



# V ESCOLA JAYME TIOMNO TÓPICOS EM FÍSICA ATMOSFÉRICA

Prof. Dr. Marco Aurélio M. Franco

[marco.franco@usp.br](mailto:marco.franco@usp.br)

[marcomac27.github.io](https://github.com/marcomac27)

# Bibliografia recomendada

- Wallace, J. M., e P. V. Hobbs (2006): Atmospheric Science: An introductory survey. 2a edição, Elsevier.
- Holton – An Introduction to Dynamic Meteorology.
- Rogers, R. R., e M. K. Yau (1989): A Short Course in Cloud Physics. 3a edição, Butterworth-Heinemann.

# Ementa geral

1. Estrutura física da atmosfera: perfis verticais de pressão atmosférica, temperatura, umidade. Equações básicas da atmosfera. Sistema de coordenadas. Composição química da atmosfera.
2. Reações químicas e processos de fotólise na atmosfera. Efeito estufa natural. Gases intensificadores do efeito estufa. Aquecimento global e mudanças climáticas.
3. Reações químicas e processos de fotólise na atmosfera. Efeito estufa natural. Gases intensificadores do efeito estufa. Aquecimento global e mudanças climáticas.
4. Processos de formação de nuvens. Núcleos de condensação de nuvens. Crescimento de gotas em nuvens. Interações entre aerossóis e nuvens. Radiação solar na atmosfera.

# Atmosferas

- Aplicar os conceitos básicos da **termodinâmica clássica** no estudo da **estrutura vertical da atmosfera** e das **transformações de energia**, principalmente aquelas associadas à **mudança de estado do vapor d'água na atmosfera**.

# Visão geral da atmosfera terrestre



# Atmosfera terrestre

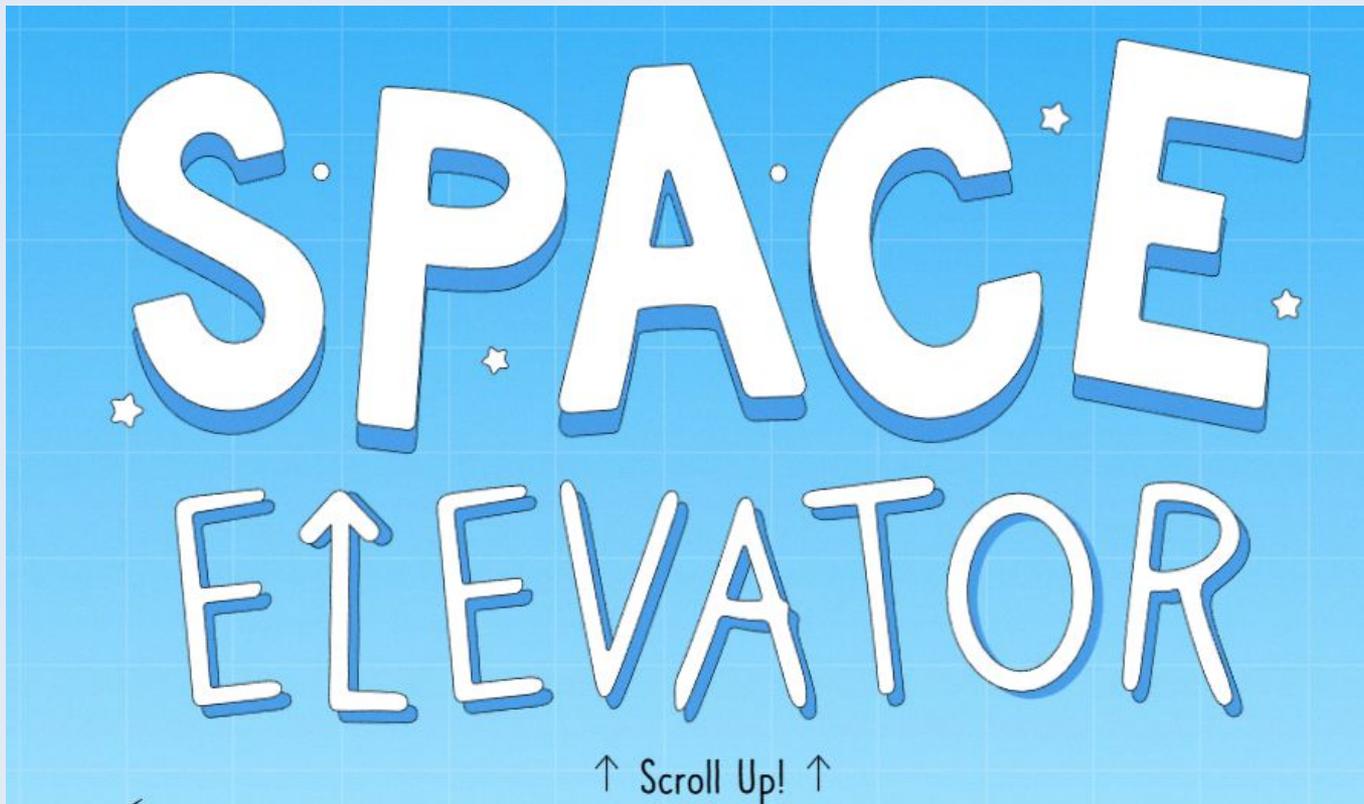
- A atmosfera da Terra é um envelope gasoso muito fino, composta principalmente de **nitrogênio** e **oxigênio**, com *pequenas quantidades* de outros gases, como o vapor de água e dióxido de carbono. As nuvens com água líquida e/ou cristais de gelo estão embebidas na atmosfera.
- Embora nossa atmosfera se estenda a muitas centenas de quilômetros da superfície terrestre, **quase 99% da atmosfera fica dentro de meros 30 km da superfície da Terra.**



- Se a Terra fosse encolhida para o tamanho de uma bola de praia, o seu ambiente habitável seria mais fino do que um pedaço de papel.
- Ou ainda, se espremermos a atmosfera para a densidade da água ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), ela teria apenas 10 metros de espessura! (Densidade da atmosfera a pressão do nível do mar e  $15^\circ\text{C}$  é  $\sim 1,225 \text{ kg/m}^3$ )
- Não há limite superior definido para a atmosfera; em vez disso, torna-se mais fina e mais fina, e eventualmente ela se une com um espaço vazio que envolve todos os planetas.

# Space Elevator

[Space Elevator \(neal.fun\)](http://neal.fun)



# A COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA

- A **Tabela 1.1 mostra** os vários gases presentes em um volume de ar perto da superfície da terra. Observe que o **nitrogênio (N<sub>2</sub>)** ocupa cerca de **78%** e de **oxigênio (O<sub>2</sub>)** de cerca de **21%** do volume total de ar seco. Se todos os outros gases são removidos, esses percentuais de nitrogênio e oxigênio se mantêm relativamente constantes até uma altitude de cerca de 80 km.

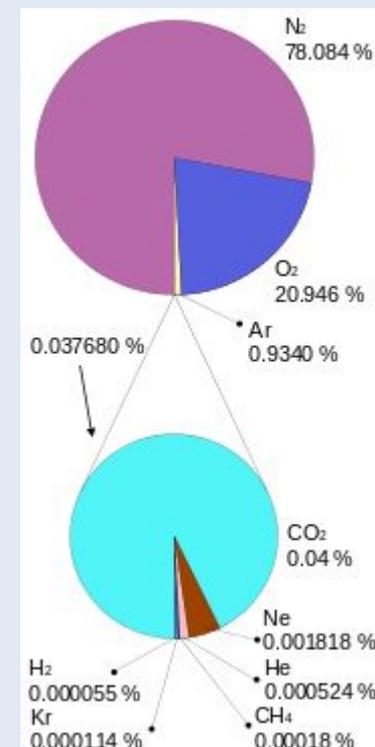
▼ **TABLE 1.1** Composition of the Atmosphere near the Earth's Surface

PERMANENT GASES			VARIABLE GASES			
Gas	Symbol	Percent (by Volume) Dry Air	Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Nitrogen	N <sub>2</sub>	78.08	Water vapor	H <sub>2</sub> O	0 to 4	
Oxygen	O <sub>2</sub>	20.95	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.038	385*
Argon	Ar	0.93	Methane	CH <sub>4</sub>	0.00017	1.7
Neon	Ne	0.0018	Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	0.00003	0.3
Helium	He	0.0005	Ozone	O <sub>3</sub>	0.000004	0.04†
Hydrogen	H <sub>2</sub>	0.00006	Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Xenon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

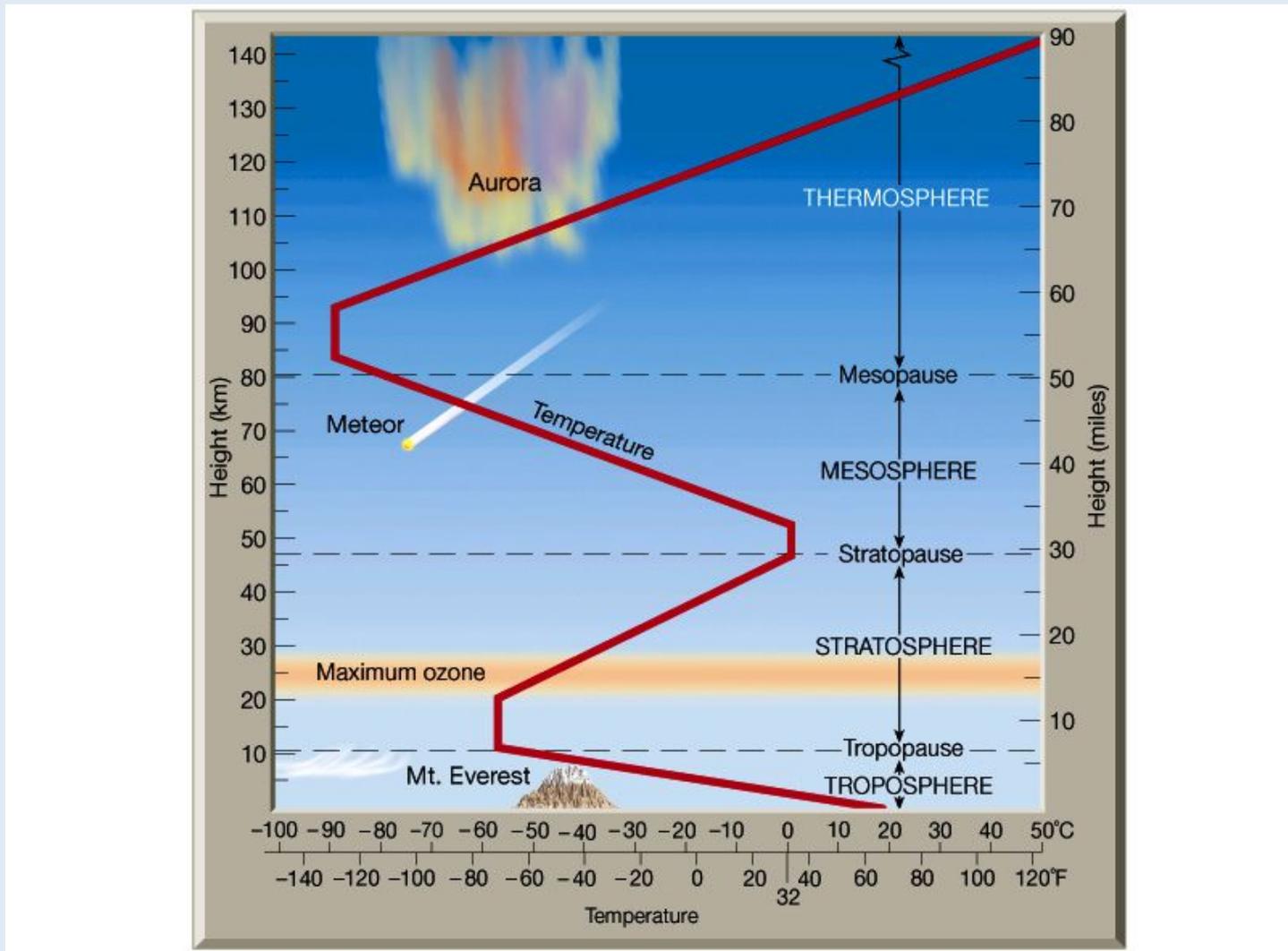
\*For CO<sub>2</sub>, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO<sub>2</sub> molecules.

†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.

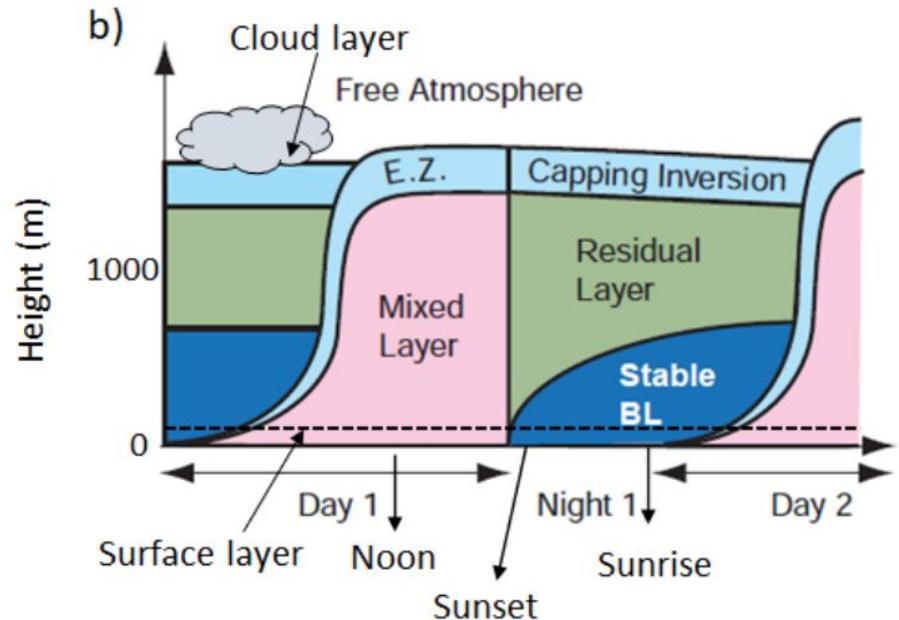
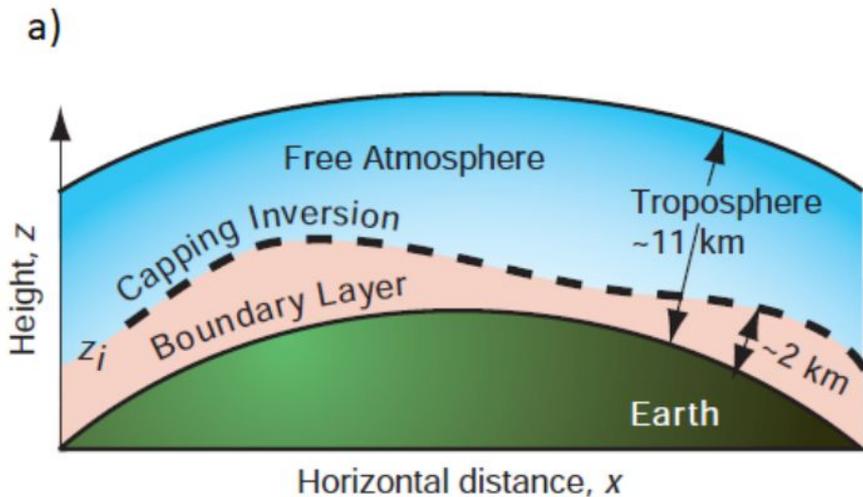
Fonte: Ahrens, C. D., 1999.



# Estrutura vertical atmosférica da Terra

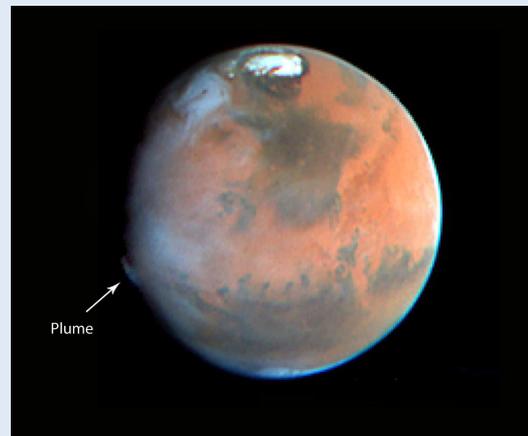


# Camada limite planetária



- Região na qual ocorrem praticamente todos os processos de mistura da atmosfera - localizada nos primeiros quilômetros de altitude
- Dinâmica turbulenta e complexa dominada pela radiação solar e, portanto, pela termodinâmica.

# Comparação de atmosferas do sistema solar



[Marte Perigeu 3x.mp4 | Marte \(observatoriozenite.com.br\)](#)

# Atmosferas - NASA

[The atmospheres of the Solar System | The Planetary Society](#)

[Overview | Mercury – NASA Solar System Exploration](#)

[ESA - Titan's atmosphere](#)

[10 Things: Planetary Atmospheres – NASA Solar System Exploration](#)

# COMPARAÇÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE COM OUTROS PLANETAS

Comparing earth's atmosphere to the other planets

Gas	Rocky (Terrestrial Planets)				Gaseous Planets			
	Mercury	Venus	Earth	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
<b>Atm Pressure</b>	Really low	92	1	0.006	>1000	>1000	>1000	>1000
<b>CO<sub>2</sub></b>		96.5	0.04	95.3				
<b>N<sub>2</sub></b>		3.5	78	2.7				
<b>Ar</b>				1.6				
<b>O<sub>2</sub></b>	42**		21	0.1				
<b>He</b>	6				10.2	3.25	15.2	
<b>CH<sub>4</sub></b>			0.002		tr	0.45	2.3	
<b>H<sub>2</sub>O</b>			1-4	tr	tr			
<b>H<sub>2</sub></b>	22				89.8	96.3	82.5	
<b>Na</b>	29							
<b>NH<sub>3</sub></b>					tr	tr		

\*Pluto is a dwarf planet; it is both rocky and icy (solid water, methane, ammonia).

\*\* The actual amount of oxygen on Mercury is incredibly small.

Atmospheric pressures are compared to the Earth (= 1 bar)  
Pressures on Mercury and Pluto are extremely low:

Mercury ~  $10^{-14}$  bars

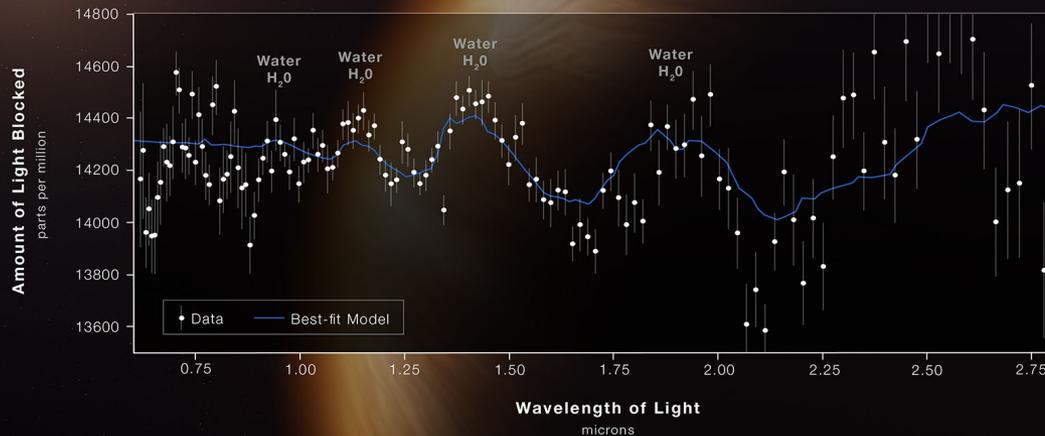
Pluto ~  $10^{-6}$  bars

# E fora do sistema solar?

HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-96 b

## ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRISS | Single-Object Slitless Spectroscopy



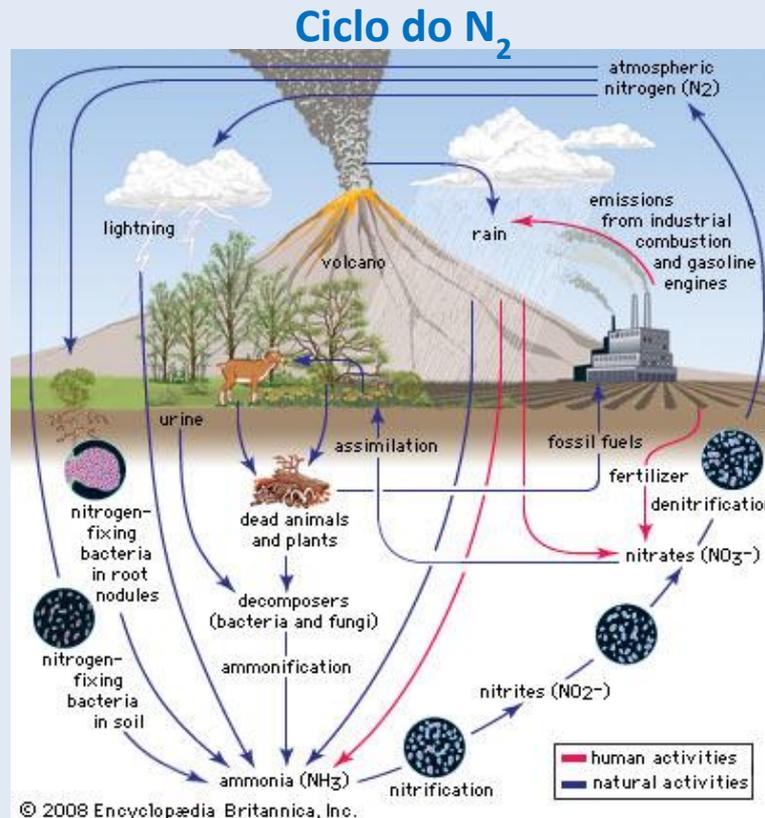
[NASA's Webb Reveals Steamy Atmosphere of Distant Planet in Detail | NASA](#)

WASP-96 b é um dos mais de 5.000 exoplanetas confirmados na Via Láctea. Localizado a cerca de 1.150 anos-luz de distância, na constelação de Fênix, representa um tipo de gigante gasoso que não tem análogo direto em nosso sistema solar. Com uma massa menor que a metade da de Júpiter e um diâmetro 1,2 vezes maior, WASP-96 b é muito mais inchado do que qualquer planeta orbitando nosso Sol. E com uma temperatura superior a 1000 ° F, é significativamente mais quente. WASP-96 b orbita extremamente perto de sua estrela parecida com o Sol, apenas um nono da distância entre Mercúrio e o Sol, completando um circuito a cada 3 dias e meio da Terra.

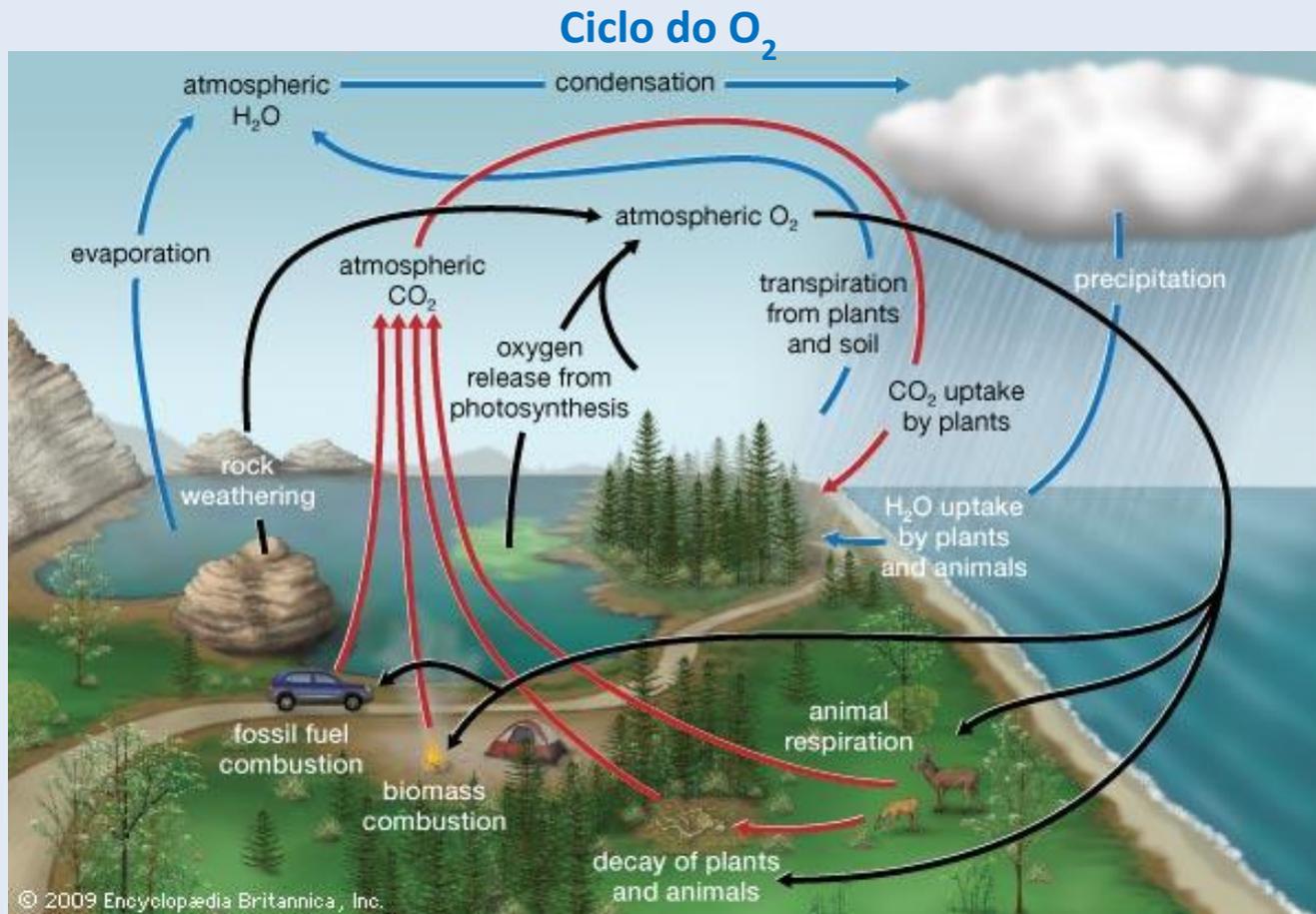
# De volta à Terra

**Ciclos biogeoquímicos: interação  
biosfera - atmosfera**

- Na superfície, há um equilíbrio entre a destruição (saída) e produção (entrada) destes gases, i.e., há um ciclo (ou reciclagem) dos gases.
  - Por exemplo,  $N_2$  é removido da atmosfera principalmente por processos biológicos que envolvem as bactérias do solo. Além disso, o  $N_2$  é retirado do ar por minúsculos plânctons no oceano que o converte em nutrientes que ajudam a fortalecer a cadeia alimentar do oceano.  $N_2$  é retornado para a atmosfera, principalmente através da decomposição da matéria orgânica vegetal e animal.

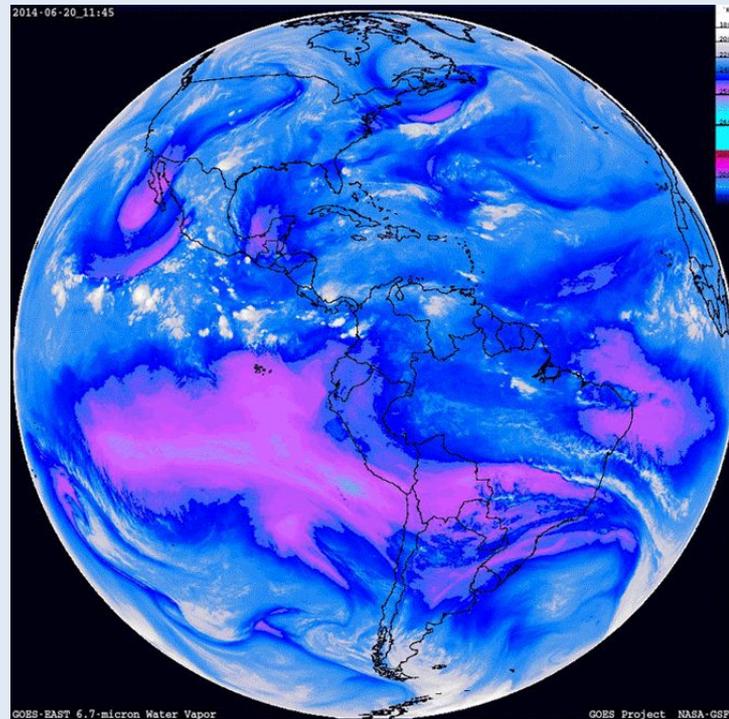


- $O_2$ , por outro lado, é removido da atmosfera quando a matéria orgânica se decompõe e quando o oxigênio combina com outras substâncias, a produção de óxidos. Também é retirado da atmosfera durante a respiração dos seres vivos transformando  $CO_2$  em  $O_2$ . A adição de  $O_2$  na atmosfera ocorre durante a fotossíntese, onde as plantas na presença de luz solar combinam  $CO_2$  e água para produzir açúcar e  $O_2$ .

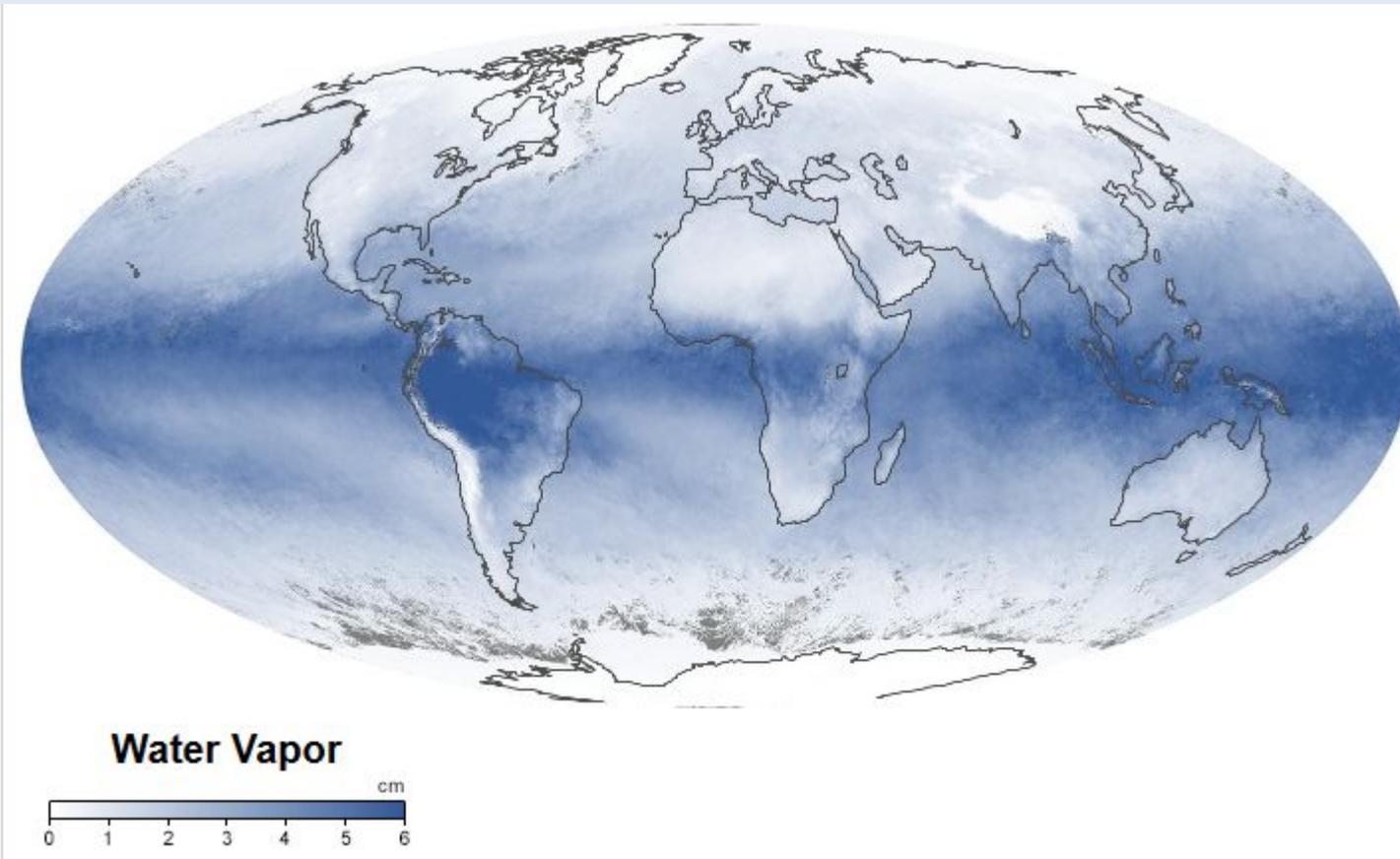


# Distribuição de vapor d'água

- A concentração de vapor de água ( $H_2O$ ), no entanto, varia muito de lugar para lugar e ao longo do tempo. Perto da superfície em locais quentes e tropicais, o vapor de água pode ser responsável por até 4% dos gases da atmosfera, enquanto que nas áreas mais frias do Ártico e desertos, a sua concentração pode diminuir para valores <1%.



# Distribuição de vapor d'água



VAPOR DE AGUA

12 G/KG SP

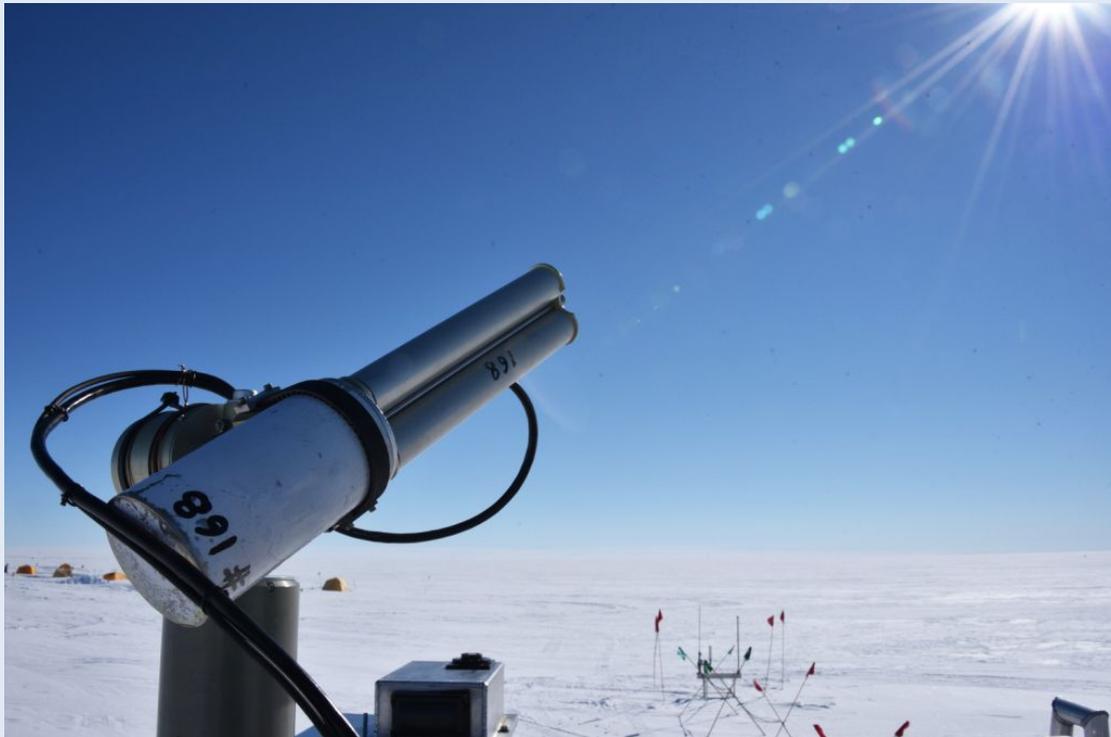
3-4 G/KG POLOS

20 G/KG EQUADOR

[Water Vapor \(nasa.gov\)](http://nasa.gov)

# Vamos ver isto na prática?

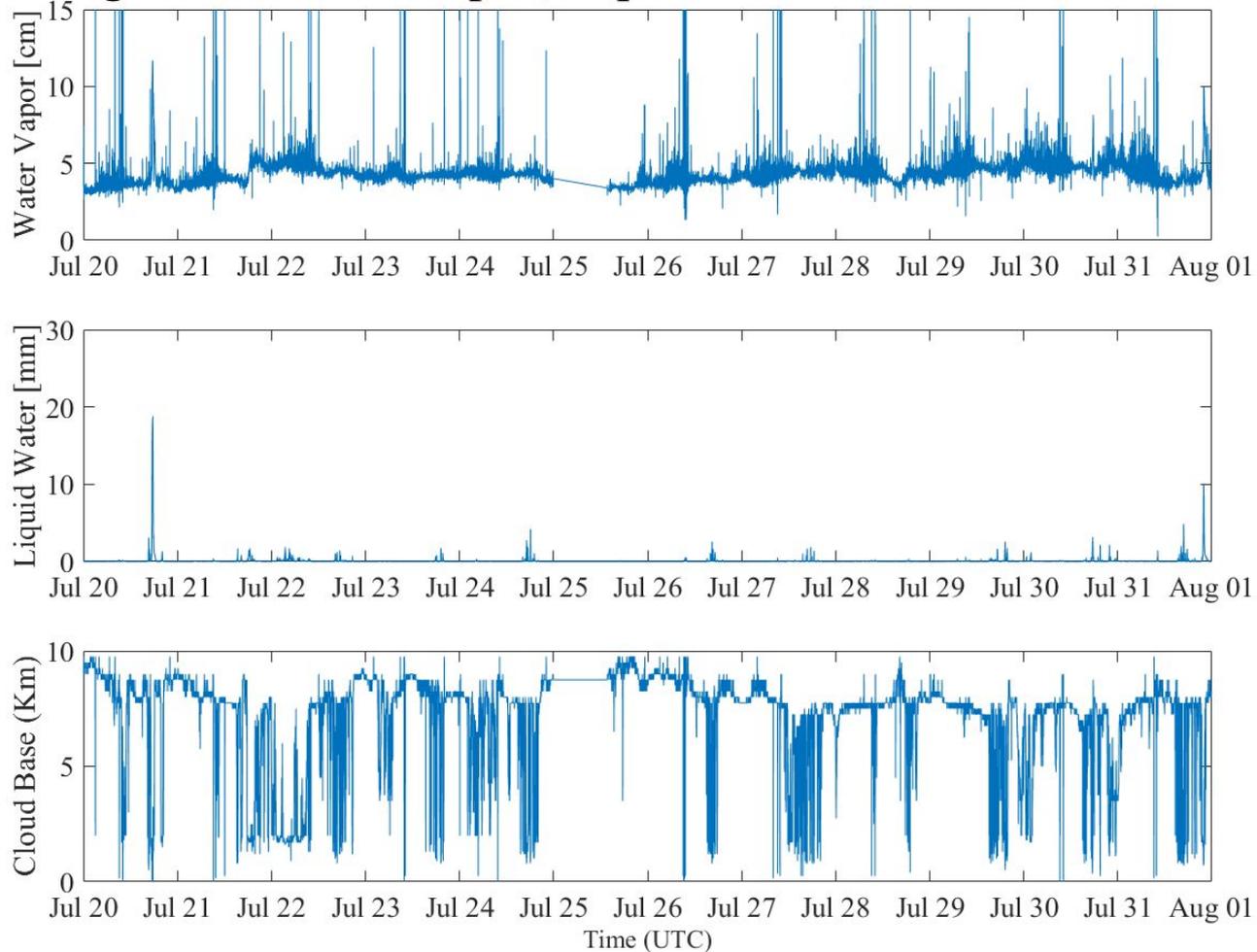
[AERONET Data Display Interface - WWW  
DEMONSTRAT \(nasa.gov\)](#)



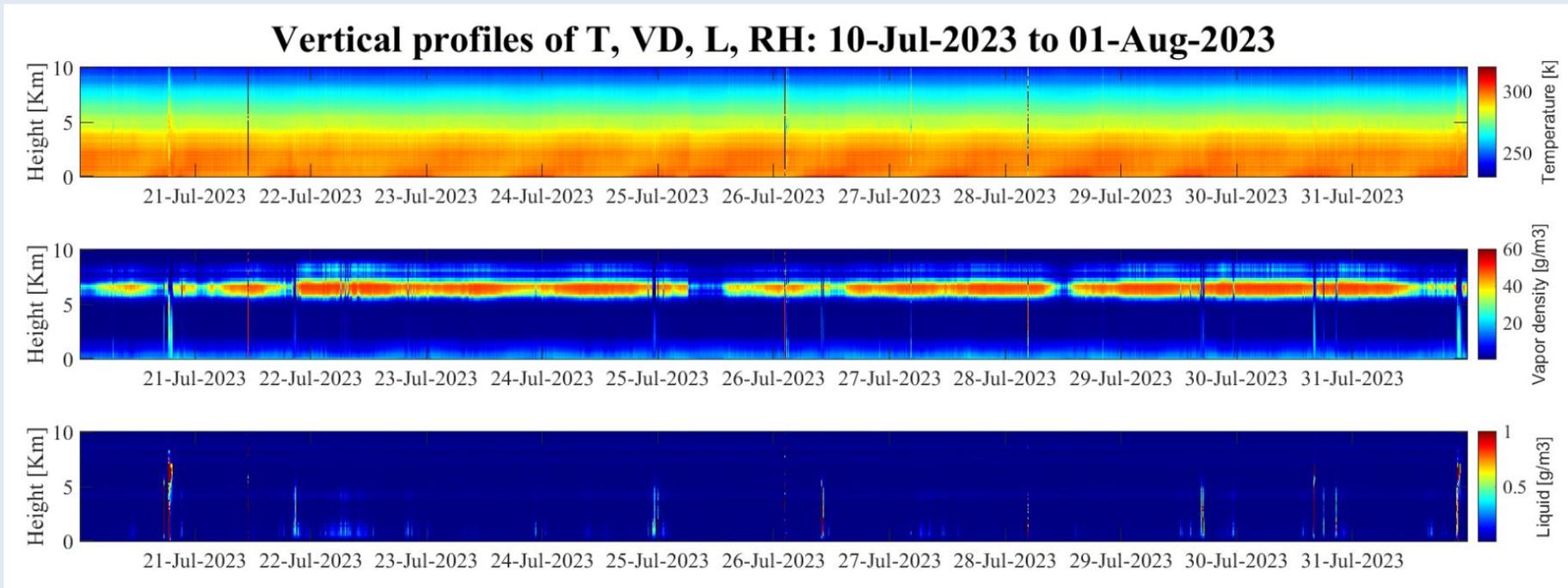
Fotômetro solar - rede AERONET

# Série temporal do vapor d'água na Amazônia Central

**Integrated Values - Vapor, Liquid and Cloud Base: 10-Jul-2023**



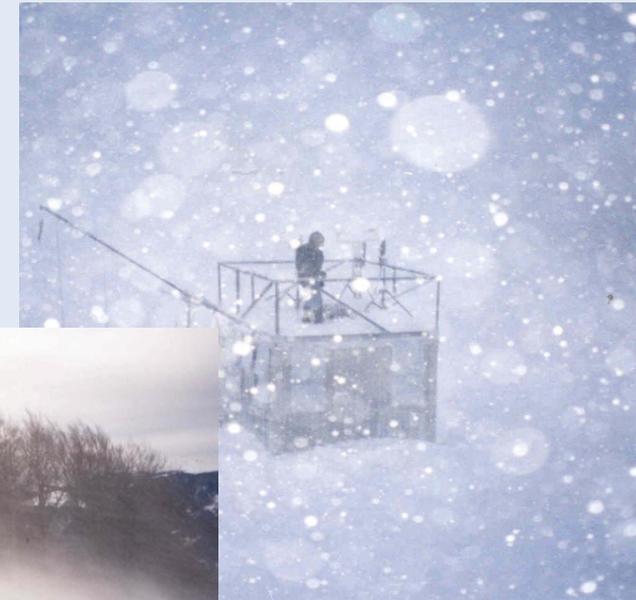
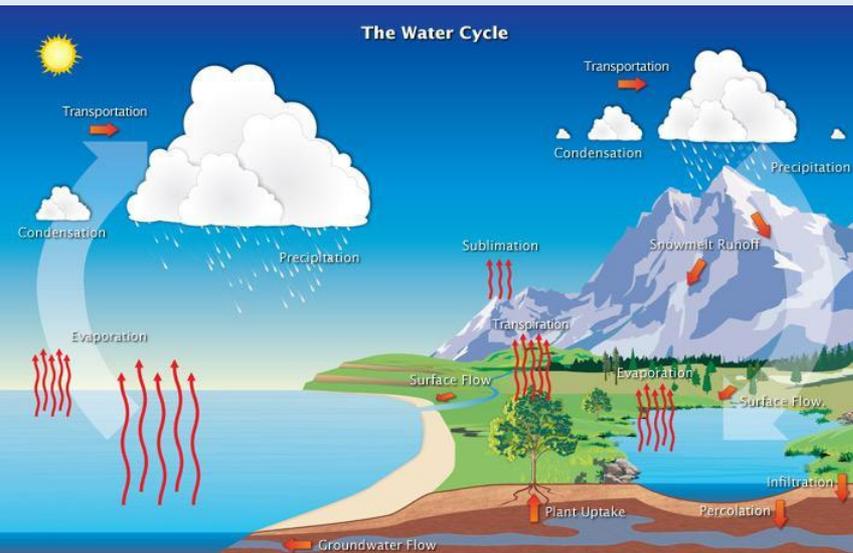
# Outras componentes atmosféricas



# Visão geral da atmosfera terrestre

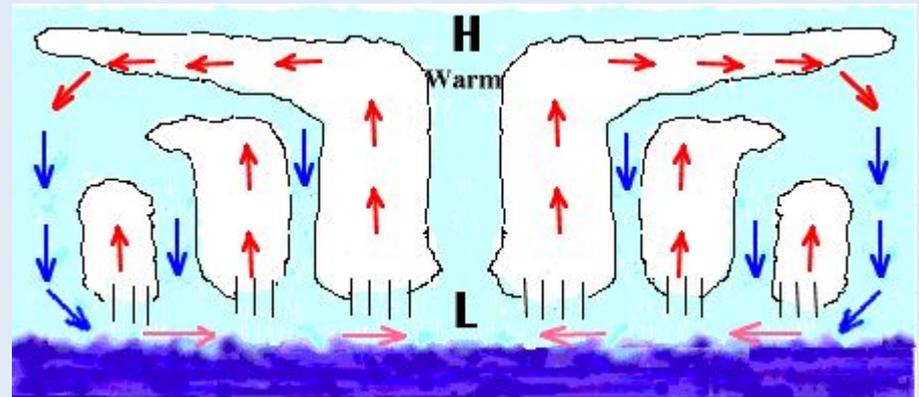
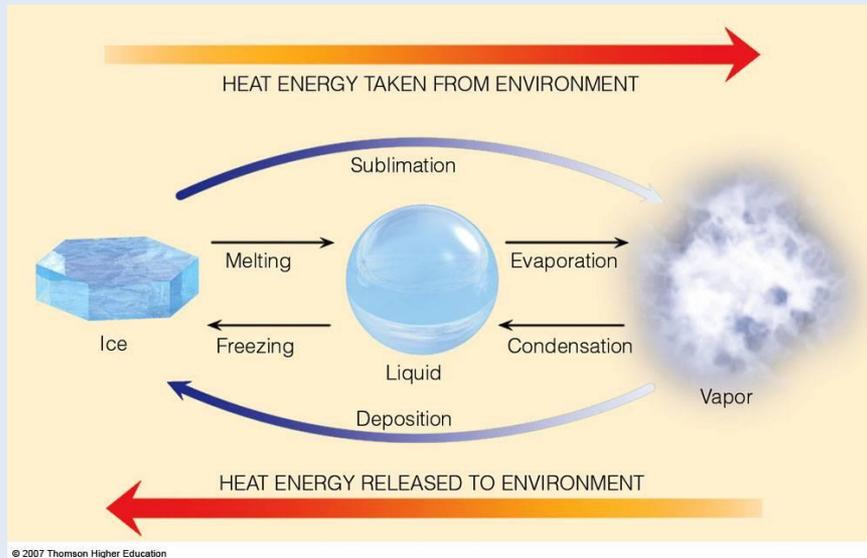
- Moléculas de  $H_2O$  são, é claro, invisíveis. Eles se tornam visíveis apenas quando se transformam em partículas líquidas ou sólidas maiores, como gotículas de nuvens e cristais de gelo, que podem crescer em tamanho e, eventualmente, cair no chão em forma de chuva ou neve (chamada de precipitação).
- $H_2O$  é a única substância que pode ser encontrada nos três estados (gasoso, líquido e sólido) na baixa troposfera.

## Ciclo do $H_2O$



# Visão geral da atmosfera terrestre

- $H_2O$  é um gás extremamente importante em nossa atmosfera. Ele não somente pode formar ambas as partículas líquidas e sólidas da nuvem (que crescem em tamanho e caem na Terra como precipitação), mas também libera grandes quantidades de calor - chamado calor latente - quando ele muda de vapor para água líquida ou gelo.
- O calor latente é uma importante fonte de energia atmosférica, especialmente para as tempestades, como os furacões.

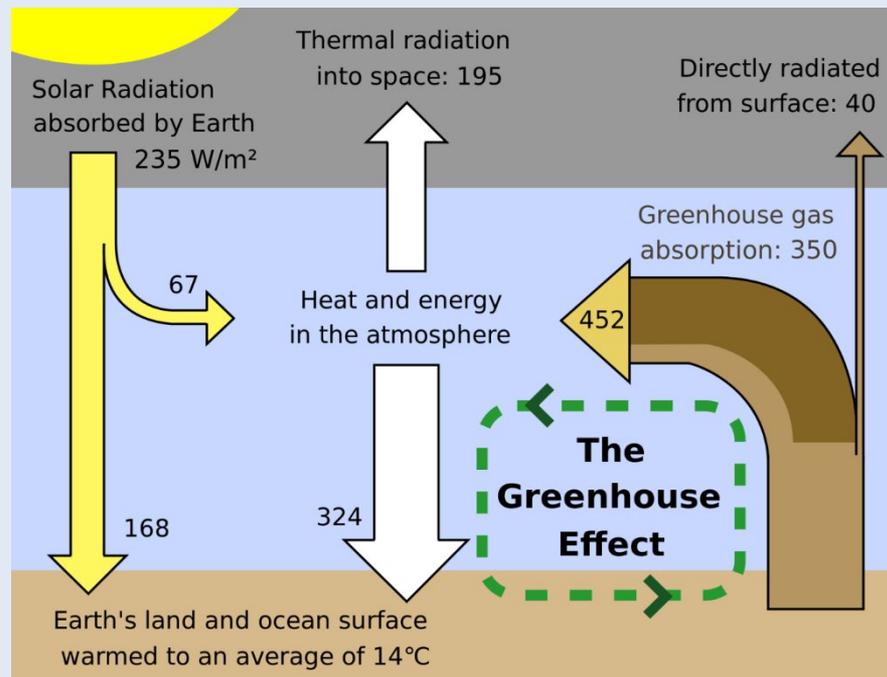






# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

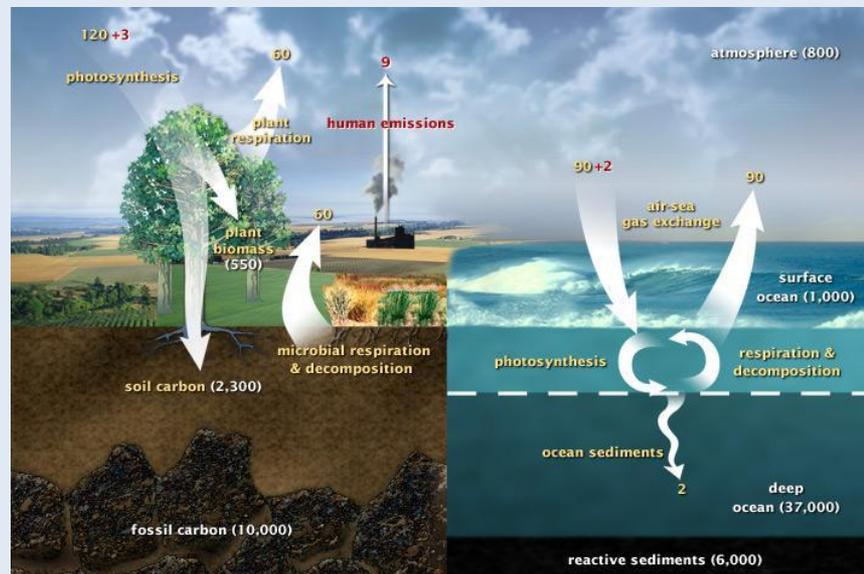
- Além disso, o vapor de água é o principal gás de efeito estufa da atmosfera, porque absorve fortemente uma parcela de energia radiante que parte da Terra.
- Assim, o vapor de água desempenha um papel significativo no equilíbrio radiativo da Terra.



# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

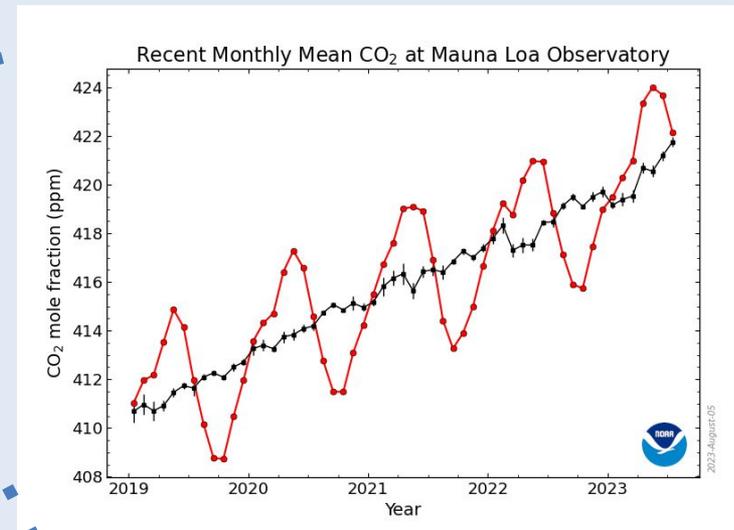
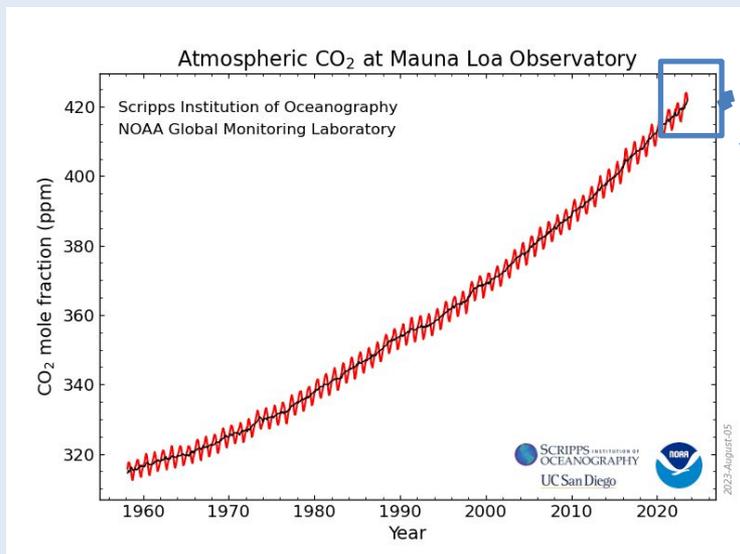
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), um componente natural da atmosfera, ocupa um pequeno, mas *muito importante*, percentual do volume de ar, aproximadamente 0,04%.
  - $\text{CO}_2$  entra na atmosfera, principalmente, pela deterioração da vegetação, mas também vem de erupções vulcânicas, das exalações da vida animal e vegetal, a partir da queima de combustíveis fósseis (como carvão, petróleo e gás natural) e do desmatamento.
  - A remoção de  $\text{CO}_2$  da atmosfera ocorre durante a **fotossíntese**, com as plantas consumindo  $\text{CO}_2$  para produzir matéria verde (biomassa). O  $\text{CO}_2$  é então armazenada em raízes, galhos e folhas.
  - Os oceanos atuam como um enorme reservatório de  $\text{CO}_2$ , onde o **fitoplâncton** (plantas deriva minúsculas) na superfície da água fixa  $\text{CO}_2$  em tecidos orgânicos. O  $\text{CO}_2$  que se dissolve diretamente em águas superficiais é misturado e transportado até grandes profundidades. As estimativas são de que os oceanos têm 50 vezes mais  $\text{CO}_2$  do que o total atmosférico.

## Ciclo do Carbono



# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

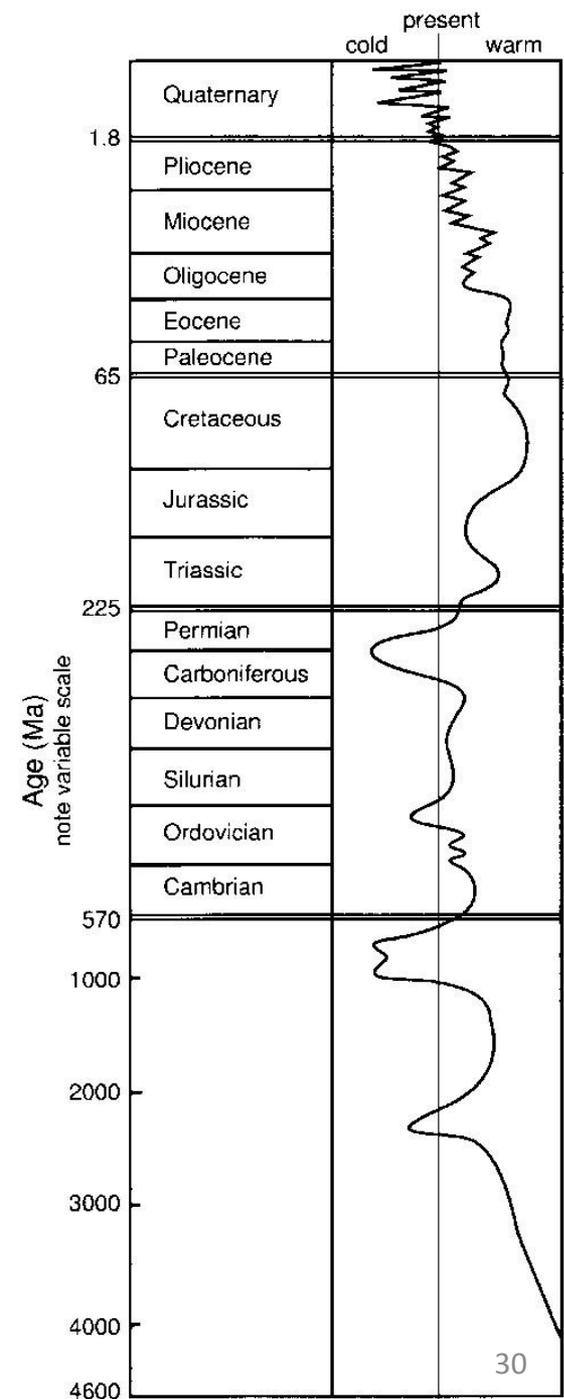
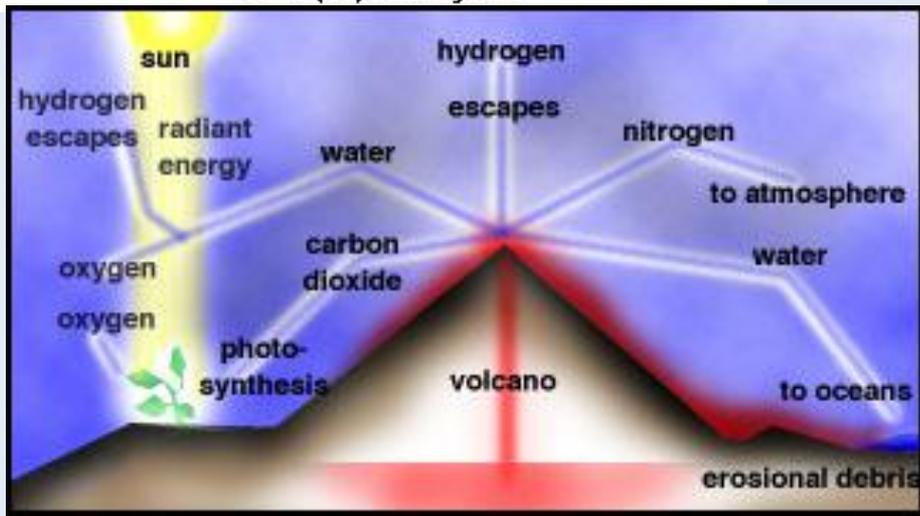
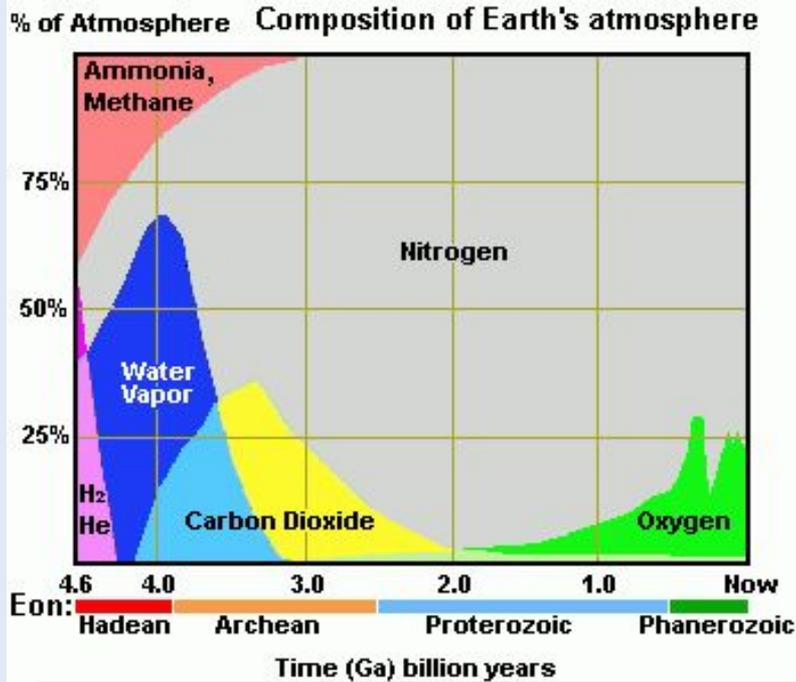
- A figura abaixo nos mostra que a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> já subiu mais de 20% desde 1958, quando foi medida pela primeira vez pelo Observatório Mauna Loa, no Havaí, EUA, e continua subindo ano a ano:



[Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle  
Greenhouse Gases \(noaa.gov\)](https://www.noaa.gov/global-monitoring-laboratory-carbon-cycle-greenhouse-gases)

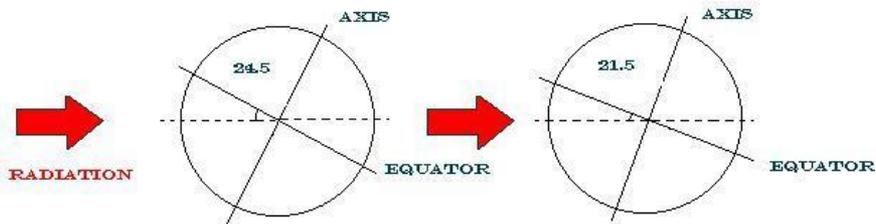
- O ciclo anual representa a atividade biológica: a concentração é maior no final do inverno, quando a atividade biológica está dormente, e decresce a um mínimo no final do verão quando a atividade biológica é máxima através da fotossíntese que remove CO<sub>2</sub> da atmosfera.
- Logo, o aumento nas concentrações ano a ano significa que CO<sub>2</sub> está entrando na atmosfera a uma taxa maior do que está sendo removido. Este aumento é devido principalmente à queima de combustíveis fósseis e desmatamento (queimadas ou deixadas para apodrecer).

# ATMOSFERA PRIMITIVA



# AS ERAS GLACIAIS

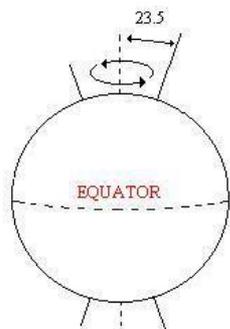
## AXIAL TILT



**PERIODICITY:**

**41,000 YEARS**

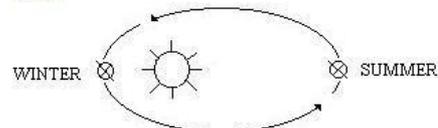
## PRECESSION



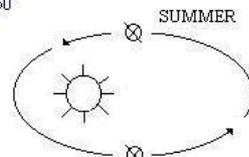
**PERIODICITY:**

**C. 23,000 YEARS**

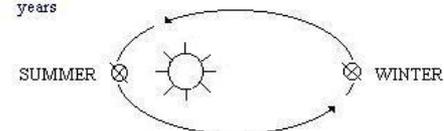
1. Now



2. In c. 5,250 years

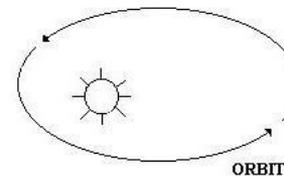


3. In c. 10,500 years

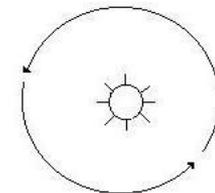


## ECCENTRICITY

**MORE ELLIPTICAL**



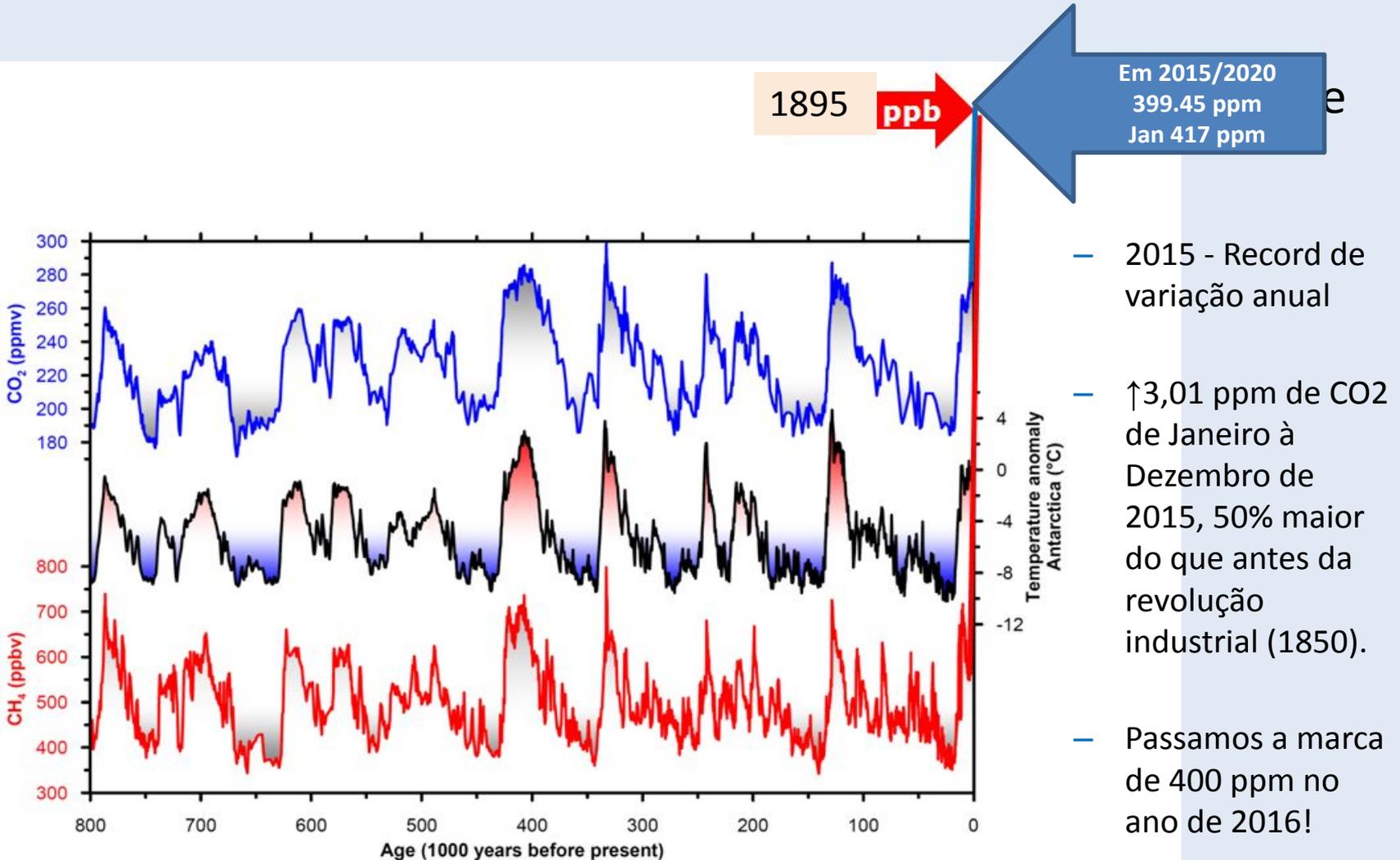
**LESS ELLIPTICAL**



**PERIODICITY:**

**100,000 YEARS**

# 1. Visão geral da atmosfera terrestre



# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

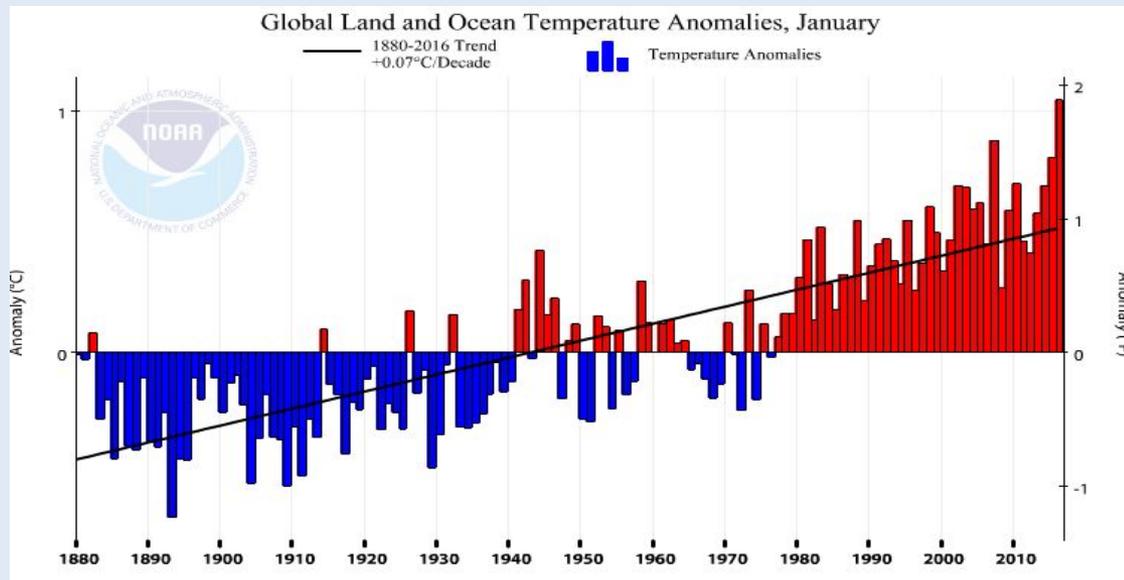
- As medições de CO<sub>2</sub> também vêm de núcleos de gelo retirados de geleiras ao redor do globo. Na Groenlândia e na Antártida, por exemplo, pequenas bolhas de ar aprisionado dentro dos lençóis de gelo revelam que antes da **Revolução Industrial**, os níveis de CO<sub>2</sub> ficaram estáveis em cerca de **280 ppm**. Desde o início dos anos 1800, no entanto, os níveis de CO<sub>2</sub> **umentaram mais de 37%**. Com os níveis de CO<sub>2</sub> aumentando cerca de **0,4% ao ano** (1,9 ppm/ano), estima-se que a concentração de CO<sub>2</sub> provavelmente subirá de seu valor atual de cerca de 402,52 ppm para um valor próximo de **500 ppm no final deste século**.



# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

- O  $\text{CO}_2$  é um *outro gás de efeito estufa importante* porque, assim como o vapor de água, retém uma parte da energia que sai da terra. Consequentemente, com todo o resto igual, como a concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  aumenta, a temperatura média do ar na superfície global também deve aumentar.
- Na verdade, ao longo dos últimos 100 anos ou mais, a temperatura média da superfície da Terra aqueceu-se por mais de  $0,8^\circ\text{C}$ .

<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201601>



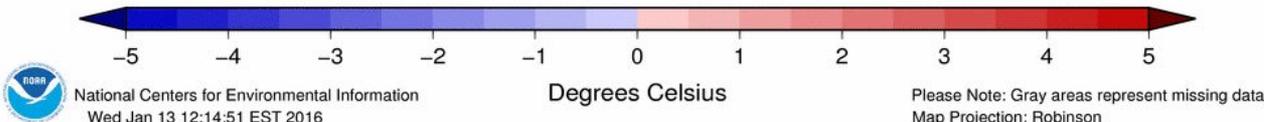
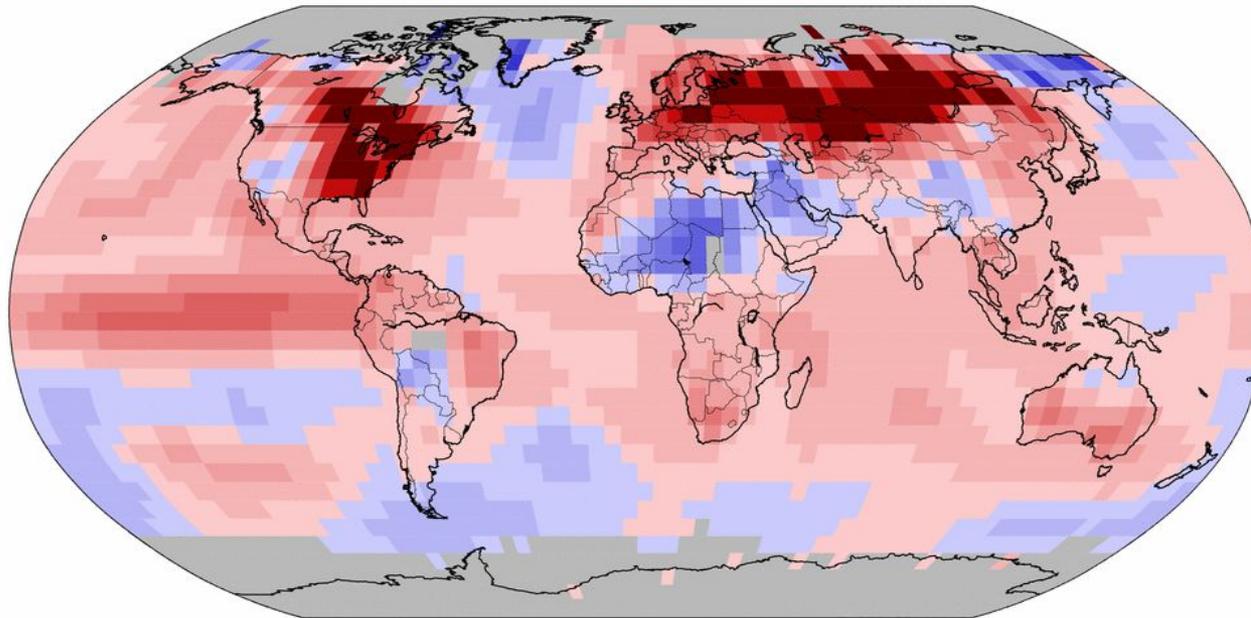
- Modelos climáticos matemáticos que predizem as condições atmosféricas futuras estimam que, se os níveis crescentes de  $\text{CO}_2$  (e outros gases de efeito estufa) continuar em suas taxas atuais, a superfície da Terra pode aquecer por um adicional de  $3\text{-}5^\circ\text{C}$  até o final deste século.

# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

- Todos os anos estamos observando recordes de temperatura (mínima e máxima) ao longo do globo:

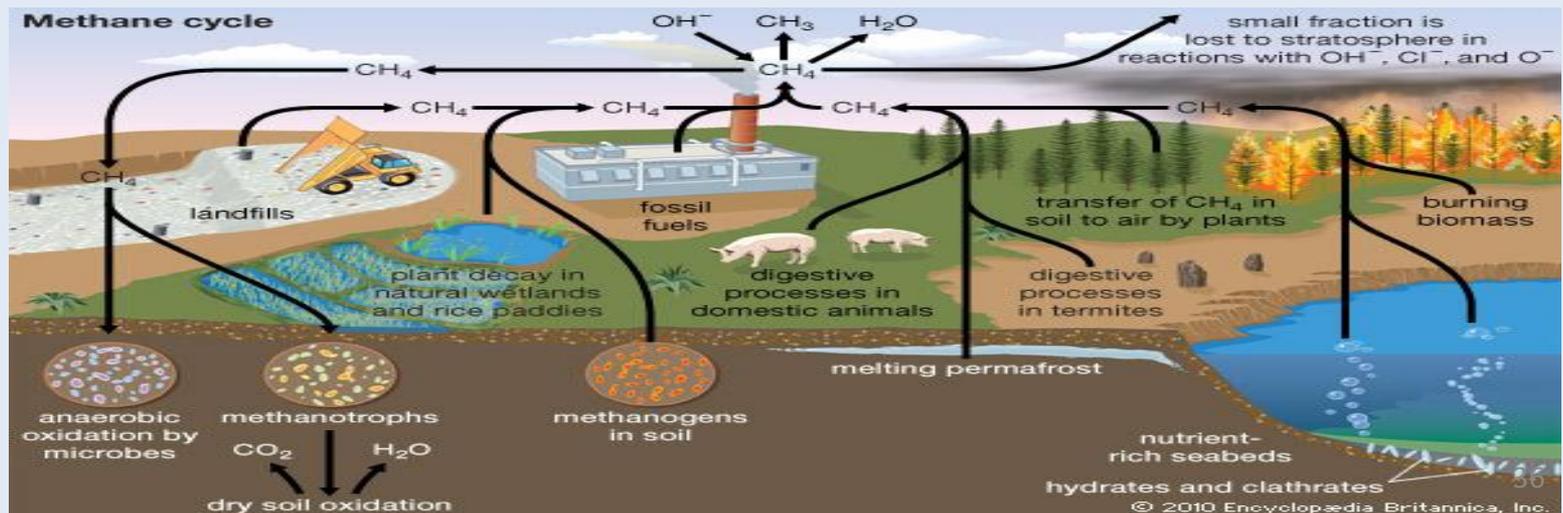
Land & Ocean Temperature Departure from Average Dec 2015  
(with respect to a 1981–2010 base period)

Data Source: GHCN–M version 3.3.0 & ERSST version 4.0.0



# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

- O  $\text{CO}_2$  e o vapor de água não são os únicos gases de efeito estufa. Recentemente, outros gases tem ganhado notoriedade, principalmente porque suas concentrações também vêm aumentando. Estes gases incluem o metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), e clorofluorocarbonetos ( $\text{CFCs}$ ). Esses gases (incluindo o  $\text{CO}_2$ ) são chamados de **gases traços**, devido a sua pequena porcentagem do volume total.
- Os níveis de  $\text{CH}_4$ , por exemplo, têm aumentado ao longo do século passado a uma taxa de 0,5% ao ano. A maior parte deste gás parece se originar a partir da quebra de material vegetal por certas bactérias em arrozais, solo molhado pobre em oxigênio, atividade biológica de cupins, e reações bioquímicas no estômago de vacas.

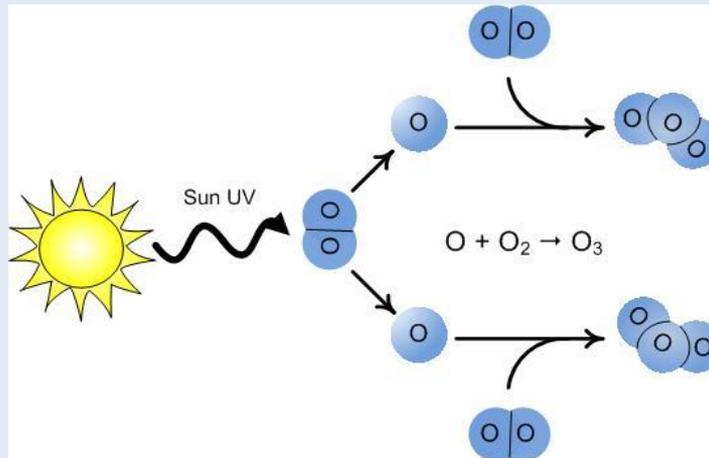


# Outros componentes

- Os níveis de óxido nitroso ( **$N_2O$** ) - vulgarmente conhecido como gás do riso - têm aumentado anualmente a uma taxa de cerca de 0,25%.  $N_2O$  é formado no solo por meio de um processo químico que envolve bactérias e certos micróbios. A luz solar ultravioleta do sol o destrói.
- Clorofluorocarbonetos (**CFCs**) representam um grupo de gases de efeito estufa que, até recentemente, era crescente em concentração. Eles foram os propulsores mais amplamente utilizados em latas de spray. Hoje, no entanto, eles são usados principalmente como gás para refrigeração, como propulsores para o sopro de isolamentos térmicos de borracha, e como solventes para limpeza de microcircuitos eletrônicos. Apesar de sua concentração média em um volume de ar ser muito pequena (0,00003%), eles têm um efeito importante na nossa atmosfera, pois não só têm o potencial para elevar as temperaturas globais, mas também destroem o gás ozônio ( $O_3$ ) na estratosfera que nos protege da radiação ultravioleta do Sol.

# ozônio

- Na superfície, o ozônio ( $O_3$ ) é o principal ingrediente do nevoeiro fotoquímico, o qual irrita os olhos e a garganta (além de problemas de saúde graves) e danifica a vegetação. Mas a maior parte do  $O_3$  atmosférico (cerca de 97%) é encontrada na atmosfera superior - *na estratosfera* - onde é formado naturalmente, através de reações fotoquímicas entre átomos de oxigênio ( $O^2$ ) e moléculas de oxigênio ( $O_2$ ).

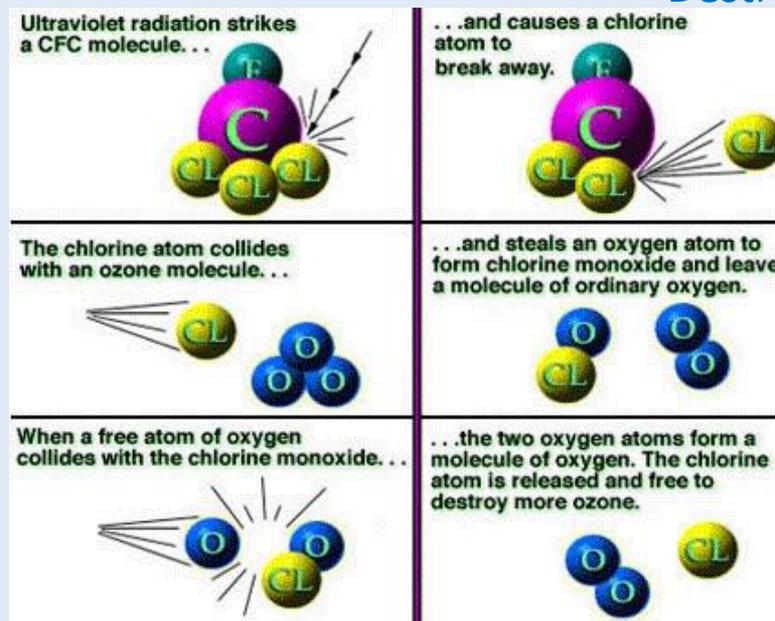


- Na estratosfera, a concentração de  $O_3$  média é menor do que 0,002% do volume total da atmosfera. Esta pequena quantidade é importante, no entanto, porque ele protege plantas, animais e seres humanos dos raios ultravioletas nocivos do sol.

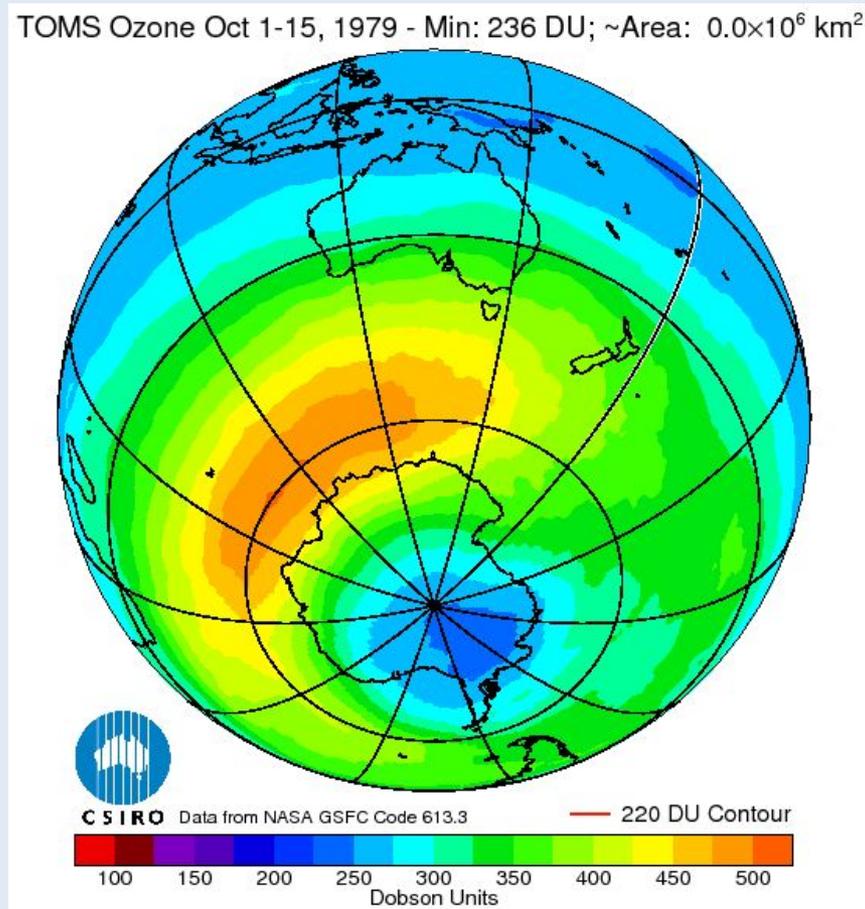
# 1. Visão geral da atmosfera terrestre

- Quando os CFCs entram na estratosfera, os raios ultravioletas quebram a molécula de CFC liberando um átomo de cloro que reagem com a molécula de  $O_3$ . Desta reação resulta monóxido de cloro (ClO), que então reage com um átomo de oxigênio, gerando uma molécula de oxigênio ( $O_2$ ) e um átomo livre de cloro, que irá novamente reagir com uma molécula de  $O_3$ .

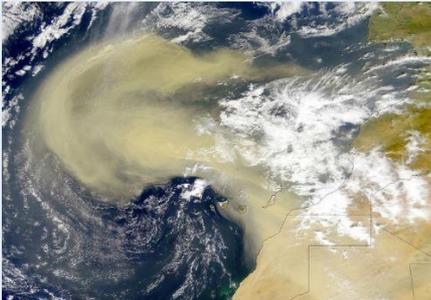
## Destruição da camada de ozônio



- Devido a este efeito, a concentração de ozônio na estratosfera foi diminuindo ao longo de partes do Hemisférios Norte e Sul. A redução dos níveis de ozônio estratosférico sobre a primavera Antártica é tão alarmante que nos meses de setembro e outubro, há um buraco de ozônio sobre a região. A figura abaixo ilustra a extensão do buraco na camada ozônio (linha vermelha) sobre a Antártida nos meses de outubro de 1979 a 2010.



- Impurezas, de fontes naturais e antropogênicas, também estão presentes na atmosfera:
  - Vento levanta poeira e solo da superfície da Terra e leva-os ao ar;
  - Pequenas gotas de água salgada são injetadas no ar através das ondas (por evaporação, estas gotas deixam partículas de sal microscópicas suspensas na atmosfera);
  - Fumaça de incêndios florestais é muitas vezes levada à níveis bem acima da superfície da terra;
  - Indústrias e meios de locomoção como automóveis, caminhões, navios e aviões injetam na atmosfera inúmeros poluentes gasosos;
  - E vulcões expõem muitas toneladas de partículas de cinzas finas e gases no ar
  - Coletivamente, essas minúsculas partículas sólidas ou líquidas em suspensão são chamadas **aerossóis**.



# A Terra é um sistema complexo

