

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Modelagem Numérica Atmosférica

Chou Sin Chan

chou@cptec.inpe.br

**Entrenamiento em Modelado de Escenários de Cambios Climáticos
Cachoeira Paulista, 13-18 de julho de 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

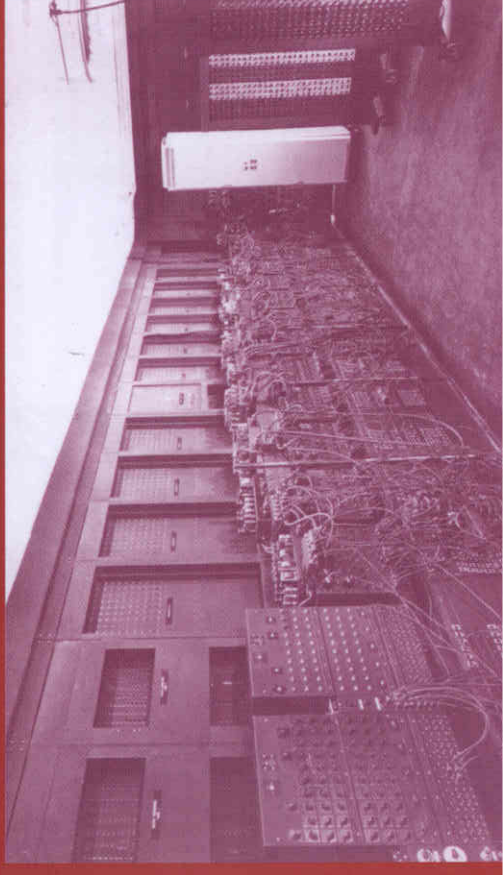
1945 - ENIAC - O 1o computador foi testado com modelo atmosférico.

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.

L'expérience historique de 1950

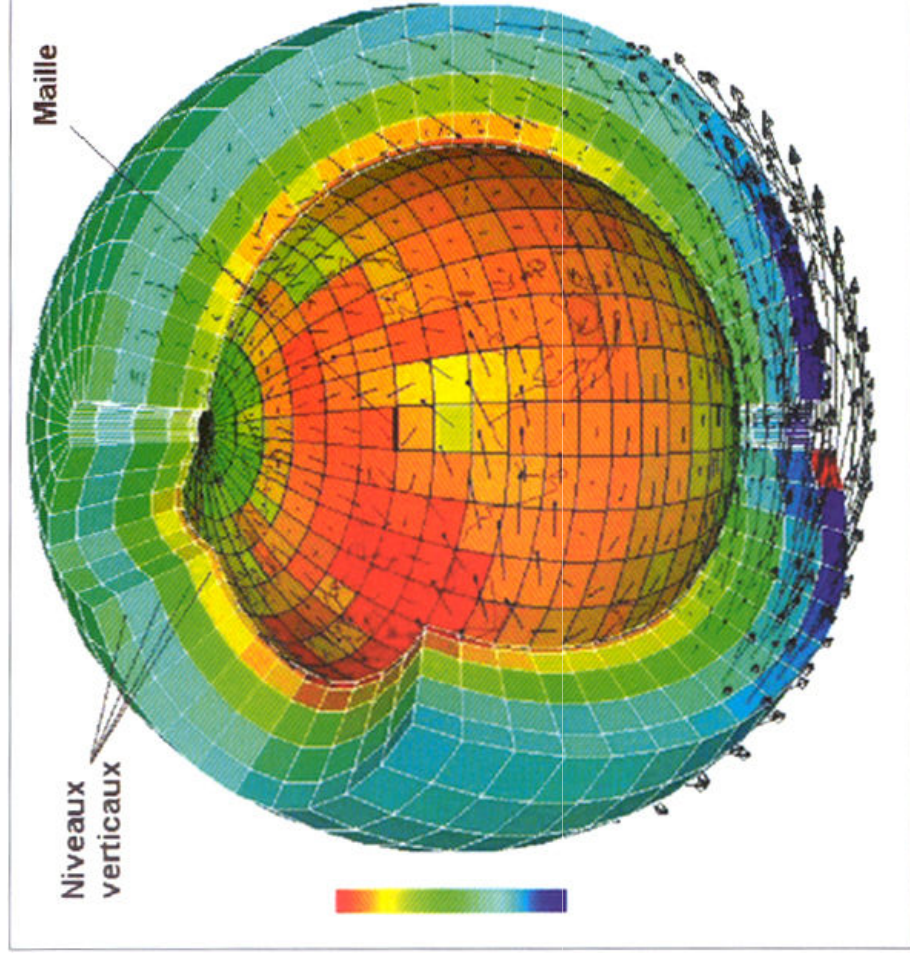


La partie gauche de l'ordinateur Eniac lorsqu'il était installé au Ballistic Research Laboratory de l'armée américaine. (US Army photo)

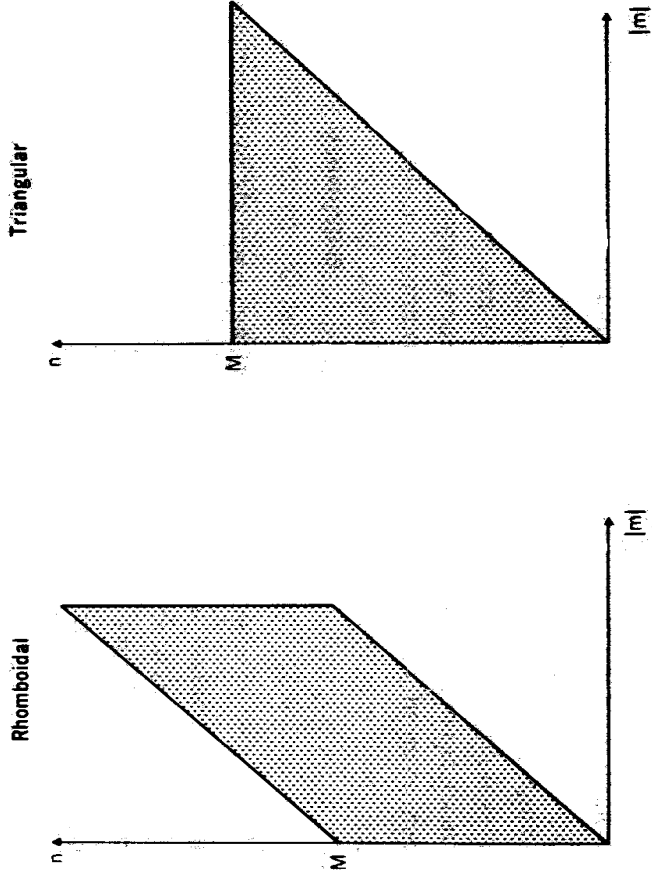
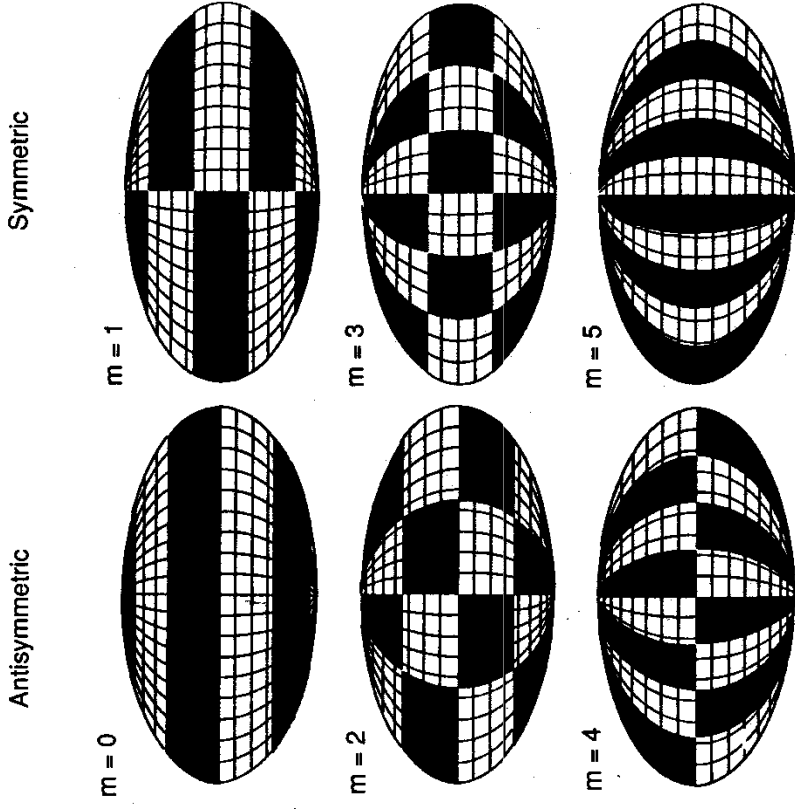
O espaço é dividido em caixas definidas por grades horizontais e níveis verticais.

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

Modelo em ponto de grade



Modelo Numérico Espectral

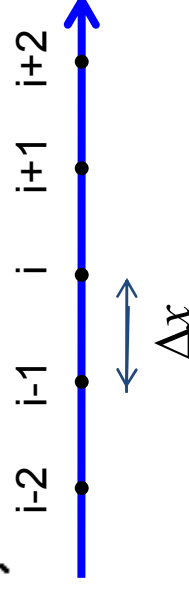


truncamento

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

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):

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

(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:

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

Condição de ESTABILIDADE NUMÉRICA: CFL < 1

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

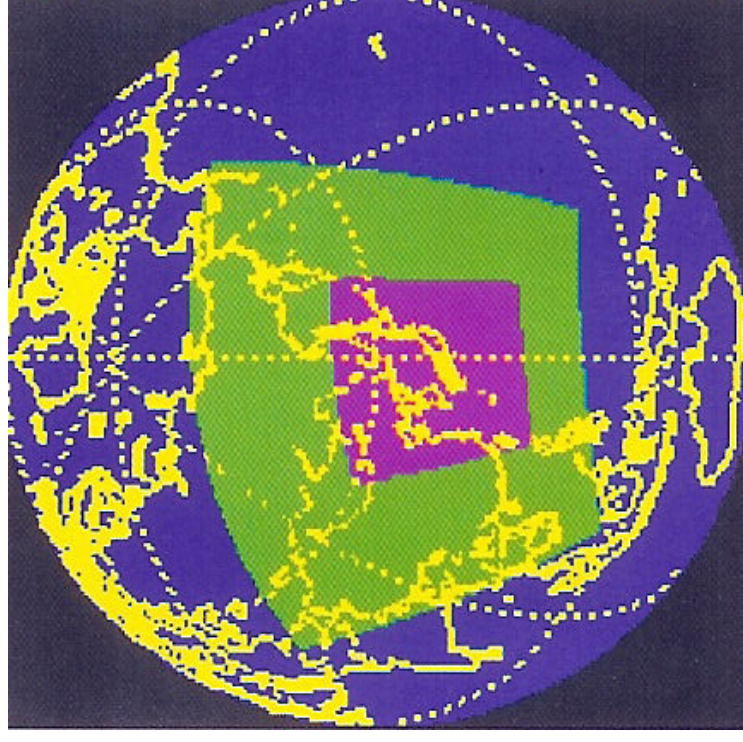
CFL: Courant-Friedrichs-Levy

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

Fenômenos

| | ESCALA ESPACIAL | ESCALA TEMPORAL |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. El Niño | Aprox 15000 km | 3 – 6 anos |
| 2. Osc. Madden Julian – MJO | Aprox 10000 km | 30 – 60 dias |
| 3. Zona Convg Atl Sul – ZCAS | Aprox 6000 km | 5 – 10 dias |
| 4. Ciclone extratropical | 1000 – 6000 km | 1 – 7 dias |
| 5. Ciclone tropical (furacão) | 500 – 1000 km | 1 – 2 dias |
| 6. Frentes Frias/Quentes | 50 – 500 km | 3 – 24 h |
| 7. Complexos Convectivos -MCC | 50 – 500 km | 12 h – 30 h |
| 8. Linhas de instabilidade | 50 – 500 km | 12 h – 30h |
| 9. Fenômenos orográficos | 10 – 200 km | < 24 h |
| 10. Convecção profunda | 1 – 50 km | < 3 h |
| 11. Efeitos urbanos | 1 – 20 km | < 3 h |
| 12. Tornado | 500 m – 1 km | < 30 min |
| 13. Plumas de fumaça | < 500 m | < 30 min |
| 14. Turbulência | < 50 m | < 3 min |

Papel dos Modelos de Previsão Numérica de Tempo



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

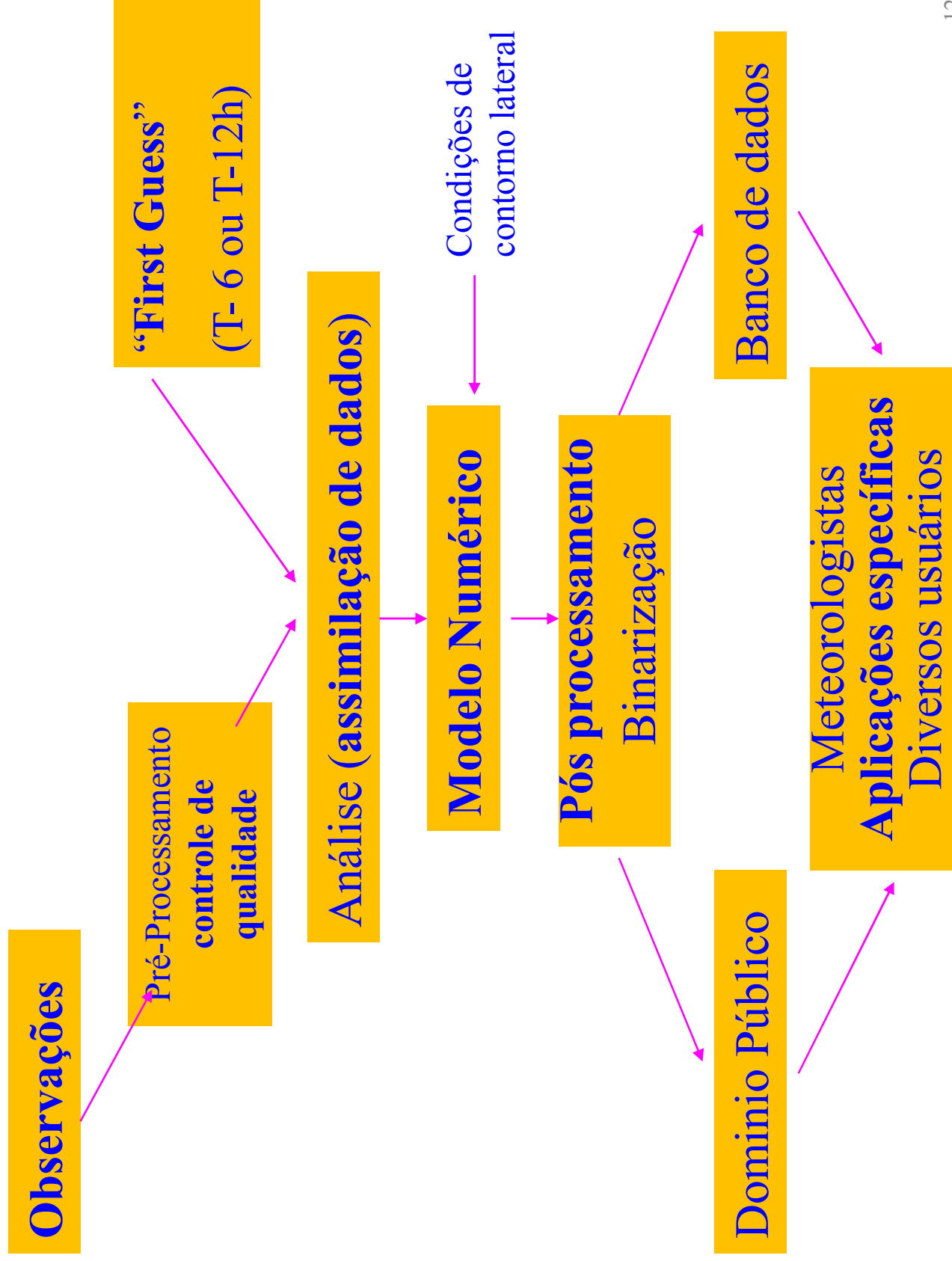
Regionais: Aplicação semelhante aos modelos globais, mas com resolução maior sobre uma área limitada de interesse.

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

Interação entre os modelos



Etapas para produzir PNT



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**

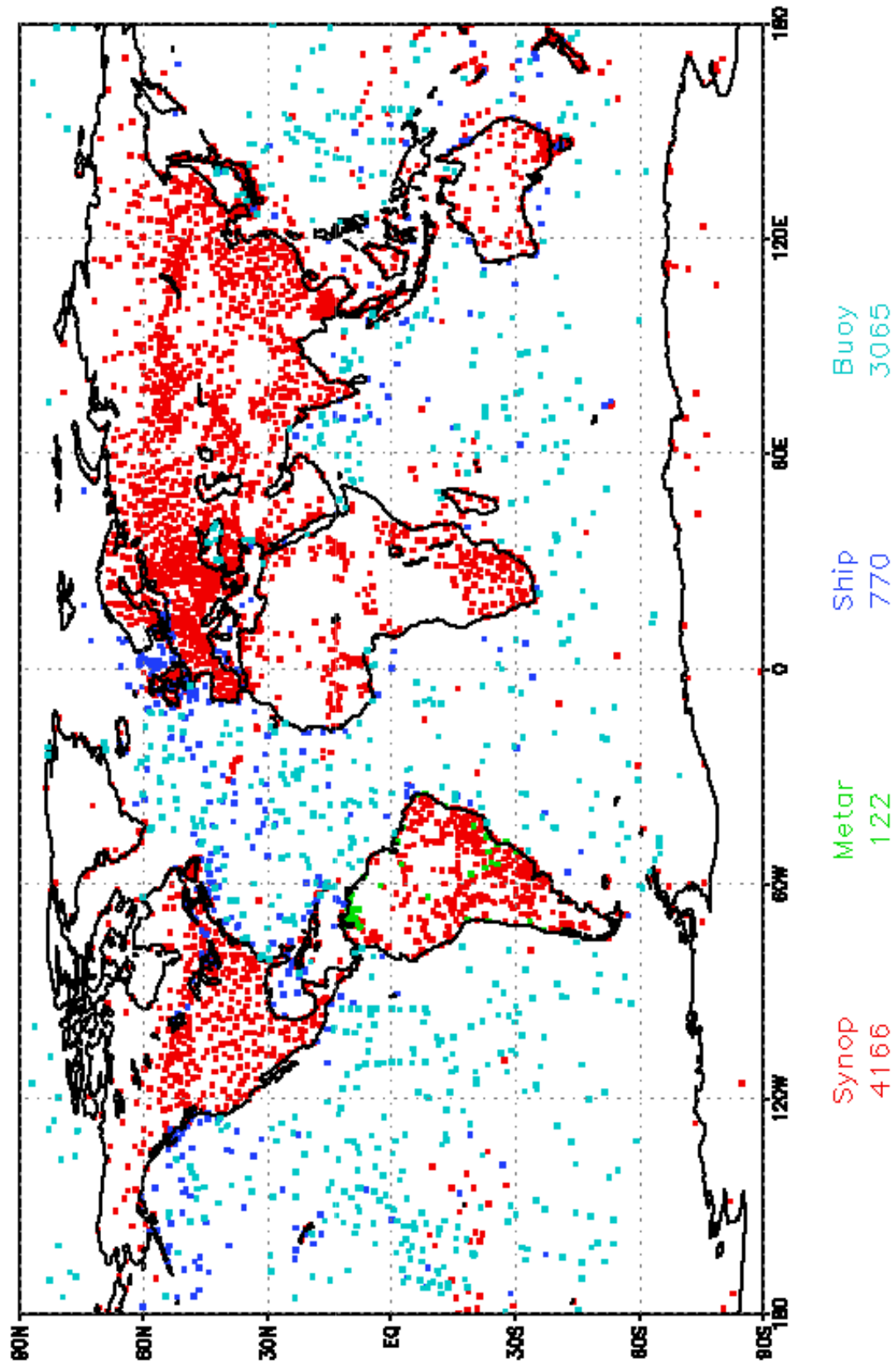
- Precipitação convectiva (esquema de convecção profunda e rasa)
- Precipitação estratiforme (microfísica de nuvens),
- Turbulência atmosférica
- Aquecimento/resfriamento radiativo (esquema de radiação)
- Transferência de água e energia na biosfera (esquemas de superfície)

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.

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

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



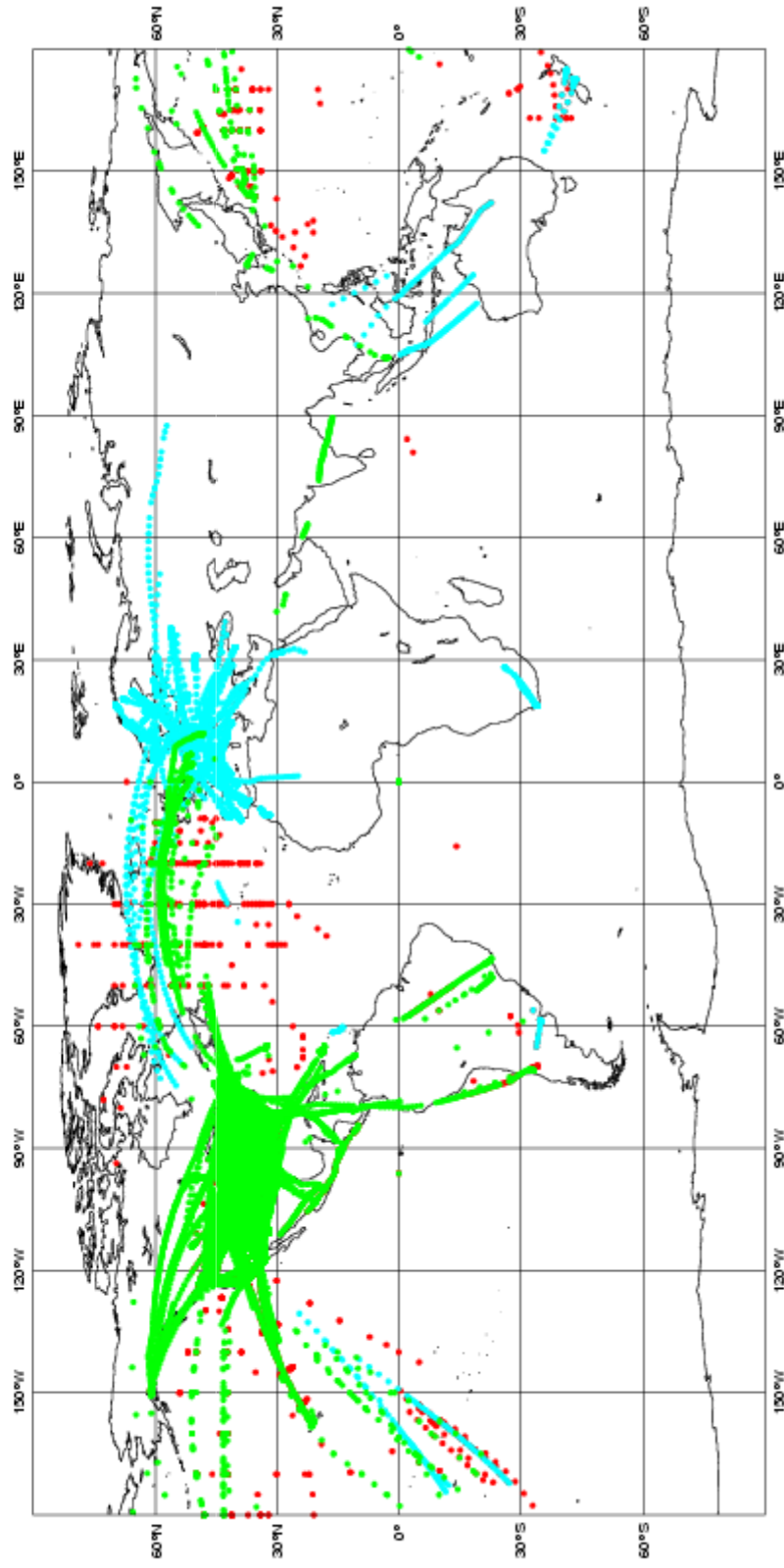
ECMWF Data Coverage (All obs) - AIRCRAFT

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=análise

f= previsão

o= observação

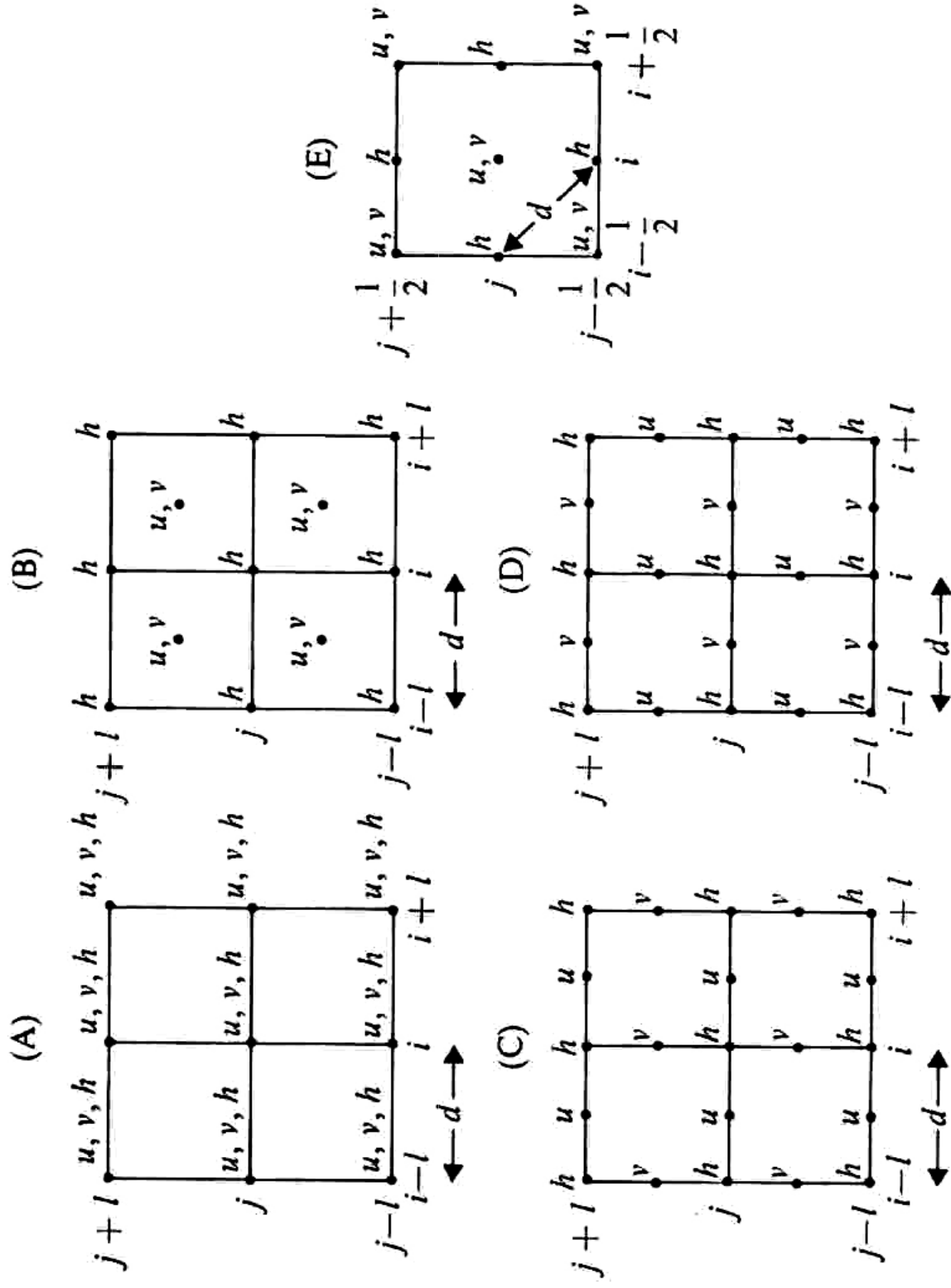
$$W^a = W^f + K (W^o - LW^f)$$

$$L+K = I$$

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

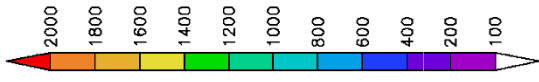
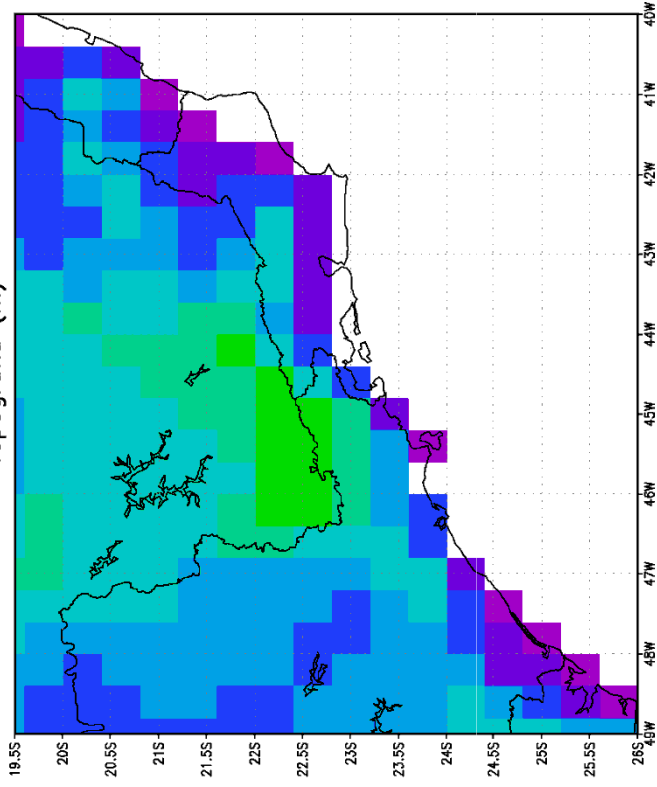
K: covariancias de erros entre previsão e observação

L: operador da observação



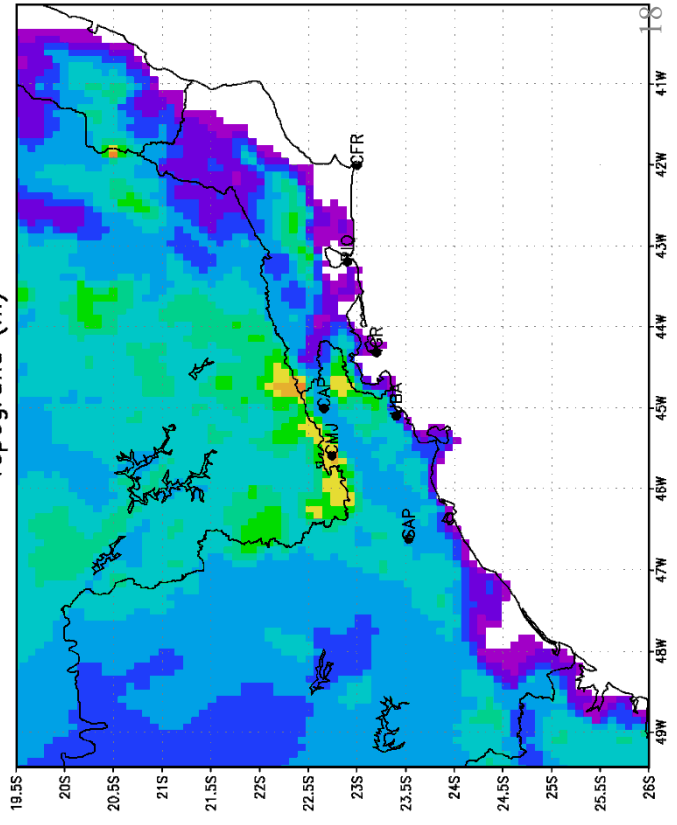
40 km

Modelo Regional Eta 40km
Topografia (m)



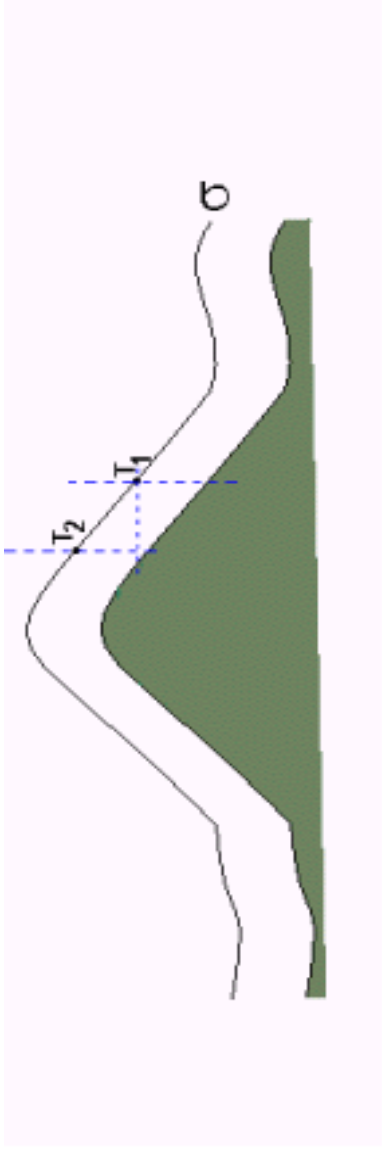
10 km

Modelo Regional Eta 10km
Topografia (m)



sigma

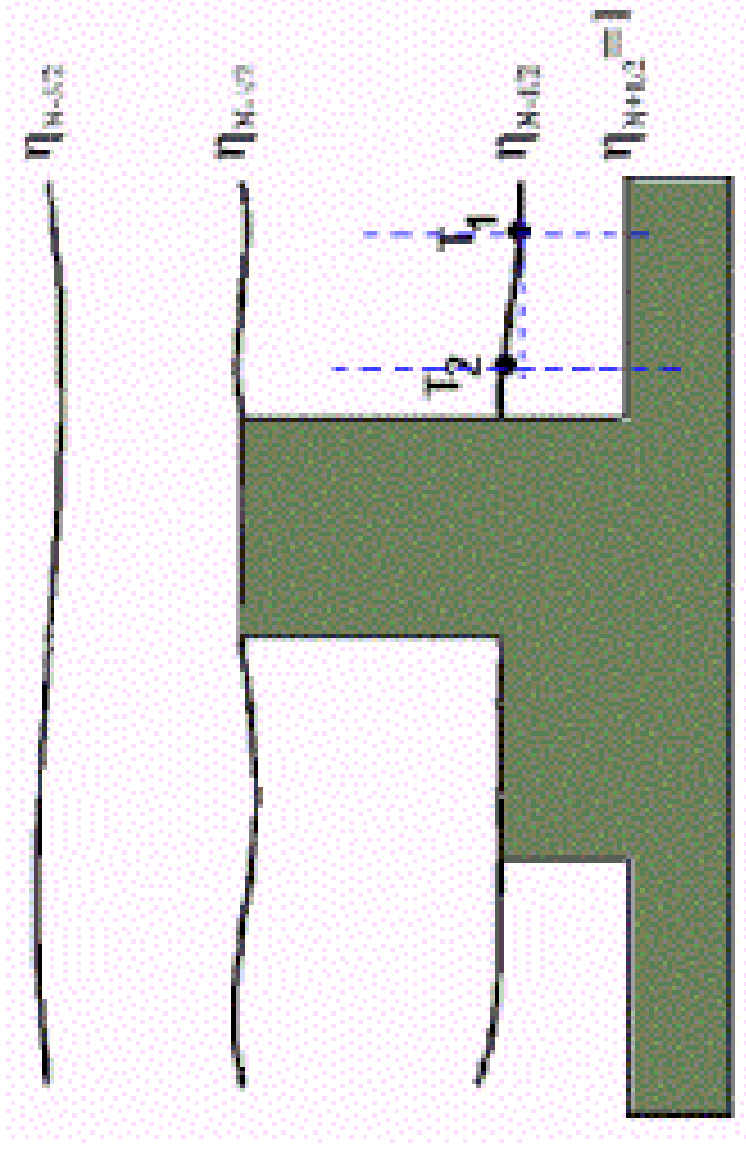
$$\sigma = \left(\frac{P - P_T}{P_S - P_T} \right)$$



eta

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

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



Coordenada Vertical

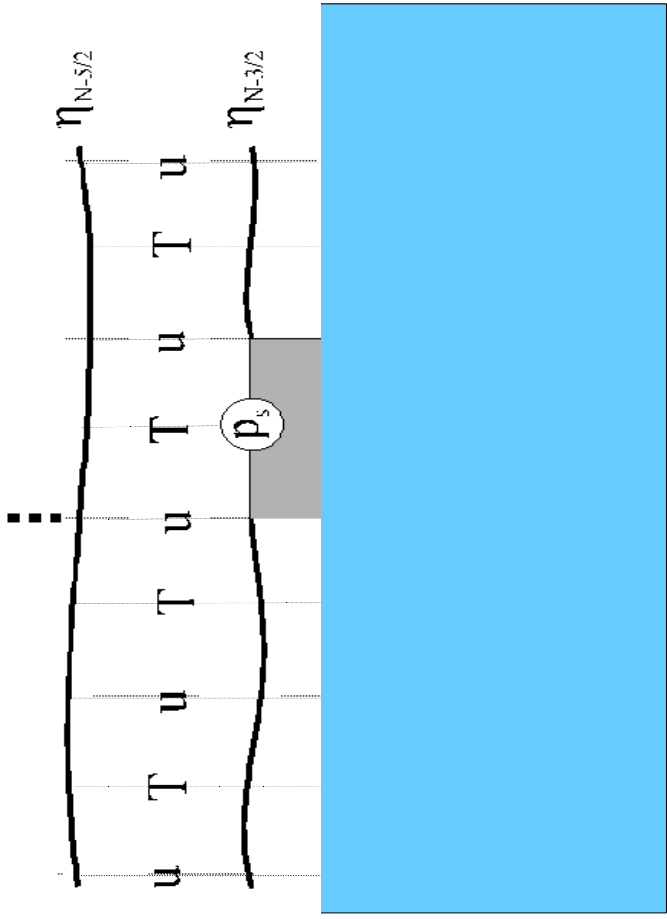
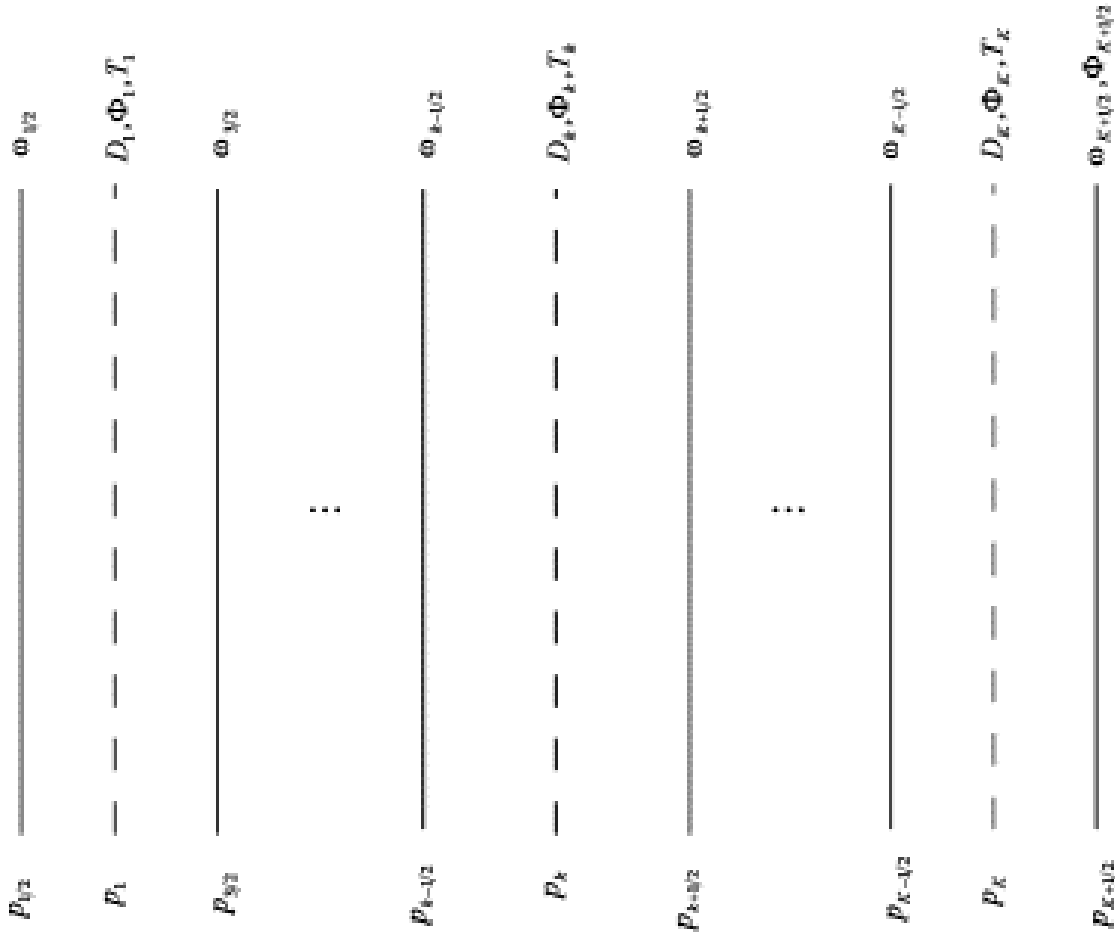
Eta Step-Mountain

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

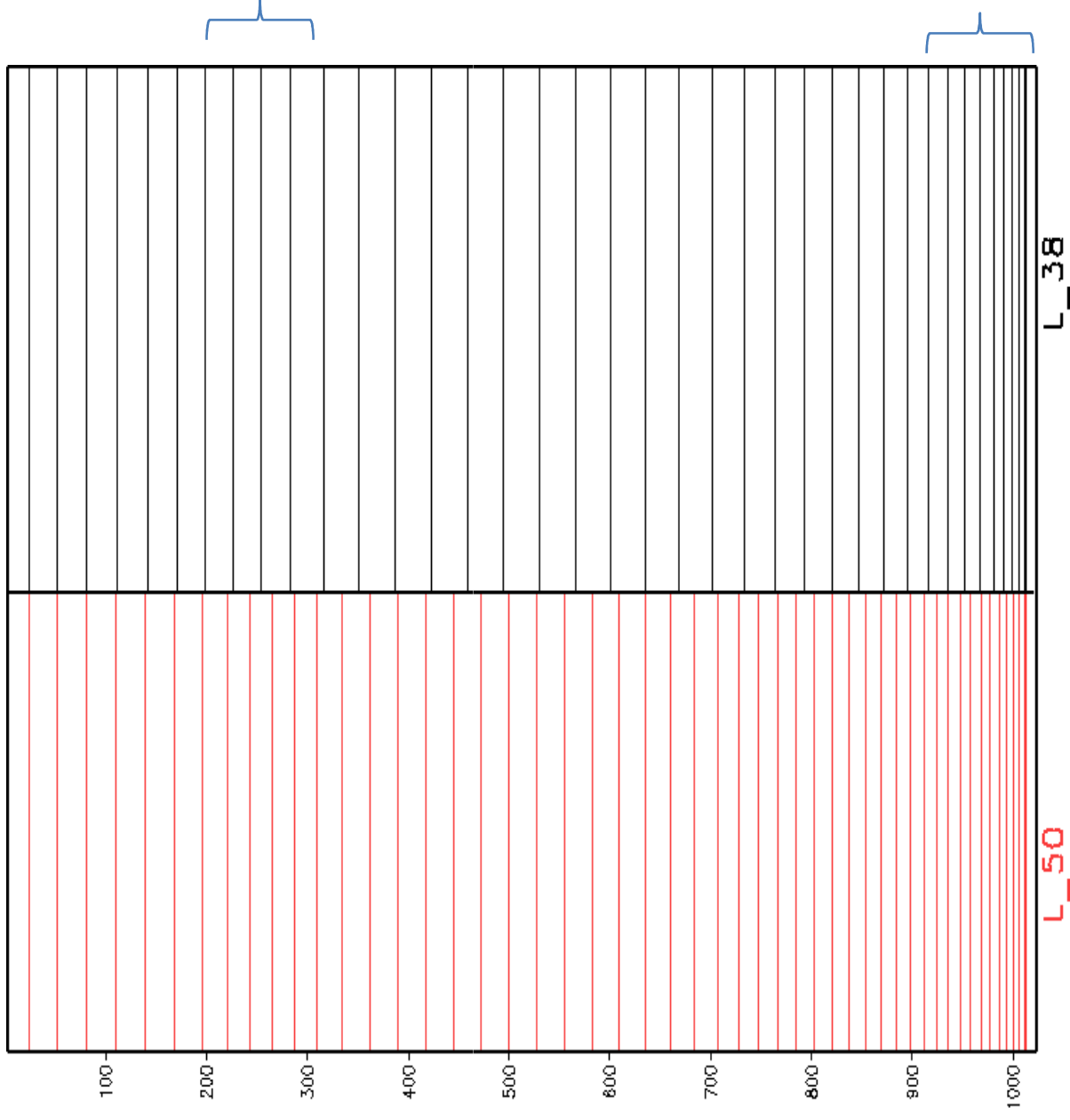
O topo das montanhas coincide com as superfícies de nível do modelo

Topografia e distribuição vertical de variáveis

Grade vertical de Lorenz

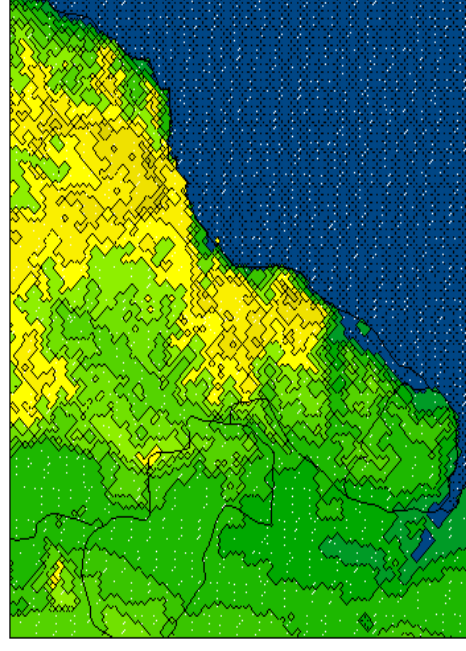
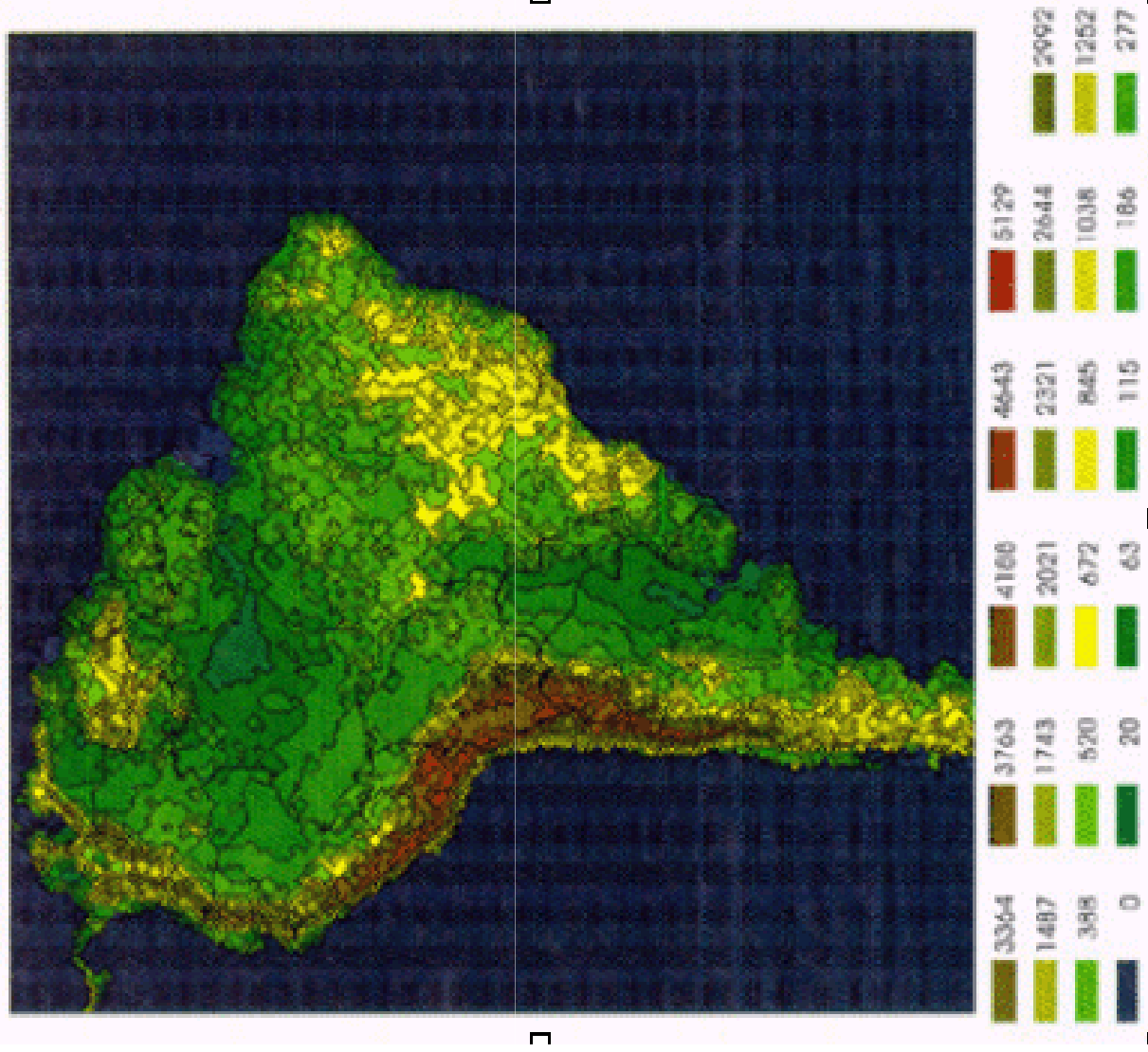


Distribuição Vertical das superfícies eta



Geração da topografia

Dinâmica



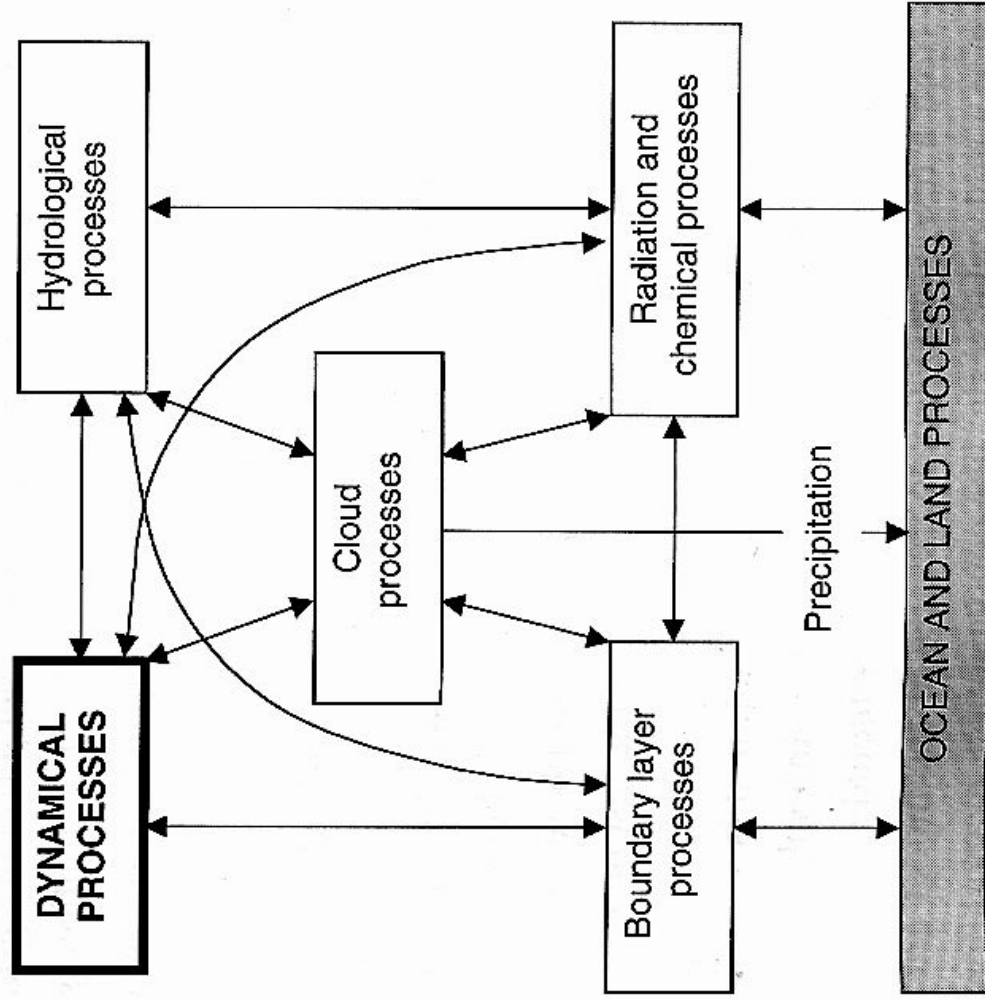
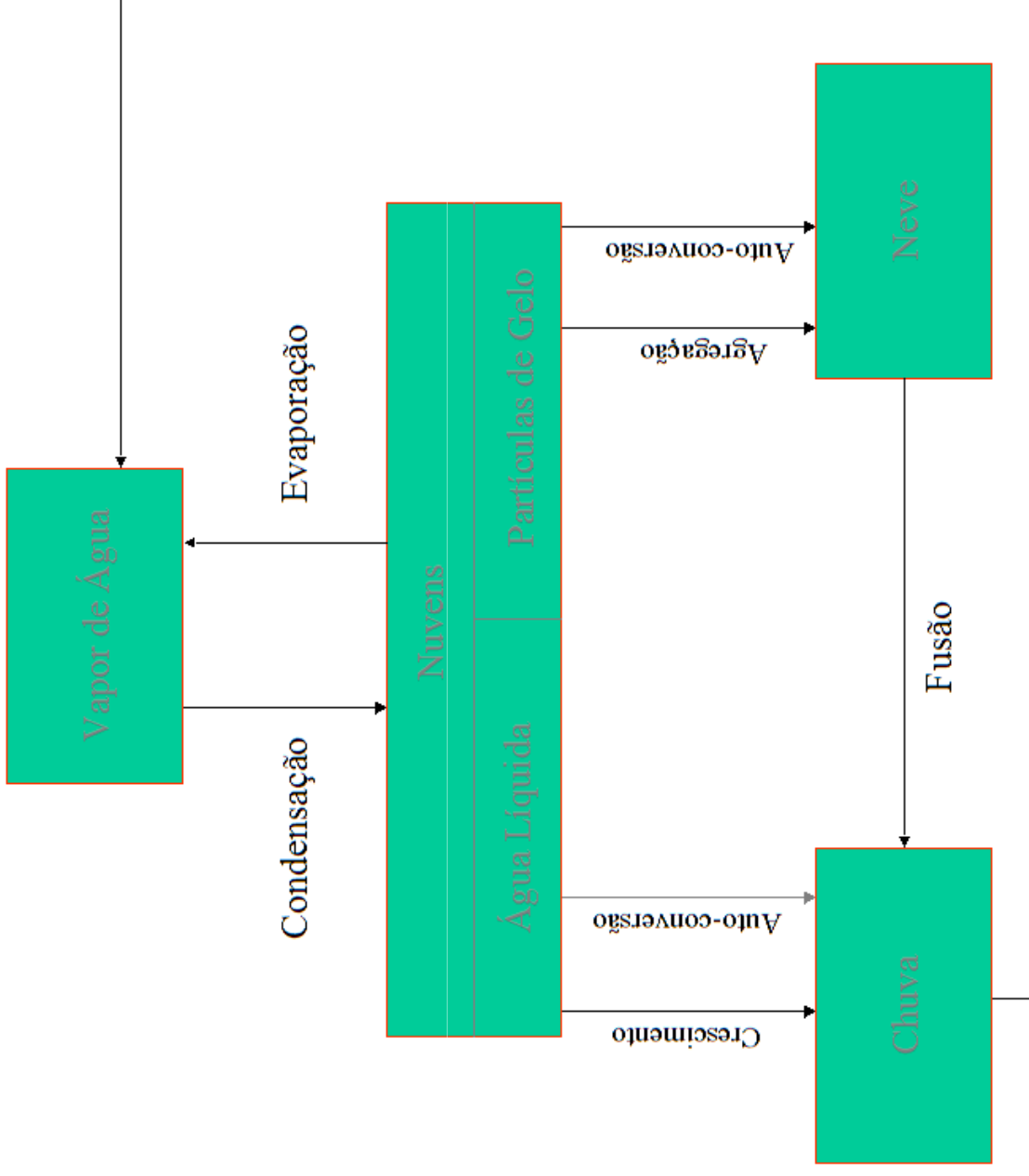


Figure 4.1.1: Physical processes in the atmosphere and their interactions. The dynamical processes for resolvable scales, in bold, are explicitly computed by the model “dynamics” (discussed in Chapters 2 and 3). The other subgrid-scale processes are parameterized in terms of the resolved-scale fields.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

- A área é considerada grande o suficiente para conter o aglomerado, mas ainda pequeno em relação ao tamanho da grade do modelo
- Nuvens Cumulus podem se organizar em aglomerados e seus efeitos são percebidos na grade da resolução 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.

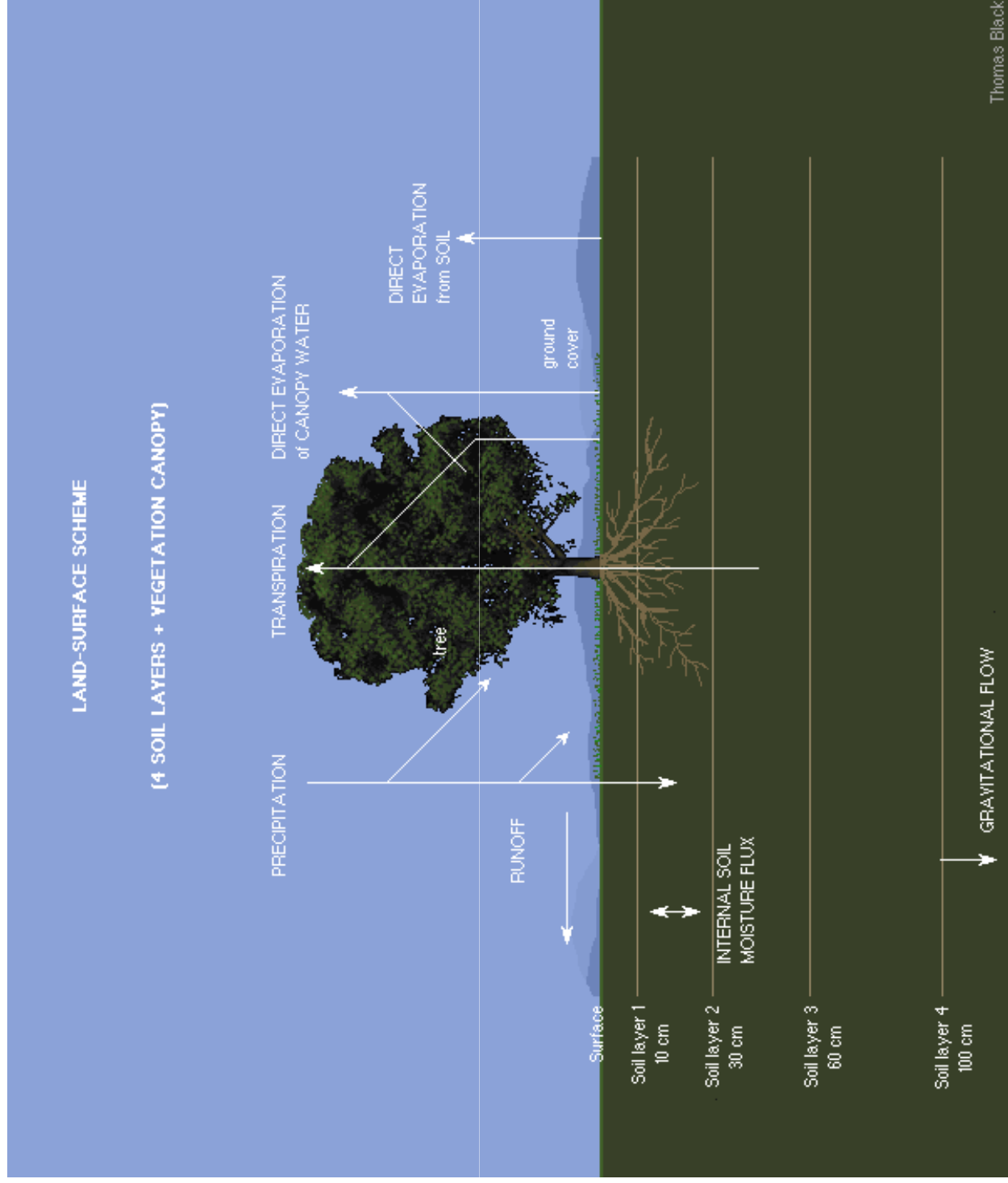
2. Parametrização de NUVENS ESTRATIFORMES (microfísica de nuvens)



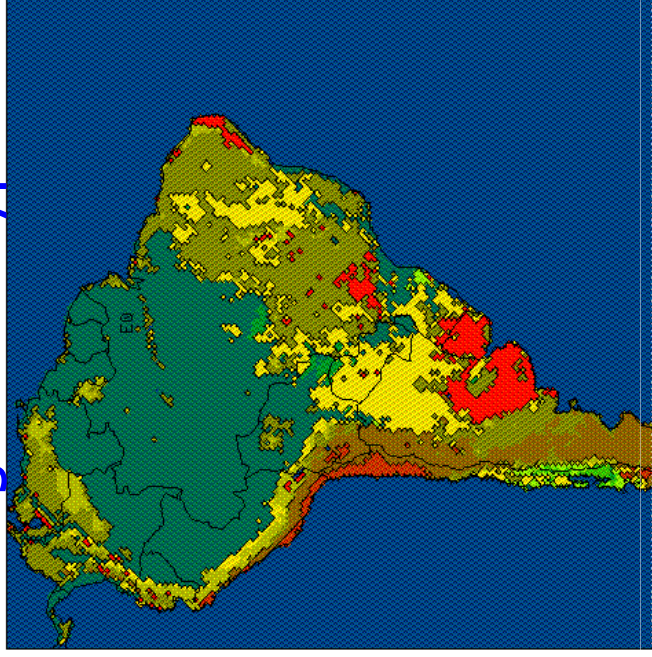
Modelo de Nuvens e Precipitação de Grande Escala

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 tempo do Eta)

3. Modelo da biosfera



Vegetation types

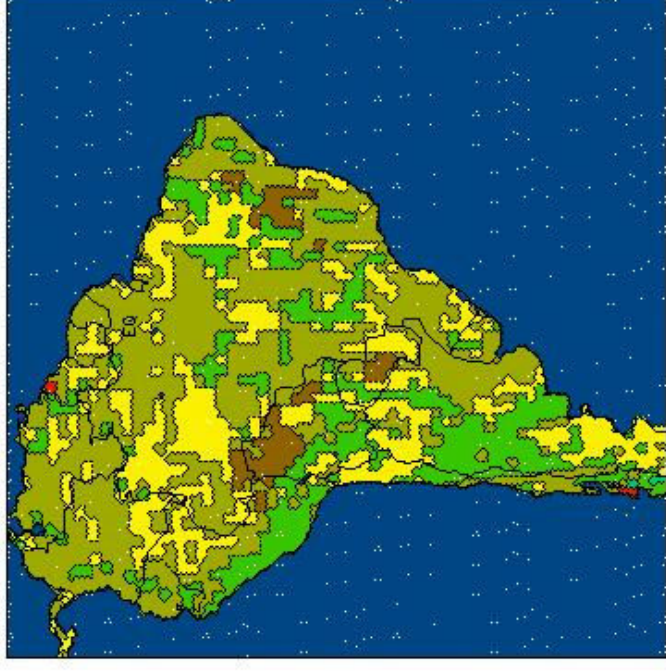


SSiB Vegetation Types (Dorman and Sellers, 1989; JAM)

- 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

Física

Soil Types

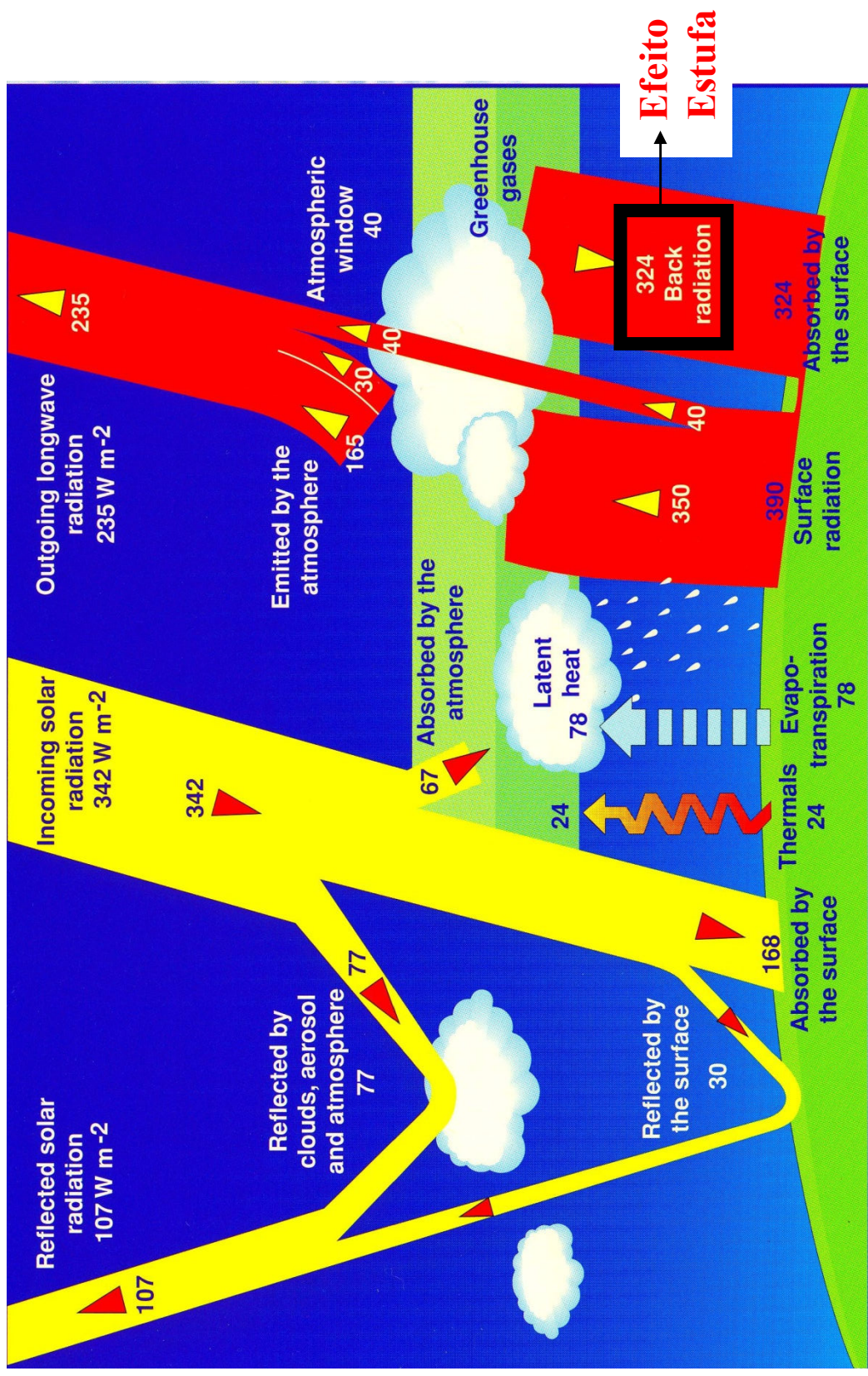


TYPES

| 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 |

4. Interação entre a radiação solar e a atmosfera

Radiação



Radiation Balance of the Earth (Jeffrey T. Kiehl)

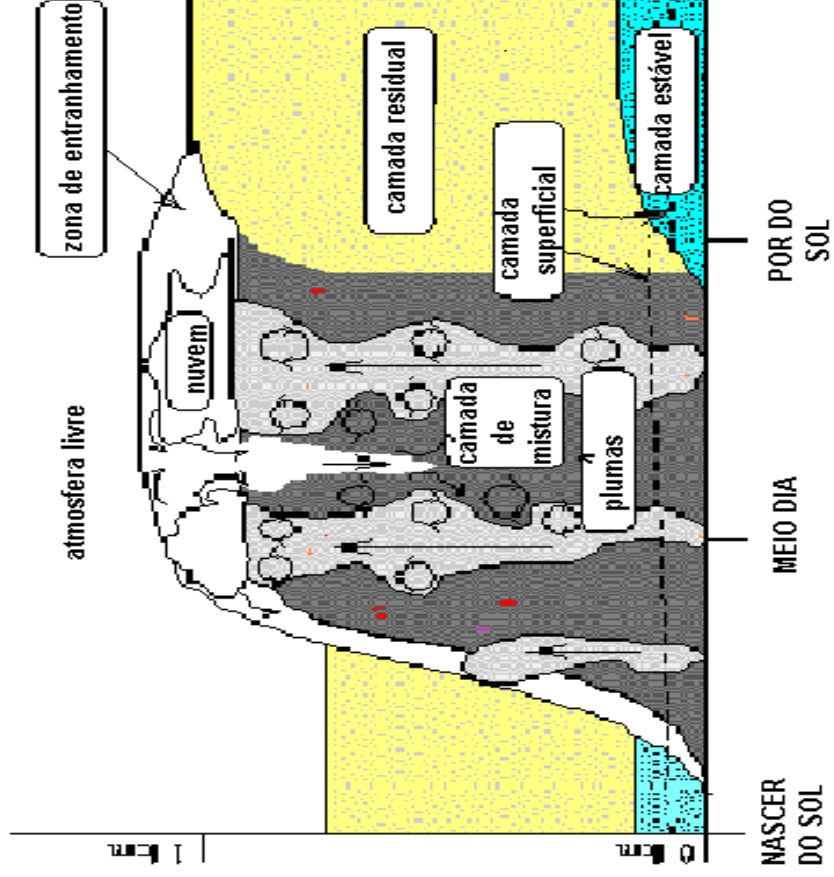
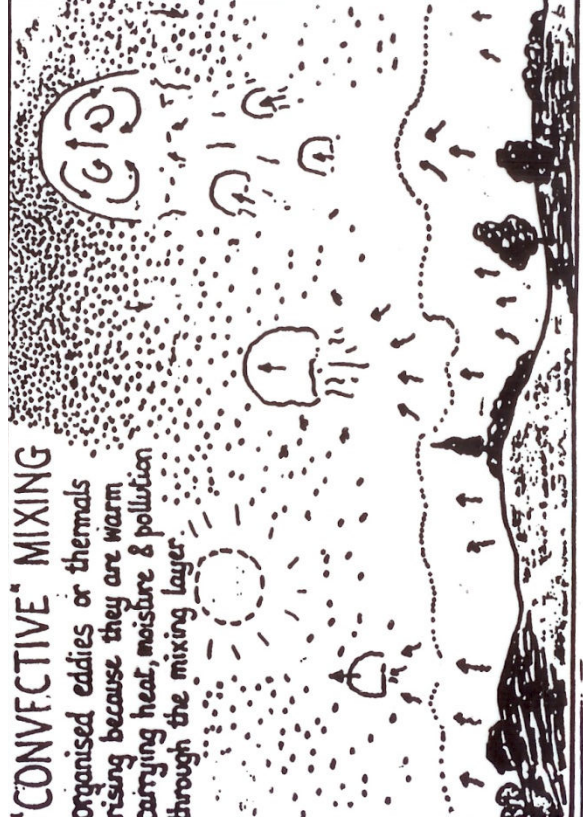
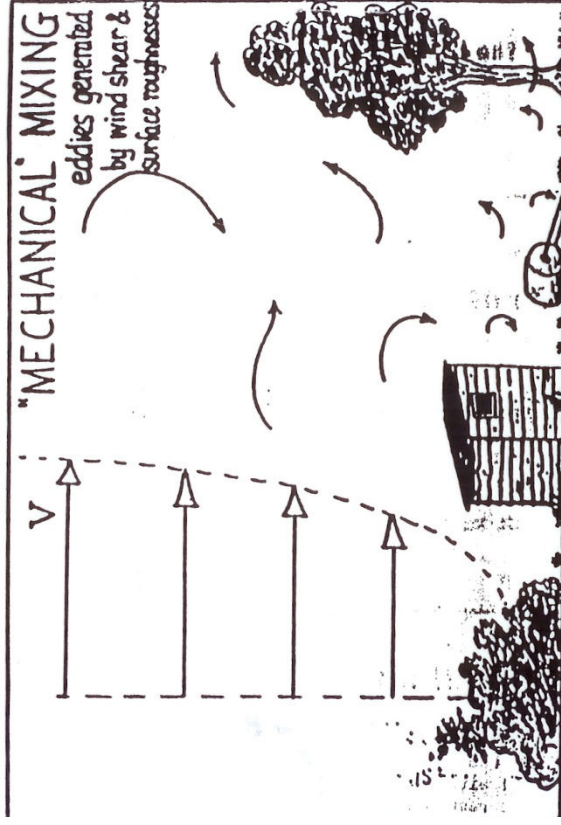
$$69\%(S/4)=\sigma\cdot T^4 - T=-19C$$

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.

5. TURBULENCIA ATMOSFERICA



Esquemas de Turbulência

1. Monin-Obukhov - Camada superficial
2. Mellor e Yamada 2.5 - Prognóstico de TKE

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

$q^2/2$ = 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

Variáveis

Do modelo

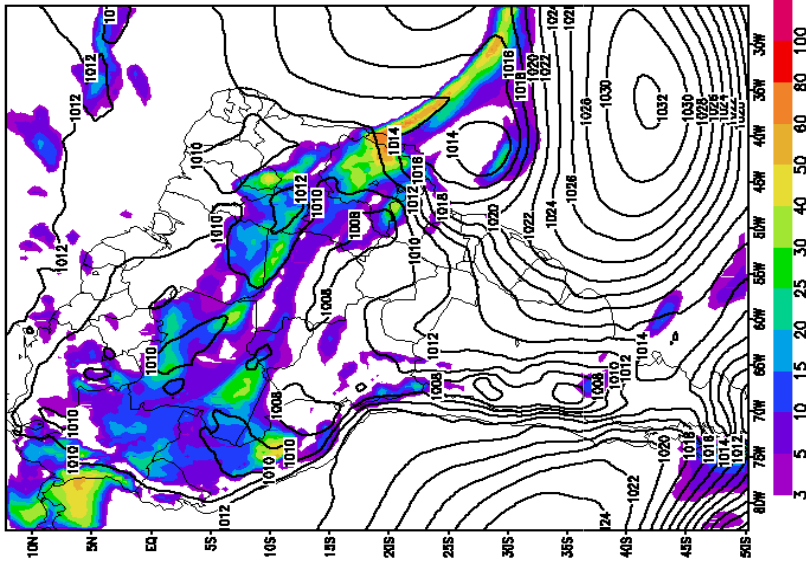
- Ps
- θ
- q
- u, v (grade E)
- precip

Pós-processadas

- Pmsl
- T
- UR
- u, v (lat/lon)
- 6h precip
- CAPE
- etc.

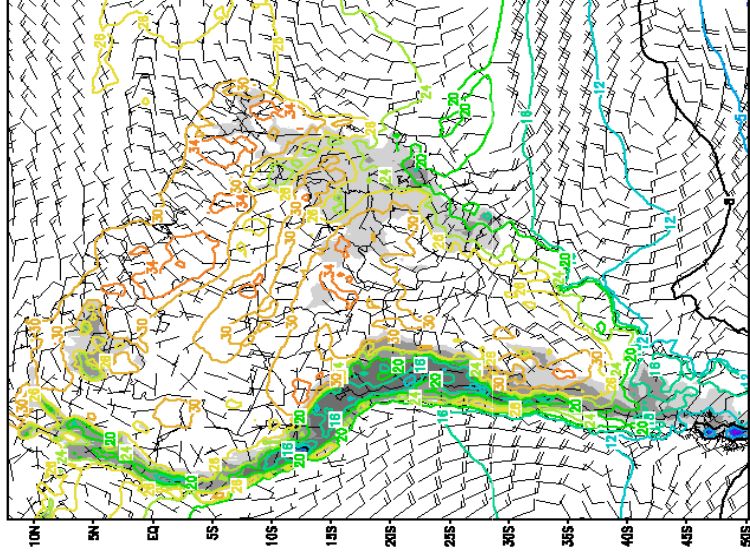
Pós-processamento

Previsão de 0120 horas iniciada em 07/12/2004, 00UTC
 válida para 12/12/2004, 00UTC (Domingo)
 Sombreado: Precipitação Total Acumulada em 24h (mm)
 Contorno: Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa)



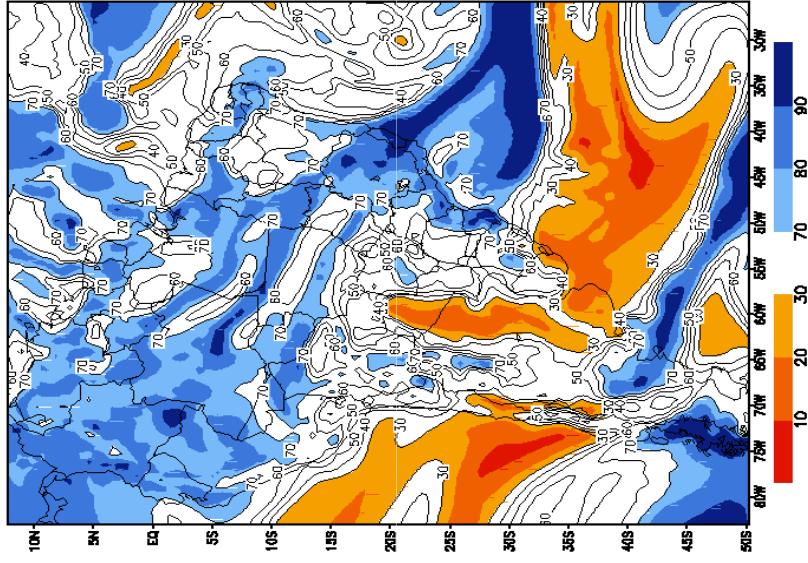
Precipitação
 acumulada em
 24h

Previsão de 0114 horas iniciada em 07/12/2004, 00UTC
 válida para 11/12/2004, 18UTC (Sabado)
 Orografia (m) / Vento 10 m (noe) / Temperatura 2m (oC)



Temperatura do ar
 a 2m & Vento a
 10m

Previsão de 0120 horas iniciada em 07/12/2004, 00UTC
 válida para 12/12/2004, 00UTC (Domingo)
 Umidade Relativa em 850 hPa



Umidade Relativa
 do ar a 1500m

Fatores que afetam a qualidade das previsões de tempo

- Sistema de observação
- Velocidade de recebimento das observações
- Método de assimilação de dados
- Monitoramento e controle de qualidade
- O modelo numérico
- Avaliação e verificação do modelo
- Posição geográfica, tamanho do domínio e resolução
- Maior esforço na interface previsor/modelo

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

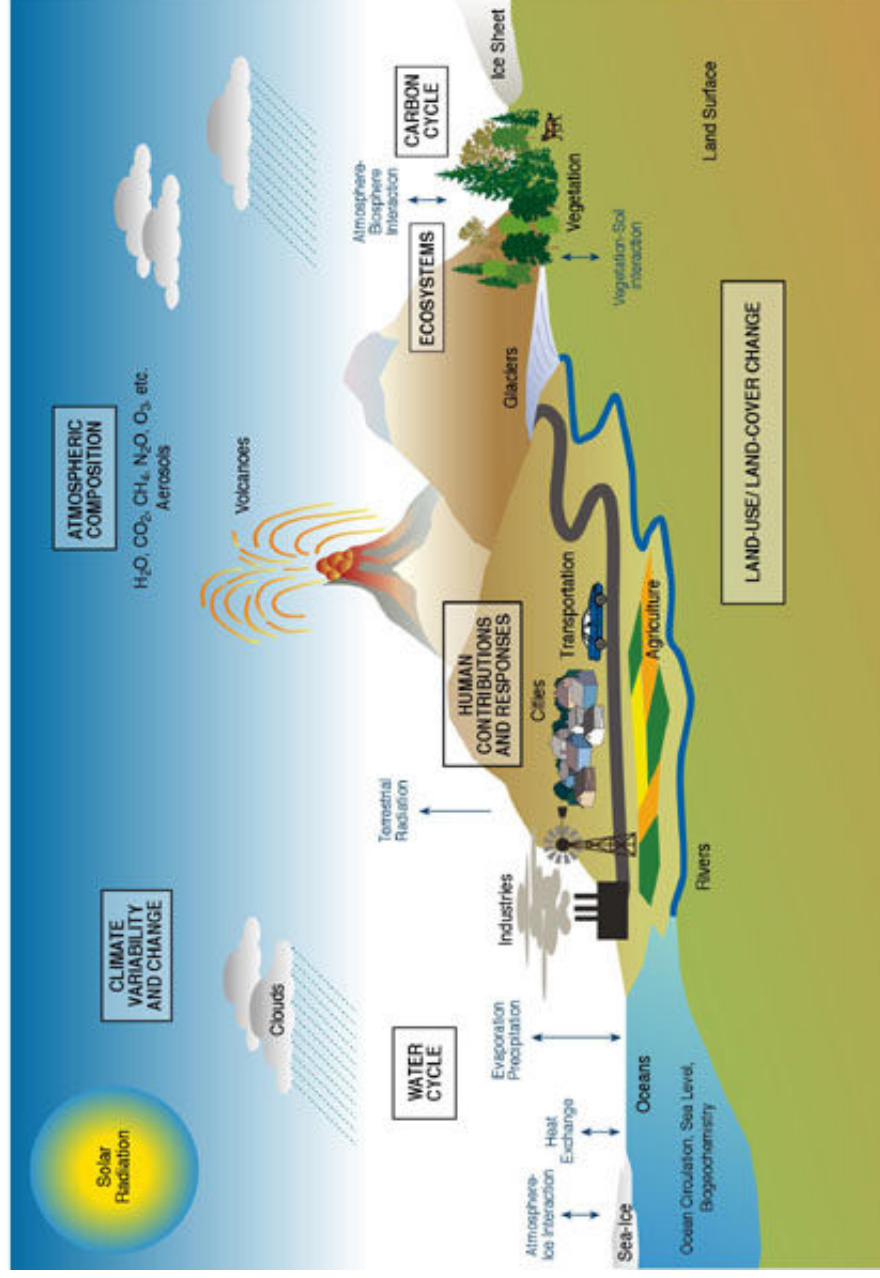
Dificuldades nos trópicos

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

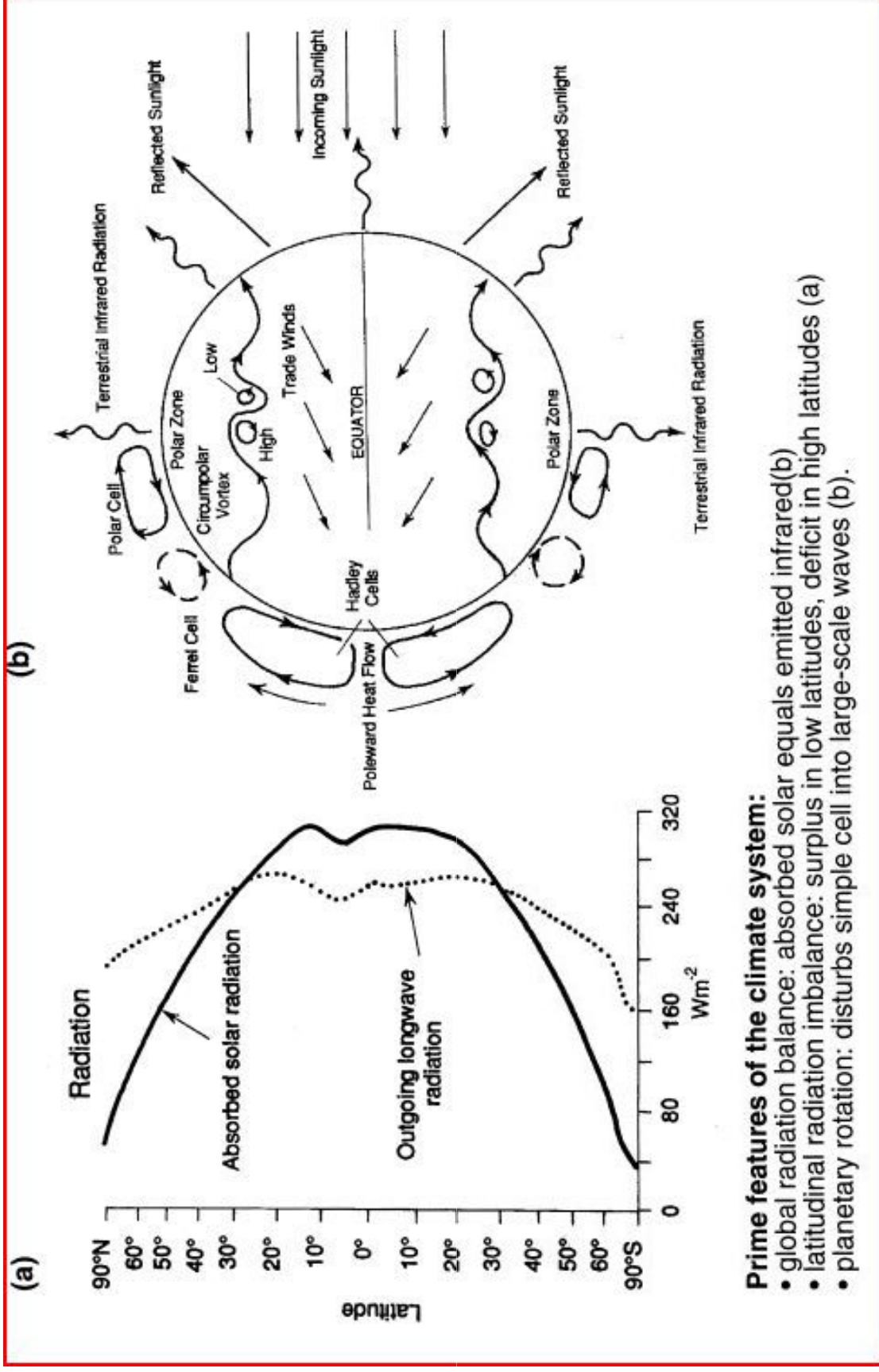
Modelagem Numérica do Clima

Clima : estado médio da atmosfera

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



Clima



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
- Prever o clima futuro.

O efeito estufa do CO₂ não é um idéia nova!

THE LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN
**PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND JOURNAL OF SCIENCE**

≡

[FIFTH SERIES APRIL 1896]

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS*.

1. *Introduction: Observations of Langley on Atmospheric Absorption.*

A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall † in particular has pointed out the enormous importance of this question. To him it was chiefly the diurnal and annual variations of temperature that were lessened by this circumstance. Another side of the question, that has long attracted the attention of physicists, is this: Is the mean temperature of the ground in any way influenced by the presence of heat-absorbing gases in the atmosphere? Fourier ‡ maintained that the atmosphere acts like the glass in a hot house, because it lets through the light rays of the sun but retains the dark rays from the ground. This idea was elaborated by Pouillet §; and Langley was by some of his researches led to the view, that 'the temperature of the earth under direct sunshine, even though our atmosphere were present as now, would probably fall to – 200 °C., if that atmosphere did not possess the

* Extract from a paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11th December 1895. Communicated by the Author.

† "Heat a mode of motion," 2nd ed. p.405 (Lond., 1865).

‡ *Mem. de l'Ac. R. d. Sci. de l'Inst. de France*, t. vii. 1827.

§ *Compress rendus*, t. vii. p41 (1838).

Svante Arrhenius:

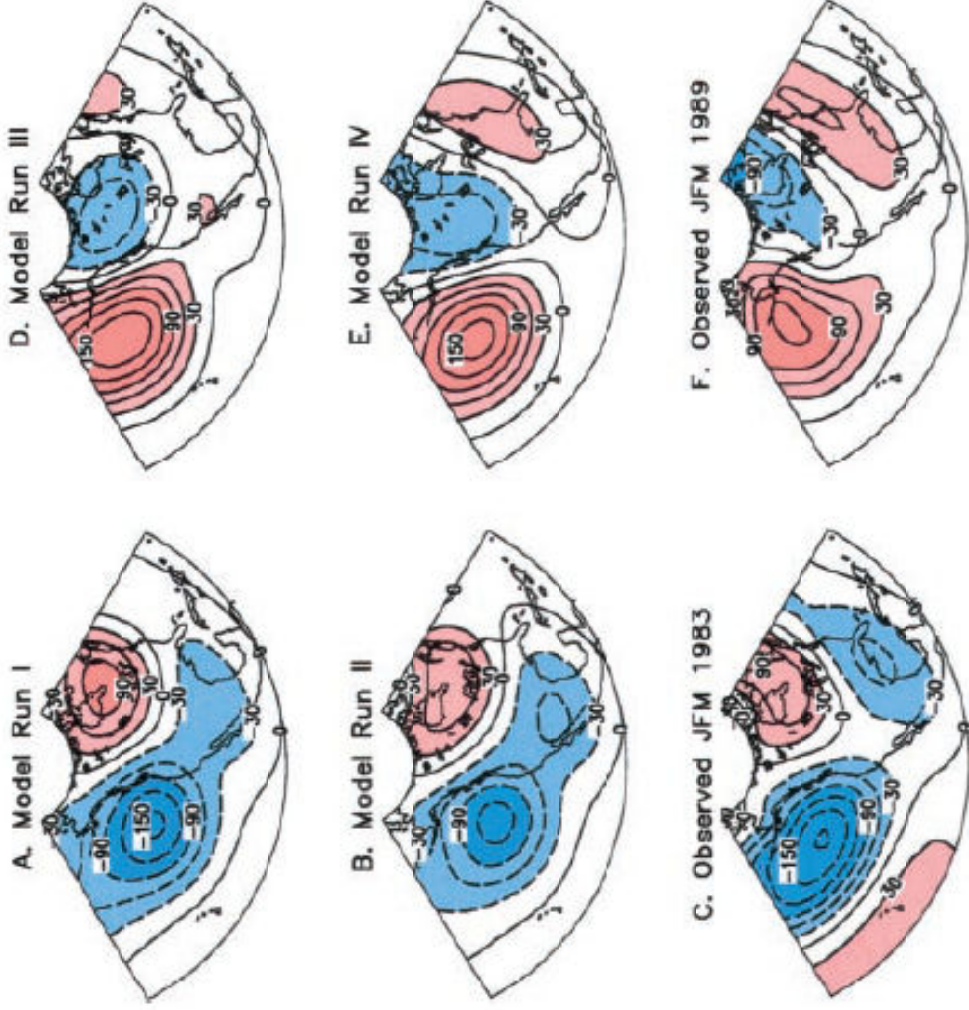
A Primeira Previsão Climática



Arrhenius

- Arrhenius quantificou em 1896 as mudanças na temperatura (aprox. 5° C) que deveriam ser esperadas ao dobrar o CO₂, baseado no conceito do efeito de "glass bowl" introduzido em 1824 por Joseph Fourier

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



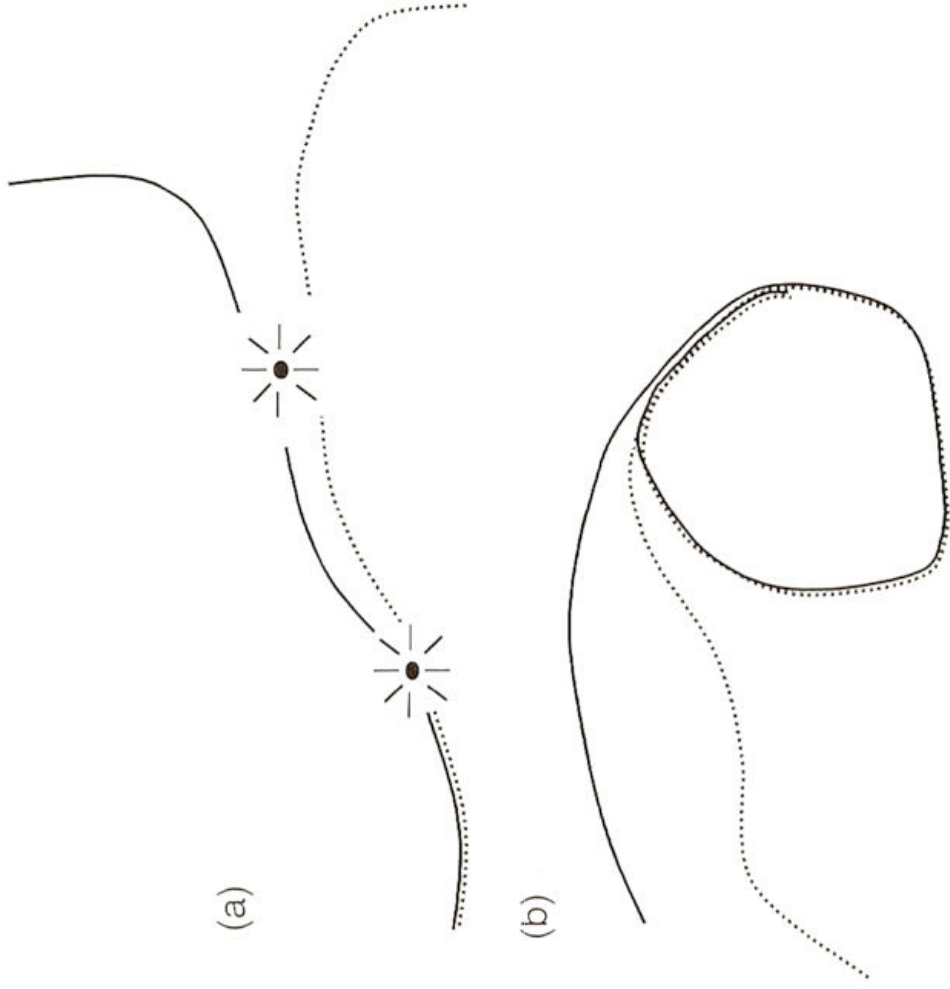
**Controle da TSM
sobre o clima.**

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.”

- A natureza caótica do sistema atmosférico limita a nossa capacidade de prever com exatidão a evolução da atmosfera.
 - A previsibilidade do tempo está limitada em aprox. **2 semanas** (Lorenz, 1963).
- O desempenho da previsão numérica de tempo (PNT) depende de:
1. Incertezas das medidas observacionais
 2. Incertezas das representações numéricas do modelo
- 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.

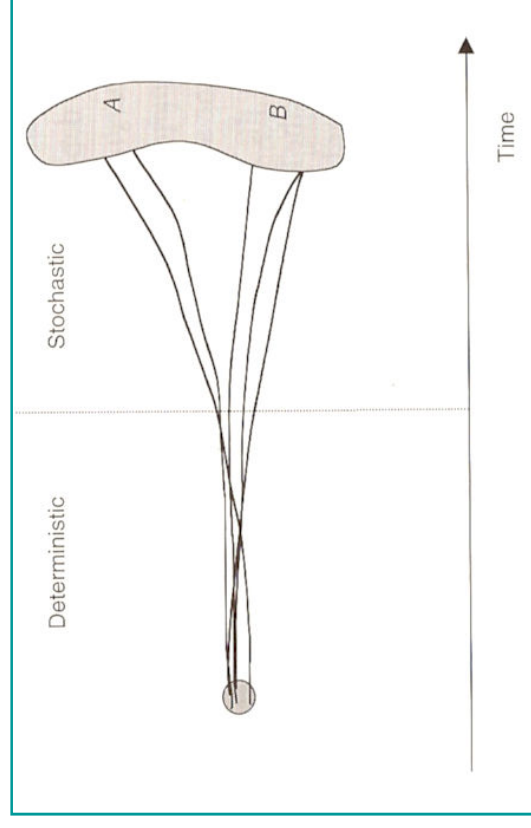


Kalnay, 2003

MÉTODOS de GERAÇÃO da PREVISÃO POR CONJUNTO:

- 1 - Diferentes perturbações nas condições iniciais;
 - 2 - Multi-model ensemble;
 - 3 - Diferentes perturbações em parâmetros do modelo.
- O conjunto de previsões fornece um conjunto de cenários possíveis da previsão.

A média do conjunto de previsões tende a reduzir os erros da previsão.

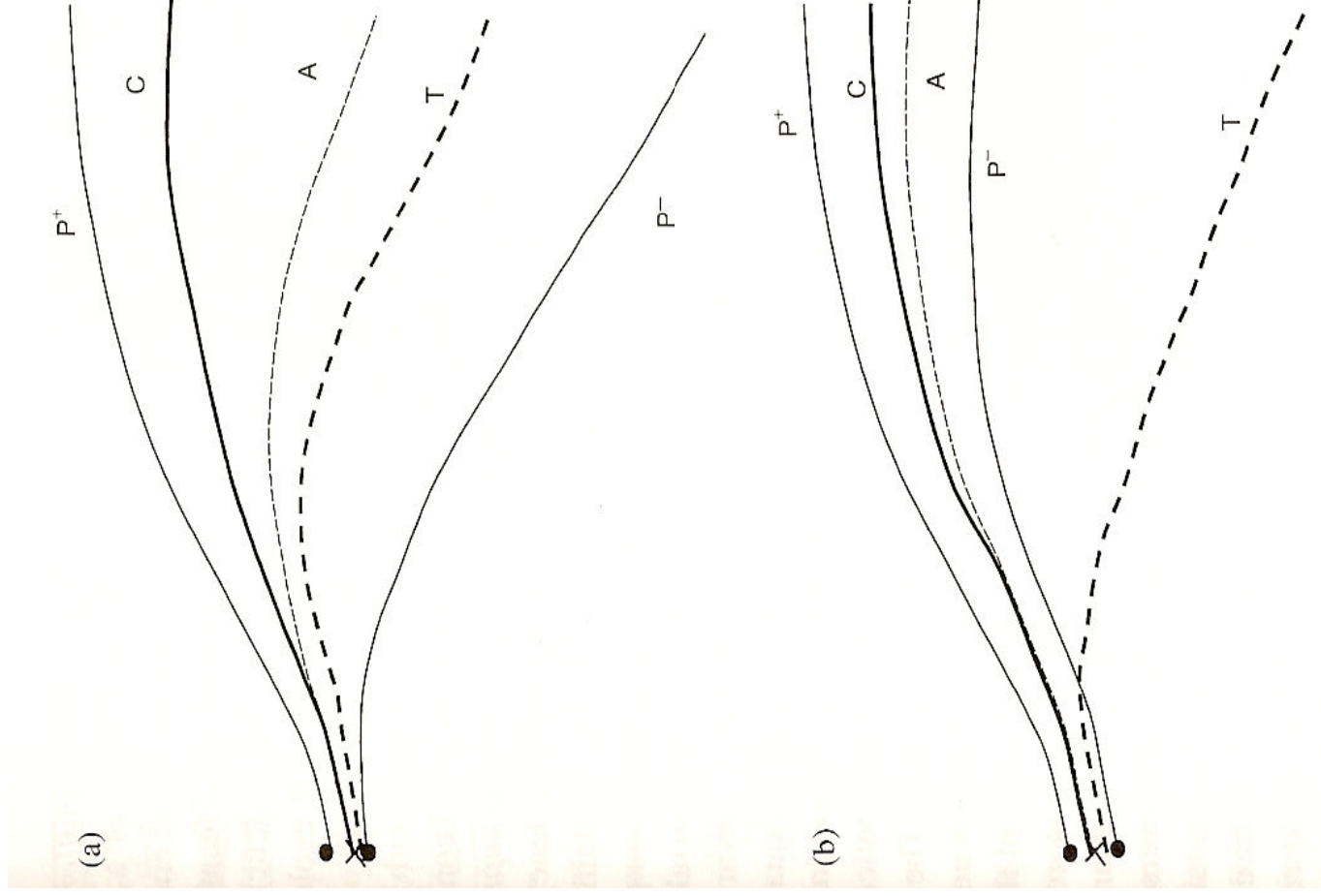


Previsão por conjunto

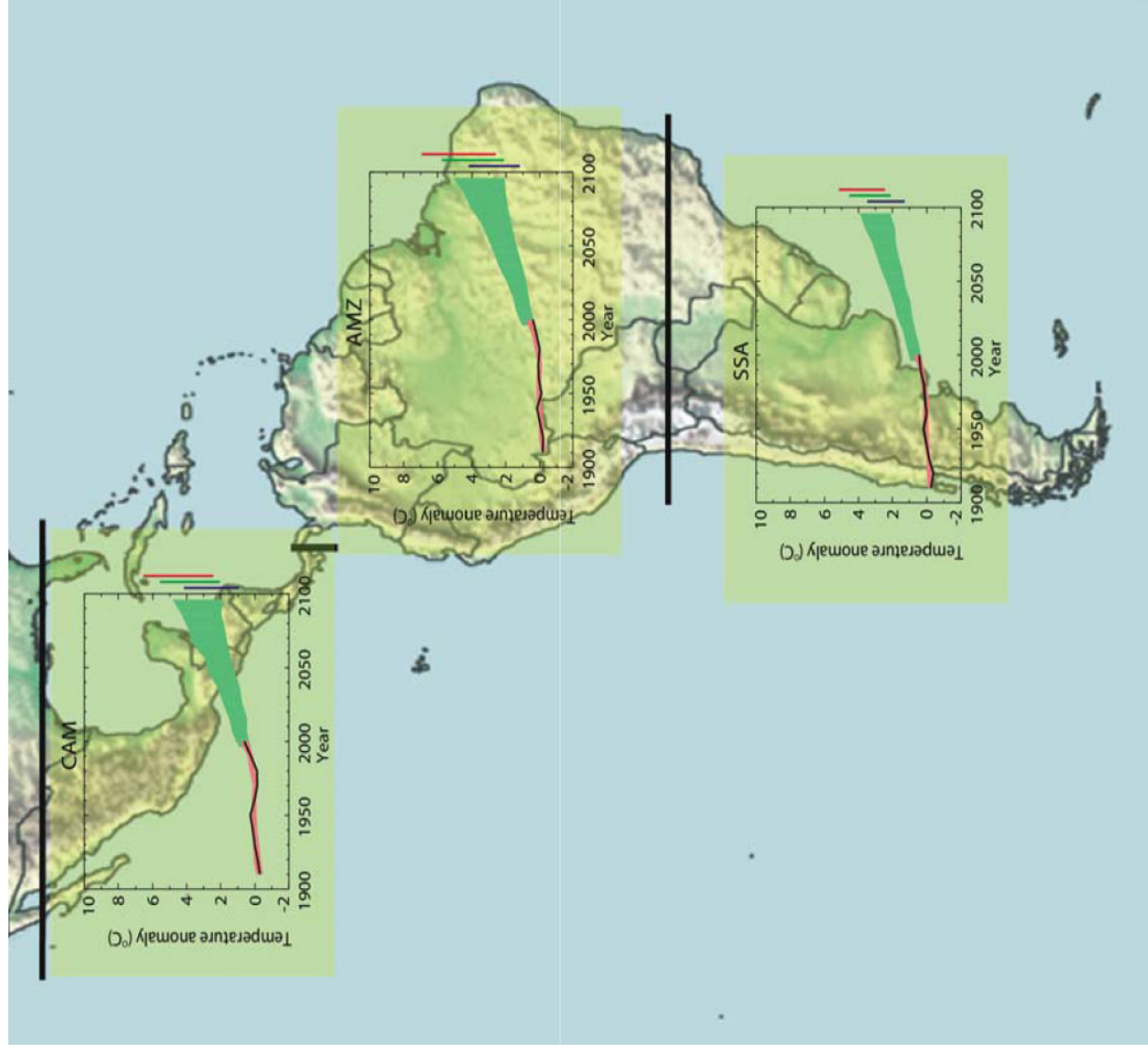
- C - previsão controle
- P⁺ - perturbação positiva
- P⁻ - perturbação negativa
- A - ensemble médio
- T - estado real da atmosfera

Bom ensemble, inclui o estado real

Ensemble de baixa qualidade



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).

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-emitada

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

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).