

Modelagem Numérica da Atmosfera – Parte 1

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

Henrique M. J. Barbosa
Instituto de Física – USP
hbarbosa@if.usp.br



Aulas de modelagem

- Aula 1

- Visão geral sobre meteorologia, climatologia e modelos numérico, de climáticos até CRM

- Equações básicas da atmosfera. Diferenças finitas. Teorema de Nyquist. Média de Reynolds. Convergência e estabilidade de soluções numéricas. Etc....

- Aula 2

- A parametrização de convecção. Equações de fluxo de massa. Entrainment/Detrainment. Tipos de fechamentos. Hipóteses para modelar convecção. Métodos numéricos para solução da equação de fluxo de massa.

História da Meteorologia

Previsões começaram baseadas na observação de padrões repetitivos:

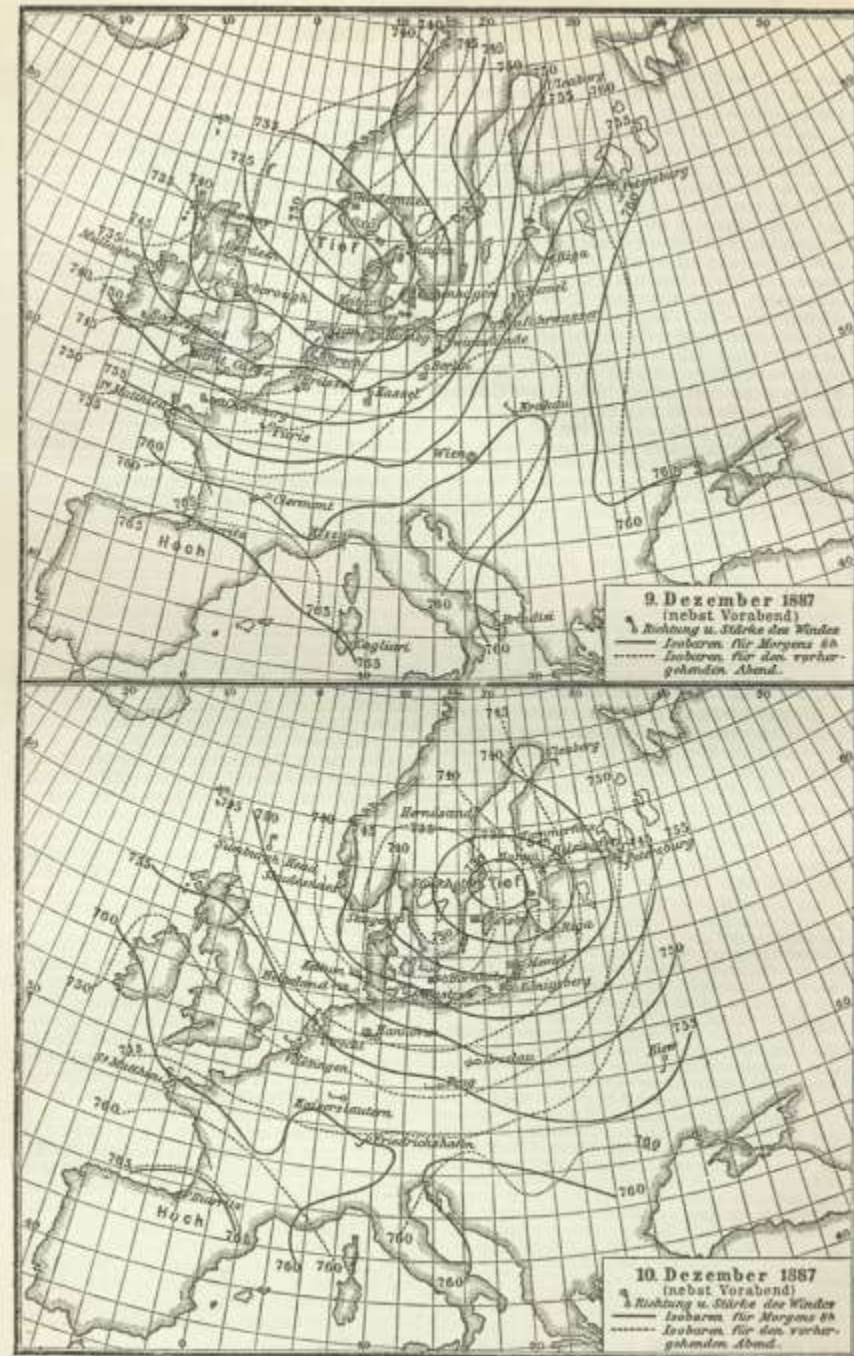
- Em 650 AC os babilônios previam o tempo a partir do padrão de nuvens e da posição dos astros
- Em 340 AC, Aristóteles descreveu uma série de situações meteorológicas no livro *Meteorológica*
- Desde pelo menos 300 AC que os chineses faziam algum tipo de previsão de tempo

Let us now explain lightning and thunder, and then whirlwinds, firewinds and thunderbolts; for the cause of all of them must be assumed to be the same. As we have said, there are two kinds of exhalation, moist and dry; and their combination (air) contains both potentially. It condenses into cloud, as we have explained before, and the condensation of clouds is thicker toward their farther limit. Heat when radiated disperses into the upper region. But any of the dry exhalation that gets trapped when the air is in process of cooling is forcibly ejected as the clouds condense and in its course strikes the surrounding clouds, and the noise caused by the impact is what we call thunder. – **Aristoteles Meteorologica**

História da Meteorologia

- 1400's
 - Hygrometer - Cryfts (1450)
 - Anemometer - Alberti (1450)
- 1500's
 - Thermoscope - Galileo
- 1600's
 - Barometer - Torricelli (1643)
 - Les Meteores - Descarte (1637)
- 1700's
 - Trade winds - Hadley (1730)
- 1800's
 - Three-cell model - Ferrel (1855)
 - Weather maps of surface pressure
- 1900's
 - Weather prediction from maps - Bjerknes (1903)
 - Polar front theory - Bjerknes (1921)
 - Numerical weather prediction - Richardson (1922)
 - First computer forecast - Charney / von Neumann (1948)
 - Daily balloon observations (1940's)
 - Weather satellites (Tiros I, 1960)

Previsão para a Europa 9 e 10 de dezembro de 1887

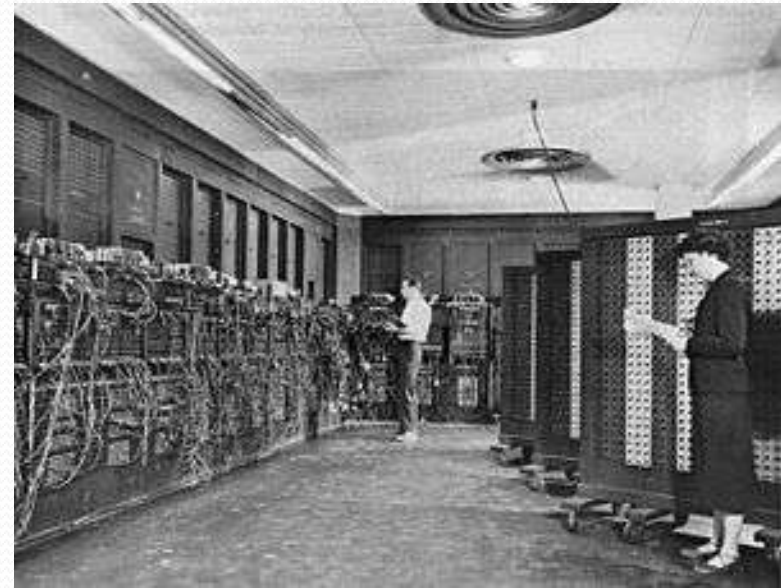


Wetterkarten vom 9 und 10. Dez. 1887 (Zust. Ge. Schmidt)

Previsão Numérica de Tempo

- Durante a 2ª guerra, os EUA financiaram a construção do primeiro computador (em segredo)
- Em 1946 o ENIAC foi apresentado ao mundo
- Em 1950, Charney, von Neumann e outros cientistas usaram o ENIAC para fazer a 1ª previsão numérica de tempo
- A partir de 1955 as previsões de tempo tornaram-se sistemáticas

Mas o que é um modelo numérico?
Como a atmosfera funciona??



O Sol é a nossa fonte de energia



Sem o Sol, a temperatura na
Terra seria 2.7K ou -270°C

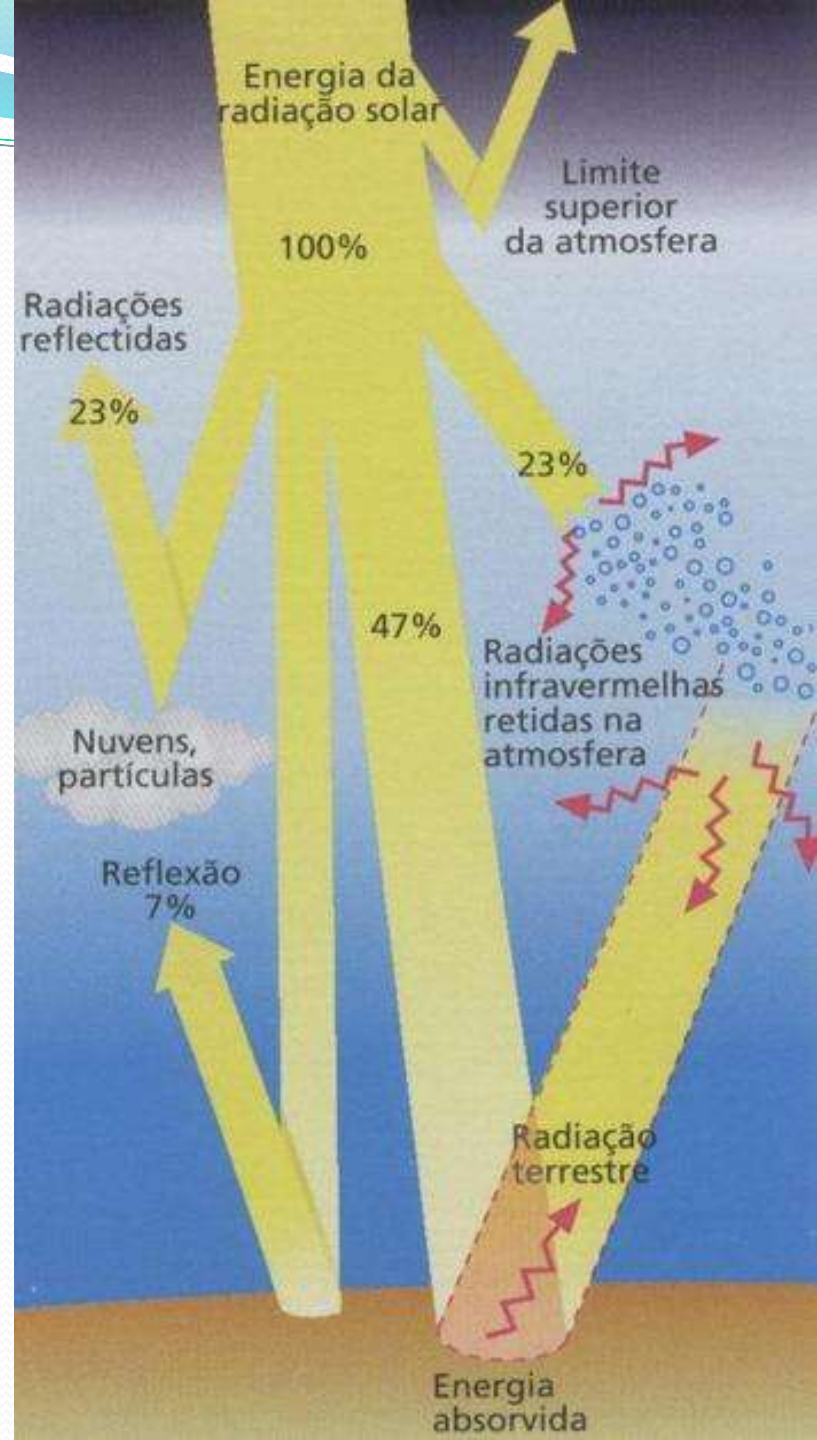
SOHO (ESA and NASA)

Radiação Solar

- A energia do sol vem na forma de radiação eletromagnética
 - Ultra-violeta
 - Visível
 - Infra-vermelho

A energia é repartida:

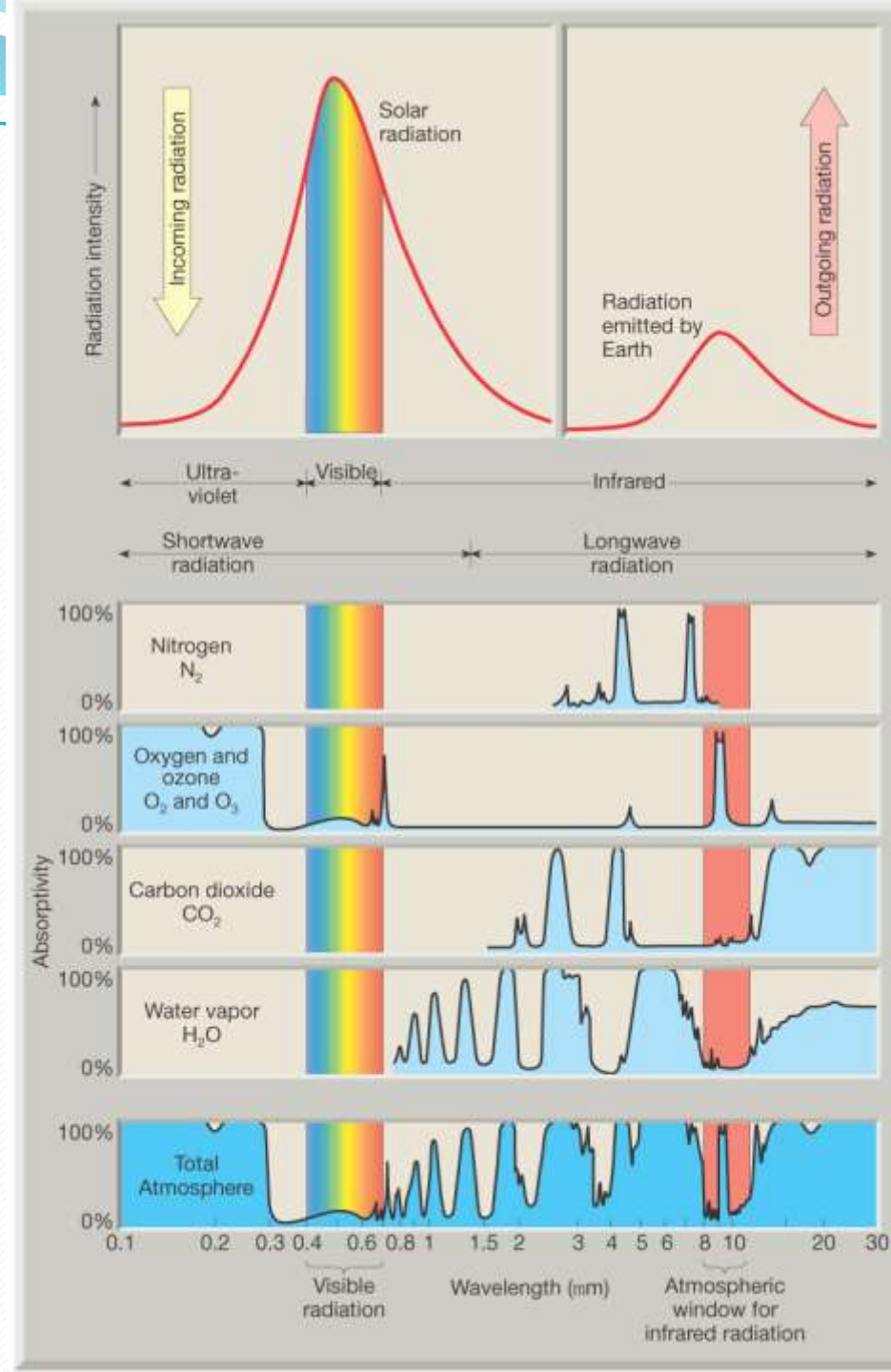
- 30% é refletida pelas nuvens, pela atmosfera ou pela superfície e volta para o espaço
- 50% atravessa a atmosfera e é absorvida na superfície
- 20% é absorvida na atmosfera pelos gases e nuvens



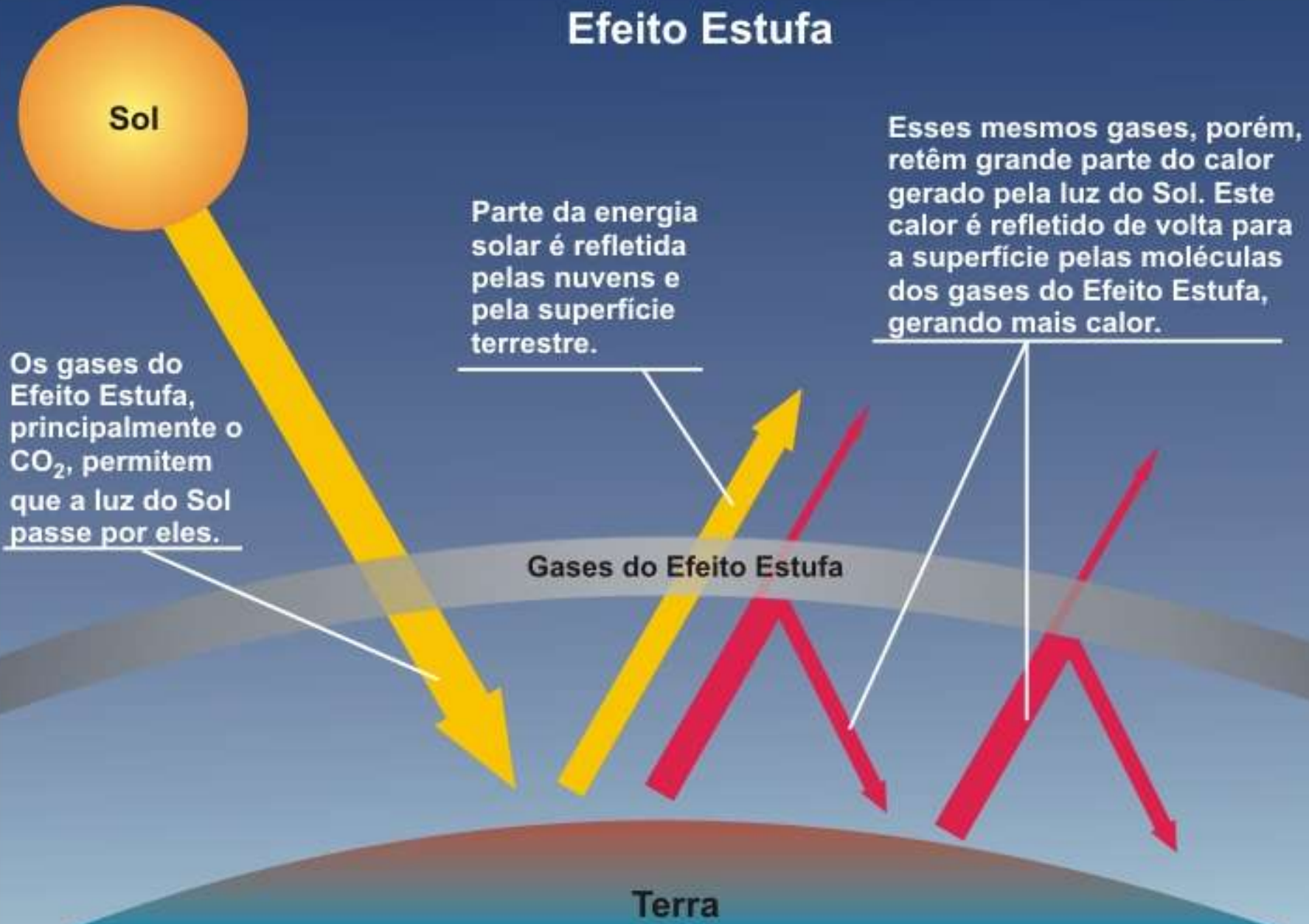
Efeito Estufa

A superfície aquecida perde energia na forma de calor, mas:

- Os gases do efeito estufa:
 - Transparentes para a radiação do Sol
 - Opacos para a radiação (calor) emitido pela Terra
- Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de apenas -18°C
- Com o efeito estufa, ela fica em torno de $+15^{\circ}\text{C}$



Efeito Estufa



Sol

Os gases do Efeito Estufa, principalmente o CO₂, permitem que a luz do Sol passe por eles.

Parte da energia solar é refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre.

Gases do Efeito Estufa

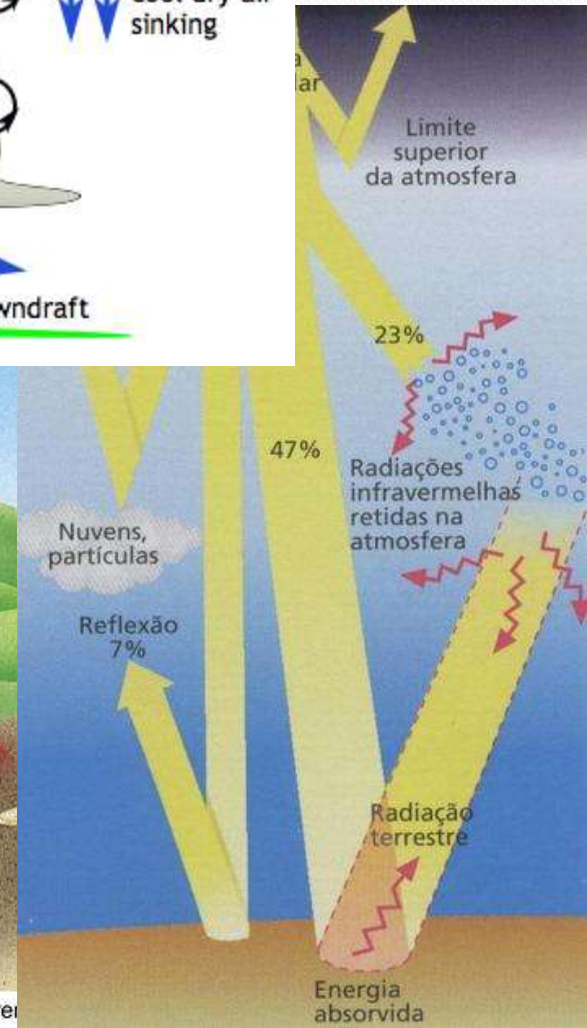
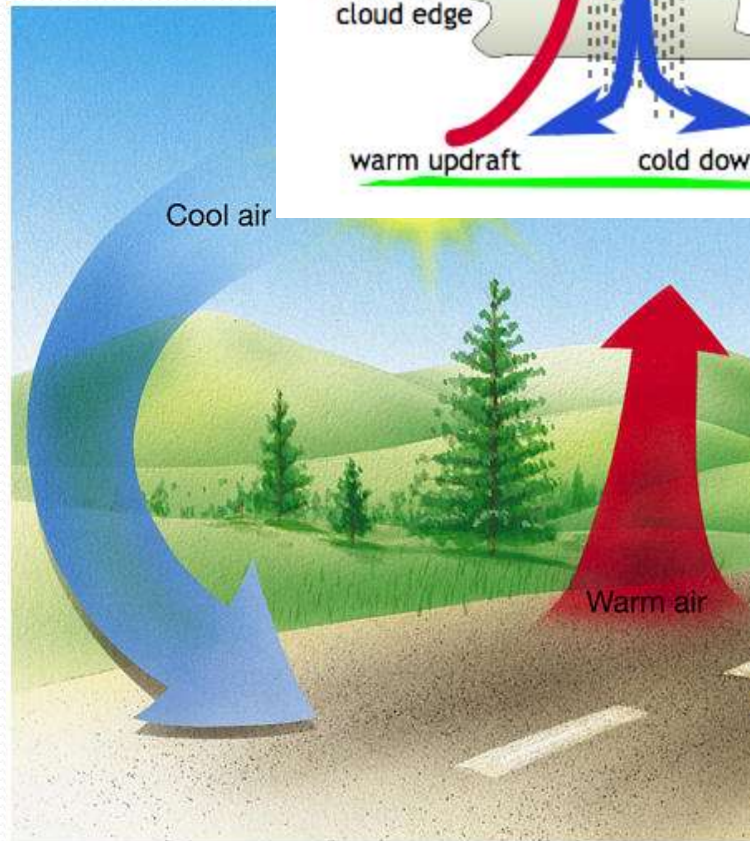
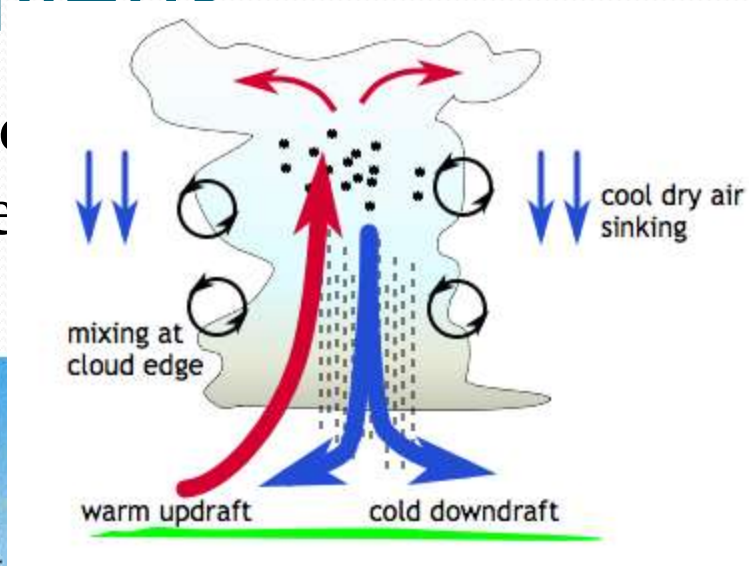
Terra

Esses mesmos gases, porém, retêm grande parte do calor gerado pela luz do Sol. Este calor é refletido de volta para a superfície pelas moléculas dos gases do Efeito Estufa, gerando mais calor.

Convecção e Nuvens

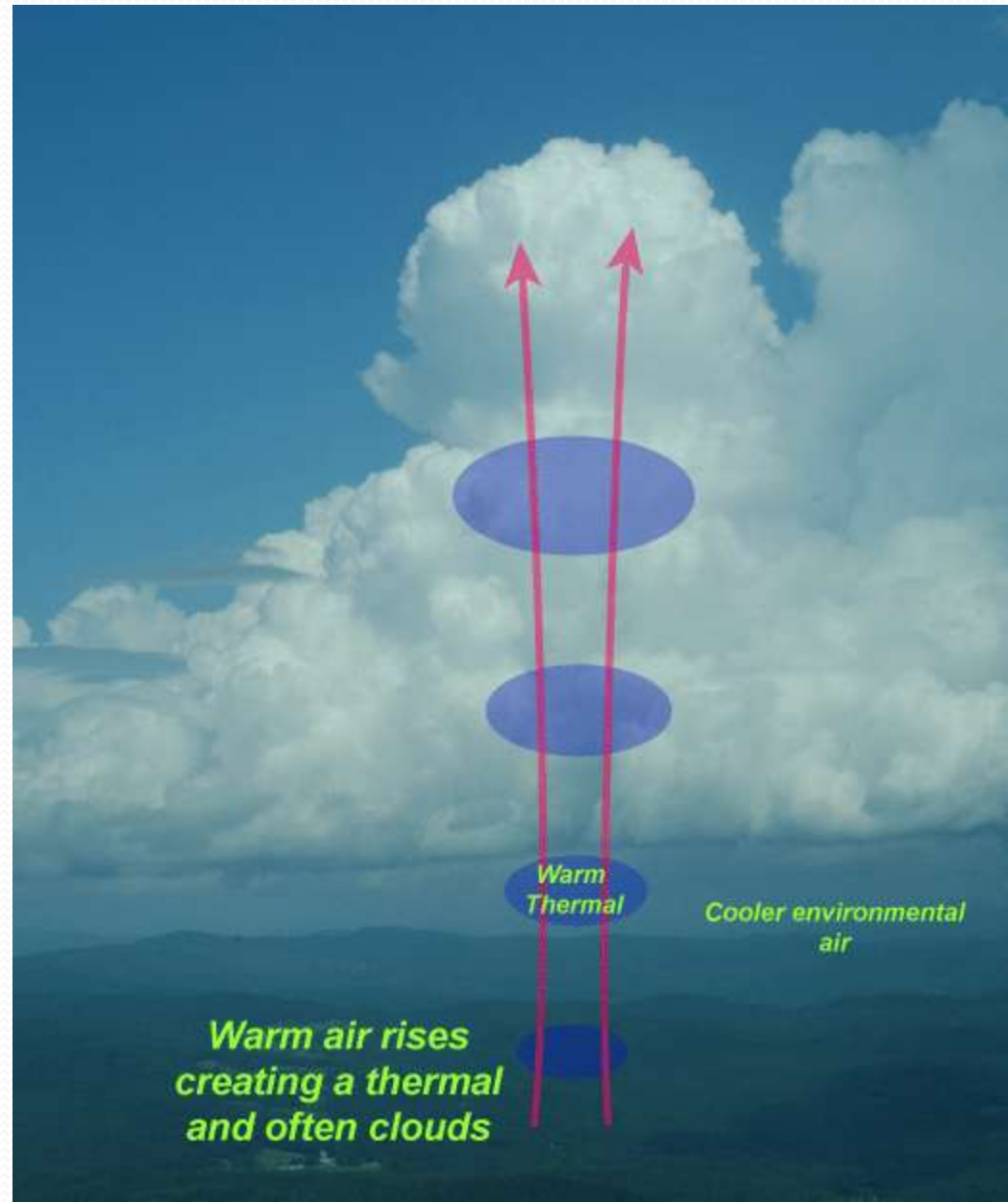
- Como a maior parte da energia solar na superfície, estamos e a atmosfera por baixo!

O ar quente é menos denso e sobe, pois o ar frio que está em cima é mais pesado.

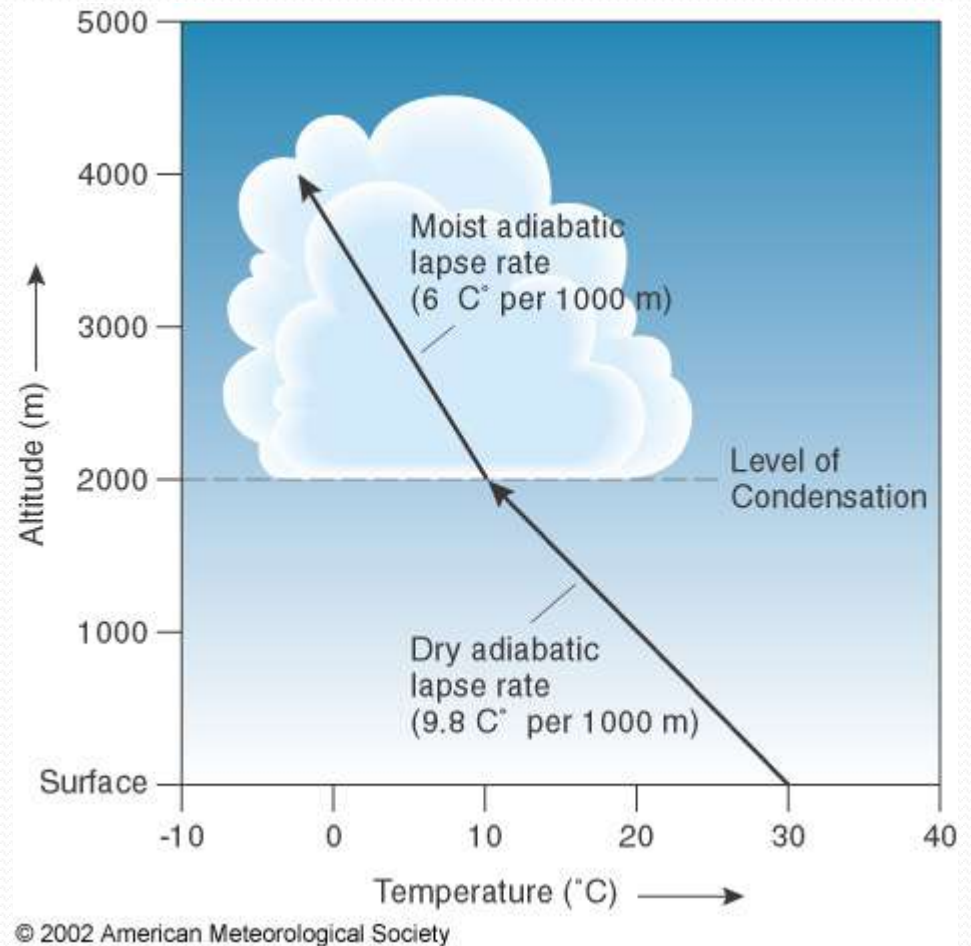
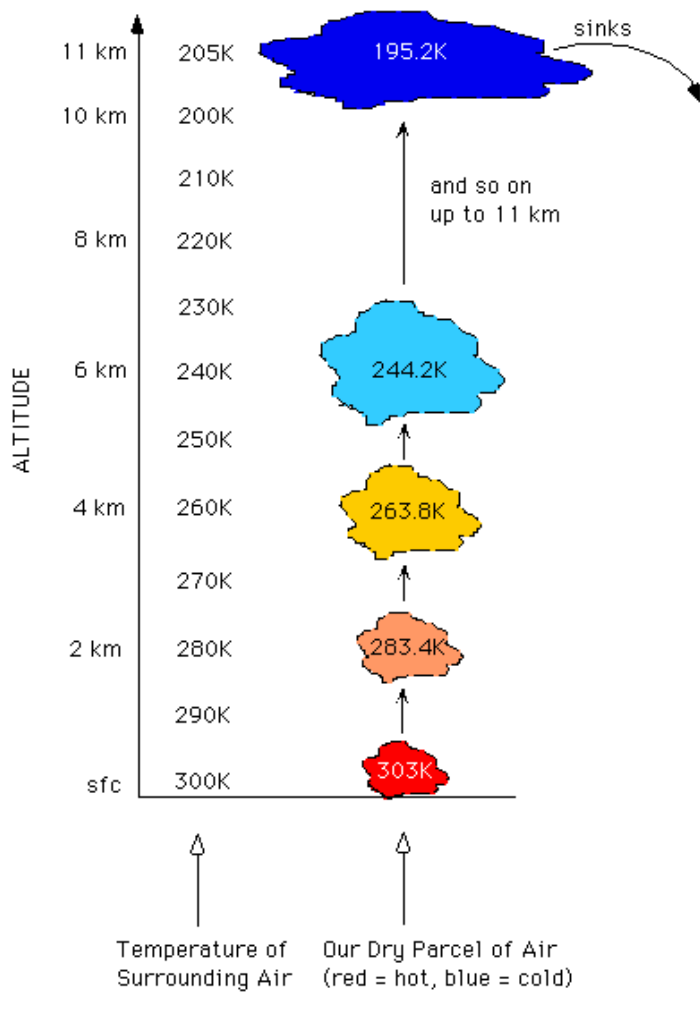


Nuvem

- A temperatura e a pressão diminuem com a altitude
- A medida que o ar quente e úmido superficial sobe, ele se expande e esfria
- A partir de um certo ponto o vapor condensa formando gotas e a nuvem

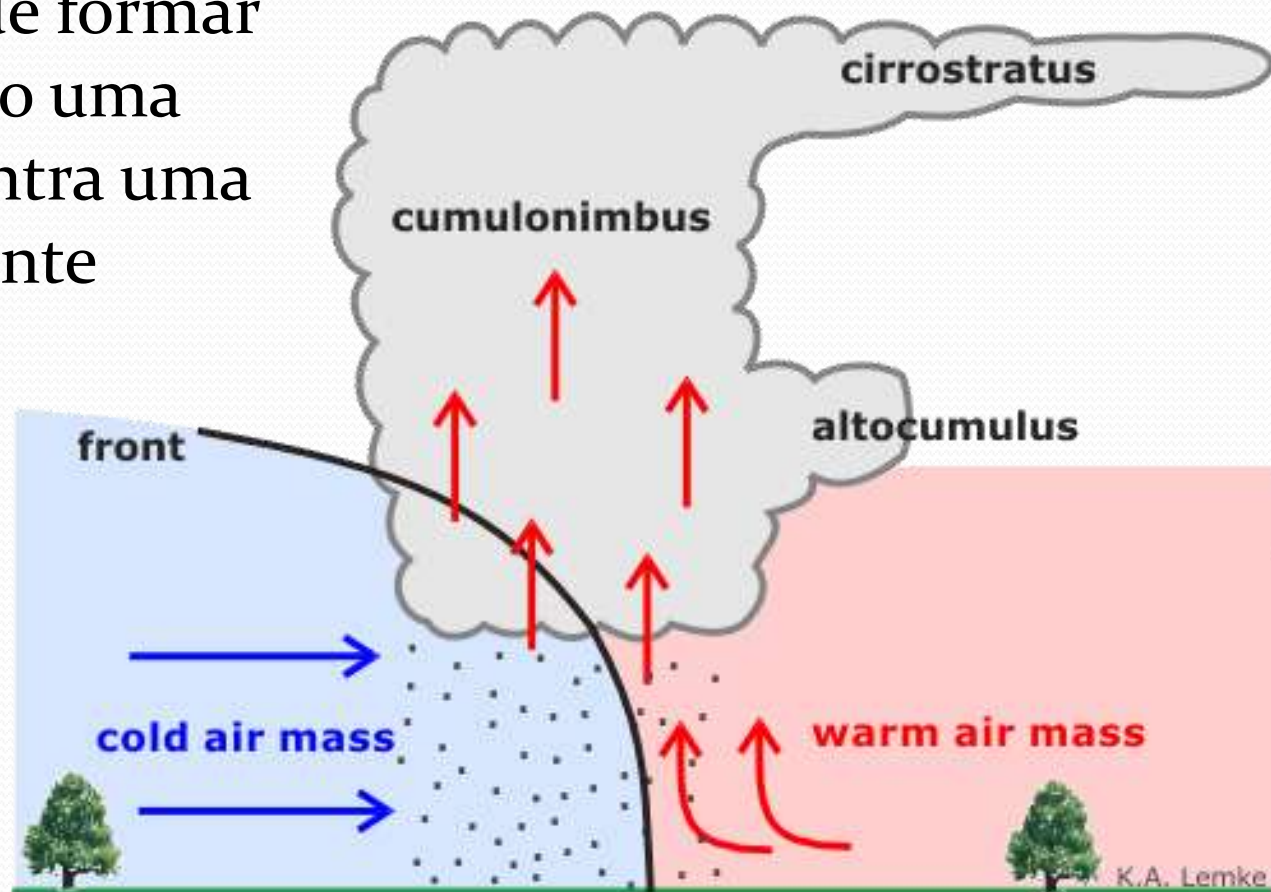


Modelo Simples



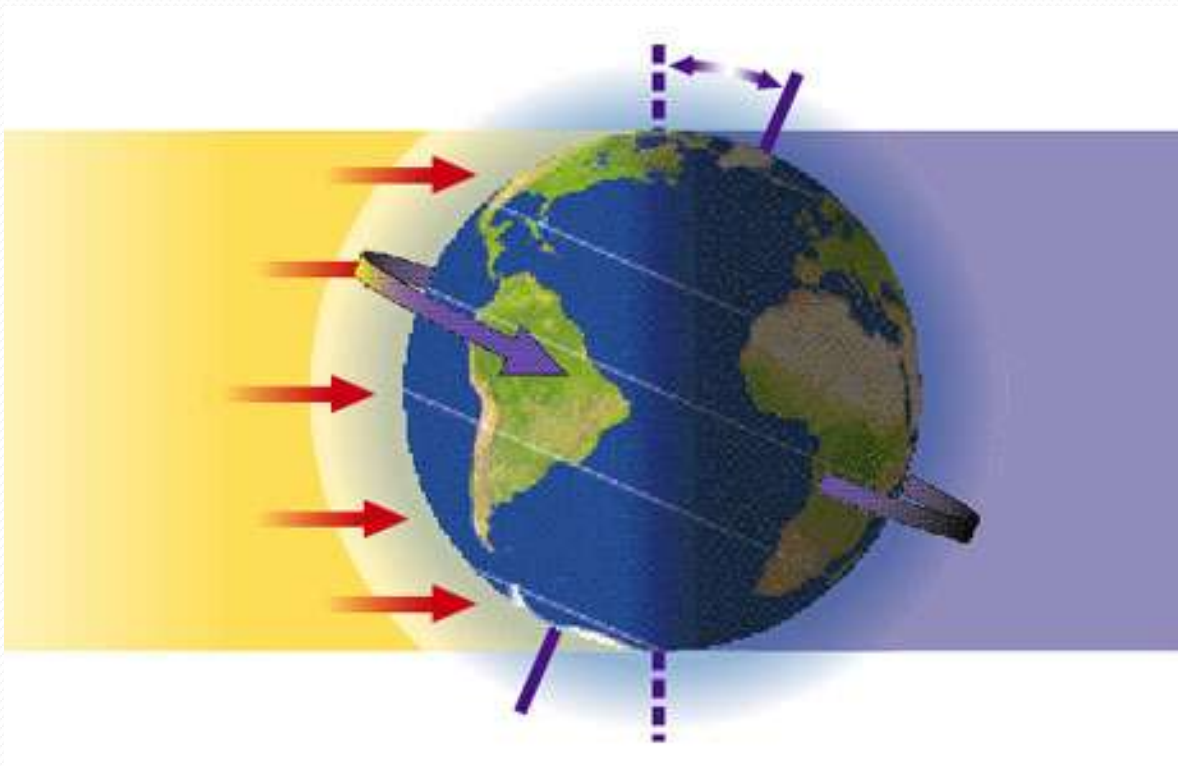
Nuvens e Frentes

- Uma outra maneira muito comum de formar nuvens é quando uma frente fria encontra uma massa de ar quente



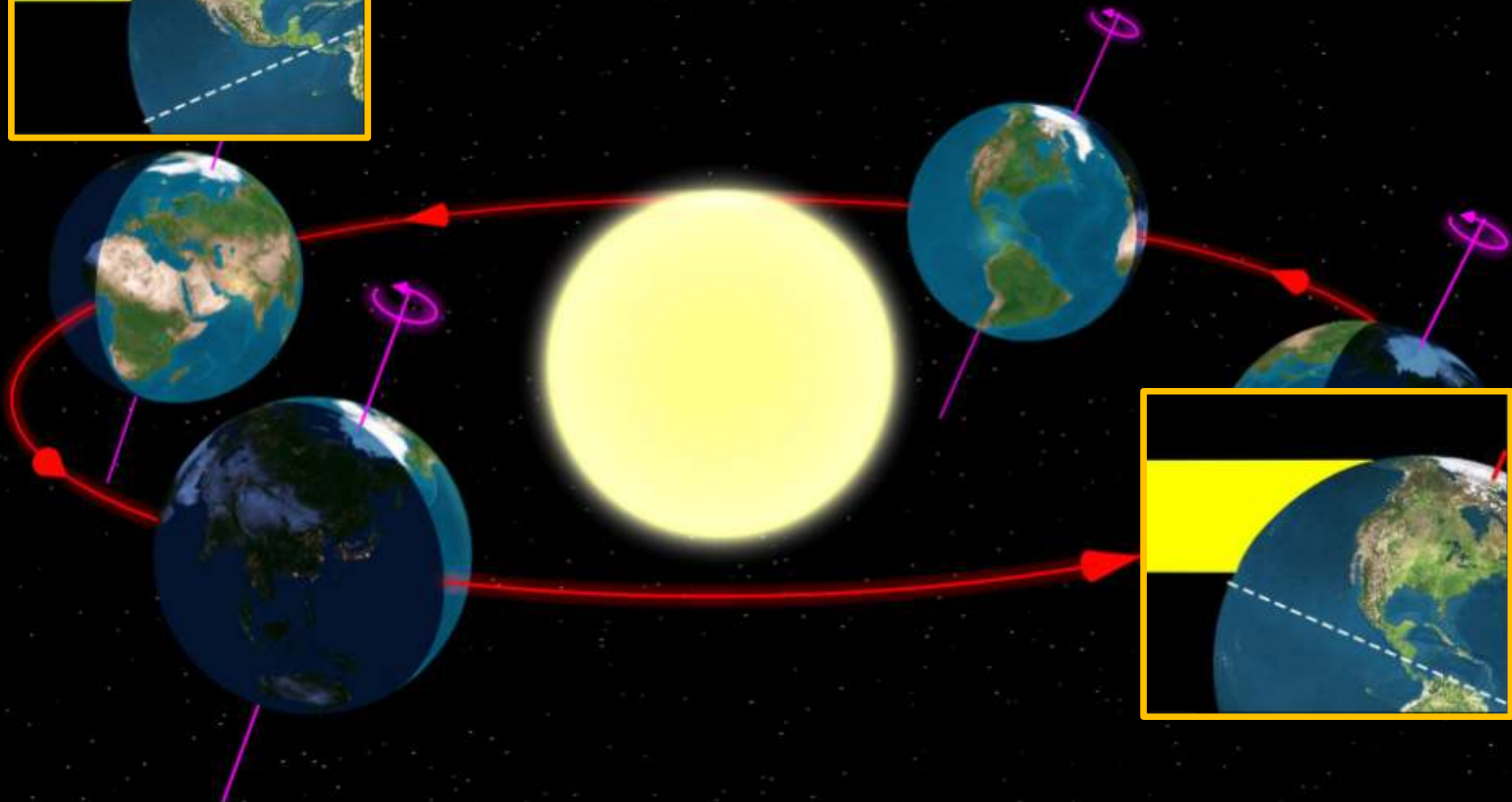
Dia e Noite

- A energia que recebemos do Sol também não é distribuída igualmente pela superfície do planeta!
 - Giro em torno do próprio eixo => dia e noite

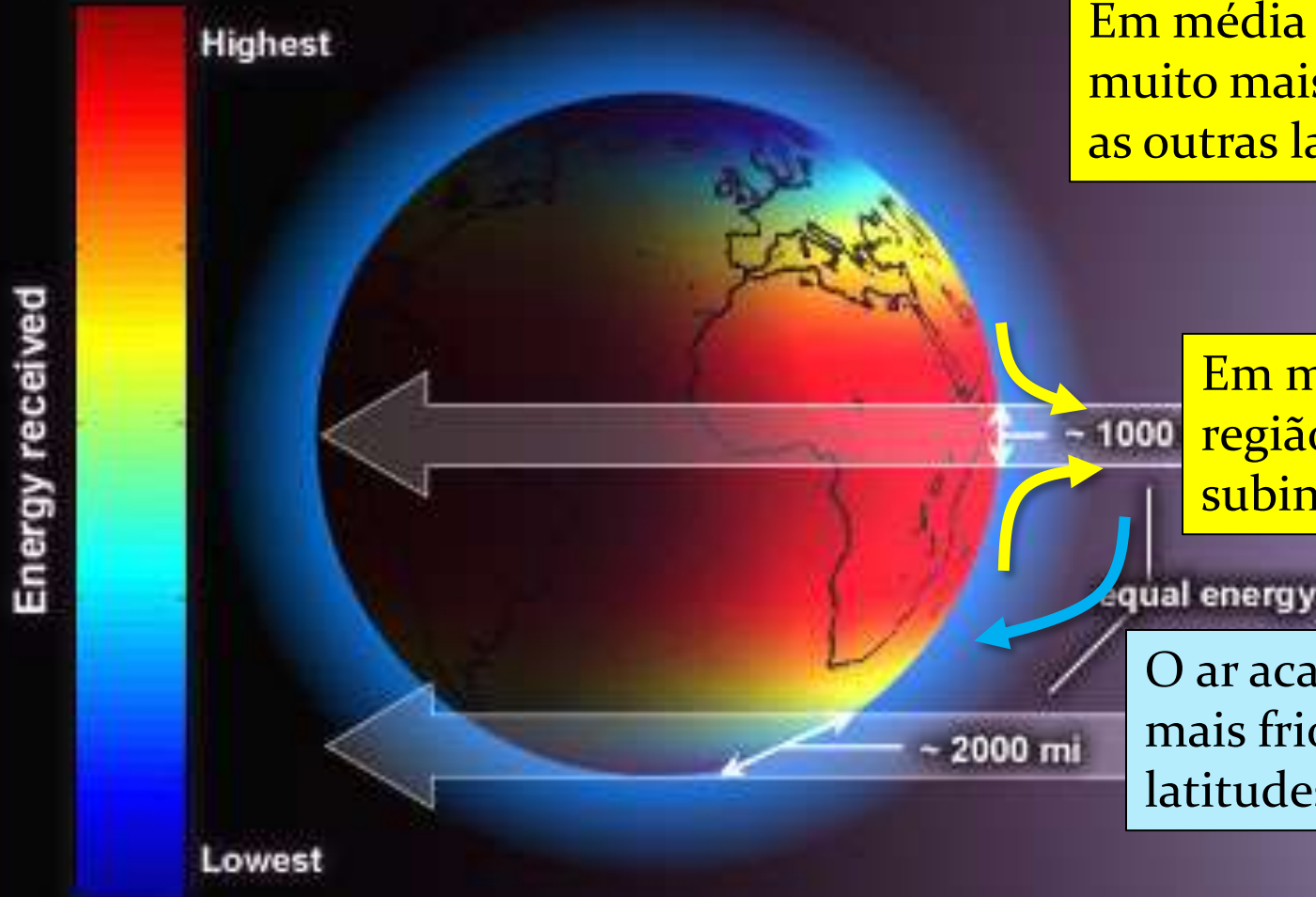


Além disso, como o eixo da Terra é inclinado e ela gira em torno do sol existem as estações do ano!

Estações do ano



Mean Annual Global Insolation



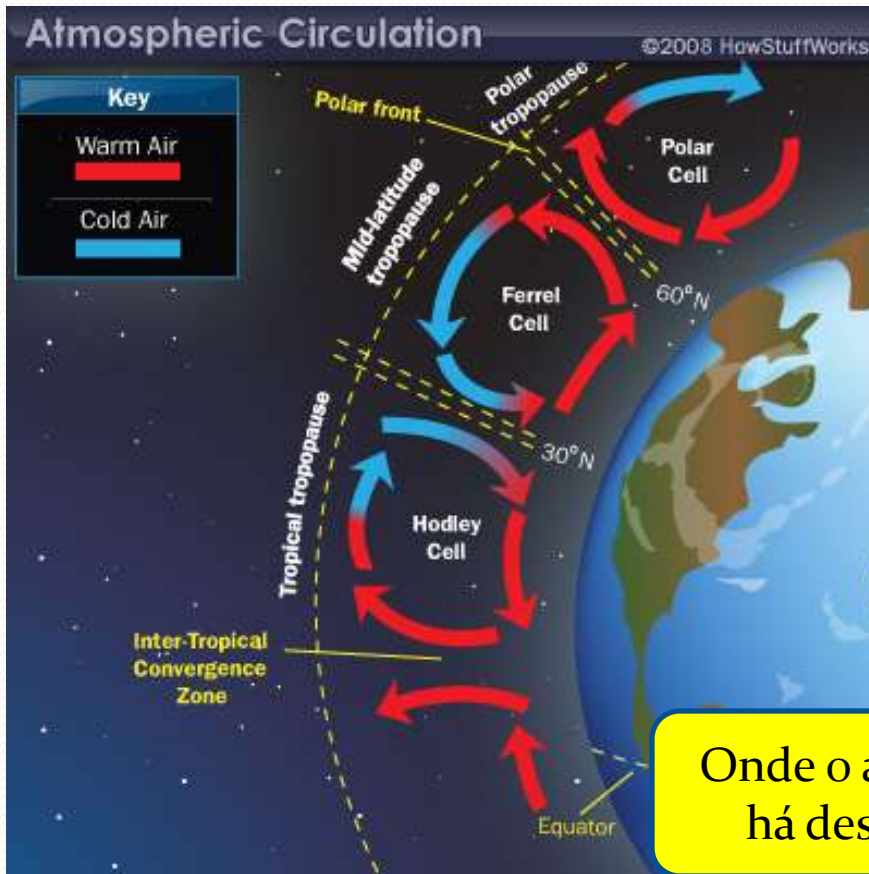
Em média o equador recebe muito mais energia do que as outras latitudes!

Em média o ar nessa região está sempre subindo!

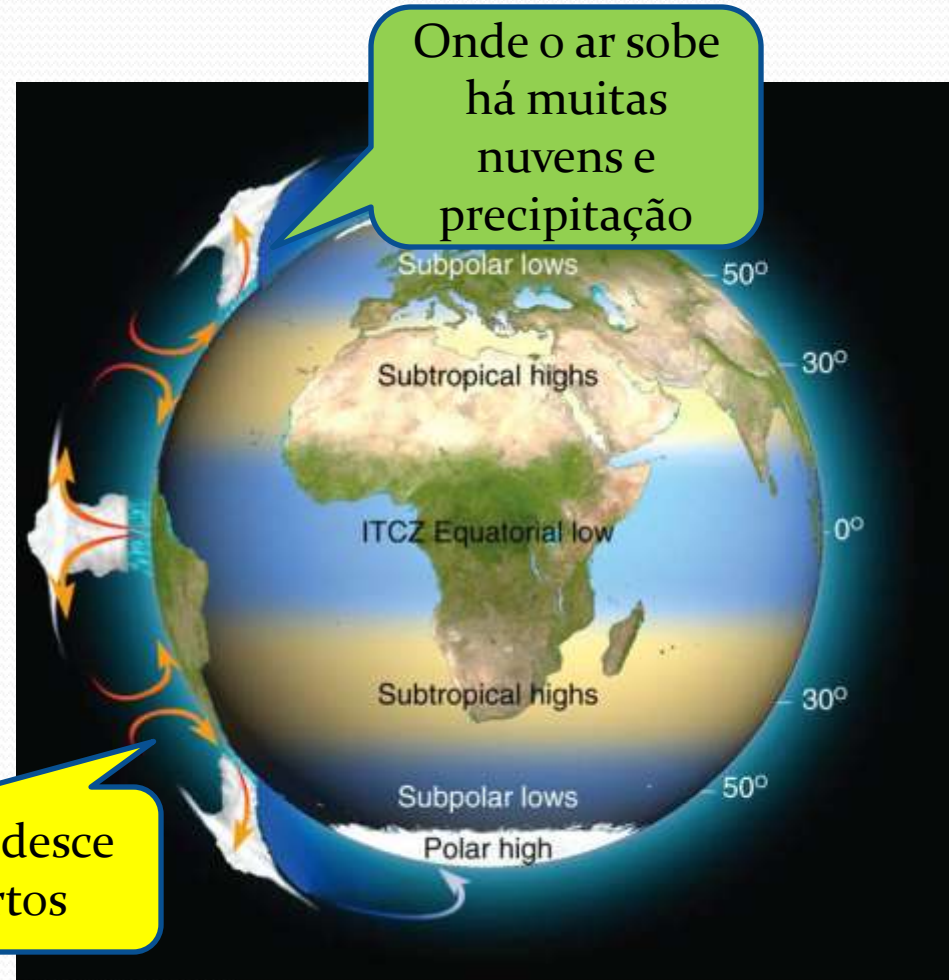
O ar acaba descendo mais frio em latitudes mais altas



Circulação de grande escala



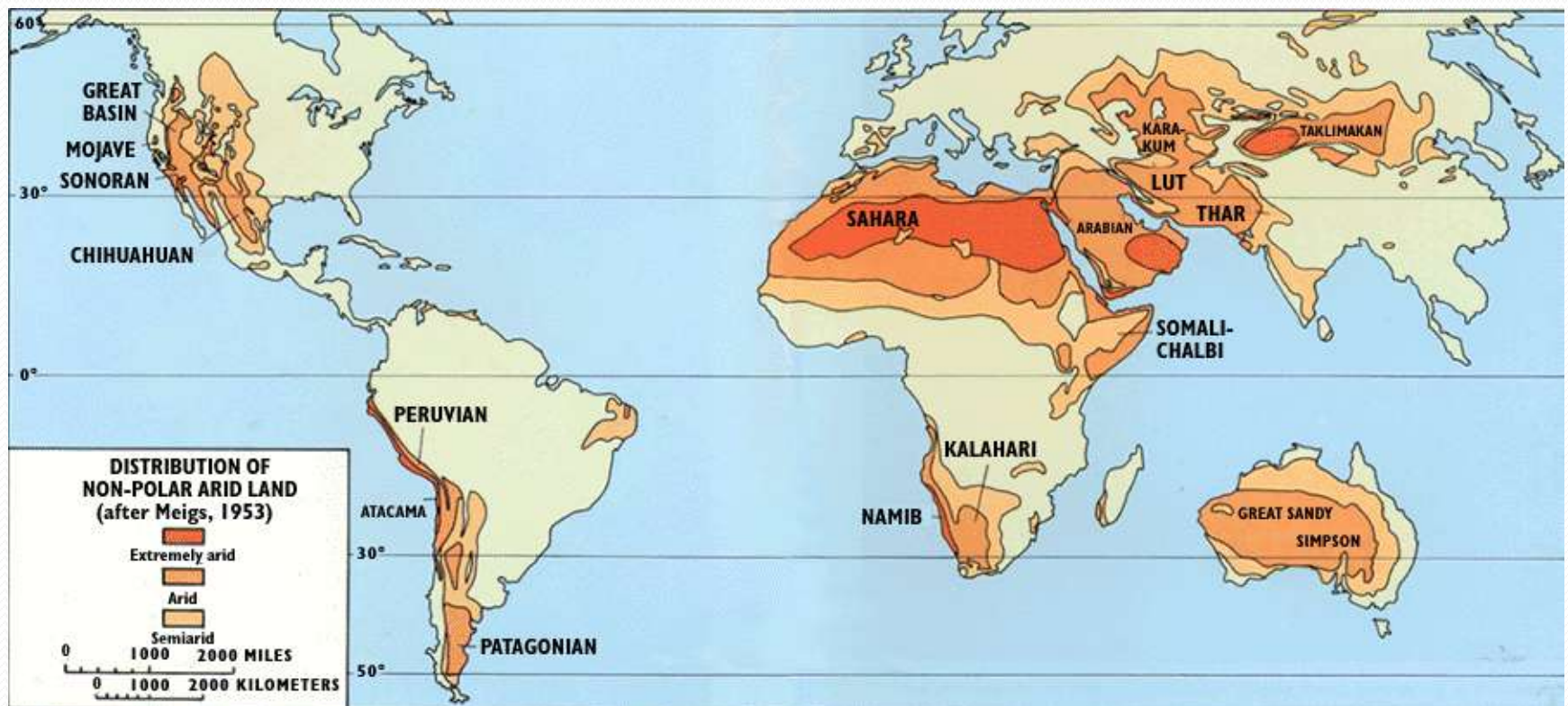
Onde o ar desce
há desertos



Onde o ar sobe
há muitas
nuvens e
precipitação

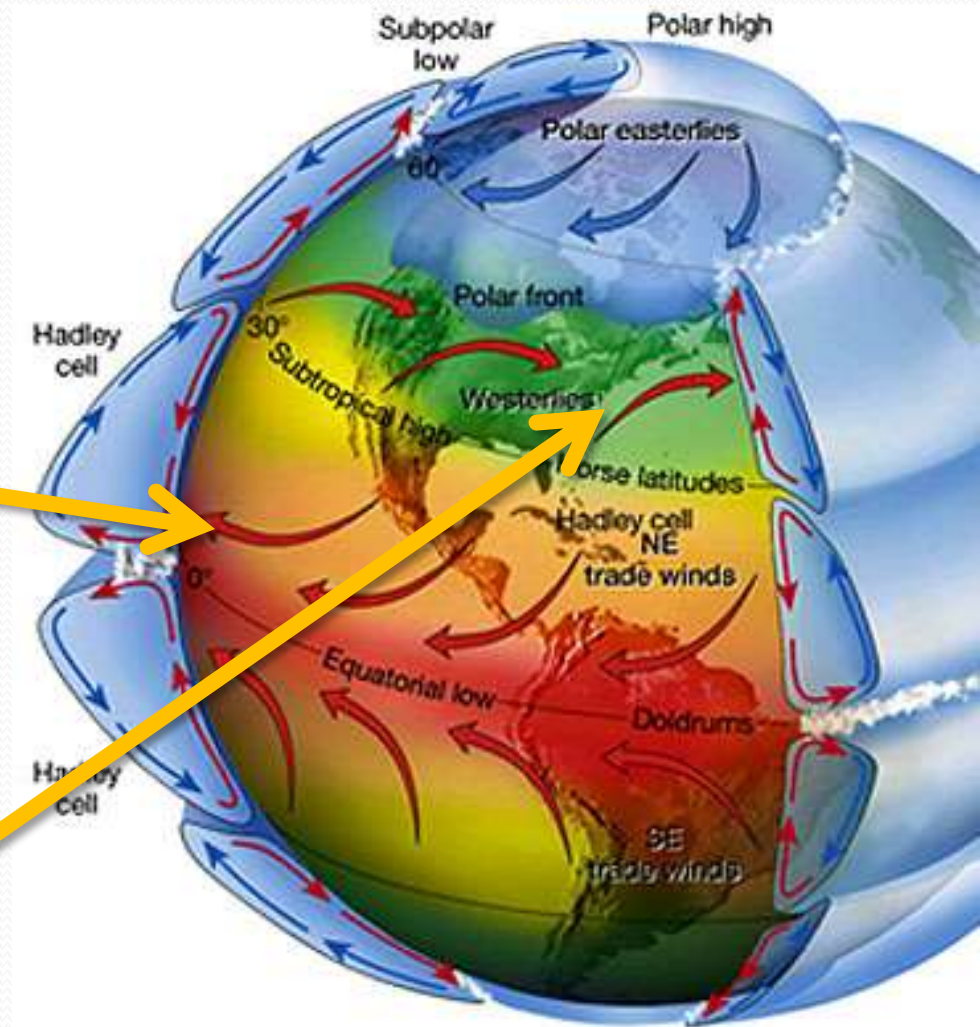
Localização dos grandes desertos

- Nas latitudes onde o ar desce seco e frio, há pouca precipitação e as regiões são desérticas.



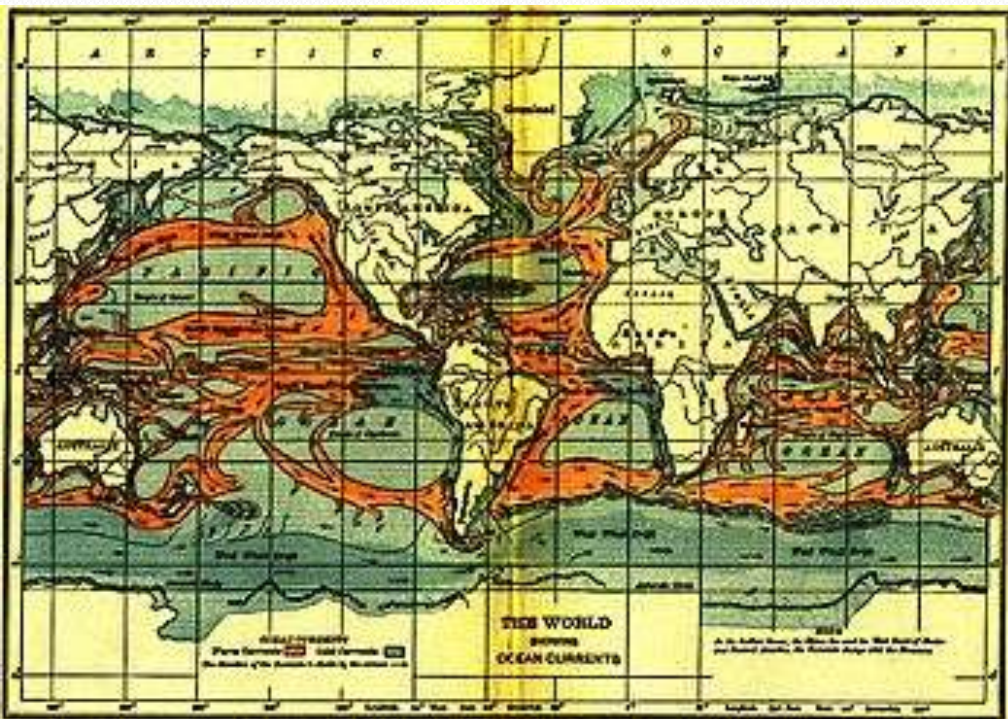
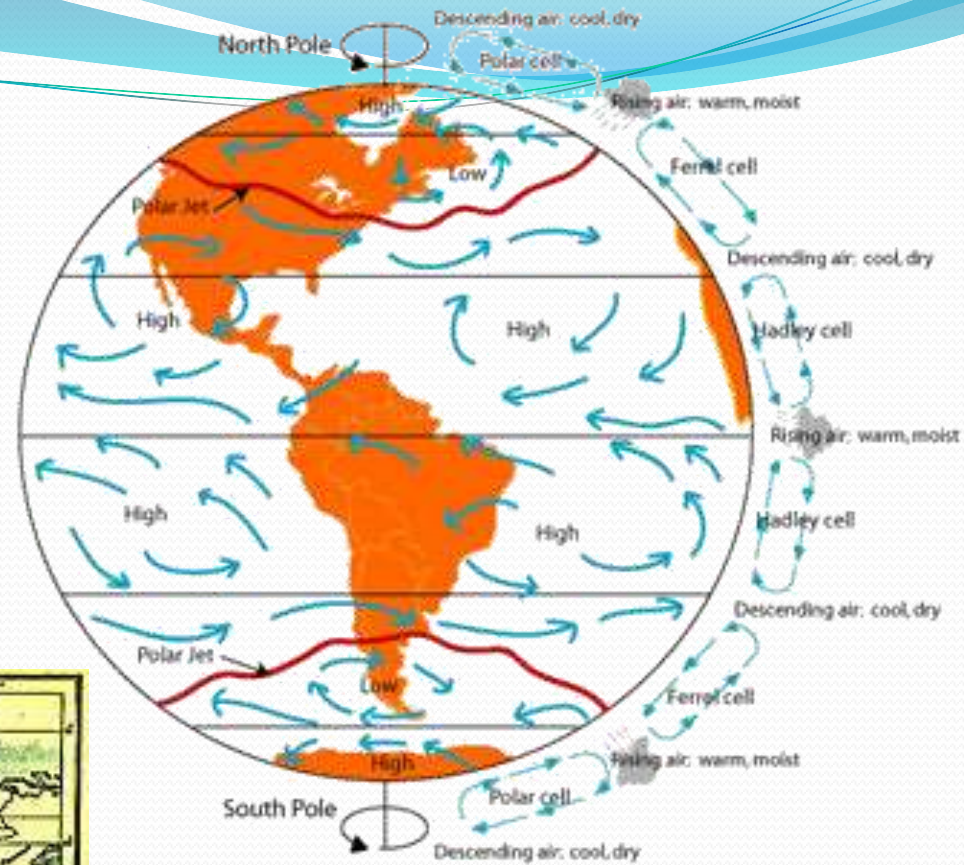
Circulação global

- Como a terra gira, por inércia, a atmosfera acaba ficando para traz.
 - A célula de Hadley fica inclinada no equador, formando os **Alísios**.
 - Já o ar que desce em latitudes mais altas está girando mais rápido que a chão (ele estava no EQ), e a circulação é ao contrário



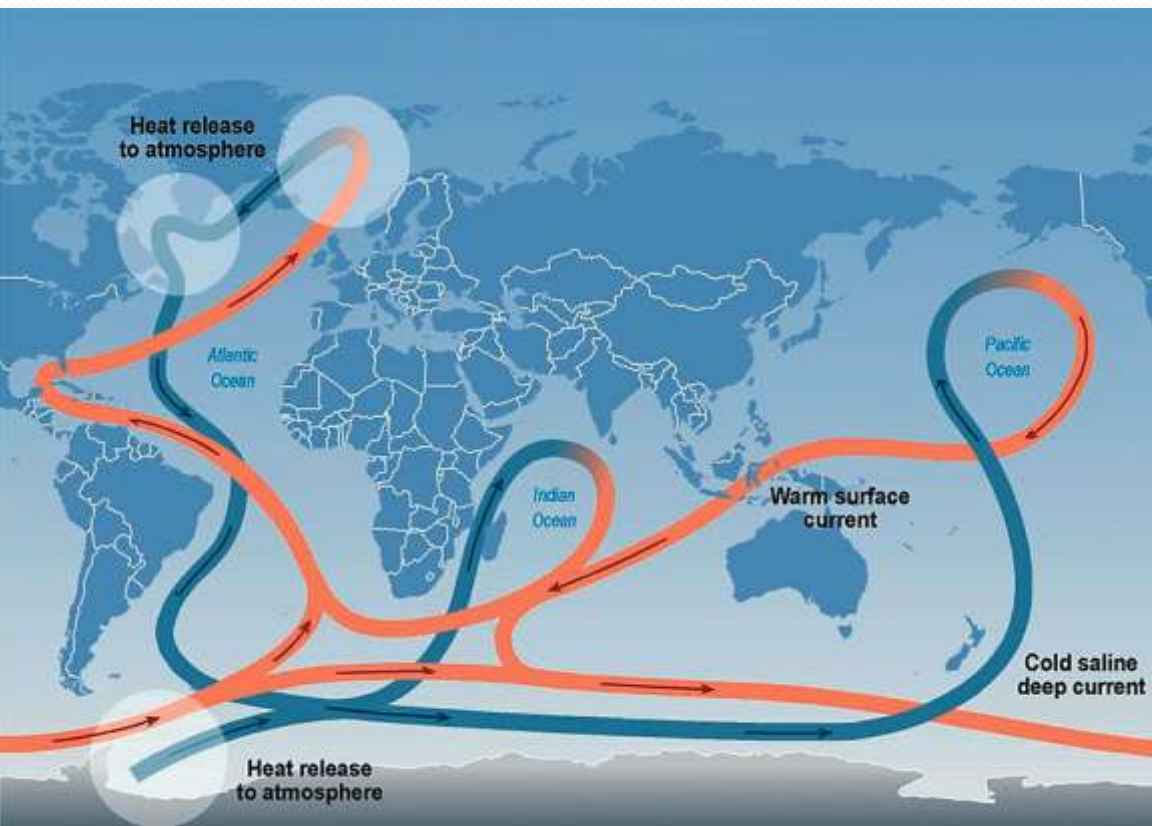
Circulação Global

- Os ventos próximos da superfície forçam o surgimento de correntes oceânicas



Circulação Oceânica

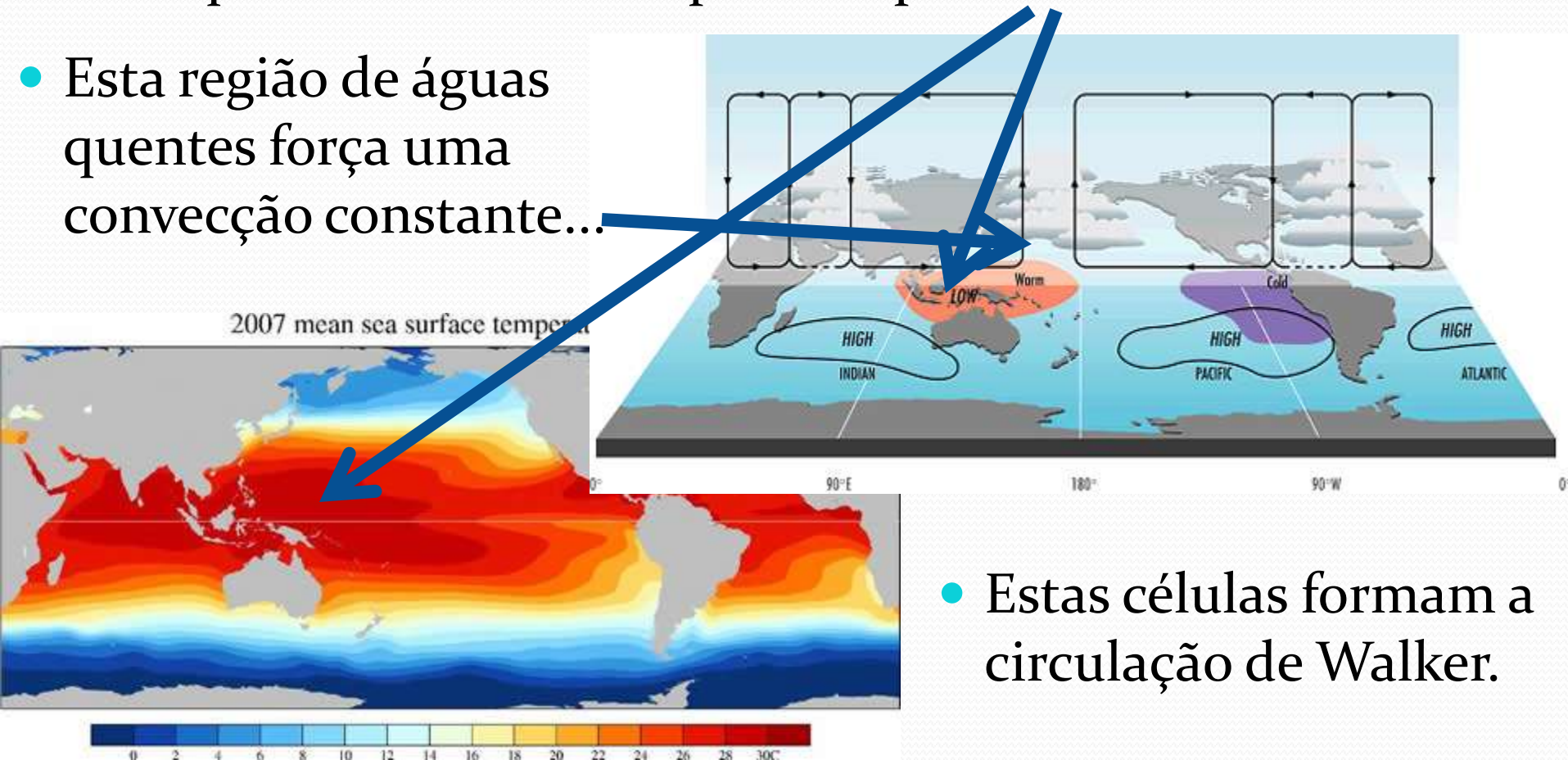
- As correntes oceânicas existem não só na superfície, mas também em águas profundas. É como um grande cinturão.



- As água superficiais são aquecidas pelo sol e levam a energia para outras regiões
- Por causa dessa corrente, a Europa é bem mais quente que o Canadá.

Circulação de Walker

- Devido a presença constante dos ventos alísios, a água mais quente vai sendo empurrada para oeste.
- Esta região de águas quentes força uma convecção constante...

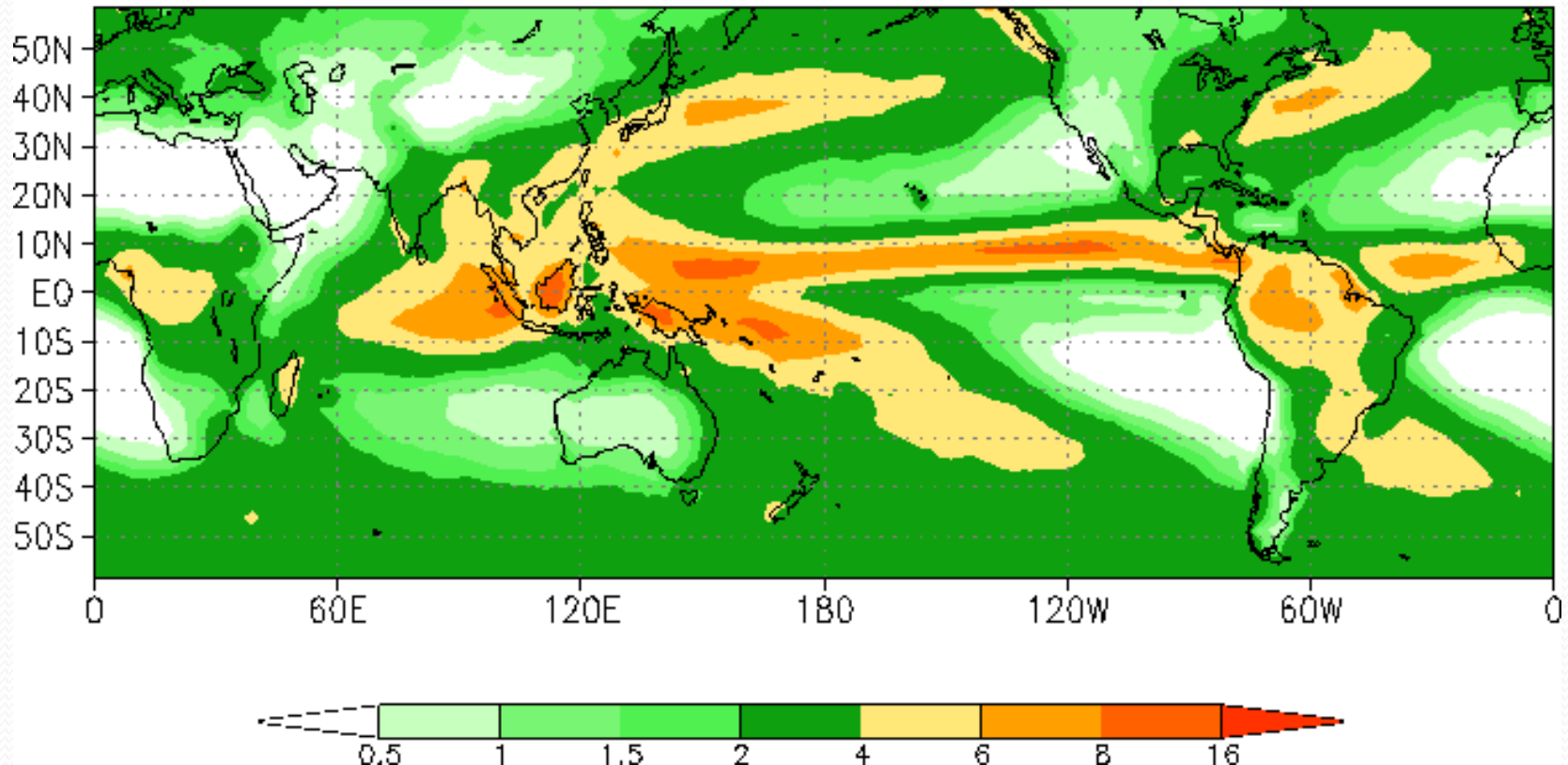


- Estas células formam a circulação de Walker.

Precipitação

- A distribuição global dos ventos, e principalmente de onde eles sobem e descem, determinam em grande parte a distribuição da precipitação

Pentad mean Precipitation (mm/day): Annual mean



Circulação da Atmosfera e do Oceano

- A terra recebe energia do sol, a maior parte chega na região tropical e é absorvida na superfície.
- Esse aquecimento desigual força o surgimento de ventos na atmosfera e de correntes no oceano.
- Esta circulação redistribui a energia

A teoria que explica o movimentos dos fluídos é chamada de dinâmica dos fluídos.

Equações de Din. dos Fluídos

- A principal equação de dinâmica dos fluídos é a de Navier-Stokes. Derivada a partir da 2ª lei de Newton, estabelece a conservação do momento

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla T + f$$

- A massa é conservada no escoamento, então:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Equações de Din. dos Fluídos

- Para resolver o problema do movimento de um gas, usamos também outras equações
 - Conservação da energia
 - Equação de estados dos gases
 - Etc...
- Estas equações juntas podem descrever o movimento
 - da atmosfera,
 - das correntes oceânicas,
 - da água em um cano,
 - do ar passando sobre uma asa
 - das estrelas em uma galáxia

Previsão de Tempo Global

Precisamos:

- Equações do eletromagnetismo (radiação -> terra)
- Equações de dinâmica dos fluídos (energia -> ventos)
- Um bom computador

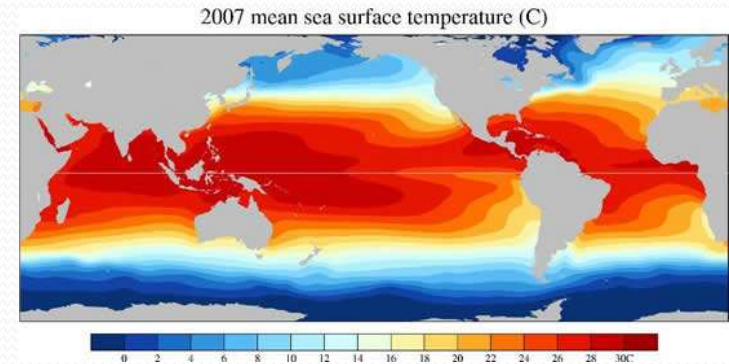
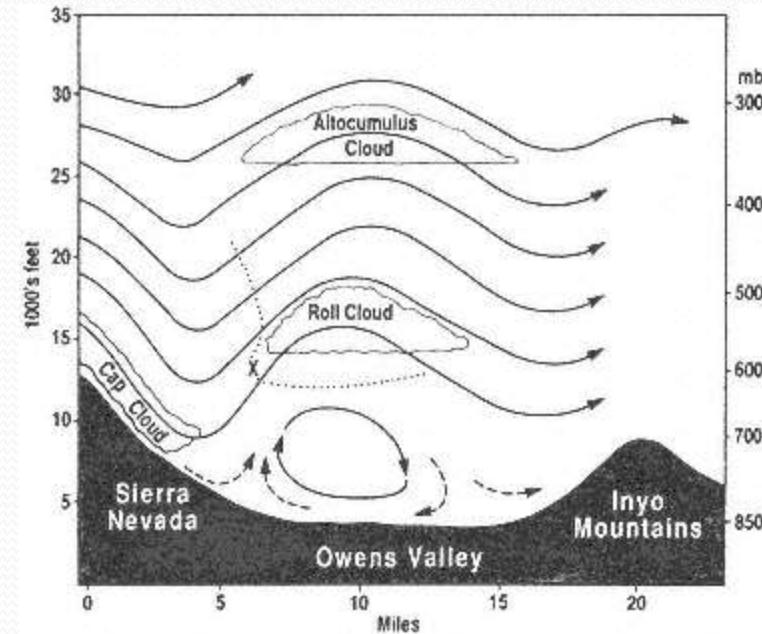


compilador

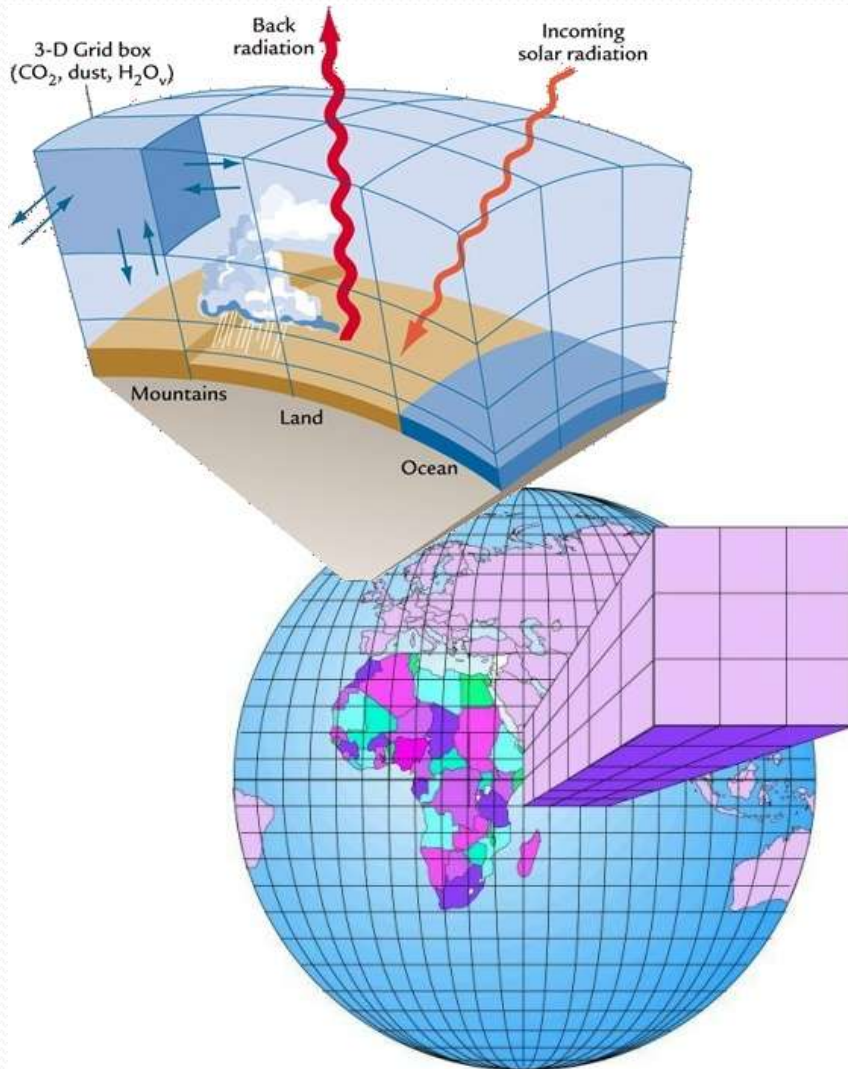


Solução

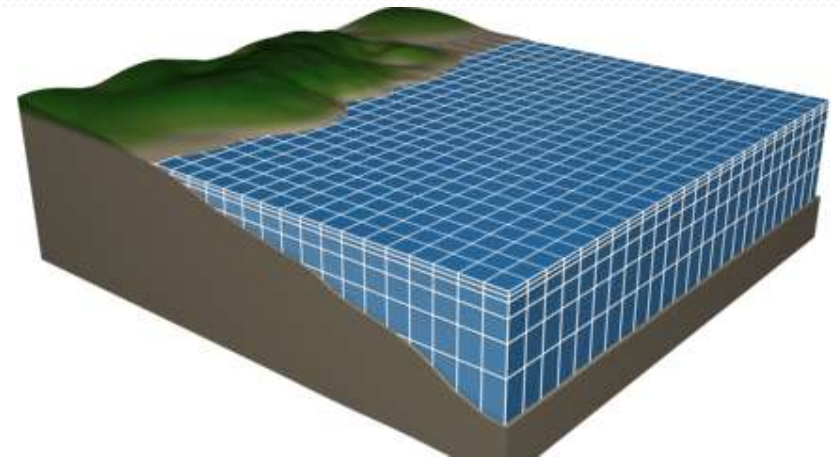
- Para resolver as equações
- A solução depende das:
 - Condições iniciais
 - Estado inicial da atmosfera
 - Condições de contorno:
 - Relevo
 - Concentração dos gases
 - Temperatura da superfície do mar



Como resolver



- Para resolver as equações no computador, precisamos dividir o problema em pequenos pedaços (**discretização numérica**).
- As equações são calculadas apenas nos pontos definidos por essa **grade**.

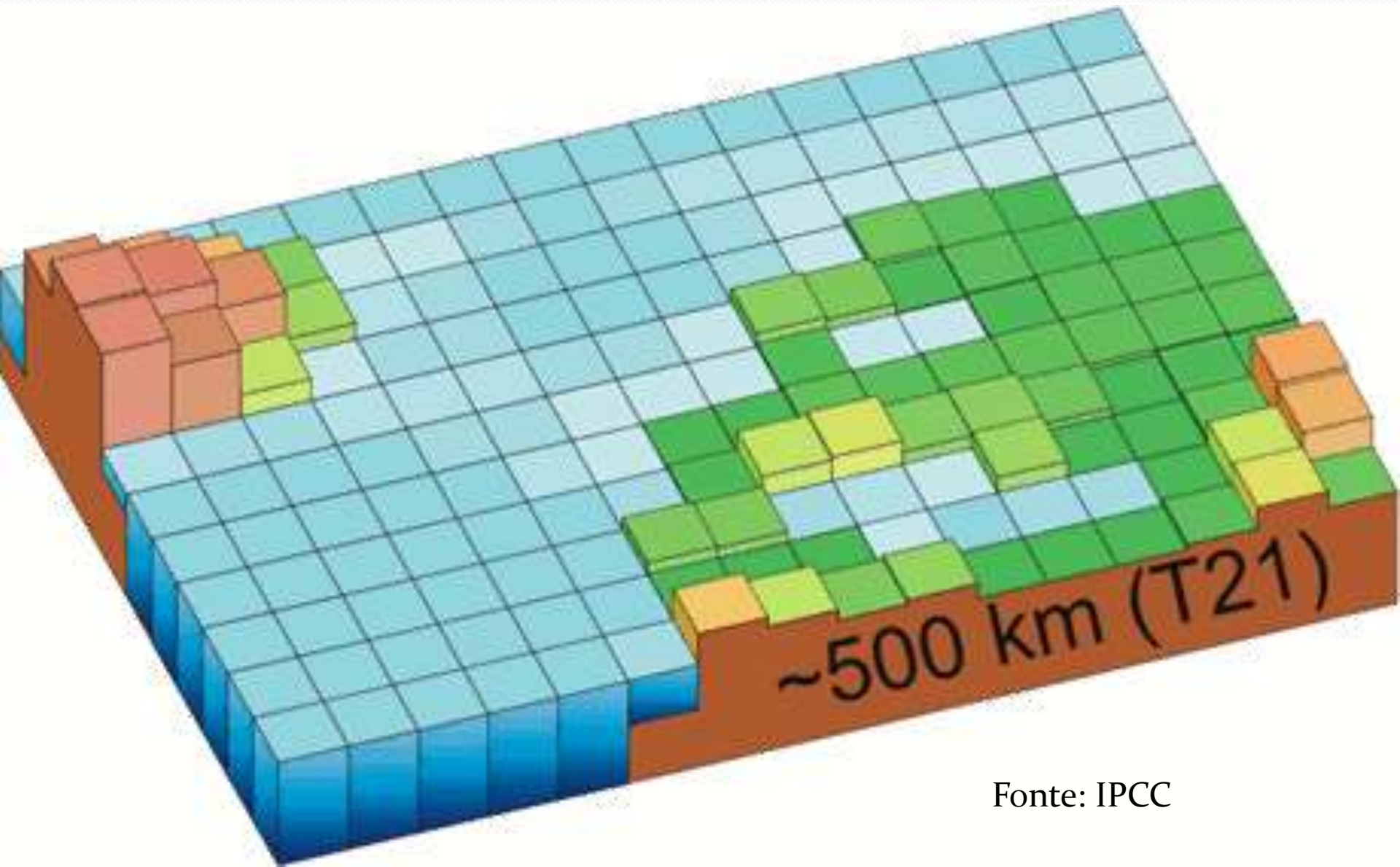


O resultado da previsão é bom??

A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

- A **resolução** espacial e temporal adequada

Resolução espacial

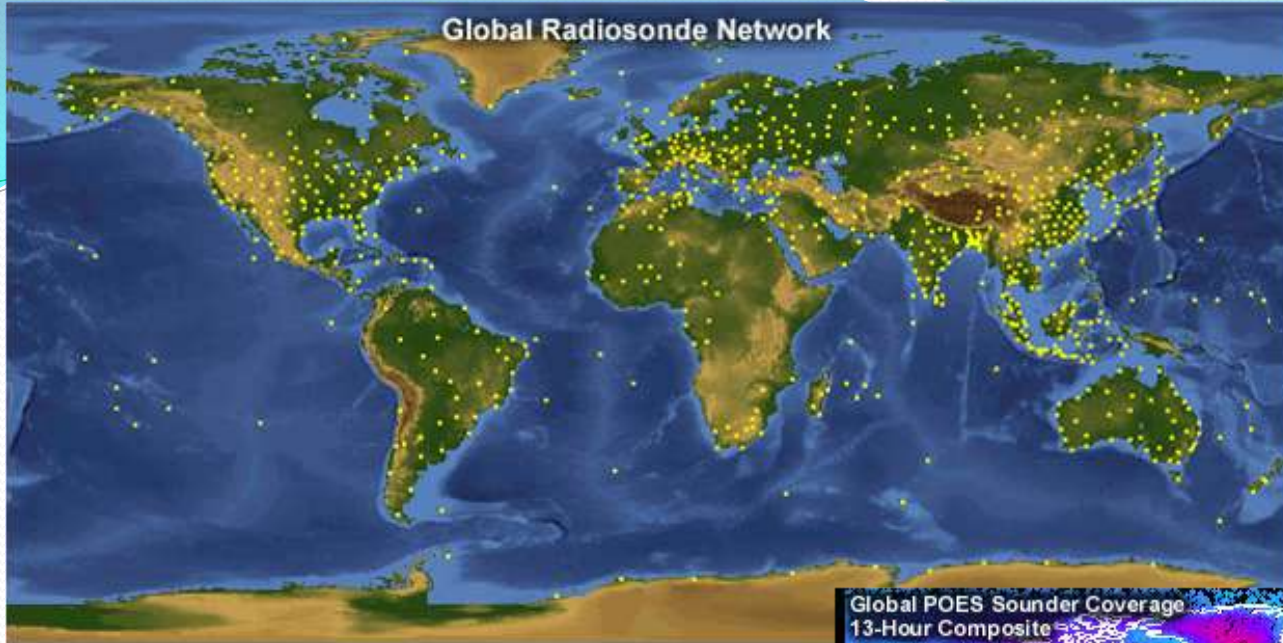


Fonte: IPCC

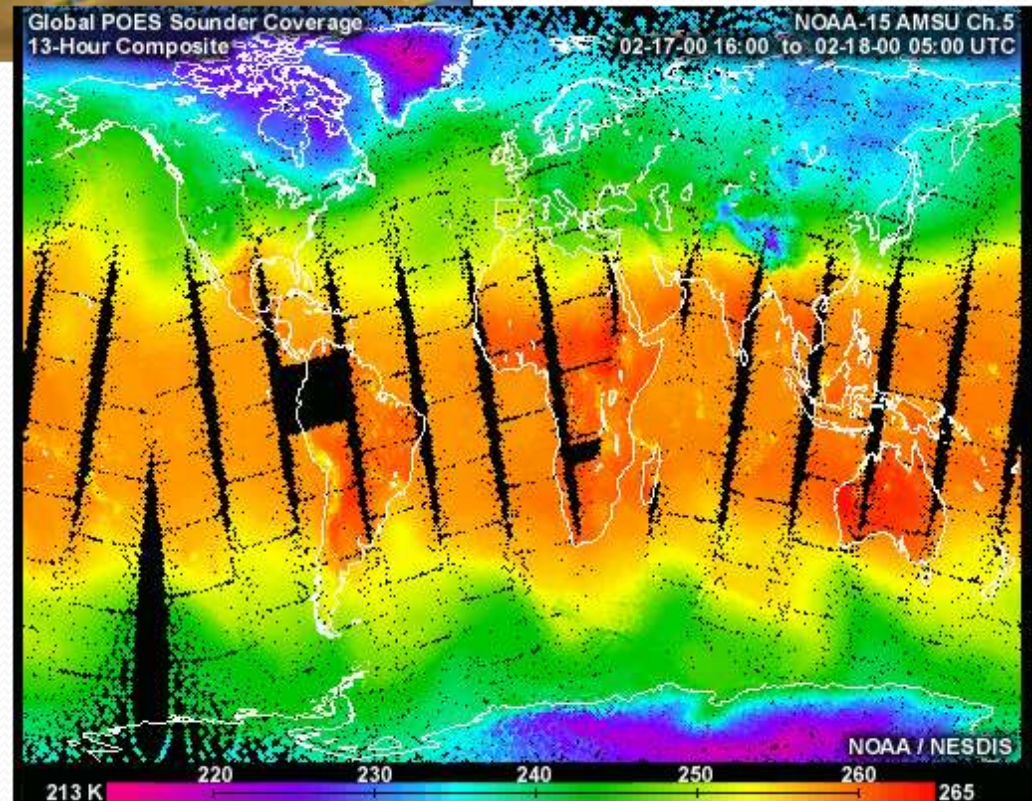
O resultado da previsão é bom??

A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

- ✓ A **resolução** espacial e temporal adequada
- Qualidade da condição inicial
 - Melhorou muito com os satélites a partir de 1970
 - É o limitante da qualidade hoje em dia



Radio sondagens,
esforço de muitas
pessoas, todos os
dias



Apenas 1 satélite
nos dá muito mais
informações

O resultado da previsão é bom??

A qualidade da nossa solução (previsão de tempo) vai depender de vários fatores:

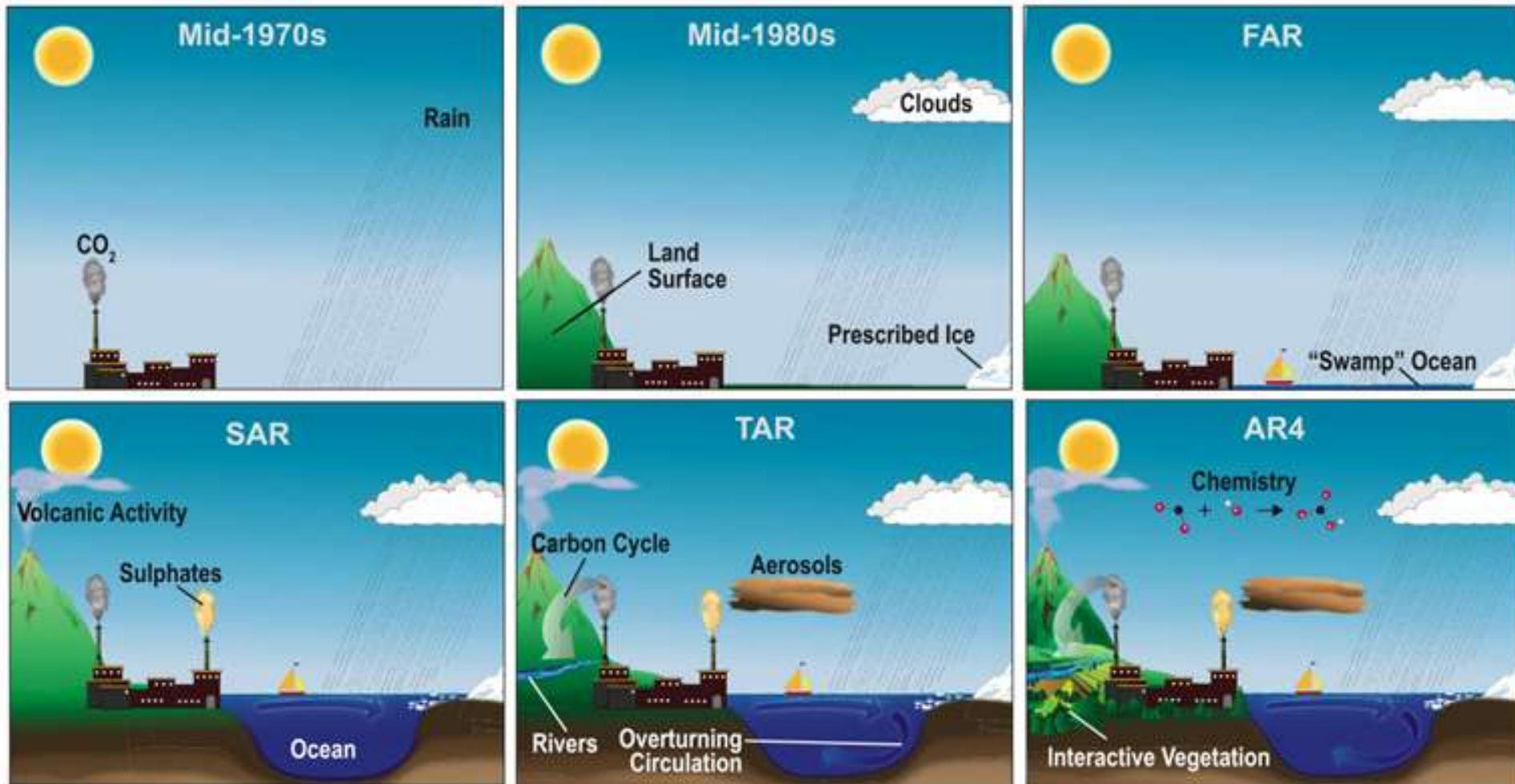
- ✓ A **resolução** espacial e temporal adequada
- ✓ Qualidade da condição inicial
 - Melhorou muito com os satélites a partir de 1970
 - É o limitante da qualidade hoje em dia
- Processos físicos incluídos
 - Radiação
 - Dinâmica dos fluídos
 - ...

Quais processos físicos incluir depende do problema que queremos resolver!

Processos Físicos

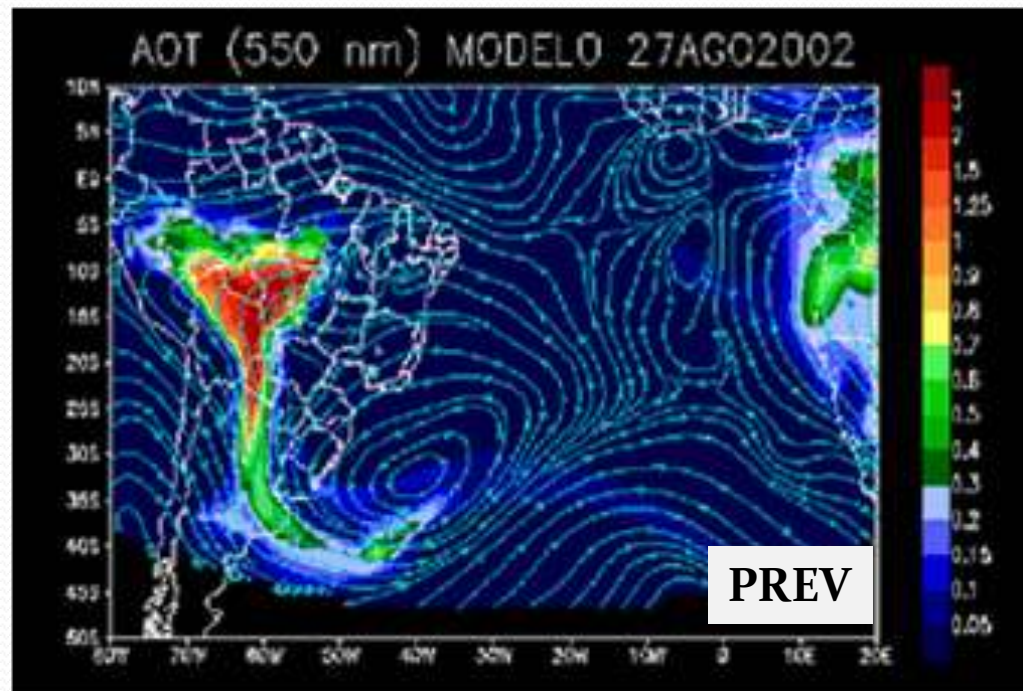
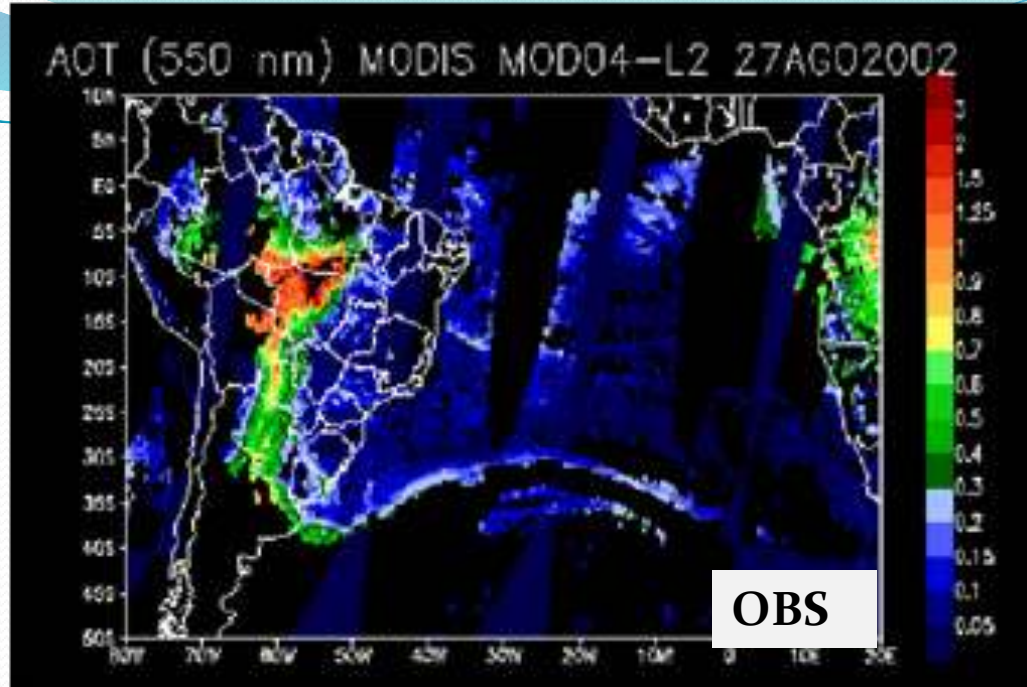
- Quais processos físicos incluir depende do problema que queremos resolver!
- Exemplo:
 - Para previsão de tempo de 5 dias, podemos considerar que a temperatura da superfície do mar não vai mudar, ela é uma condição de contorno.
 - Para uma previsão de vários meses (clima), isso não é verdade!! Nesse caso precisamos de um **modelo oceânico** para prever as correntes marinhas, a absorção de energia, e a **temperatura da superfície do mar**.

Evolução dos modelos atmosféricos



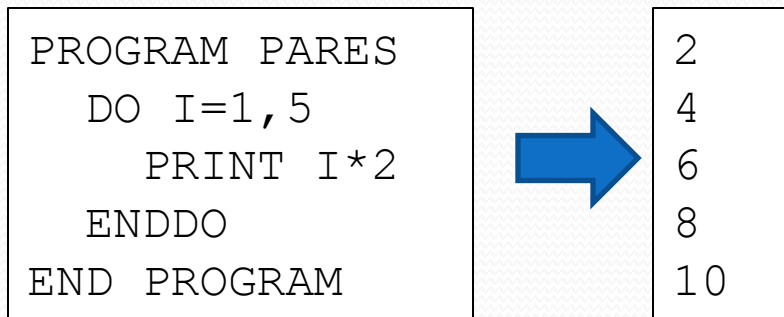
Química

- O Brasil foi o líder mundial na previsão de qualidade do ar, modelando a química e os aerossóis na atmosfera
- Mais 200 equações para o modelo resolver!
 - Ok para prev. de 5 dias
 - Mas como fazer isso numa escala de tempo de centenas de anos??

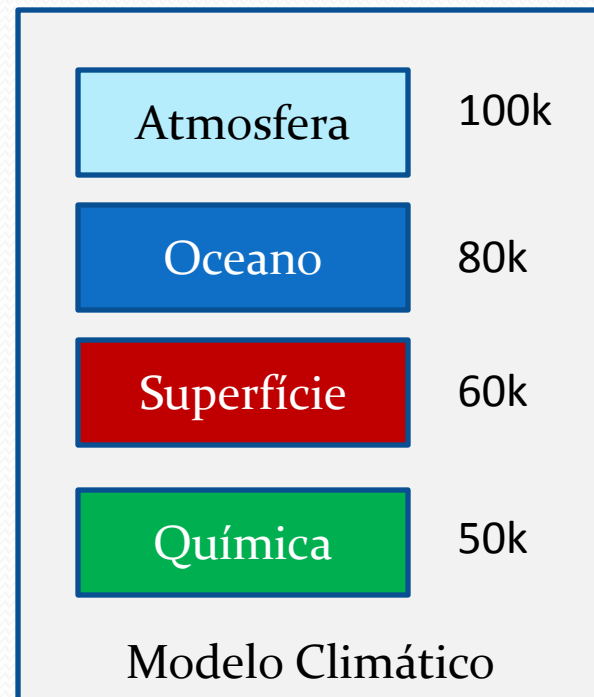


Complexidade Computacional

- A complexidade de um modelo atmosférico é tão grande e seu desenvolvimento envolve tantos pesquisadores que é fácil alguém cometer um erro de programação.



Programa de 3 linhas para escrever na tela os 5 primeiros números pares



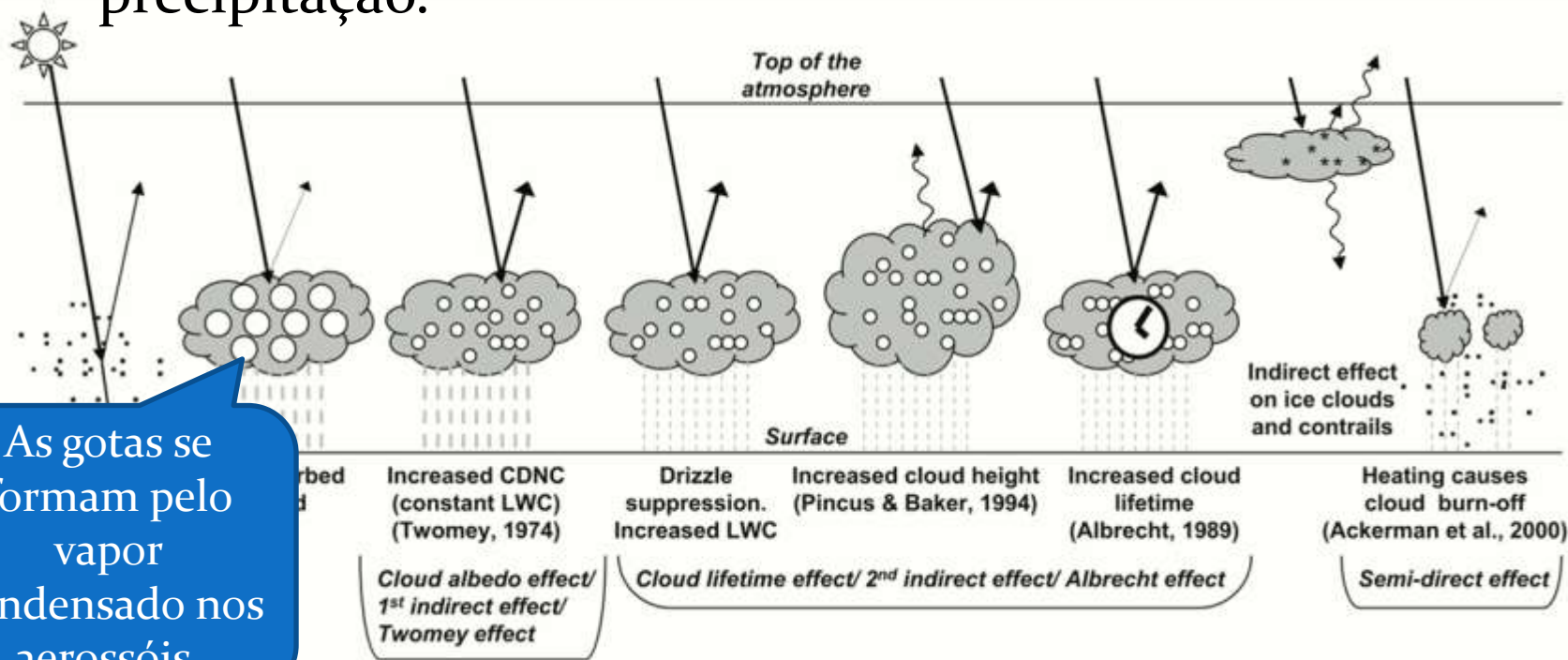
100-300 MIL linhas de código

Retroalimentação

- Cada um destes **processos** está ligado a alguma **interação** existente no **sistema climático terrestre**
 - Os ventos sobre o mar mudam sua temperatura \Leftrightarrow a temperatura do mar força a precipitação, que influi no vento
 - A vegetação determina quanto de água é evaporada para a atmosfera \Leftrightarrow as chuvas molham o chão deixando-os úmidos e mais propícios a evaporarem
 - Uma queimada liberada fuligem na atmosfera \Leftrightarrow essa fuligem prejudica a formação de nuvens e reduz a chuva, deixando a vegetação mais propícia ao fogo
 - Etc...

Mas não conhecemos tudo...

- Se conhece pouco os efeitos dos aerossóis (partículas de poeira, poluição, etc...) nas nuvens e menos ainda na precipitação.

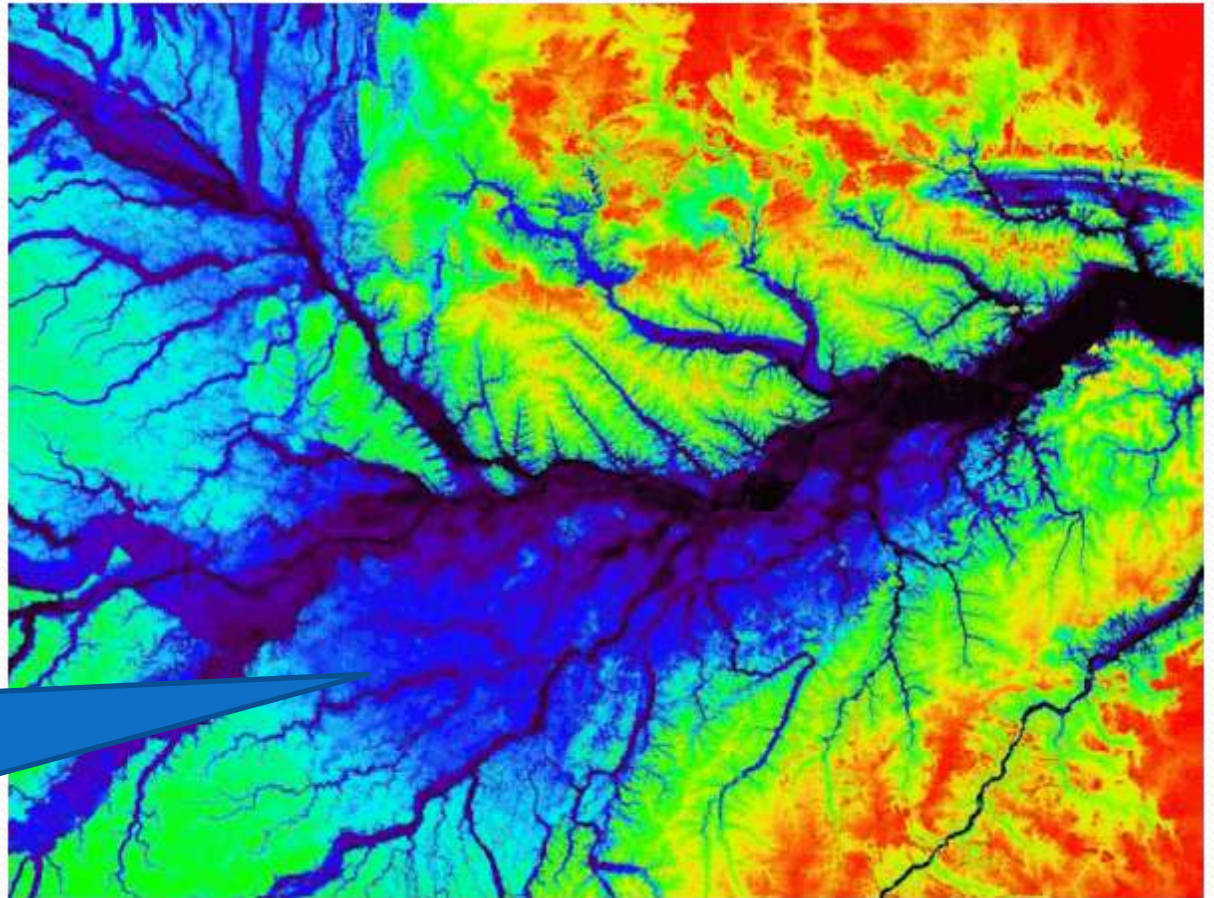


O que acontece se aumentar ou diminuir a poluição?

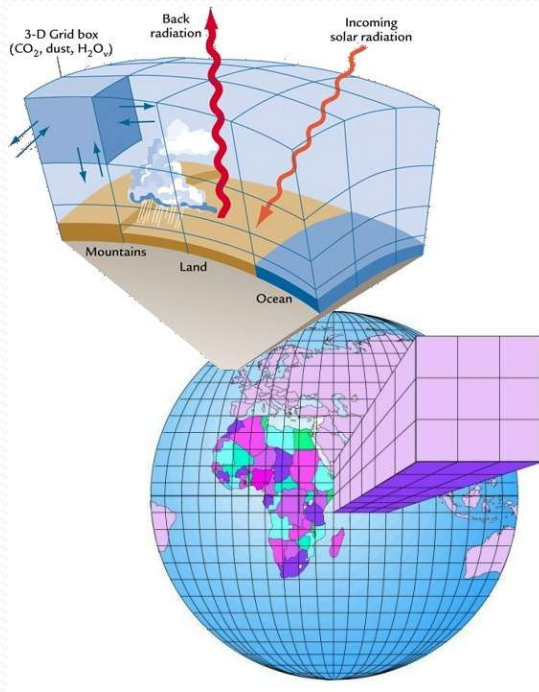
Mas não conhecemos tudo...

- Quando modelamos a floresta, não incluímos as área alagadas!

Como as área alagadas modificam a evaporação e a temperatura da floresta?



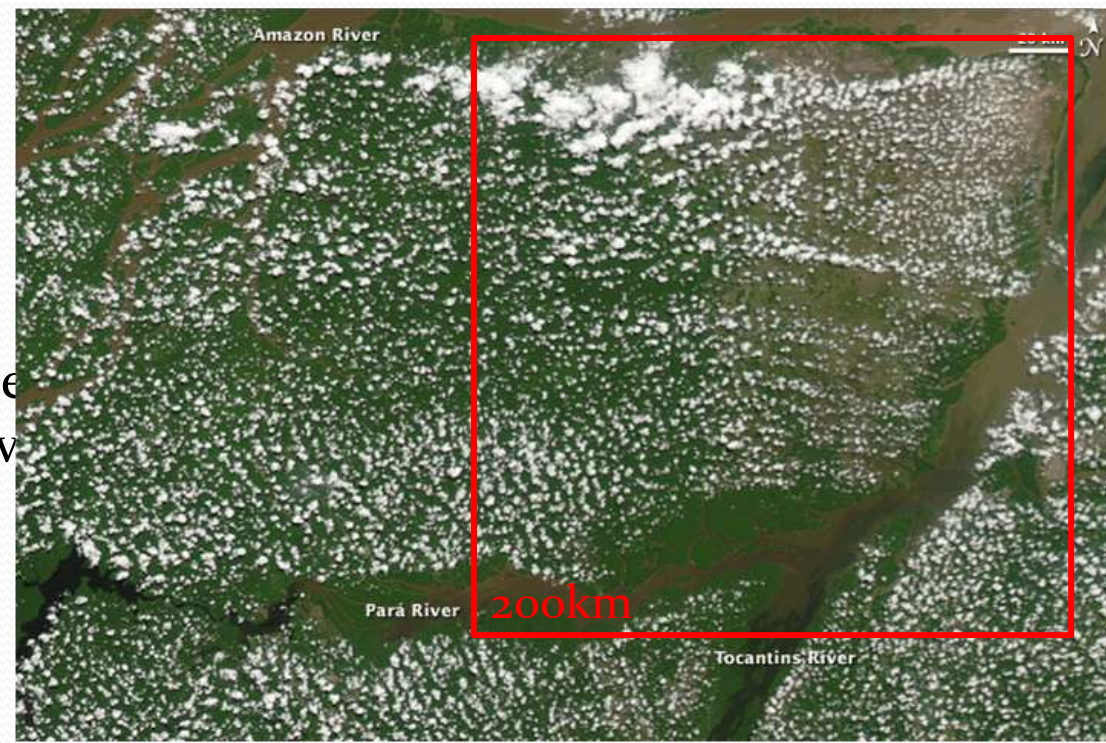
Como incluir processos sub-grade?



- Nossas equações só conseguem resolver o que pode ser representado usando os pontos que escolhemos!

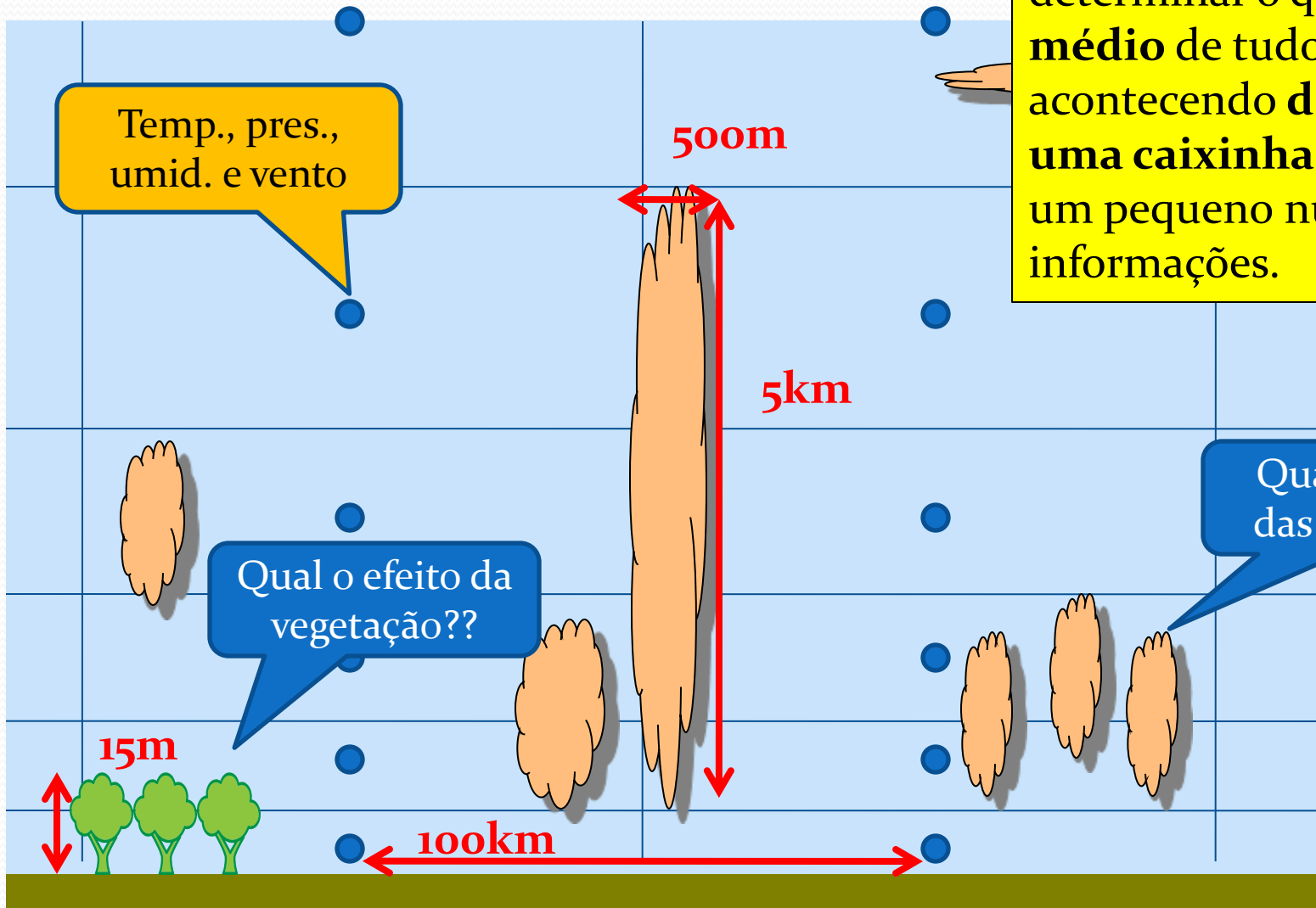
Como representar
as nuvens

Como representar
a floresta?



Parametrização

Parametrização é um conjunto de equações empíricas usadas para determinar o qual o **efeito médio** de tudo que esta acontecendo **dentro de uma caixinha**, a partir de um pequeno número de informações.



Temp., pres.,
umid. e vento

500m

5km

Qual o efeito da
vegetação??

Qual o efeito
das nuvens??

15m

100km

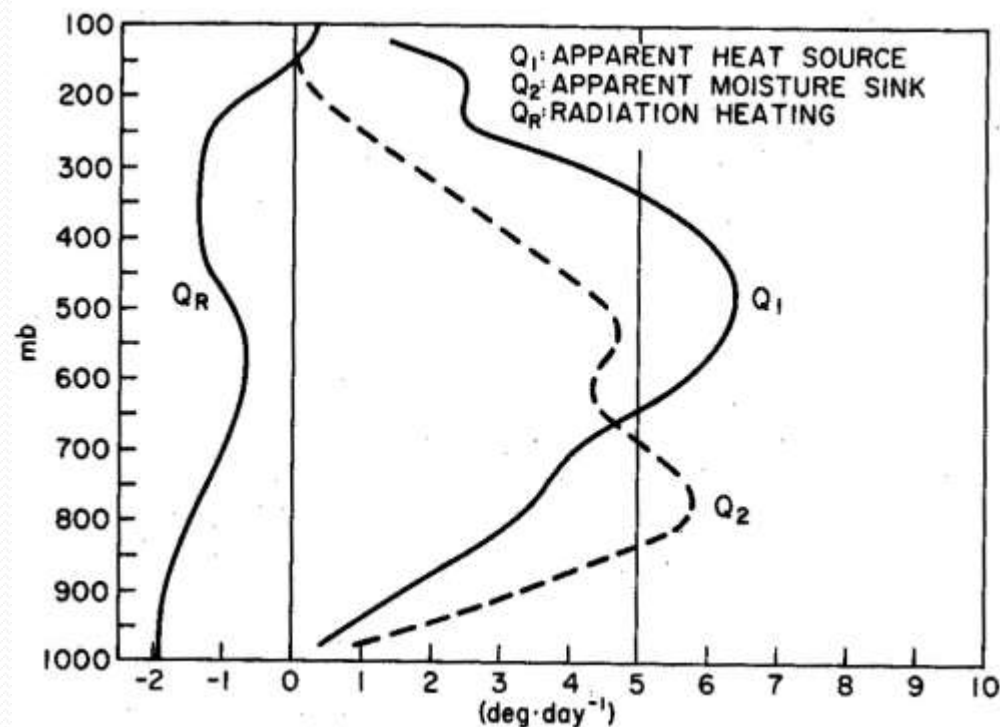
Como parametrizar

- **Abordagem convencional**
- Partimos de primeiros princípios e escrevemos equações para representar os processos em consideração
- Fechamento das equações (**Closure problem**)
 - Intruz informação adicional (empírica)
 - Calibrar as constantes (observações, ...)

Objetivos (1) – dQ/dt e dT/dt

Calcular o efeito coletivo de conjuntos de nuvens convectivas em um coluna do modelo atmosférico a partir apenas das variáveis em ponto de grade

$$Q_{1C} \equiv Q_1 - Q_R \equiv L(\bar{c} - \bar{e}) - \frac{\overline{\partial \omega' s'}}{\partial p}$$



Objetivos (2)

Determinar a **ocorrência/localização** da convecção



Trigger

Determinar a **distribuição vertical** de aquecimento, umidecimento e transporte de momento



Cloud model

Determinar a **quantidade** de energia convertida no processo, precipitação convectiva=liberação de calor



Closure

Tipos de esquemas de convecção

- Baseados em balanço de umidade
 - Kuo, 1965, 1974, *J. Atmos. Sci.*
- Baseados no ajuste convectivo
 - Ajuste convectivo úmido, Manabe, 1965, *Mon. Wea. Rev.*
 - Ajuste penetrativo, Betts and Miller, 1986, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, Betts-Miller-Janic
- Baseados em fluxo de massa (bulk+spectral)
 - Entraining plume - spectral model, Arakawa and Schubert, 1974, *JAS*.
 - Entraining/detraining plume - bulk model, e.g., Bougeault, 1985, *Mon. Wea. Rev.*, Tiedtke, 1989, *Mon. Wea. Rev.*, Gregory and Rowntree, 1990, *Mon. Wea. Rev.*, Kain and Fritsch, 1990, *JAS*, Donner, 1993, *JAS*
 - Episodic mixing, Emanuel, 1991, *JAS*

O esquema de “Kuo”

Fechamento: A atividade convectiva está ligada a convergência de grande escala

$$P = (1 - b) \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \rho q}{\partial t} \right)_{ls} dz$$

Principal problema: a convecção consome apenas água e não energia ou momento

Esquemas de Ajuste

e.g. Betts and Miller, 1986, QJRMS:

Quando a atmosfera está instável e úmida para uma parcela levantada da PBL, ajusta-se o perfil termodinâmico de volta a um estado de referência durante um certo tempo de escala, i.e.,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{conv.} = \frac{T_{ref} - T}{\tau} \quad \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{conv.} = \frac{q_{ref} - q}{\tau}$$

T_{ref} é construído a partir de uma adiabática úmida acima da base da nuvem, mas não existe um perfil universal para q_{ref} . Ainda assim o esquema é robusto e produz campos suaves.

Fluxo de massa

$$Q_{1c} \equiv L(\bar{c} - \bar{e}) - \frac{\overline{\partial \omega' s'}}{\partial p}$$

Condensation term Eddy transport term

Fechamento: Como parametrizar o fluxo turbulento convectivo?

$$\overline{\omega' \Phi'} = ?$$

Muitas hipóteses,
veremos em detalhe
na próxima aula

↑ Resolução ↓

- Modelos climáticos de baixa resolução representam razoavelmente a atmosfera, **mas tem problemas:**
 - Representação da convecção com parametrizações
 - Representação da interação aerossol-nuvem
 - Representação da interação biosfera-atmosfera
- Precisamos de modelos com maior resolução e com mais processos físicos!!
 - ~~• Regionais ou meso escala~~
 - Super-parametrização
 - Cloud-Resolving-Models

Convecção ainda é parametrizadas...

A microfísica das nuvens é parametrizada...

Normalmente os modelos incluem:

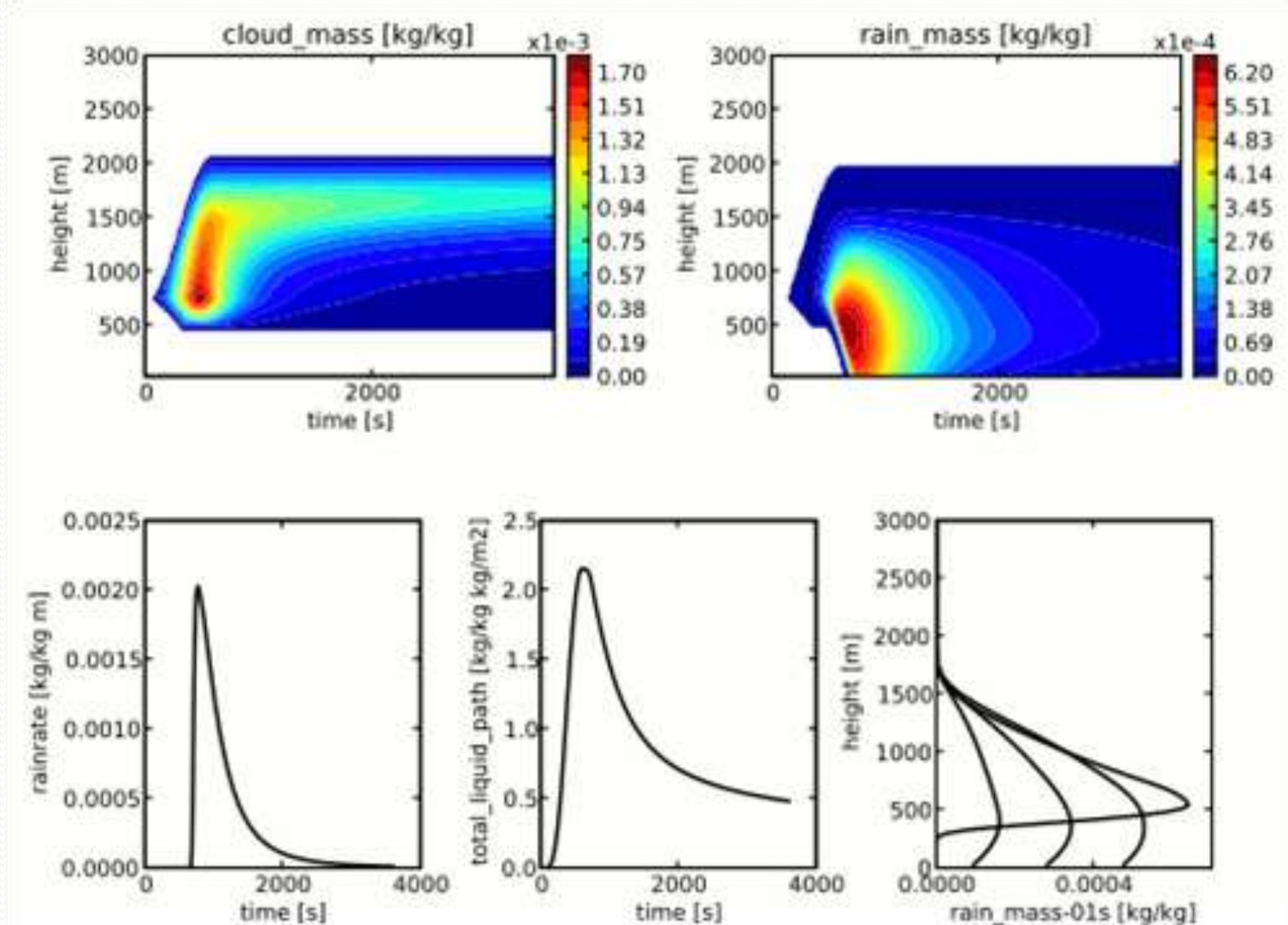
- Dinâmica sofisticada com parametrização de convecção (CPTEC-AGCM)
- Dinâmica sofisticada com microfísica simplificada (BRAMS): **bulk microphysics**
- Dinâmica simplificada com um microfísica elaborada; resolvem a distribuição de tamanhos explicitamente (TauBin/Kid): **bin microphysics**
- Sem dinâmica e as equações explícitas (parcela): **single particle microphysics**
- Incluem uma microfísica detalhada junto com uma dinâmica também detalhada (e.g. Grabowski's **super-parameterização**) mas são muito custos computacionalmente.

Modelo tipo Bulk (e.g. BRAMS)

- Resolvem as equações de balanço apenas para algumas grandezas totalizadas que caracterizam a nuvem. Tipicamente:
 - Concentração em Massa (momento 1)
 - Concentração em Número (momento 0)
- Tradicionalmente transportavam apenas o 1º momento (esquema de Kessler)
 - Agora há mais esquemas de 2 momentos
- São usados normalmente em modelos de meso escala ou globais
- São muito mais rápidos que esquemas “bin”, mas não resolvem a distribuição de tamanhos explicitamente, perdendo em realismo.

Ex.: Microfísica explícita – BINS

Taubin – Feingold et al.



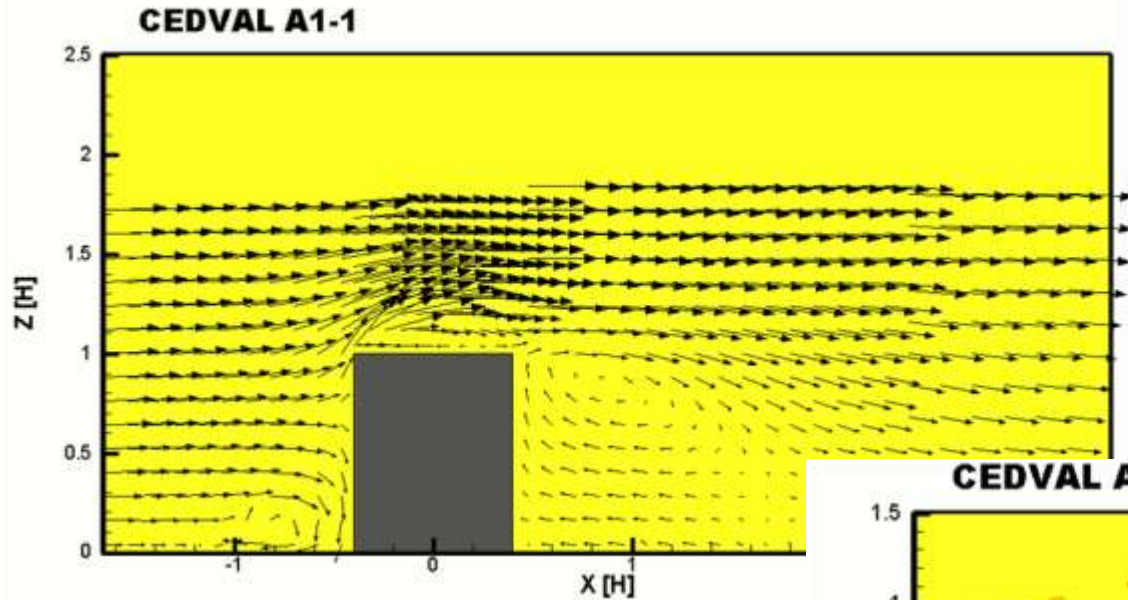
RAMS/ADAP Very High-Resolution Simulation Examples

- 1) Flow around a single rectangular building
(CEDVAL A1-1, $Re = 32750$)
- 2) Flow through an array of buildings
(CEDVAL B1-1, $Re = 56390$)
- 3) Flow through an array of buildings on a slope

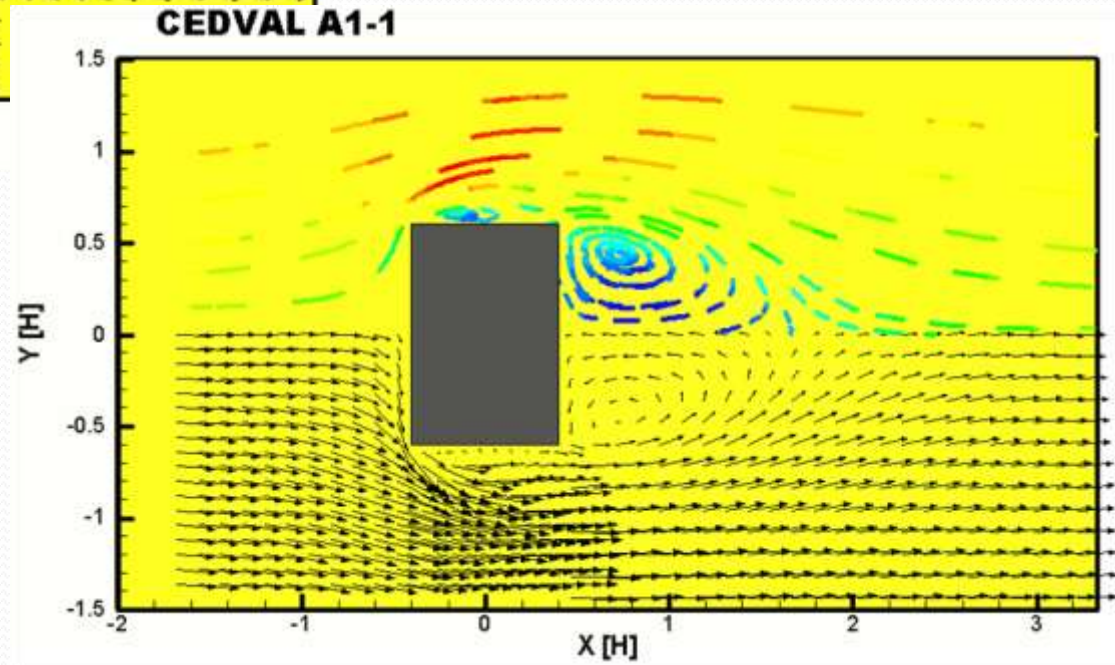
RAMS configuration

- Two grids: $\Delta x = 10 \text{ m} \ \& \ 2 \text{ m}$; $\Delta z = 2 \text{ m}$, stretched
- Neutral, horizontally homogeneous initialization
- 5 m/s initial flow; $Re \approx 100$
- Deardorff isotropic TKE subgrid scheme

Flow around a single building



Building size:
✎ $x=20\text{m}$ ✎ $y=30\text{m}$ ✎ $z=25\text{m}$



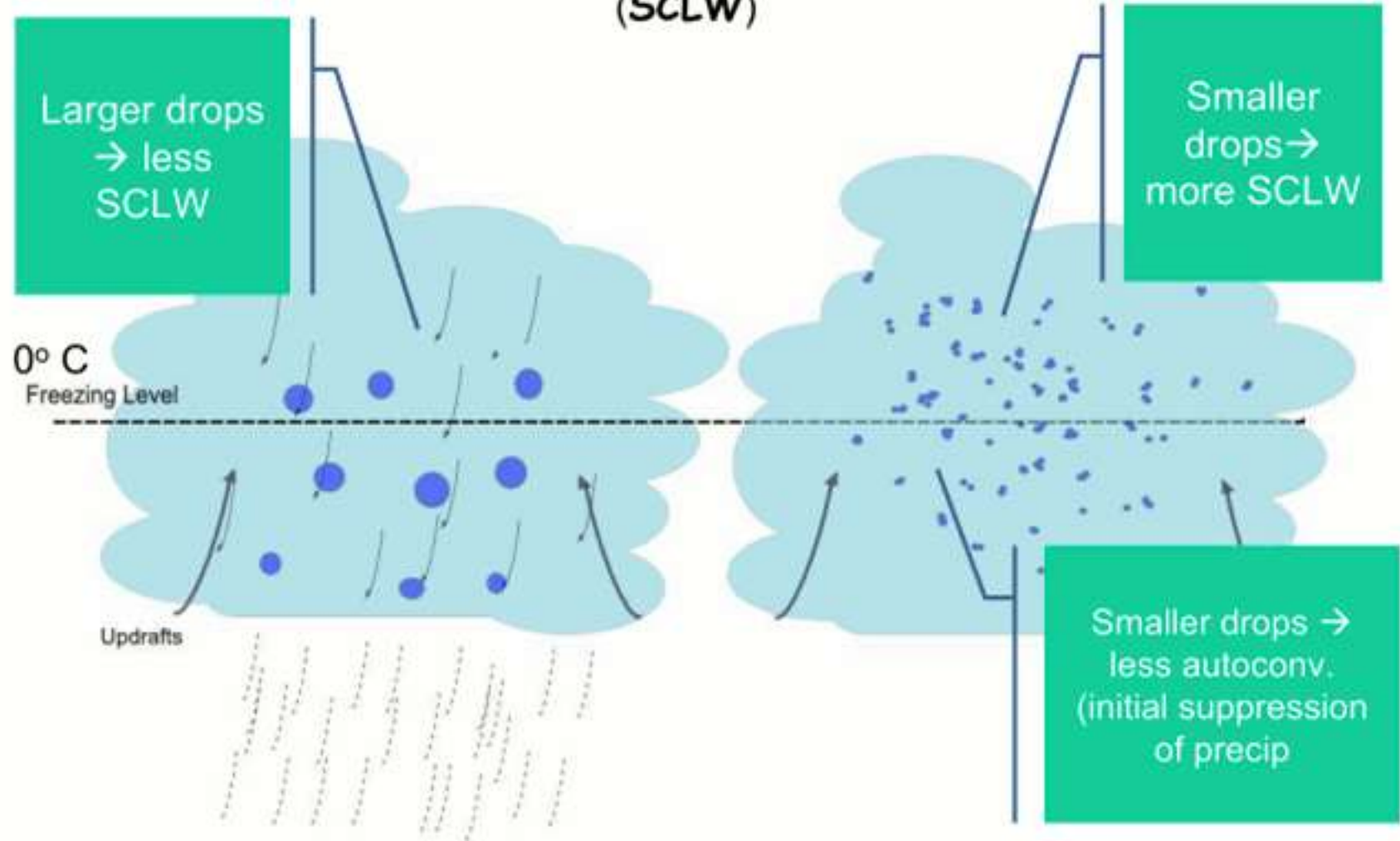
Craig J. Tremback, ATMET
Robert L. Walko, ATMET/Duke

RAMS – 2 momentos

- Cloud droplets has two moments Cloud droplets has two moments and sources can be:
 - activation of CCN
 - evaporation of drizzle drops
- Second mode of cloud droplets (drizzle drops $\sim 60\mu\text{m}$) observed in nature, also with two moments and sources can be:
 - self collection of cloud droplets
 - activation of GCCN
 - evaporation of rain
- Activation of CCN and GCCN based on a explicit parcel models that is run offline. models that is run offline.

The basic principle

Change in the supercooled liquid water
(SCLW)

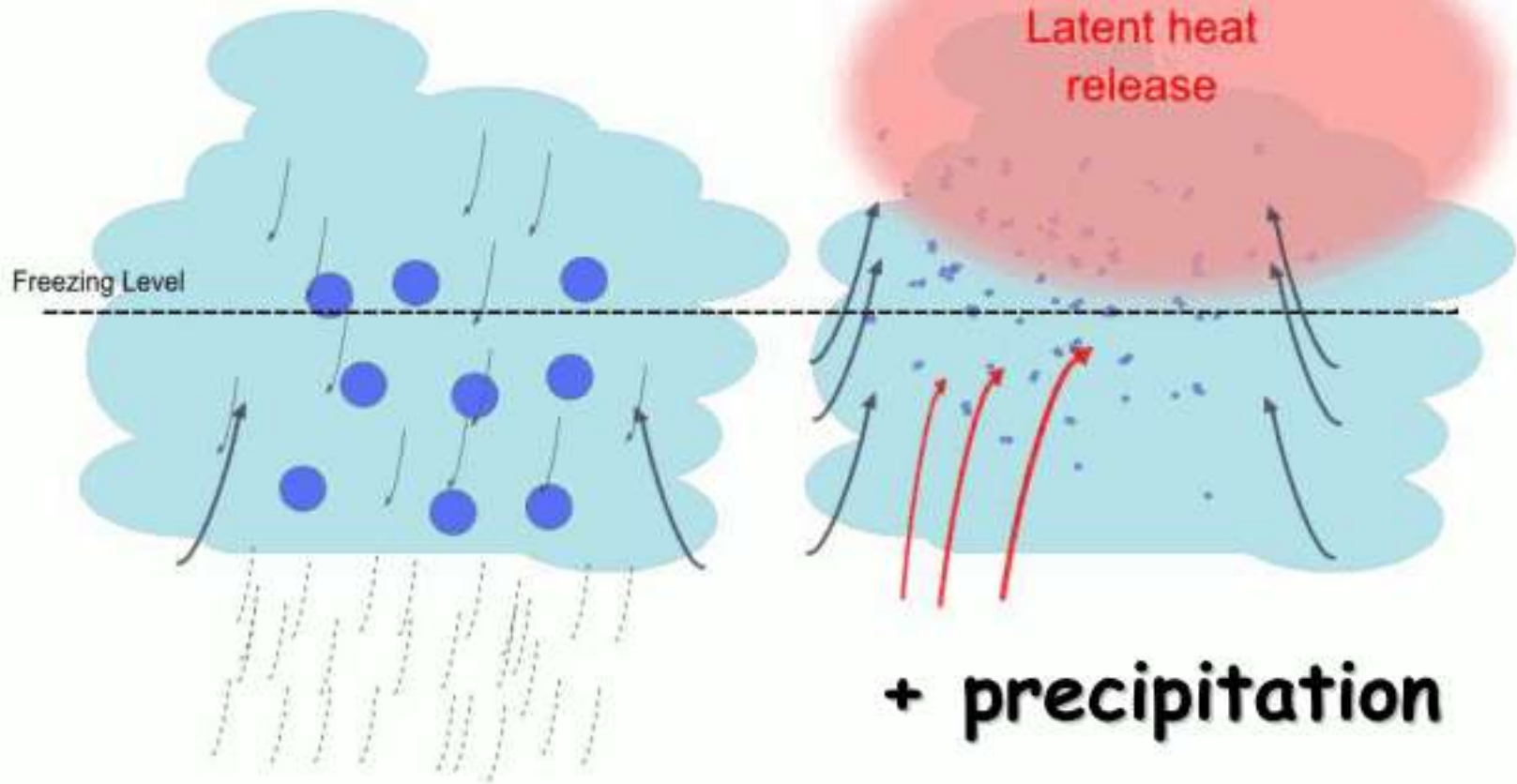


The basic principle

+ convection

Latent heat
release

Freezing Level

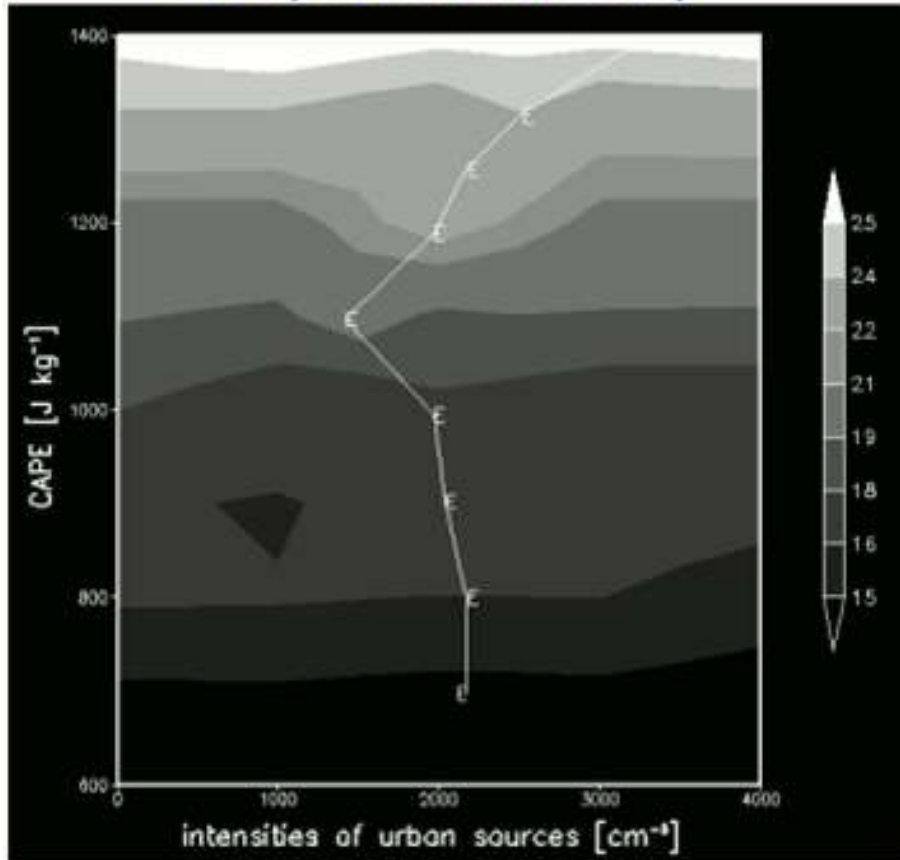


+ precipitation

The response of precipitation in NOT monotonic

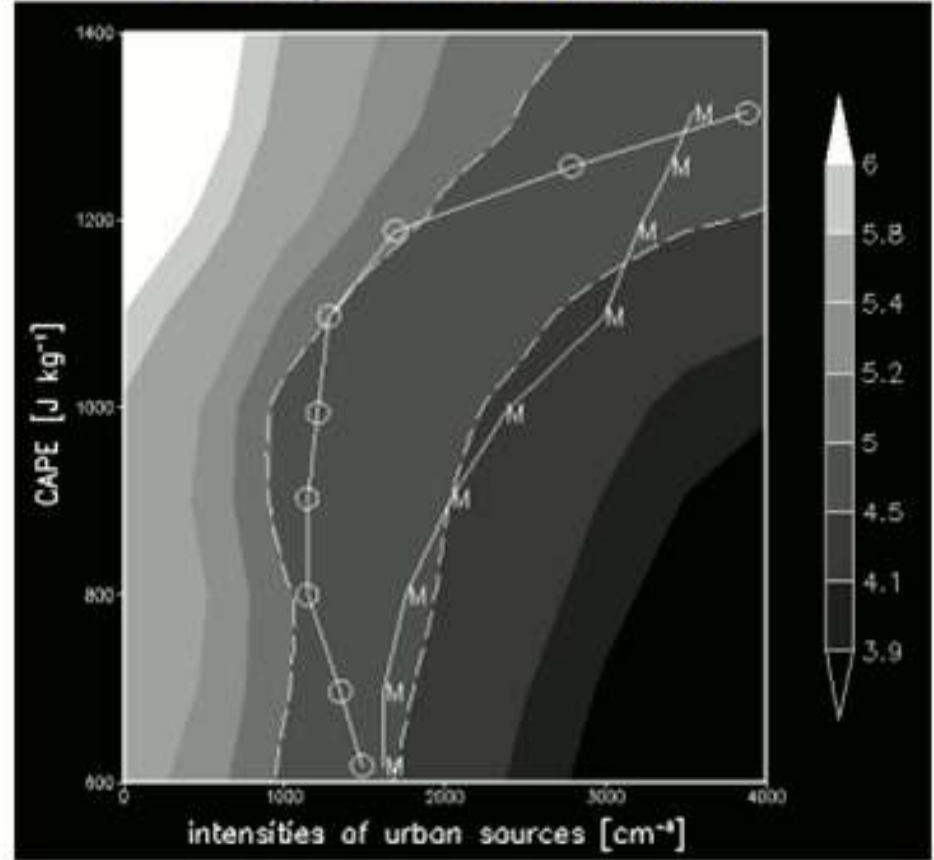
(Atmos Res: Carrió et al 2010, Carrió y Cotton, 2010b)

Precipitation efficiency



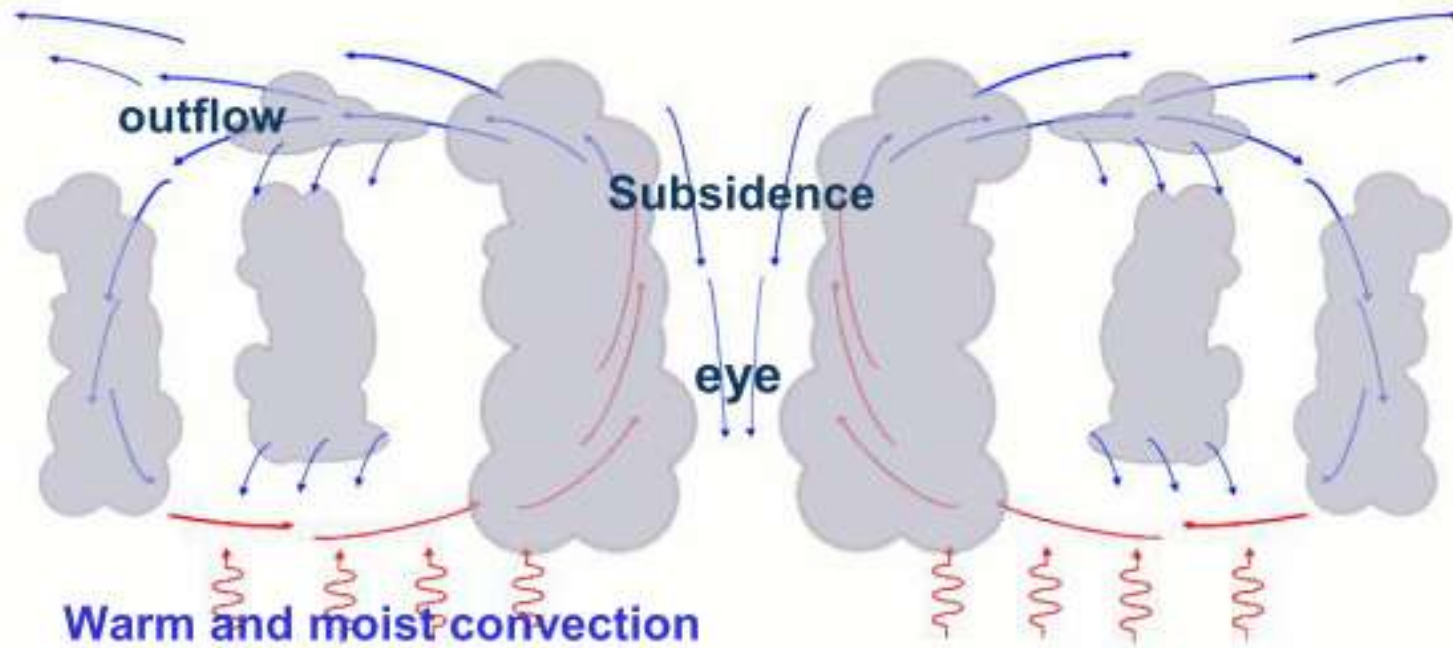
"E": Efficiency peak

SC droplet diameter (μm)



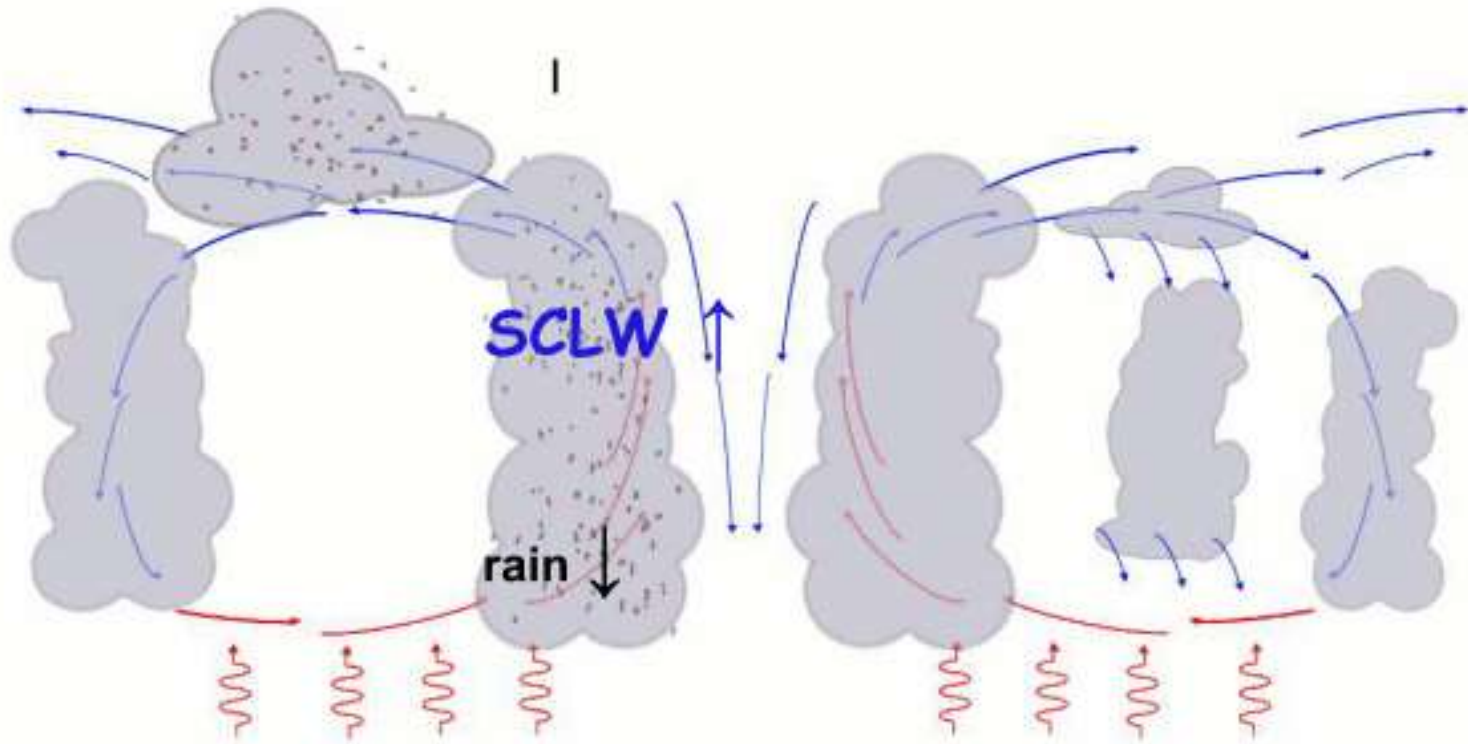
"M": SCLW peak
"O": Precipitation peak

The Hypothesis

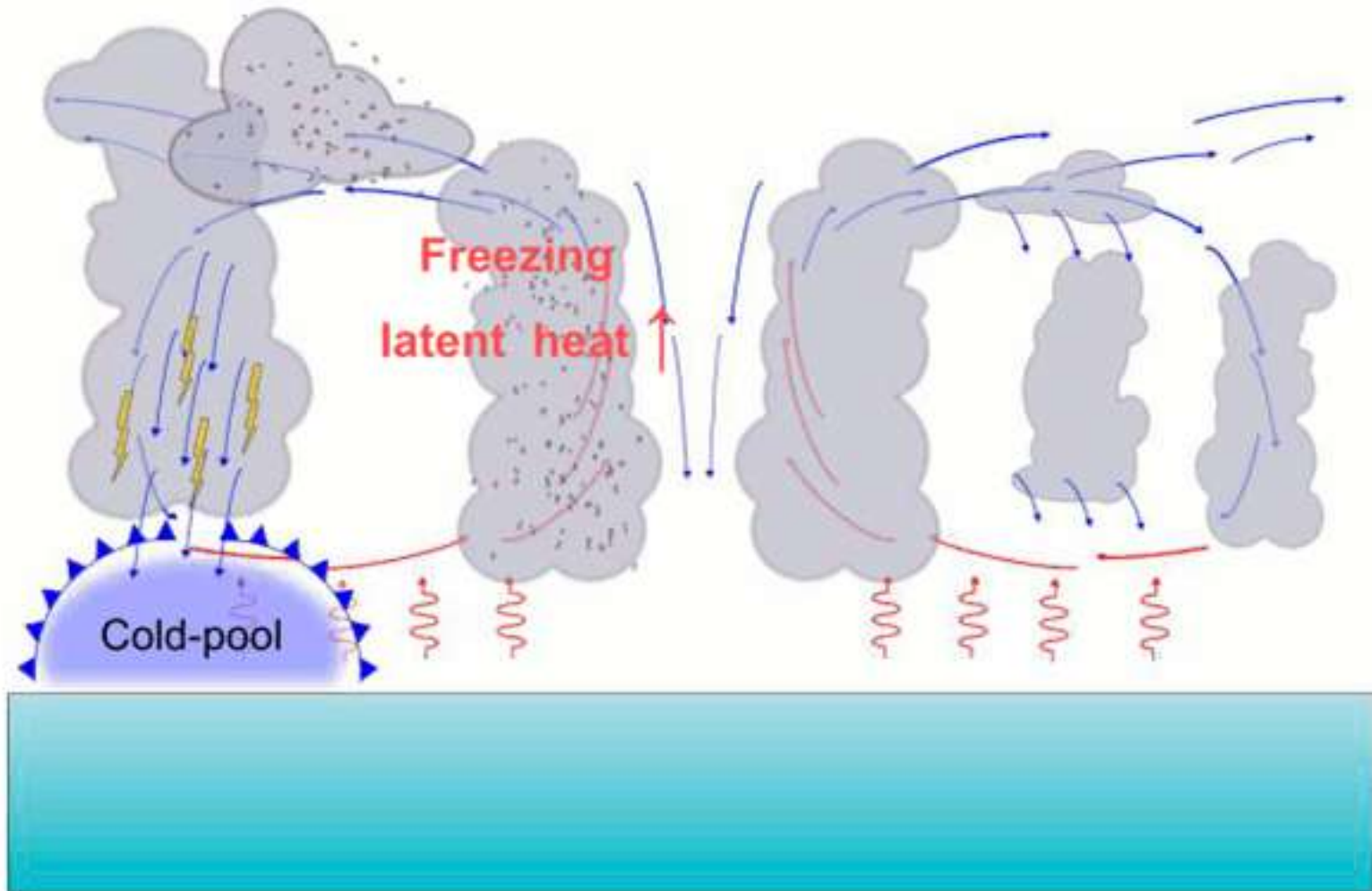


Warm ocean waters

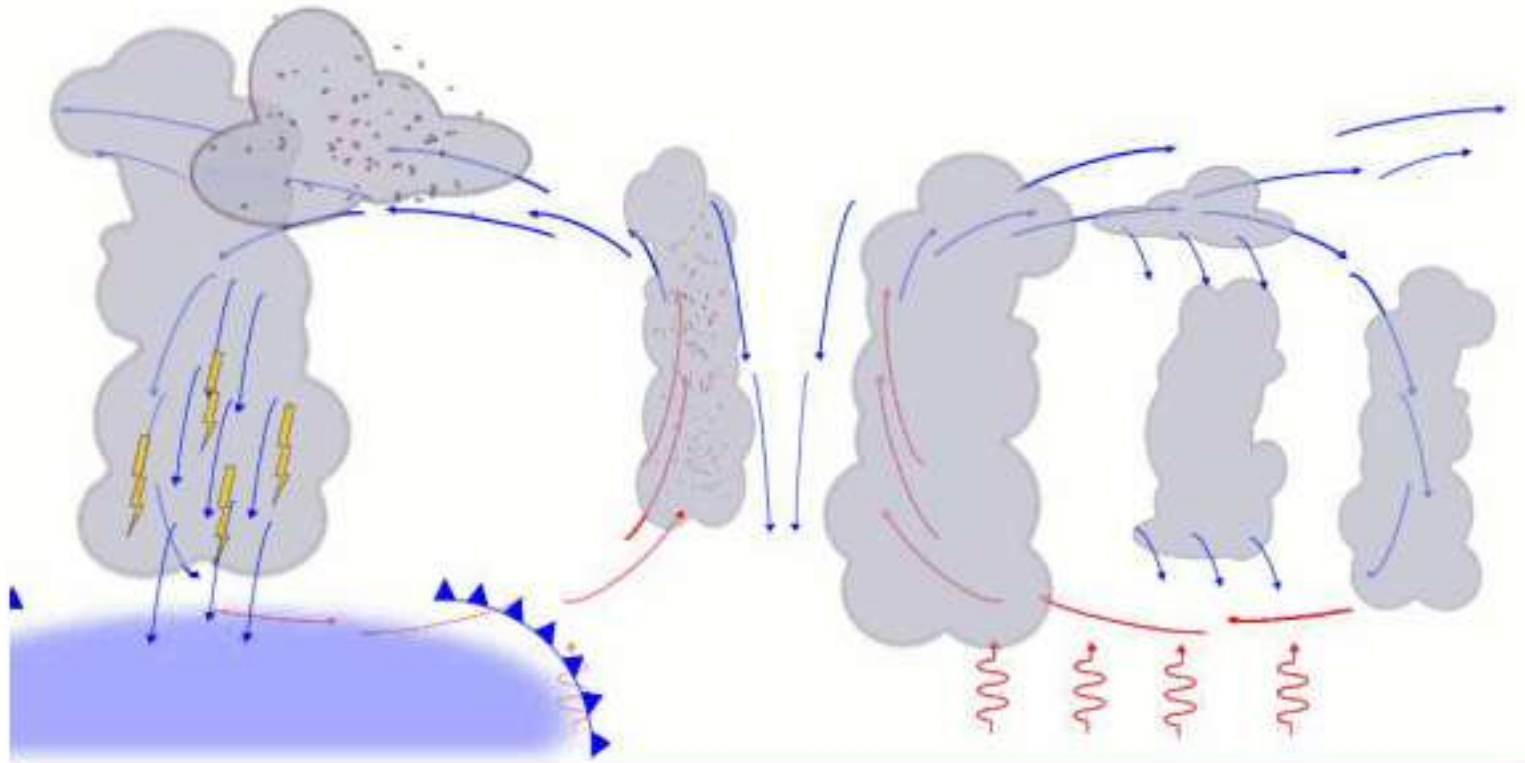
After introducing CCN's



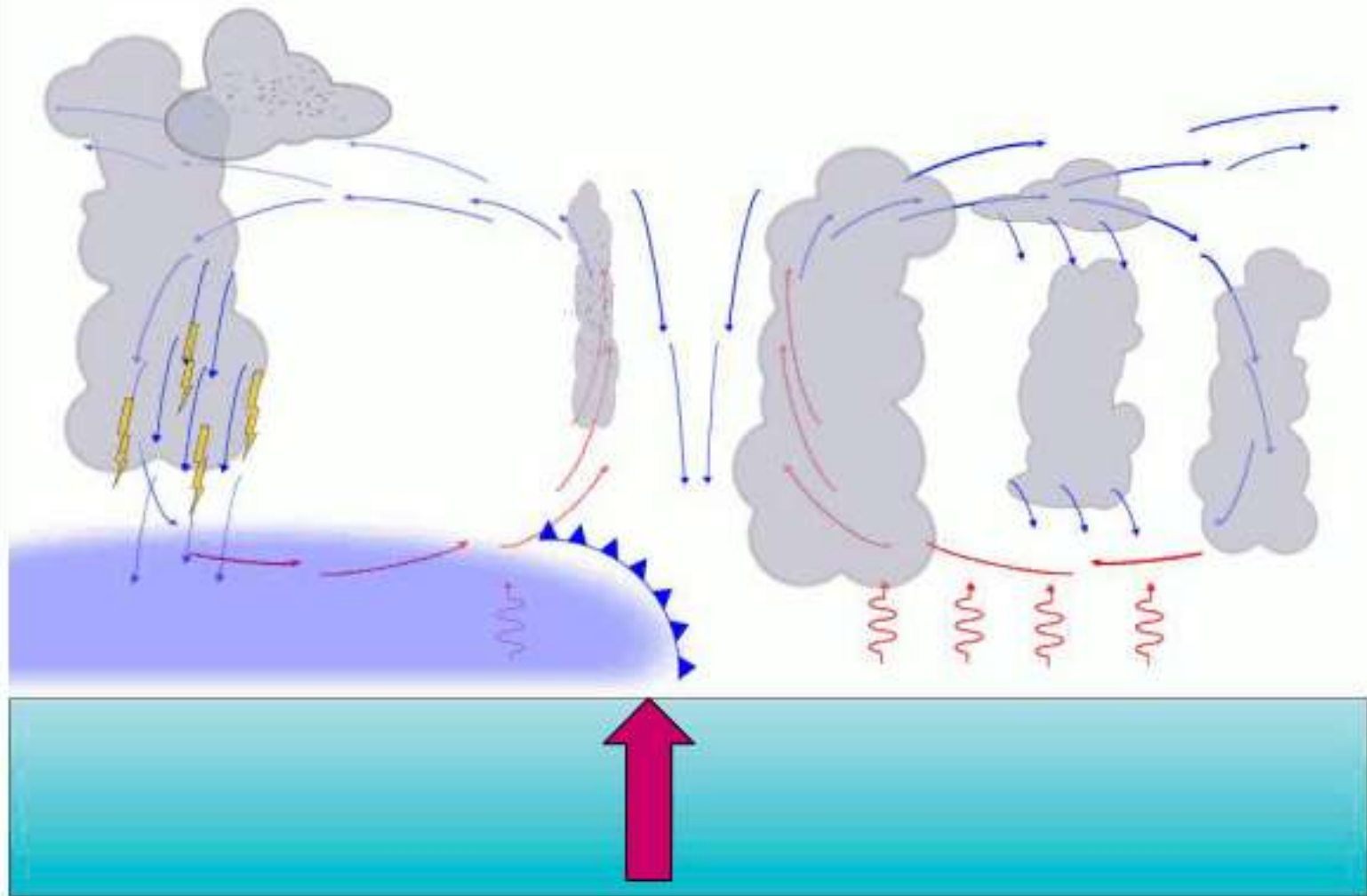
More precipitation in the rainbands



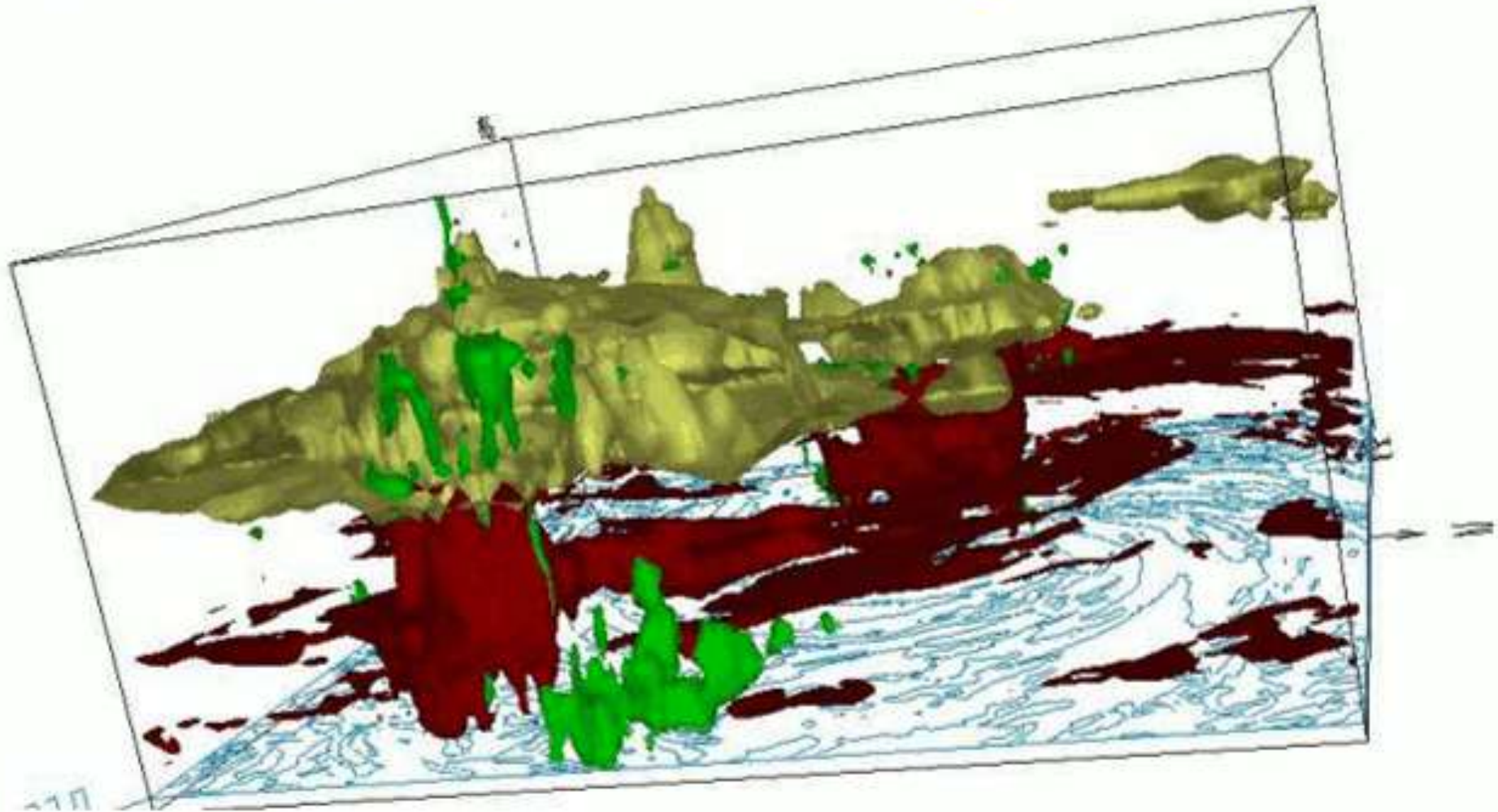
The largest *cold-pools* propagate



The energy source is blocked



Downdrafts linked to the largest cold pools



Seeding time=39h

8000/cc

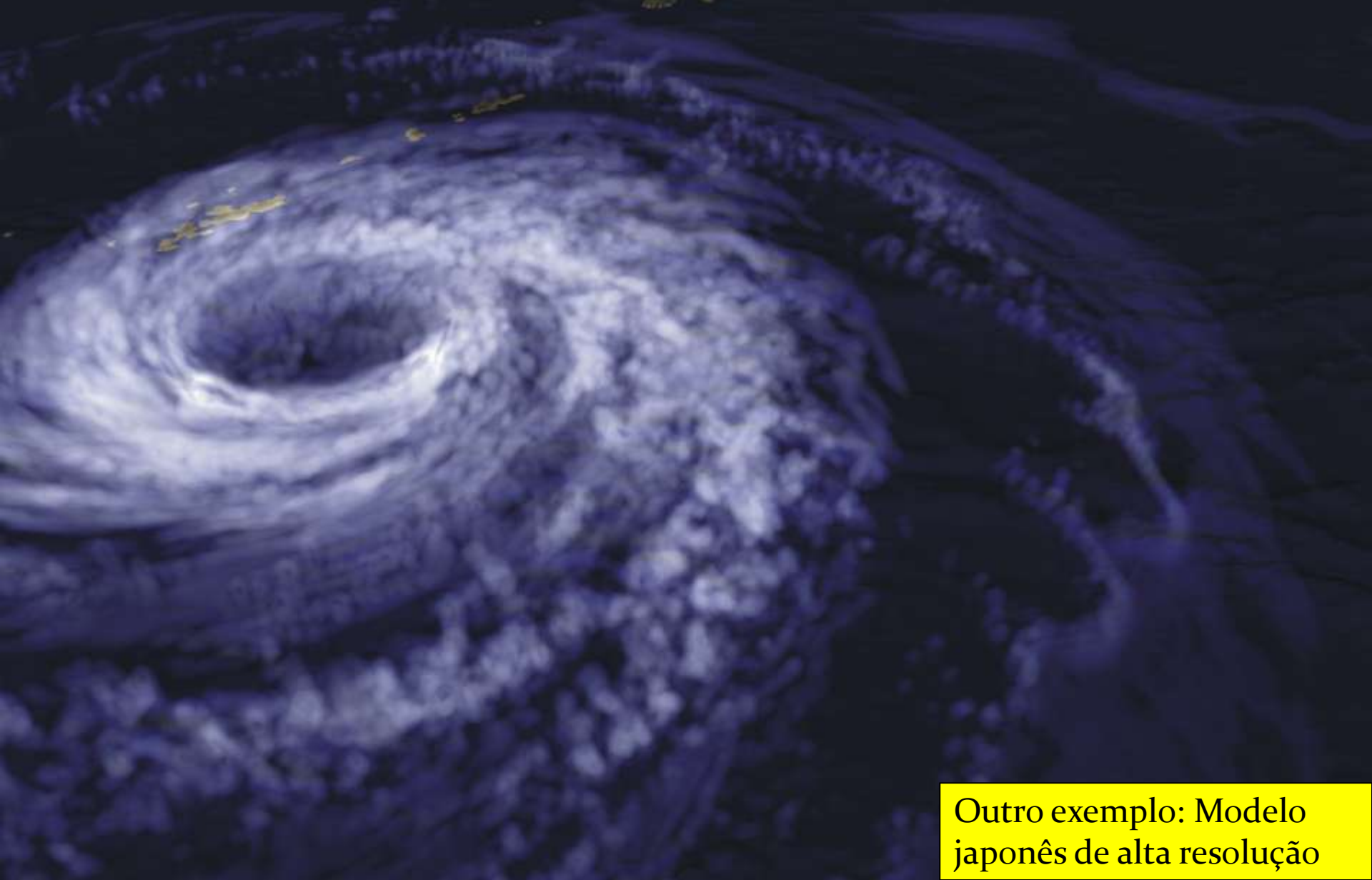
t=65h

downdraft (-2m/s)

updraft (-2m/s)

pristine ice (0.2g/kg)

Typhoon simulation with $\Delta x=1\text{km}$:To418



Outro exemplo: Modelo japonês de alta resolução

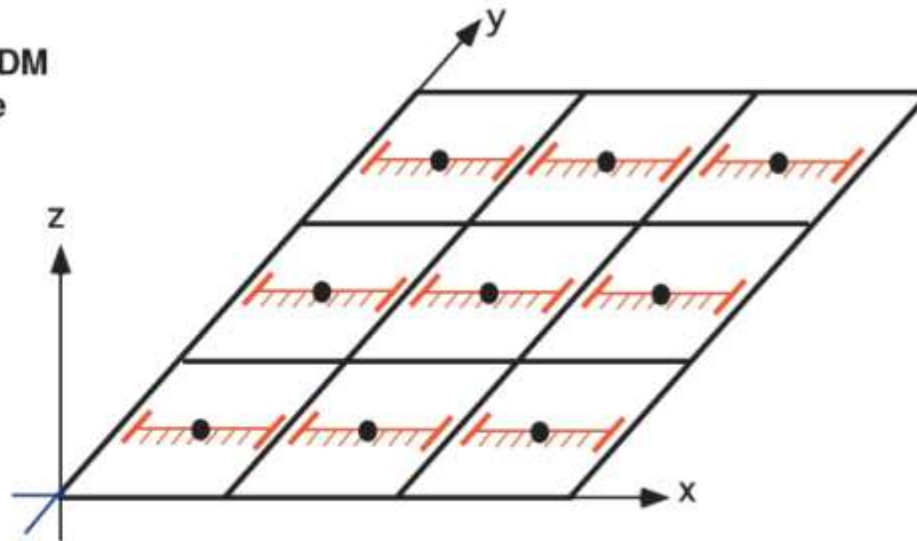
Grabowski – Super parametrização

Cloud-Resolving Convection Parameterization or Super-Parameterization

Grabowski (2001), Khairoutdinov and Randall (2001)

Application of
a 2D CSRМ within each column of a large-scale dynamical model (LSDM)
with periodic lateral boundary conditions

At the ● points, the LSDM
and the domain-average
of the CSRМ interact.



Concept and viewgraph from Akio Arakawa

Grabowski – Super parametrização

- Convecção profunda resolvida explicitamente
- Fração de cobertura resolvida explicitamente
- Intersecção entre camadas de nuvens calculado explicitamente

Mas...

- Um modelo global usando uma super-parameterização é 3 ordens de magnitude mais “caro” que um modelo convencional. Por outro lado, é mais fácil de paralelizar....

Compromisso

- Ao modelar a atmosfera, precisamos fazer um compromisso entre
 - Esforço computacional
 - Custo de CPU,
 - Total de tempo de máquina,
 - Consumo de memória e de espaço em disco
 - Nossa própria ambição científica.

Aulas de modelagem

- Aula 1

- Visão geral sobre meteorologia, climatologia e modelos numérico, de climáticos até CRM

• Equações básicas da atmosfera. Diferenças finitas. Teorema de Nyquist. Média de Reynolds. Convergência e estabilidade de soluções numéricas. Etc....

- Aula 2

- A parametrização de convecção. Equações de fluxo de massa. Entrainment/Detrainment. Tipos de fechamentos. Hipóteses para modelar convecção. Métodos numéricos para solução da equação de fluxo de massa.