

**MET-576-4**

**Modelagem Numérica da Atmosfera**

**Dr. Paulo Yoshio Kubota**

**Os métodos numéricos, formulação e parametrizações utilizados nos modelos atmosféricos serão descritos em detalhe.**

**3 Meses  
24 Aulas (2 horas cada)**



## **Dinâmica:**

**Métodos numéricos amplamente utilizados na solução numérica das equações diferenciais parciais que governam os movimentos na atmosfera serão o foco, mas também serão analisados os novos conceitos e novos métodos.**

- ✓ **Métodos de diferenças finitas.**
- ✓ **Acurácia.**
- ✓ **Consistência.**
- ✓ **Estabilidade.**
- ✓ **Convergência.**
- ✓ **Grades de Arakawa A, B, C e E.**
- ✓ **Domínio de influência e domínio de dependência.**
- ✓ **Dispersão numérica e dissipação.**
- ✓ **Definição de filtros monótono e positivo.**
- ✓ **Métodos espectrais.**
- ✓ **Métodos de volume finito.**
- ✓ **Métodos Semi-Lagrangeanos.**
- ✓ **Conservação de massa local.**
- ✓ **Esquemas explícitos versus semi-implícitos.**
- ✓ **Métodos semi-implícitos.**



## **Hierarquia de modelo Numéricico da Atmosfera**

**Jeevanjee, N., P. Hassanzadeh, S. Hill, and A. Sheshadri (2017), A perspective on climate model hierarchies, J. Adv. Model. Earth Syst., 9, 1760–1771,  
doi:10.1002/2017MS001038**

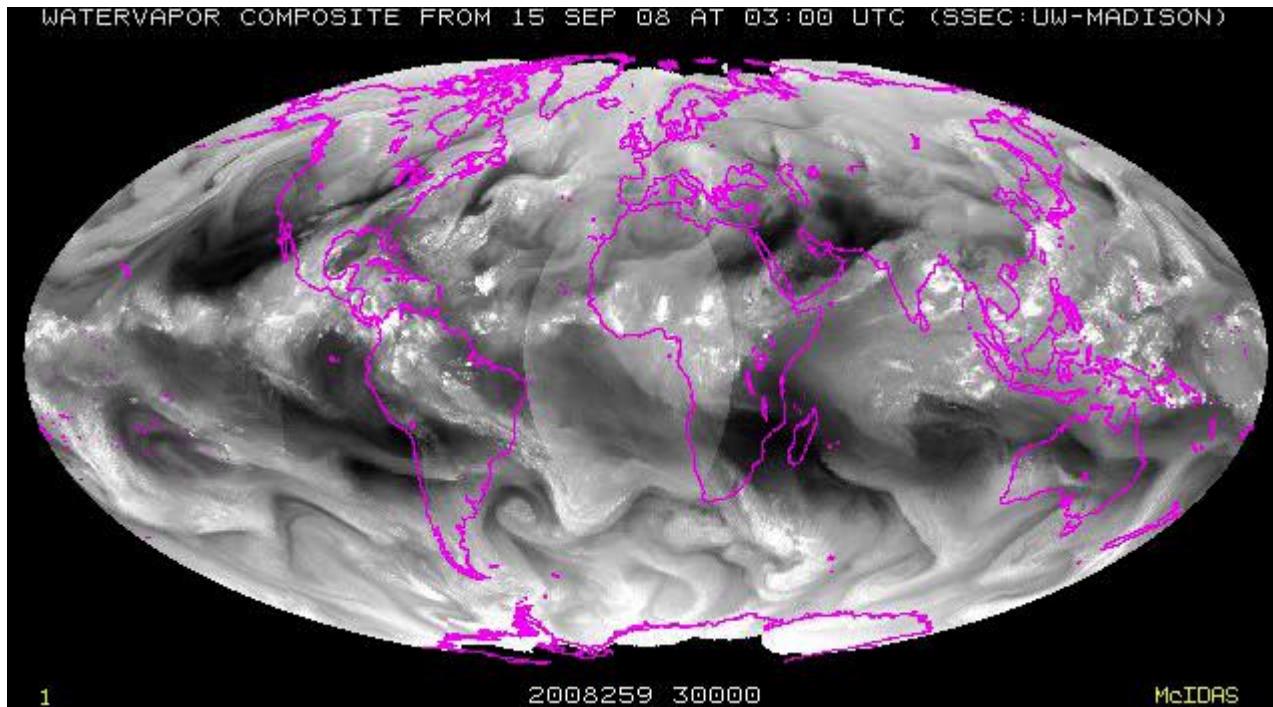
## Hierarquia de modelo Numérico da Atmosfera

| Fluid                                                                                                   | Rotation                                                                                                      | Ocean                                                                                                                           | Surface                                                                                                        | Convection                                                                                                                                      | Radiation                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{pmatrix} \text{compressible} \\ \text{hydrostatic} \\ \text{QG} \\ \text{static} \end{pmatrix}$ | $\times \begin{pmatrix} \text{Coriolis} \\ \beta\text{-plane} \\ f\text{-plane} \\ \text{none} \end{pmatrix}$ | $\times \begin{pmatrix} \text{dynamical column} \\ \text{slab} \\ \text{non-uniform } T_s \\ \text{uniform } T_s \end{pmatrix}$ | $\times \begin{pmatrix} \text{land+ice} \\ \text{real land} \\ \text{ideal land} \\ \text{aqua} \end{pmatrix}$ | $\times \begin{pmatrix} \text{explicit moist} \\ \text{super-param.} \\ \text{parameterized} \\ \text{large-scale} \\ \text{dry} \end{pmatrix}$ | $\times \begin{pmatrix} \text{spectral} \\ \text{gray} \\ \text{Newtonian} \\ \text{fixed} \end{pmatrix}$ |

(1)

$\underbrace{\text{Fluid} \times \text{Rotation}}_{\text{Dynamics}} \times \underbrace{\text{Ocean} \times \text{Surface}}_{\text{Boundary Forcing}} \times \underbrace{\text{Convection} \times \text{Radiation}}_{\text{Bulk Forcing}}$ ,

## Modelando a Circulação Geral





## **Modelando a Circulação Geral**

- Nesta aula...**
  - Vamos estudar:**

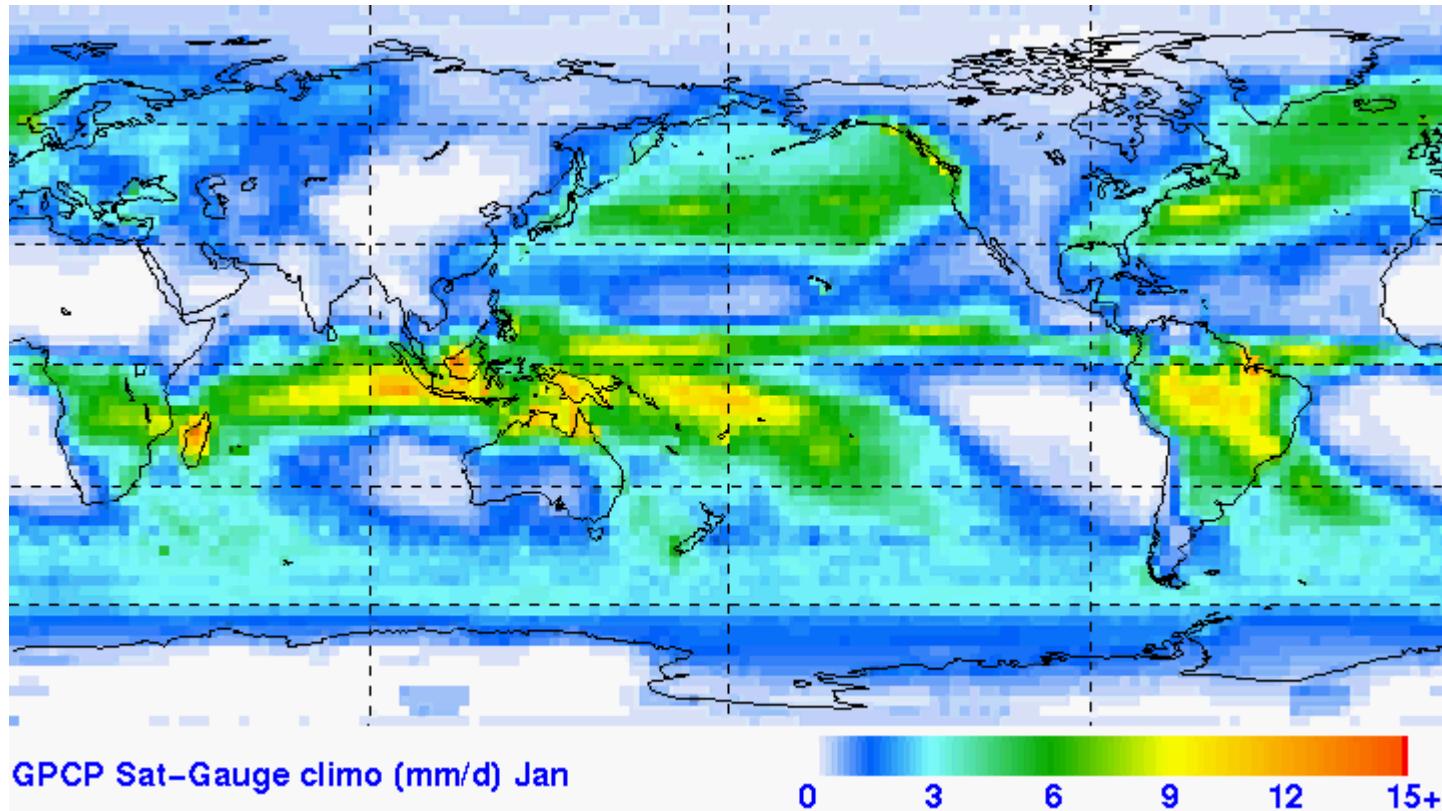
**1. A “circulação geral” da atmosfera**

**2. Características do clima em grande escala**

## Modelando a Circulação Geral

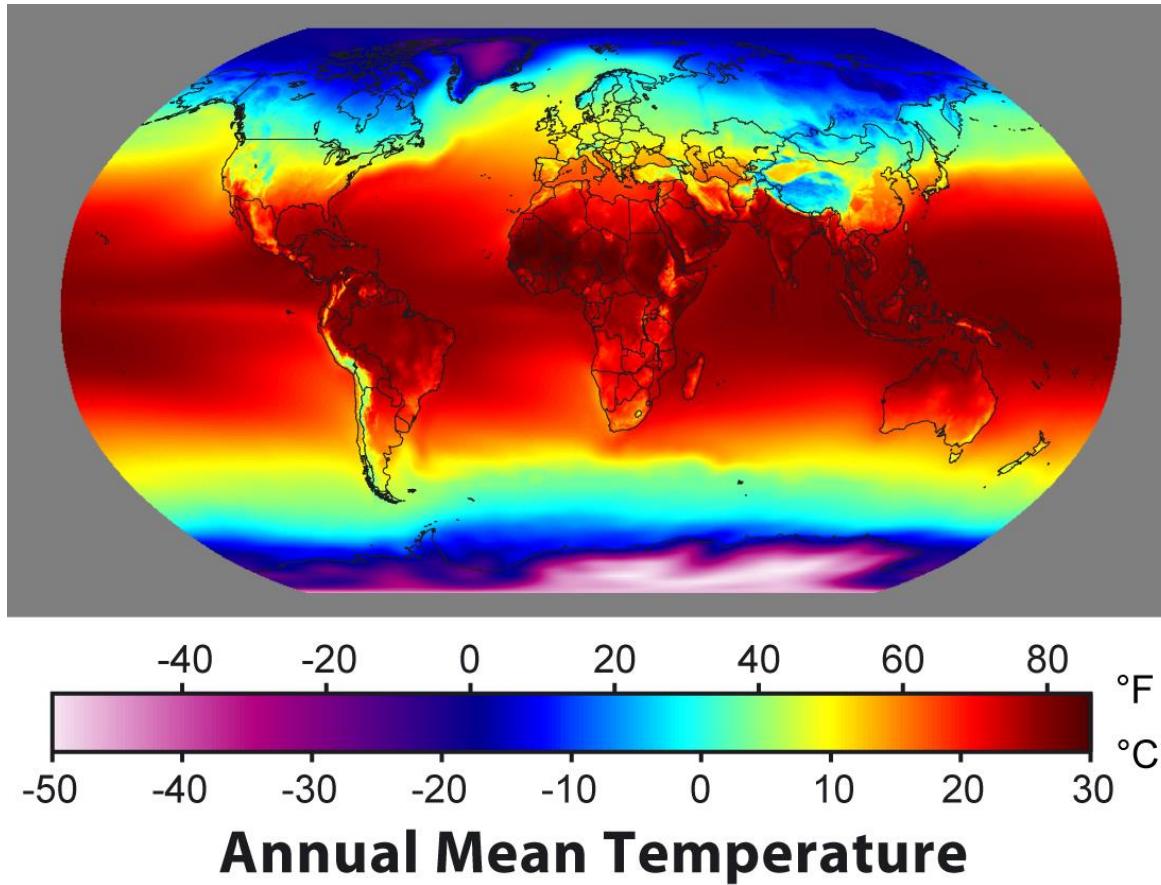
Perguntas como ...

- O que determina a distribuição da precipitação na Terra?



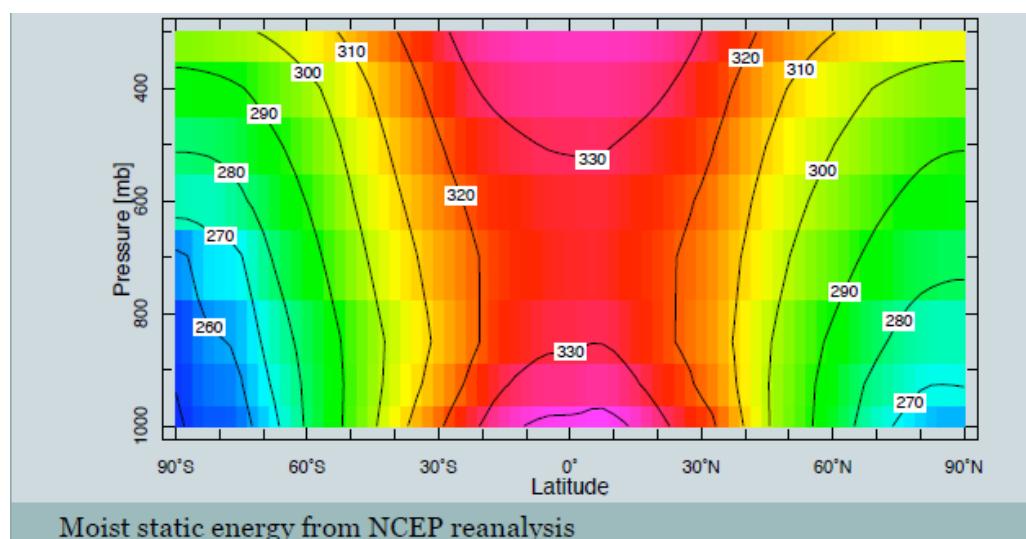
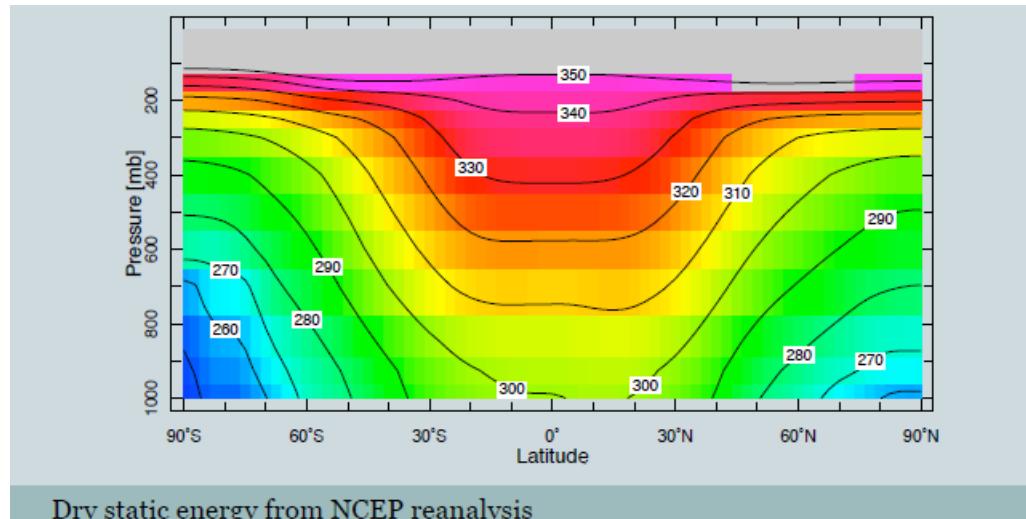
## Modelando a Circulação Geral

- O que determina a distribuição da temperatura norte-sul na Terra?



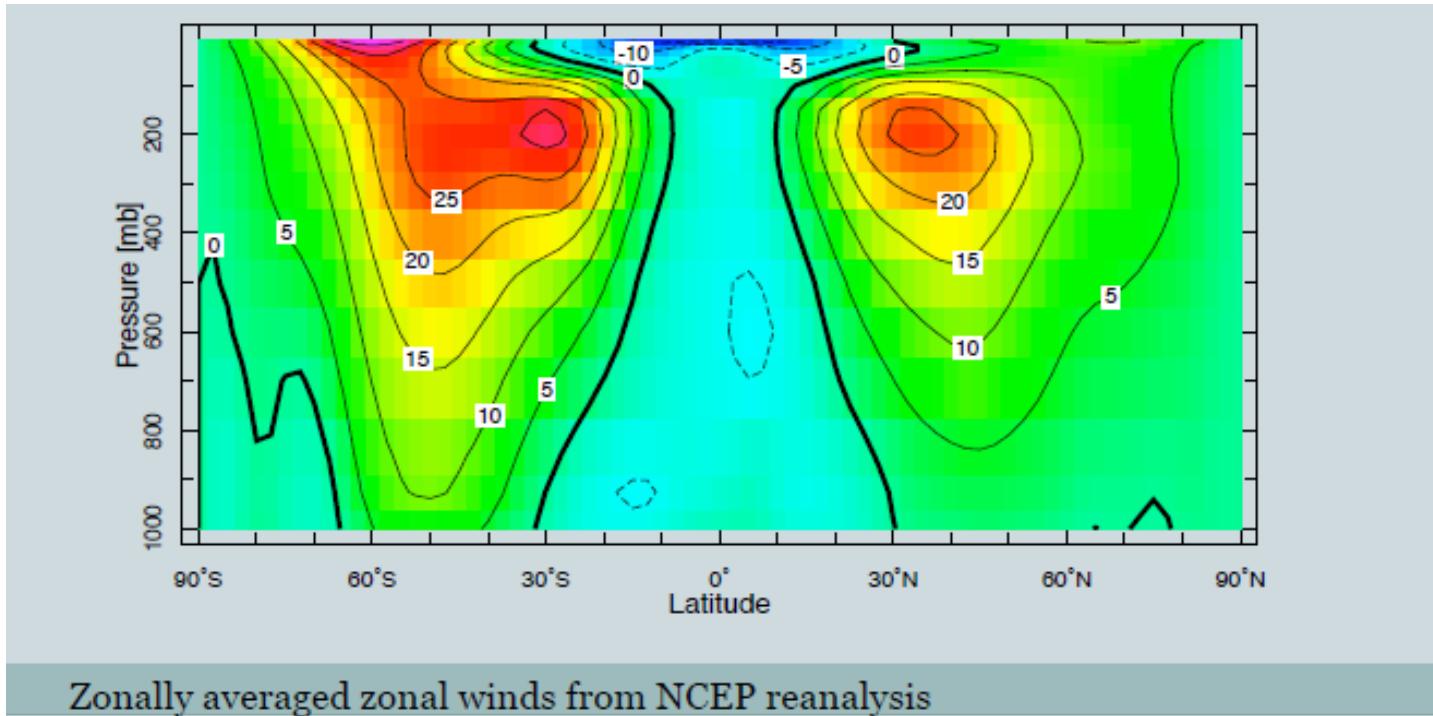
## Modelando a Circulação Geral

- O que determina a estrutura vertical da temperatura na Terra?



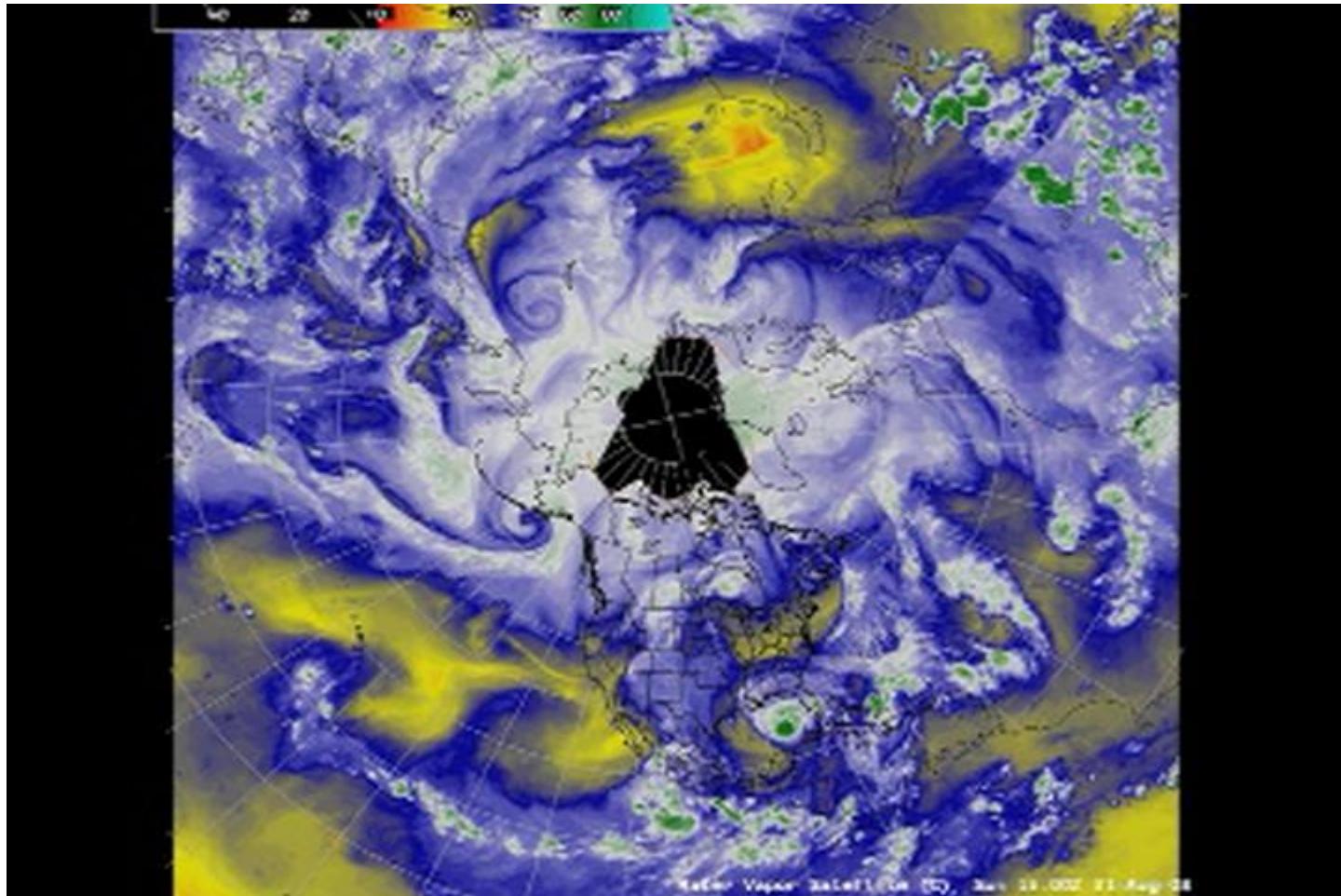
## Modelando a Circulação Geral

- O que determina a localização / intensidade dos jatos?



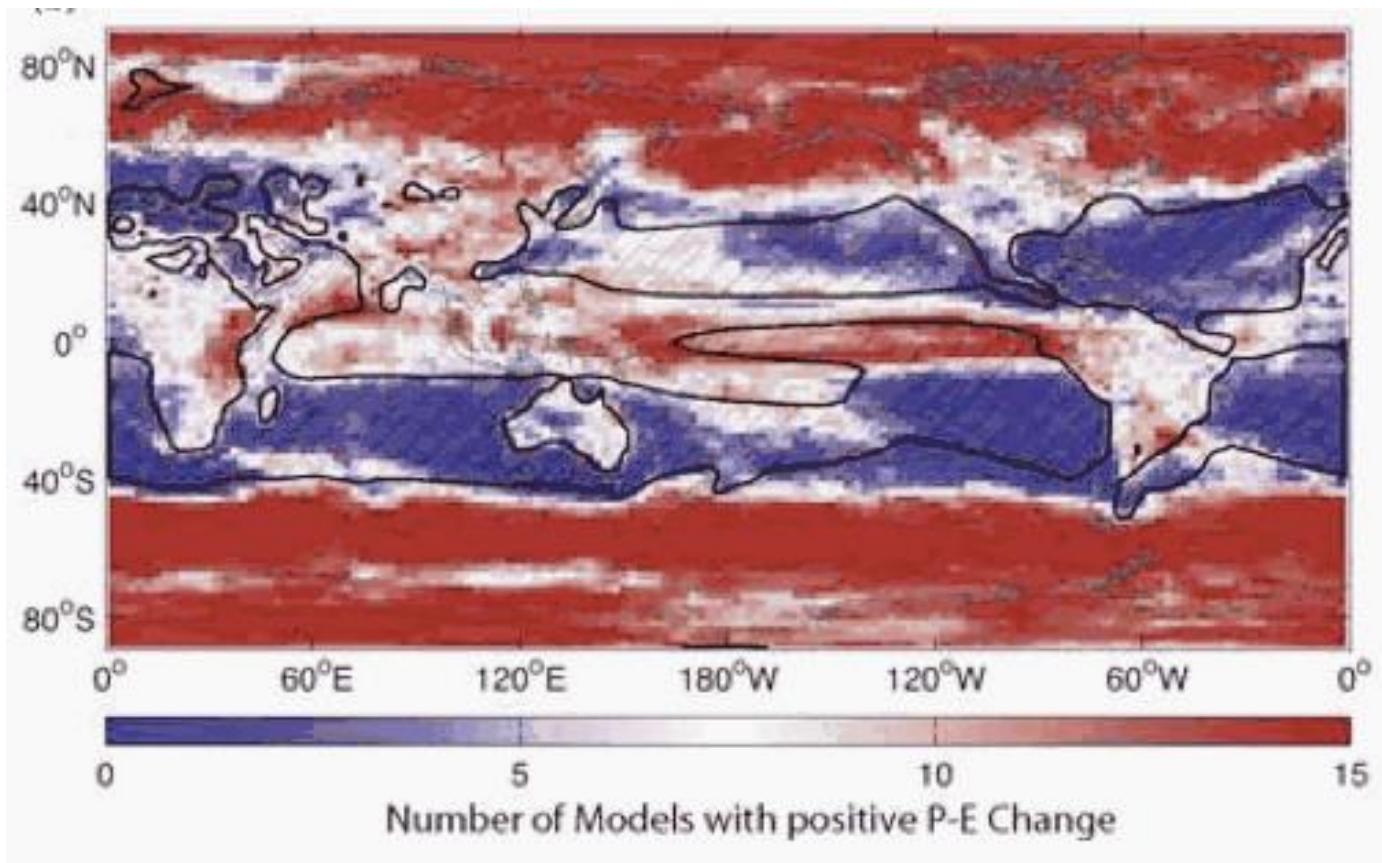
## Modelando a Circulação Geral

- O que determina a intensidade dos vórtices (Eddies)?



## Modelando a Circulação Geral

- Como isso vai mudar com o aquecimento global?



Regiões chuvosas ficam mais chuvosas, regiões secas ficam mais secas De Lu et al 2006

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

- Quais são os componentes desses modelos?
- Quais são os processos físicos essenciais que estão sendo modelados?
- Quais são os modelos matemáticos mais simples que podem capturar a física básica?
- Como as parametrizações evoluíram ao longo da história da modelagem climática?

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Componentes AGCM

- **AGCM: Modelo de Circulação Geral Atmosférica**
- “**Dinâmica**”:  
**Equações de fluido em uma esfera giratória**
- “**Física**”:  
**Transferência radiativa**  
**Esquema de fluxos de superfície / camada limite**  
**Nuvens**  
**Convecção úmida**

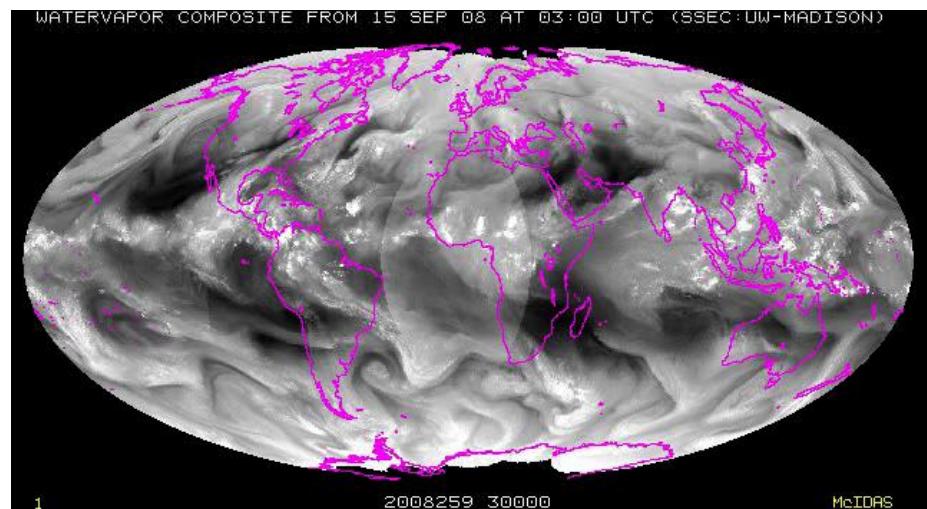
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Componentes AGCM

Núcleos Dinâmicos de AGCMs

Movimento fluido na esfera!

- As equações primitivas:



$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + S_{v,B}$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\ln p} = -R_d T_v$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{\kappa T \omega}{p} - Q_R + Q_C + Q_B$$

Coordinates:  $(\lambda, \theta, p)$  = (longitude, latitude, pressure)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + S_{v,B}$$

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \left[ \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} \right] + S_{u,B}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu \left[ \frac{u^2\tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} \right] + S_{v,B}$$



Metric terms

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \boxed{\frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda}} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \boxed{\frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta}} + S_{v,B}$$



Pressure gradient term

$\Phi = g\mathcal{Z}$  = geopotential

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + S_{v,B}$$

$$\boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial \ln p} = -R_d T_v}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{\kappa T \omega}{p} - Q_R + Q_C + Q_B$$

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Equilíbrio hidrostático

- Equação de momento vertical:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \ln p} = -R_d T_v$$

- Em coordenadas z, escrito como:

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

- Premissa principal: a atmosfera é uma película muito fina  
Proporção pequena (tamanho de grade horizontal de 100 km)
- Modelos de resolução de nuvem não são hidrostáticos



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Hidrostática

- 2x2,5 graus GCMs são realmente hidrostáticos
- Garner Frierson Held Pauluis e Vallis (2007, JAS):

- 1) Executou um modelo **não hidrostático** na resolução GCM (2x2,5 graus)
- 2) Termos não hidrostáticos **multiplicados** por uma **constante**
  - ÷ Faz a convecção ocorrer em escalas maiores e tem taxas de crescimento mais lentas
  - ÷ Igual ao método “DARE” de Kuang, Bretherton & Blossey
- 3) Tivemos que **multiplicar os termos não hidrostáticos por 10000** antes de começarmos a ver os efeitos!



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Núcleos Dinâmicos de AGCMs

- Conservação de momentum:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + S_{v,B}$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial ln p} = -R_d T_v$$

Equação de conservação de massa

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{\kappa T \omega}{p} - Q_R + Q_C + Q_B$$

Parece incompressível, mas não é. As coordenadas de pressão tornam esta forma possível (também requer equilíbrio hidrostático).

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Núcleos dinâmicos da equação termodinâmica  
de AGCMs:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + S_{u,B}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + S_{v,B}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial ln p} = -R_d T_v$$

Mudanças de temperatura devido à compressão e expansão

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} = \left[ -\frac{\kappa T \omega}{p} \right] - Q_R + Q_C + Q_B$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left( U \frac{\partial T}{\partial \lambda} + V \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \theta \dot{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial \sigma} = kT \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \ln(ps) + F_T$$

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Núcleos dinâmicos

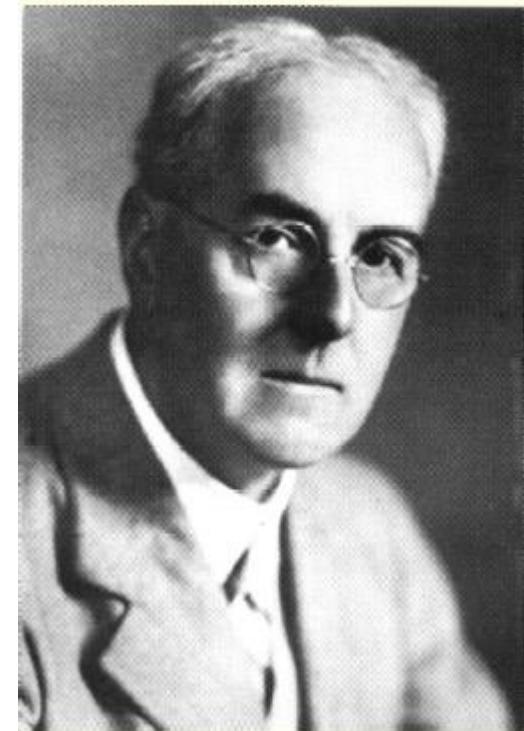
- Termos de fonte e sumidouro: onde grande parte da complexidade entra

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u + \omega \frac{\partial u}{\partial p} = fv + \frac{uvtan\theta}{a} - \frac{1}{a\cos\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + S_{u,B}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \omega \frac{\partial v}{\partial p} = -fu - \frac{u^2tan\theta}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} + S_{v,B}$$
$$\frac{\partial\Phi}{\partial ln p} = -R_d T_v$$
$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{\kappa T \omega}{p} - Q_R + Q_C + Q_B$$

“Physics”

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

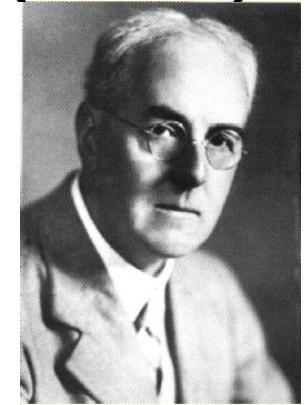
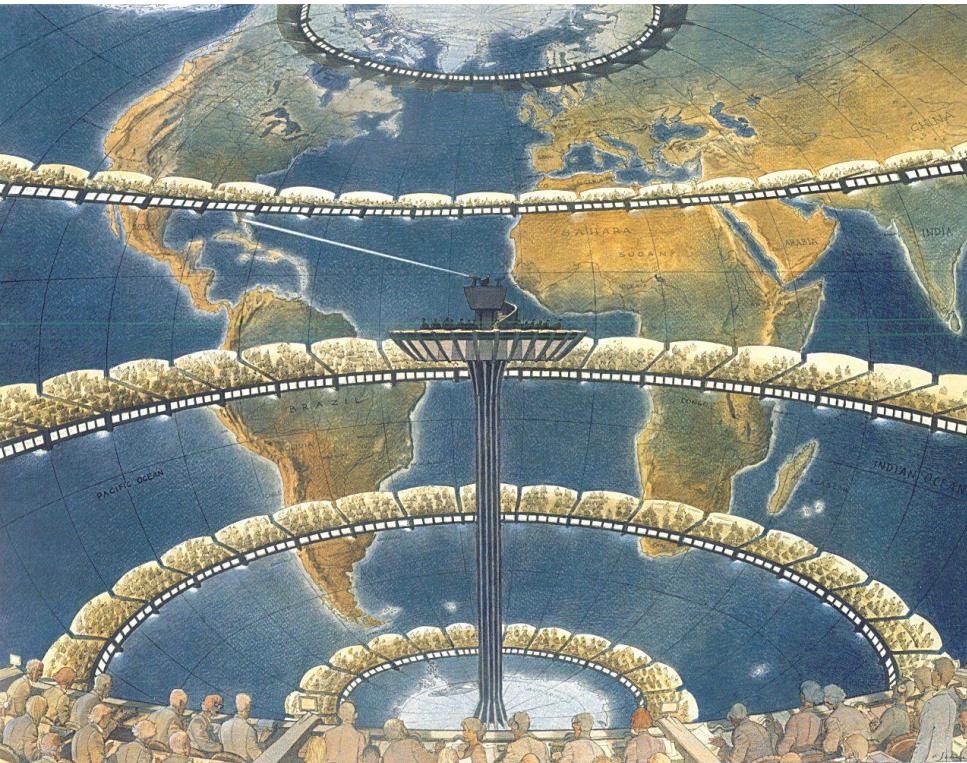
- **Lewis Fry Richardson: matemático, físico, cientista atmosférico britânico**  
**Carreira científica muito influenciada por suas crenças Quaker (pacifismo)**
- **Fez a primeira previsão numérica do tempo em 1922**  
**Fiz os cálculos totalmente à mão!**  
**Demorou mais de 1000 horas!**
- **Também sonhava com o futuro da previsão do tempo ...**



Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

- O sonho de Richardson: a fábrica de previsões
- Ocupado com funcionários ("computadores") fazendo cálculos

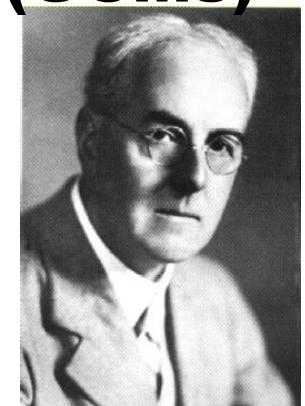
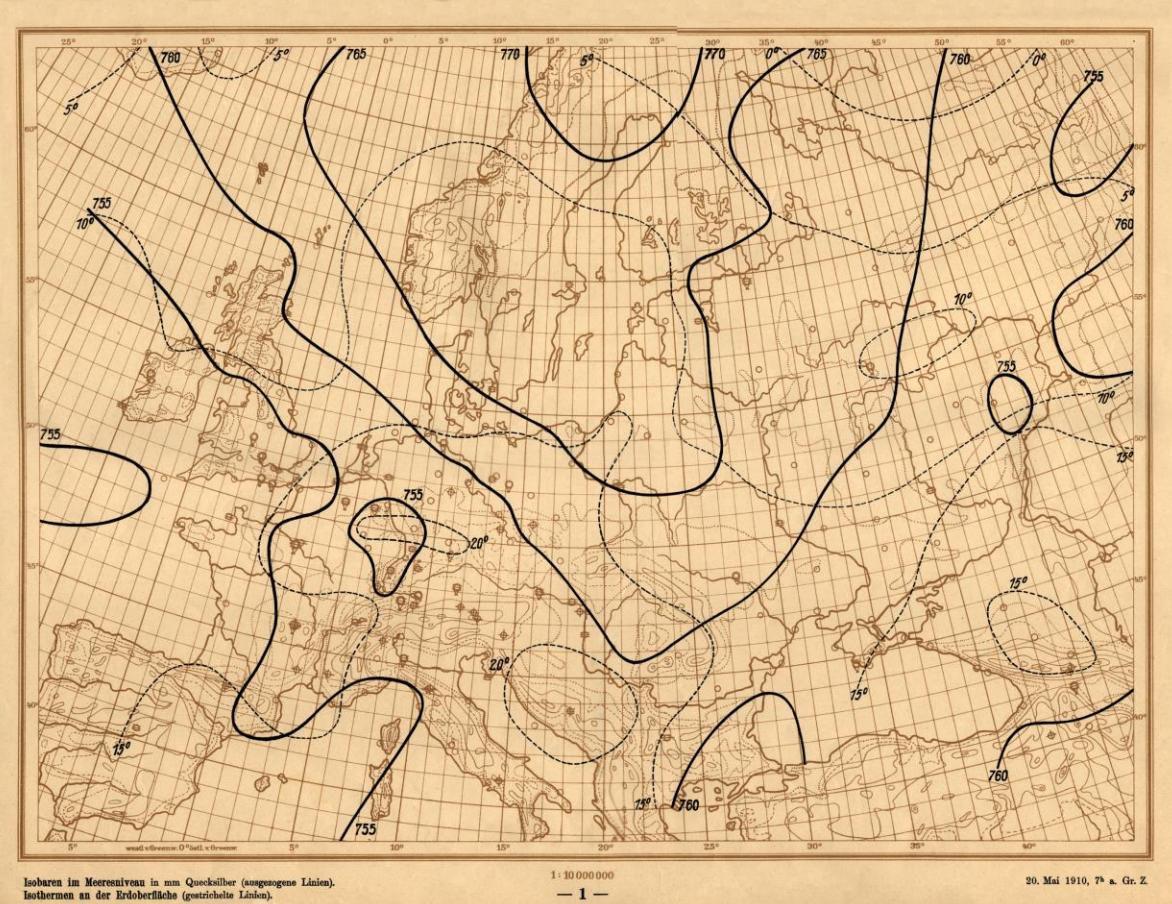


Ele estimou que 64.000 "computadores" (pessoas) seriam necessários para fazer previsões em todo o mundo

Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Experimento de Richardson



Dados usados de 20 de maio de 1910

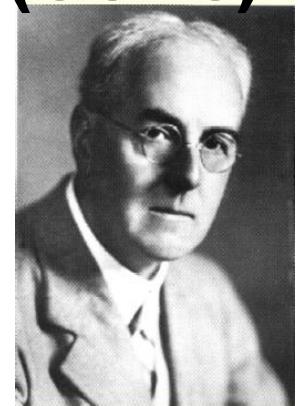
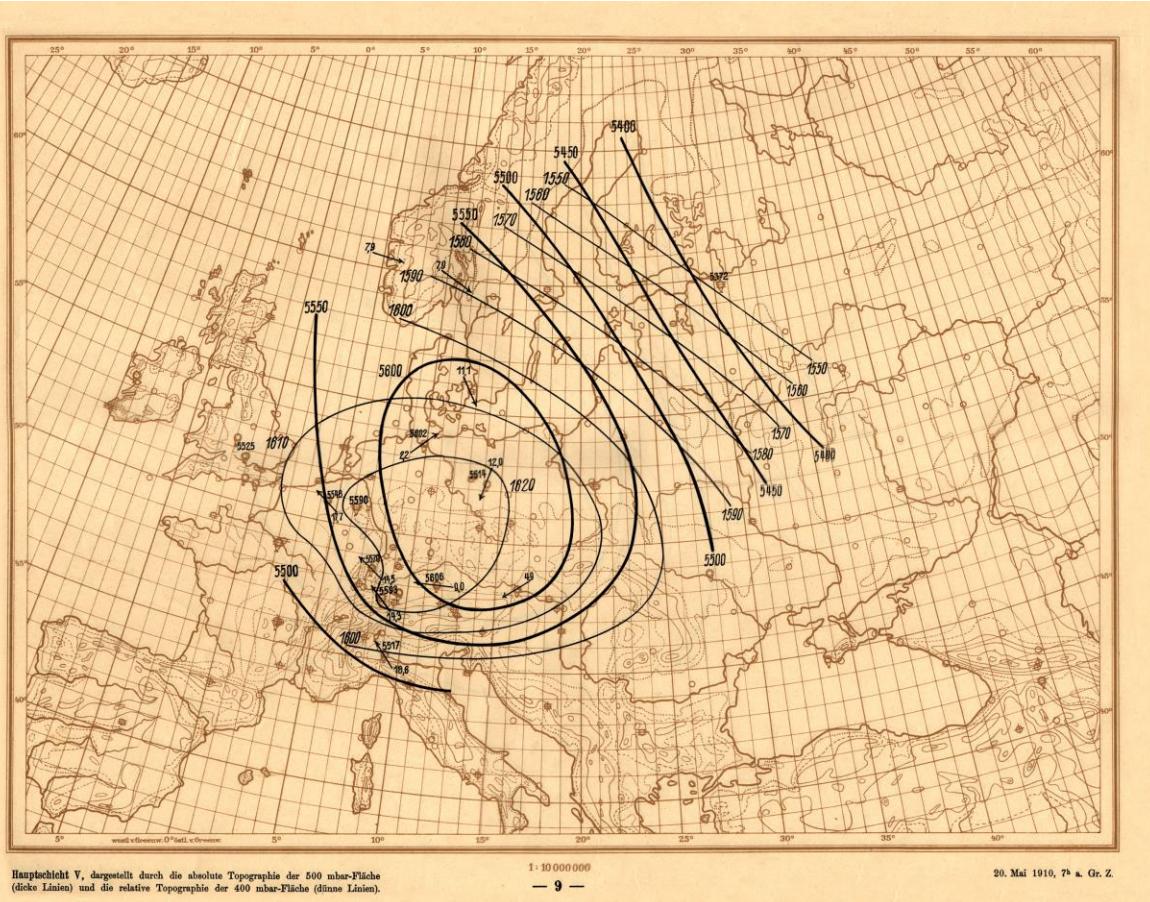
O **cometa de Halley** estava passando, e havia uma grande **campanha de observação** em balão de ar quente para estudar **o efeito dos cometas no tempo.**

SLP e temperatura da superfície

Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

## **Experimento de Richardson**



Valores tabulados desses gráficos manualmente!

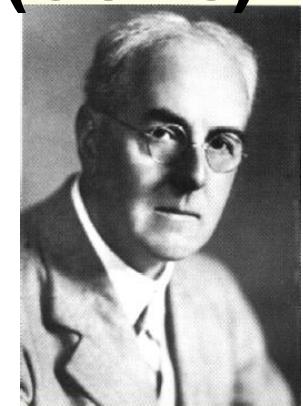
Alturas de 500 mbar e espessura de 500-400 mbar

Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Cálculos de Richardson

- Serviu como **motorista de ambulância** na Unidade de Friends' Ambulance na França durante a Primeira Guerra Mundial  
Soldados feridos transportados, muitas vezes sob fogo pesado
- Demorou **seis semanas** para realizar os cálculos  
“Meu escritório era um monte de feno em um local de repouso frio”  
Peter Lynch acha que ele quis dizer  $6 \text{ semanas} * 7 \text{ dias} * 24 \text{ horas} = 1000 \text{ horas de computação!}$   
Ou seja, ele demorou o tempo todo em que esteve na França, 2 anos
- **Livro de cálculo foi perdido** durante a batalha de Champagne  
Mas se **recuperou** meses depois sob um monte de carvão
- Eventualmente publicado em 1922

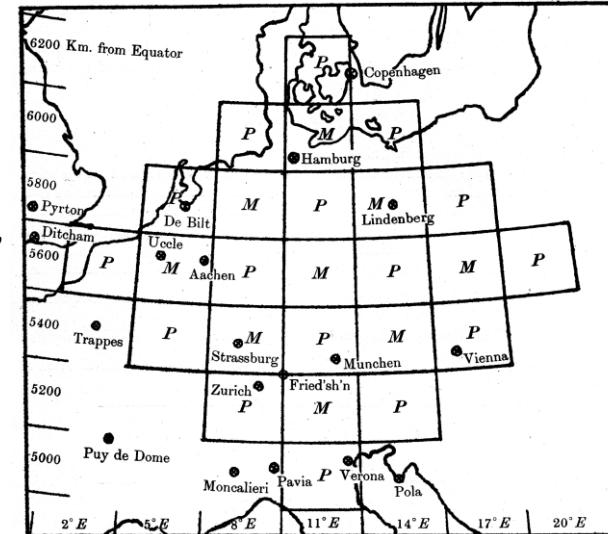
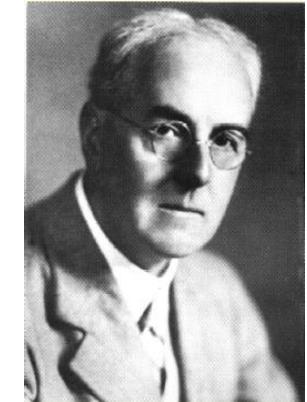


Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Cálculos de Richardson

- Objetivo: calcular a tendência da pressão superficial em um ponto (na Baviera), 6 horas no futuro.
- Discretizado em cinco camadas na vertical.
- **Equações primitivas usadas.**  
Assumindo equilíbrio hidrostático
- **Diferenças finitas** usadas para calcular mudanças no momento, temperatura e pressão



Todas as informações sobre este tópico são de Peter Lynch: Confira seu livro “The Emergence of NWP”!

# Modelo Numérico da Atmosfera



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

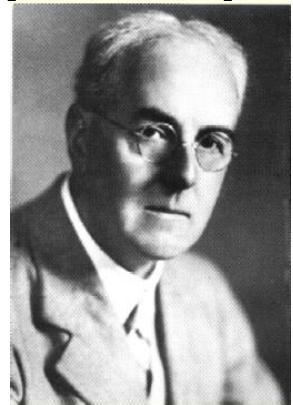
### Resultados de Richardson

### Folha de cálculo de Richardson

COMPUTING FORM PxIII. Divergence of horizontal momentum-per-area. Increase of pressure

The equation is typified by:  $-\frac{\partial P_{\text{atm}}}{\partial t} = \frac{\partial M_{\text{atm}}}{\partial e} + \frac{\partial M_{\text{atm}}}{\partial n} - M_{\text{atm}} \frac{\tan \phi}{a} + m_{\text{atm}} - m_{\text{atm}}^* + \frac{g}{a} M_{\text{atm}}$ . (See Ch. 4/2 #5.)

- In the equation for the lowest stratum the corresponding term  $-m_{\text{atm}}$  does not appear



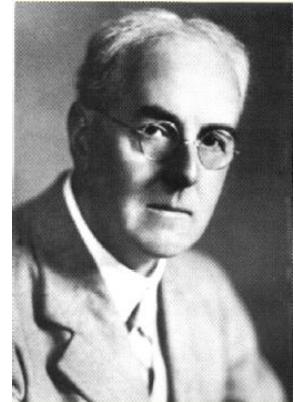
| Longitude 11° East                                                                                                                       |                               |                               | Latitude 5400 km North     |                                              |                                 | Instant 1910 May 20 <sup>th</sup> 7 <sup>th</sup> G.M.T. |                  |                  | Interval, $\delta t$ 6 hours     |                                           |                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                                                                                                                                          |                               |                               |                            |                                              |                                 |                                                          |                  |                  |                                  |                                           |                                                    |
|                                                                                                                                          |                               |                               |                            | previous<br>3 columns                        | previous<br>column              |                                                          | Form Pxvi        | Form Pxvi        | equation<br>above                | previous<br>column                        | previous<br>column                                 |
| $h$                                                                                                                                      | $\frac{\delta M_x}{\delta e}$ | $\frac{\delta M_x}{\delta n}$ | $-\frac{M_x \tan \phi}{a}$ | $\text{div}'_{EN} M$                         | $-g\delta t \text{div}'_{EN} M$ |                                                          | $m_R$            | $\frac{2M_x}{a}$ | $-\frac{\partial R}{\partial t}$ | $+\frac{\partial R}{\partial t} \delta t$ | $\frac{\partial R}{\partial t} \delta t$           |
|                                                                                                                                          | $10^{-5} \times$              | $10^{-5} \times$              | $10^{-5} \times$           | $10^{-5} \times$                             | $100 \times$                    |                                                          | $10^{-5} \times$ | $10^{-5} \times$ | $10^{-5} \times$                 | $100 \times$                              | $100 \times$                                       |
| $h_t$                                                                                                                                    | -61                           | -245                          | -6                         | -312                                         | 656                             |                                                          | 0                |                  |                                  |                                           | 0                                                  |
| $h_2$                                                                                                                                    | 367                           | -257                          | 2                          | 112                                          | -236                            |                                                          | -83              | -229             | 49.5                             | 483                                       | 483                                                |
| $h_4$                                                                                                                                    | 93                            | -303                          | -16                        | -226                                         | 478                             |                                                          | 165              | 0.06             | -136                             | 29.4                                      | 287                                                |
| $h_6$                                                                                                                                    | 32                            | -55                           | -12                        | -35                                          | 74                              |                                                          | 63               | 0.11             | -124                             | 26.8                                      | 262                                                |
| $h_8$                                                                                                                                    | -256                          | 38                            | -8                         | -226                                         | 479                             |                                                          | 133              | 0.07             | -110                             | 23.8                                      | 233                                                |
| $h_{10}$                                                                                                                                 |                               |                               |                            |                                              |                                 |                                                          |                  | 0.03             | -88                              | 19.0                                      | 189                                                |
| NOTE: $\text{div}'_{EN} M$ is a contraction for<br>$\frac{\delta M_x}{\delta e} + \frac{\delta M_x}{\delta n} - M_x \frac{\tan \phi}{a}$ |                               |                               | SUM =                      |                                              |                                 |                                                          |                  |                  |                                  |                                           | 1451                                               |
|                                                                                                                                          |                               |                               |                            | $= \frac{\partial p_a}{\partial t} \delta t$ |                                 |                                                          |                  |                  |                                  |                                           |                                                    |
|                                                                                                                                          |                               |                               |                            |                                              |                                 |                                                          |                  |                  |                                  |                                           | check by<br>$\Sigma -g\delta t \text{div}'_{EN} M$ |

Leave the subsequent columns to be filled up after  
the vertical velocity has been computed on  
Form Pxvi

Planilha de cálculo de Richardson PxIII. A figura no canto inferior direito é a mudança prevista na pressão de superfície: 145 mb em seis horas!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Fracasso da previsão de Richardson

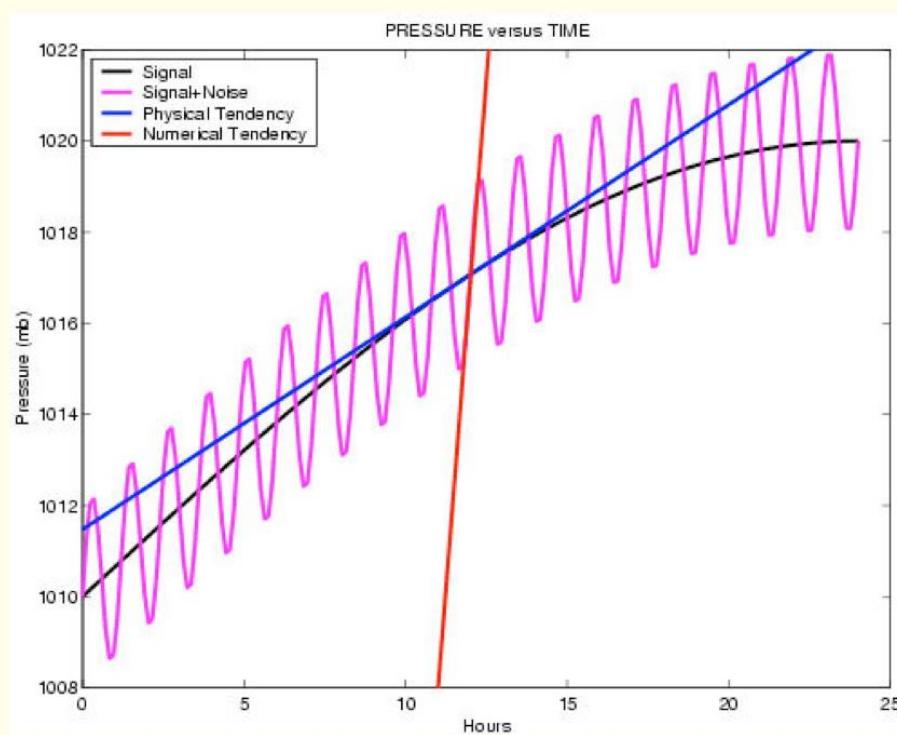
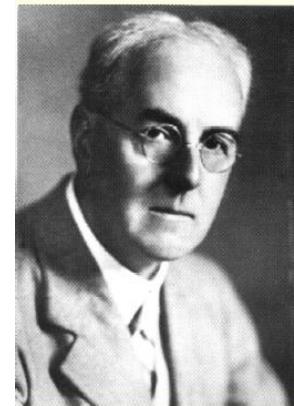


- Por que esse fracasso?
- Não foi devido a números incorretos, como muitos afirmam  
Ele deu apenas **um passo no tempo**, então instabilidades numéricas não podem se desenvolver
- Em vez disso, tem a ver com as ondas rápidas

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Fracasso da previsão de Richardson

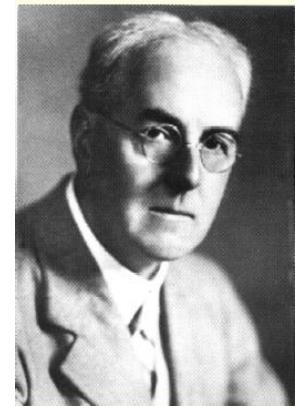
Extrapolando taxas de mudança dos ruidos



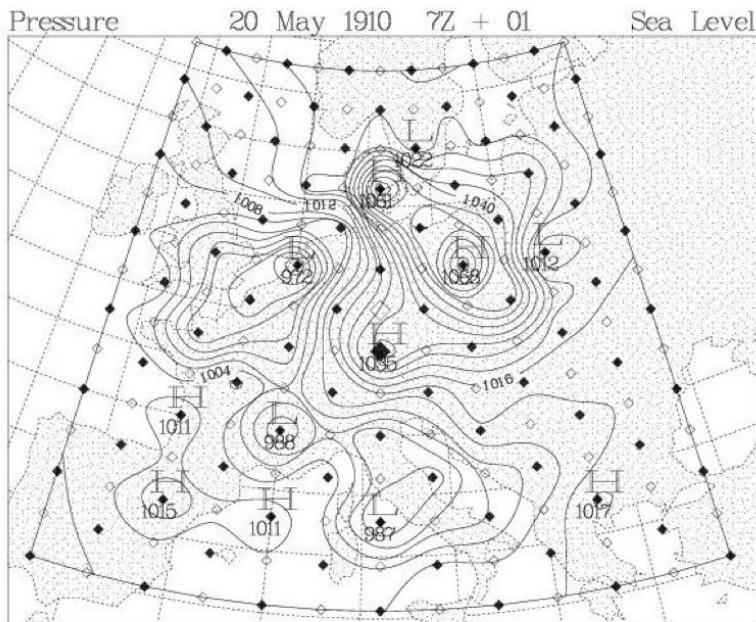
Um esquema simples ilustrando como extrapolar um sinal ruidoso é perigoso ...

# **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

## previsão de Richardson



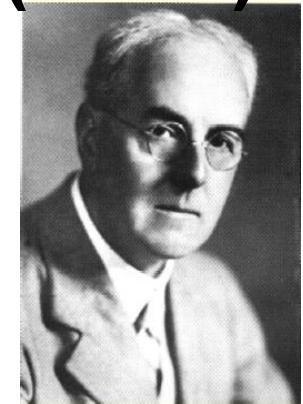
## Forecast without Filtering



Short-range forecast of sea-level pressure, from *uninitialized* data. The contour interval is 4 hPa. Single forward time step of size  $\Delta t = 3600$  s.

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### previsão de Richardson

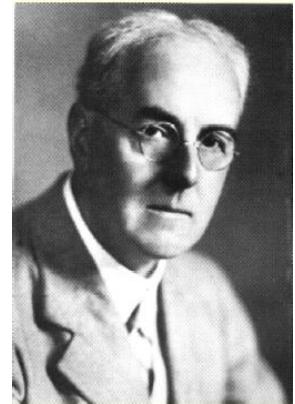


- O próprio Richardson percebeu que as **ondas gravitacionais** eram o problema.
- Ele sugeriu **suavização das condições iniciais**  
E propôs 5 métodos diferentes para isso
- Infelizmente, **ele não conseguiu implementá-los devido ao custo computacionais**  
Mas podemos reproduzir os resultados usando os computadores de hoje

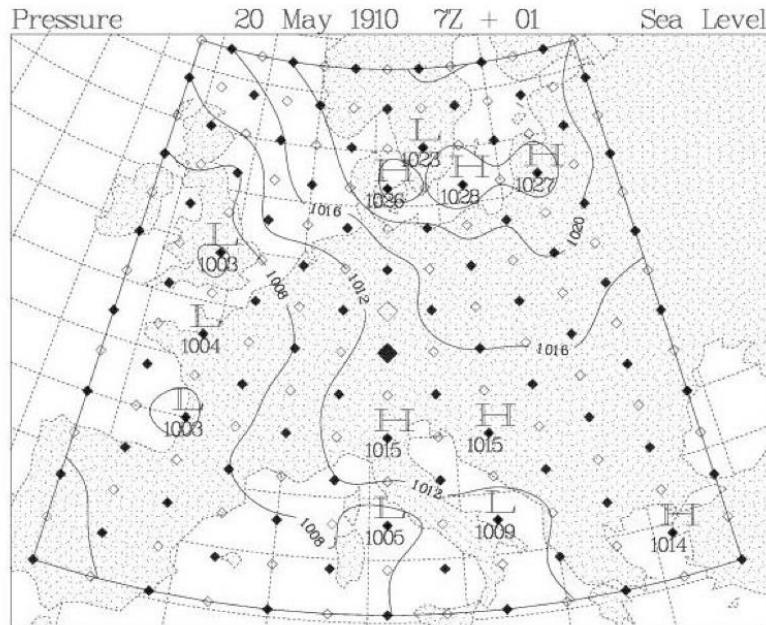
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

visão de Richardson

“Balanceado” as condições iniciais



### Forecast with Filtering



Short-range forecast of sea-level pressure, from *filtered data*. The con-  
tour interval is 4 hPa. Single forward time step of size  $\Delta t = 3600$  s.

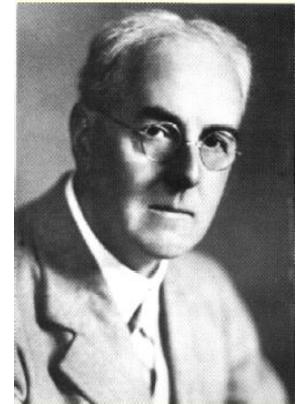
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs) previsão de Richardson

“Balanceado” as condições iniciais

O primeiro experimento NWP de sucesso

- Ondas de gravidade rápidas eram o problema:

Por que não tentar fazer previsões com um **modelo que não possui ondas gravitacionais?**



- John von Neumann, Jule Charney, Ragnar Fjortoft.

- A proposta de pesquisa propôs três usos para o NWP:

Previsão do tempo

Planejando onde fazer observações

Modificação do tempo!

# Modelo Numérico da Atmosfera



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

previsão de Richardson

“Balanceado” as condições iniciais

O primeiro experimento NWP de sucesso

ENIAC Forecast Grid

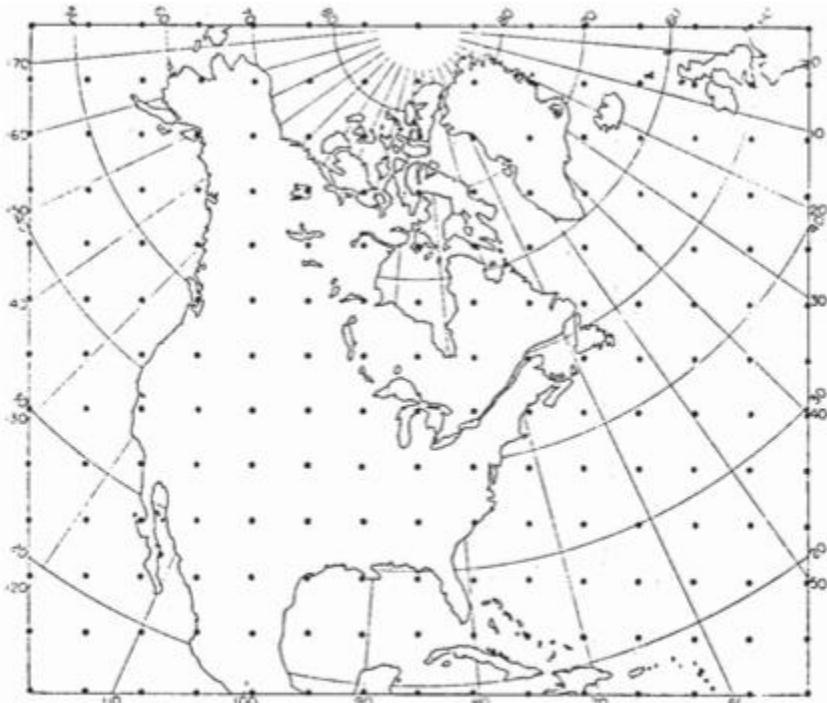
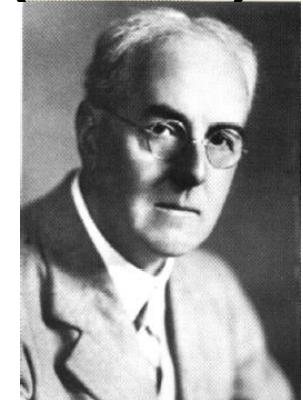


FIG. 2. Computation grid used for the ENIAC forecasts. One line is omitted from the southern edge and two lines from the remaining edges (from CFvN).



Modelo barotrópico usado (sem ondas de gravidade, sem problemas com condições iniciais desequilibradas)

Modelo mais simples c / Rossby ondas

Temos este modelo rodando no pynchon!

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

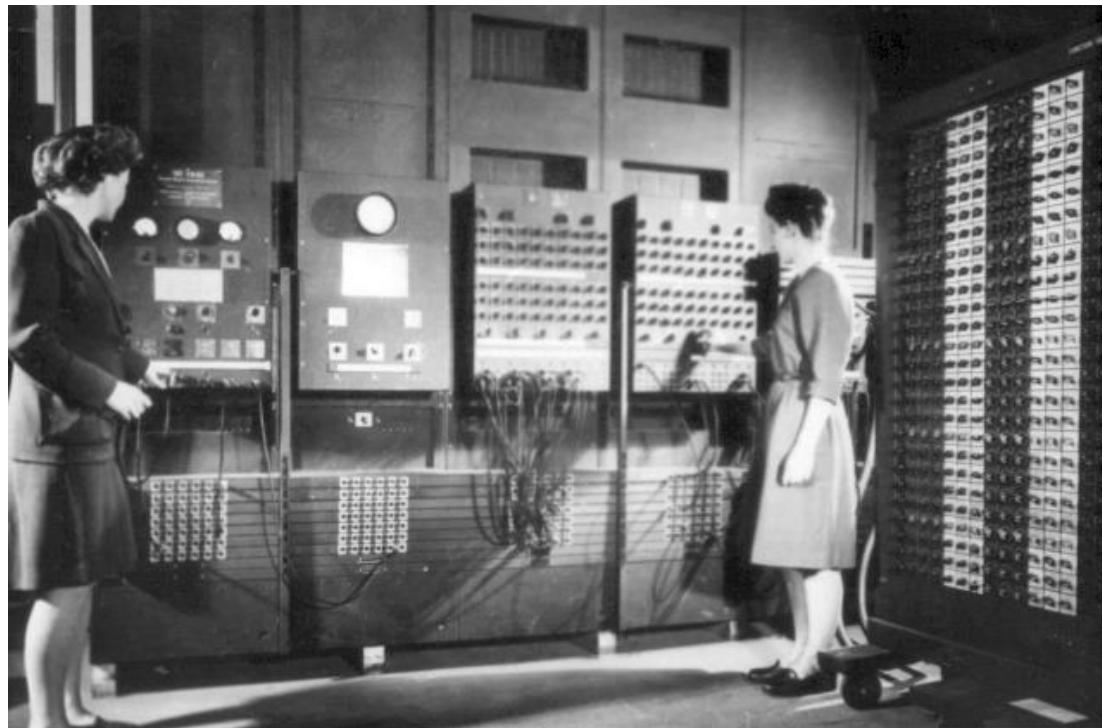
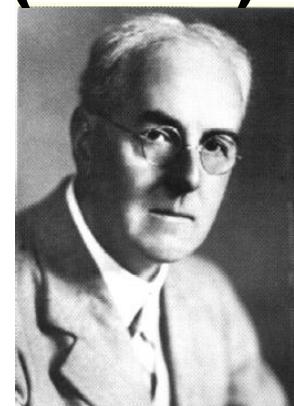
### visão de Richardson

“Balanceado” as condições iniciais

O primeiro experimento NWP de sucesso

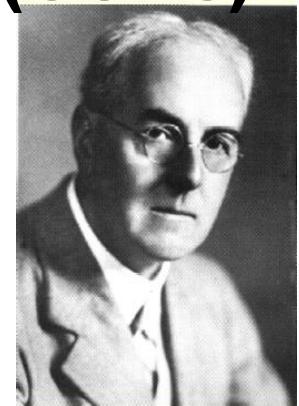
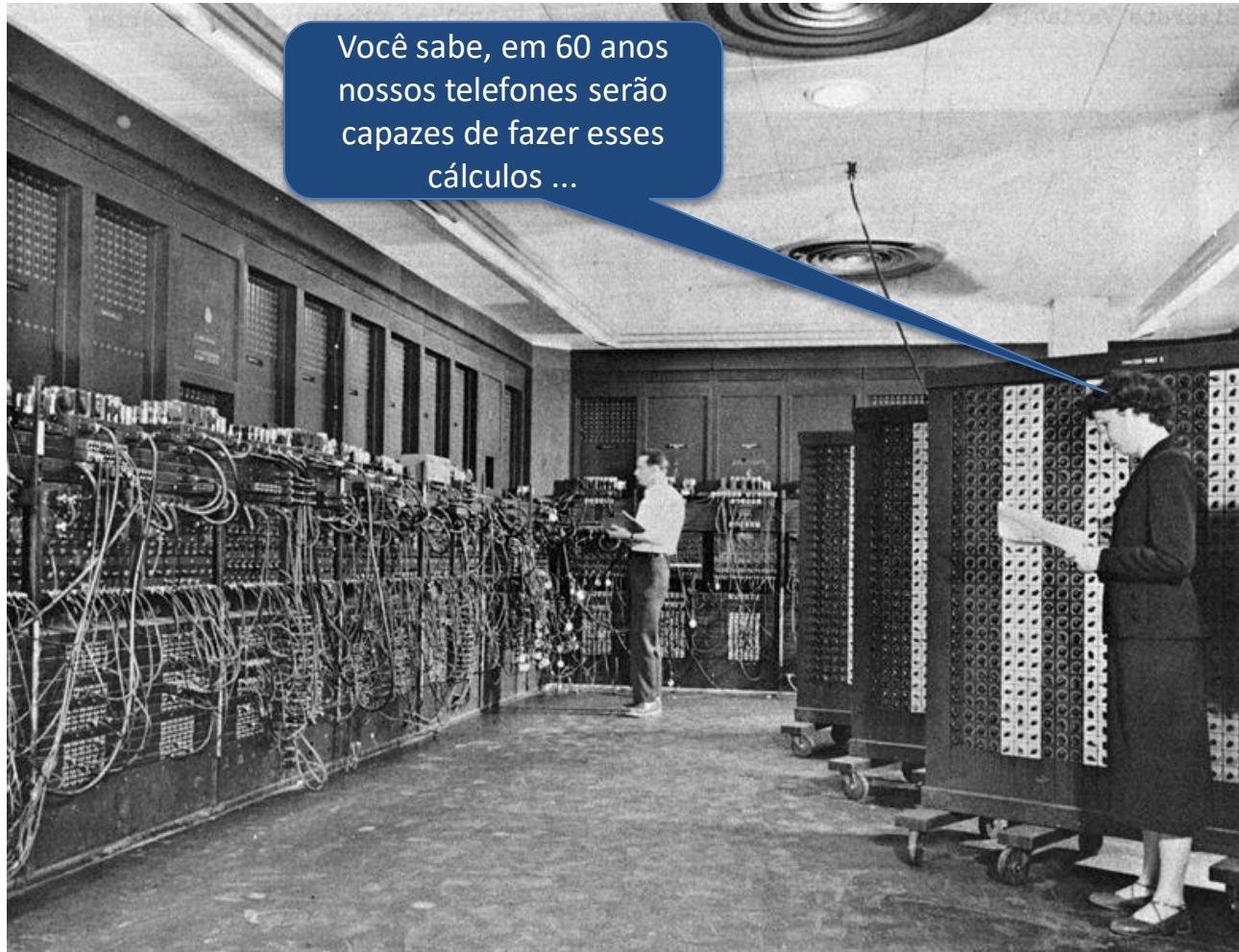
O primeiro computador!

- ENIAC: O Integrador Numérico Eletrônico e o Computador



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### visão de Richardson



# Modelo Numérico da Atmosfera

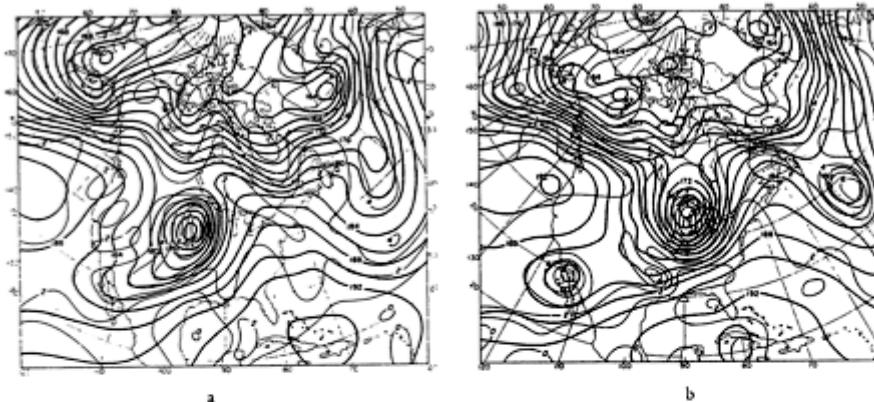


## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

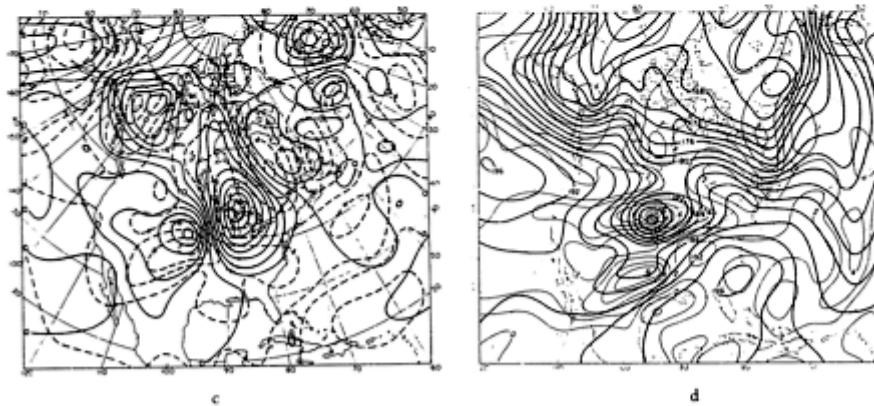
previsão de Richardson

Primeira Previsão

Condições iniciais



Observado e  
calculado  
mudança de  
altura



Altura  
observada 24  
horas depois

Previsão de altura  
24  
horas depois

Fig. 2. Forecast of January 5, 1949, 0300 GMT: (a) observed  $z$  and  $\eta$  at  $t = 0$ ; (b) observed  $z$  and  $\eta$  at  $t = 24$  hours; (c) observed (continuous lines) and computed (broken lines) 24-hour height change; (d) computed  $z$  and  $\eta$  at  $t = 24$  hours. The height unit is 100 ft and the unit of vorticity is  $10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ .

# Modelo Numérico da Atmosfera

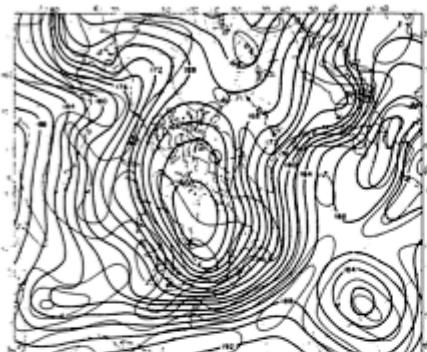


## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

previsão de Richardson

Segunda Previsão

Condições iniciais

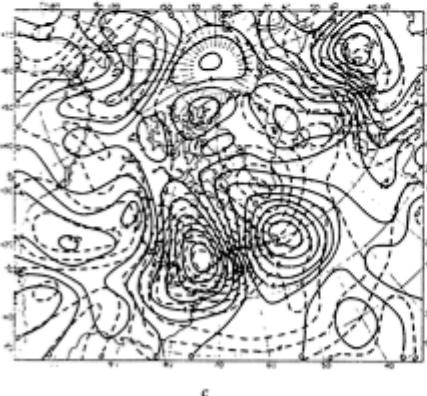


a

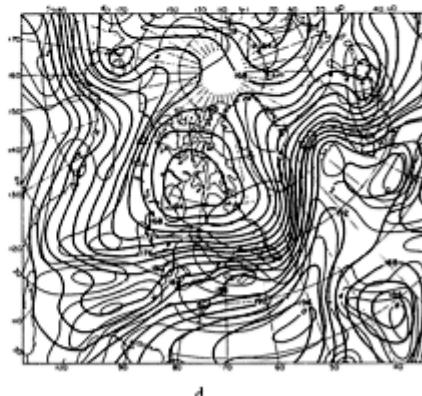


b

Observado e  
calculado  
mudança de  
altura



c



d

Altura observada  
24 horas depois

Previsão de altura 24  
horas depois

- Fig. 3. Forecast of January 30, 1949, 0300 GMT. (See Fig. 2 for explanation of diagrams.)

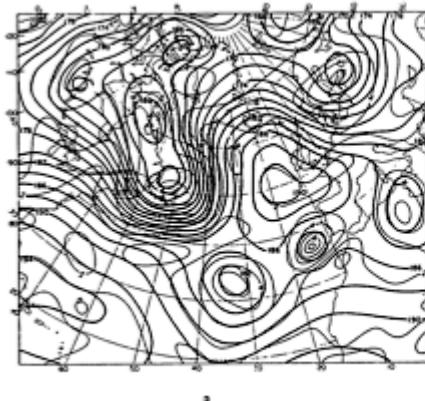
# Modelo Numérico da Atmosfera



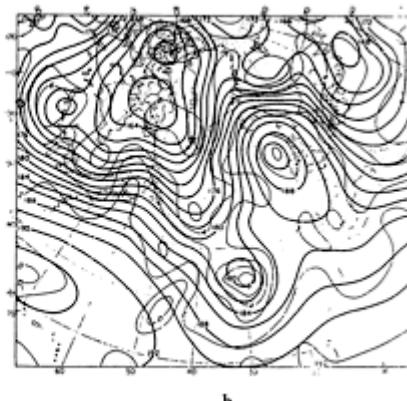
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

previsão de Richardson

Condições iniciais

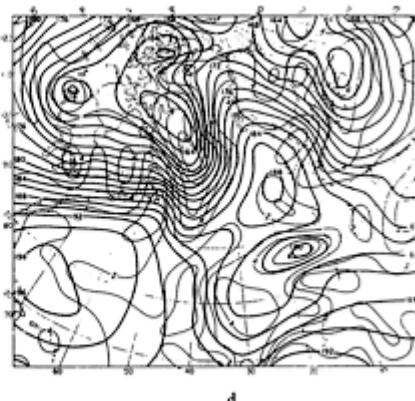
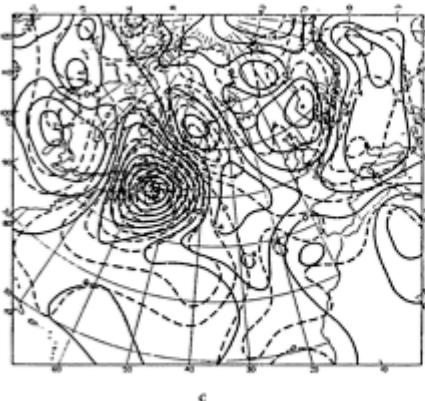


Terceira Previsão



Altura observada  
24 horas depois

Observado e  
calculado  
mudança de  
altura



Previsão de altura 24  
horas depois

Fig. 4. Forecast of January 31, 1949, 0300 GMT. (See Fig. 2 for explanation of diagrams.)

# Modelo Numérico da Atmosfera

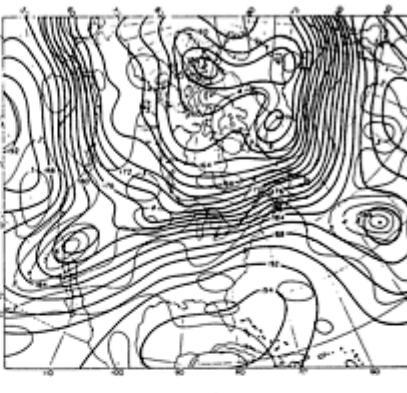
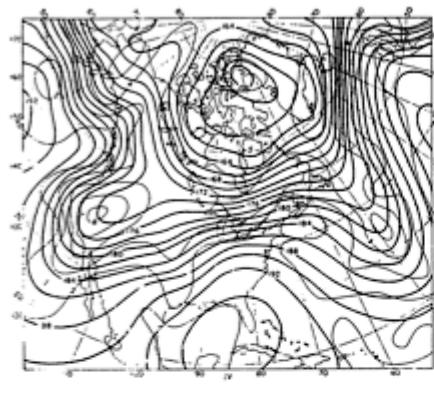


## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

previsão de Richardson

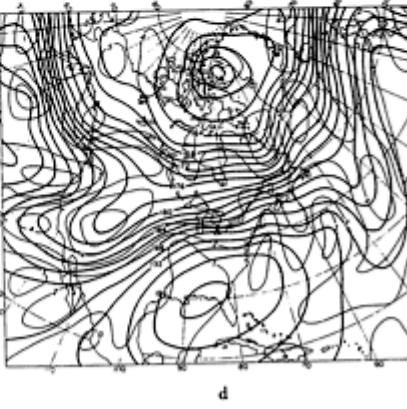
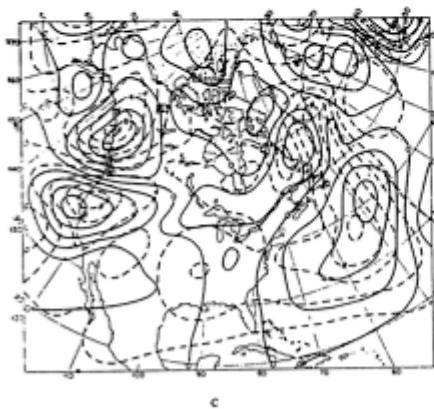
Quarta Previsão

Condições iniciais



Altura observada  
24 horas depois

Observado e  
calculado  
mudança de  
altura



Previsão de altura 24  
horas depois

Fig. 5. Forecast of February 13, 1949, 0300 GMT. (See Fig. 2 for explanation of diagrams.)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Primeiros sistemas operacionais NWP

- O NWP realmente decolou e melhorou rapidamente!
- Dezembro de 1954: Serviço Meteorológico da Real Força Aérea Sueca em Estocolmo
  - a) Modelo desenvolvido no Instituto de Meteorologia da Universidade de Estocolmo (Rossby, etc)
  - b) Modelo barotrópico, 3 previsões por semana do Atlântico Norte
- Maio de 1955: Unidade Numérica Conjunta de Previsão do Tempo, Maryland
  - a) Modelo QG de 3 níveis
- 1966: os EUA usam um modelo de equação primitiva de 3 níveis
- Cobertura global desde 1973

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Numerical Methods

Métodos do Gridpoint:

- a) Campos especificados em pontos:
- b) Freqüentemente escalonado para facilitar a obtenção de derivadas
- c) “B-grid”: a velocidade está em diferentes grades em relação ao geopotencial, temperatura e traçadores
- d) Resoluções comuns: 2x2,5 graus (90x144 pontos)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Numerical Methods

- Métodos espetrais:

a) Usa harmônicos esféricos para representar campos

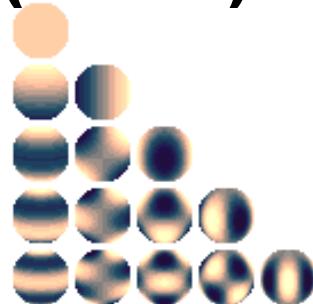
b) Diferentes maneiras de truncar (triangular ou romboidal)

÷ Triangular tem resolução uniforme em torno da esfera, o romboidais focas as resoluções em latitudes médias

÷ Triangular é a escolha preferida agora, romboidal só é usado em GCMs de resolução muito baixa

c) Resoluções comuns: T42 (64x128; 2,8 graus), T85 (128x256; 1,4 graus)

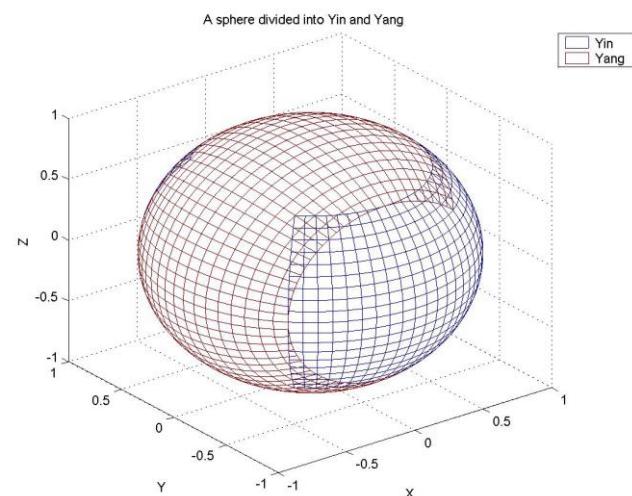
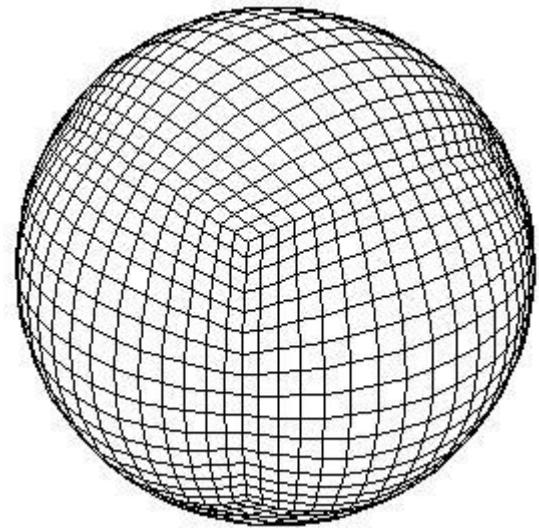
d) Modelo de resolução mais alta em CMIP3: T106 (resolução de 1,1 graus)



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Numerical Methods

- Muitos centros de modelagem estão desenvolvendo métodos numéricicos mais sofisticados.
- Novo núcleo dinâmico GFDL: volume finito
  - a) Melhores propriedades de conservação
- Malhas diferentes:
  - a) “Esfera cubada”
  - b) “Yin-yang”



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Evolução da resolução do modelo

- Mudanças na resolução ao longo do tempo:

AR = “relatório de avaliação”

FAR = “primeiro” AR, etc

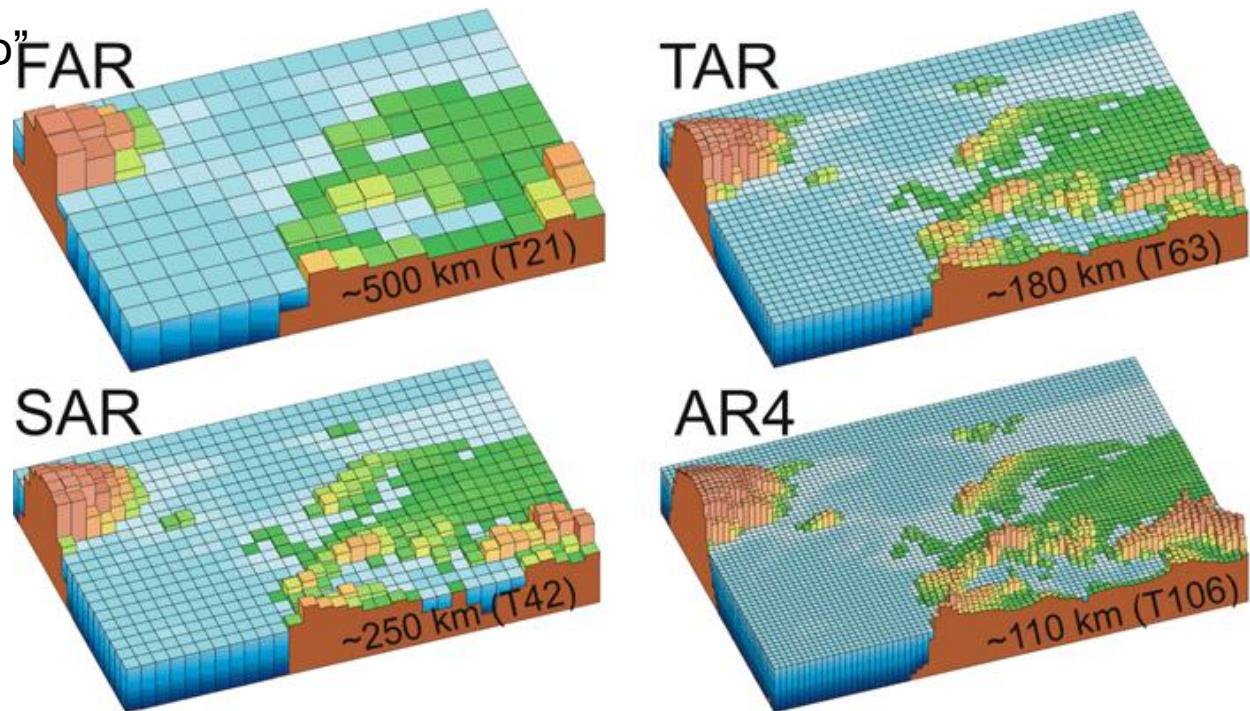
FAR: 1990

SAR: 1995

TAR: 2001

AR4: 2007

AR5: 2014



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

- Mudanças na resolução ao longo do tempo:

AR = “relatório de avaliação”

FAR = “primeiro” AR, etc

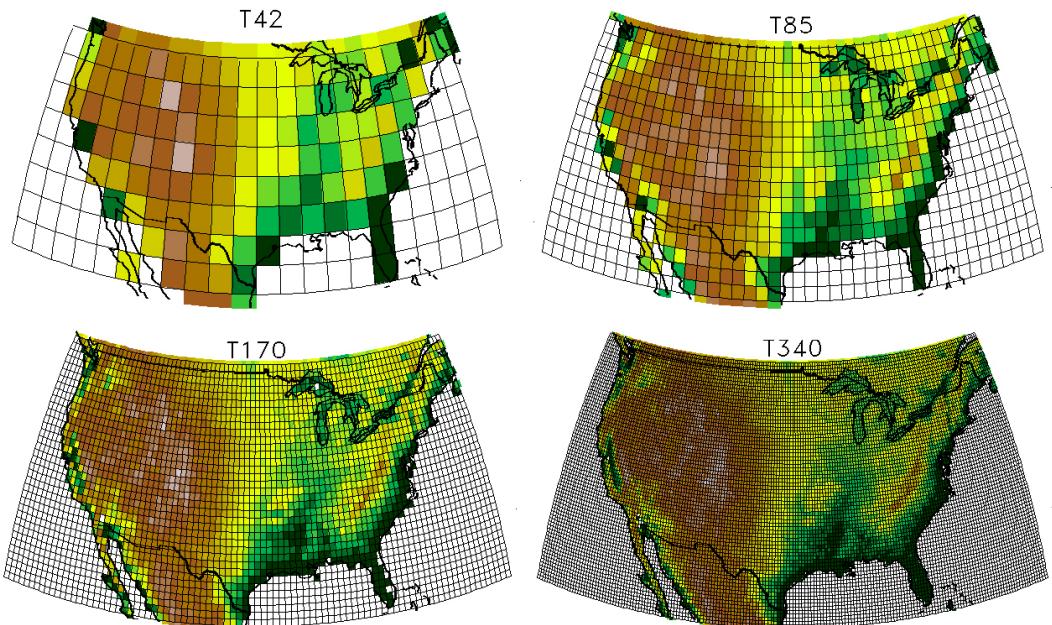
FAR: 1990

SAR: 1995

TAR: 2001

AR4: 2007

AR5: 2014



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

### Métodos numéricos

- Coordenadas verticais:
  - a) A topografia introduz complicações significativas (os níveis de pressão podem desaparecer)
  - b) “Coordenadas Sigma”:  $p / ps$ 
    - ÷ Torna a superfície uma coordenada (porém não é uma coordenadas de pressão verdadeira)
- Os modelos tendem a uma resolução vertical mais alta
  - a) Em reconhecimento da importância da estratosfera no clima de superfície
  - b) CMIP3: em torno de 25 níveis verticais
  - c) GFDL AM3: 48 níveis

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

- Uma vez que nem todos os aspectos dos métodos numéricos conservam energia, uma correção é geralmente aplicada
  - a) energia calculada antes e depois da dinâmica é chamada
  - b) Temperatura multiplicada por uma constante em todos os lugares para garantir que a energia permaneça a mesma

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

#### Pontos-chave do núcleo dinâmico

- Equações do fluido hidrostático na esfera
  - a) O futuro será não hidrostático: mais caro e não necessário atualmente
- Numérica
  - a) Não seria bom se vivêssemos em Flatland ...
    - ÷ Pólos e topografia levam a dificuldades
  - b) Nenhum vencedor claro para esquemas numéricos
    - ÷ Métodos espectrais
    - ÷ Métodos de ponto de grade (por exemplo, grade B)
    - ÷ Volume finito
- Resolução
  - a) Melhora dos Efeitos locais perto da topografia em modelos de alta resolução
  - b) Melhora na soluções de tempestades tropicais em alta resolução
  - c) A sensibilidade ao clima não muda muito com a resolução
  - d) A fidelidade em grande escala com obs não é tão dependente da resolução (contanto que o modelo não seja realmente de baixíssima resolução)



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

**Próximo: Física dos AGCMs**

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

- Os modelos climáticos têm algumas parametrizações muito complexas de processos físicos
- Descreveremos ideias gerais de como eles são parametrizados
- O histórico de algumas das parametrizações
- E descrição sobre maneiras simples de parametrizar esses efeitos também

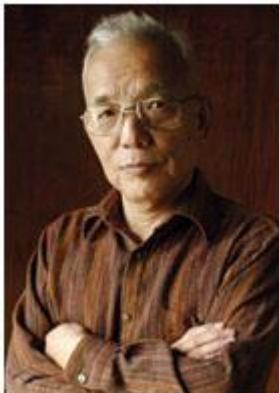
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

Suki Manabe: **Pai da Modelagem Climática**

- Syukuro Manabe (nascido em 1931):



Trabalhou na GFDL de 1958-1997

1997-2001: Diretor do Earth Simulator, Japão

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

### Primeiros estudos de modelagem de Manabe

- Modelo radiativo: M. e Moller (1961)
- Modelo radiativo-convectivo: M. e Strickler (1964)
- Modelo apenas com atmosfera: Smagorinsky, M. e Holloway (1965)

# Modelo Numérico da Atmosfera



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricos

### Primeiro Modelo de Clima Acoplado

- Manabe e Bryan (1969):  
a) Primeiro modelo climático acoplado

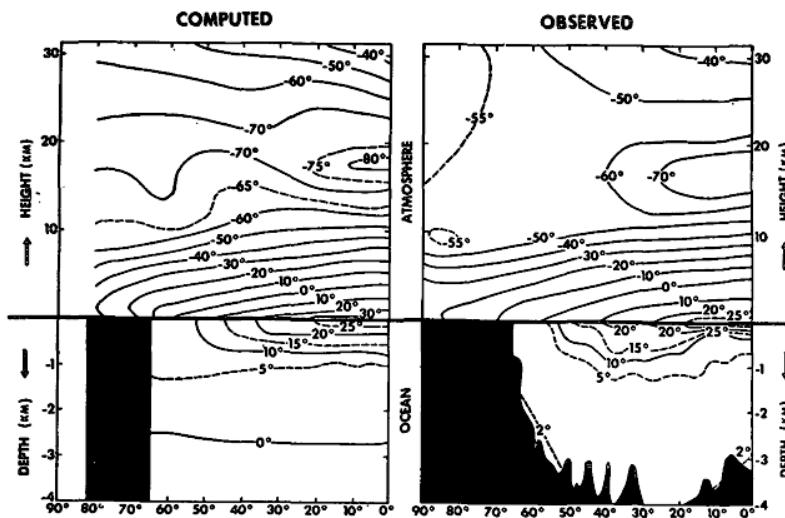
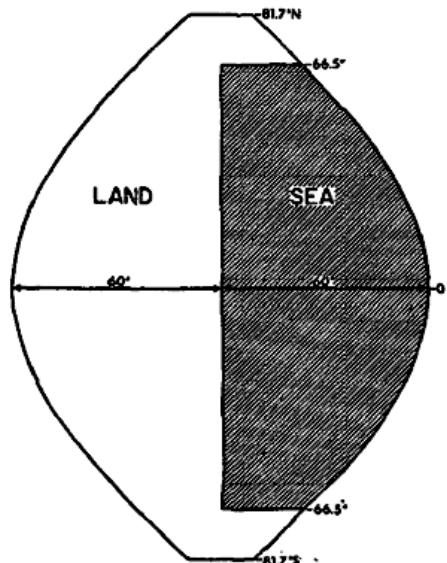


FIG. 2. Zonal mean temperature of the joint ocean-atmosphere system, left-hand side. This distribution, which is the average of two hemispheres, represents the time mean over two-sevenths of the period of the final stage of the time integration. The right-hand side shows the observed distribution in the Northern Hemisphere. The atmospheric part represents the zonally averaged, annual mean temperature. The oceanic part is based on a cross section for the western North Atlantic from Sverdrup *et al.* (1942).

FIG. 1. Ocean-continent configuration of the model.

# Modelo Numérico da Atmosfera



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Evolução da resolução do modelo

Métodos numéricicos

## Primeira previsão de aquecimento global

- Manabe e Wetherald (1975):

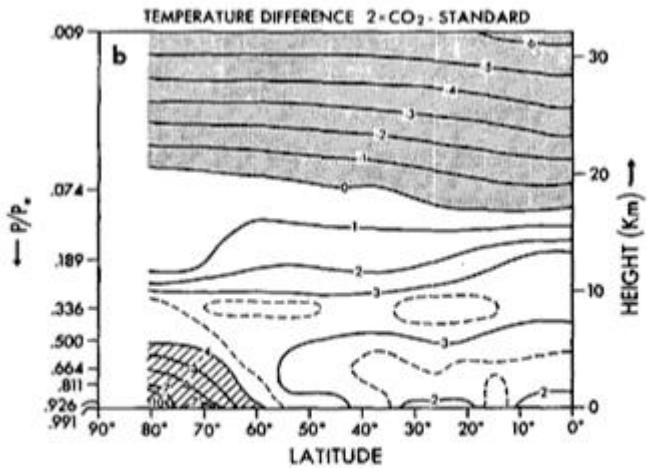


FIG. 4. Latitude-height distribution of the zonal mean temperature (K) for the standard case (a) and of the increase in zonal mean temperature (K) resulting from the doubling of CO<sub>2</sub> concentration (b). Stippling indicates a decrease in temperature.

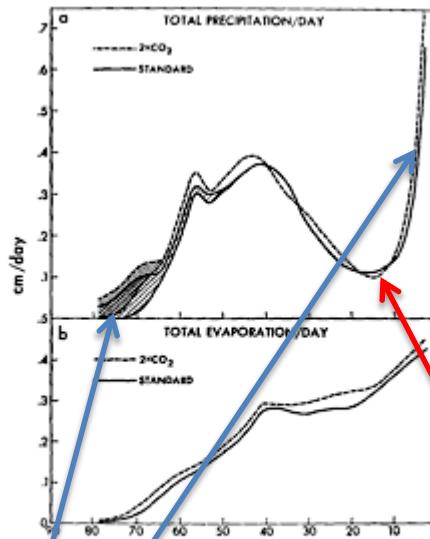


FIG. 7. Zonal mean rates of total precipitation, where shaded areas denote the rates of snowfall (a), and zonal mean rates of evaporation (b).



Amplificação polar

As áreas úmidas ficam mais úmidas & secam subtropical

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

Outros estudos iniciais de Manabe

- Acho esses primeiros paper de modelagem ainda realmente fascinantes ...
- Efeito da circulação do oceano no clima:
  - a)Desligue o modelo do oceano
- Efeito da umidade:
  - b)Desligue o aquecimento latente
- Efeito das montanhas:
  - a)Expulsar(eliminar) toda a topografia
- Efeito da mudança da **radiação solar**, dobrando o **CO<sub>2</sub>**, **mantos de gelo**, nuvens, **umidade do solo**, etc ...

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Evolução da resolução do modelo

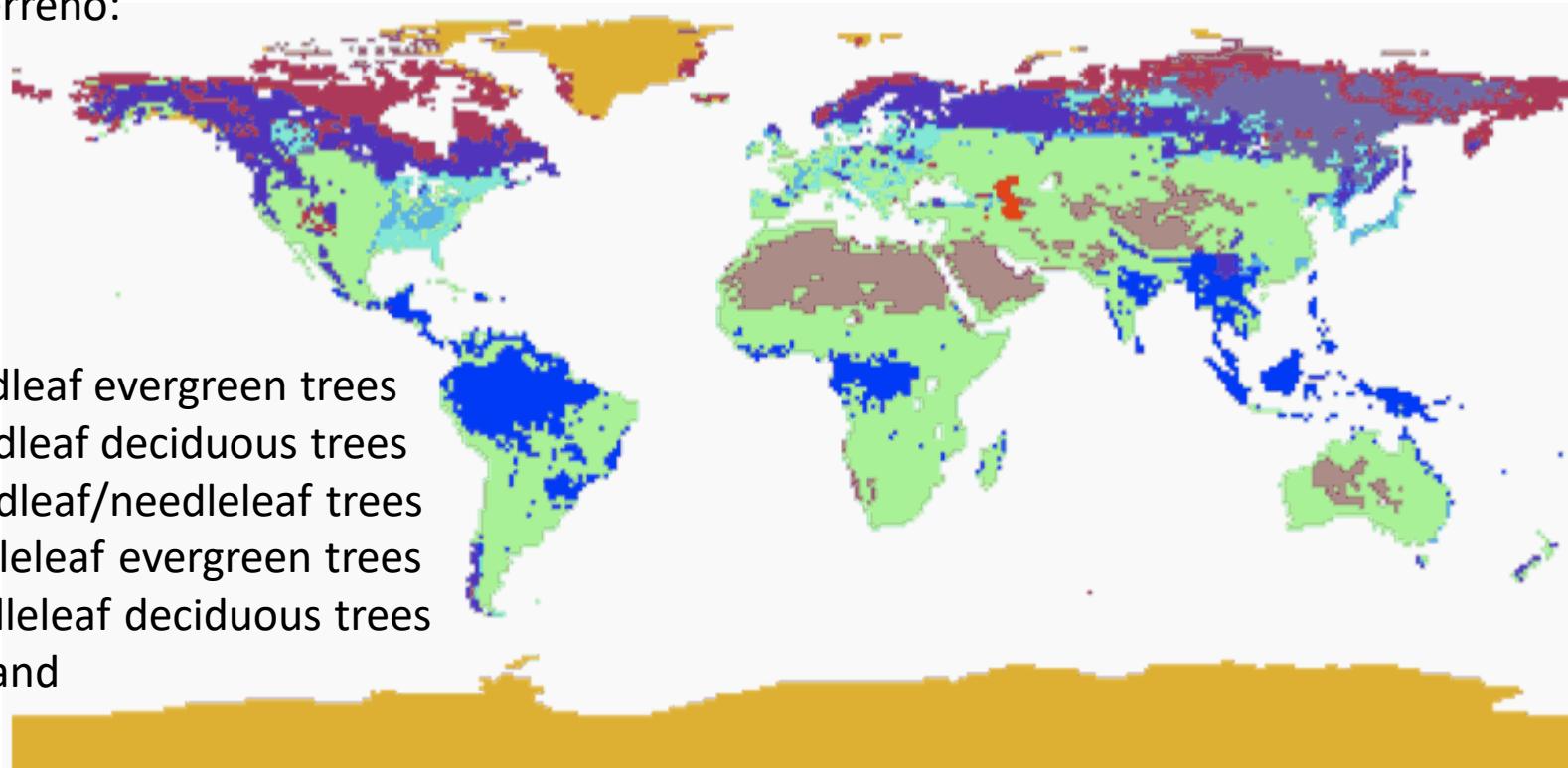
GCMs dos dias atuais

- A seguir, discutiremos GCMs de última geração
  - a) CMIP = projeto de intercomparação de modelo acoplado
    - ÷ CMIP3: para o 4º relatório de avaliação do IPCC
    - ÷ CMIP5: para relatório de avaliação do 5º IPCC
  - Mas, primeiro, uma lista de coisas que os modelos CMIP3 nem tentaram fazer:
    - a) Ciclo do carbono
    - b) Vegetação dinâmica

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

Tipos de vegetação

- Tipos de terreno:



- 1: (BE) broadleaf evergreen trees
- 2: (BD) broadleaf deciduous trees
- 3: (BN) broadleaf/needleleaf trees
- 4: (NE) needleleaf evergreen trees
- 5: (ND) needleleaf deciduous trees
- 6: (G) grassland
- 7: (D) desert
- 8: (T) tundra
- 9: (A) agriculture
- 10: (I) ice
- 11: (L) lake

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### O que os modelos não parametrizam (ainda)

- Mas, primeiro, uma lista de coisas que os CMIP3 GCMs nem mesmo tentaram fazer:
  - a) Ciclo do carbono
    - ÷ Eles usaram distribuições de CO<sub>2</sub> prescritas
  - b) Vegetação dinâmica
    - ÷ Prescrito para ser os valores atuais do clima
  - c) Modelos dinâmicos de manto de gelo
    - ÷ Prescrito para o tamanho atual
  - d) Química interativa (por exemplo, química do ozônio)
    - ÷ Buraco de ozônio prescrito
  - e) Efeitos do aerossol na formação de nuvens
    - ÷ Não é frequentemente considerado
- “Modelos do sistema terrestre” estão tentando parametrizar muitos desses

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **Parametrizações Físicas**

- Discutiremos as seguintes parametrizações físicas:
  - a) Transferência radiativa
  - b) Convecção
  - c) Nuvens
  - d) Esquemas de fluxos de superfície/camada limite

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **Modelos de transferência radiativa**

- A transferência radiativa de céu claro é essencialmente um problema resolvido.
- Divila o espectro eletromagnético em bandas
- Absorção e dispersão solar por H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, nuvens, aerossóis
  - a) O modelo GFDL AM2 usa 18 bandas de radiação solar
  - b) Aerossóis são sal marinho, poeira, carbono preto e orgânico e aerossóis de sulfato
    - ÷ As concentrações de aerossóis e produtos químicos são prescritas como climatologias médias mensais

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Modelos de transferência radiativa

- Absorção e emissão de ondas longas por H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC-11, CFC-12, CFC-113, HCFC-22, aerossóis, nuvens
  - a) 8 bandas de ondas longas
- Muito caro computacionalmente!
  - A) Freqüentemente, ~ 50% do uso total da CPU está executando o código de radiação
    - a) Freqüentemente, não é chamado a cada time step
    - a) Implementações mais rápidas, como redes neurais foram desenvolvidas

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Esquemas de convecção úmida

- Convecção: perturbação vertical devido a diferenças de densidade
  - A atmosfera é fortemente aquecida por baixo, levando a grandes quantidades de convecção
  - A umidade complica isso significativamente (grande fonte de calor)

O oceano é aquecido de cima: a principal diferença entre a atmosfera e o oceano!

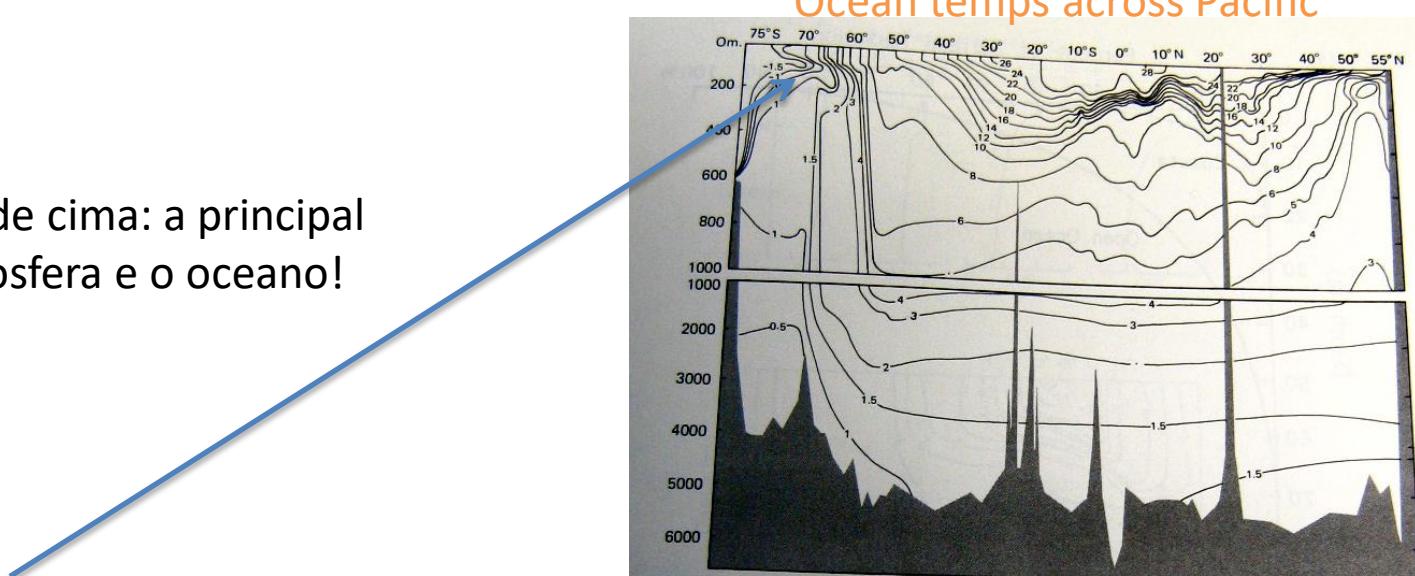


Figure 1.3 Temperature along approximately 160° W in the Pacific from the Antarctic to Alaska. Vertical exaggeration is  $5.5 \times 10^3$  in the upper 1000 m and  $1.11 \times 10^3$  below 1000 m. (After Reid, *Intermediate Waters of the Pacific Ocean*, The John Hopkins Oceanography Studies, The John Hopkins Press, 1965.)

A água quente do oceano está confinada a alguns 100 metros da superfície

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **Esquemas de convecção úmida**

- Objetivos clássicos de parametrização cumulus (Cu param):
  - a) Precipitação
  - b) Distribuição vertical de aquecimento e secagem / umedecimento
- Objetivos não clássicos do parâmetro Cu:
  - a) Fluxos de massa (para advecção do traçador)
  - b) Geração das fases líquida e gelo da água
  - c) Interações com PBL, radiação e fluxo (transporte de momento)

Metas da revisão de Arakawa (2004)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Esquemas de convecção úmida

- Esquema de convecção mais simples:
  - a) Condense sempre que uma caixa de grade atinge 100% de saturação
- Esquema de convecção inicial:
  - a) Ajuste convectivo úmido (Manabe et al 1965)
  - b) Acima e neutralizando a instabilidade convectiva
  - c) Derivação ():
    - ÷ Primeiro ajuste convectivo seco, depois instabilidade condicional e ajuste convectivo úmido

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Esquemas de convecção úmida

- Esquema de convecção simplificado Betts-Miller:
  - a) Relaxe a temperatura para a adiabata umida
  - b) Relaxe a umidade para algum perfil
  - c) Isso não vai conservar energia embora (aquecimento deve ser igual a secagem): ajuste para que assim seja
  - d) Mas então pode ocorrer precipitação negativa: "convecção rasa (não precipitante)"

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Esquemas de convecção úmida

- A maioria dos esquemas de convecção CMIP3 / 5 são esquemas de "fluxo de massa"
  - a) Com base em modelos de entranhamento de plumas em escala de sub-grade
  - b) O entranhamento adiciona ar seco ao fluxo de massa vertical, dilui a pluma
  - c) Umidade, etc, é advectada por correntes ascendente de ar (updrafts ) e subsidente (downdrafts)

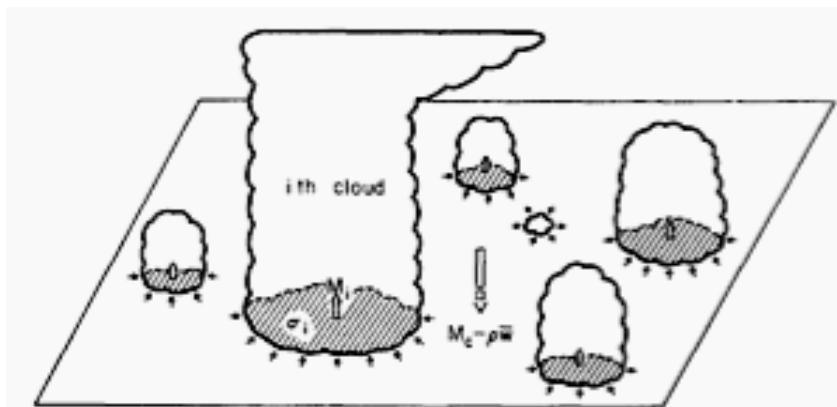
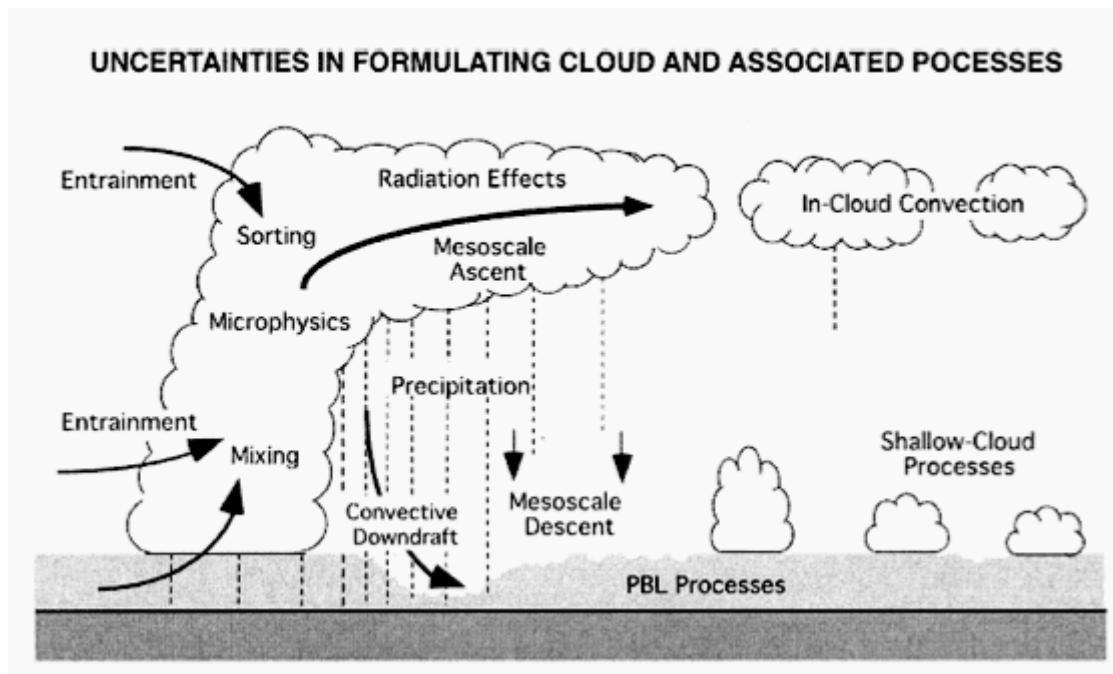


FIG. 1. A unit horizontal area at some level between cloud base and the highest cloud top. The taller clouds are shown penetrating this level and entraining environmental air. A cloud which has lost buoyancy is shown detraining cloud air into the environment.

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Esquemas de convecção úmida

- - Esquemas de "fluxo de massa":
  - a) Intensidade convectiva determinada pelo "quase equilíbrio" do CAPE (fechamento CAPE)
  - b) Fácil de disparar a convecção nestes esquemas (obter convecção fraca, estável)



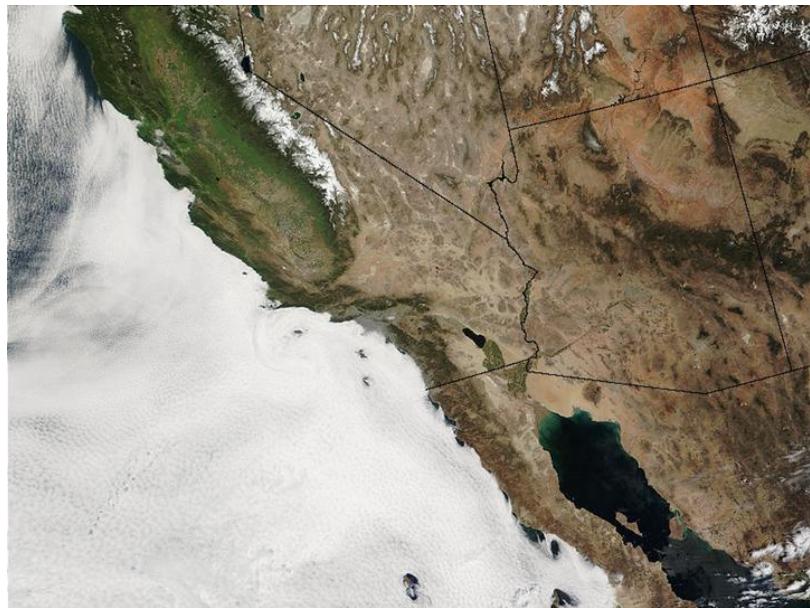
# Modelo Numérico da Atmosfera



Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Esquemas de nuvem

- As interações da nuvem são **o processo mais incerto em GCMs**
- a) Levam às **maiores diferenças entre os modelos**



Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Esquemas de nuvem

- Implementações históricas de parametrizações de nuvem:
  - a) Primeiro, distribuições de nuvens climatológicas foram usadas (por exemplo, Holloway e Manabe 1971)
  - 
  - b) Depois disso, parametrizações de nuvem de diagnóstico foram usadas
    - ÷ Com base em propriedades como umidade relativa, velocidade vertical e estabilidade estática
    - ÷ Por exemplo, Wetherald e Manabe 1988: nuvens quando a umidade relativa excede 99%
    - ÷ Slingo 1987: Esquema de diagnóstico baseado em precipitação convectiva, umidade, velocidade vertical e estabilidade

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Esquemas de nuvem

- Agora os esquemas são prognósticos:

- a) A água da nuvem e o gelo da nuvem são transportadas como variáveis separadas
  - ÷ Bigornas estratiformes e nuvens cirros podem ter vida longa
- b) A fração de nuvem também é um prognóstico em muitos modelos
- c) Uma certa porcentagem de condensação do esquema de convecção vai para a água da nuvem em vez de precipitação
  - ÷ “Eficiência de precipitação”
- d) Parametrizações microfísicas bulk:
  - ÷ Transferência entre fases (por exemplo, autoconversão e acréscimo de líquido de nuvem em chuva)
- e) Erosão de nuvens
  - ÷ Se houver ar seco na caixa de grade
- f) A chuva dentro e fora das nuvens é rastreada: determinar se há reevaporação é importante
- g) A sobreposição de nuvens também é uma parte fundamental da parametrização:
  - ÷ Importante para radiação, queda de precip

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Parametrização de Fluxo de Superfície

- Esquemas de fluxo de superfície
  - a) Quanta evaporação e fluxo de calor sai do oceano / continente
  - b)  $SH = \text{fluxo de calor sensível} = C | v | (T - Ts)$
  - c) O coeficiente de resistência da superfície  $C$  é uma função da estabilidade e cisalhamento
    - ÷ Teoria de similaridade "Monin-Obukhov"
    - ÷ Coeficiente de arrasto neutro: apenas em função da "rugosidade da superfície" e coeficiente de von Karman

$$z_0 = 0.0002 \text{ m open water}$$

$$z_0 = 0.005 \text{ m flat land, ice}$$

$$z_0 = 0.03 \text{ m grass or low vegetation}$$

$$z_0 = 0.1 \text{ m low crops}$$

$$z_0 = 0.5 \text{ m forest}$$

$$z_0 = 2.0 \text{ m city center, large forest}$$

Valores de rugosidade da superfície para diferentes superfícies

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Parametrização de Fluxo de Superfície

. Teoria de Monin-Obukhov para coeficiente de arrasto C

a)  $SH = C |v| (T - Ts)$

b) Coeficiente de arrasto neutro: apenas em função da rugosidade da superfície e coeficiente de von Karman

c) Em condições estáveis ou instáveis: função de número Richardson

÷ C é maior em condições instáveis

÷ C fica menor (e se aproxima de zero) em condições estáveis

d) Os coeficientes de arrasto estável são atualmente bastante incertos

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Parametrização de Fluxo de Superfície

- a) GCMs têm suas camadas mais baixas muito perto da superfície (normalmente dentro de 20 m)
  - ÷ Portanto, a teoria de Monin-Obukhov pode ser usada para calcular coeficientes de arrasto

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Parametrizações da Camada Limite

- Esquema de camada limite
    - a) Como o calor, a umidade e o momento são distribuídos na camada limite turbulenta
    - b) Normalmente com base em fechamentos turbulentos com dados empíricos
    - c) Combinado com a camada de superfície Monin-Obukhov
    - e) Alguns têm uma variável prognóstica adicional, a energia cinética turbulenta
- ÷ Dá memória à mistura

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Parametrizações GCM adicionais

- Convecção rasa
  - a) Esquema de convecção rasa UW é implementado no modelo AM3 do GFDL (para CMIP5)
  - b) Este esquema é um esquema de fluxo de massa de única pluma
  - c) Outras maneiras:
    - ÷ Esquemas difusivos
    - ÷ Esquemas de ajuste
- Transporte de momento por cumulus
- Arrasto da onda gravitacional
  - a) Fluxos de momento devido a ondas gravitacionais perto da topografia

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Correção de Fluxo

- E se o seu modelo climático chegar a um estado irreal?
- Os primeiros modelos climáticos tiveram que usar "ajuste de fluxo":
  - Colocando fluxos de calor e umidade em diferentes locais para tornar o clima mais realista
  - Para o segundo relatório de avaliação, a maioria dos modelos teve que usar ajuste de fluxo ou tinha estado médio ruim
  - Pelo TAR (terceiro relatório de avaliação), a maioria dos modelos não precisava de ajuste de fluxo
  - No CMIP3, apenas 4 dos 24 modelos têm ajuste de fluxo

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## CMIP3 GCM Summary

- De 24 modelos no arquivo CMIP3:
  - a) 1 é não hidrostático (Had-GEM)
  - b) 4 têm efeito indireto de aerossol (nas nuvens)
  - c) 4 têm algum tipo de química
    - ÷ 3 destes são a produção de aerossol de sulfato de SO<sub>2</sub>
    - ÷ 1 simplificou a química do ozônio (CNRM)
    - ÷ 1 tem modificações de concentração química de GHG (metano, nitroso, CFC-11 e CFC-12) (NCAR CCSM3)
  - e) 0 têm vegetação dinâmica, ciclo de carbono ou mantos de gelo dinâmicos

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## CMIP3 GCM Summary

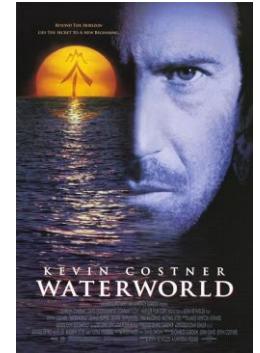
- De 24 modelos no arquivo CMIP3:
  - a) 1 é não hidrostático (Had-GEM)
  - b) 4 têm efeito indireto de aerossol (nas nuvens)
  - c) 4 têm algum tipo de química
    - ÷ 3 destes são a produção de aerossol de sulfato de SO<sub>2</sub>
    - ÷ 1 simplificou a química do ozônio (CNRM)
    - ÷ 1 tem modificações de concentração química de GHG (metano, nitroso, CFC-11 e CFC-12) (NCAR CCSM3)
  - e) 0 têm vegetação dinâmica, ciclo de carbono ou mantos de gelo dinâmicos

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Física simplificada GCMs

- Há valor em desenvolver GCMs com física simplificada:
  - a) Mais fácil de entender
  - b) Mais fácil de reproduzir os resultados
  - c) Resultados mais robustos (menos sensíveis aos parâmetros)
  - d) Menos despesas computacionais
  - e) Campo de teste para teorias da circulação geral

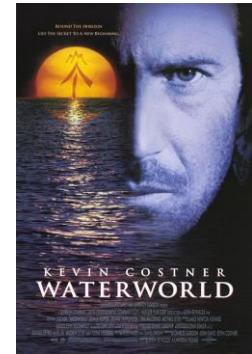
Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)



## Simplified GCM Experiments

- A natureza nos forneceu apenas um planeta
- Os modelos de computador nos permitem explorar uma variedade de climas planetários imaginários:
  - a) Planetas cobertos pelo oceano
  - b) Planetas com diferentes taxas de rotação, raio, aquecimento solar
  - c) Certos efeitos físicos suprimidos ou aprimorados

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)



## Simplified GCM Experiments

- Veja Held (2005, BAMS) para analogia biológica:
  - a) Em biologia, a hierarquia ocorre naturalmente: bactérias, moscas de fruta, ratos, etc.
  - b) Isso permitiu um rápido progresso na compreensão da biologia molecular, do genoma, etc.
- Na ciência atmosférica, temos que criar nossas próprias hierarquias
  - a) Tem que argumentar adicionado o que vale a pena estudar nos modelos simplificados

Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## An Idealized GCM

- Modelo Held-Suarez (1994, BAMS)
- Radiação e convecção parametrizadas como

$$Q = -k(T - T_{eq})$$

Mais quente que  $T_{eq}$  => resfriamento "

Mais frio do que  $T_{eq}$  => aquecimento "

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **An Idealized GCM**

#### **Como parametrizar a temperatura de equilíbrio?**

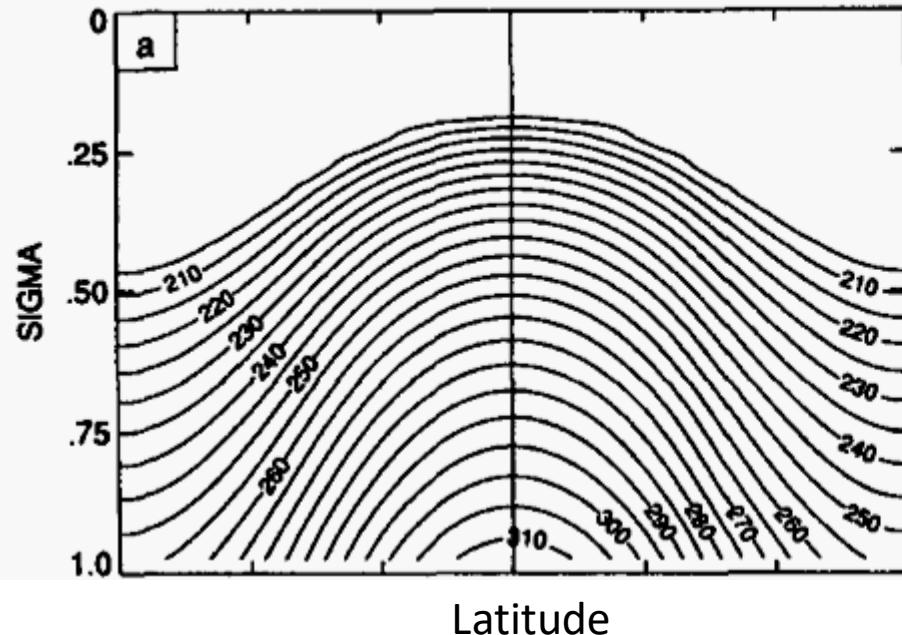
- Temperatura de equilíbrio = o que aconteceria se a dinâmica não agisse**
- Radiação e convecção**

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

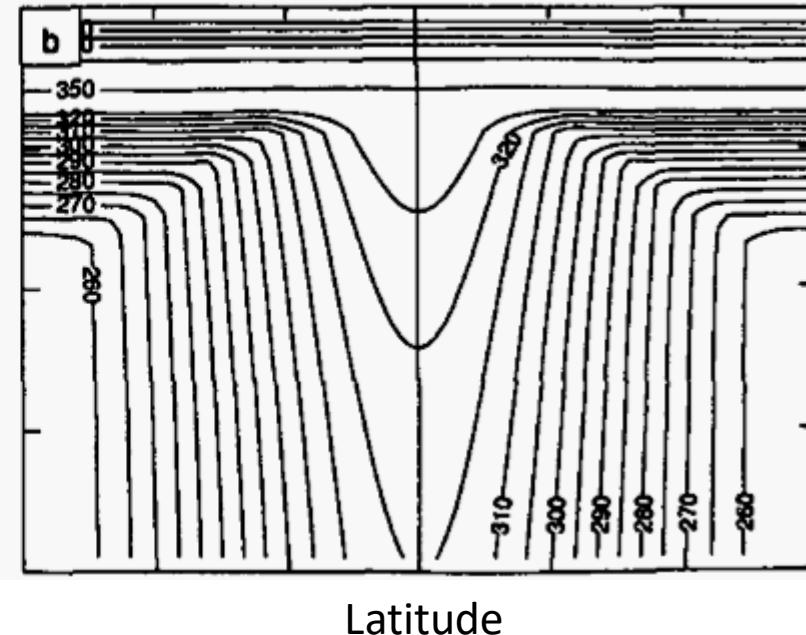
### The Held-Suarez Dry GCM

- Distribuição de equilíbrio é o que a radiação e a convecção produziriam sem dinâmica

Temperature



Potential Temperature



O equador é mais quente do que observado.  
O Pólo é mais frio do que observada.  
a temperatura estratosférica constante

estrutura Vertical aproximadamente adiabático úmido

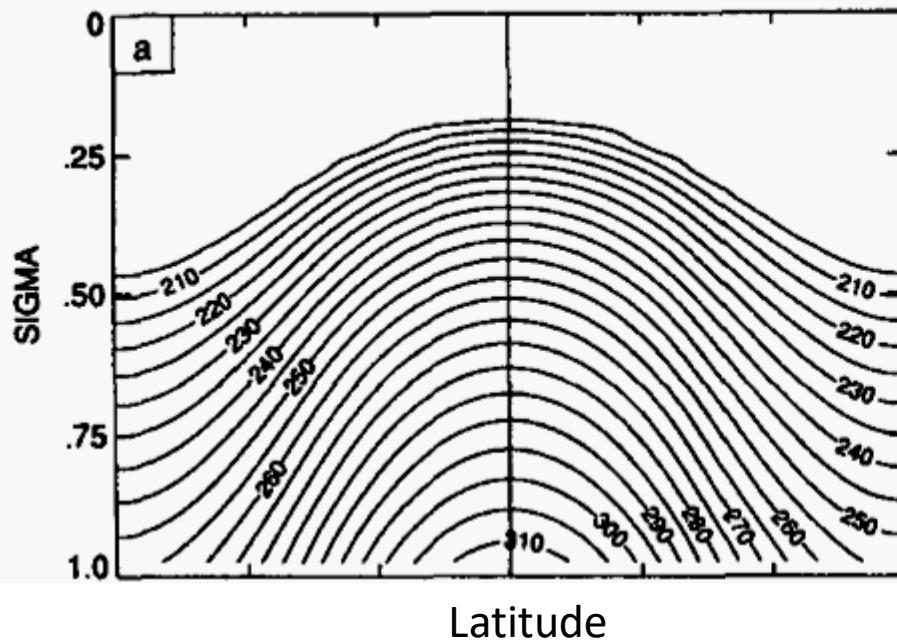
## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

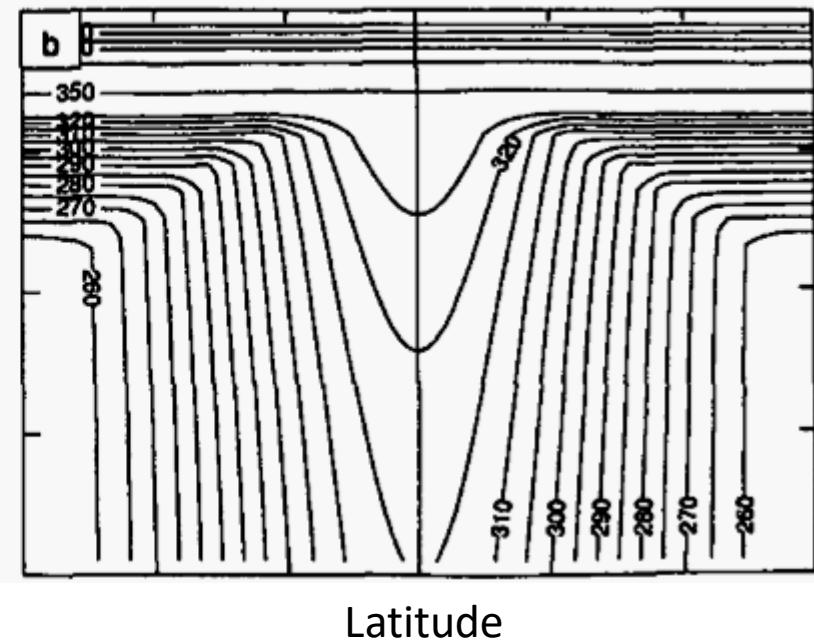
Parâmetros de radiação:

- a) Gradiente horizontal de equilíbrio radiativo: 60 K
- b) Gradiente vertical de temperatura potencial no equador: 10 K
- c) Tempo de relaxamento na troposfera livre: 40 dias
- d) Tempo de relaxamento da camada limite: 4 dias na superfície

Temperature



Potential Temperature



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

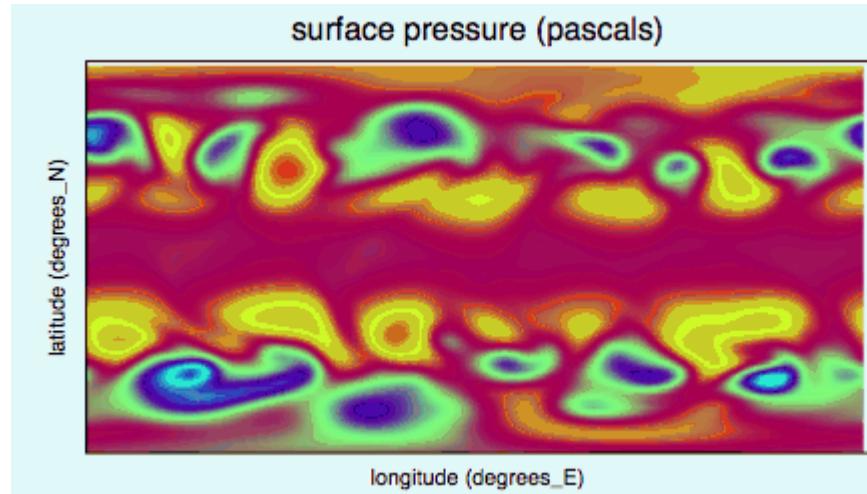
### The Held-Suarez Dry GCM

- Forte amortecimento na camada limite é necessário para evitar que ocorra uma forte inversão
- Também atrito dentro da camada limite:
  - a) Tempo de amortecimento por atrito: 1 dia na superfície
  - b) Profundidade da camada limite: até 700 hPa
- Outros parâmetros físicos:
  - a) Pressão superficial média = 1000 hPa,  $g = 9,8 \text{ m / s}^2$
  - b) Constantes de ar seco:  $R = 287,04 \text{ J / kg}$ ,  $cp = 1004 \text{ J / kg}$
  - c)  $A = 6,371 \times 10^6 \text{ m}$
  - e)  $\Omega = 7,292 \times 10^{-5} (\text{s}^{-1})$

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

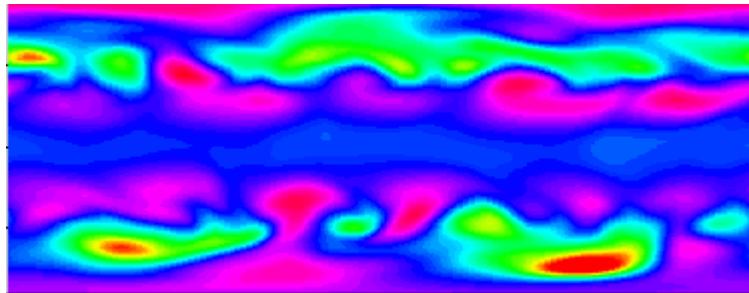
- Pressão superficial instantânea:



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

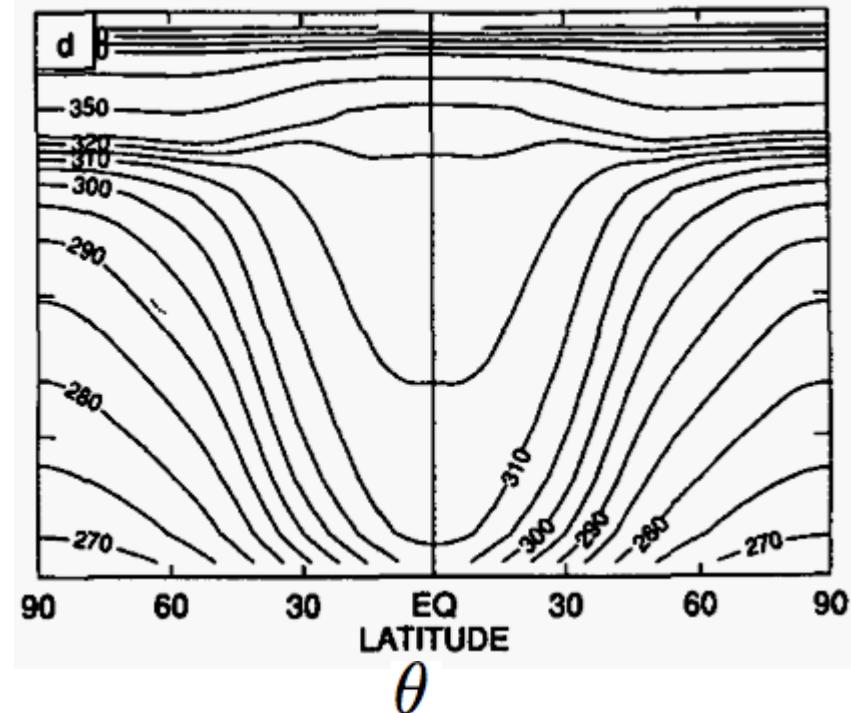
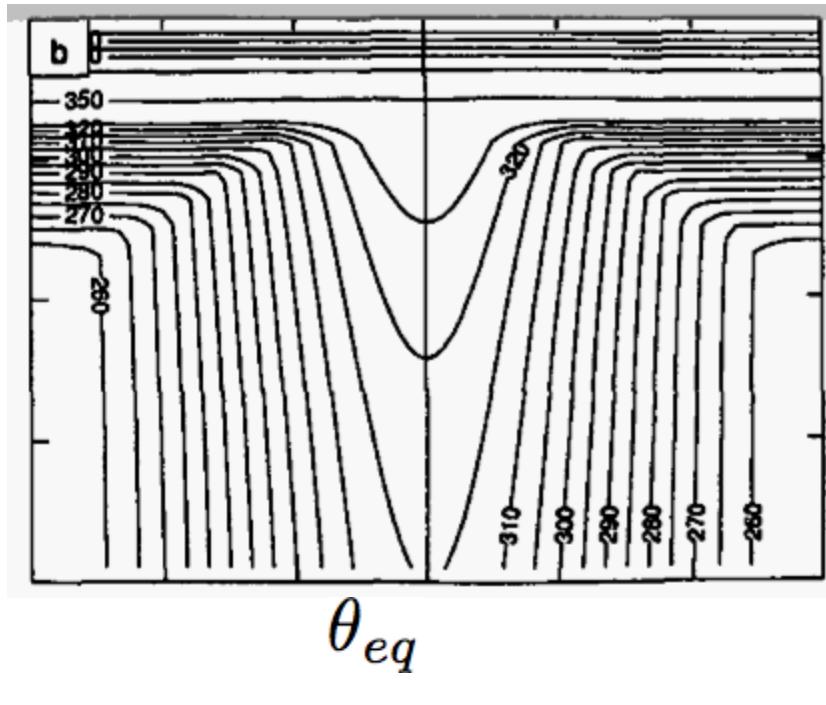
- Pressão superficial instantânea:



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

#### - climatologia de temperatura potencial



A circulação transporta o calor em direção ao pólo e para cima

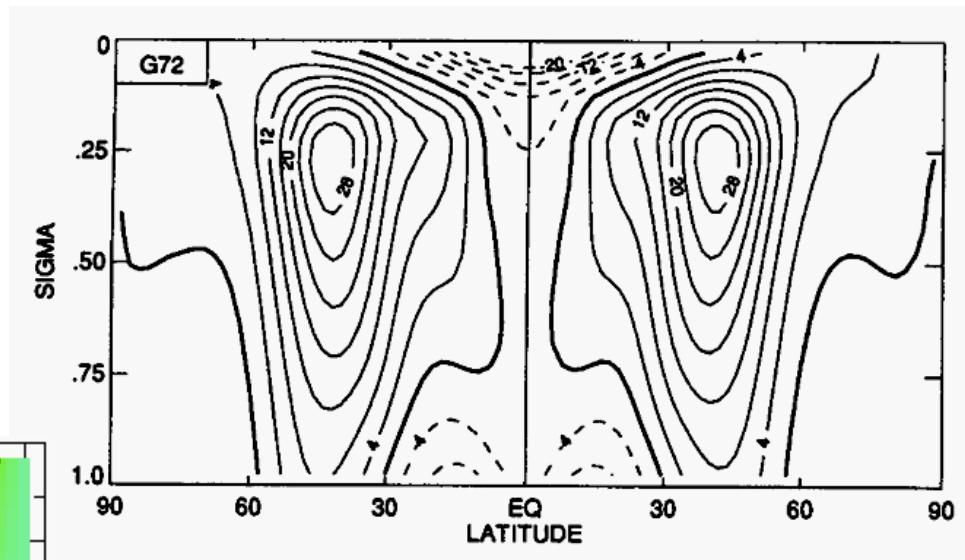
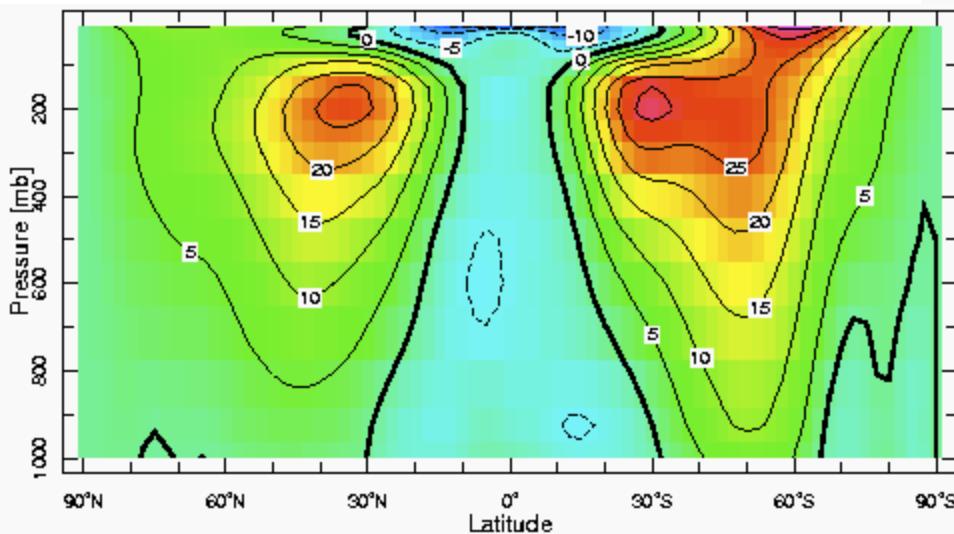
# Modelo Numérico da Atmosfera



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

- Ventos zonais versus observações:



## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **The Held-Suarez Dry GCM**

- O modelo Held-Suarez foi usado para estudar:
  - a) Modos anulares de variabilidade extratropical (Gerber e Vallis)
  - b) Sensibilidade da circulação extratropical à altura da tropopausa (Williams; Lorenz e DeWeaver)
  - c) Ventos na troposfera equatorial (Kraucunas e Hartmann)
  - e) Acoplamento estratosfera-troposfera (Reichler, Kushner e Polvani)



## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### The Held-Suarez Dry GCM

- Ventos estratosféricos mais realistas (Polvani e Kushner)
- Perfil de referência estaticamente instável + esquema de convecção (Schneider)
- Inverno austral perpétuo (Ring e Plumb)

## **Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)**

### **Held-Suarez Model**

Pontos Fortes:

- a) Formulação extremamente simples
- b) Dá circulação realista em muitos aspectos

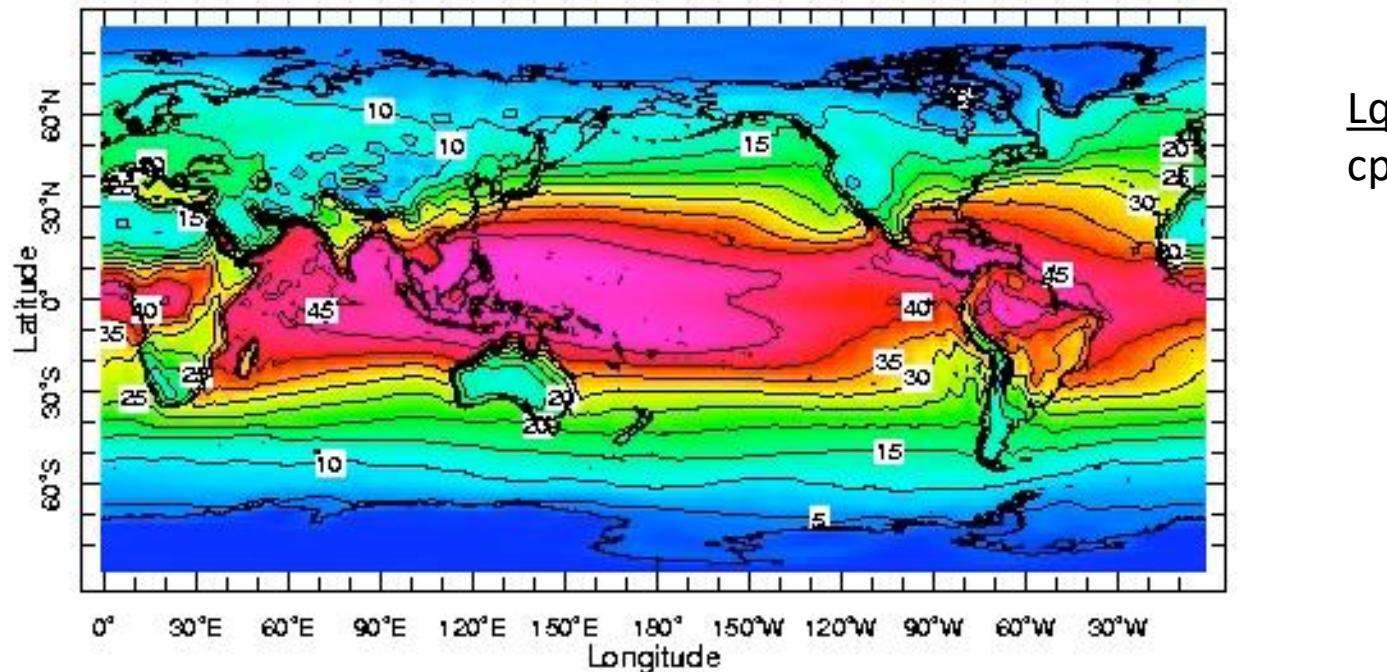
- Ponto Fracos:

- a) Sem fluxos de superfície, sem possibilidade de contraste terra-mar
- b) Não diz nada sobre precipitação, nuvens, gelo, etc.
- c) Não há aquecimento por baixo como a atmosfera real
- d) Trópicos são muito calmos
- e) Os processos diabáticos são fracos
- f) Os vórtices baroclínicos tendem a fazer tudo

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Introduction to Moisture in the Atmosphere

- Umidade específica da superfície, medida em Kelvin:

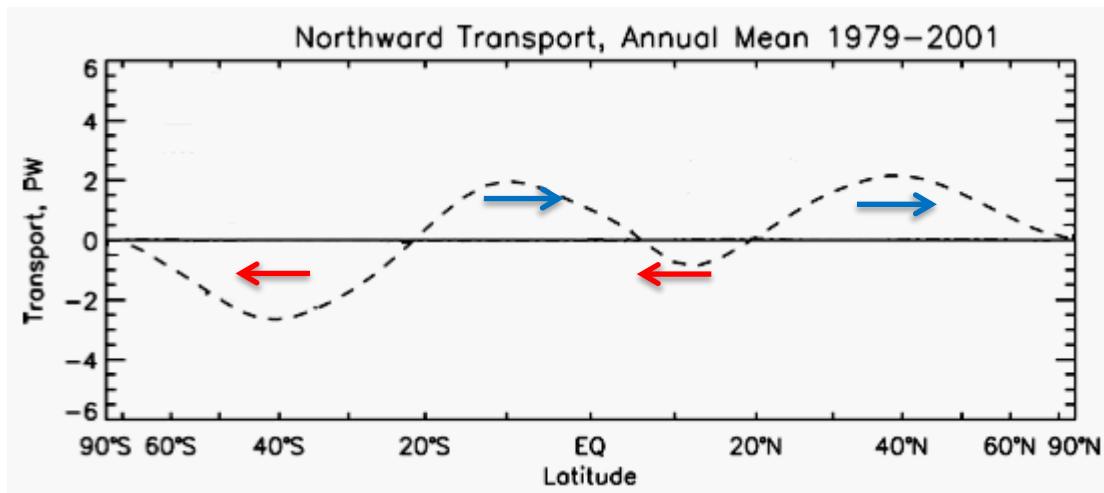


2 m\_above\_gnd

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Introduction to Moisture in the Atmosphere

- Fluxo de umidade na atmosfera:

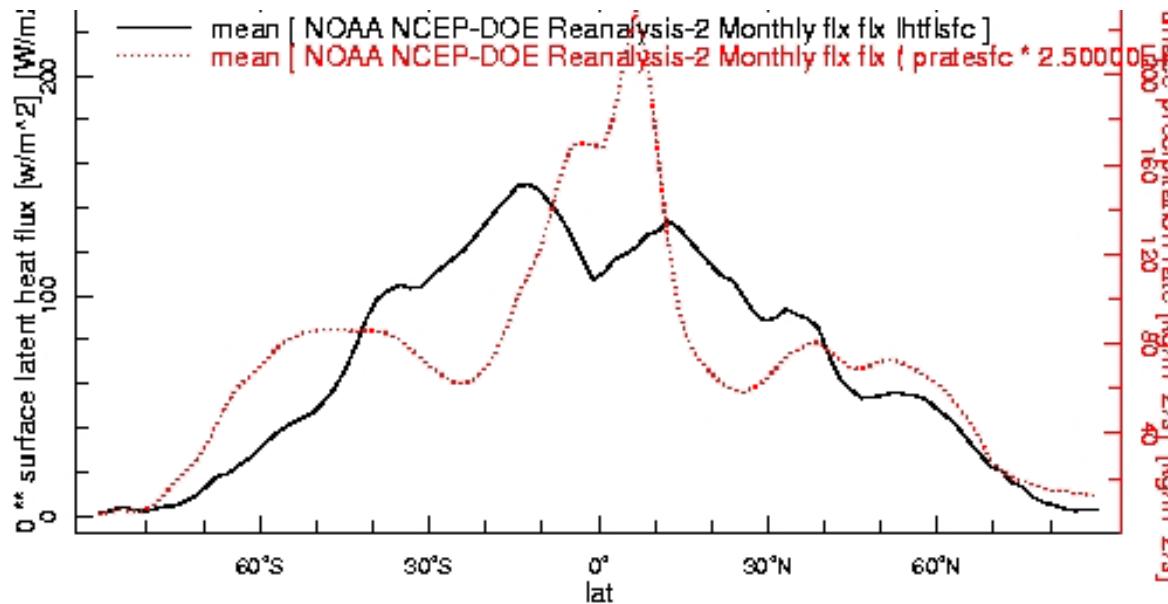


- a) Fluxo de umidade em direção ao Equador nos trópicos
- b) Fluxo de umidade no pólo em latitudes médias

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Introduction to Moisture in the Atmosphere

- Precipitação e evaporação:

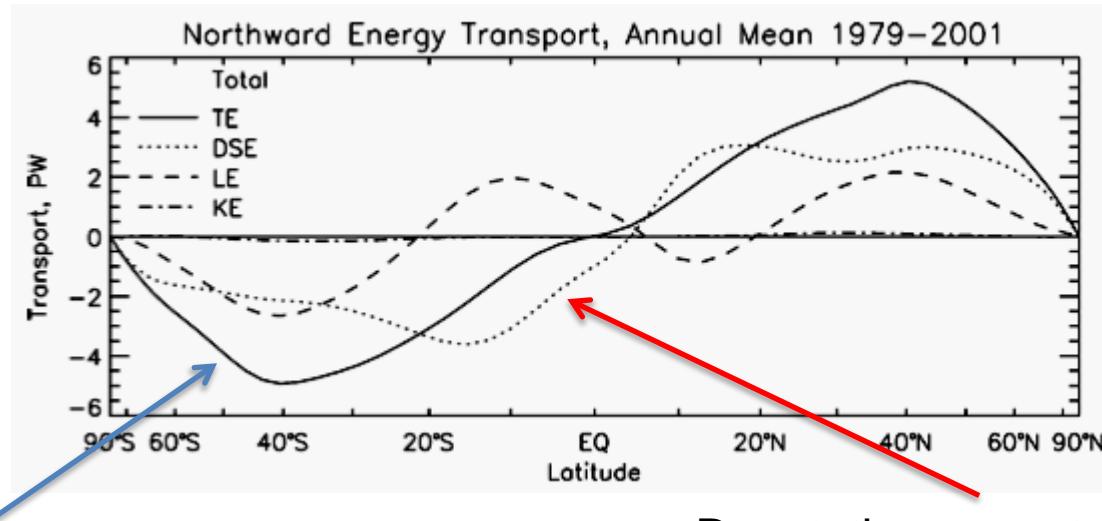


Fonte: Trenberth e Stepaniak (2003)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Introduction to Moisture in the Atmosphere

- Precipitação e evaporação:
- Efeito da umidade nos transportes de energia:
  - a) Comparação com fluxo seco:



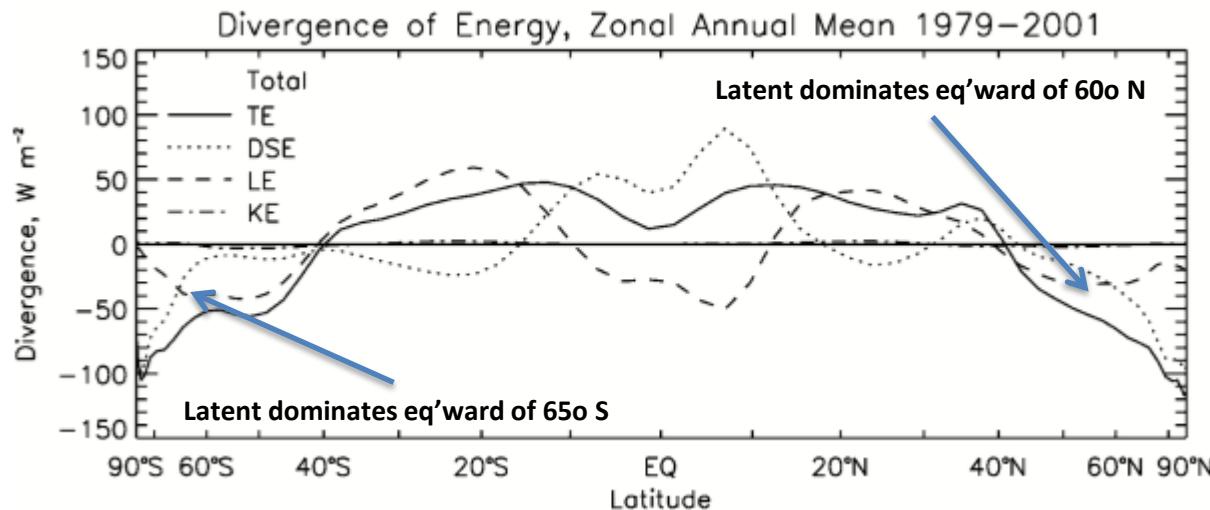
Total transport

Dry static energy transport

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

## Introduction to Moisture in the Atmosphere

- Componentes de divergência do transporte de energia:



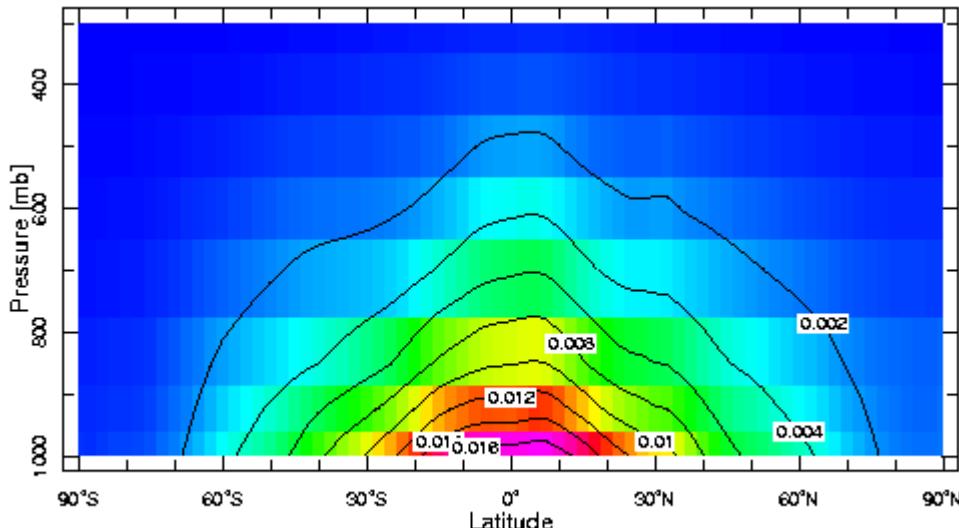
- a) Divergência de umidade domina
- b) E em todas as latitudes médias seca

Fonte: Trenberth e Stepaniak (2003)

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Introduction to Moisture in the Atmosphere

- A umidade está concentrada nos **níveis mais baixos** da atmosfera
  - a) A atmosfera superior é **muito fria** para reter muito vapor de água
- O **congelamento** também está associado à **liberação de calor latente**
  - a) É uma fonte de calor significativamente menor:
    - ÷ Calor latente de vaporização:  $2,5 \times 10^6 \text{ J / kg}$
    - ÷ Calor latente de fusão:  $3,3 \times 10^5 \text{ J / kg}$



Teor de umidade médio zonal

## Primeiro: Modelos de Circulação Geral (GCMs)

### Vapor de água e aquecimento global

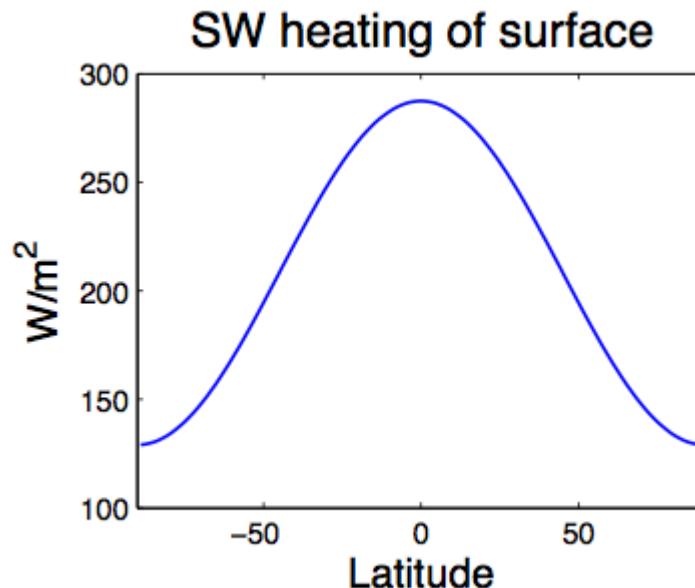
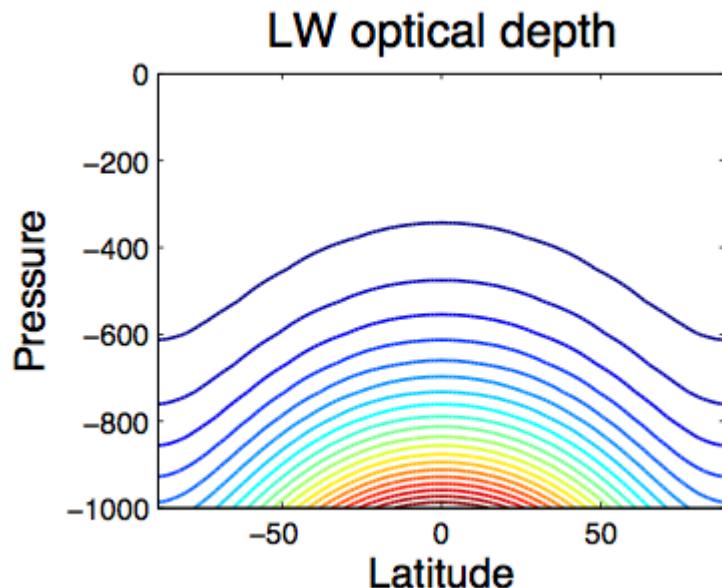
- Com o aquecimento global, o teor de umidade na atmosférica aumentará
  - a) com aumento de temperatura global de **3 K** a **umidade aumentará 20%**
- Que efeitos o aumento do teor de umidade terá na circulação geral da atmosfera?
  - a) **Motivação** para desenvolver um GCM úmido **simplificado**

## GRaM: An Idealized Moist GCM

- Cinza Radiação Úmida GCM
  - a) A maioria dos GCMs tem uma tonelada de métrica física, mas você pode fazer um longo caminho com apenas um GRaM!
- Equações primitivas
- Transferência radiativa cinza
  - a)Vapor de água, nuvem e outros feedbacks radiativos **suprimidos**
  - b)Fluxos radiativos apenas em função da temperatura
- Superfície do **Aquaplanet** (Terra coberta pelo oceano)
  - a) Slab mixed layer
  - b)Zonalmente simétrico
- Fluxos de superfície Monin-Obukhov **simplificados**
- Esquema da camada limite **do perfil K**
- Esquemas de convecção simples
  - a) Condensação em escala de grade ou esquema de Betts-Miller simplificado  
Veja Frierson, Held & Zurita-Gotor 2006 para detalhes

## Gray radiation

- Fluxos ascendentes e descendentes
- Profundidades ópticas prescritas para radiação de onda longa
  - a) Projetado para se parecer com vapor de água
- Perfil de radiação de onda curta idealizado
  - b) Com base no perfil idealizado (polinômio de Legendre)
  - c) Todo o SW vai para a superfície (na versão mais simples de configuração)



## Slab mixed layer ocean

- Especifica uma **capacidade de calor e resolve a equação de energia**
  - a) A capacidade de calor é sempre equivalente a uma profundidade de água (por exemplo,  $2,5 \times 10^7 \text{ J/m}^2/\text{K}$  é equivalente a 60 m)
- Uma boa alternativa para o SST fixo
  - a) A **SST fixa não respeita a conservação de energia**
    - ÷ Por exemplo, ventos de superfície mais rápidos causam mais evaporação, mas a superfície não esfria em resposta
- Vieses de SST podem se desenvolver (obviamente)
  - a) Q-flux: um fluxo de calor de superfície prescrito projetado para simular a divergência de transporte de calor do oceano
    - ÷ Também usado para corrigir tendências de modelo na prática