

# Modelagem da Atmosfera

## Aula 0 – Panorama Geral

Henrique M. J. Barbosa  
IF-USP, Basílio Jafet, Sala 100  
R. 6647



# O Curso

- Nesta curso iremos abordar a ciência que rege o sistema climático global com foco em como ela é descrita nos modelos numéricos usados para previsões de tempo, clima e mudanças climáticas.
  - Iremos mostrar a grande evolução conseguida nesta área nos últimos anos, mas também algumas das limitações que ainda não conseguiram ser vencidas.
- Vamos discutir papers importantes
- Teremos trabalhos práticos (simulações numéricas)

# Ementa

- 12 aulas: 3 meses, com 1 aula por semana
- Princípios básicos
  - Equações: Navier-stokes, continuidade, termodinâmica, ...
  - Sistemas de coordenadas
  - Soluções numéricas e métodos de diferenças finitas
  - Processos subgrade
- Parametrizações dos modelos climáticos
  - Turbulência
  - Convecção
  - Biosfera
  - Radiação
- Tópicos avançados (parametrizações mais detalhadas)
  - Microfísica
  - Aerossóis
  - Química
  - Interações aerossol/micro/rad/quimica

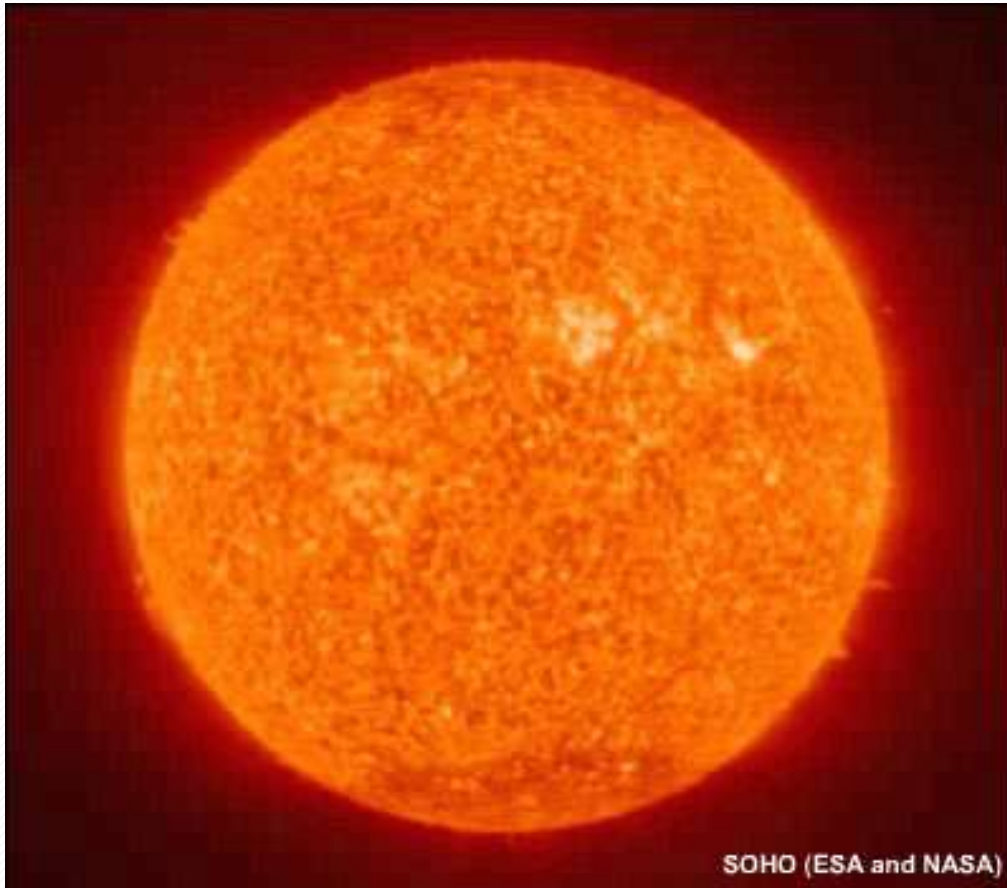
# Avaliação

- Não teremos prova
- Algumas (ou parte) das aulas serão apresentadas por vocês (discussão de papers)
- Exercícios práticos com modelos numéricos
  - Global
  - Brams
  - Micro física em coluna (Kid+TAU)
  - Parcela (Theo)
  - Radiação em coluna (Sbdart, ESRAD)
  - Etc...

# Material

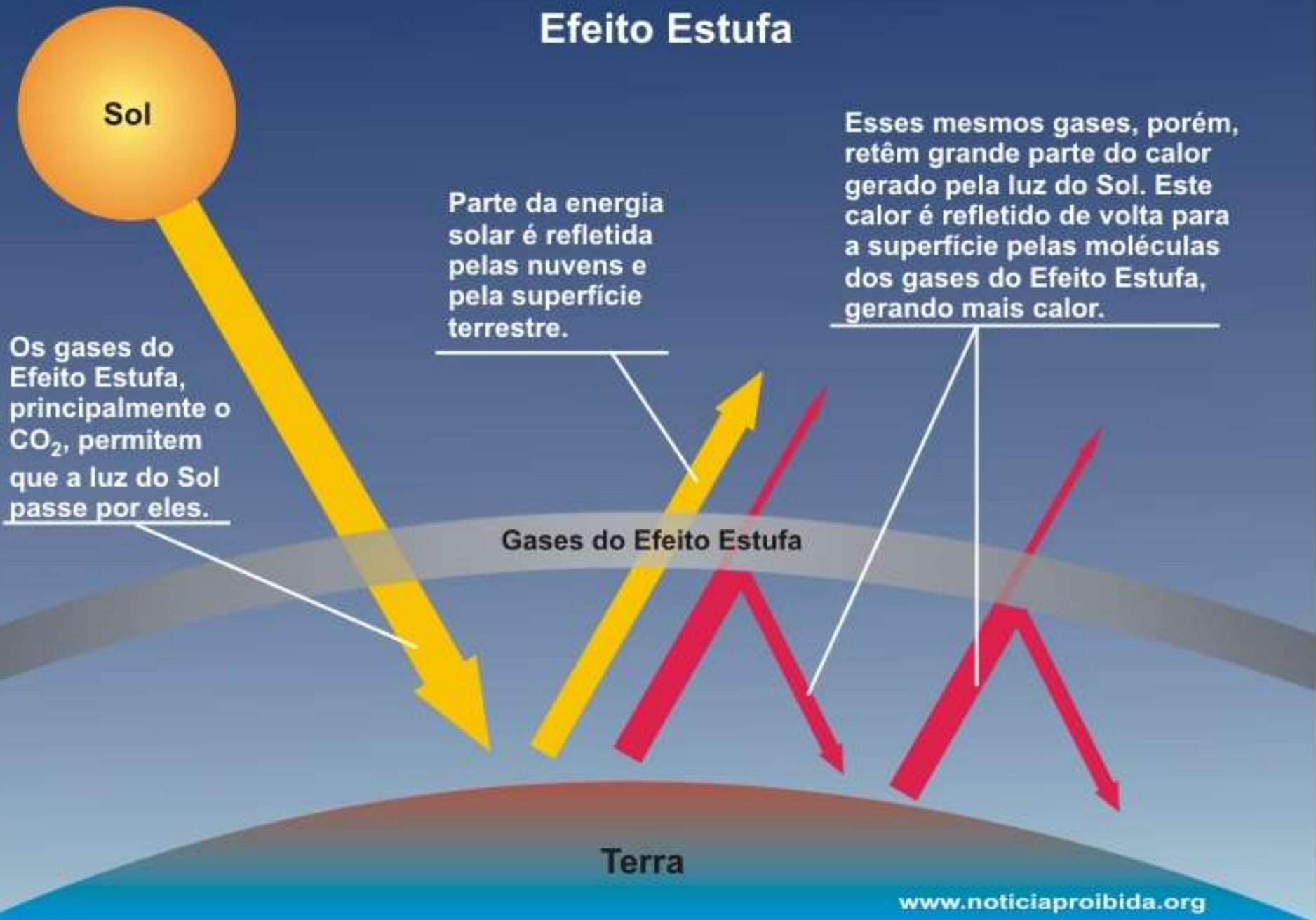
- Não vou reinventar a roda... Vamos mais ou menos seguir alguns livros clássicos:
  - Jacobson, “*Fundamentals of Atmospheric Modeling*”
  - Seinfeld and Pandis, “*Atmospheric Chemistry and Physics*”
  - McGuffie and Henderson-Sellers, “*A climate modeling primer*”
- Papers clássicos:
  - Lacis & Hansen, 72 (radiacao)
  - Mellor & Yamada, 82 (pbl)
  - Xue et al, 1991 (biosfera)
  - Grell & Devani, 2002 (conveccao)

# O Sol é a nossa fonte de energia



Sem o Sol, a temperatura na Terra seria  $-270^{\circ}\text{C}$

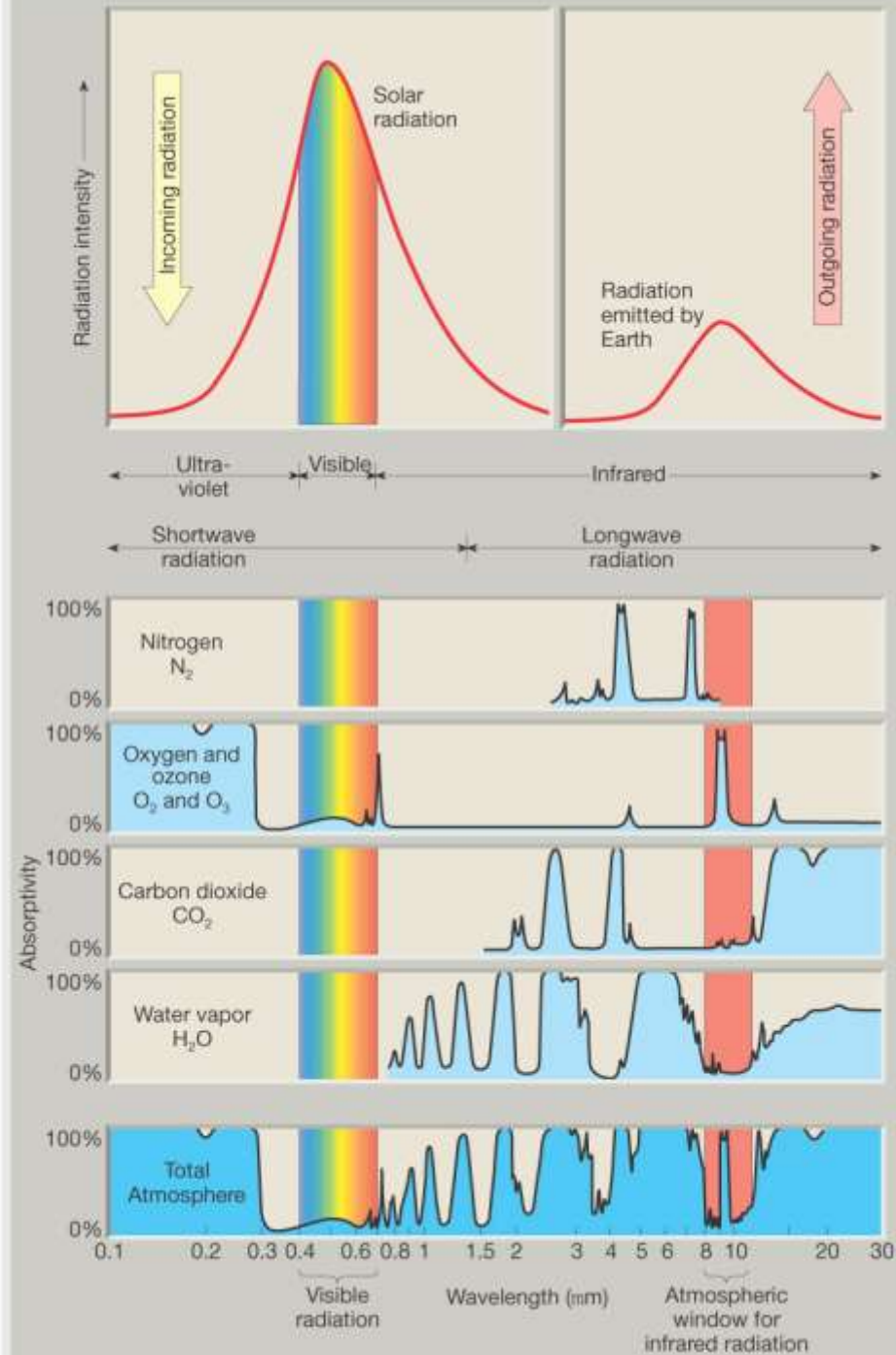
# Efeito Estufa





# Efeito Estufa

- 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  $-18^{\circ}\text{C}$
- Com o efeito estufa, ela fica em torno de  $+15^{\circ}\text{C}$





# Transferência radiativa

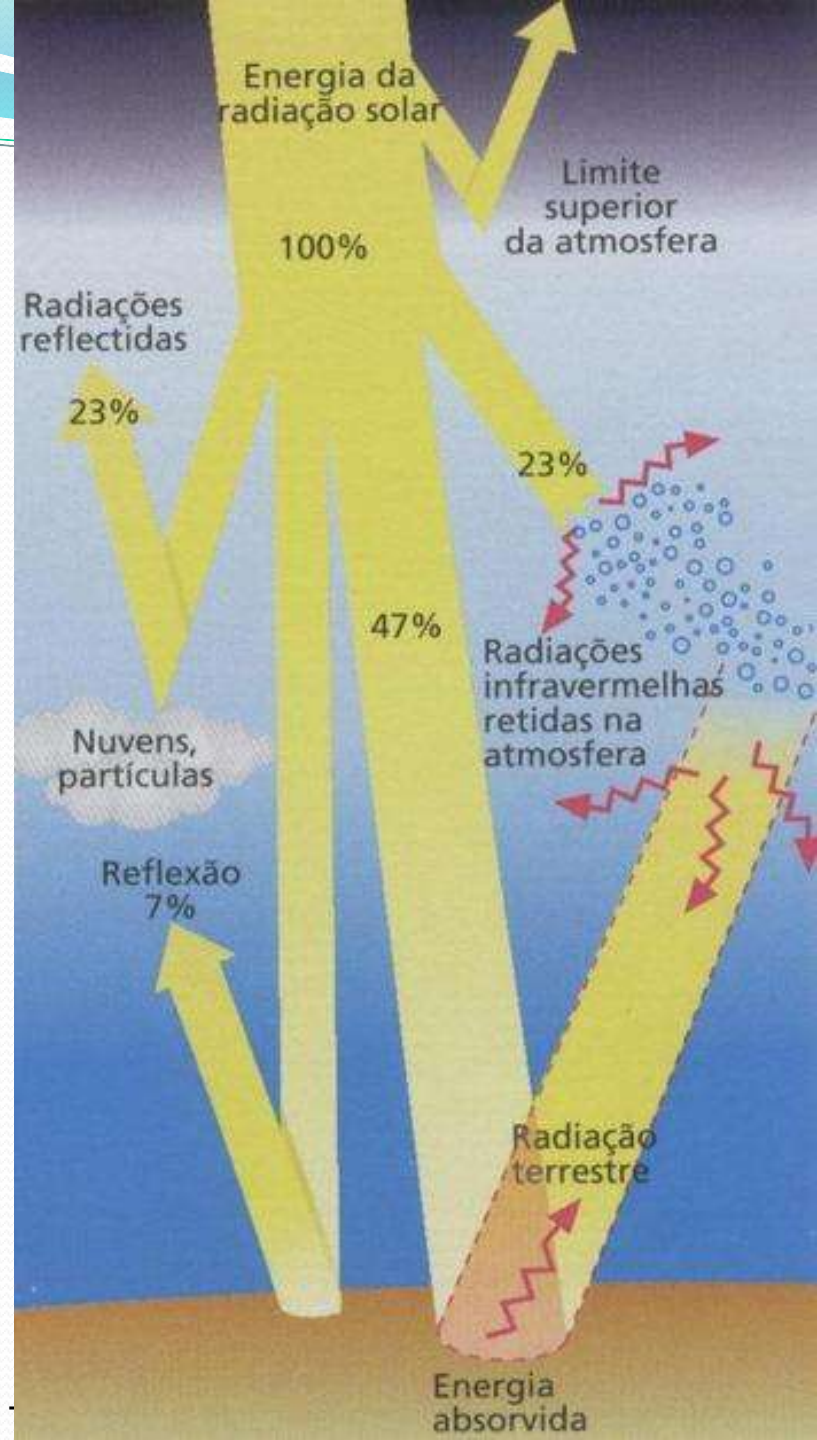
- A teoria eletromagnética explica a absorção e o espalhamento da energia (radiação) que chega do sol.
- Usando a equação de transferência radiativa:

$$dE_\nu = I_\nu(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{n}}, t) \cos \theta \, d\nu \, da \, d\Omega \, dt$$

- É possível medir no laboratório as propriedades de absorção e espalhamento dos gases. Medimos também, em campo, os fluxos de energia e calculamos o balanço de radiação.

# Balanço de Energia

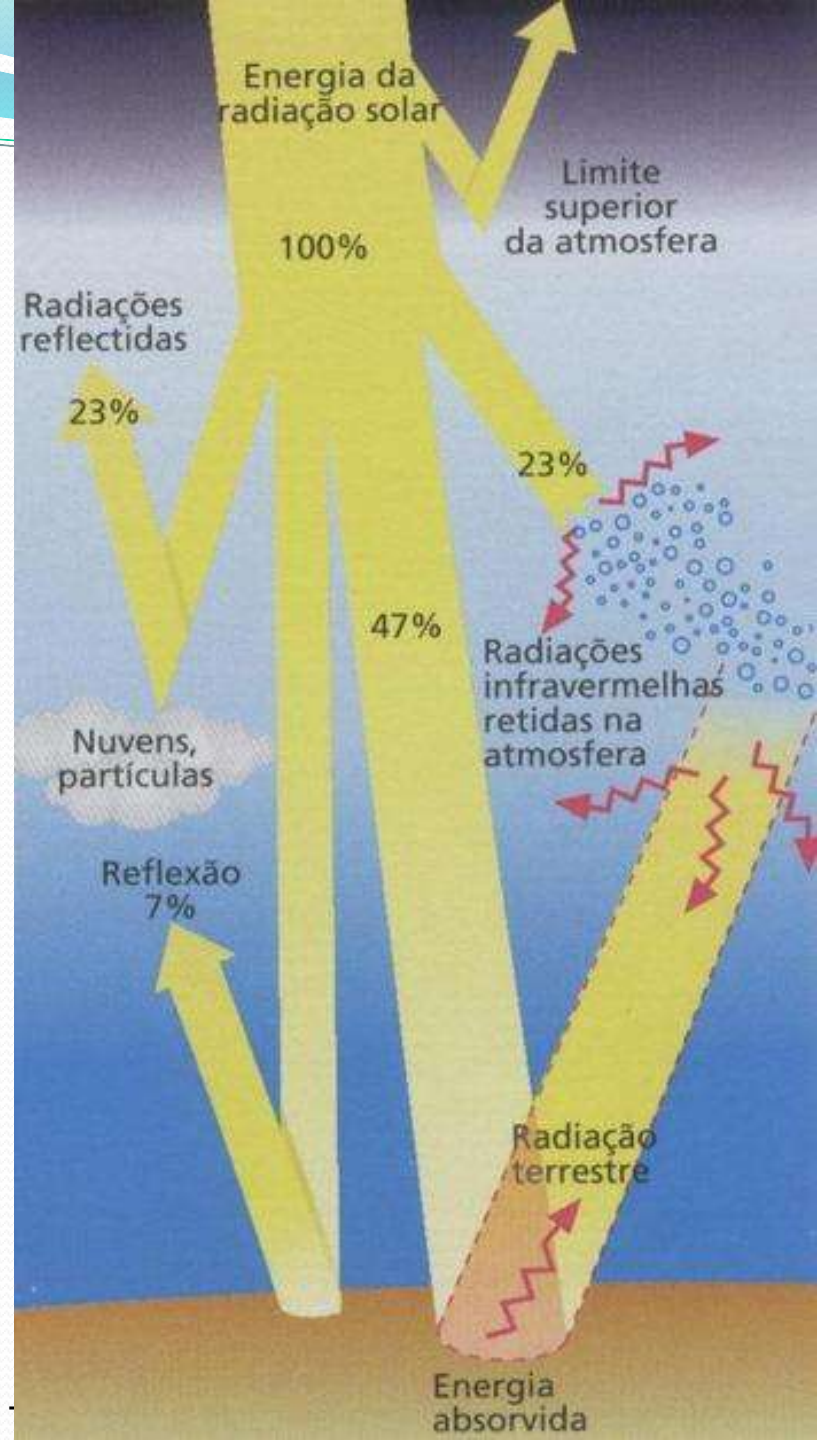
- A energia do sol vem na forma de radiação eletromagnética
  - Ultra-violeta
  - Visível
  - Infra-vermelho
- A energia perdida na forma de calor depende da temperatura da Terra
- Em média, a energia absorvida pela Terra é igual a perdida
  - Temperatura está em equilíbrio



# Balanço de Energia

A energia é repartida:

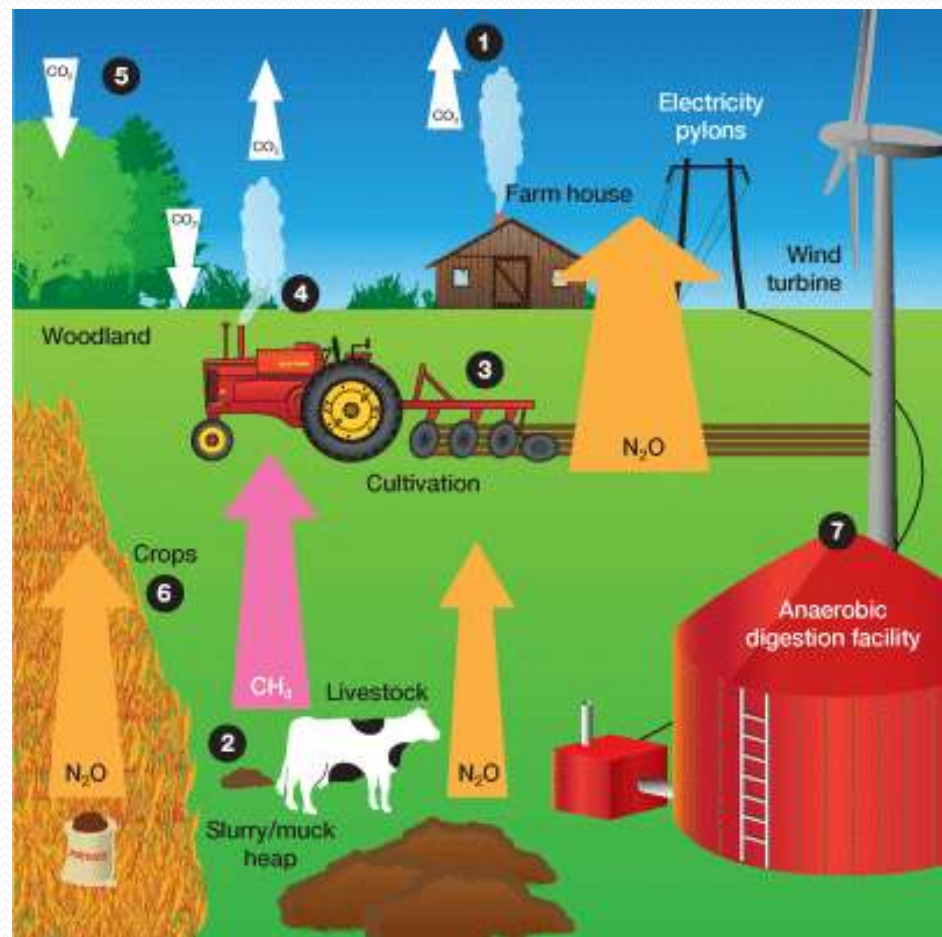
- 30% é refletida pelas nuvens, pela atmosfera ou pela superfície e volta para o espaço
- 50% atravessa a atmosfera e é absorvida na superfície
- 20% é absorvida na atmosfera pelos gases e nuvens





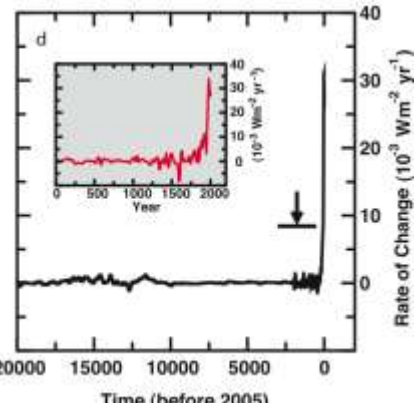
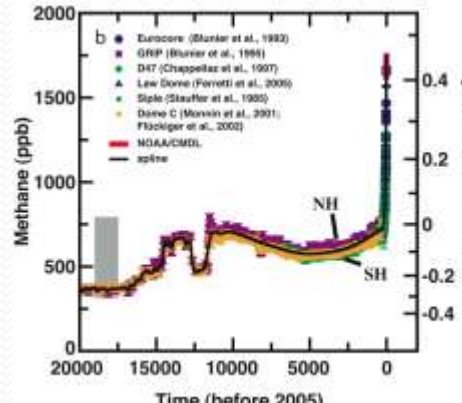
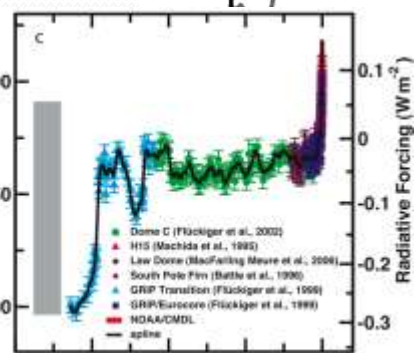
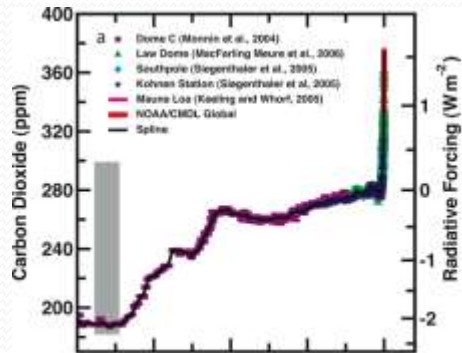
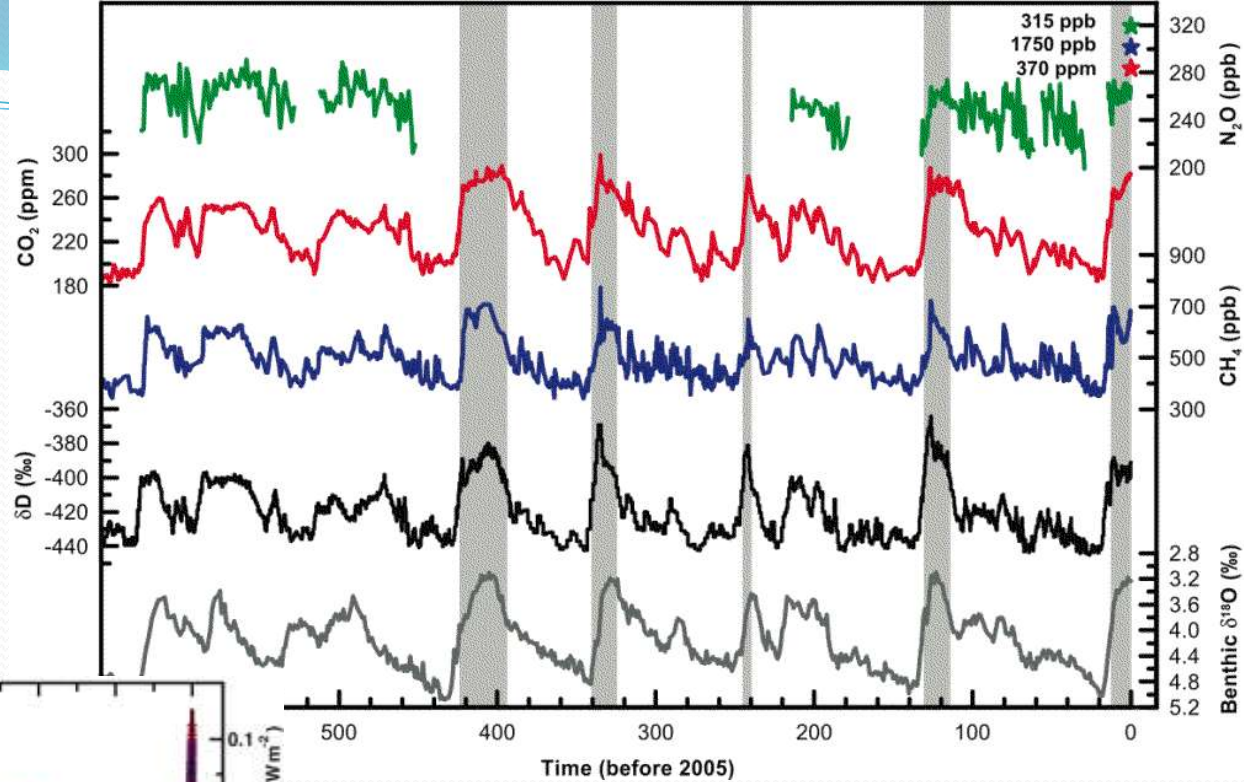
# Mudanças Climáticas

- Quando emitimos gases de efeito estufa na atmosfera, parte do calor que devia ser perdido para o espaço fica preso na Terra.
- Esse calor extra esquenta a atmosfera!



# Gases

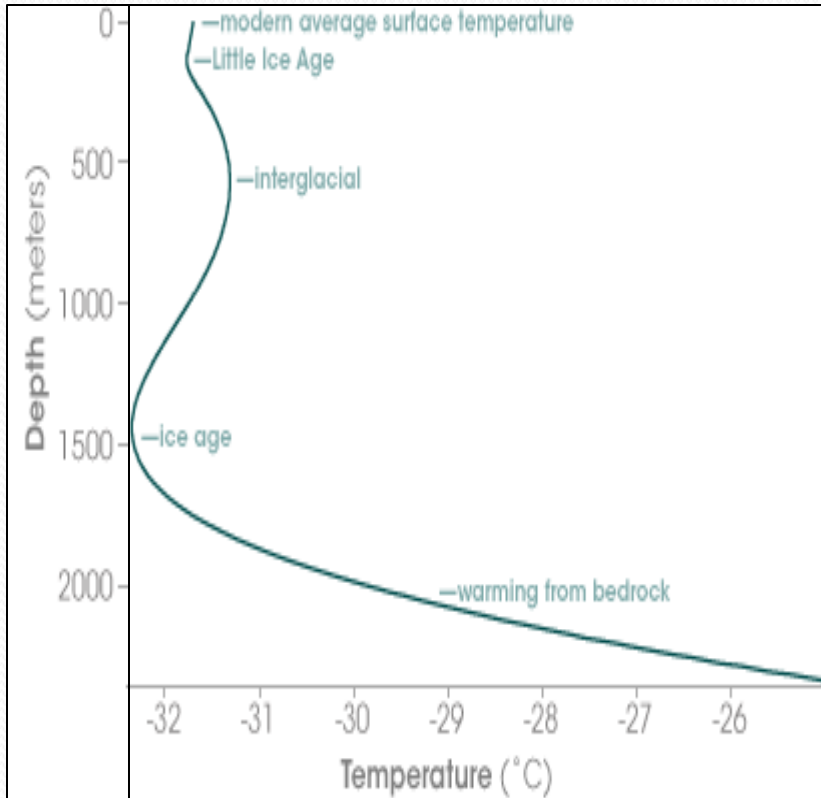
- E a mudança ocorreu depois da revolução industrial...



- Medidas experimentais mostram que a concentração de alguns gases na atmosfera está mais alta do que nos últimos 600 mil anos!



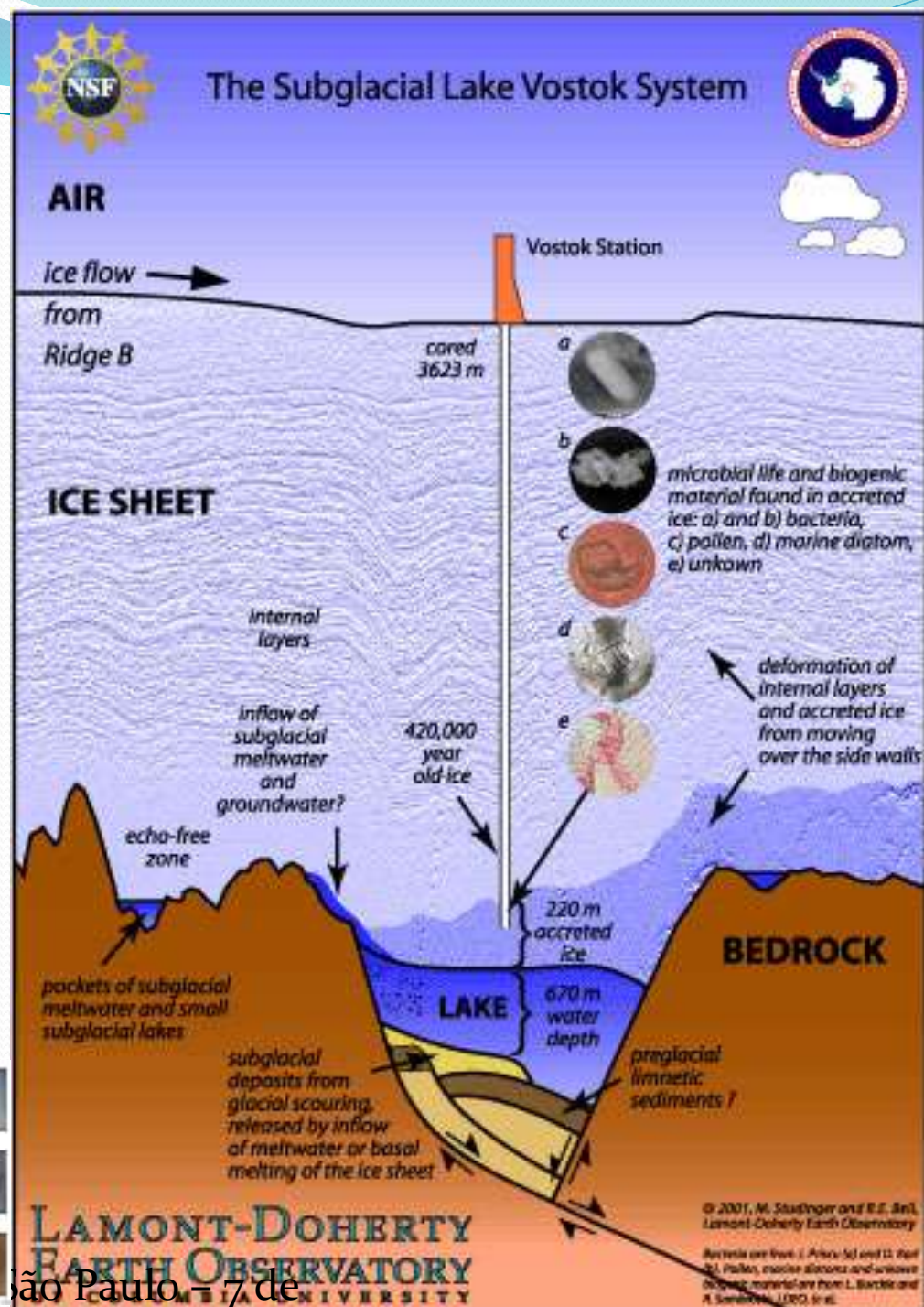
# Ice Cores



53-54m

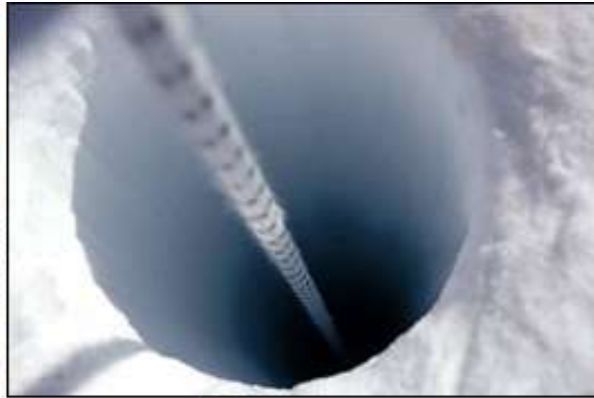
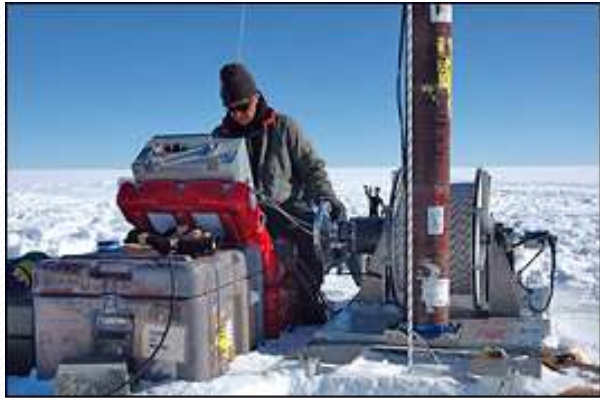
1836-1837m

3050-3051m





# Ice Cores

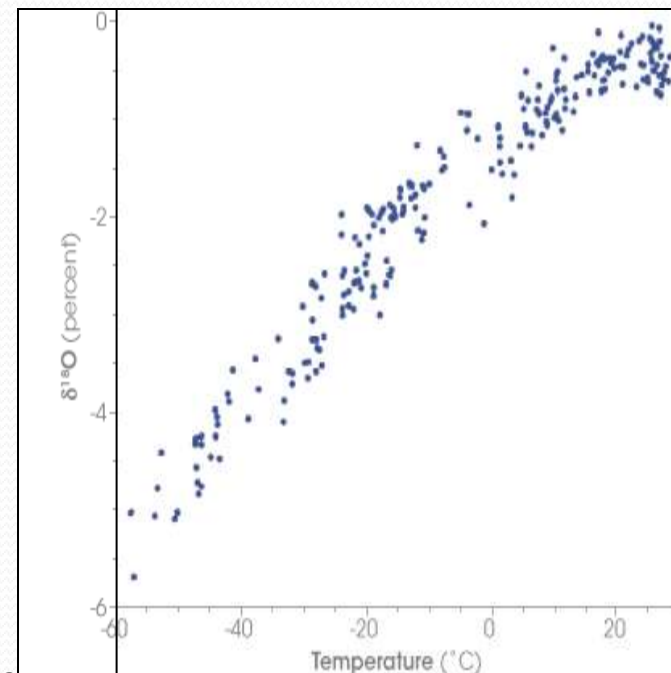


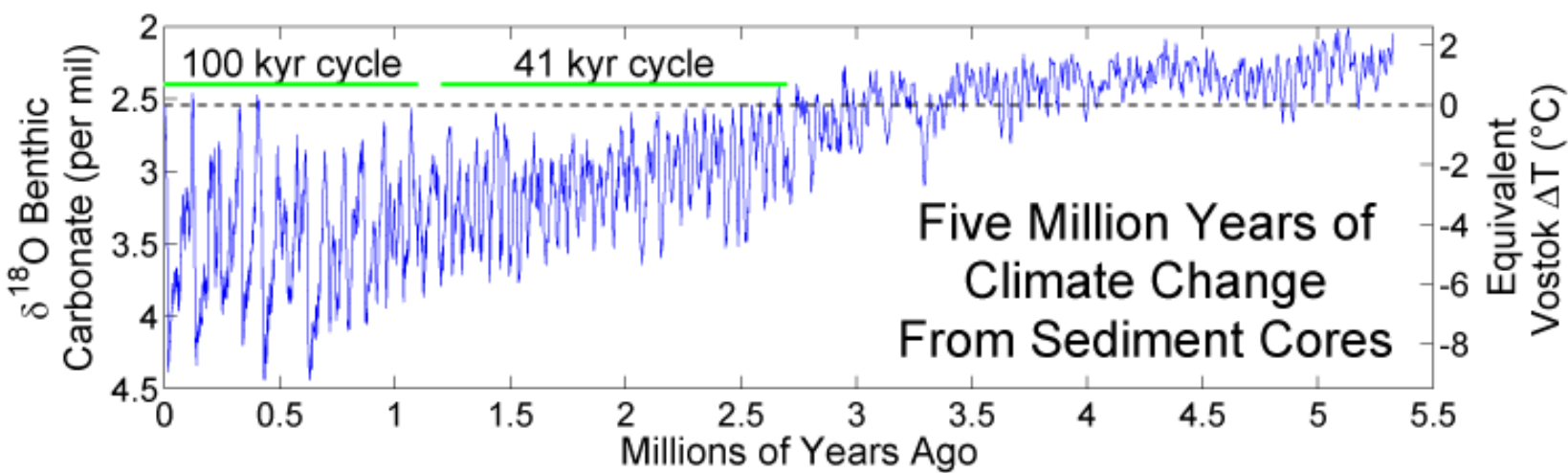
# Datação do Gelo

A molécula  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  evapora mais devagar e chove mais rápido que a molécula  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ . Por isso a chuva sobre o continente é pobre em  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ... O quanto depende da temperatura!

1. Contagem das camadas
  - Dependentes da Temperatura
  - Dependentes da Irradiação
2. Usando marcadores pré-determinados
  - Outros Ice-Cores já medidos
  - Erupções Vulcânicas
  - Etc...
3. Elementos radioativos
4. Cálculos do escoamento do gelo

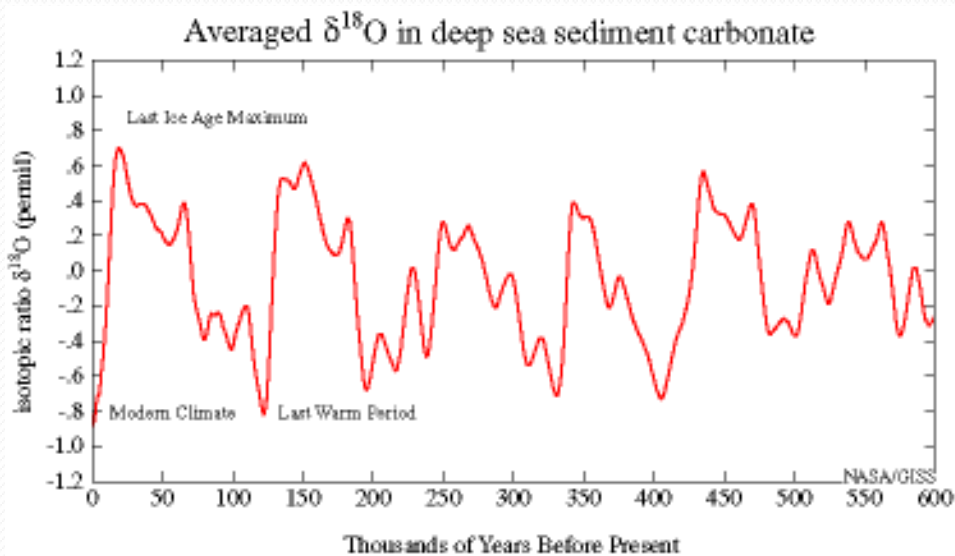
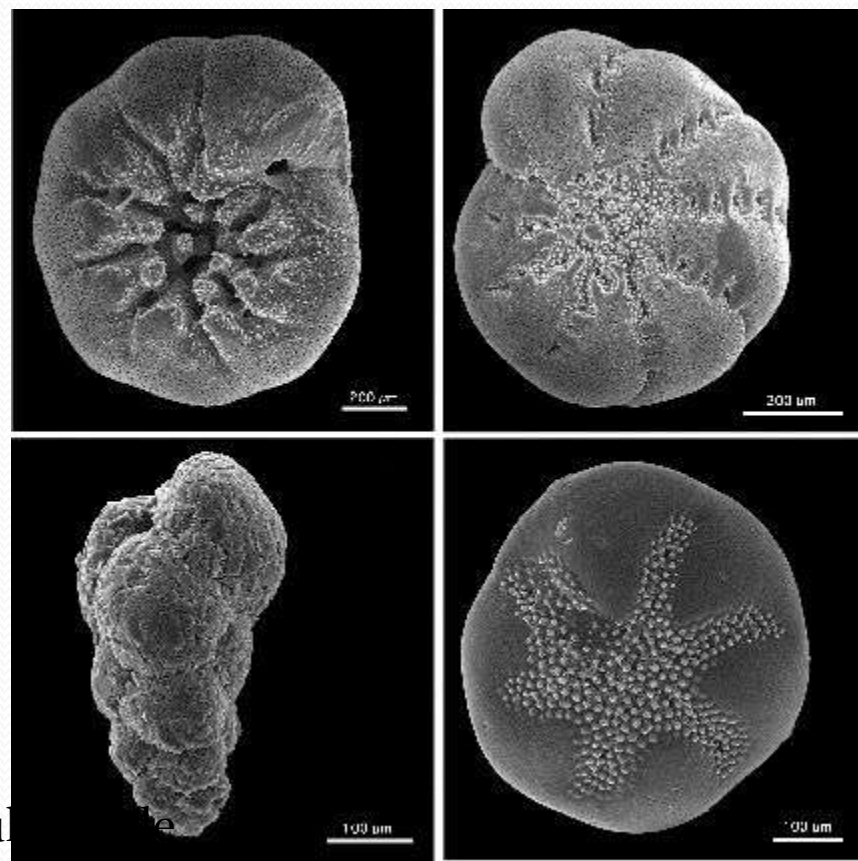
$$\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{sample}}}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) * 1000 \text{ ‰}$$





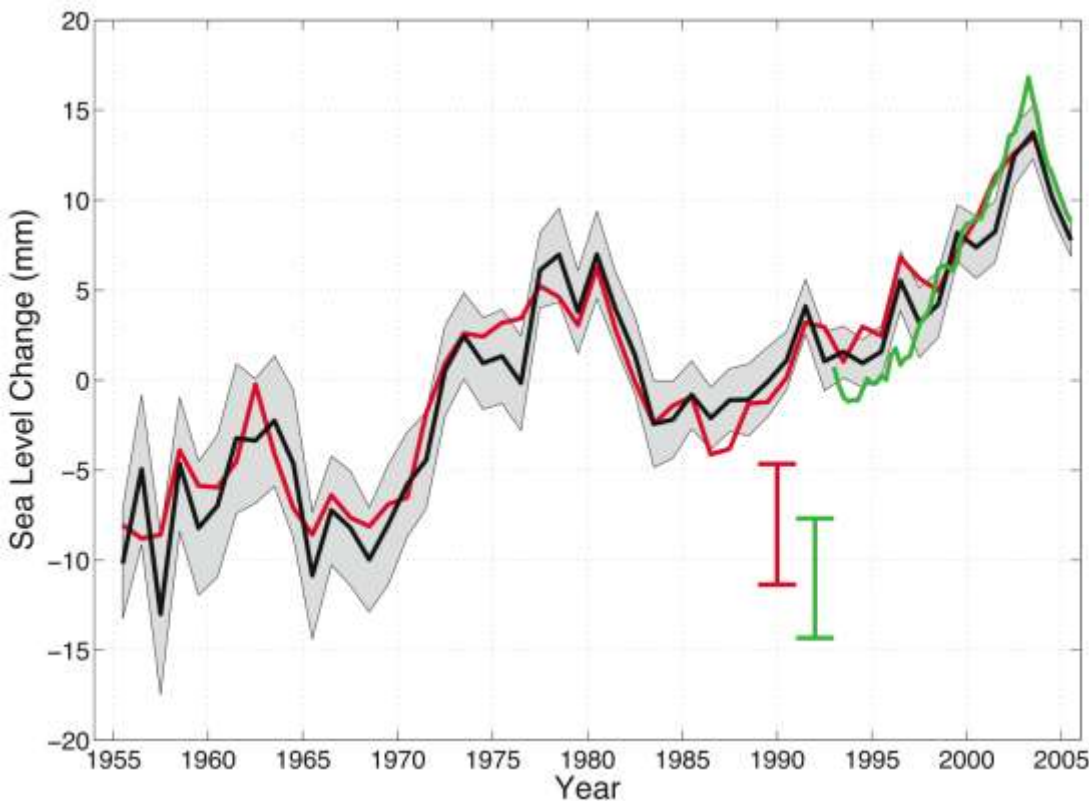
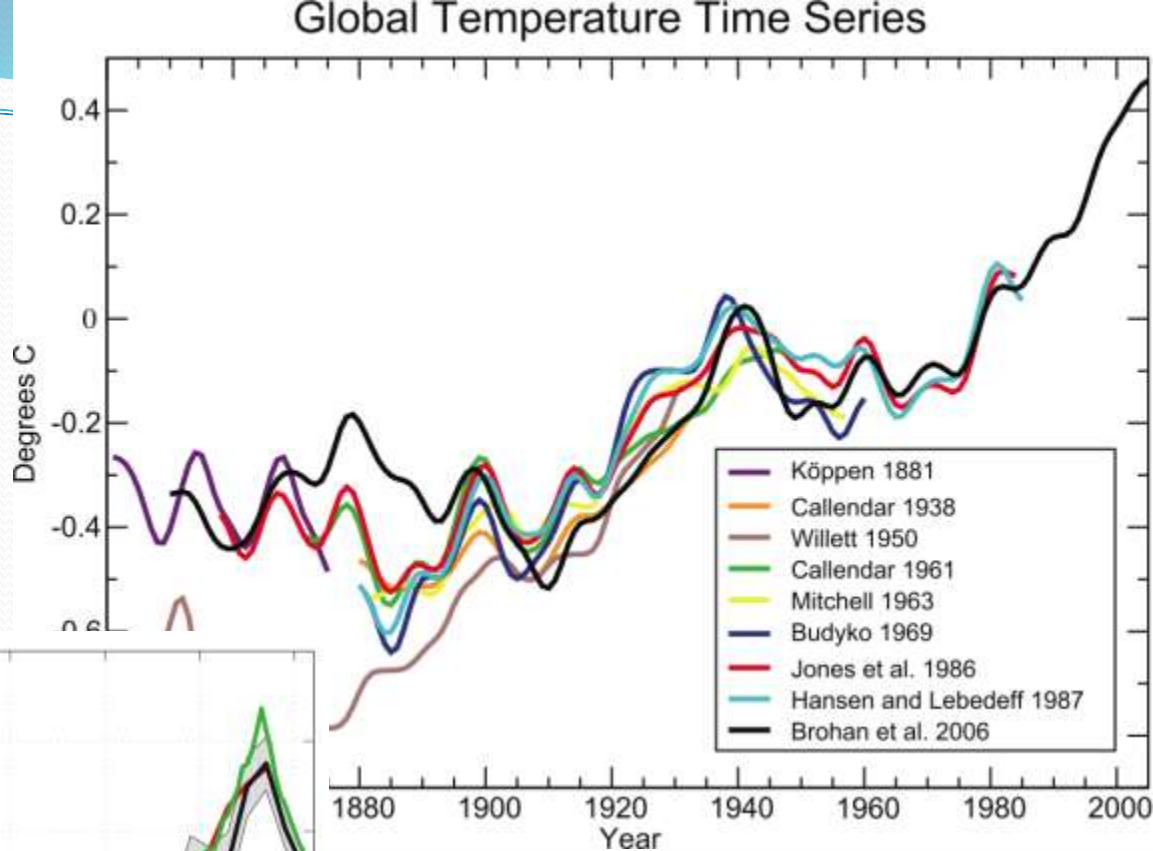
# Sedimentos no Oceano

A casca das Foraminíferas é de CaCO<sub>3</sub>





# Impactos



- Já existem medidas também que mostram um aumento da temperatura e do nível do mar

# Previsões de Mudanças Climáticas

- OK, temos observações...
- MAS como podemos fazer uma previsão do que vai acontecer no futuro devido as mudanças climáticas??

É “simples”... Basta fazer uma previsão de tempo para os próximos 100 anos, ao invés dos próximos 5 dias

Vamos tentar entender como uma previsão de tempo é feita

# Previsão de tempo

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

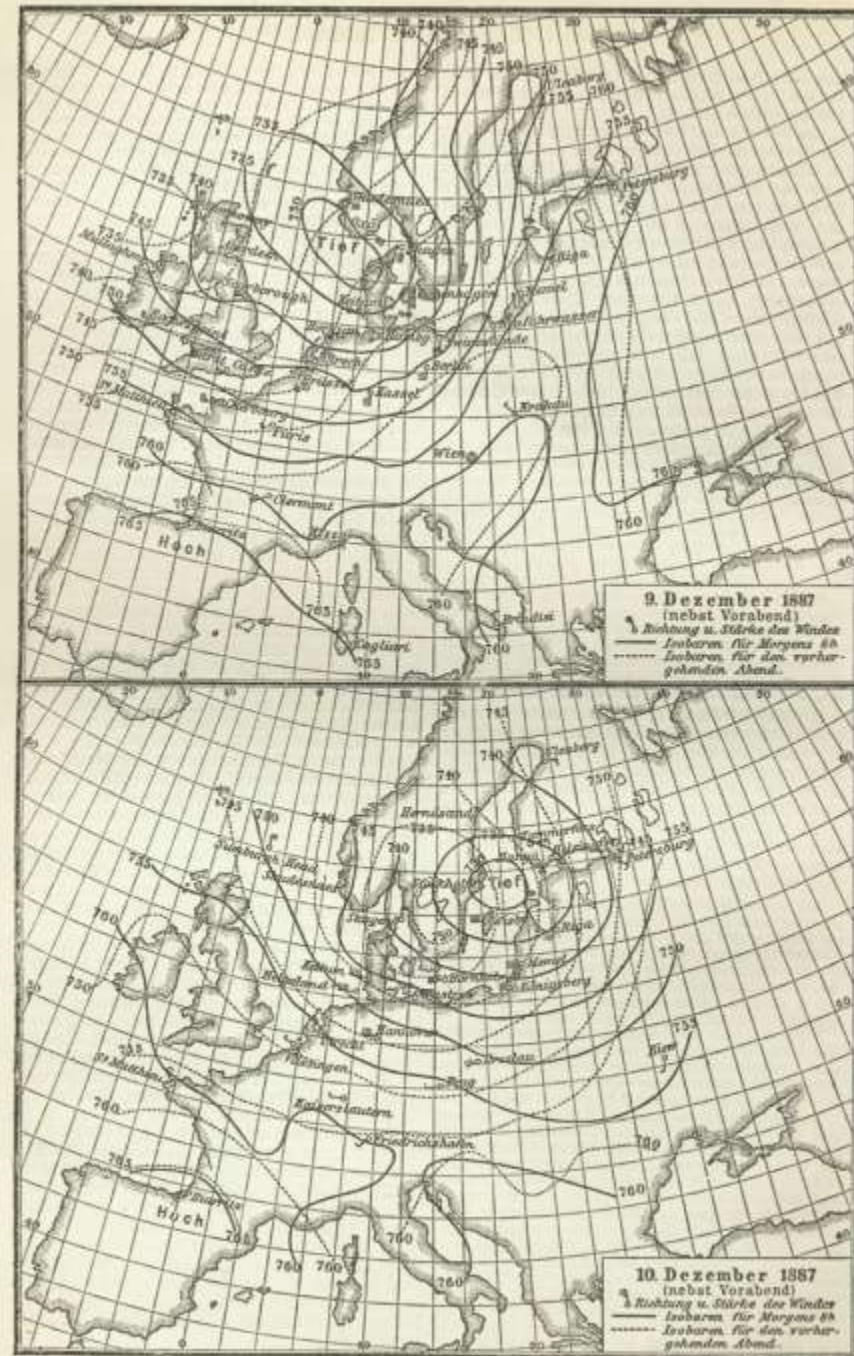
A era moderna da previsão de tempo surge em 1835 com o telégrafo

- Na segunda metade do século XIX, EUA e Inglaterra já faziam previsões de tempo de maneira sistemática
- Em 1922, Lewis Fry Richardson propôs que deveria ser possível fazer uma previsão numérica de tempo usando as equações da física.



# Previsão para a Europa 9 e 10 de dezembro de 1887

Henrique Barbosa – Estação Ciência – São Paulo – 7 de

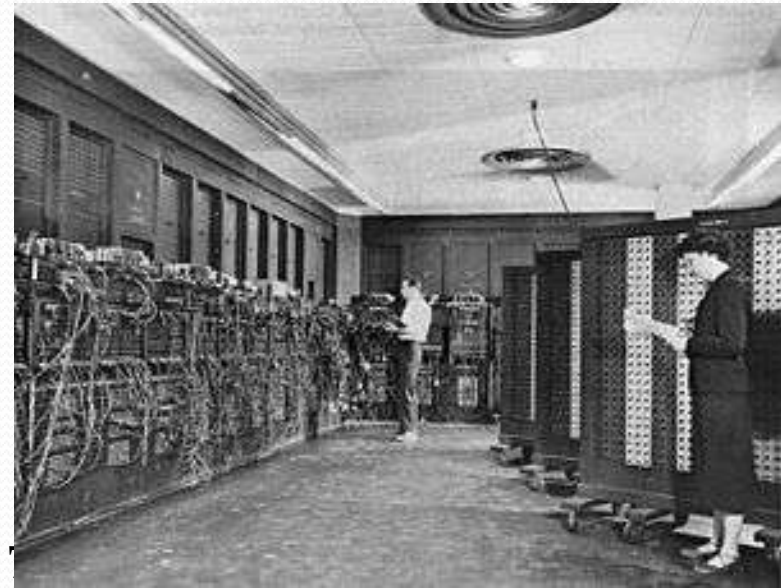


Wetterkarten vom 9 und 10. Dez. 1887 (Zust. Ge. Schmidt)

# 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 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?  
... precisamos entender como a atmosfera funciona

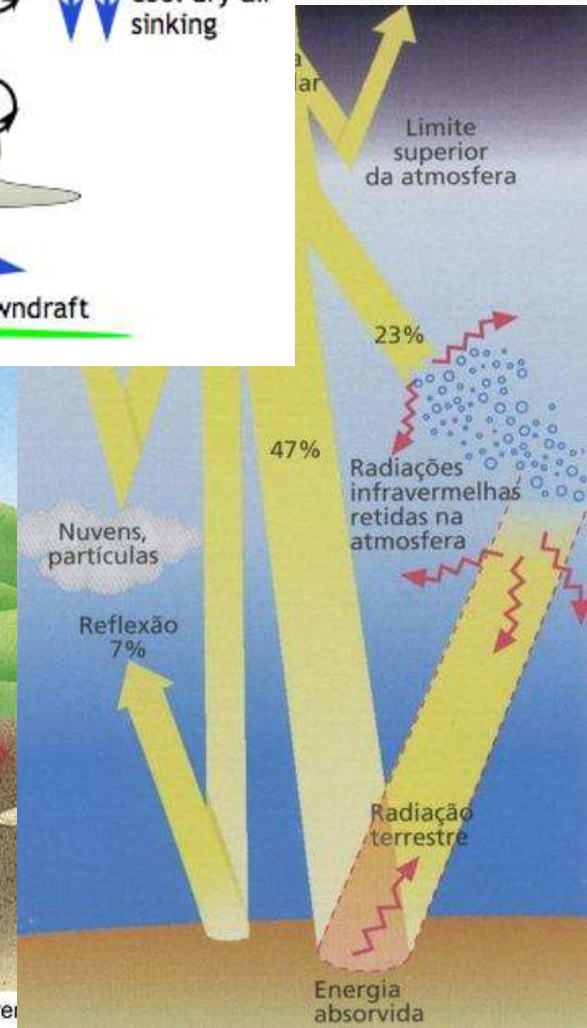
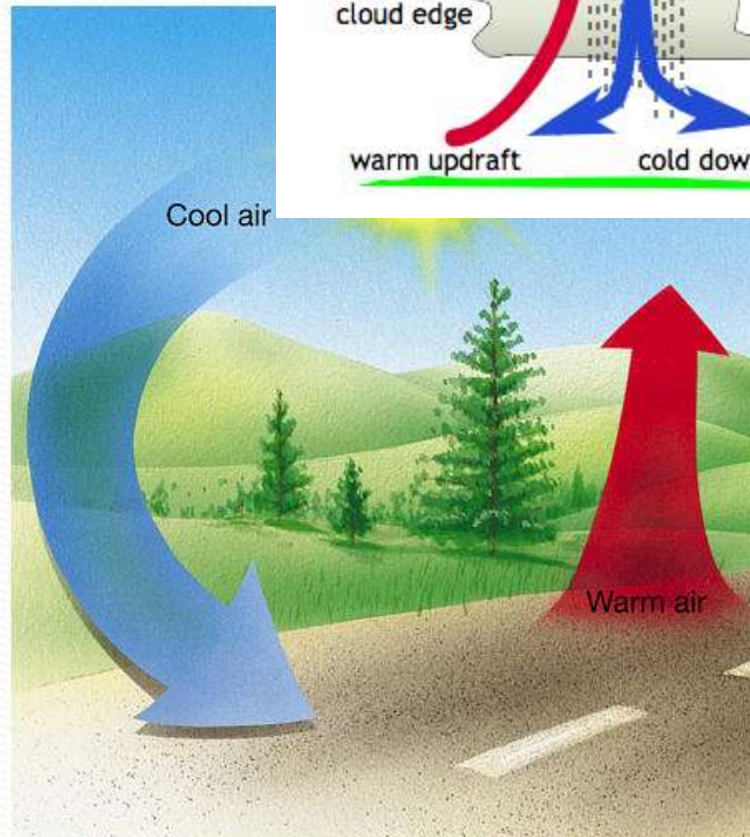
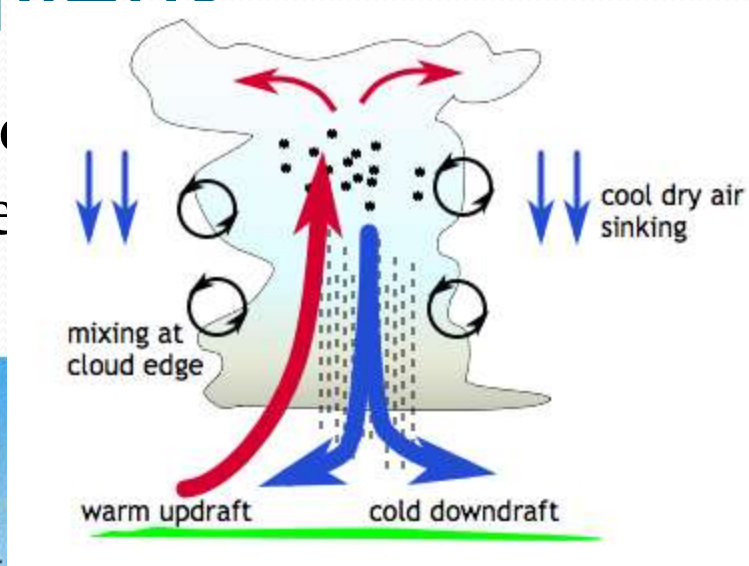




# Convecção e Nuvens

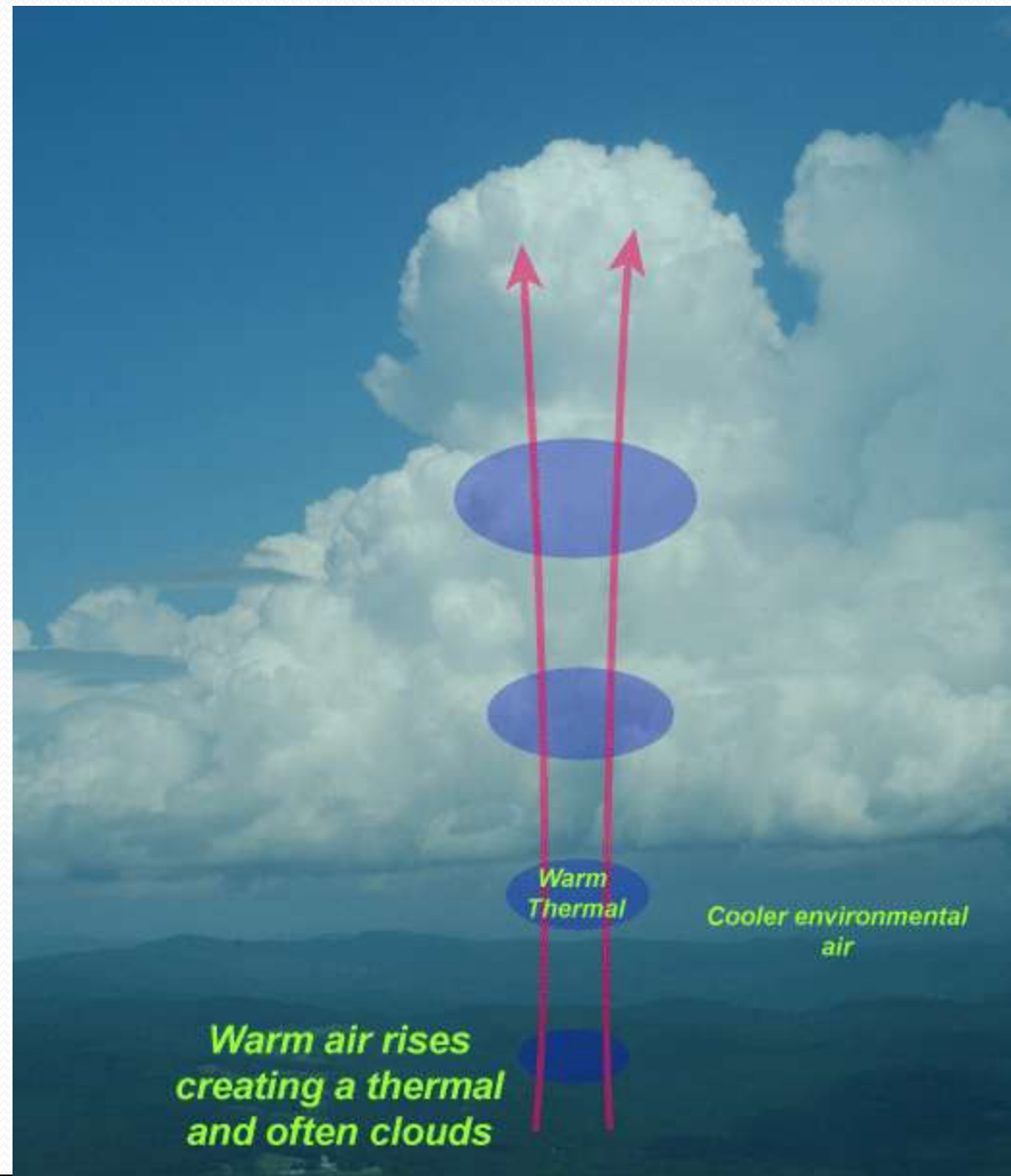
- Como a maior parte da energia solar é absorvida na superfície, estamos esquentando a atmosfera por baixo!

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

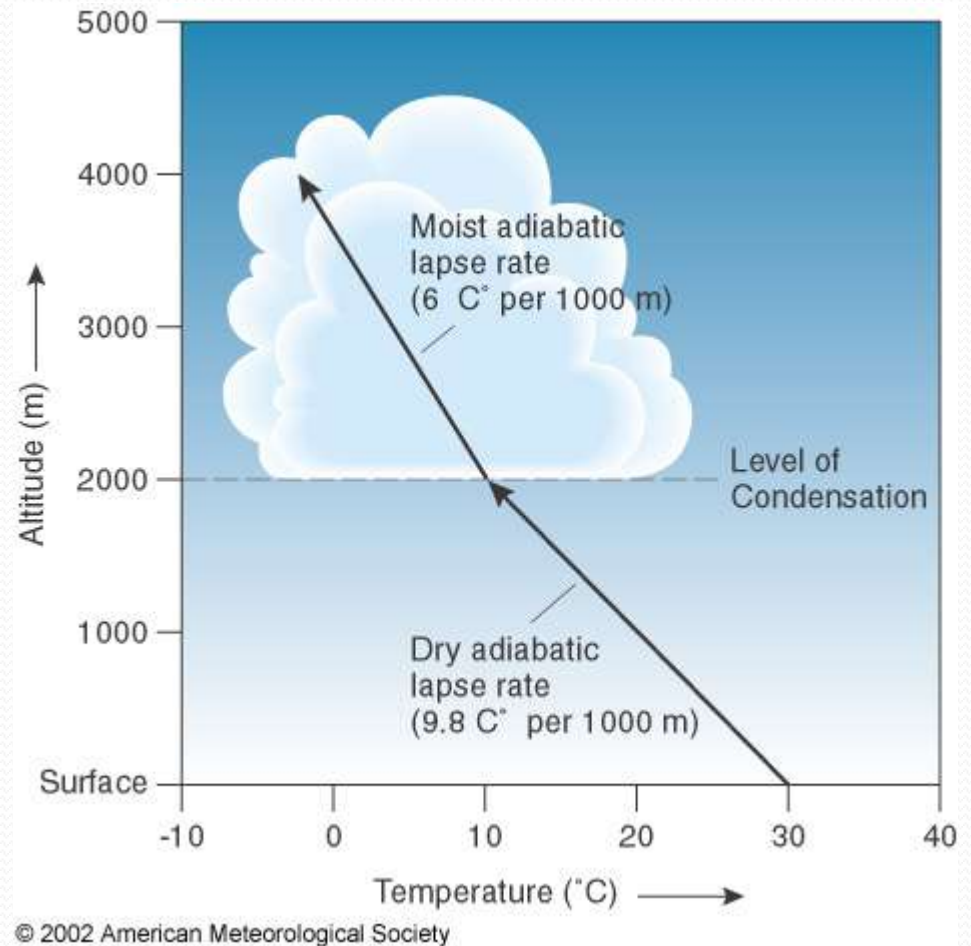
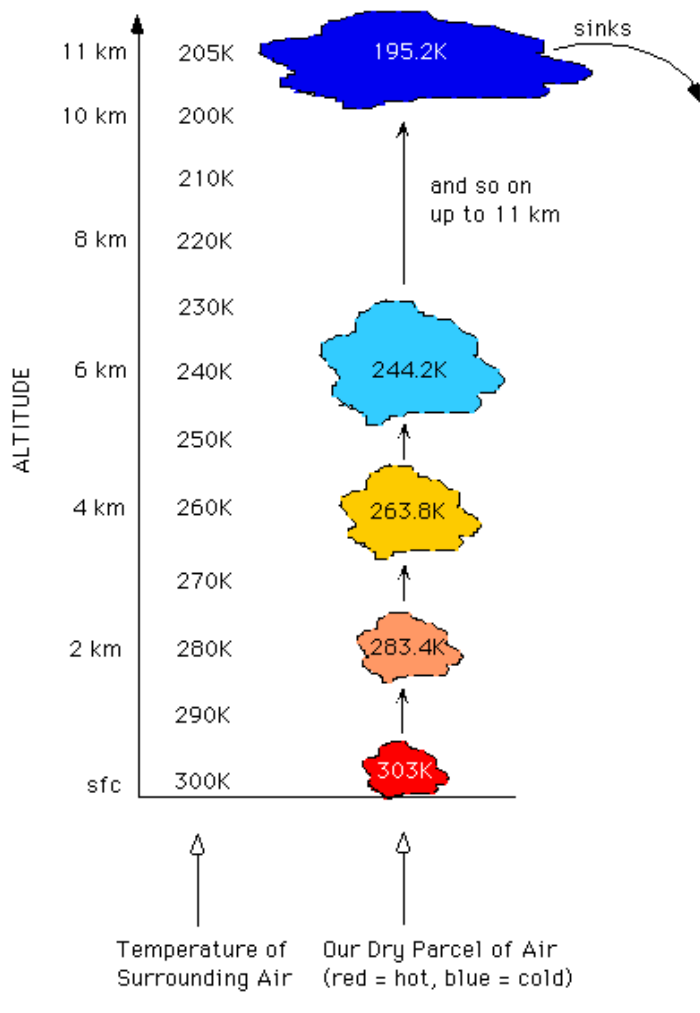


# Nuvem

- 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



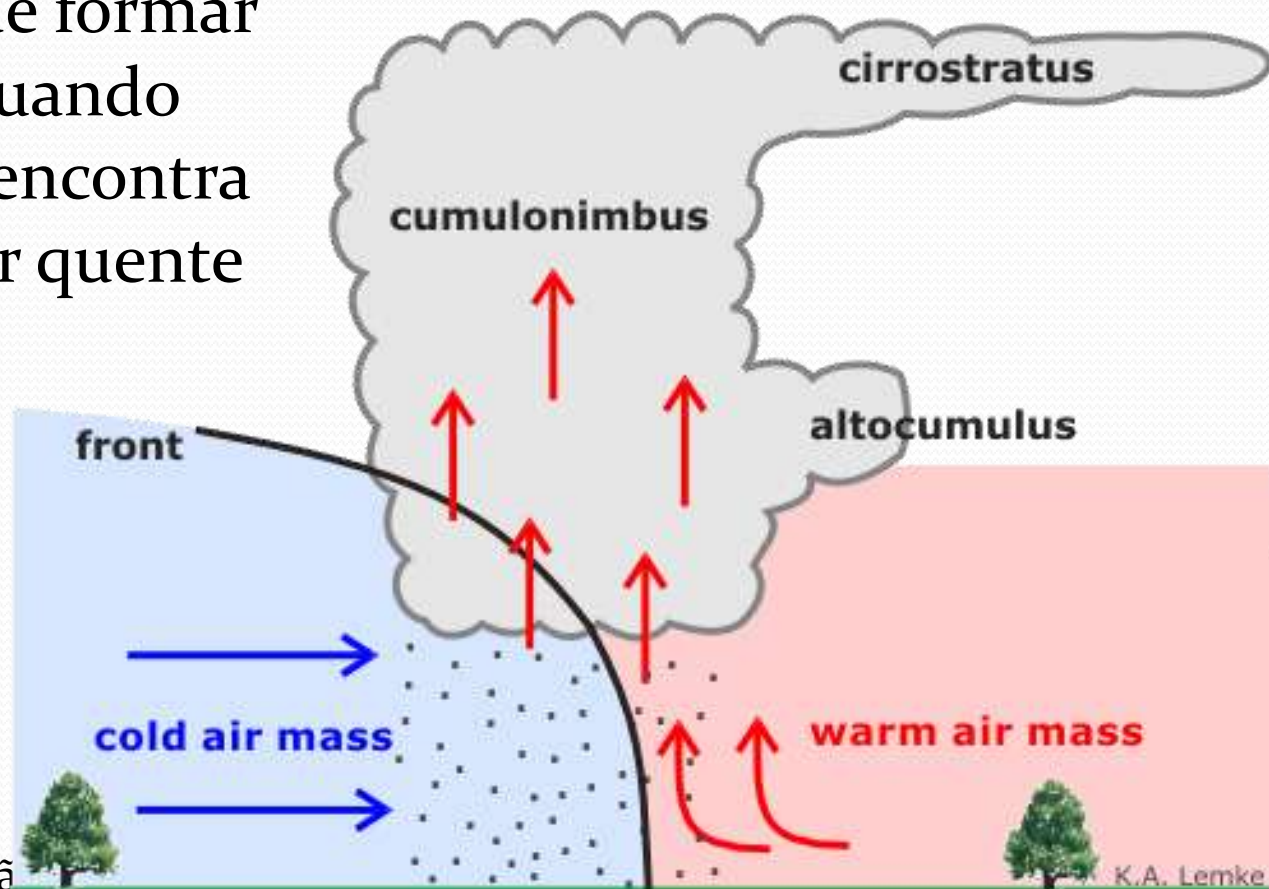
# Modelo Simples



© 2002 American Meteorological Society

# Nuvens e Frentes

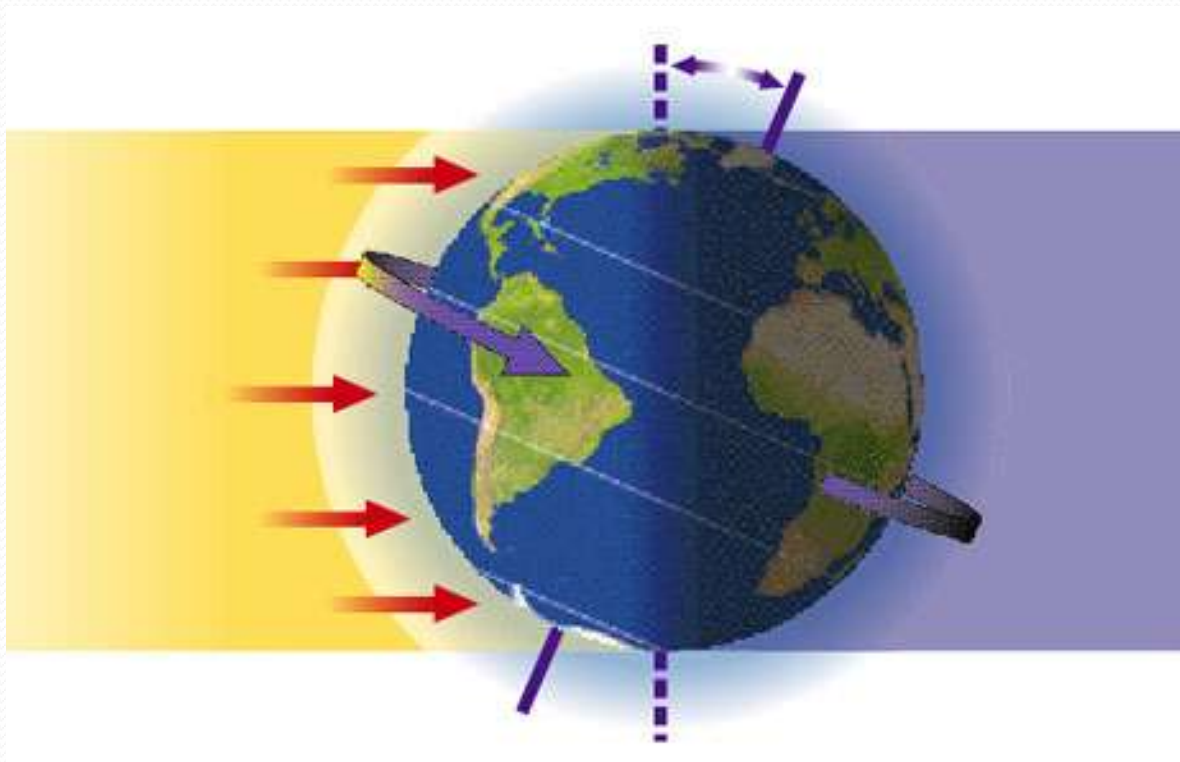
- Uma outra maneira muito comum de formar uma nuvem é quando uma frente fria encontra uma massa de ar quente





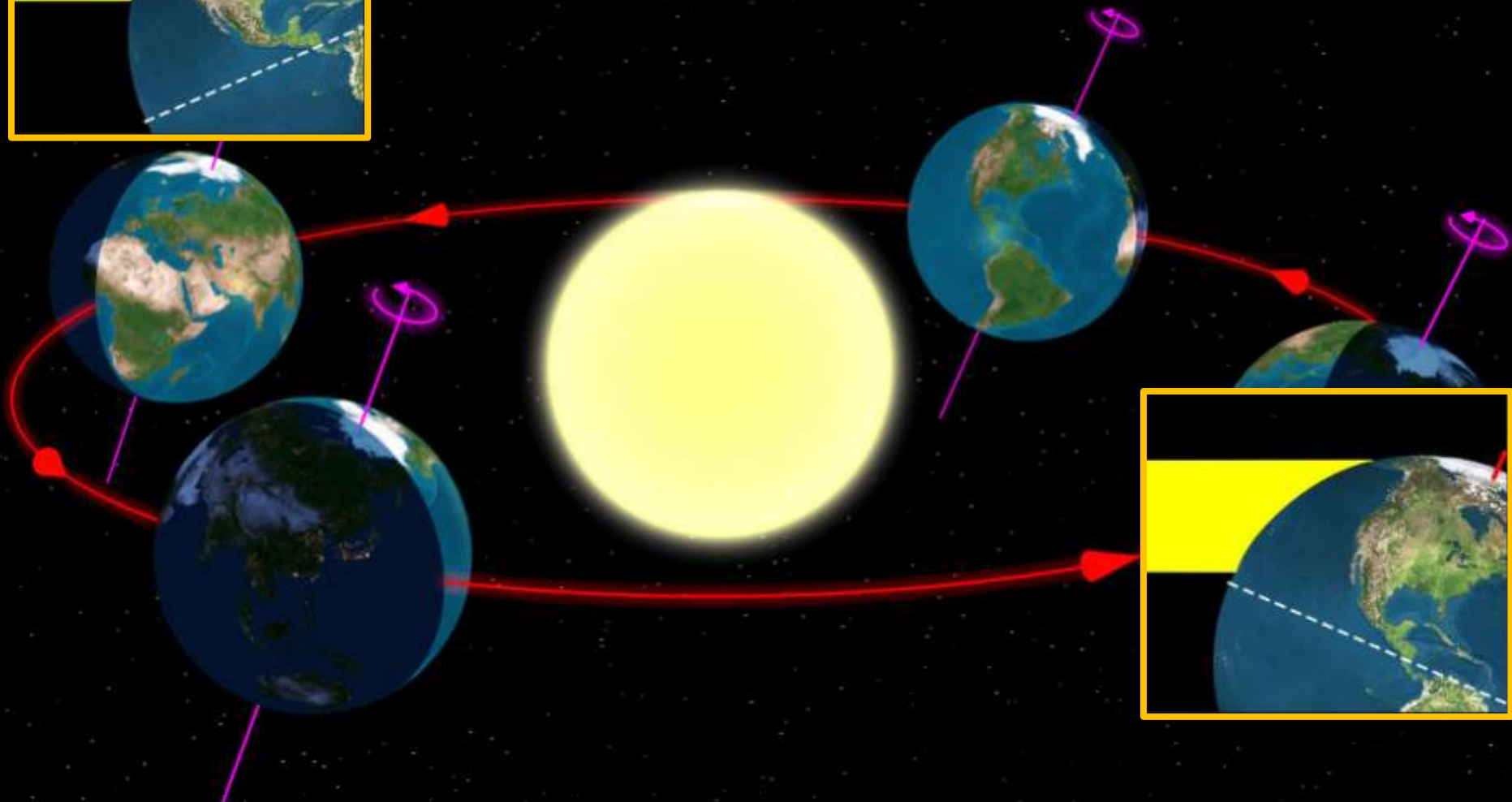
# Dia e Noite

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

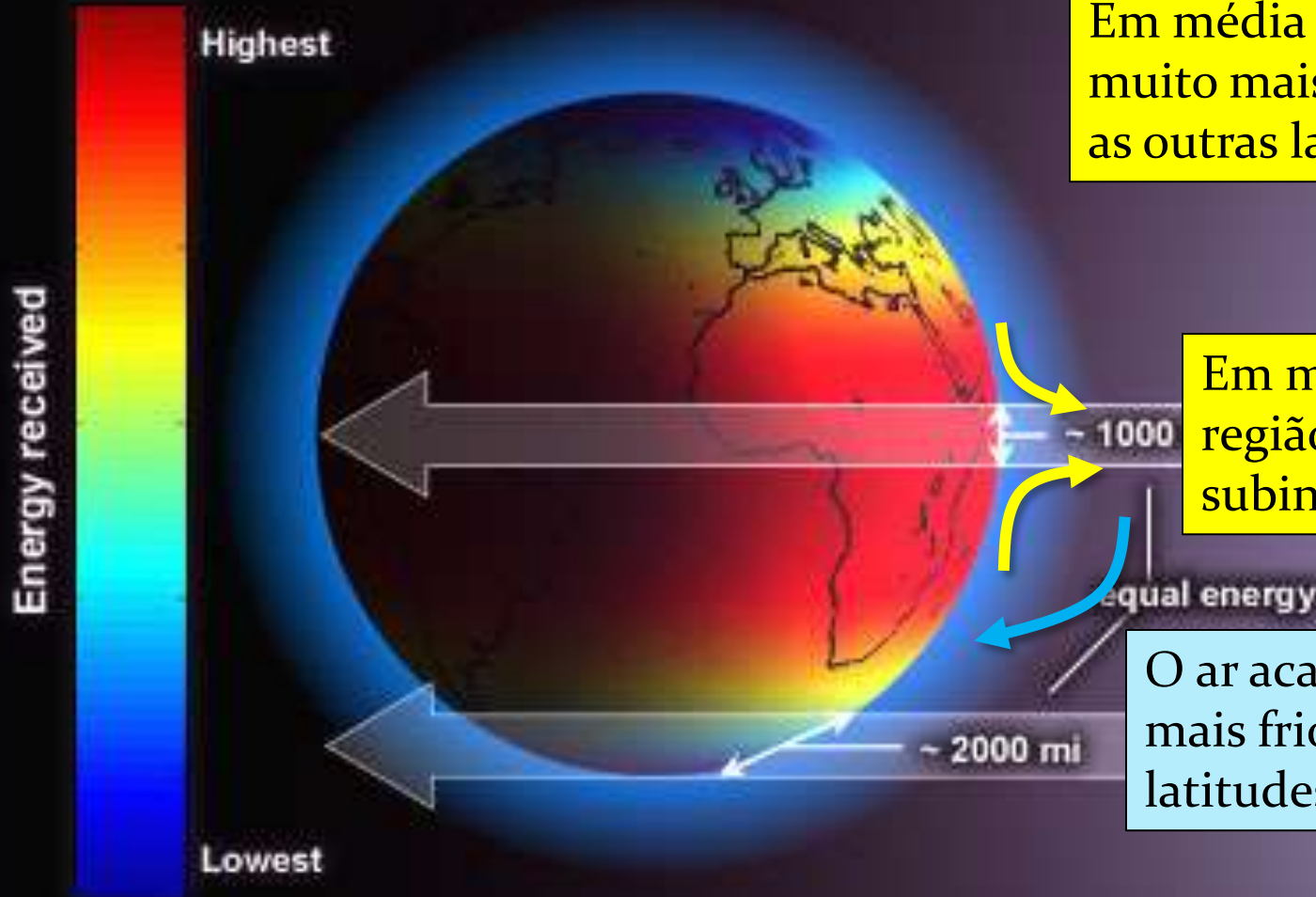


Além disso, como o eixo da Terra é inclinado e ela gira em torno do sol existem as estações do ano!

# Estações do ano



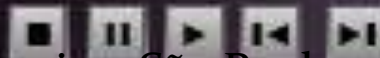
## Mean Annual Global Insolation



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

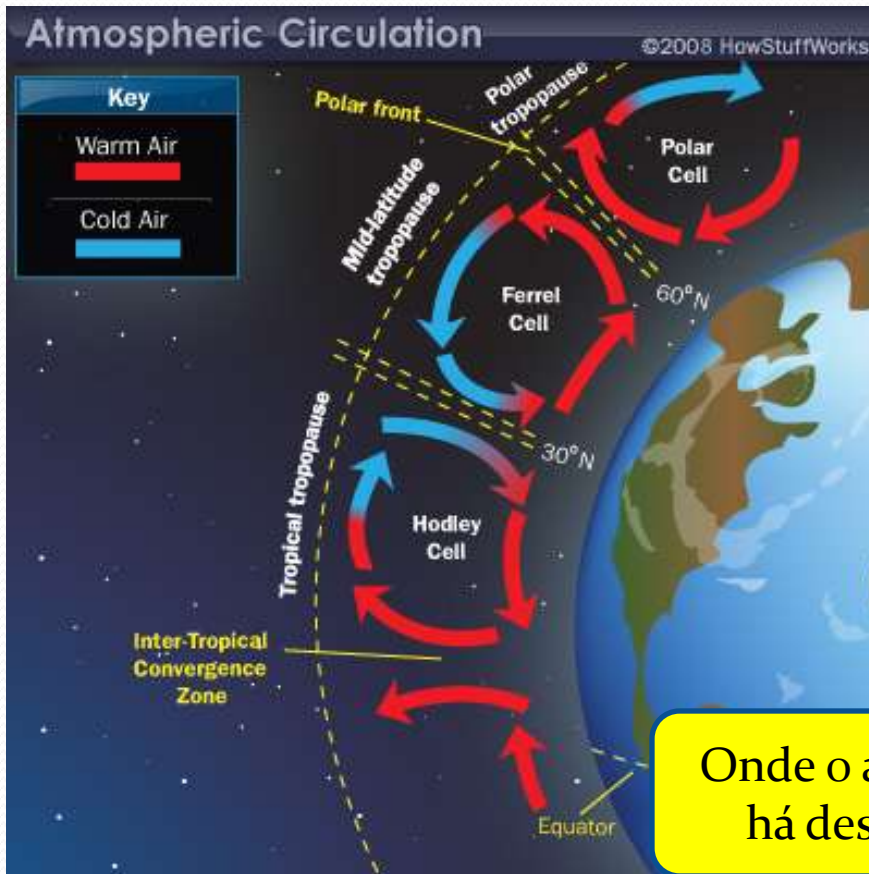
Em média o ar nessa região está sempre subindo!

O ar acaba descendo mais frio em latitudes mais altas

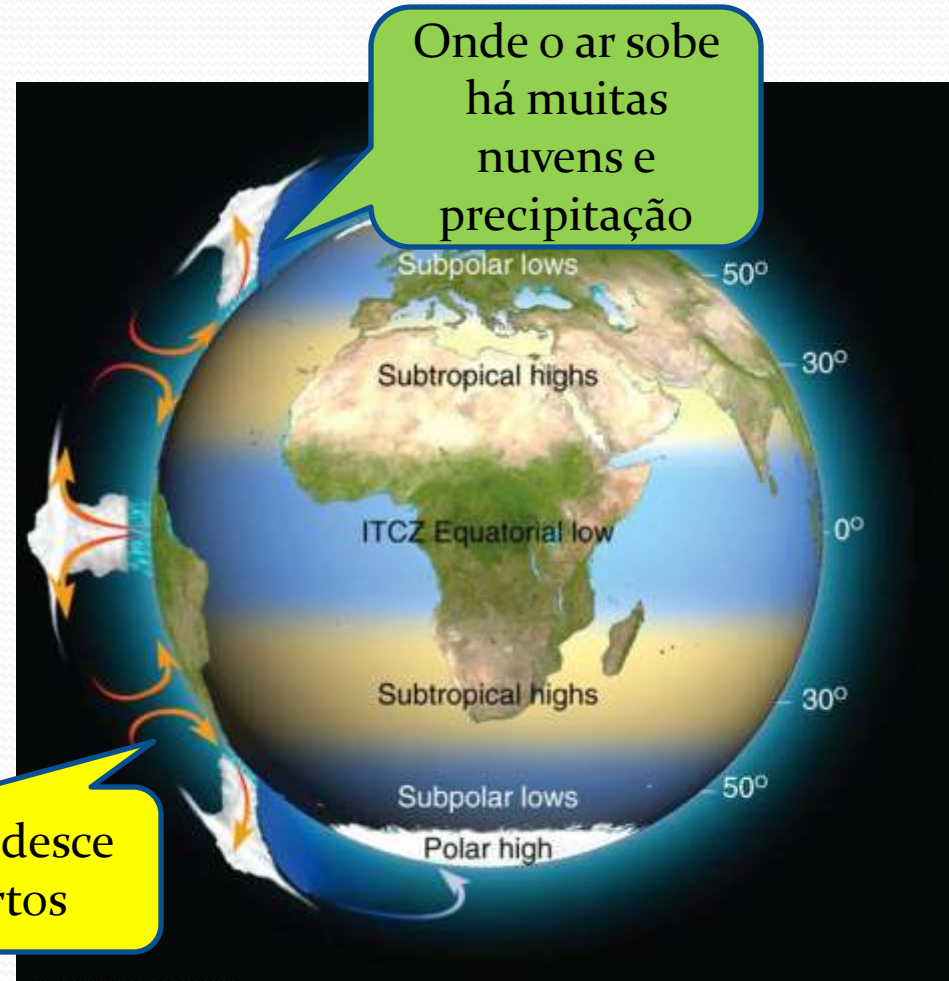




# Circulação de grande escala



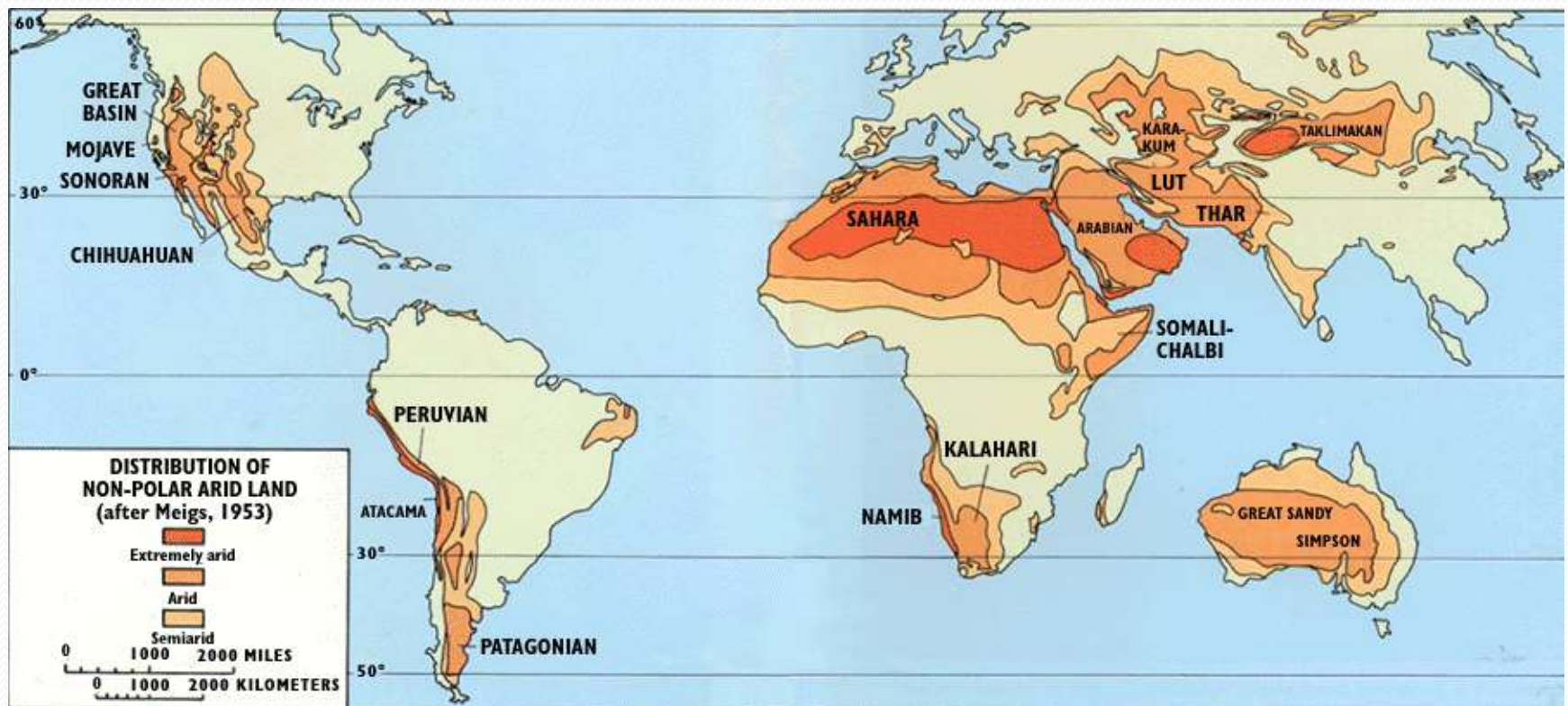
Onde o ar desce  
há desertos



Onde o ar sobe  
há muitas  
nuvens e  
precipitação

# Localização dos grandes desertos

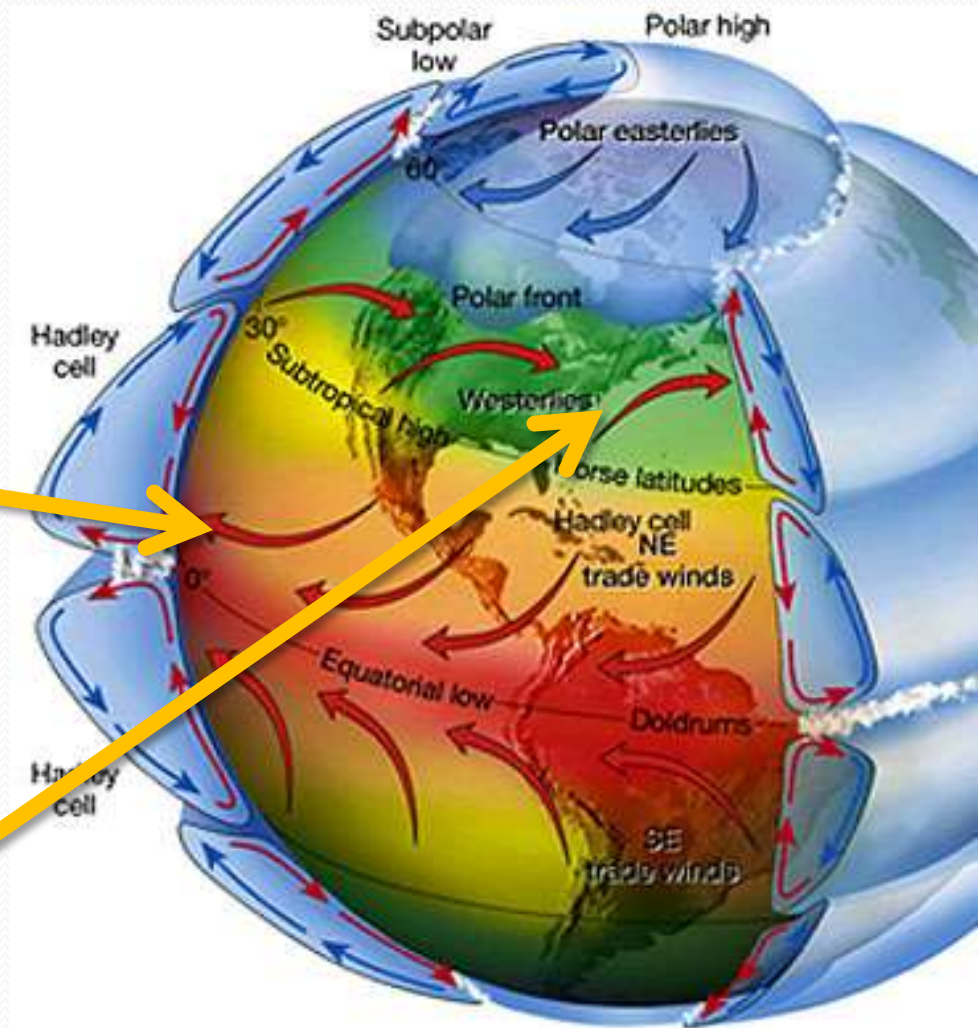
- Nas latitudes onde o ar desce seco e frio, há precipitação é pouco e as regiões são desérticas.





# Circulação global

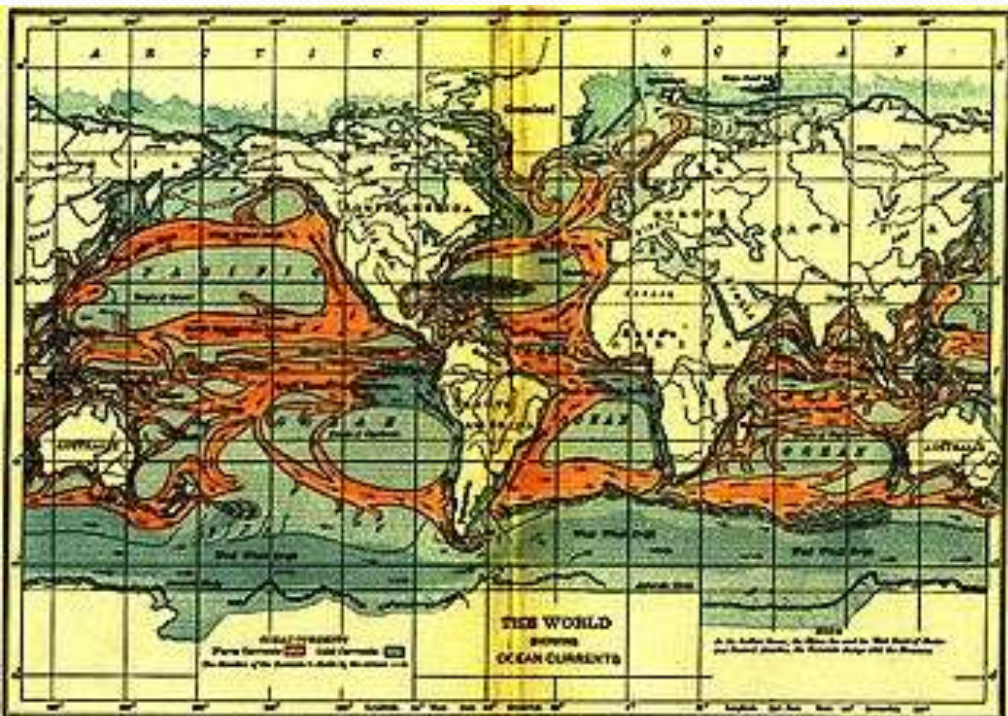
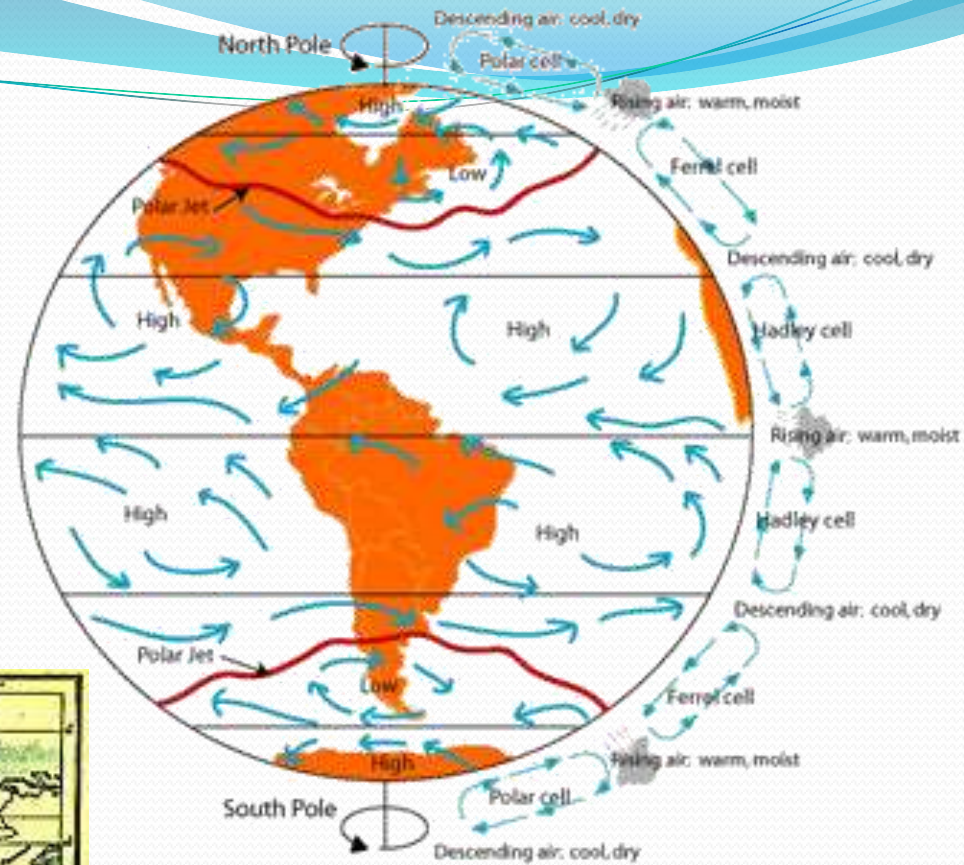
- Como a terra gira, por inércia, a atmosfera acaba ficando para traz.
  - A célula de Hadley fica inclinada no equador, formando os **Alísios**.
  - Já o ar que desce em latitudes mais altas está girando mais rápido que a chão (ele estava no EQ), e a circulação é ao contrário





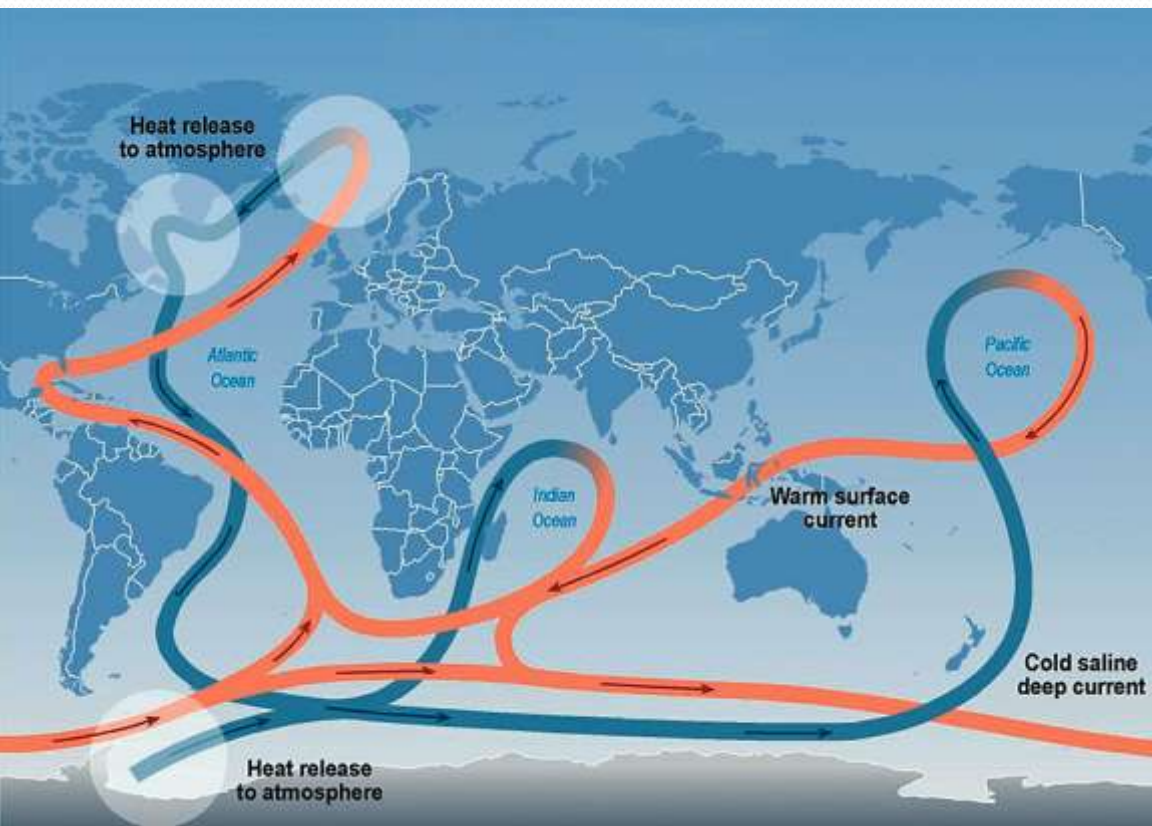
# Circulação Global

- 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.

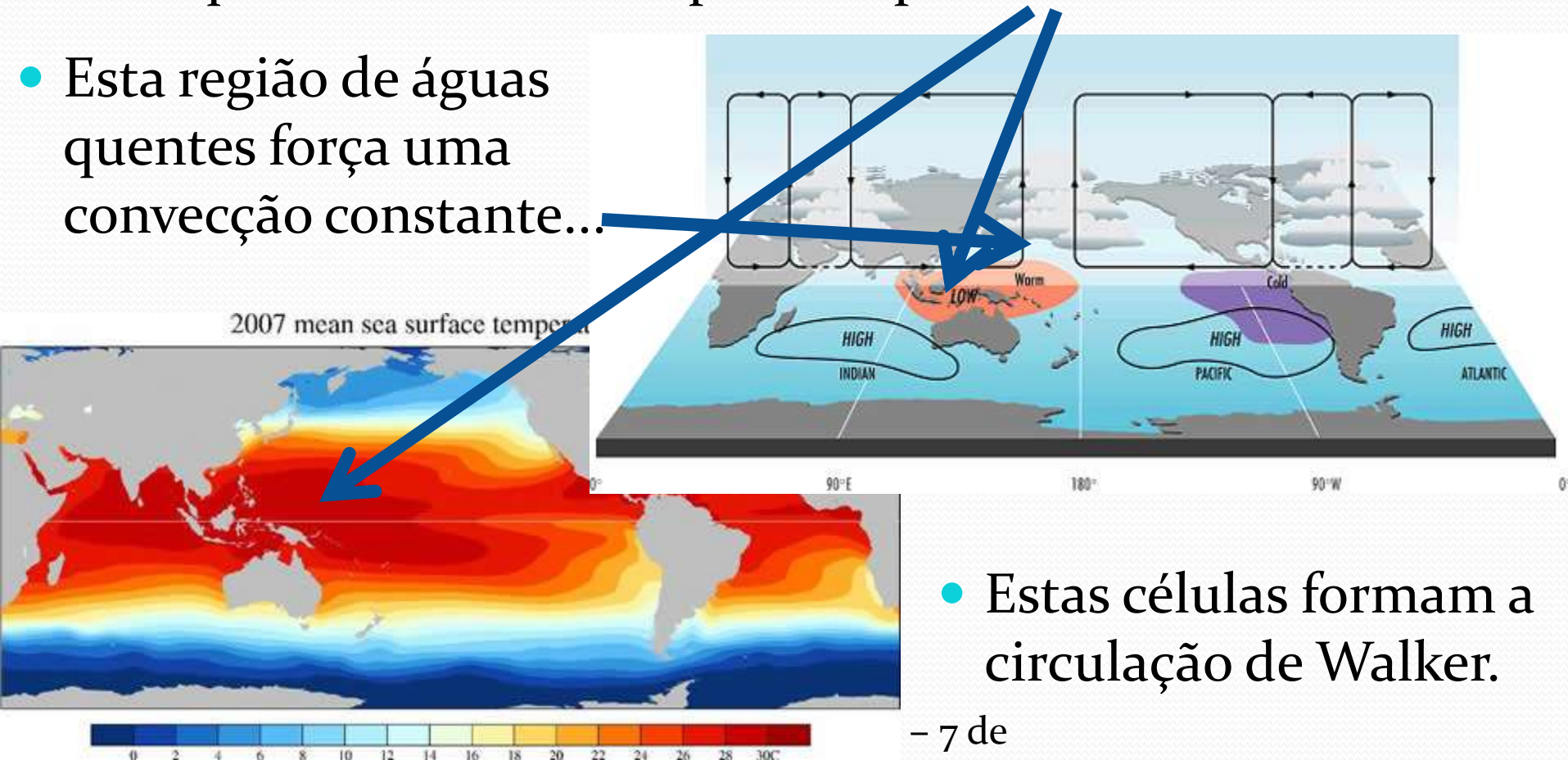


- As água superficiais são aquecidas pelo sol e levam a energia para outra regiões
- Por causa dessa corrente, a Europa é bem mais quente que o Canadá.



# Circulação de Walker

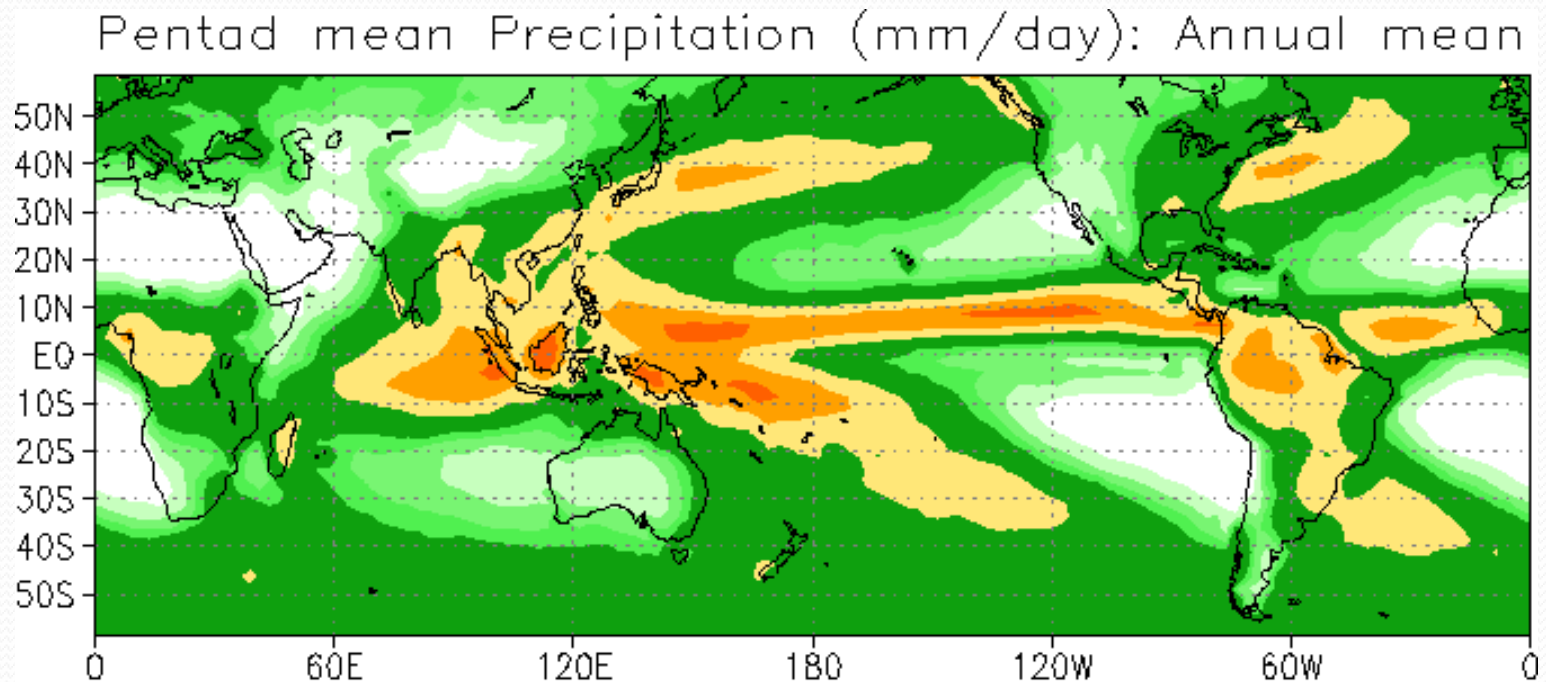
- Devido a presença constante dos ventos alísios, a água mais quente vai sendo empurrada para oeste.
- Esta região de águas quentes força uma convecção constante...



- 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





# Circulação da Atmosfera

- 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

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

- 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 ( $P V = n R T$ )
  - 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



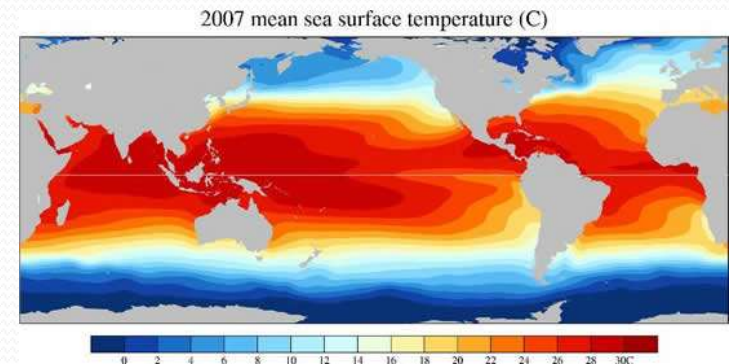
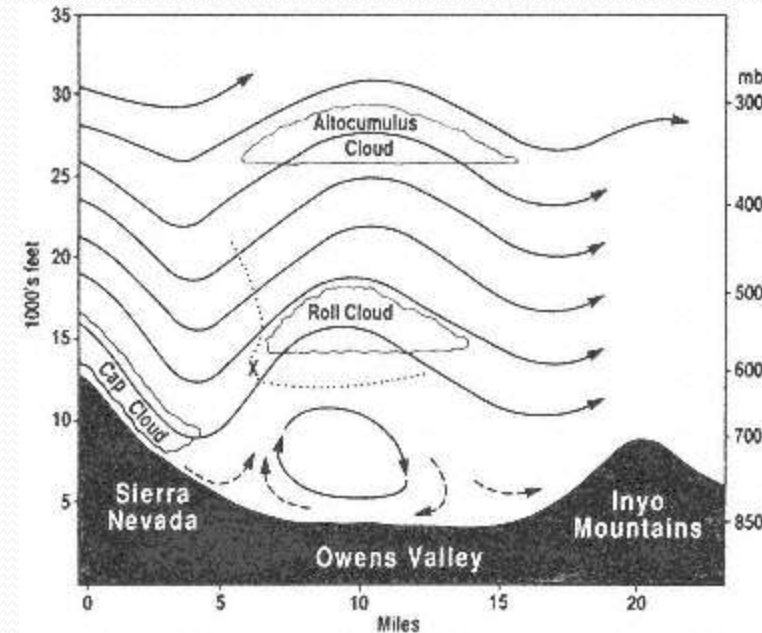
compilador



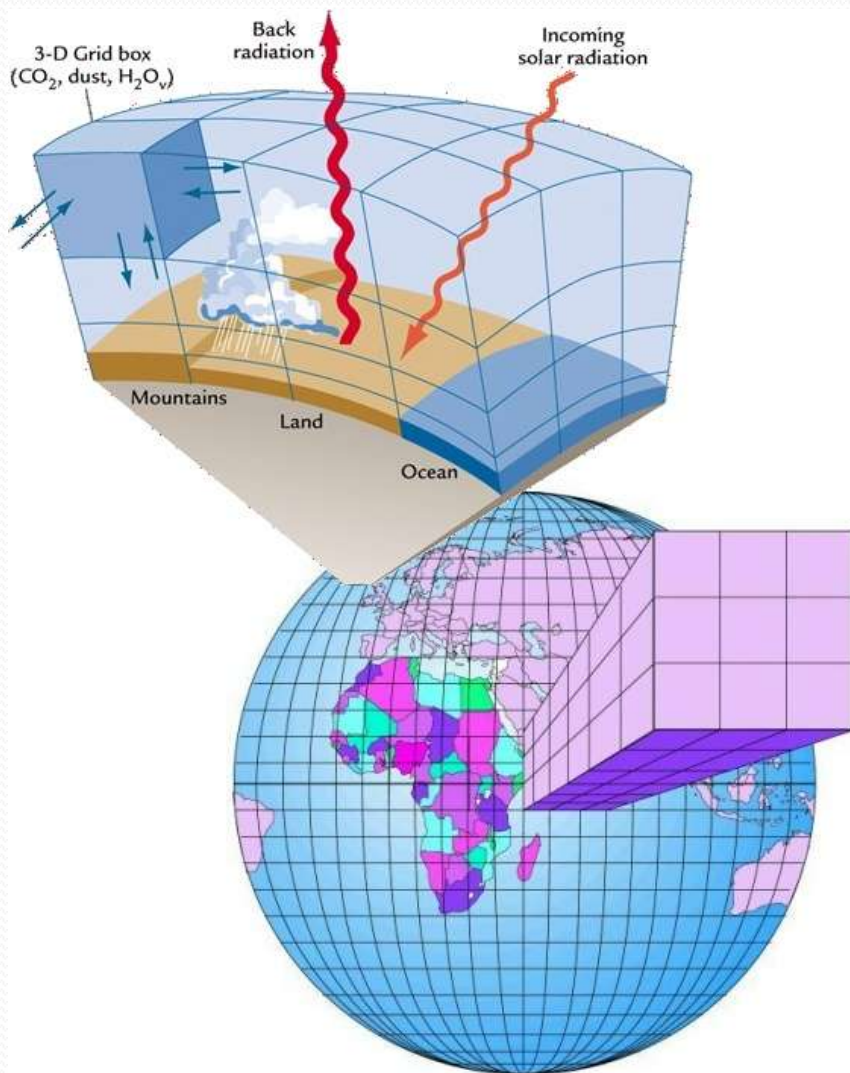


# Solução

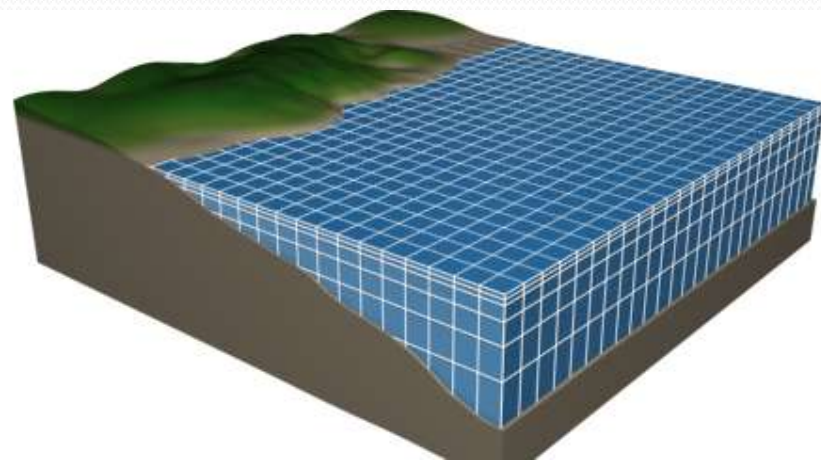
- Para resolver as equações
- A solução depende das:
  - Condições iniciais
    - Estado inicial da atmosfera
  - Condições de contorno:
    - Relevo
    - Concentração dos gases
    - Temperatura da superfície do mar



# 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**.



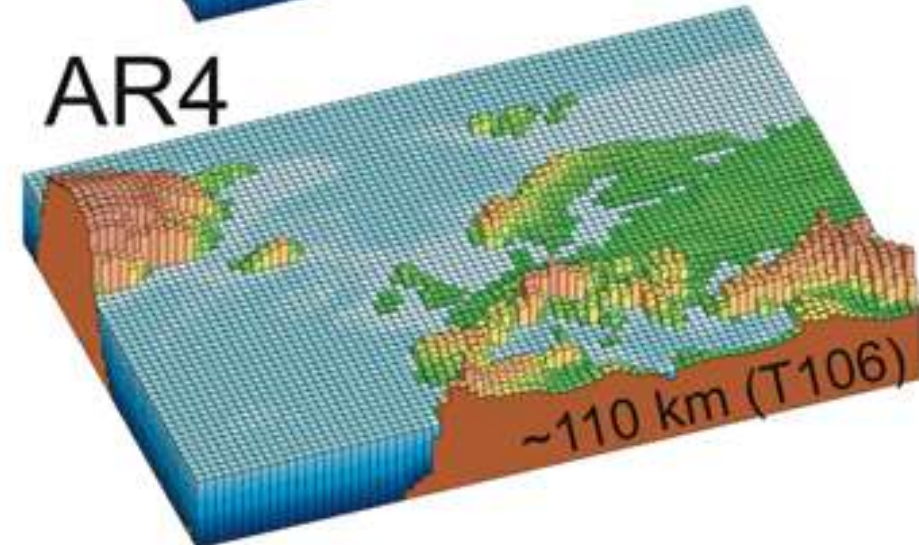
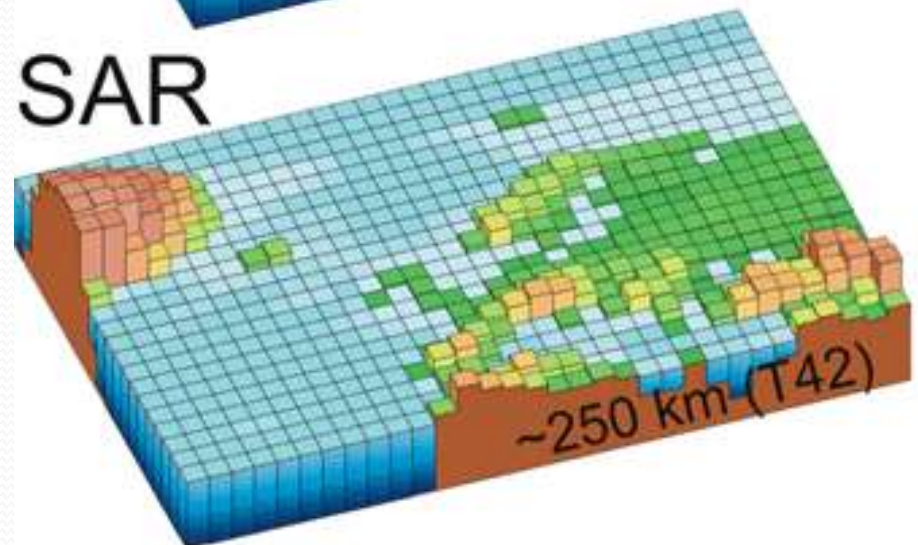
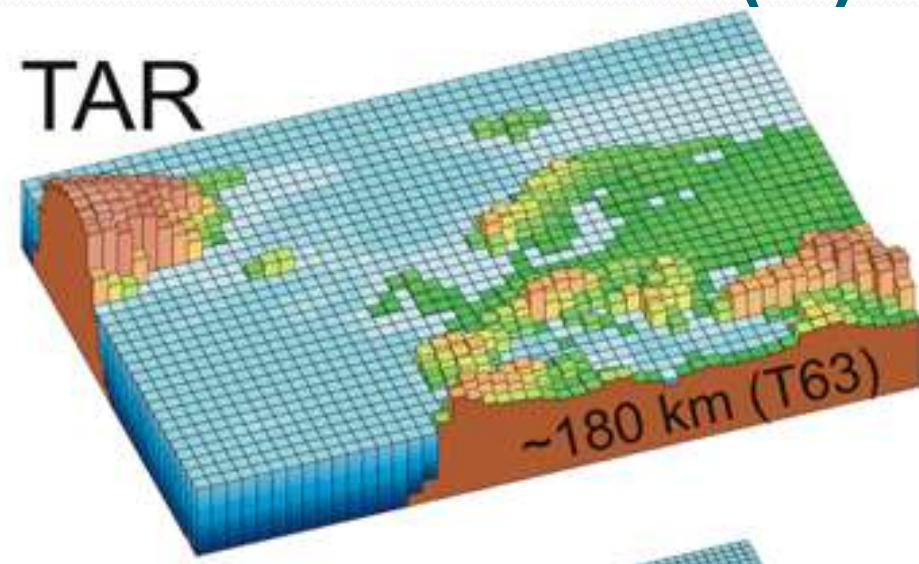
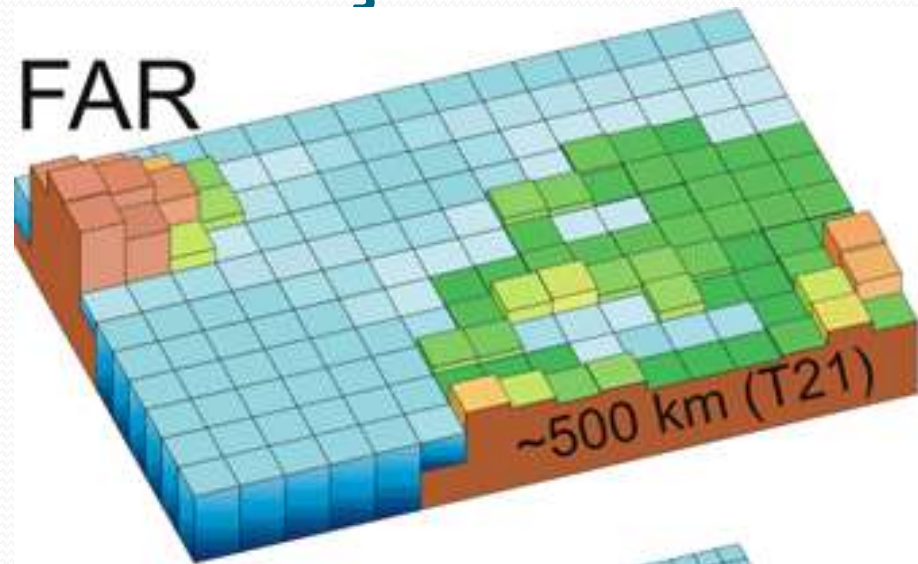
# O resultado da previsão é bom??

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

- A **resolução** espacial e temporal adequada



# Evolução dos modelos Climáticos (1)





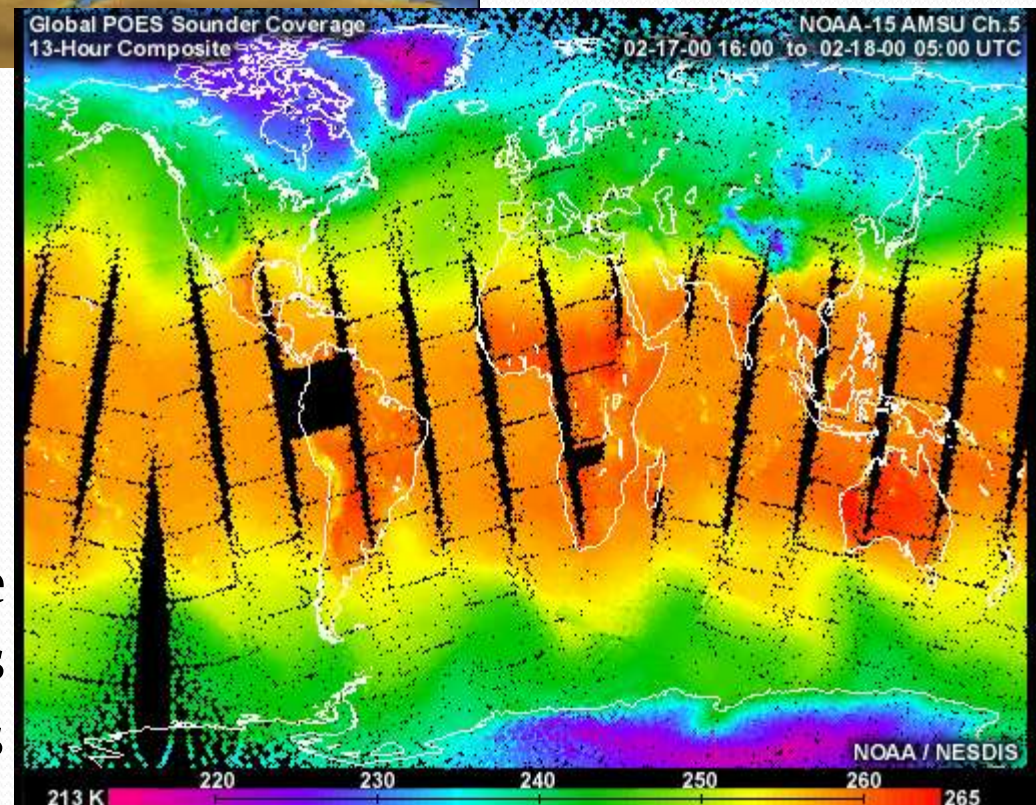
# O resultado da previsão é bom??

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



Radiosondagens,  
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

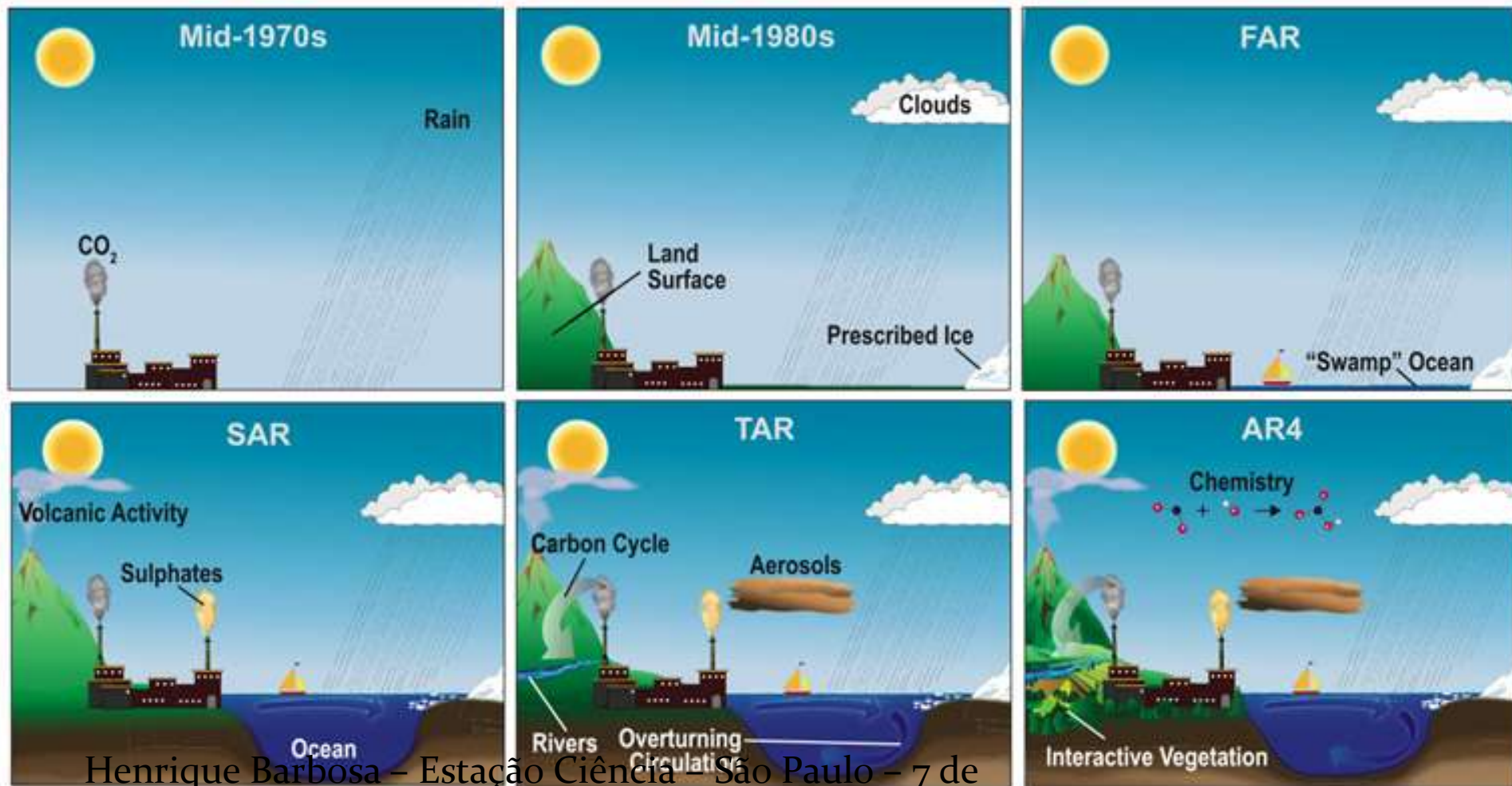
Quais processos físicos incluir depende do problema que queremos resolver!

# 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 Climáticos



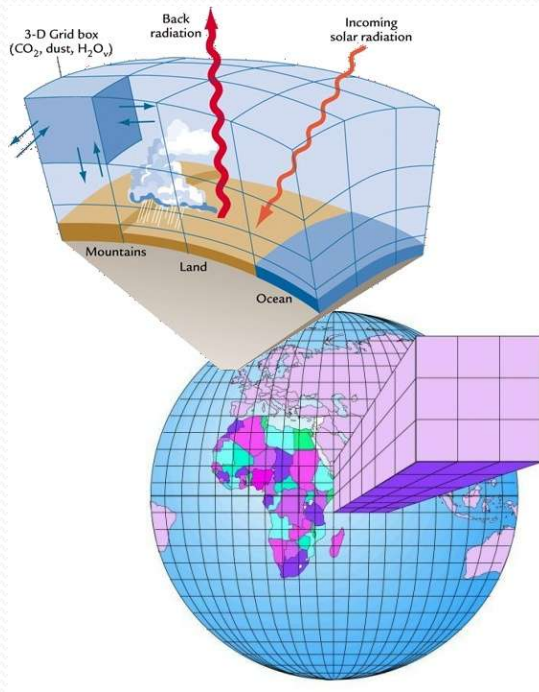
# Retroalimentação

- 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...

Para mudanças climáticas, tentamos incluir tudo que conhecemos sobre o sistema terrestre!



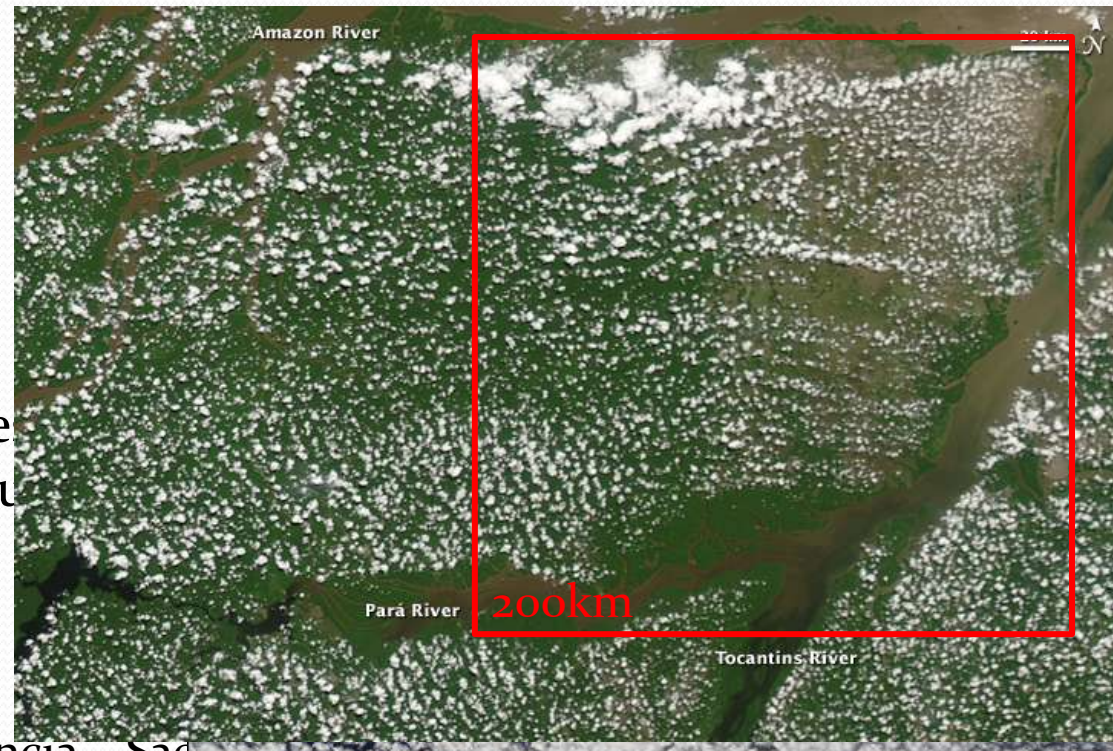
# Como incluir processos sub-grade?



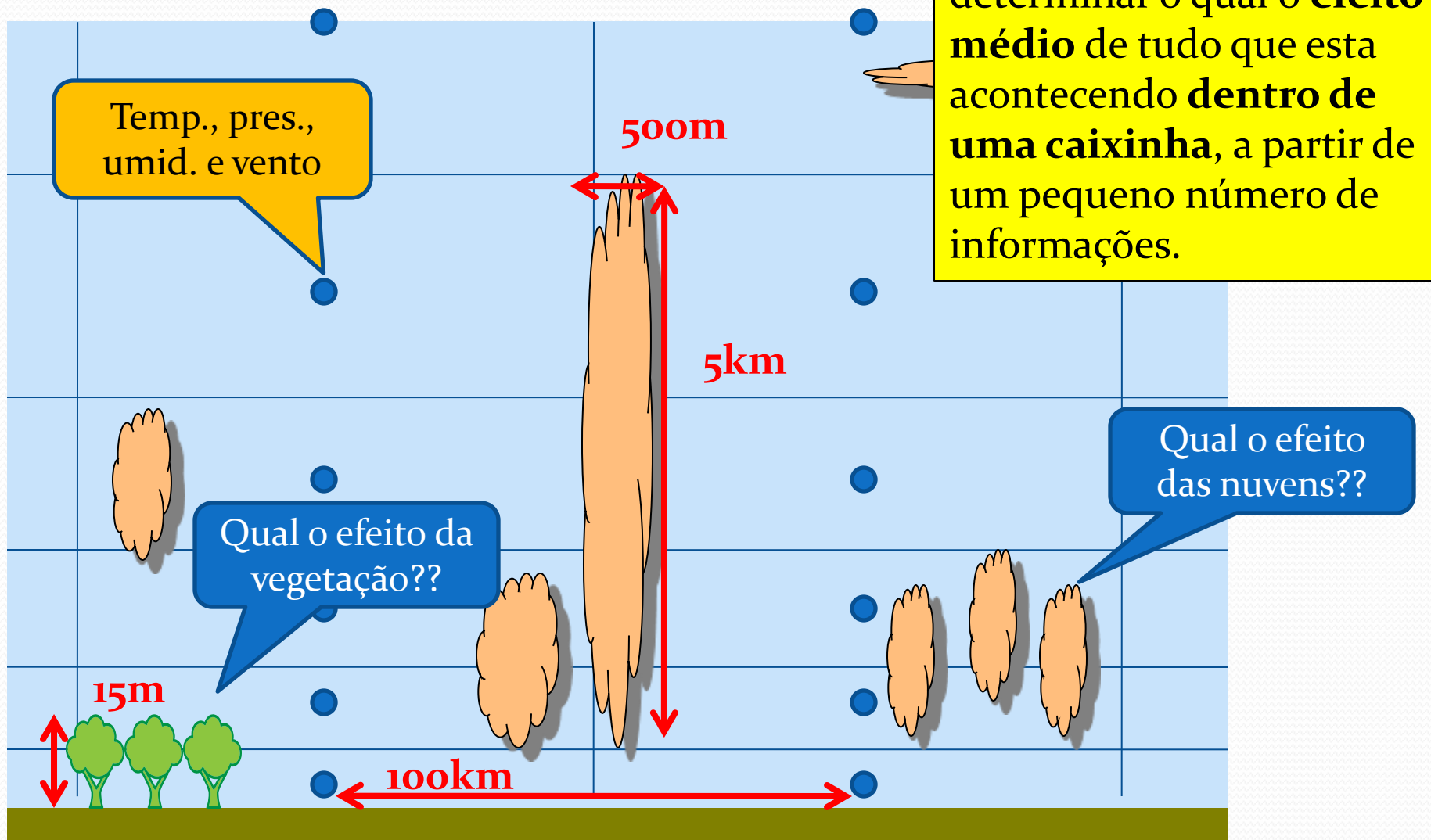
- Nossas que equações só conseguem resolver o que pode ser representado usando os pontos que escolhemos!

Como representar  
as nuvens?

Como representar  
a floresta?

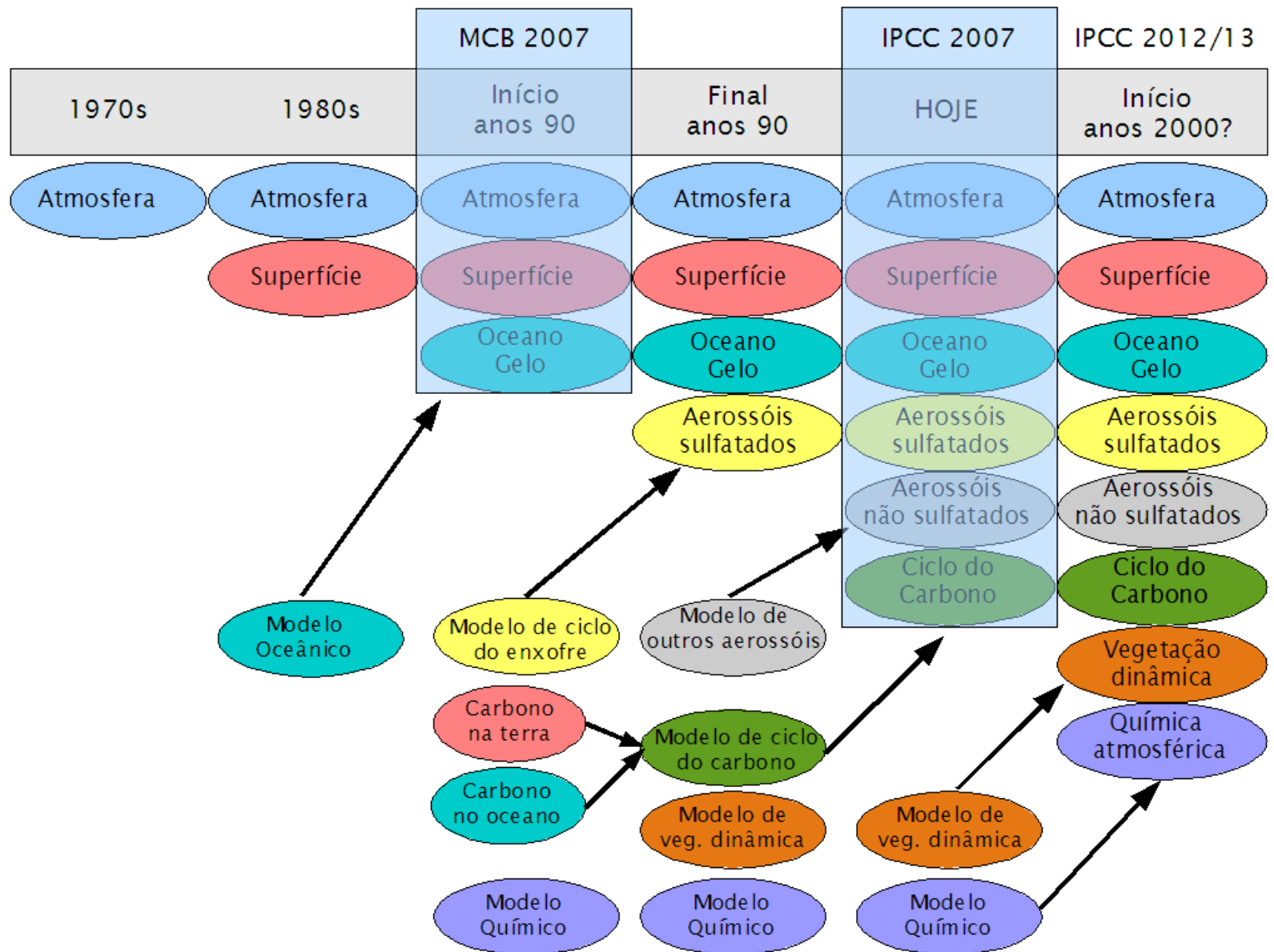


# Parametrização



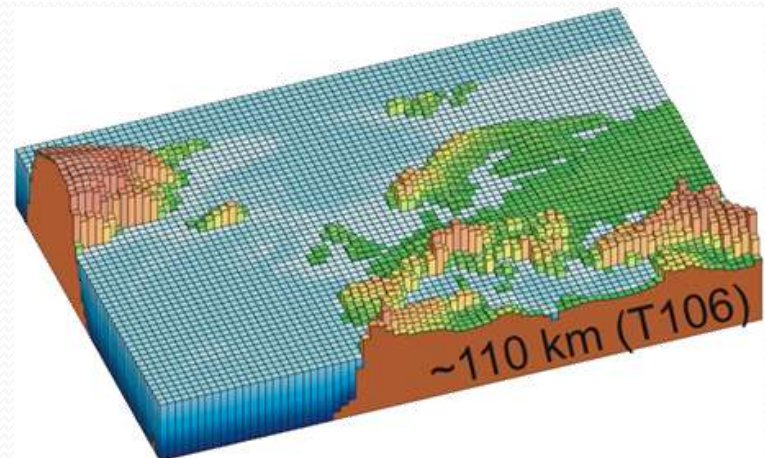
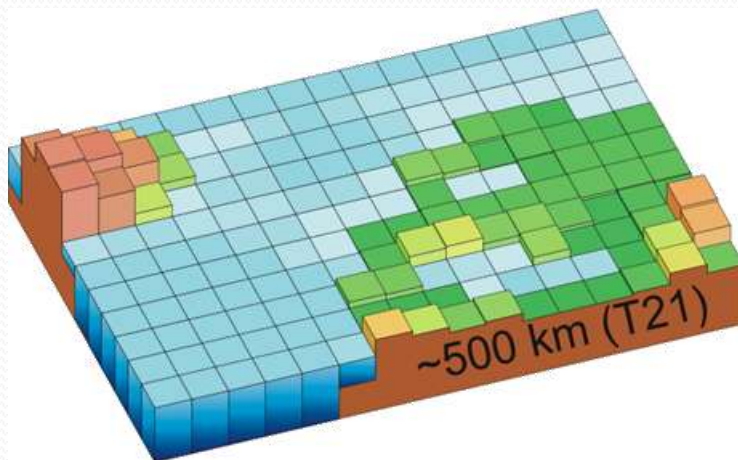


# Evolução dos modelos Climáticos



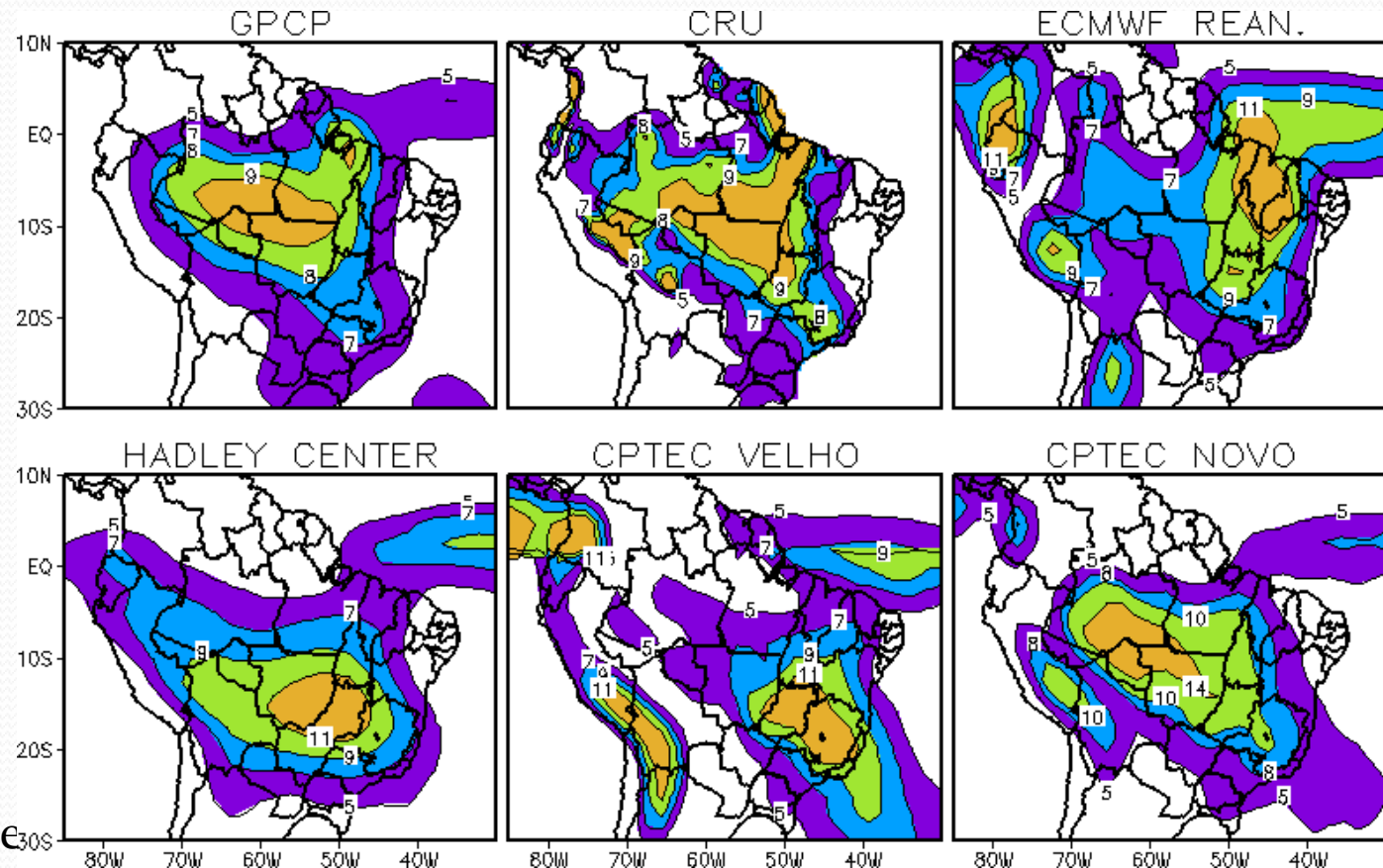
# Problemas que persistem

- Apesar da evolução dos modelos climáticos, vários problemas persistem:
  - Resolução baixa (200km) → Só dá para resolver com computadores mais velozes



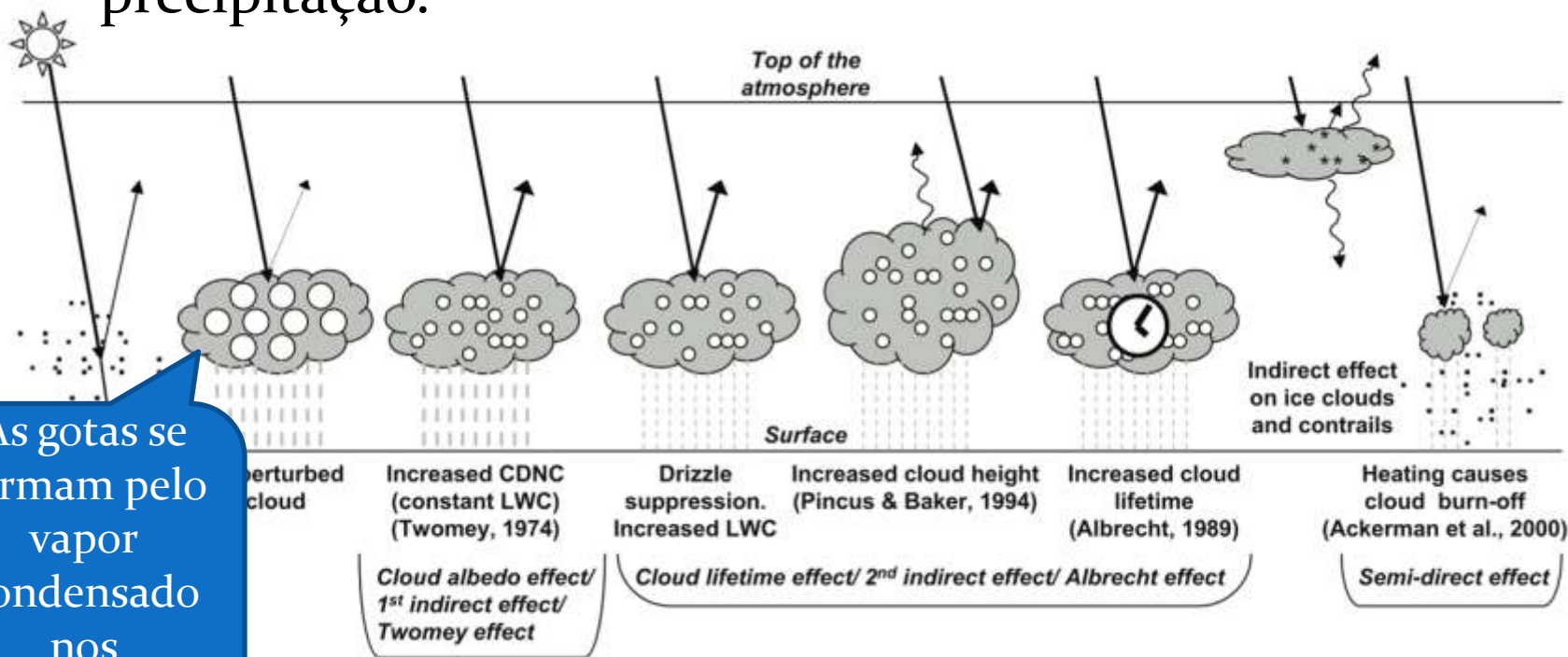
# Problemas que persistem

- A parametrização de convecção faz o modelo produzir chuva no local errado → Melhores parametrizações(?), mais resolução (?), não se sabe ao certo como melhorar



# Problemas que persistem

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



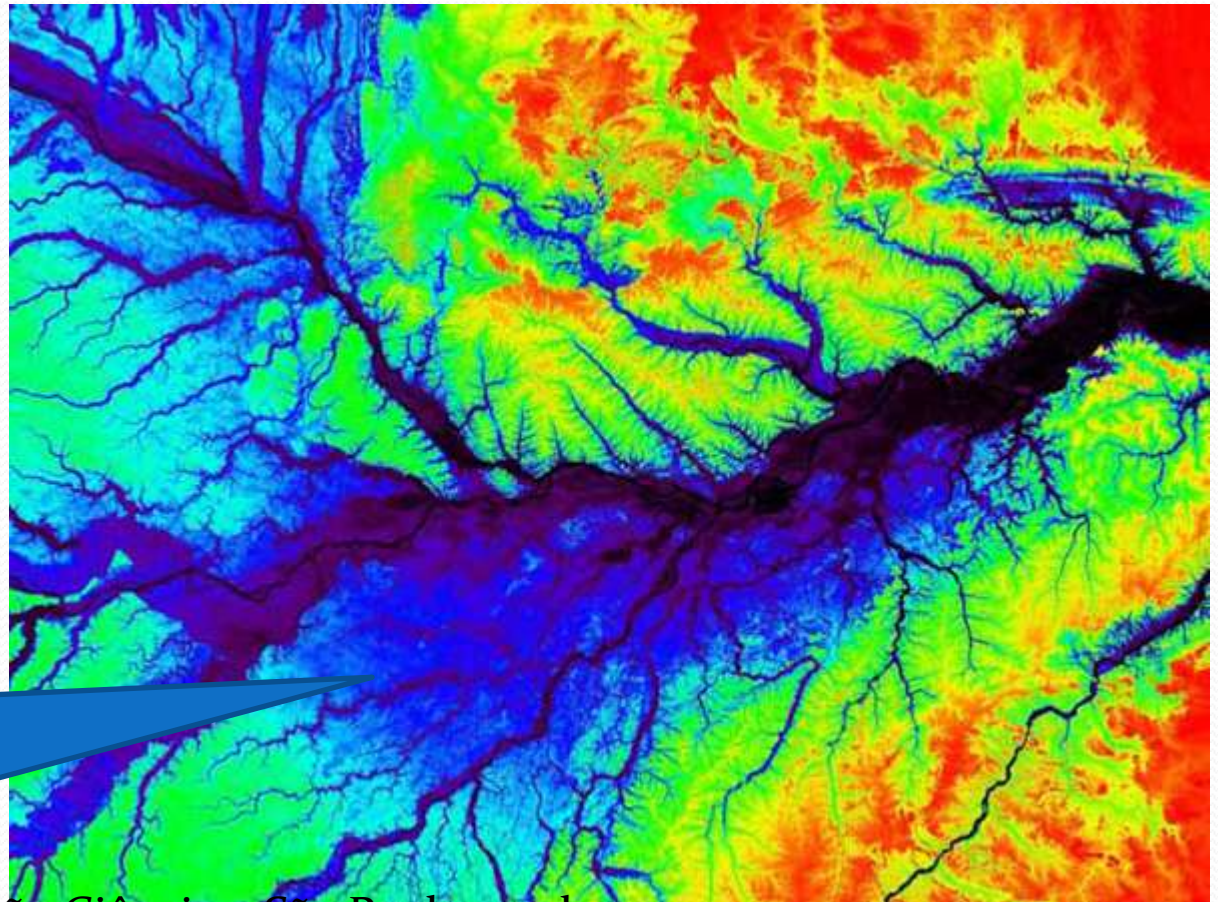
O que acontece se aumentar ou diminuir a poluição?



# Problemas que persistem

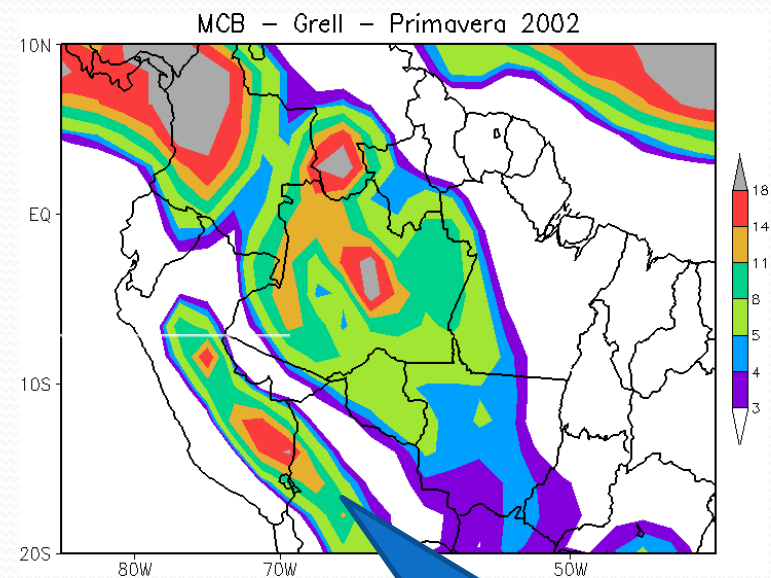
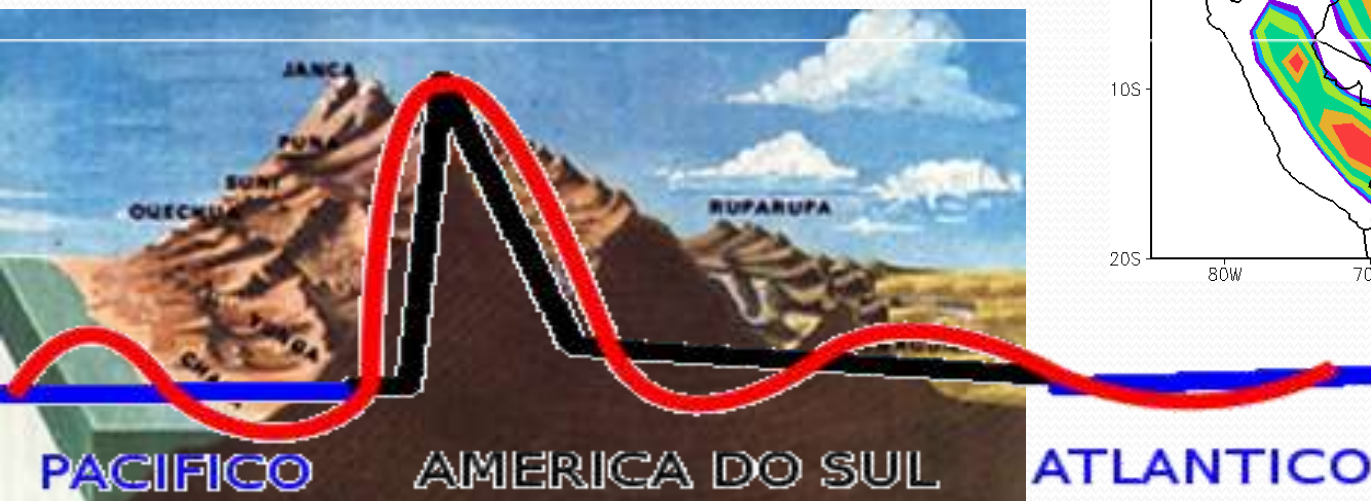
- Quando modelamos a floresta, não incluímos as área alagadas!

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



# Problemas que persistem

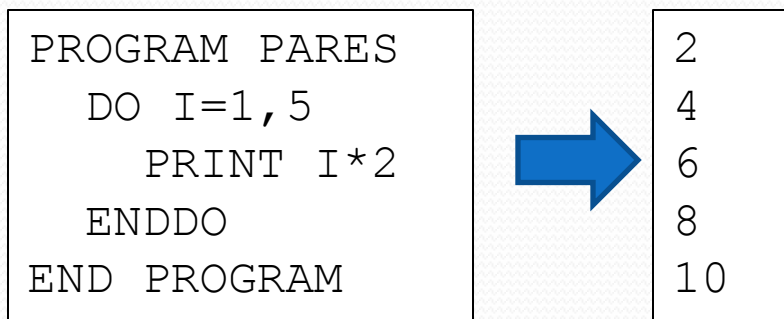
- Em alguns modelos, a topografia é representada com uma função senóide. Isso faz aparecer montanhas e vales irreais.



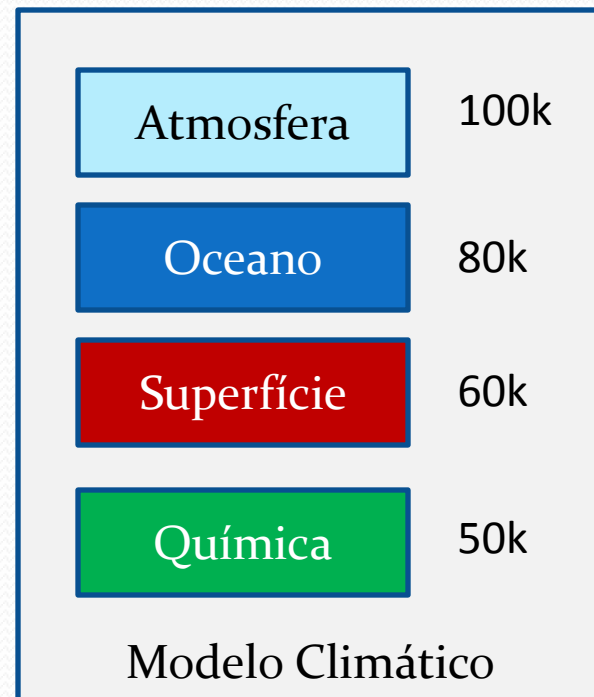
Uma  
conseqüência é  
chover no lugar  
errado

# Complexidade Computacional

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



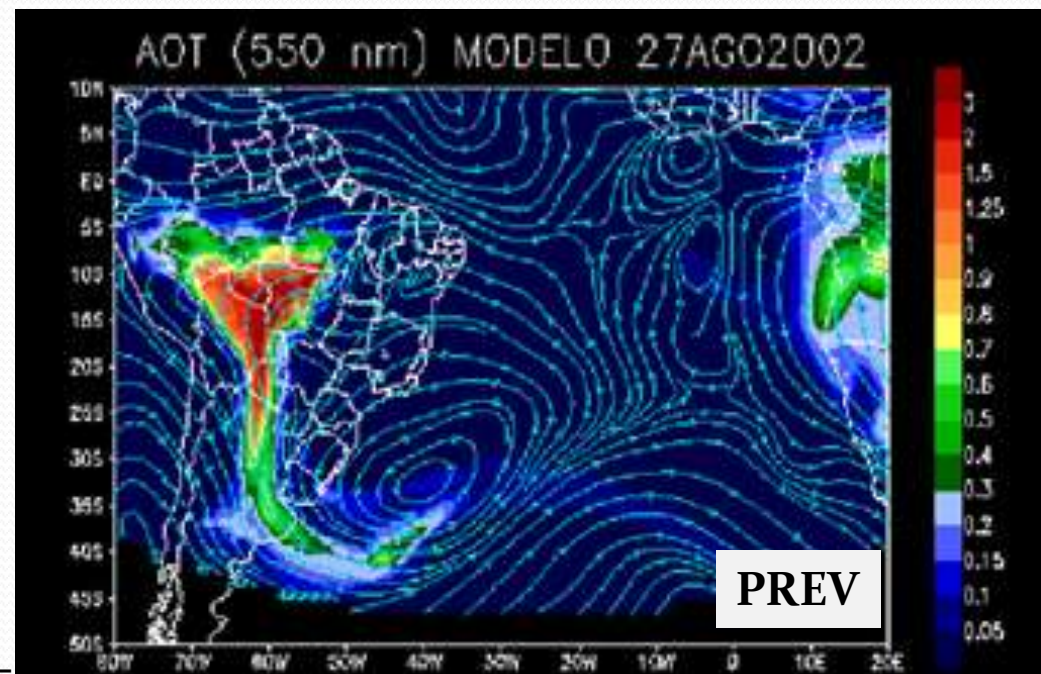
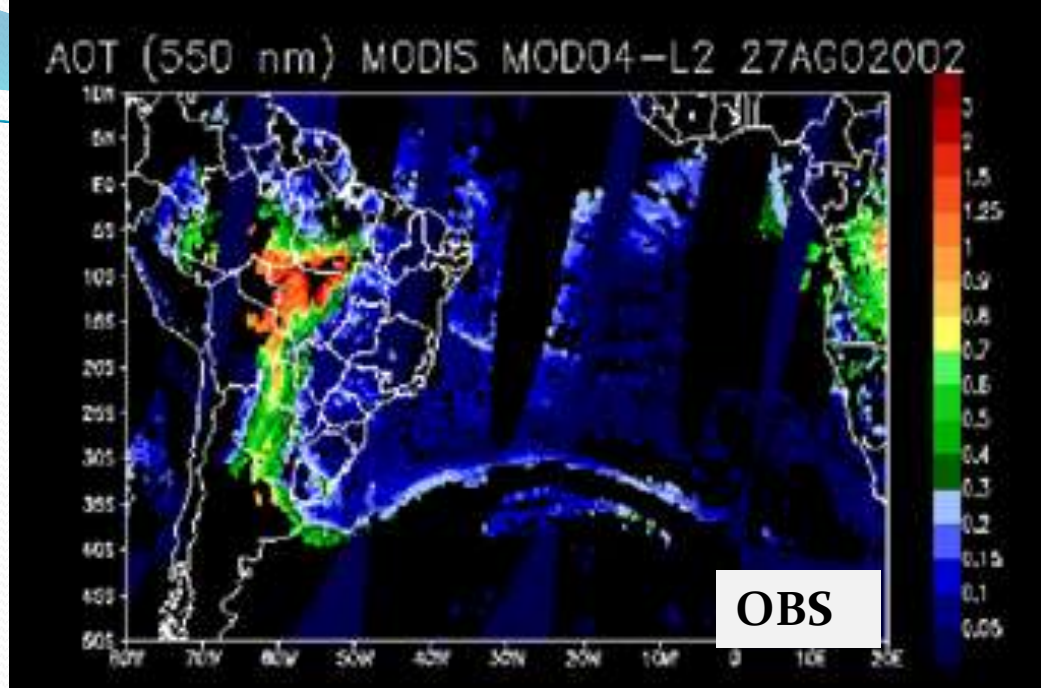
Programa de 3 linhas para escrever na tela os 5 primeiros números pares





# 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??

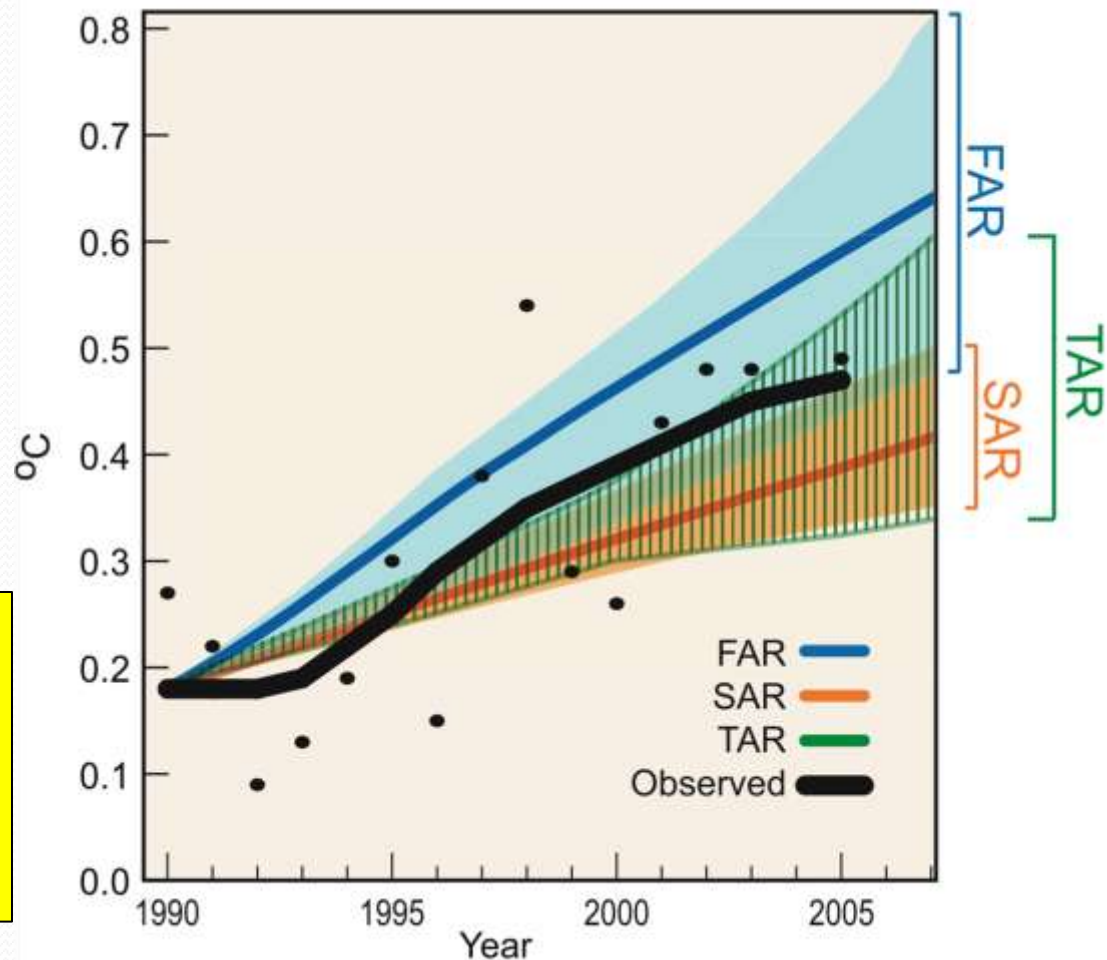




# Apesar de tudo

- Apesar de todos os problemas dos modelos climáticos, as **previsões** que foram feitas desde o 1º IPCC **acertaram em cheio** o que ia acontecer!

Temos segurança que entendemos a física envolvida e que os modelos funcionam!

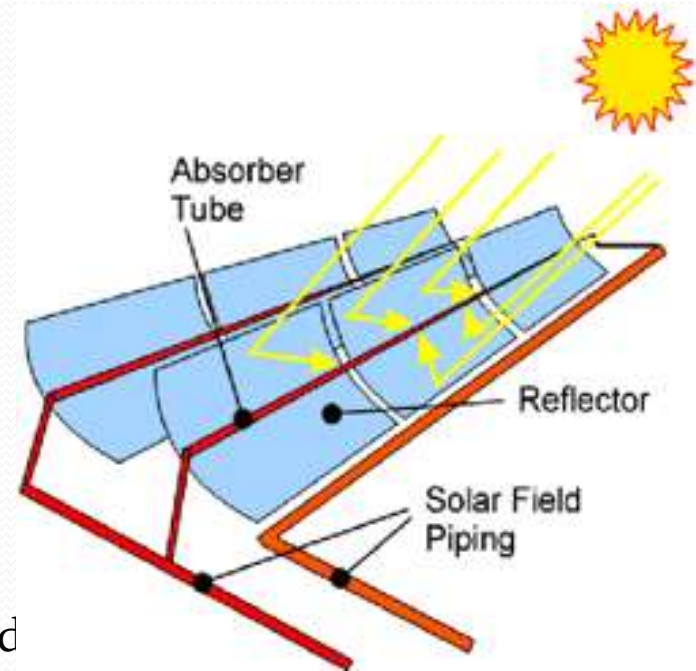
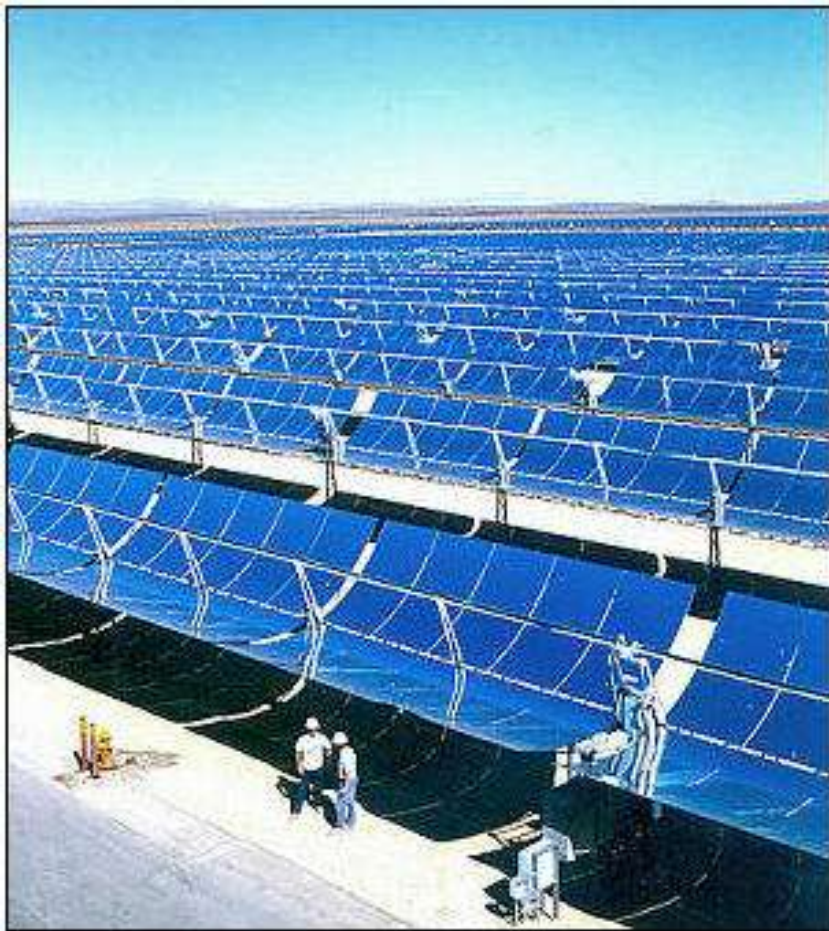


# Mudanças Climáticas

Mas e o que eu posso fazer a respeito??

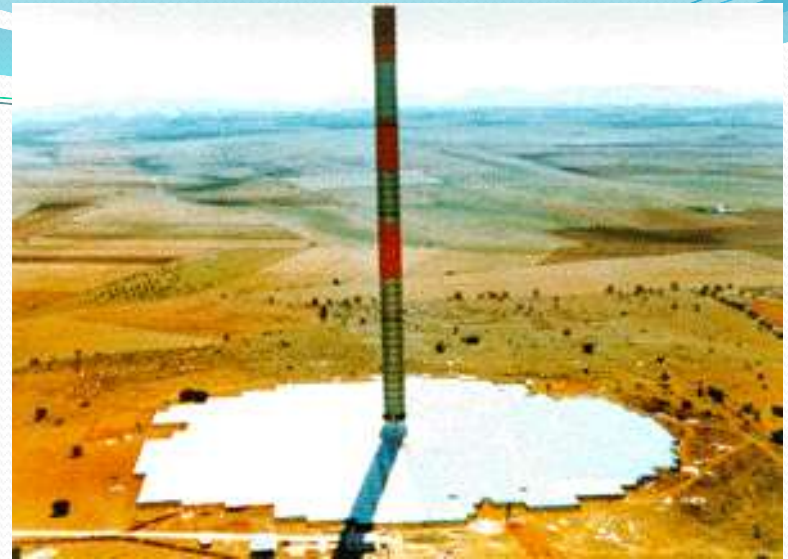
- **Compras:** Consuma de maneira consciente, escolhendo produtos energeticamente eficientes e/ou de empresas que respeitam o meio ambiente.
- **Recicle:** Prefira produtos reciclados e/ou que tenham pouca embalagem
- **Transporte Público:** Use o máximo que puder ou prefira alternativas saudáveis como andar e pedalar. Os combustíveis fósseis são a principal fonte de gases de efeito estufa.
- **Árvores:** Proteger as florestas e plantar novas árvores ajuda a remover o carbono da atmosfera e reduzir o aquecimento global.
- **Carros:** Se tiver mesmo que comprar um carro, prefira o mais econômico possível (mais km por litro). Seu bolso e o meio ambiente agradecem.
- **Energias renováveis:** Use fontes alternativas de energia na sua casa, como painéis e aquecedores solares.
- **Produtos animais:** Reduza o consumo de produtos animais, pois estes dependem da produção agrícola (soja, milho, etc...) e são menos eficientes para conseguir energia.
- **Política:** Cobrar do político que você elegeu políticas públicas de defesa do meio ambiente. Ou se engaje em grupos de defesa do meio ambiente

# Energia Solar





# Energia Solar



Solar Updraft Tower

