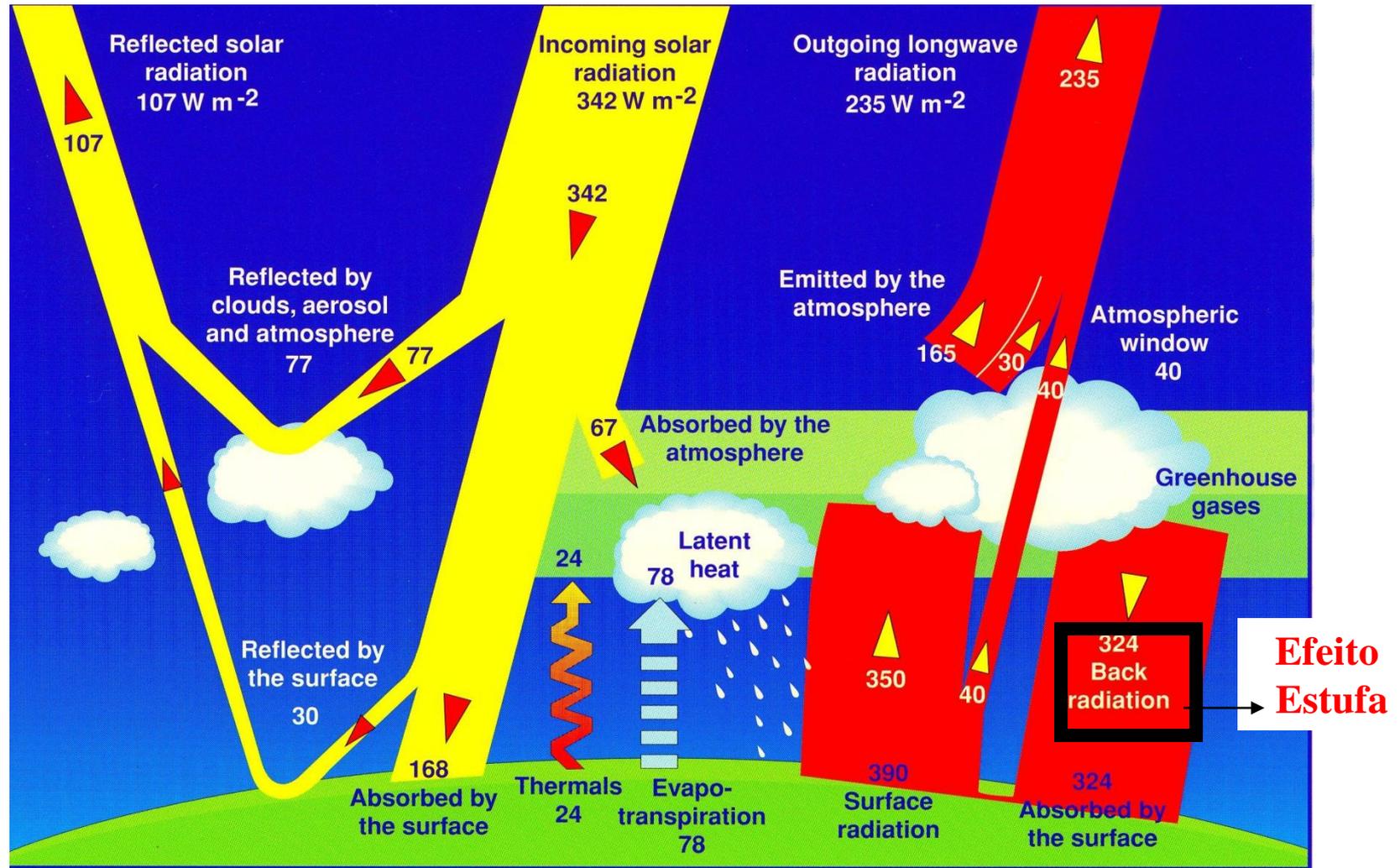
Parametrização de NUVENS ESTRATIFORMES (microfísica de nuvens)

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 => 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



Radiation Balance of the Earth (Jeffrey T. Kiehl)

Processos Físicos: Radiação

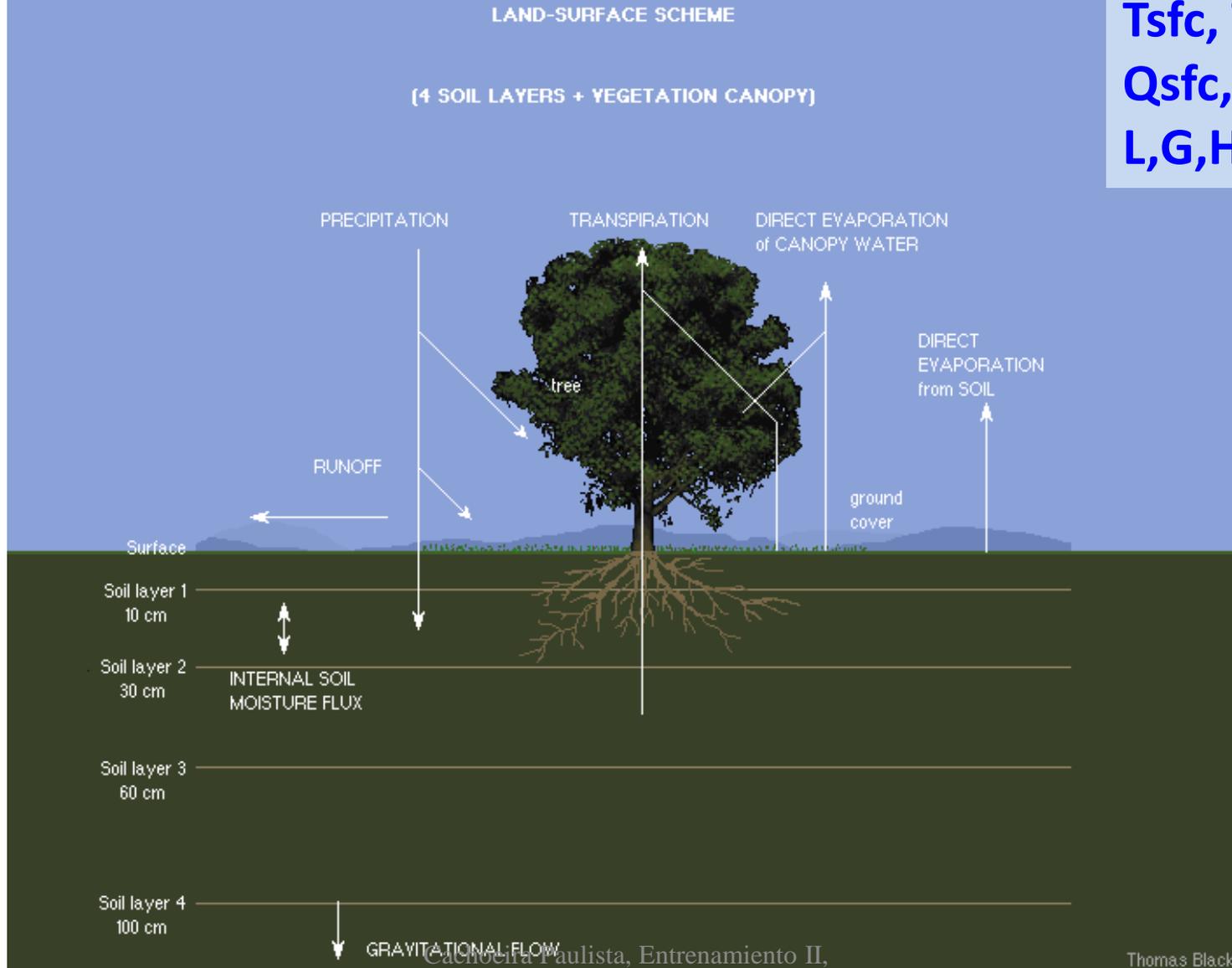
Processos de transferência radiativa:

- 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.

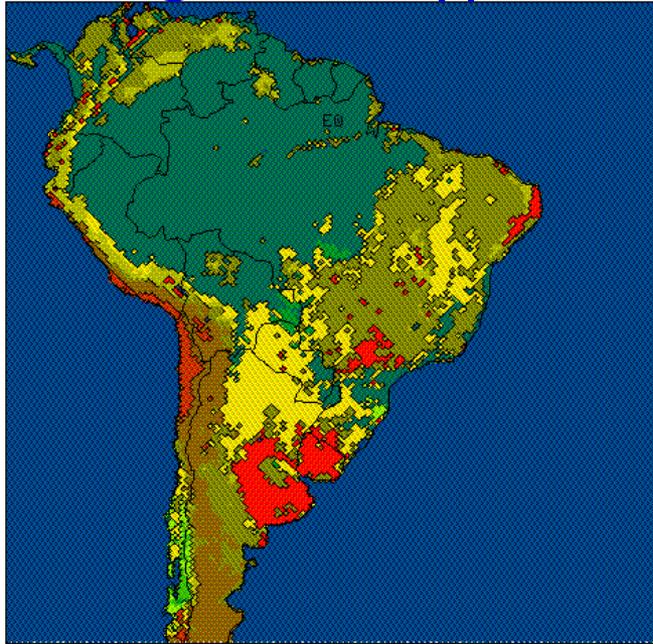
- Fluxos radiativos alteram o perfil de Temperatura

Modelo de biosfera

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



Vegetation types



Land surface scheme maps

Soil Types



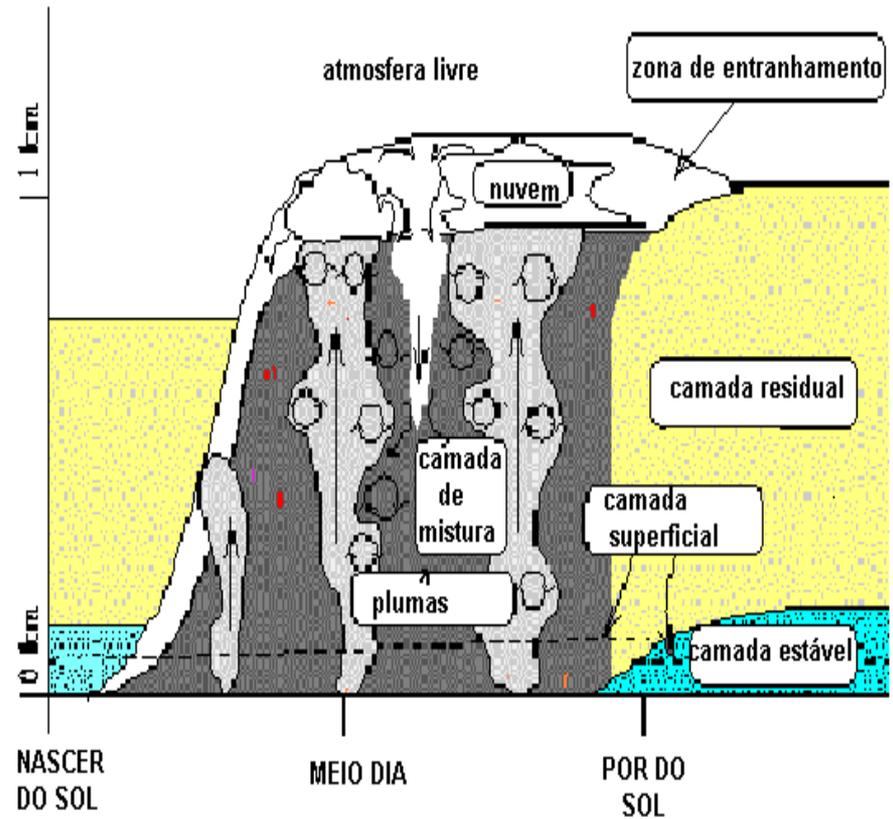
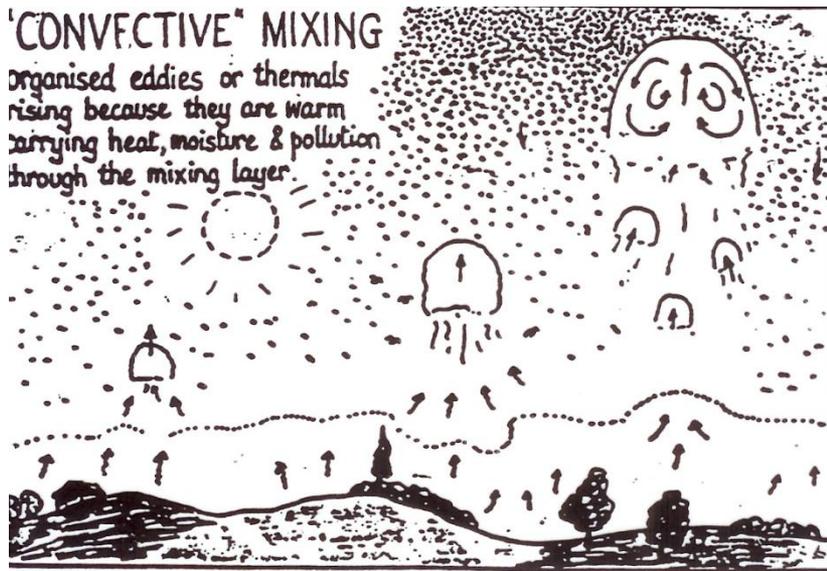
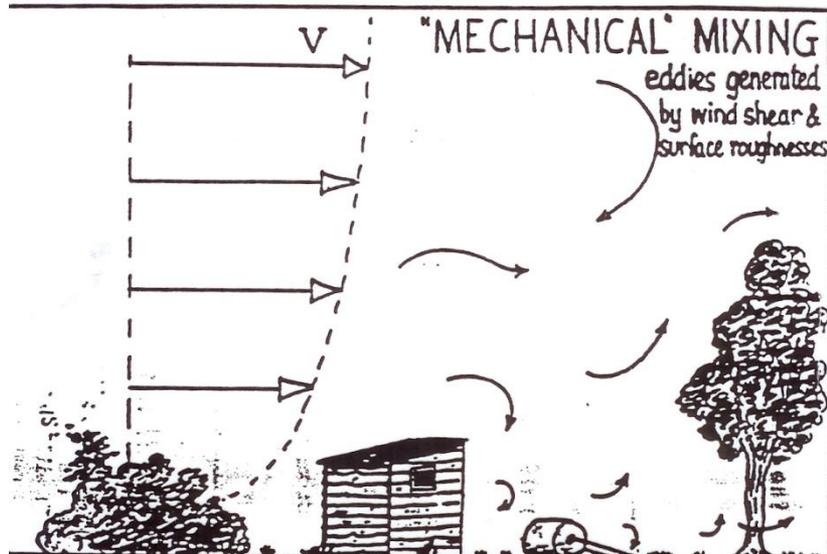
SSiB Vegetation Types (Dorman and Sellers, 1989; JAM)

- 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

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

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

$q^2/2$ = 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.**

Modelos Numéricos Climáticos

Tenta-se responder com modelos climáticos:

- Esse planeta será habitável?
- Haverá mais poluição?
- Será mais quente?
- Haverá água suficiente para irrigação das culturas ou para beber?

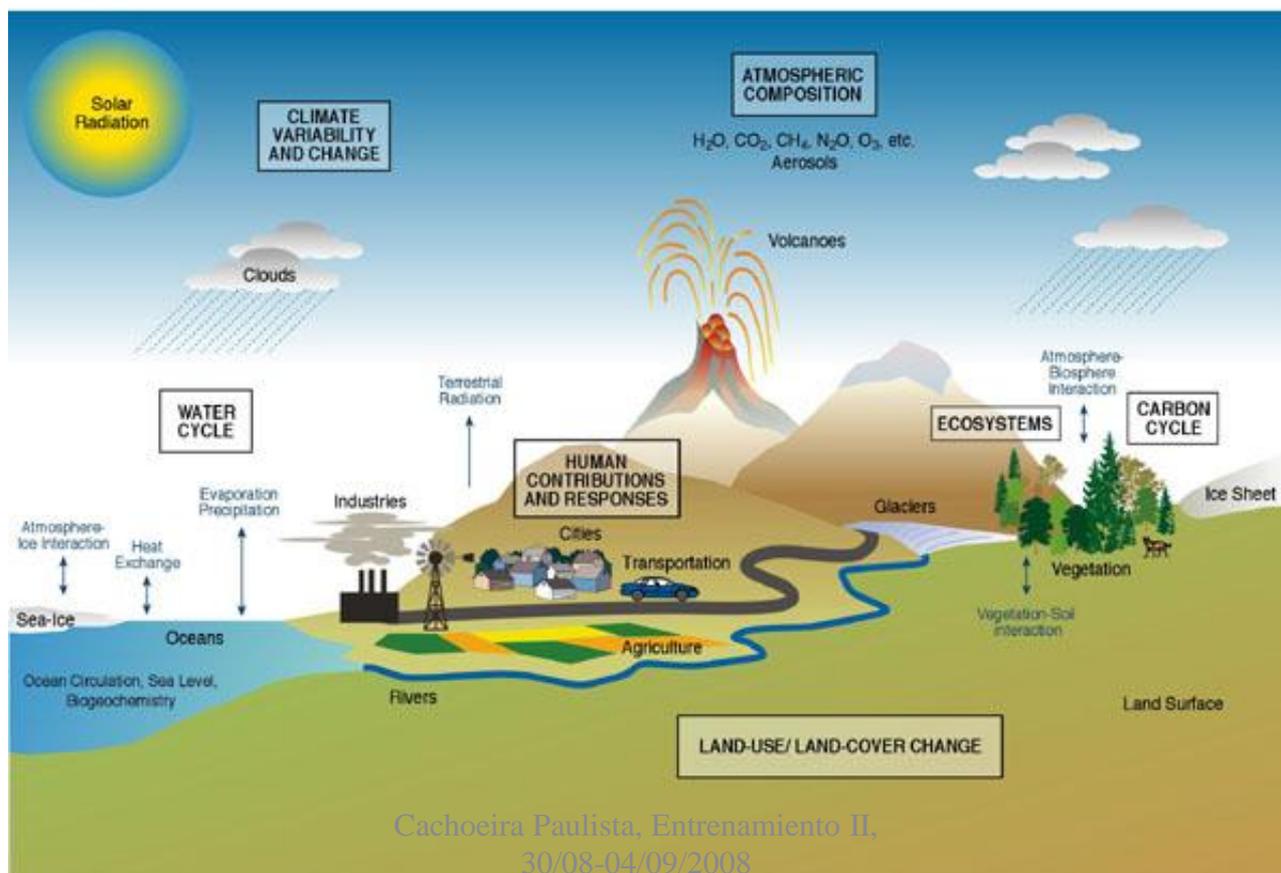
Modelos climáticos estão sendo testados para

- Entender o clima do passado,
- Relacionar o clima presente com as atividades antropogênicas, e
- Projetar o clima futuro.

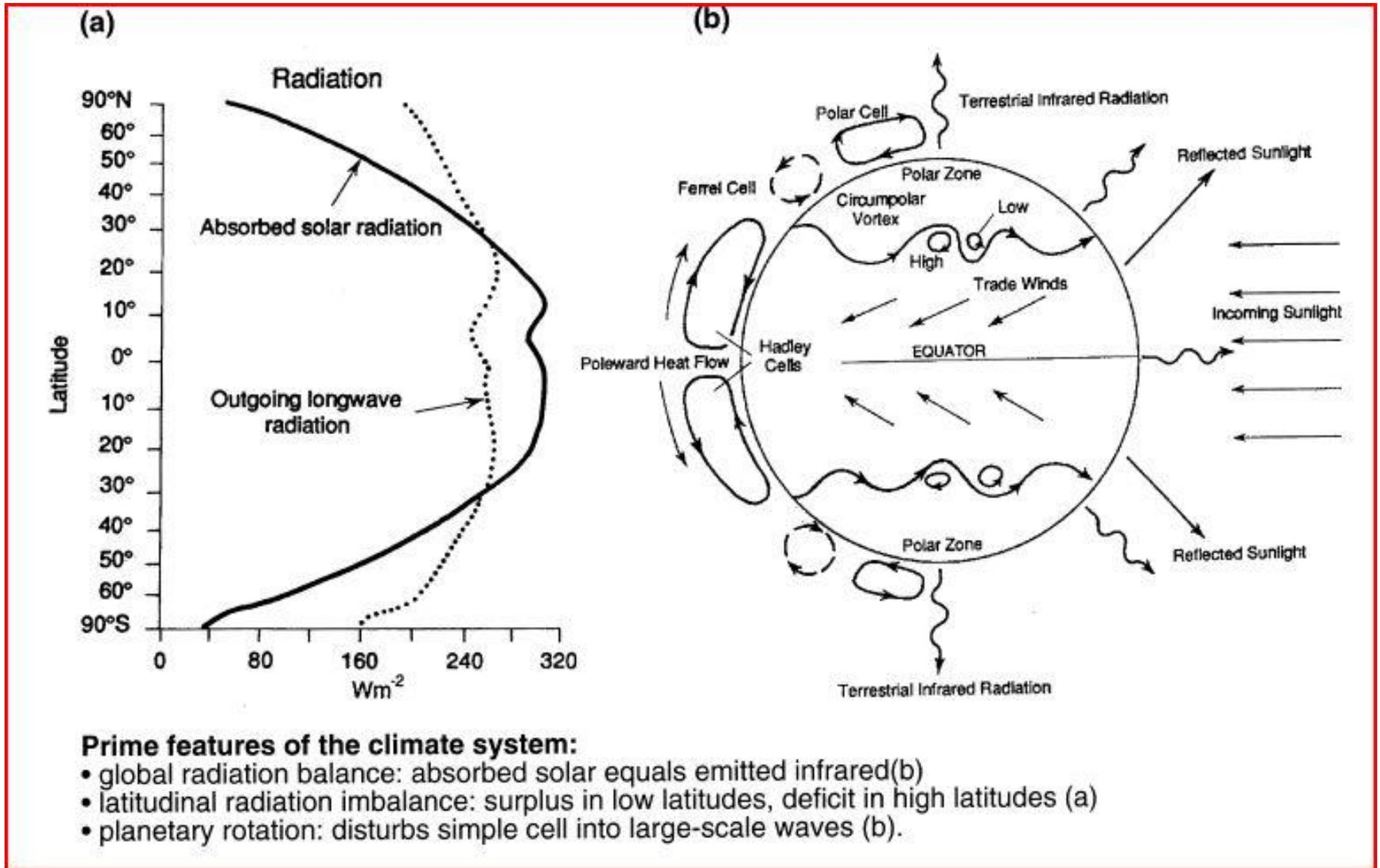
Modelagem Numérica do Clima

Clima : estado médio da atmosfera

Sistema climático: atmosfera, hidrosfera, biosfera, criosfera, a superfície terrestre e suas *interações*.



Clima



Controle da TSM sobre o clima tropical

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

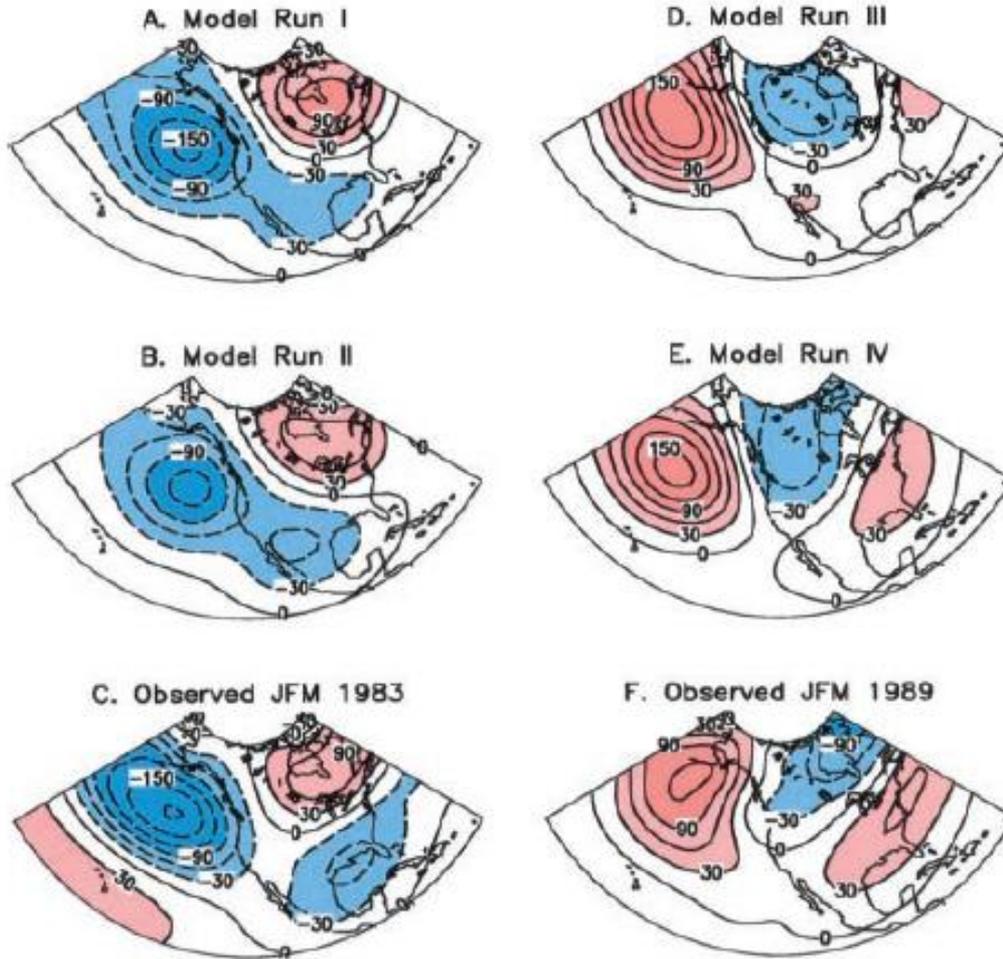


Fig A e D; B e E
utilizam iguais CIs e
CCs (TSM) diferentes
-> padrões diferentes

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

Forçantes e feedbacks no sistema climático

1. Nuvens e vapor d'água

Maior quantidade de nuvens altas > maior aumento do efeito estufa com radiação de onda longa re-emitida

Maior quantidade de nuvens baixas > menos radiação de onda curta incidente chegando a superfície.

Se a temperatura aumenta > conteúdo de vapor d'água aumenta > absorção do infravermelho aumenta.

Há muitas incertezas na representação da nuvens nos modelos.

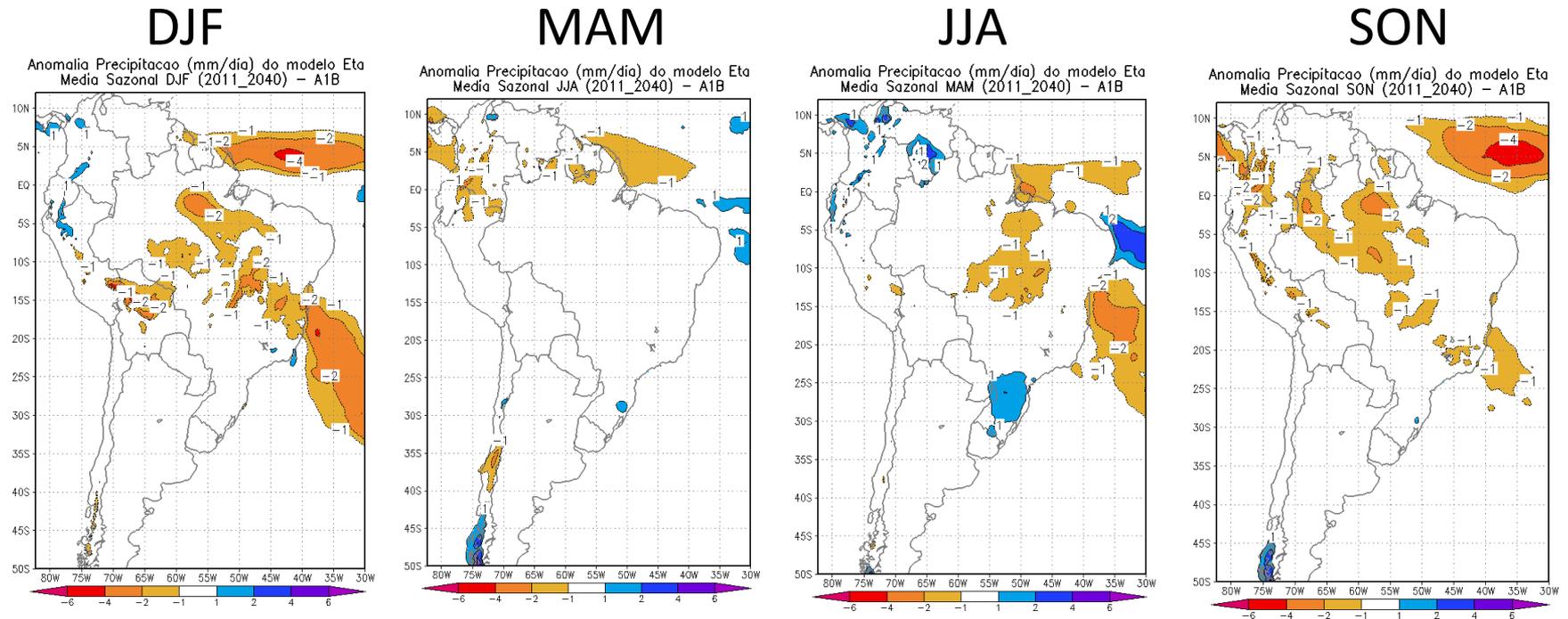
2. Neve e gelo

Aumento da temperatura > maior derretimento do gelo > menor albedo > aumento da radiação de onda curta a superfície.

3. CO₂

Aumento de temperatura > plantas fixam mais CO₂ > redução de CO₂

Diferenças entre os climas: 2011-2040 e 1961-1990,
simuladas pelo Modelo Eta com cenário **A1B** do **HadCM3**. A)
Média de DJF (verão austral); B) Média de MAM (outono
austral); C) Média de JJA, o inverno austral; e D) Média de SON
(primavera austral).



precipitação

Cachoeira Paulista, Entrenamiento II,
30/08-04/09/2008

1 realização

previsibilidade

• 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.

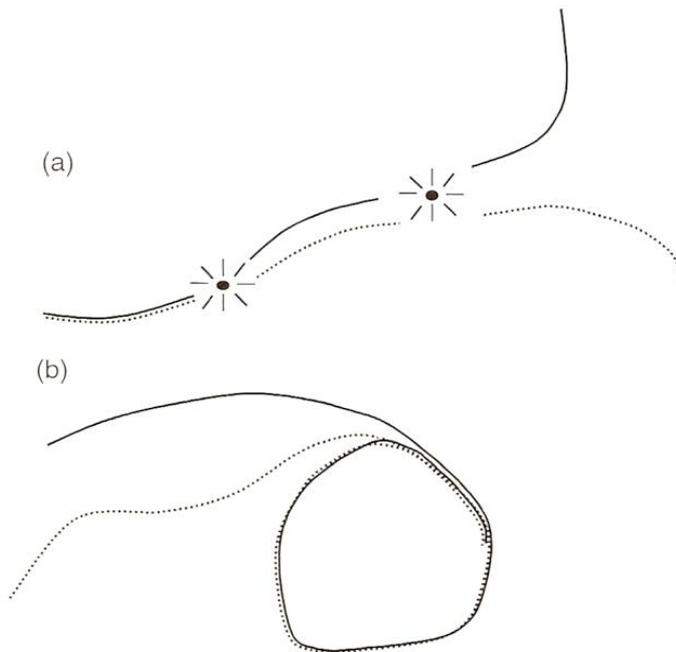


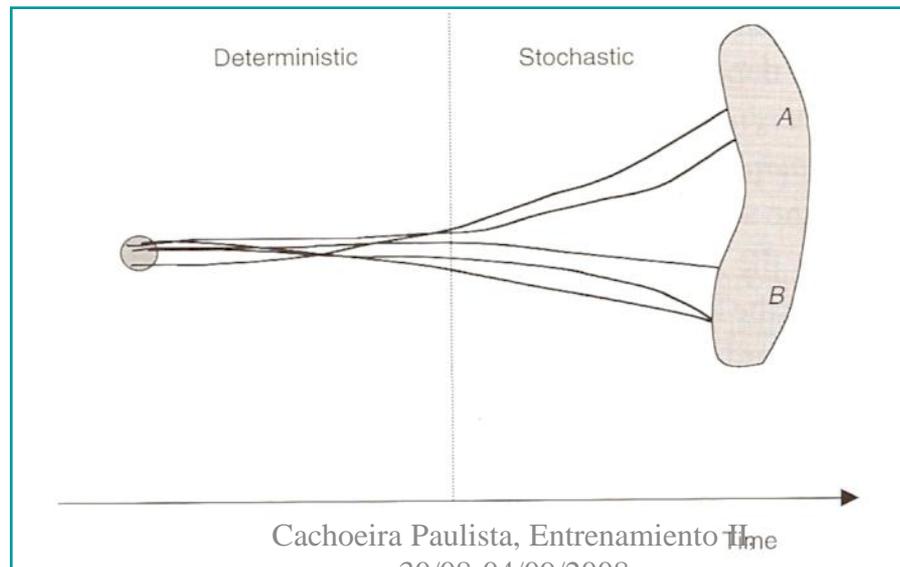
Figure 6.1.1: Schematic illustrating trajectories of: (a) a dynamical system with instabilities, which no matter how close they initially are, inevitably drift apart, and (b) a stable system with stationary or periodic orbits: after a possible transient stage, the trajectories stay close to each other,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

Kalnay, 2003

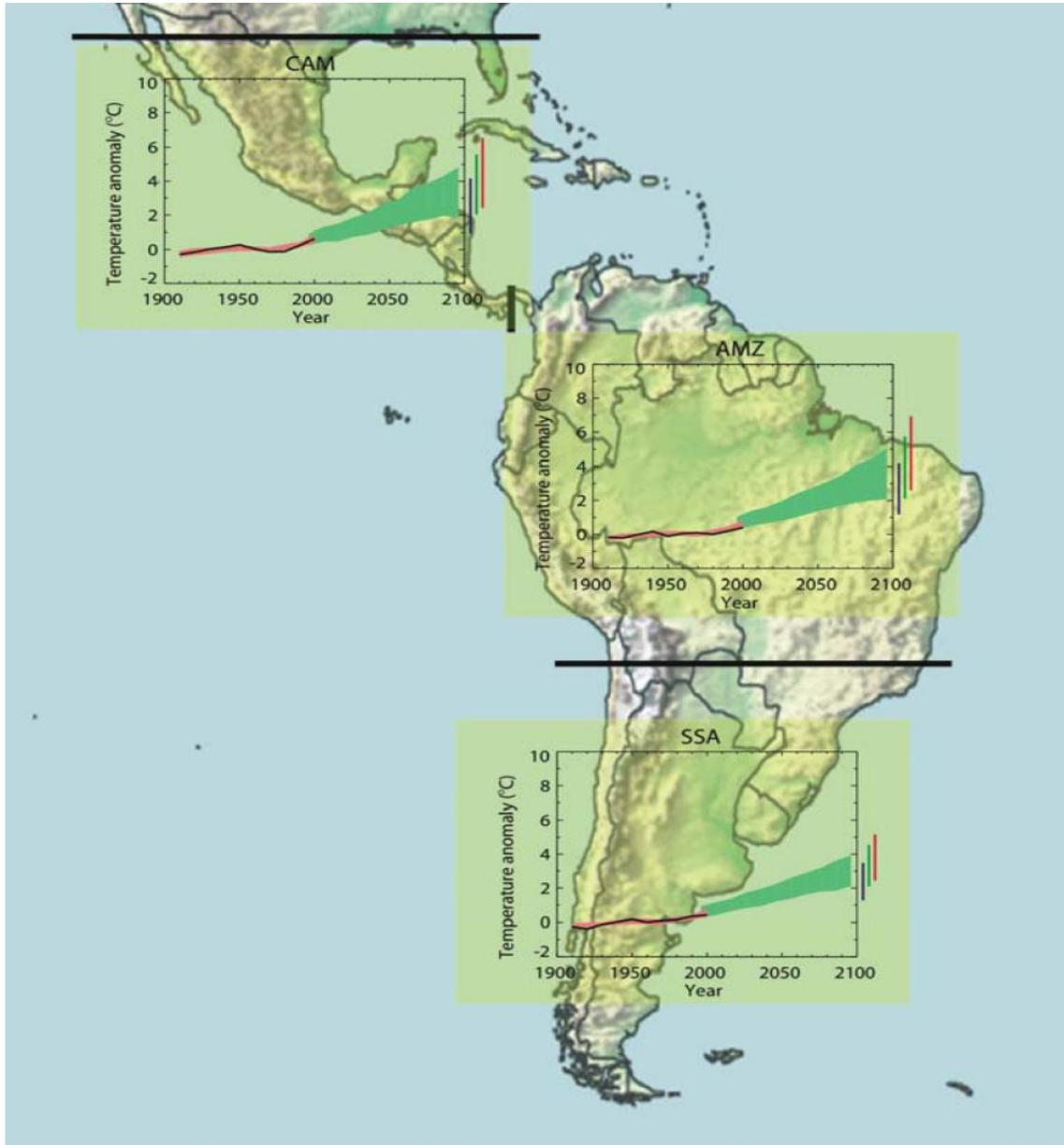
MÉTODOS de GERAÇÃO da PREVISÃO POR CONJUNTO:

- 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.



Warming for Central America, Amazonia and southern South America



For 1900–2000 as observed (black line) and as simulated (red envelope);

For 2001–2100 as simulated for the A1B emission scenario (green envelope).

○ The set of AR4 AOGCM simulations used for both periods are only those with all forcings in the 20th century (eleven simulations).

Configuração do Modelo Eta para estudos de Mudanças Climáticas

1. Atualização do CO₂ , 5/5 anos, de acordo com os cenários. Geração dos coef. de transmissividade para cenários A1B e A2;
2. Temperatura da Superfície do Mar geradas pelos AOGCM; Média mensal, atualização diária (385 valores/time slice);
3. Sazonalidade da vegetação; atualização 1/1 mês.
4. Preparação de Tsoil, Qsoil das condições iniciais;
5. Domínio maior nas condições do ECHAM4 (topografia+vegetação).

Pesquisas em andamento e futuras

1. Geração de mais cenários com Eta-HadCM3, A1B de baixa, média e alta sensibilidade;
2. Simulação do clima presente com Era-Interim;
3. Aninhamento com modelo PVM (Potential Vegetation Model);
4. Acoplamento ao modelo de vegetação dinâmica IBIS;
5. Inserir representação de superfícies alagáveis com Eta-IBIS;
6. Inserir esquema de parametrização de radiação do Hadley Centre;
7. Testar esquema de convecção Kain-Fritsch com transporte de momentum para modo climático;
8. Modelo Eta-Oceano Acoplado;
9. ...