



Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas
DCA/IAG/USP

AGM5823 – Tópicos em química atmosférica

Ozônio estratosférico – Parte 1

Profa. Adalgiza Fornaro

São Paulo, setembro 2023

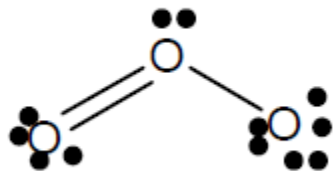
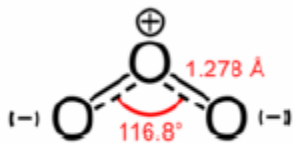
Química da atmosfera

Ozônio estratosférico:

- o que é a camada de ozônio?
- quais processos (físicos e químicos “naturais) afetam a $[O_3]$

Referência importante

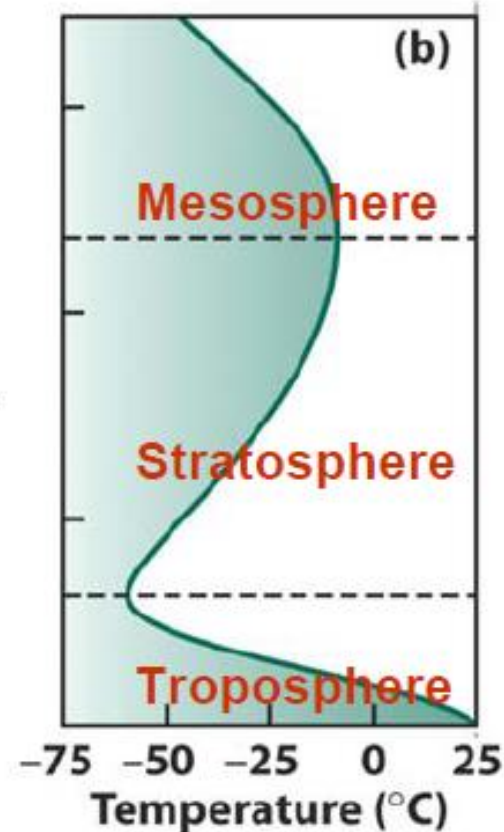
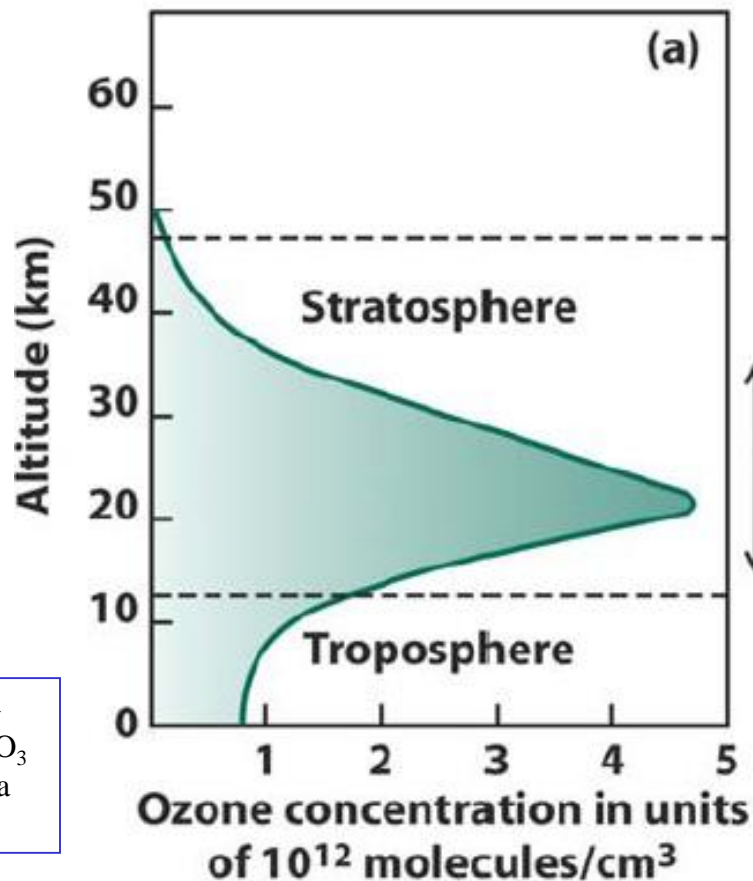
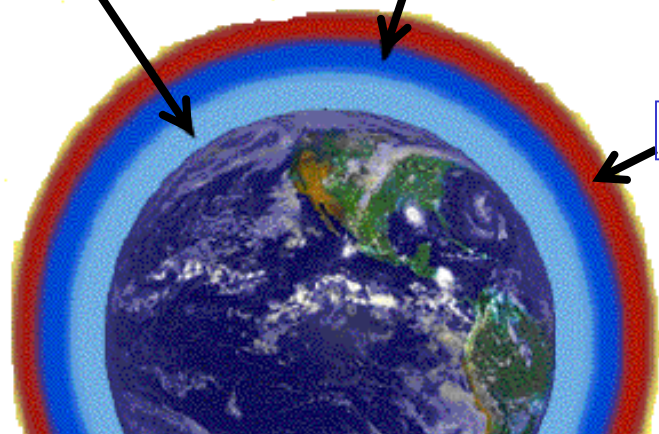
Susan Solomon , STRATOSPHERIC OZONE DEPLETION: A REVIEW OF CONCEPTS AND HISTORY, Reviews of Geophysics, 37(3), 275–316, 1999



Troposfera – nesta região, O_3 pode prejudicar tecidos do pulmão e plantas

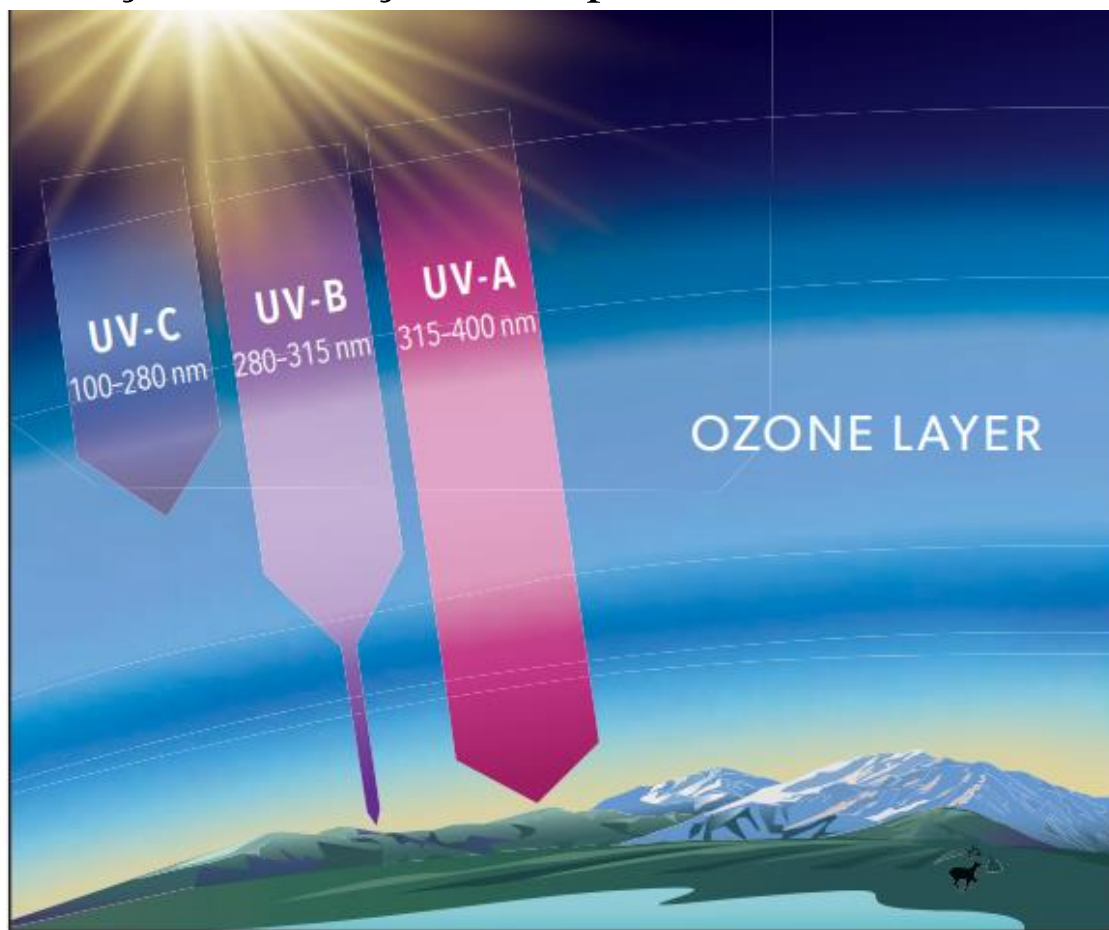
Estratosfera – nesta região, O_3 nos protege da radiação UV

Mesosfera



Importância do ozônio estratosférico:

Proteção da radiação UV a partir da camada de ozônio

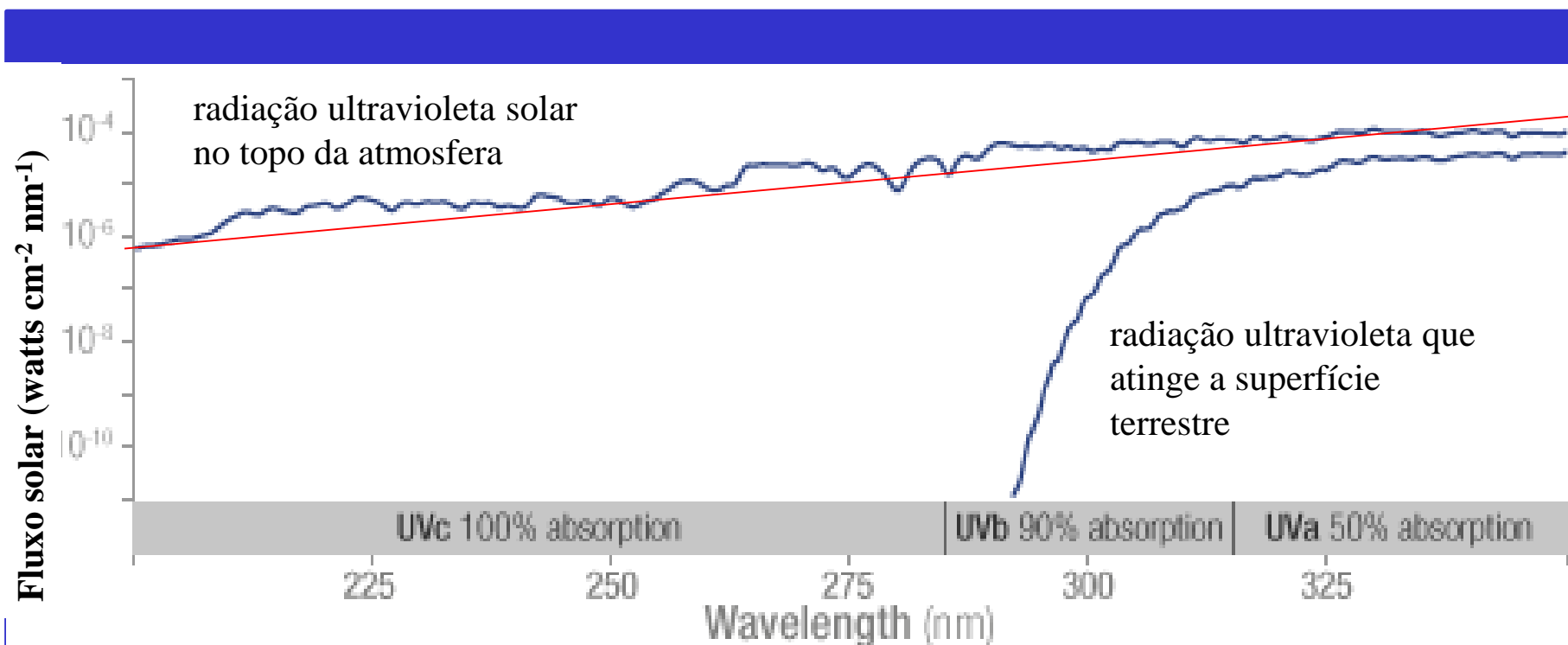


UVC (100 – 280 nm) → absorção por O_2

UVB (280 – 315 nm) → absorção por O_3

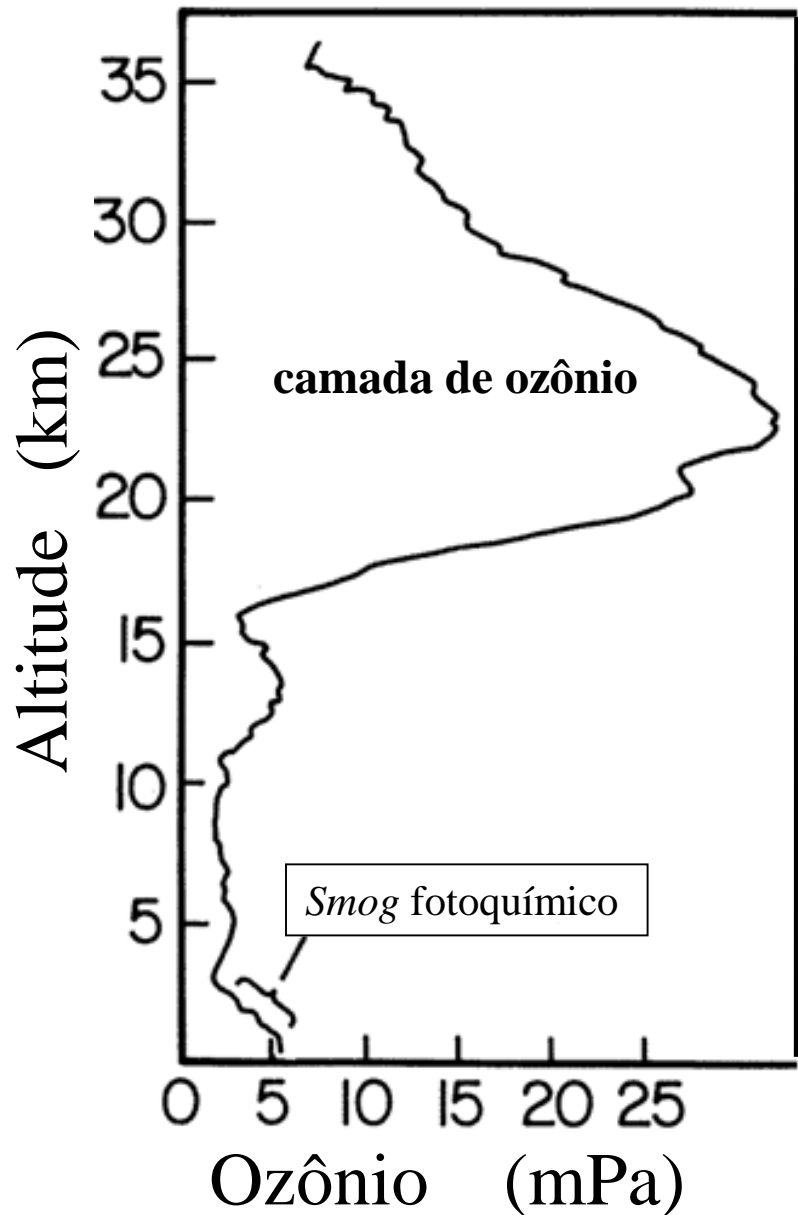
UVA (315 – 400 nm) → importante para síntese da Vit. D

A radiação ultravioleta solar é largamente absorvida pelo ozônio na atmosfera, especialmente o nocivo, de alta energia de UV-A e UV-B. O gráfico mostra o fluxo (valor do fluxo de energia através de uma área) de radiação ultravioleta solar no topo da atmosfera (linha de cima) e na superfície da Terra (linha inferior). O fluxo é mostrado numa escala logarítmica, de modo que cada marca de escala no eixo dos y indica 10 vezes mais energia.



<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html>

Ozônio atmosférico

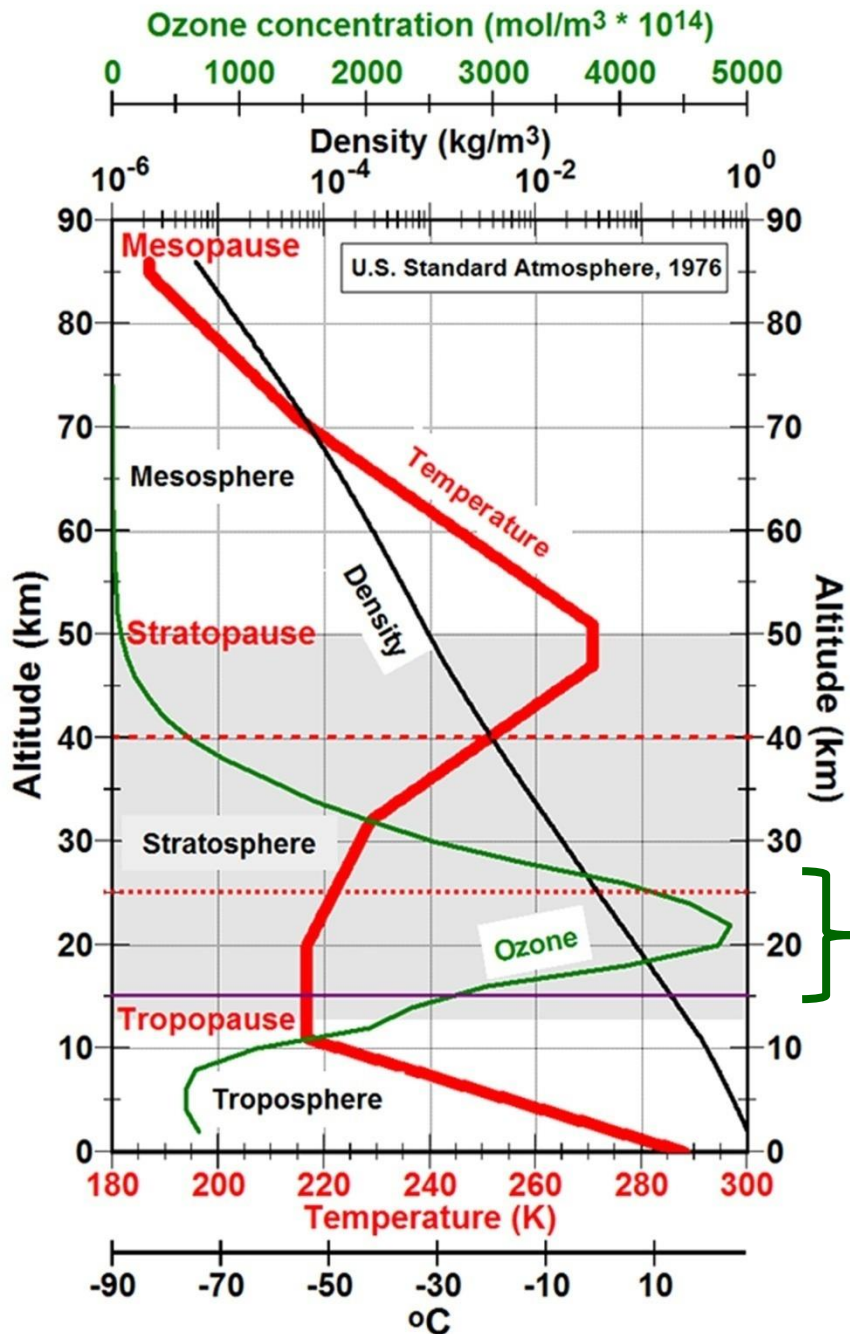


Ozônio estratosférico

- ❑ 90% do ozônio atmosférico
- ❑ Papel benéfico: age como filtro de radiação UV
- ❑ Assuntos atuais:
 - Tendência global de diminuição
 - Buraco de ozônio todo ano na primavera na Antártica
 - Anos recentes perda de ozônio na primavera no Ártico

Ozônio troposférico

- ❑ Contém 10% do ozônio atmosférico
- ❑ Impacto negativo: efeitos tóxicos em humanos e vegetação
- ❑ Assuntos atuais:
 - Episódios de altas concentrações de ozônio em atmosfera urbana e rural

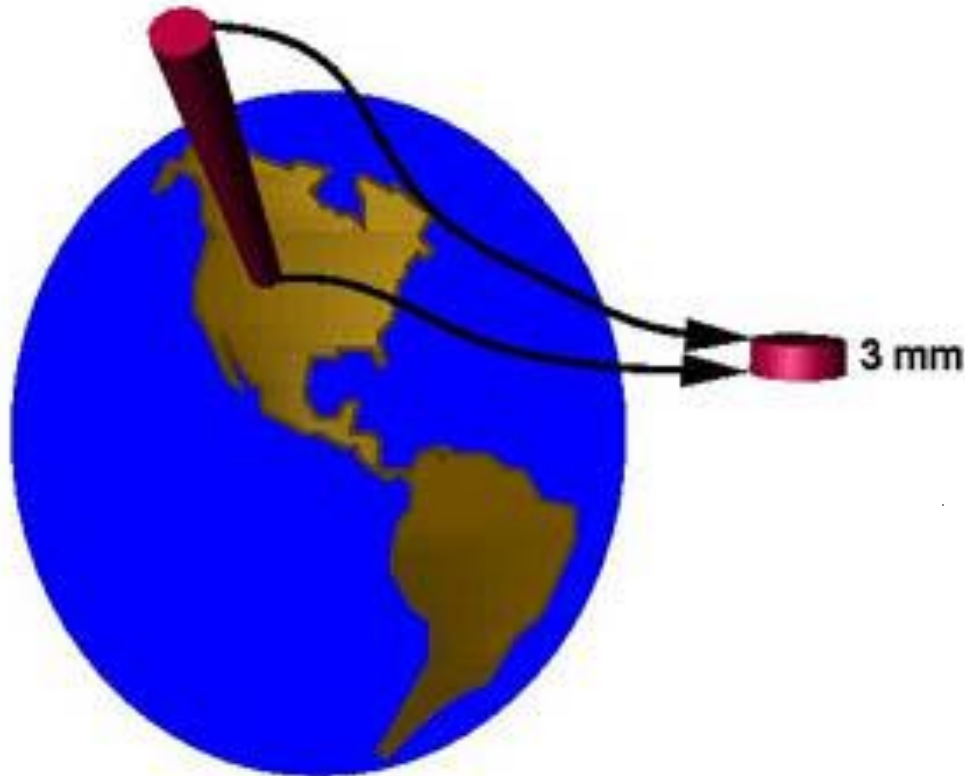


Perfil de ozônio, densidade e temperatura na atmosfera terrestre

**Camada de ozônio
na estratosfera**

<https://ozonedepletiontheory.info/ImagePages/atmosphere-temp-ozone-density.html>

Unidades Dobson (UD)

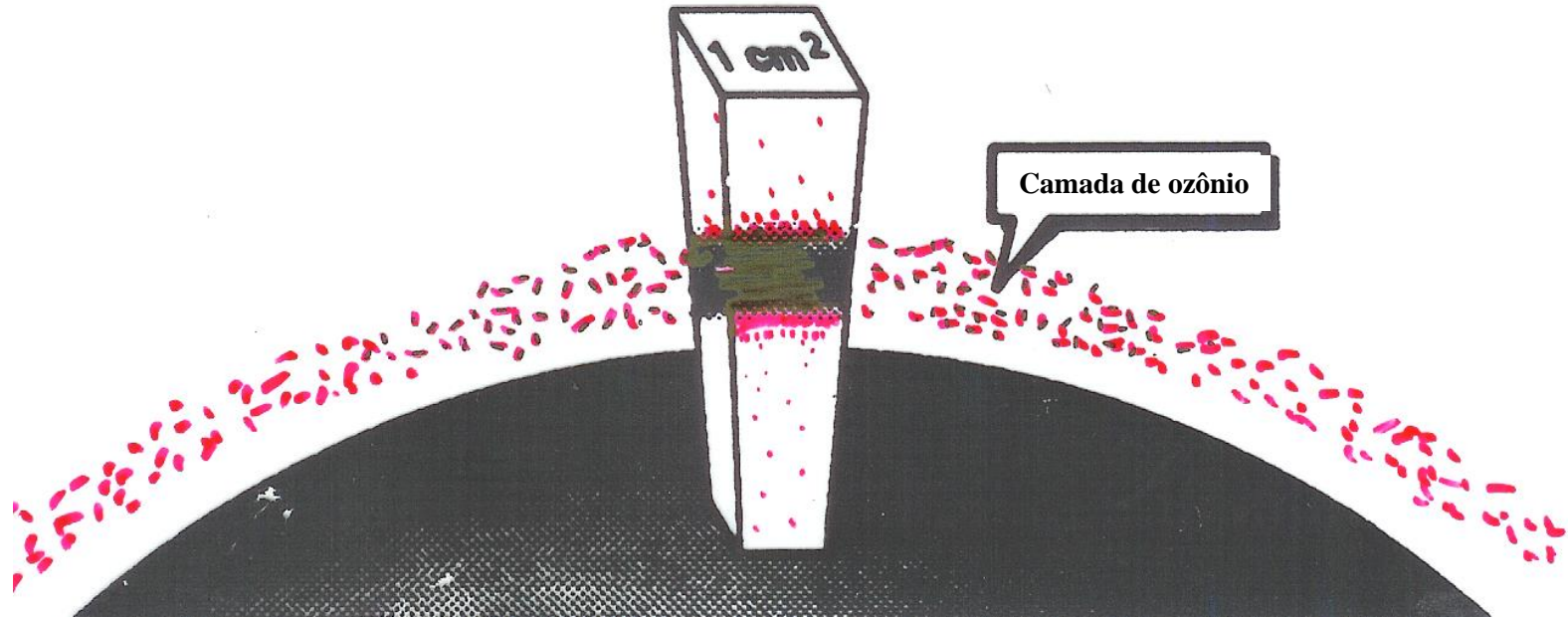


- Considera todo o ozônio acima de uma localização em condições de 0°C e 1 atm.
- A espessura desta camada mede 3 mm, correspondendo a 300 UD (aproximadamente à média global).
- 100 unidades Dobson corresponde a 1mm de espessura.



➤ A unidade Dobson é uma unidade conveniente para medidas da coluna total de ozônio

Coluna de ozônio

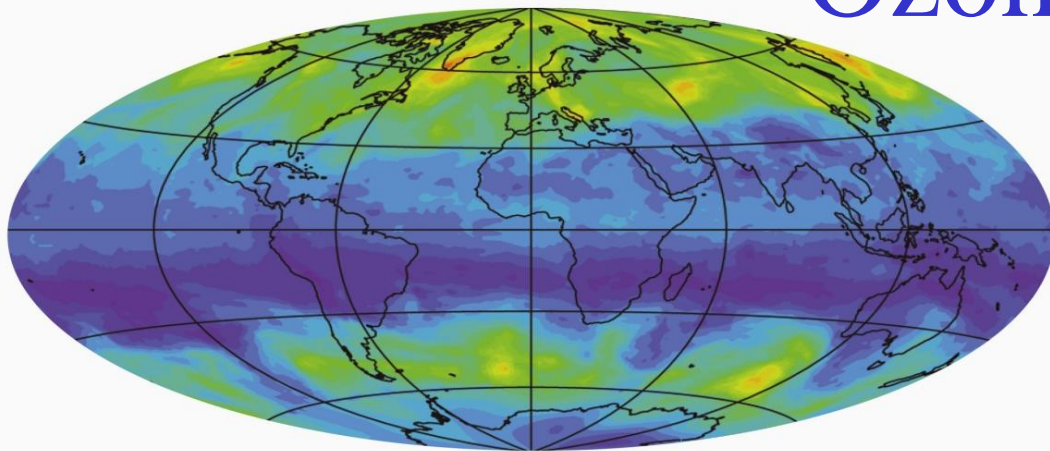


Define $100 \text{ DU} = 1 \text{ mm}$ de espessura de O_3 na STP (1 atm e 273 K)

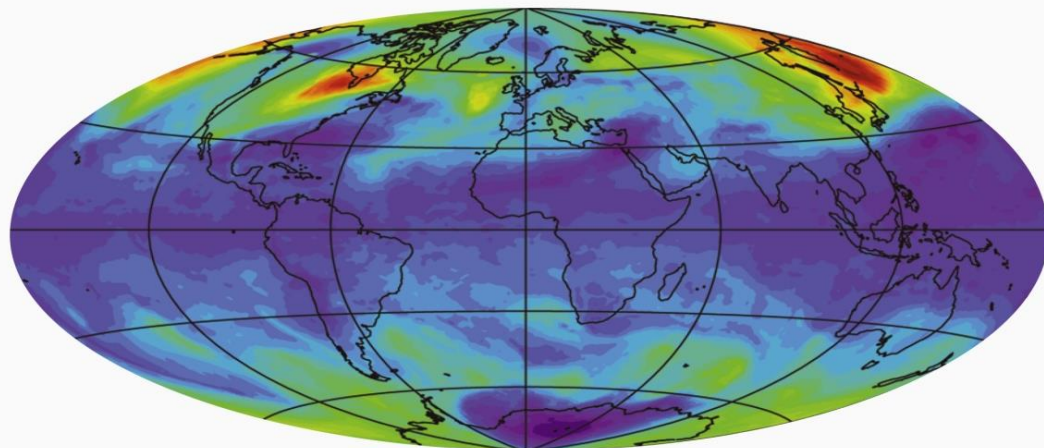
$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{1 \text{ atm}}{0.0821 \frac{\text{l-atm}}{\text{mole-K}} 273 \text{ K}} \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ cm}^3} \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ molec}}{1 \text{ mole}} = 2.7 \times 10^{19} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3}$$

$$1 \text{ DU} = 2.7 \times 10^{19} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3} 0.001 \text{ cm} = 2.7 \times 10^{16} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$$

Ozônio Estratosférico



22 June 1999



22 December 1999

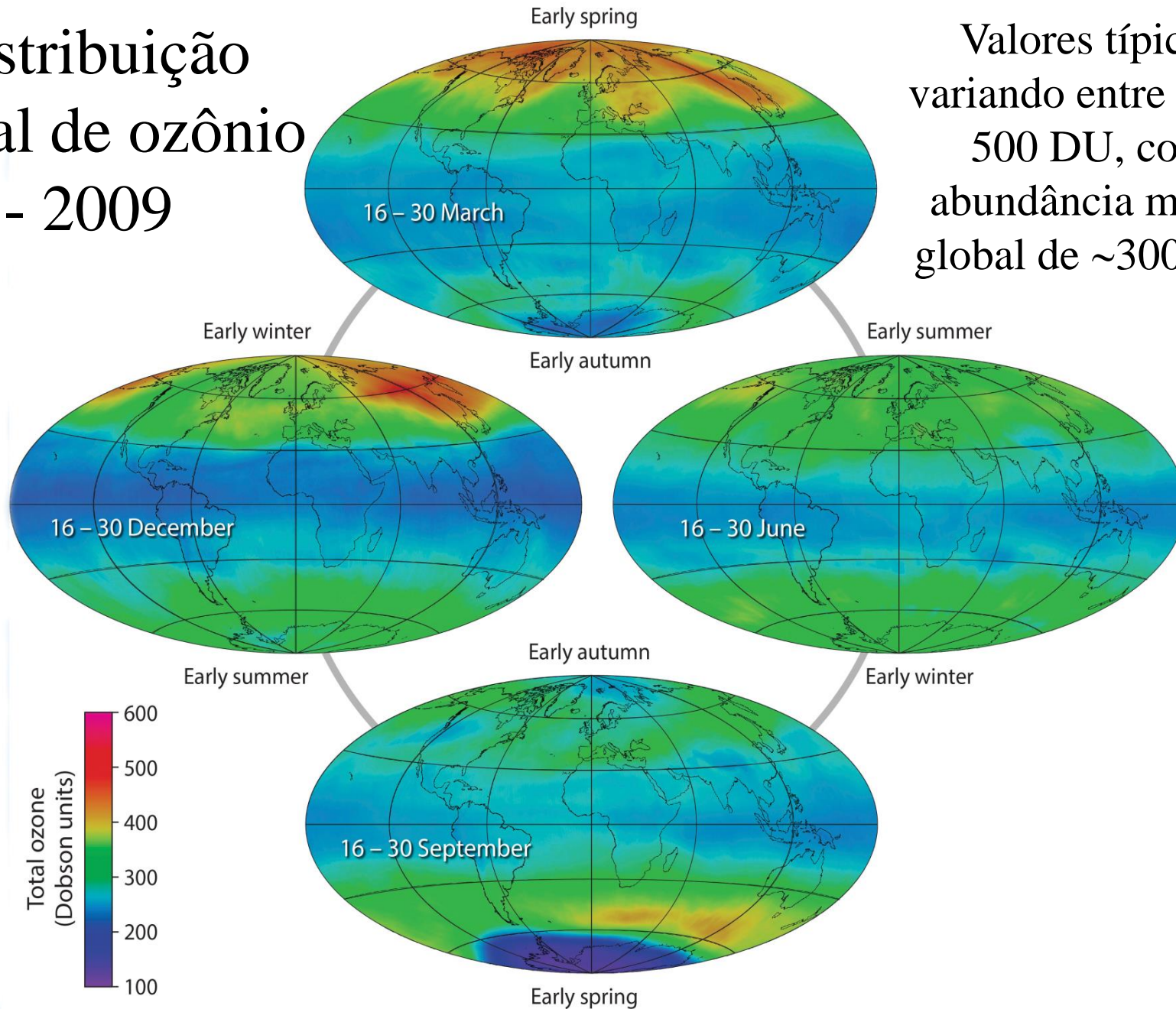


Total Ozone (Dobson units)

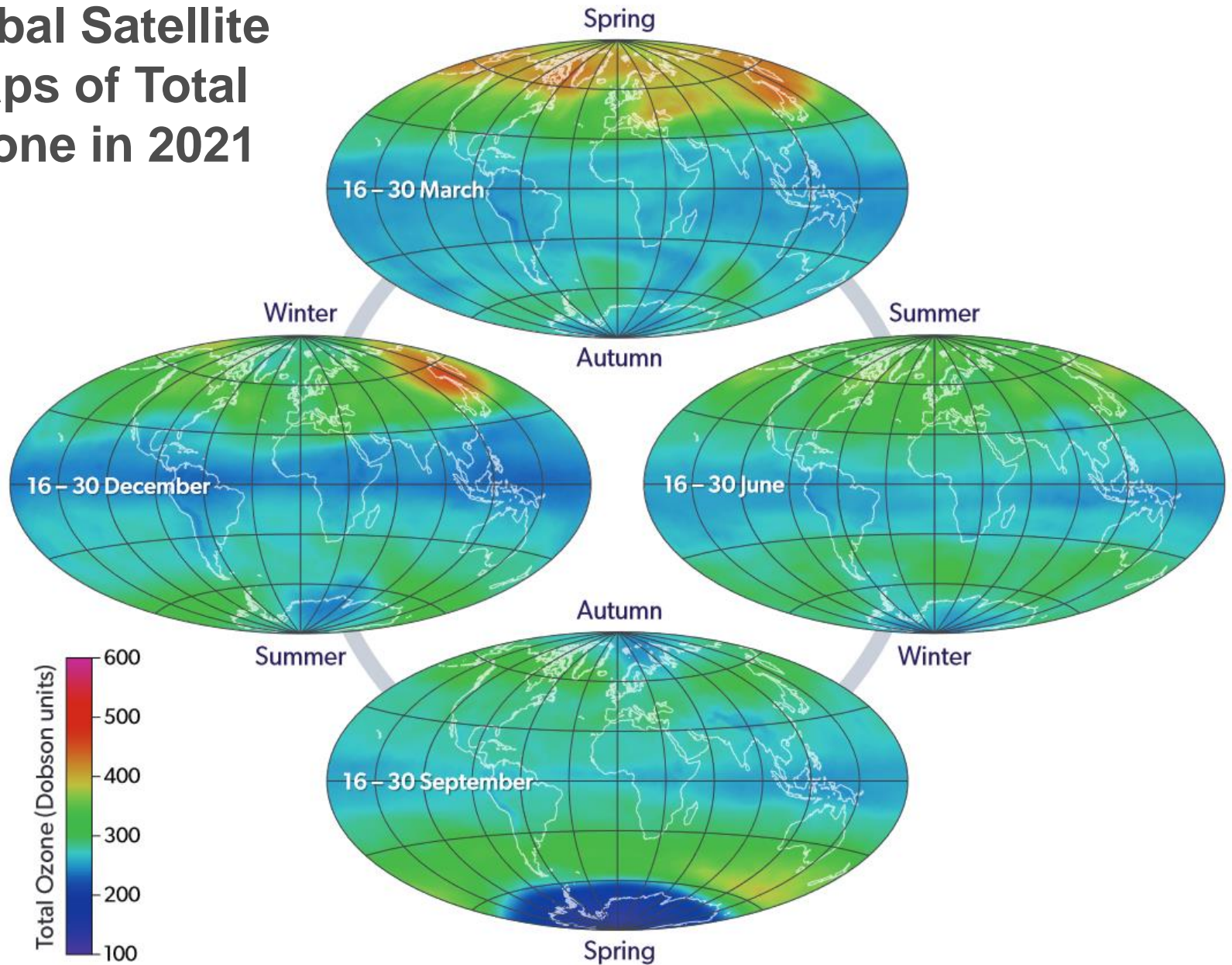
Dados de satélite – mapas da
coluna de ozônio total global

Distribuição global de ozônio - 2009

Valores típicos variando entre 200 e 500 DU, com abundância média global de ~300 DU.



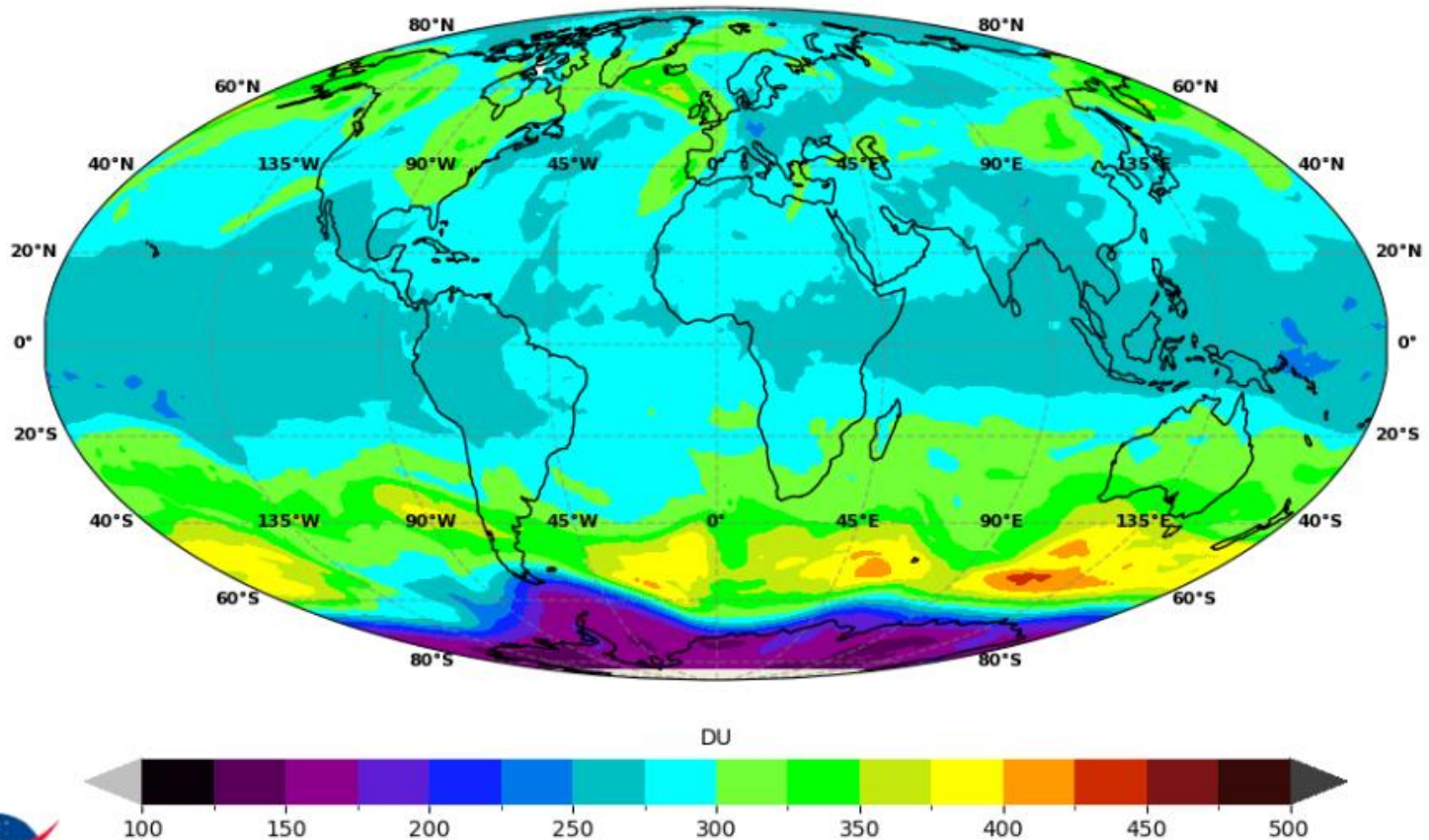
Global Satellite Maps of Total Ozone in 2021



Coluna total de ozônio global, 19 de setembro de 2023

OMPS-NPP Nadir Mapper Total Column Ozone

2023-09-18 (day 261) Daily Gridded, Global Orbits = 61606 - 61628



Ozone ST & SIPS

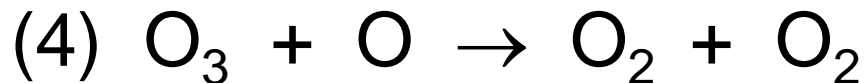
Data Product = NMT03-L3-DAILY // PGE = NMT03-L3-DAILY-2.5.14 in A561004 @ 2023-09-20 06:18Z

<https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>

Ciclo de Chapman – mecanismo de formação de ozônio estratosférico



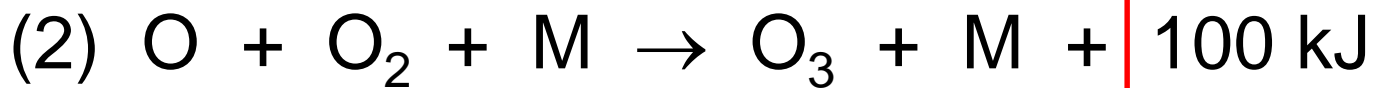
formação



consumo

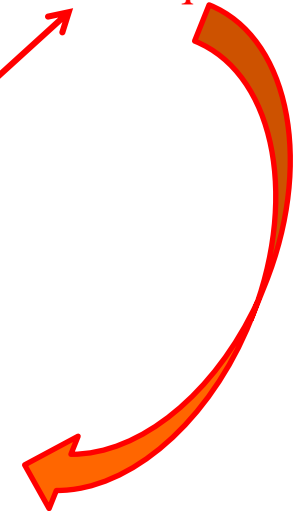
M → chamado terceiro corpo (atenua energia, em excesso estabilizando o ozônio produzido), N₂ ou O₂

Ciclo de Chapman – mecanismo de formação de ozônio estratosférico



Aquecimento
fotoquímico

Aumento da temperatura com a altitude
na estratosfera



Aproximação de estado pseudo estacionário e tempo de vida de uma espécie química

- Quando uma espécie intermediária (p.ex. AB*) tem um tempo de vida muito curto e reage tão rapidamente quanto é produzida, pode-se considerar que a velocidade de formação desta espécie é igual a velocidade de consumo.
- Tempo de vida de uma espécie química, τ , é o tempo médio que a espécie permanece na atmosfera antes de ser consumida por reação química:

$$\tau = \frac{[X]}{V}$$

\rightarrow Concentração no ar
 \rightarrow Velocidade de remoção

Exemplo: o tempo de vida da conversão de O em O₃, reação 2.

$$\tau_{\text{O}} = \frac{[\text{O}]}{k_2[\text{O}][\text{O}_2][\text{M}]} = \frac{1}{k_2[\text{O}_2][\text{M}]}$$

$\tau_{\text{O}} \ll \text{segundos}$

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário → $[O_3] = ???$

Mecanismo de reação:



Equações de velocidade:

$$v_1 = -k_1 [O_2]$$

$$v_2 = -k_2 [O][O_2][M]$$

$$v_3 = -k_3 [O_3]$$

$$v_4 = -k_4 [O][O_3]$$

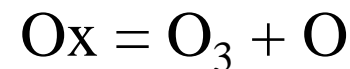
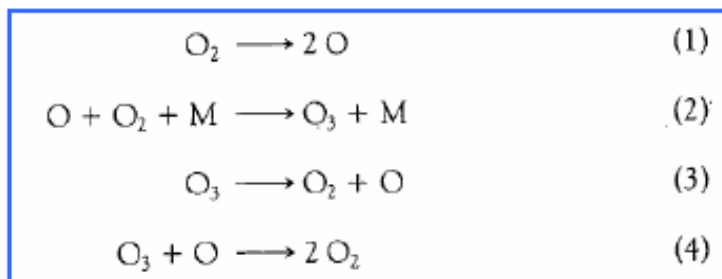
São quatro equações e quatro incógnitas (O, O₂, O₃ e M)!!!

As reações 1 e 3 são reações de fotólise = decomposição química ou dissociação molecular provocada por absorção de fótons (radiação solar).

As constantes de fotólise k_1 e k_3 , também são representadas pelo símbolo j : j_1 e j_3 .

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[\text{O}_3] = ???$$



(A) Velocidade de mudança de $[\text{O}] = 2x \text{ velocidade } 1 - \text{velocidade } 2 + \text{velocidade } 3 - \text{velocidade } 4 = 0$

(B) Velocidade de mudança de $[\text{O}_3] = \text{velocidade } 2 - \text{velocidade } 3 - \text{velocidade } 4 = 0$

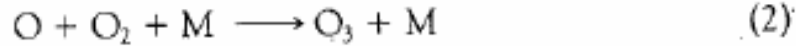
(A) + (B) =

$$2x \text{ velocidade } 1 - \text{velocidade } 2 + \text{velocidade } 3 - \text{velocidade } 4 + \text{velocidade } 2 - \text{velocidade } 3 - \text{velocidade } 4$$

$$(A) + (B) = 2x \text{ velocidade } 1 - 2x \text{ velocidade } 4$$

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[O_3] = ???$$



$$v_1 = -k_1[O_2]$$

$$v_2 = -k_2[O][O_2][M]$$

$$v_3 = -k_3[O_3]$$

$$v_4 = -k_4[O][O_3]$$

$$(A) + (B) = 2 \times \text{velocidade 1} - 2 \times \text{velocidade 4}$$

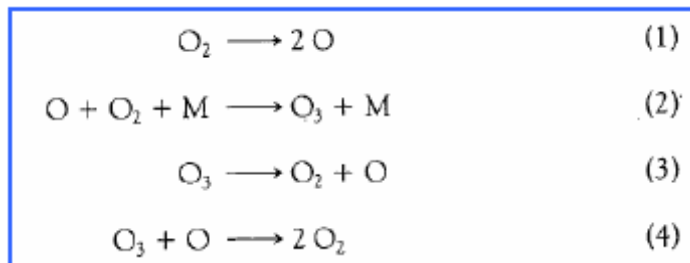
$$= 2k_1[O_2] - 2k_4[O_3][O] = 0$$

$$k_1[O_2] = k_4[O_3][O]$$

$$[O] = k_1[O_2] / k_4[O_3]$$

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[\text{O}_3] = ???$$



(A) Velocidade de mudança de $[\text{O}] = 2x$ velocidade 1 – velocidade 2 + velocidade 3 - velocidade 4 = 0

(B) Velocidade de mudança de $[\text{O}_3] =$ velocidade 2 - velocidade 3 - velocidade 4 = 0

(A) - (B) =

$2x$ velocidade 1 – velocidade 2 + velocidade 3 - velocidade 4
- velocidade 2 + velocidade 3 + velocidade 4

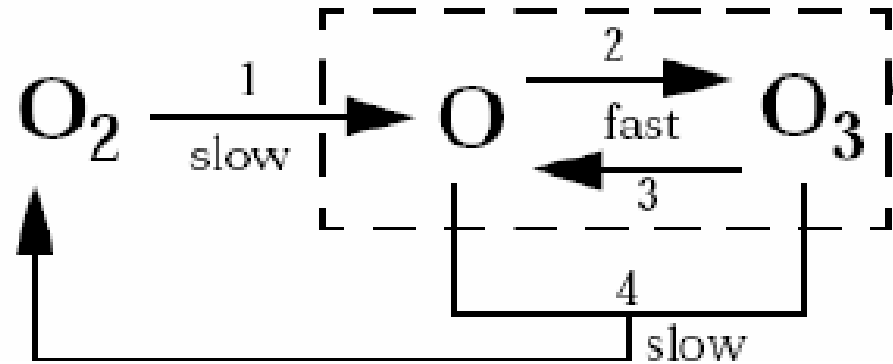
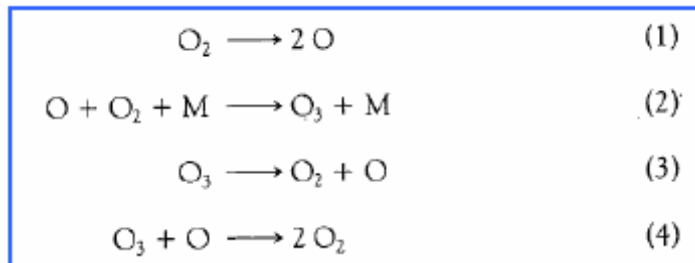
(A) - (B) =

$2x$ velocidade 1 – $2x$ velocidade 2 + $2x$ velocidade 3

E agora?

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[\text{O}_3] = ???$$



$$(\mathbf{A}) - (\mathbf{B}) =$$

$$2 \times \text{velocidade 1} - 2 \times \text{velocidade 2} + 2 \times \text{velocidade 3}$$

Medidas experimentais indicam que a velocidade 2 e 3 são mais altas do que a velocidade 1

⇒ portanto velocidade 1 pode ser desprezada nessa condição de estado pseudo-estacionário

$$\text{velocidade 3} = \text{velocidade 2}$$

$$k_3[\text{O}_3] = k_2[\text{O}_2][\text{O}][\text{M}]$$

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[\text{O}_3] = ???$$

$$k_3[\text{O}_3] = k_2[\text{O}_2][\text{O}][\text{M}]$$


$$[\text{O}] = k_1[\text{O}_2] / k_4[\text{O}_3]$$

$$k_3[\text{O}_3] = k_2[\text{O}_2][\text{M}] k_1[\text{O}_2] / k_4[\text{O}_3]$$

$$[\text{O}_3]^2 = k_1 k_2[\text{M}] [\text{O}_2]^2 / k_3 k_4$$

$$[\text{O}_3] = (k_1 k_2[\text{M}] / k_3 k_4)^{1/2} [\text{O}_2]$$

$$[\text{M}] = \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar} \Rightarrow \text{Sendo } [\text{M}_0] = 2,55 \times 10^{19} \text{ moléculas cm}^{-3} \text{ (288 K)}$$

$$[O_3] = \left(\frac{k_1 k_2 [M]}{k_3 k_4} \right)^{1/2} [O_2]$$

Temperatura, pressão, razão de mistura e densidade de número em diferentes alturas da estratosfera.

| z , km | T , K | p , hPa | p/p_0 | | $[M]$, molecules cm^{-3} |
|----------|---------|-----------|---------|-------------------------------|------------------------------------|
| 20 | 217 | 55 | 0.054 | | 1.4×10^{18} |
| 25 | 222 | 25 | 0.025 | $[M]$ diminui ~40 vezes | 6.4×10^{17} |
| 30 | 227 | 12 | 0.012 | | 3.1×10^{17} |
| 35 | 237 | 5.6 | 0.0055 | | 1.4×10^{17} |
| 40 | 251 | 2.8 | 0.0028 | | 7.1×10^{16} |
| 45 | 265 | 1.4 | 0.0014 | | 3.6×10^{16} |

Lembrando que nas diferentes altitudes:

$$[O_2] = 0,21 \times [M]$$

$[M] = N_2 + O_2 + Ar \Rightarrow$ Sendo $[M_0] = 2,55 \times 10^{19}$ moléculas cm^{-3} (288 K)

Concentração em estado quase estacionário de ozônio

$$[O_3] = \left(\frac{k_1 k_2 [M]}{k_3 k_4} \right)^{1/2} [O_2]$$

$$k_2 = 1 \times 10^{-33} \text{ cm}^6 \text{ molecule}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$k_4 = 8.0 \times 10^{-12} \exp(-2060/T) \text{ cm}^3 \text{ molecule}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$20\text{km}, T = 200\text{K}, k_4 = 2.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ molecules}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

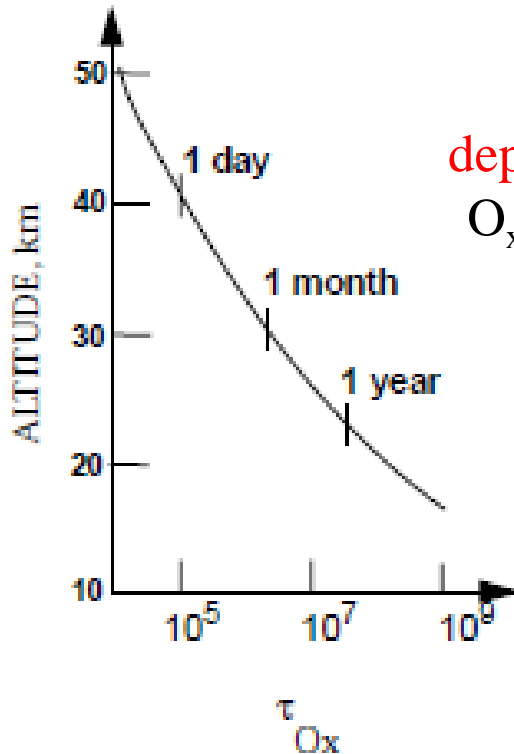
$$45\text{km}, T = 270\text{K}, k_4 = 3.9 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ molecules}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

@ 20 km,

$$[M] = 1.8 \times 10^{18} \text{ molecules/cm}^3$$

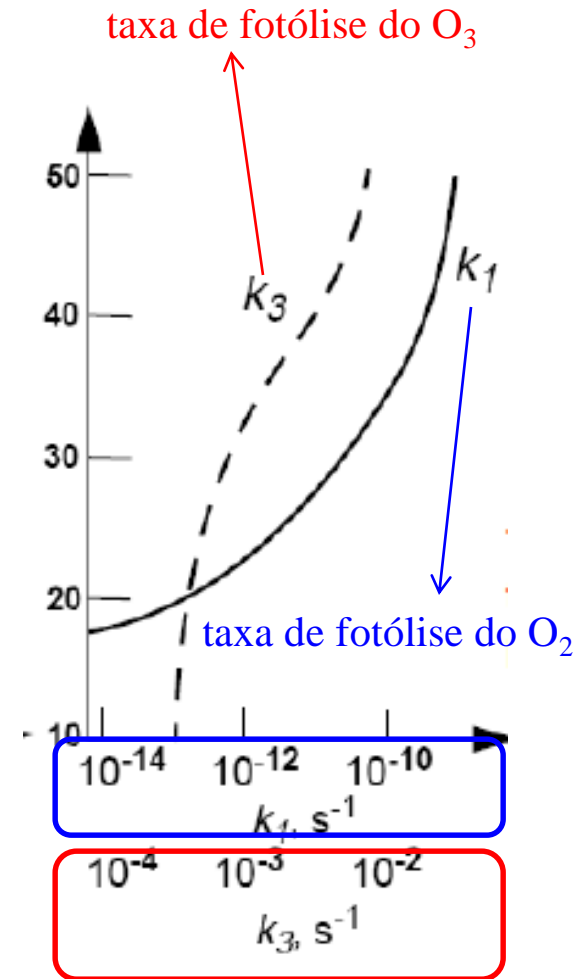
@ 40 km,

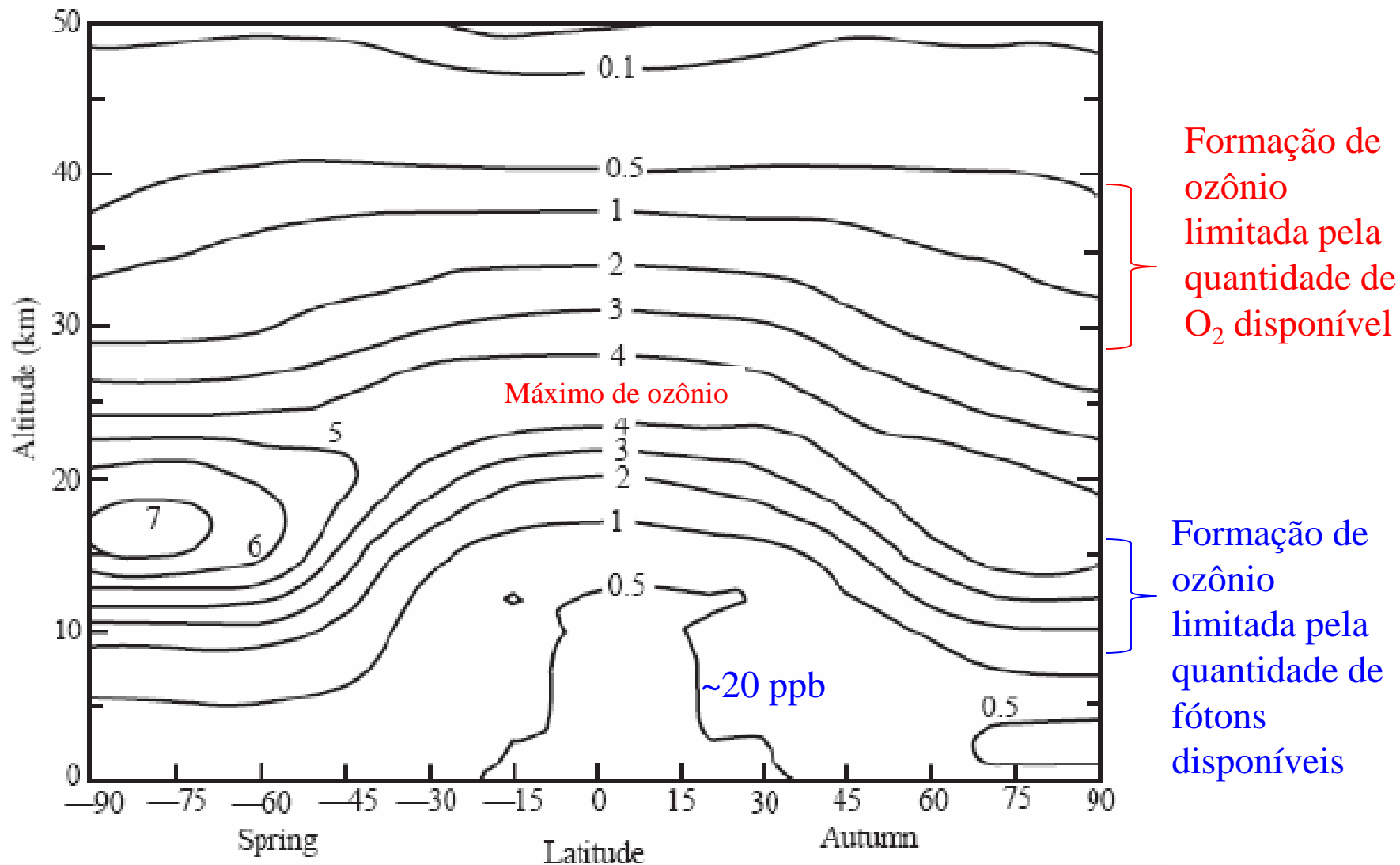
$$[M] = 4.1 \times 10^{16} \text{ molecules/cm}^3$$



O máximo reflete fortemente a dependência vertical da produção de O_x ($O + O_3$) pela reação (1), isto é, $2k_1[O_2]$

A teoria de Chapman descreve como a luz solar converte as várias formas de oxigênio umas nas outras, explica porque a maior quantidade de ozônio ocorre na camada entre 15 e 50km, chamada camada de ozônio.



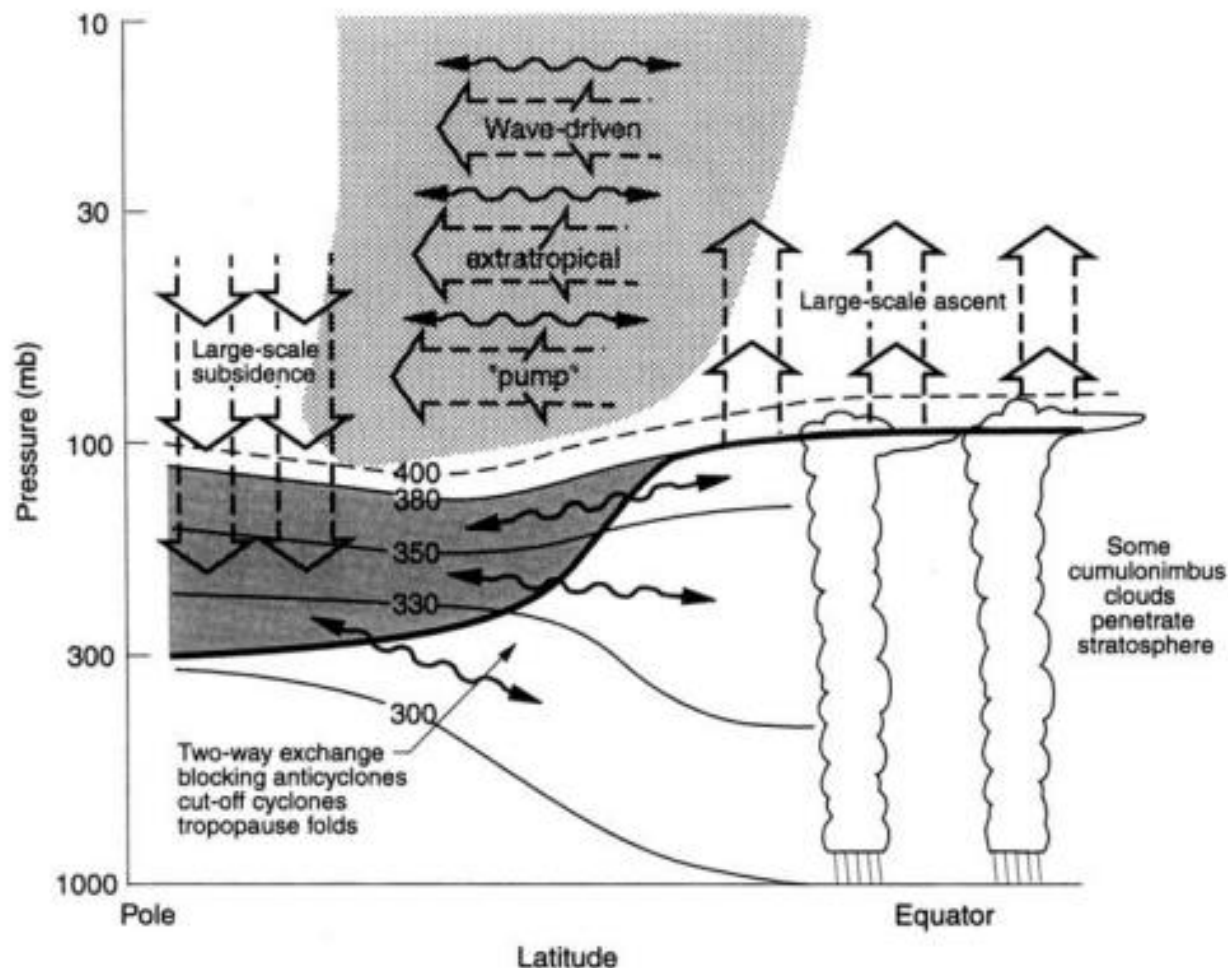


Camada natural de ozônio: distribuição vertical e longitudinal de O_3 (10^{12} moléculas cm^{-3}) no equinócio, baseada em medidas dos anos 1960

(Wayne, R.P., Chemistry of Atmospheres, Oxford, 1991)

Nota: equinócio refere-se ao período do ano em que o dia e a noite são iguais

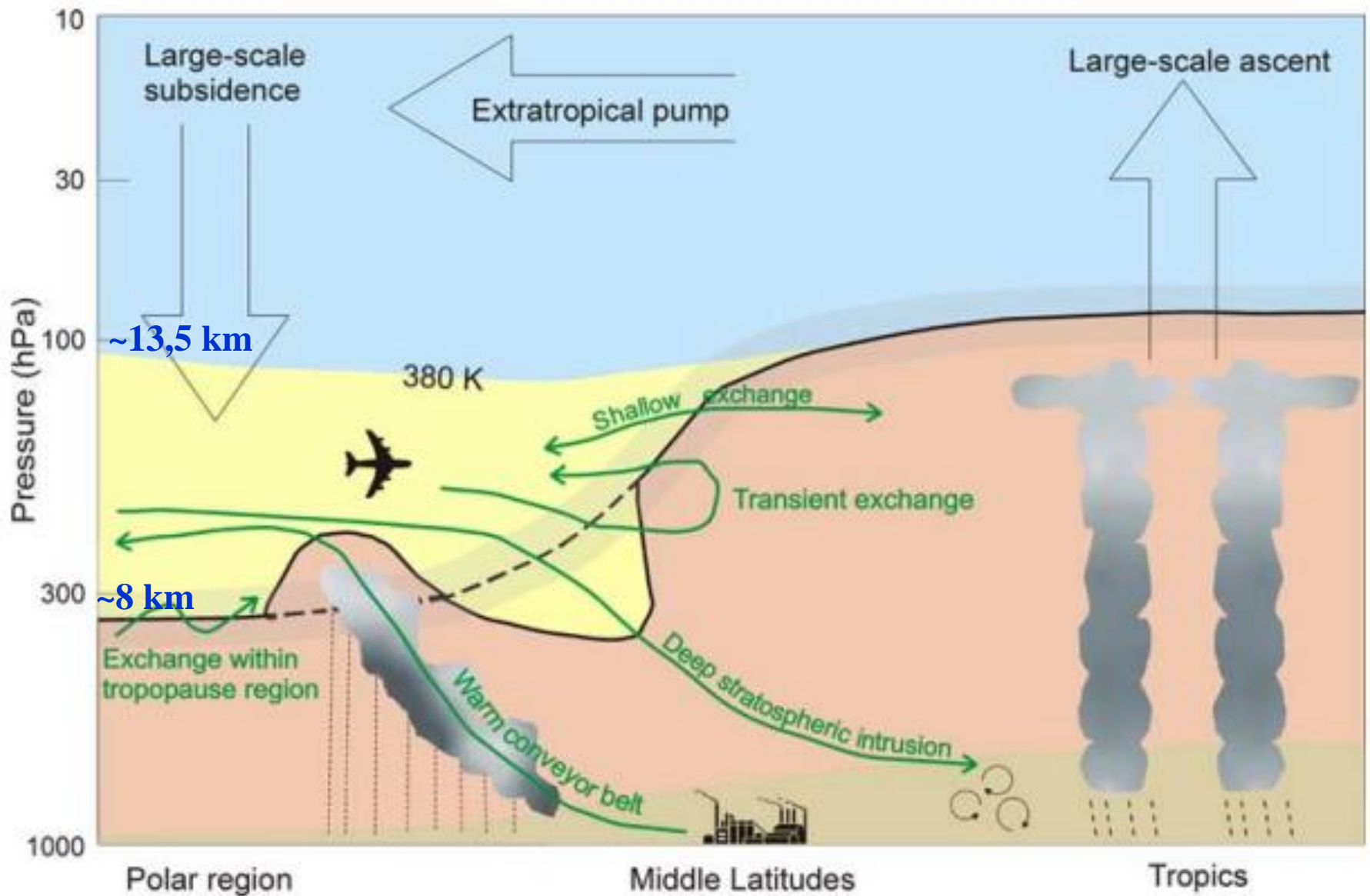
Circulação atmosférica global explica máximos de O₃ nos pólos.



Aspectos dinâmicos da troca estratosfera-troposfera.

Obs.: de acordo com o conhecimento atual, as nuvens cumulonimbus tropicais não chegam à estratosfera.

Numa perspectiva global, a circulação na alta troposfera e a estratosfera pode ser descrita por uma organização de ressurgência da troposfera para a estratosfera nos trópicos, transporte para o extratropical na estratosfera, e um fluxo de massa descendente da estratosfera para a troposfera em latitudes médias e altas. É como uma "bomba de sucção", retirando o ar da alta troposfera tropical, empurrando-o para o pólo e finalmente para baixo.



Legenda no próximo slide.

Aspectos globais da STE de Holton et al. [1995], com novo conceito STE sobreposto. A posição média da tropopausa é mostrada pela linha preta espessa, com regiões sombreadas em cada lado representando a região da tropopausa. A região azul é o "mundo superior", em que os isentrópicos (acima da superfície isentrópica de 380 K) se encontram inteiramente na estratosfera, a região amarela é a mais baixa estratosfera, onde as superfícies isentrópicas cruzam a tropopausa, a região rosa é a troposfera livre e a região marrom é a camada limite atmosférica. Setas largas mostram o transporte pela circulação em escala global. Trajetórias verdes ilustram nosso novo conceito, conforme explicado no texto principal. Saliências rosa e amarelas perto da esteira transportadora quente e a intrusão estratosférica profunda indicam forte perturbação da tropopausa a partir de sua posição média (linha tracejada). **Observe que a pressão não está em escala.**

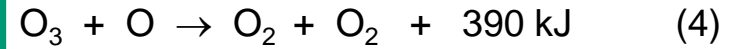
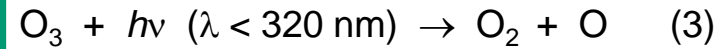
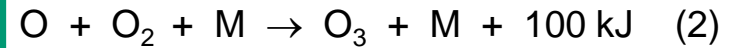
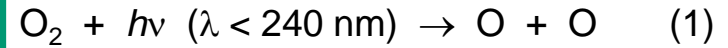
Stohl et al., Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO, J. Geophys Res., 108 (D12), 8516, doi:10.1029/2002JD002490, 2003

stratosphere-troposphere exchange (STE)

Superfície isentrópica - superfície no espaço na qual a entropia (ou, na meteorologia, a temperatura potencial) é igual em todos os lugares; uma superfície de entropia constante.

Camada de ozônio:

Ozônio estratosférico → teoria de Chapman (1935) considera apenas espécies de oxigênio (O, O₂ e O₃) → explica a existência e posição da camada de ozônio

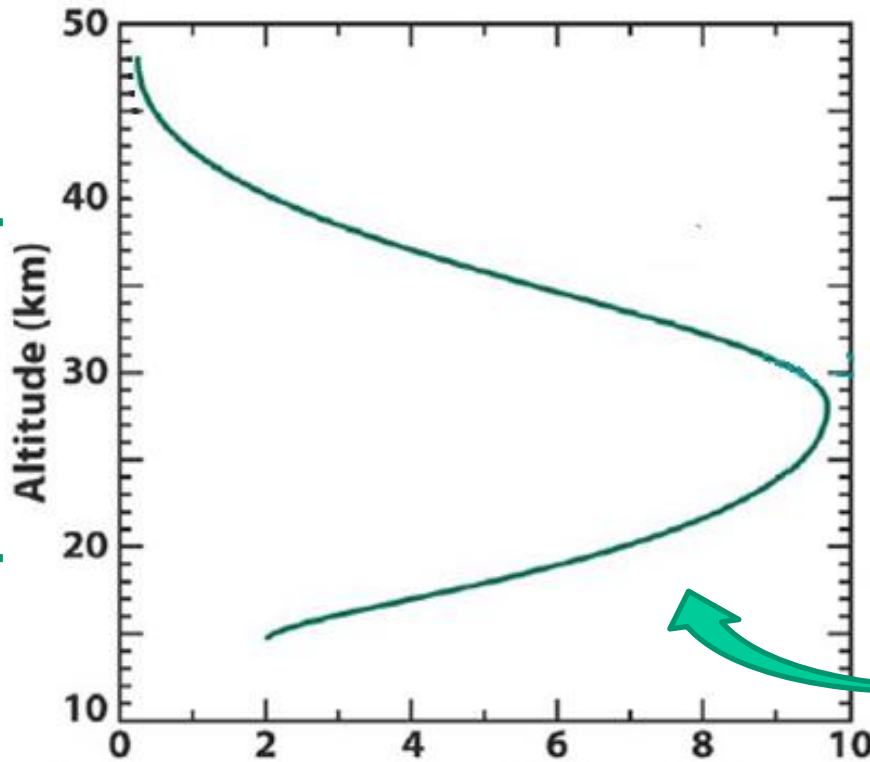
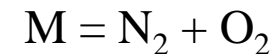


Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[\text{O}_3] = ???$$

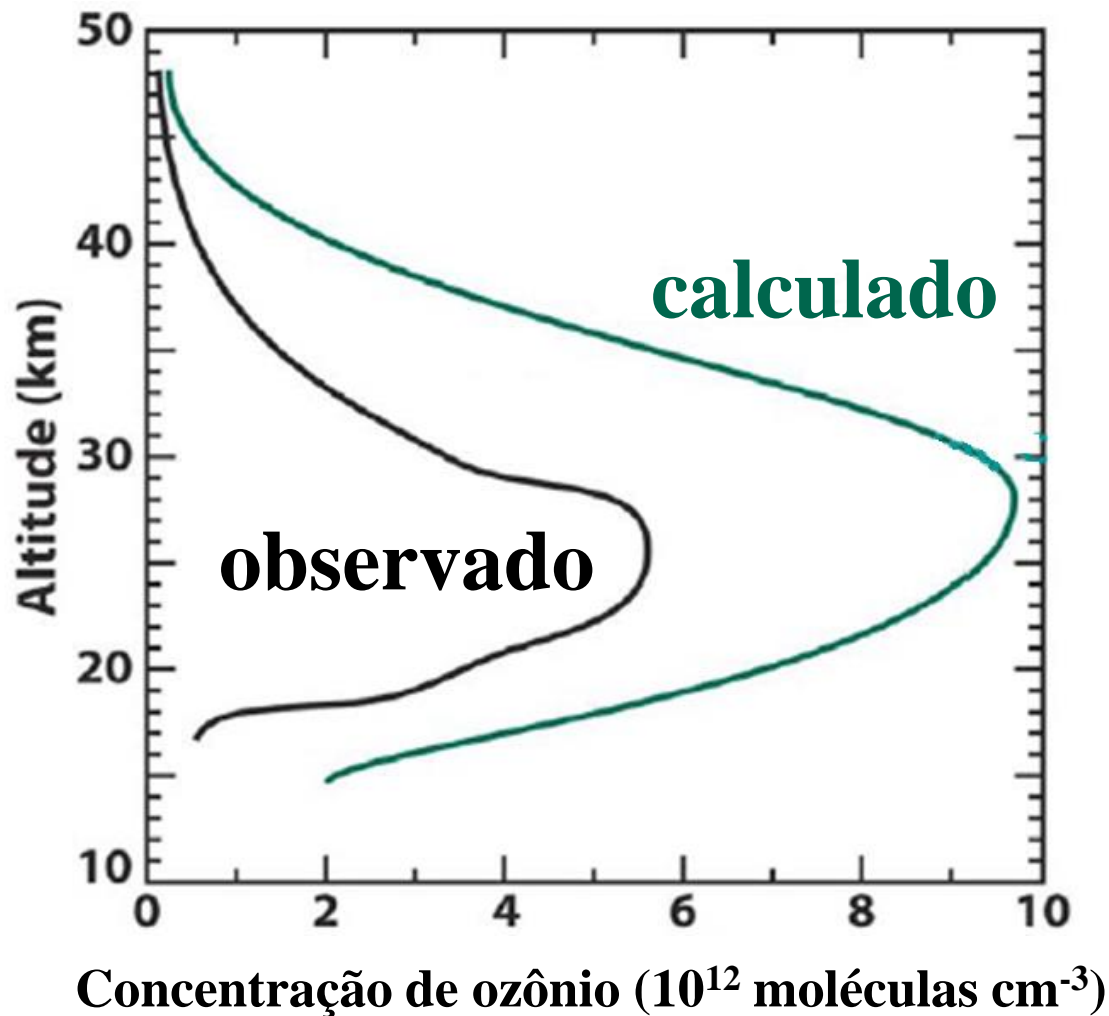
$$[\text{O}_3] = (k_1 k_2 [\text{M}] / k_3 k_4)^{1/2} [\text{O}_2]$$

calculado

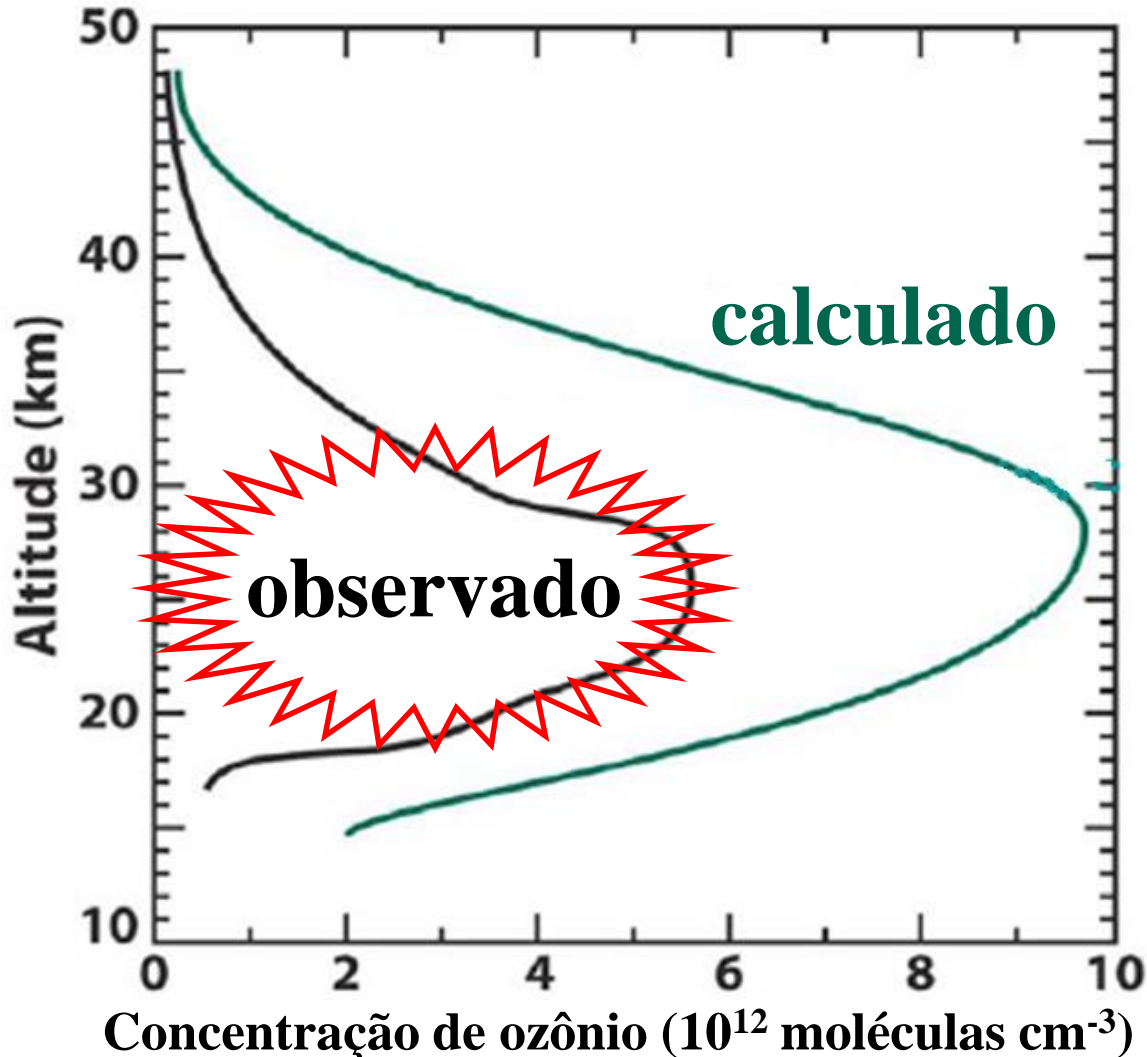


Concentração de ozônio (10¹² moléculas cm⁻³)

Camada de ozônio: Ozônio estratosférico previsto pela **teoria de Chapman (apenas espécies de oxigênio)** vs **observado** → modelo de Chapman prevê um valor de O_3 duas vezes mais alto do que o observado (ao longo do século passado).

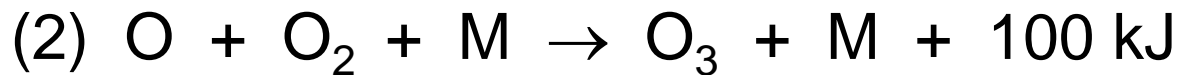


Camada de ozônio: Ozônio estratosférico previsto pela **teoria de Chapman (apenas espécies de oxigênio)** vs observado → modelo de Chapman prevê um valor de O_3 duas vezes mais alto do que o observado (ao longo do século passado).

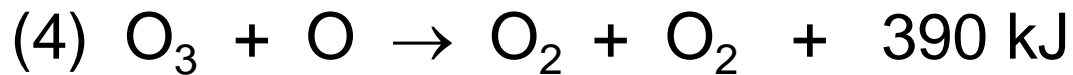


E agora?

Ciclo de Chapman (O₃ estratosférico)



formação



consumo

Se O₃ observado e/ou medido na estratosfera é menor do que o previsto com cálculos pelo mecanismo de Chapman, pode-se inferir que ocorre:

- interferência na reação 2, impedindo a formação de O₃, por consumir O (oxigênio atômico);
- interferência na reação 4 consumindo mais O₃, ou seja, um reagente mais efetivo em consumir O₃ do que o próprio O (oxigênio atômico).

Redução catalítica do ozônio



Reação global



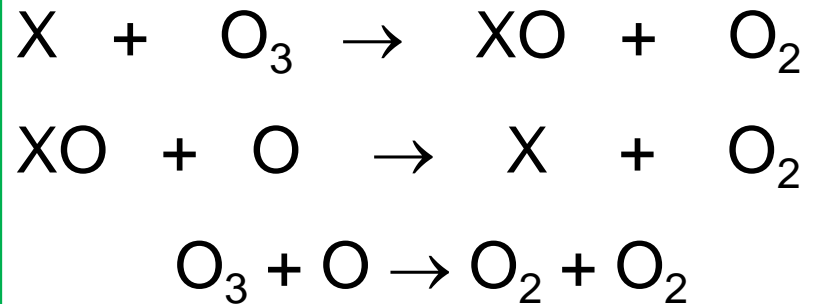
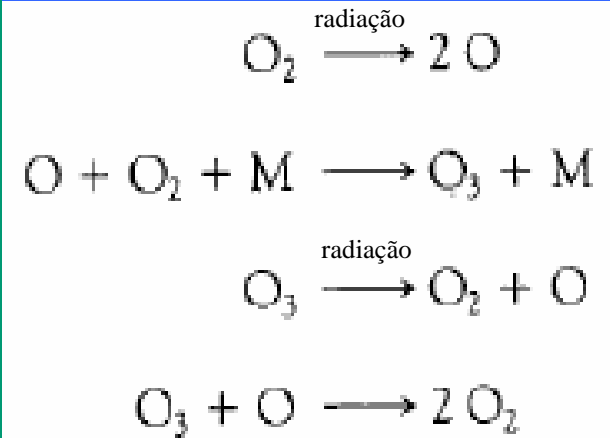
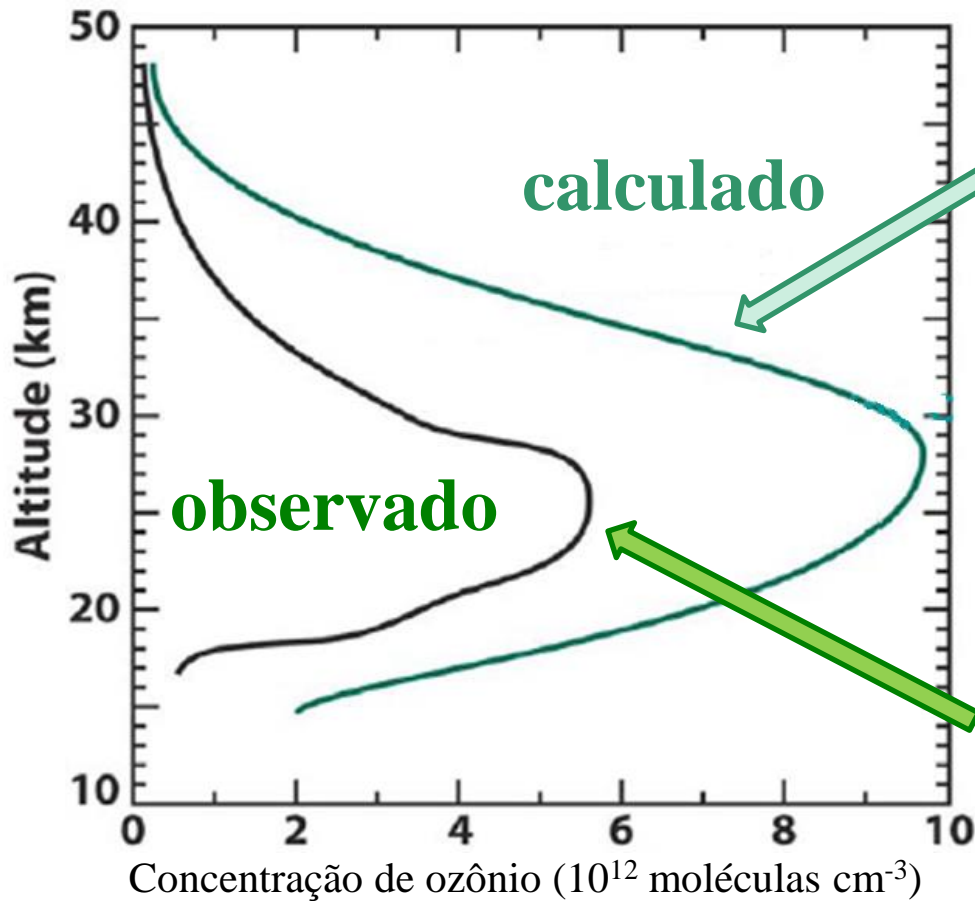
X pode ser H, OH, NO, Cl, ou Br. A reação (2) é a etapa mais lenta. Portanto, é considerada a etapa limitante do processo.

Pares X / XO

| | |
|-----------|-----------------------|
| <i>X</i> | <i>XO</i> |
| <i>H</i> | <i>OH</i> |
| <i>OH</i> | <i>HO₂</i> |
| <i>NO</i> | <i>NO₂</i> |
| <i>Cl</i> | <i>ClO</i> |
| <i>Br</i> | <i>BrO</i> |

Portanto, a presença de outras “**espécies naturais**” (p. ex., **H₂O**, **CH₄**, **N₂O**, **CH₃Cl**, **CH₃Br**) que são fotoquimicamente ativas na estratosfera, explicam as diferenças observadas em relação ao modelo de Chapman para a camada de ozônio.

Camada de ozônio



Espécies “naturais” fontes dos pares X/XO - na estratosfera

Ciclo do HO_x

H, OH e HO₂ - espécies formadas pela fotólise ou reação de átomos de O excitados com compostos atmosféricos contendo H, como H₂O e CH₄.

Ciclo do Nox na estratosfera

NO e NO₂ - espécies formadas pela fotólise ou reação de átomos de O excitados com N₂O (microorganismos no solo).

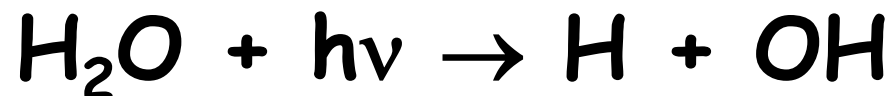
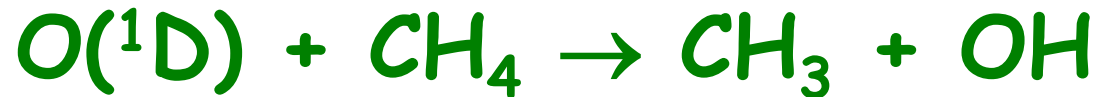
Ciclo dos halogênios

Cl e ClO ou Br e BrO - espécies formadas pela fotólise ou reação de átomos de O excitados com CH₃Cl ou CH₃Br (algas nos oceanos).

Reações Competitivas

Ciclo do HO_x

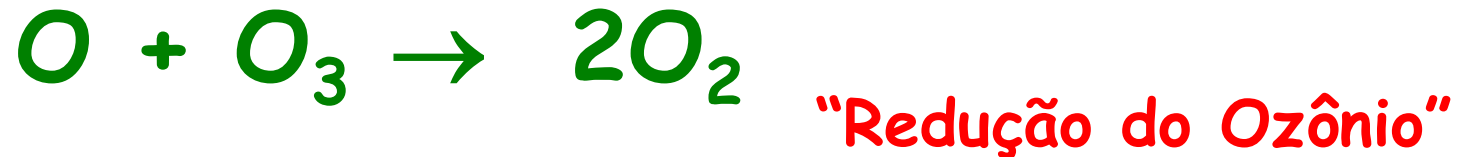
H, OH e HO₂ - espécies formadas pela reação de átomos de O excitados com compostos atmosféricos contendo H, como H₂O e CH₄.



Reações das espécies de HO_x com O₃



Reação global:

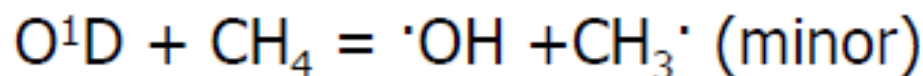
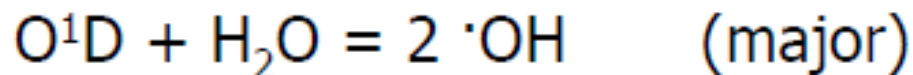
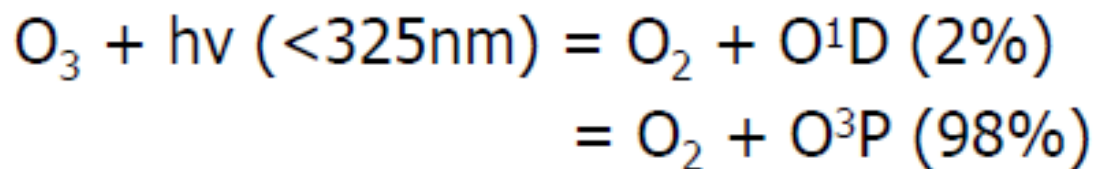


Porém na baixa estratosfera, a concentração de O é muito baixa. Assim as reações importantes para destruir ozônio são:



Hydroxy radical

- Accounts for nearly one-half of the total ozone destruction in the lower stratosphere (16-20 km).
- Sources



- Termination reaction
 $\cdot\text{OH} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$

Ciclo do ClO_x e BrO_x

cloreto de metila (CH_3Cl) e brometo de metila (CH_3Br) são compostos de ocorrência natural (produzidos por algas nos oceanos).

Reações de ClO_x com O_3

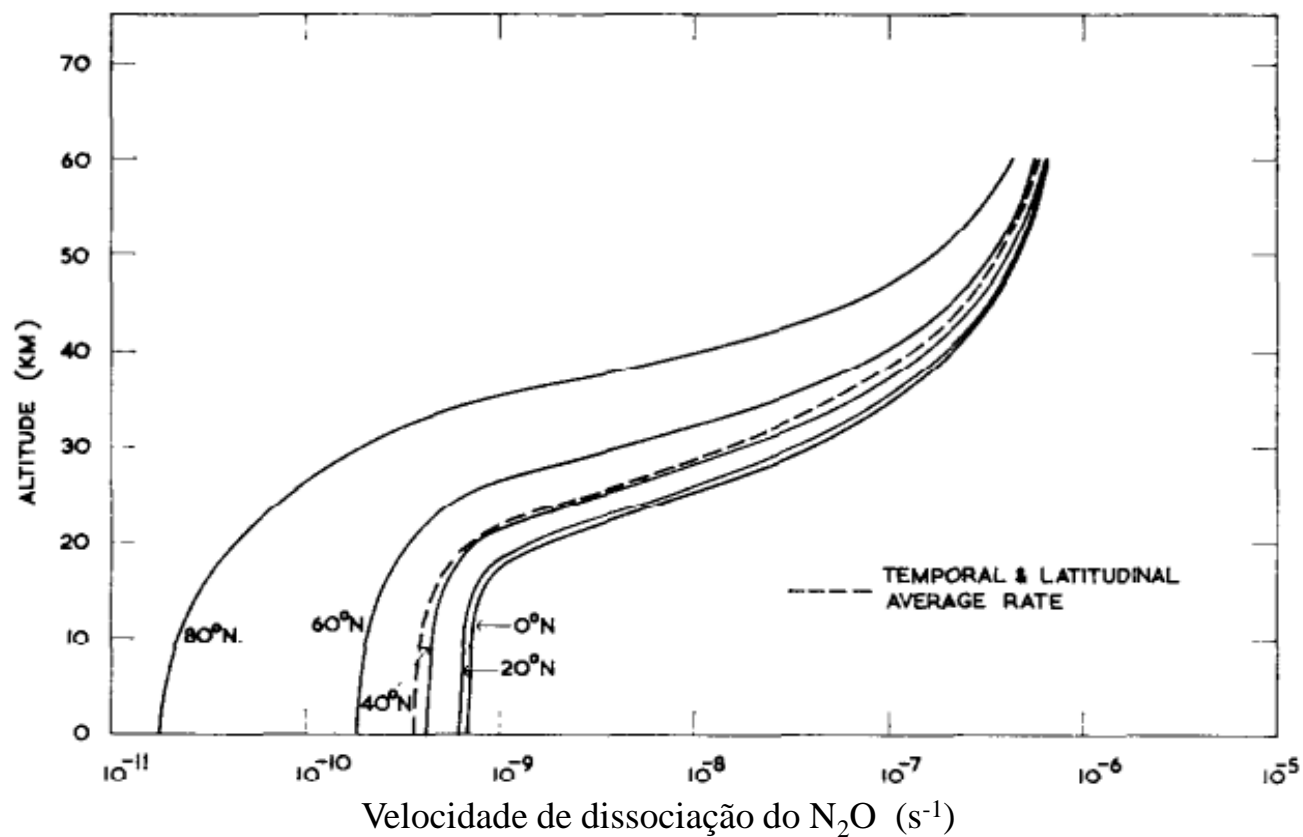


Reação global



“Redução do Ozônio”

Ciclo do NO_x (NO + NO₂)- espécies produzidas durante a reação de fotólise do N₂O (produzido no solo por bactérias).



Taxa de dissociação de óxido nitroso. As curvas completas referem-se às latitudes indicadas; a curva tracejada é a média.

Bates, D. R., Hays, P. B. Atmospheric Nitrous Oxide, *Planet. Space Sci.*, 15, 189-197, 1967.

Também:



Reações de NO_x com O₃

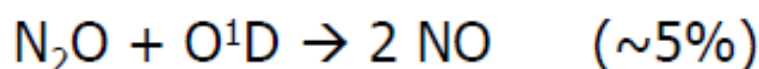
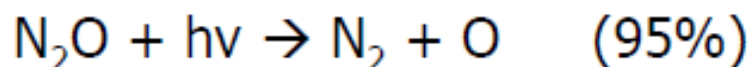


"Redução do Ozônio"

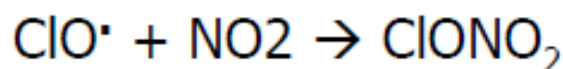
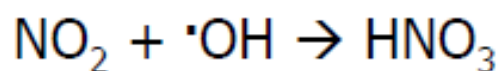
Crutzen 1970, 1971 então usou essas concentrações projetadas por Bates e Hays (1967) para mostrar que as reações de óxidos de nitrogênio, formados a partir de N₂O produzido naturalmente, com O₃ foram o principal "elo perdido" na determinação das concentrações de ozônio estratosférico. Este trabalho foi citado na entrega do Prêmio Nobel de Química de 1995 a Crutzen, juntamente com Rowland e Molina por seu trabalho em CFCs.

Nitric oxides

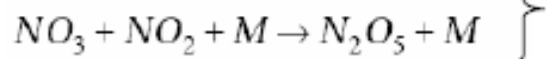
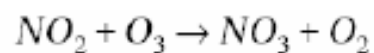
- NO is produced abundantly in the troposphere, but all of it is converted into $\text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$ (removed through precipitation)
- NO in the stratosphere is mainly produced from nitrous oxide (N_2O), which is much less reactive than NO.



- Removal processes:



} Inhibit the HO_x and ClO_x cycles



} Nighttime termination reactions

O óxido nitroso (N_2O) é um sub-produto dos processos de nitrificação e denitrificação.

Fluxo anual de óxido nitroso por diferentes fontes

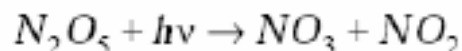
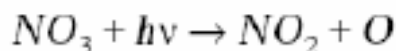
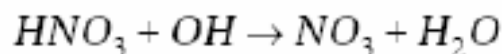
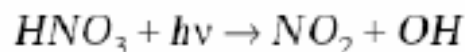
| | Rate, Tg N yr ⁻¹ best estimate and range of uncertainty |
|-------------------------------|--|
| SOURCES, natural | 9 (6-12) |
| Oceans | 3 (1-5) |
| Tropical soils | 4 (3-6) |
| Temperate soils | 2 (0.6-4) |
| SOURCES, anthropogenic | 6 (4-8) |
| Cultivated soils | 4 (2-5) |
| Biomass burning | 0.5 (0.2-1.0) |
| Chemical industry | 1.3 (0.7-1.8) |
| Livestock | 0.4 (0.2-0.5) |
| SINK Stratosphere | 12 (9-16) |
| ATMOSPHERIC INCREASE | 4 |

Reservoir species for NO_x

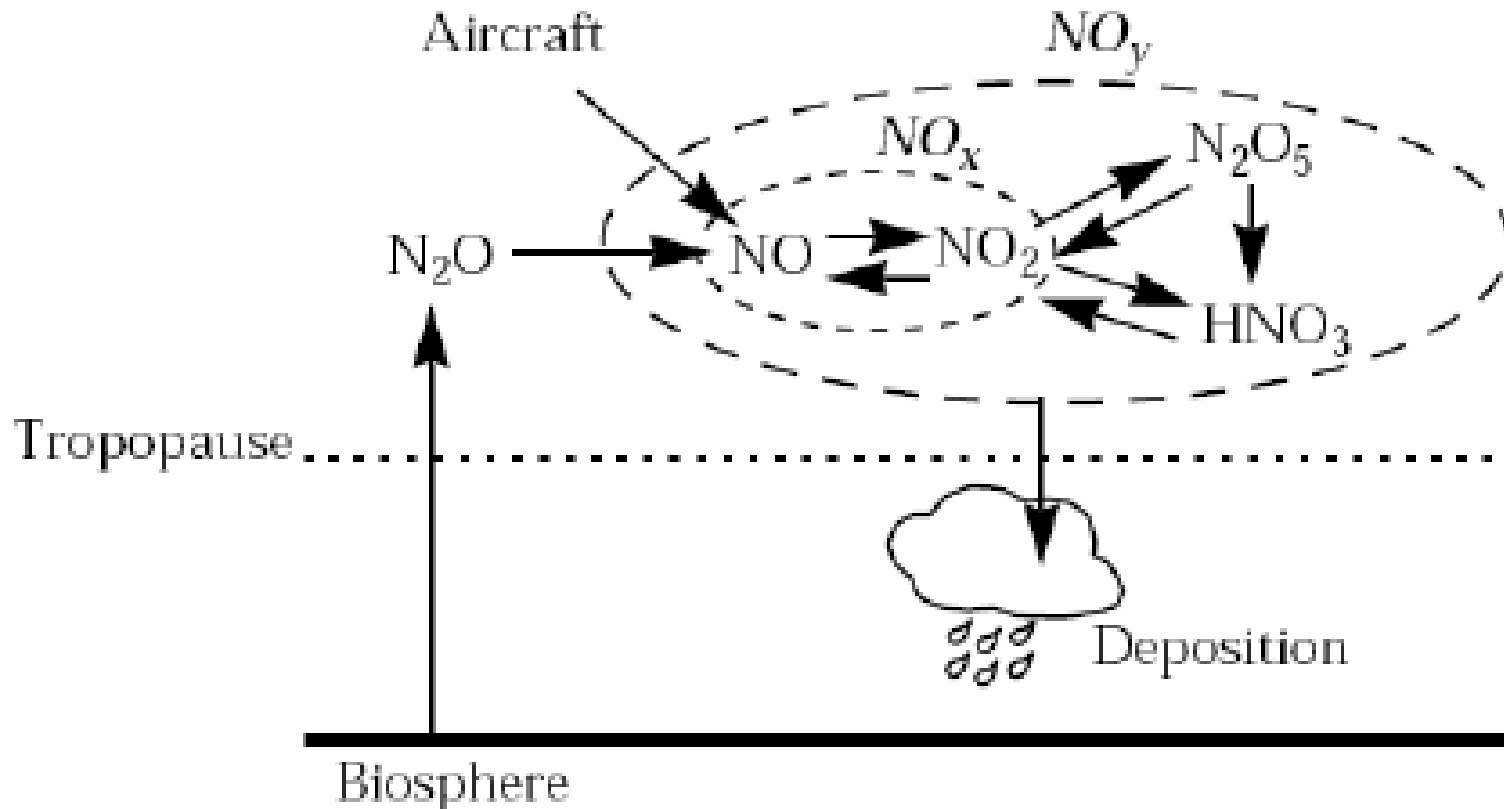
HNO₃ and N₂O₅ have longer lifetime than NO_x, and can eventually be converted back to NO_x through photolysis. For this reason, they are called reservoir species for NO_x.

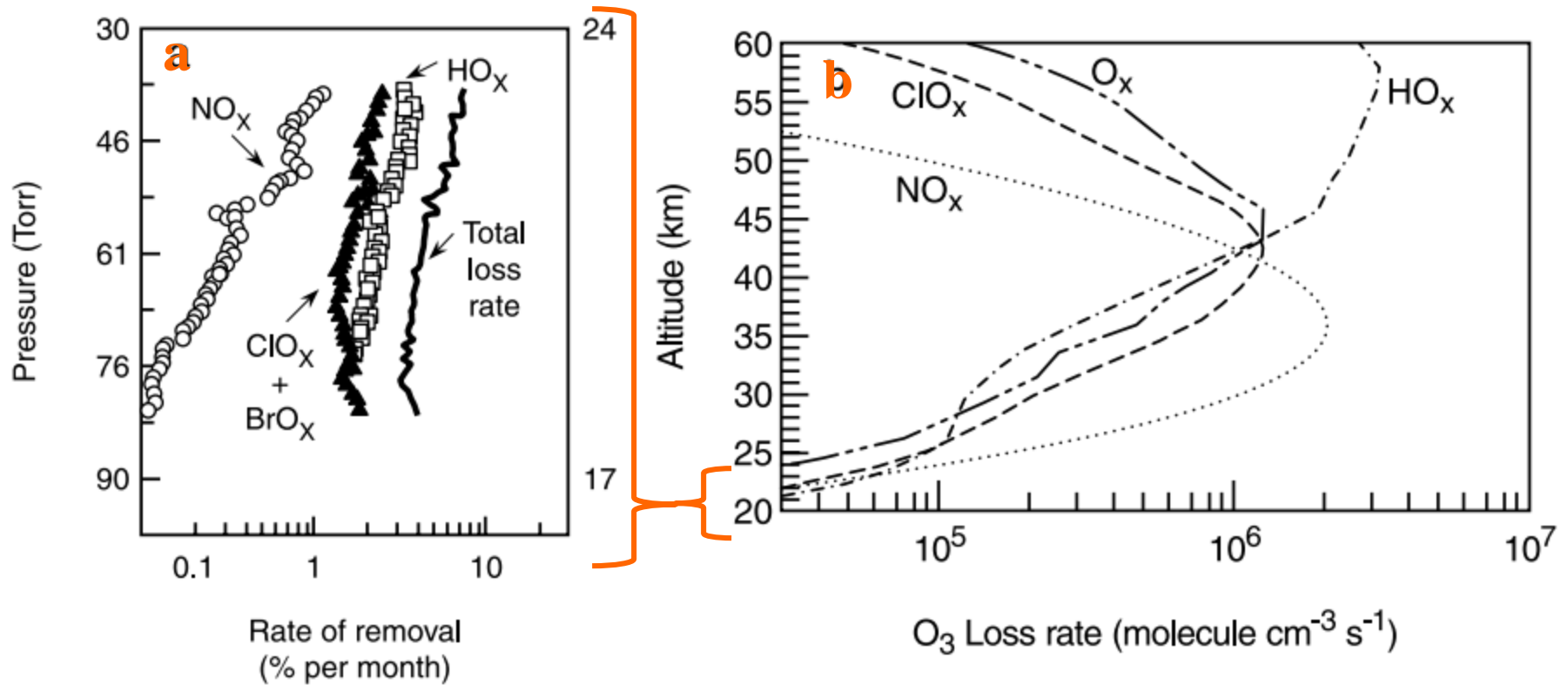
NO_y: NO_x + its reservoir species

Conversion of reservoir species to NO_x



Fontes e sumidouros de NO_x e NO_y estratosféricos





- a) Taxas de remoção de O_3 devido química de NO_x (ClO_x , BrO_x) e HO_x , respectivamente, em função da altitude na estratosfera, a $38^\circ N$ em maio de 1993.
- b) Taxas médias de 24 horas de remoção de O_3 em função da altitude.

Paul J. Crutzen (December 3, 1933 – January 28, 2021)



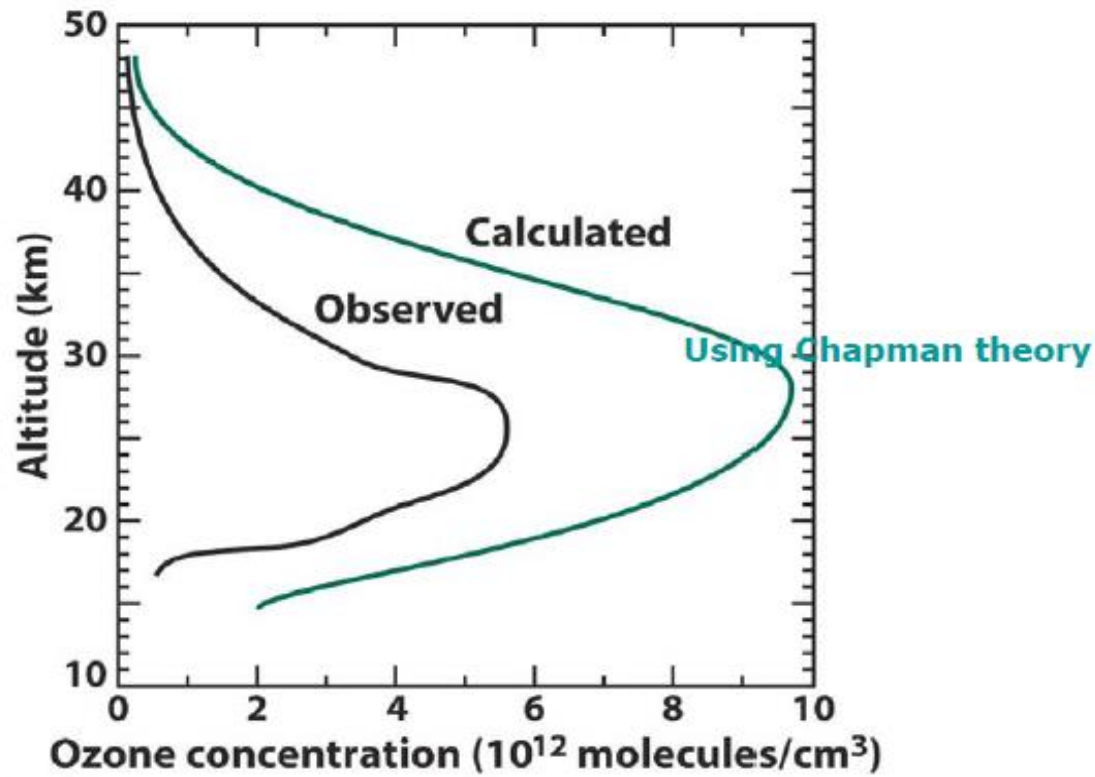
Paul J. Crutzen at the Max Planck Institute for Chemistry. © C. Costard/MPI for Chemistry

Crutzen recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1995 por identificar como os óxidos de nitrogênio contribuem na depleção da camada de ozônio da Terra e também descobrir os processos químicos que causam depleção e buraco da camada de ozônio.

Crutzen, P.J. The influence of nitrogen oxide on the atmospheric ozone content.

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 96, 320-325, 1970.

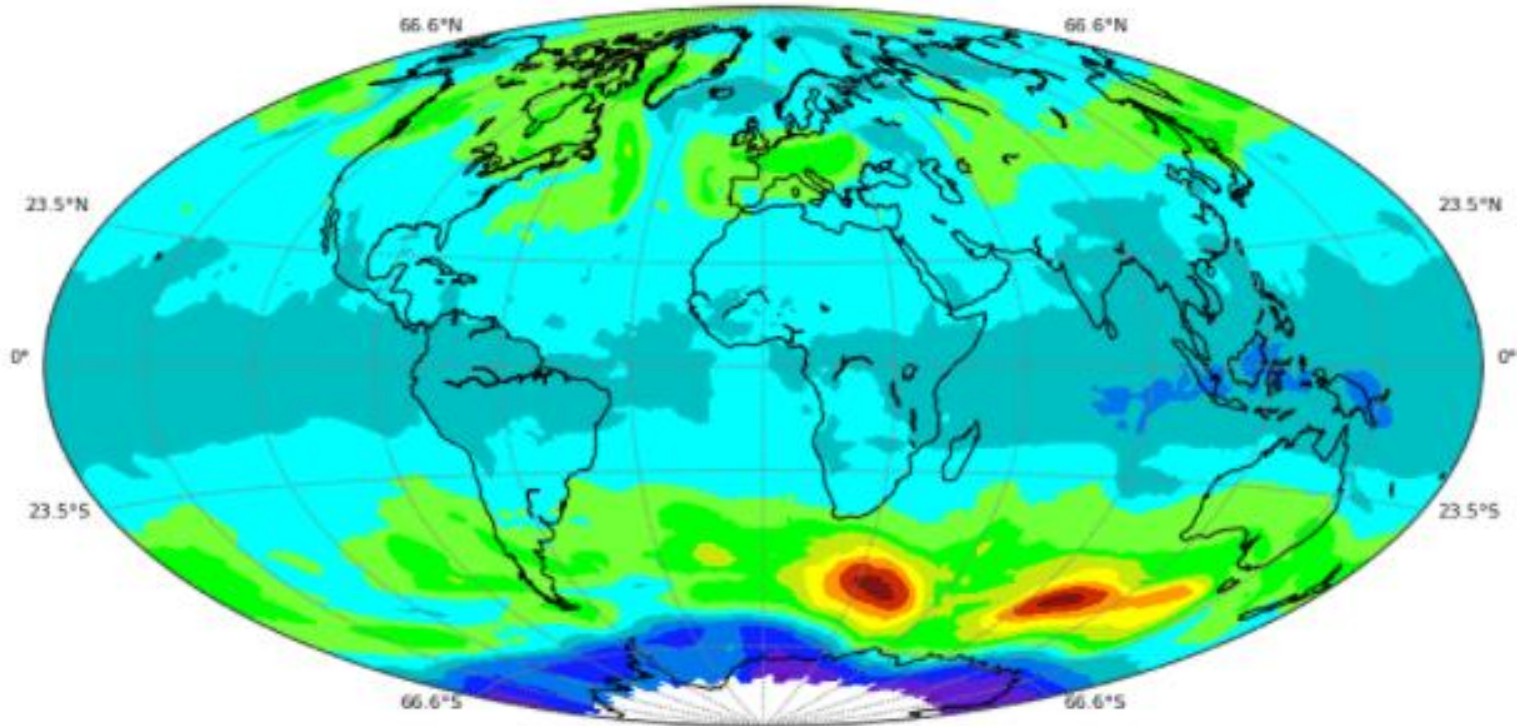
Portanto, a presença de outras espécies “naturais” (p. ex., H_2O , CH_4 , N_2O , CH_3Cl) que são ativas fotoquimicamente na estratosfera, explicam as diferenças observadas em relação ao modelo de Chapman para a camada de ozônio.



Distribuição global da coluna e ozônio, 31 de agosto de 2021

Best Total Ozone Solution

2021-08-31 (day 243) Daily Gridded, Global Orbits = 50992 - 51018



DU



Ozone ST & PEATE

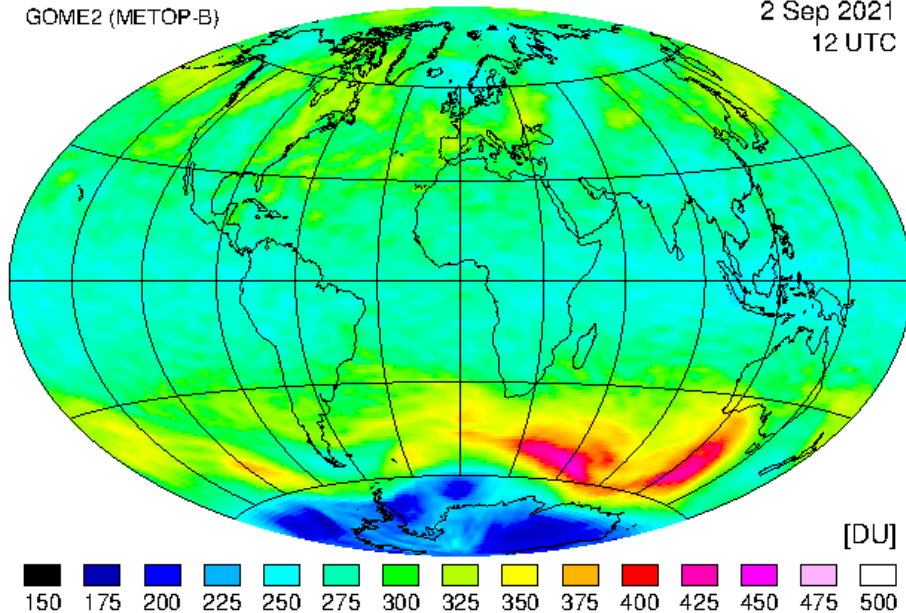
Suomi NPP_OMPS Nadir Mapper // Data Product = NMTO3-L3-DAILY // PGE = NMTO3-L3-DAILY-2.0.9 in AS61004 @ 2021-09-02 13:15Z

<https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>

Distribuição global e nos pólos da coluna e ozônio, 2 de setembro de 2021

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

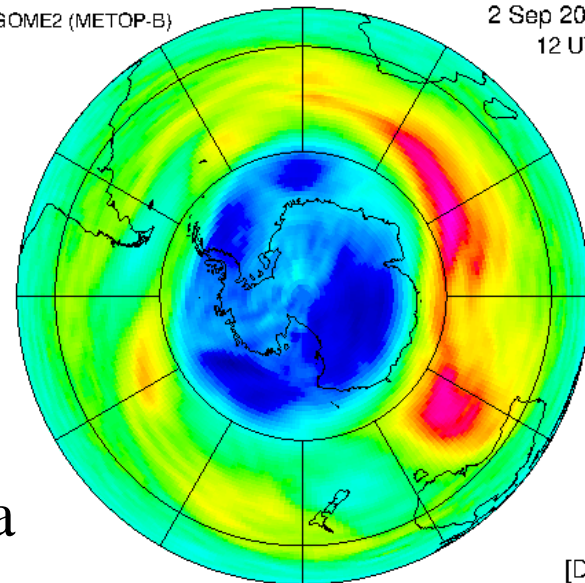
Forecast total ozone (D+1)
2 Sep 2021
12 UTC



[DU]
150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

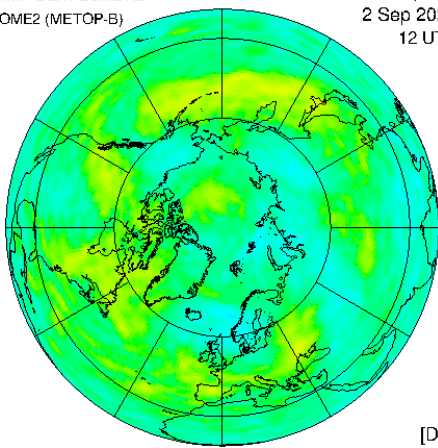
Forecast total ozone (D+1)
2 Sep 2021
12 UTC



[DU]
150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

Forecast total ozone (D+1)
2 Sep 2021
12 UTC



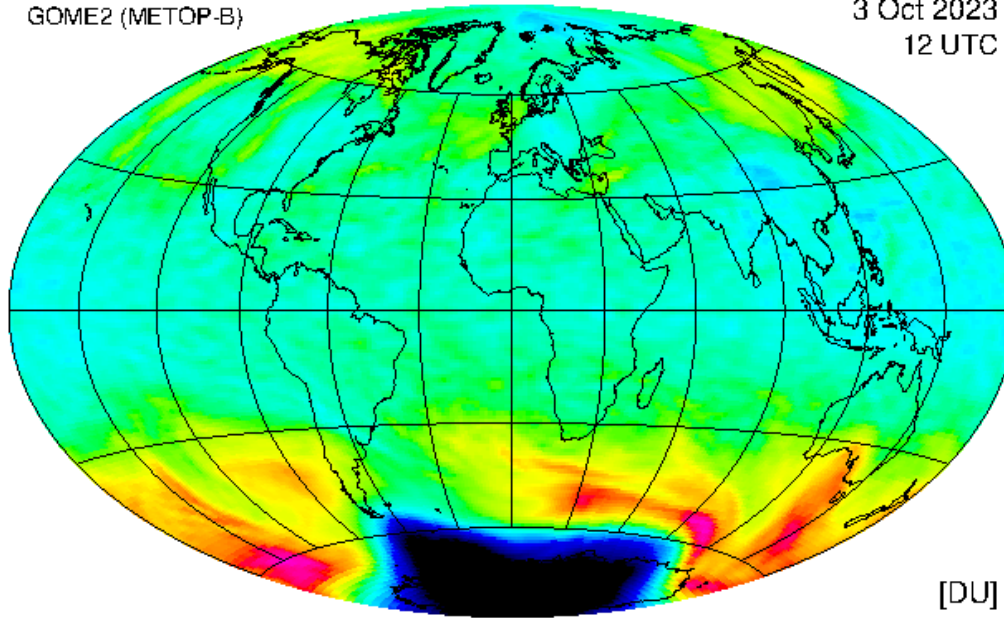
[DU]
150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500

Ártico

Antártica

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

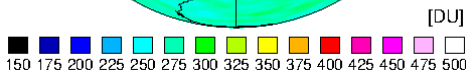
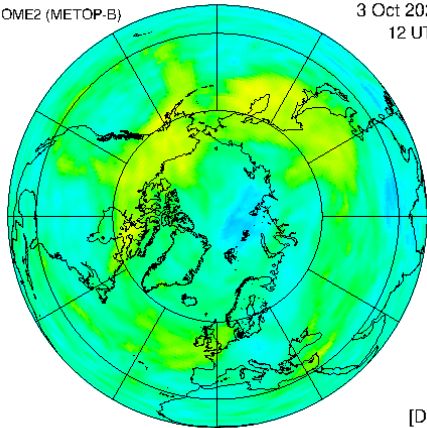
Forecast total ozone (D+1)
3 Oct 2023
12 UTC



Ártico

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

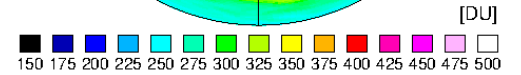
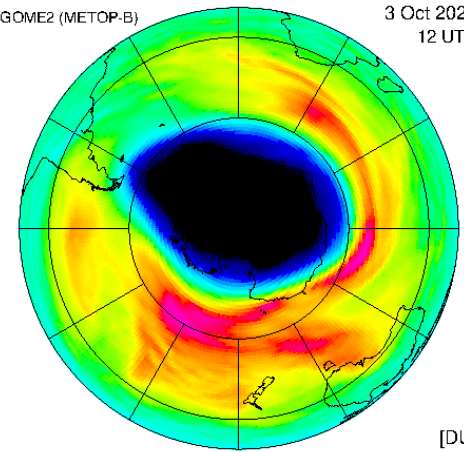
Forecast total ozone (D+1)
3 Oct 2023
12 UTC



Antártica

KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

Forecast total ozone (D+1)
3 Oct 2023
12 UTC



20 QUESTIONS & ANSWERS ABOUT THE OZONE LAYER

2022 Update



World Meteorological Organization

7bis avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Geneva 2
Switzerland

United Nations Environment Programme

Ozone Secretariat
P.O. Box 30552
Nairobi, 00100
Kenya

US Department of Commerce

National Oceanic and Atmospheric Administration
14th Street and Constitution Avenue NW
Herbert C. Hoover Building, Room 5128
Washington, D. C. 20230

National Aeronautics and Space Administration

Earth Science Division
NASA Headquarters
300 E. Street SW
Washington, D.C. 20546-0001

European Commission

Directorate-General for Research
B-1049 Bruxelles
Belgium

Published April 2023

ISBN: 978-9914-733-98-3

Ross J. Salawitch (Lead Author), Laura A. McBride, Chelsea R. Thompson, Eric L. Fleming, Richard L. McKenzie, Karen H. Rosenlof, Sarah J. Doherty, David W. Fahey, *Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2022 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, 75 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2023.

This report is available on the internet at the following locations:

<https://ozone.unep.org/science/assessment/sap>

<https://www.csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022>

Note: Figures from this report are in the public domain and may be used without permission. Attribution to this document is encouraged.

Cover image: Artistic rendering of the Aura spacecraft in Earth orbit. Aura, launched in 2004 by the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA), carries four instruments: the Microwave Limb Sounder (MLS), High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLIS), Tropospheric Emission Spectrometer (TES) and Ozone Monitoring Instrument (OMI). The instrument suite has provided observations of stratospheric and tropospheric ozone abundances, as well as a wide range of other chemical and physical properties of the atmosphere. The observations have been used extensively to guide the scientific community's understanding of the effects of human activity on Earth's protective ozone layer. Of particular importance have been the MLS observations of the chemical conditions in the ozone layer over Antarctica, including halogen species (ClO and HCl) and nitric acid (HNO₃) (see Fig. Q7-3). Image credit: NASA.

Cover design by Chelsea R. Thompson



← The Aura spacecraft in a clean-room, prior to launch. Photo credit: NASA

https://ozone.unep.org/sites/default/files/2023-05/Final_20Qs%202022%20full%20document_26April2023_digital%20version-reduced.pdf

Referências

Romeu C. Rocha-Filho, CAMADA DE OZÔNIO DÁ NOBEL, QUÍMICA NOVA NA ESCOLA, N° 2, NOVEMBRO 1995

Wallace & Hobbs, cap. 5,
5.7 Stratospheric Chemistry

B.J. Finlayson-Pitts, J.N. Pitts Jr., Chemistry of the upper and lower atmosphere – theory, experiments and applications, Academic Press, San Diego, 1998

Chipperfield, M.P., Bekki, S., Opinion: Stratospheric Ozone – Depletion, Recovery and New Challenges, EGU sphere, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1409>

<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-1409/>

Rolf Müller, R., Pöschl, U., Koop, T., Peter, T., Carslaw, K., Paul J. Crutzen – a pioneer in Earth system science and a founding member of the journal “Atmospheric Chemistry and Physics”, EGU sphere, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1467>

<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-1467/>