



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 – o que forma a camada de ozônio, distribuição global e sazonalidade

Profa. Adalgiza Fornaro

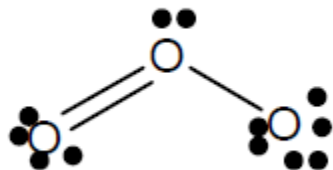
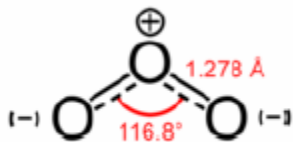
Química da atmosfera

Ozônio estratosférico:

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

Referência importante

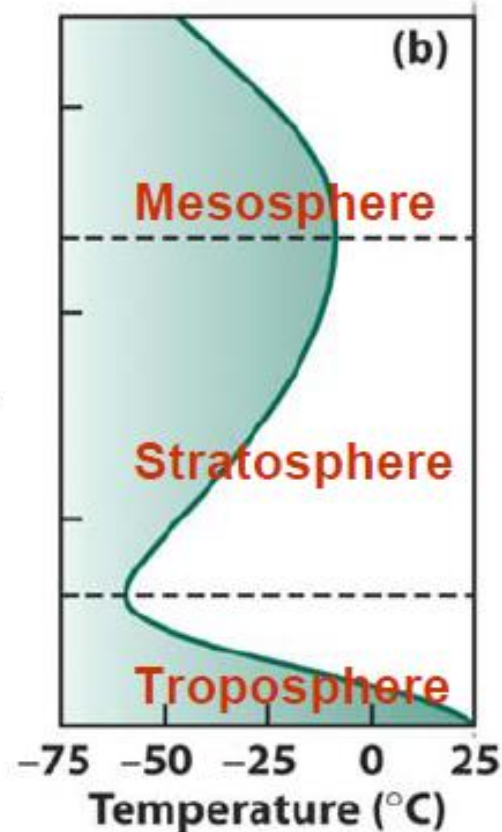
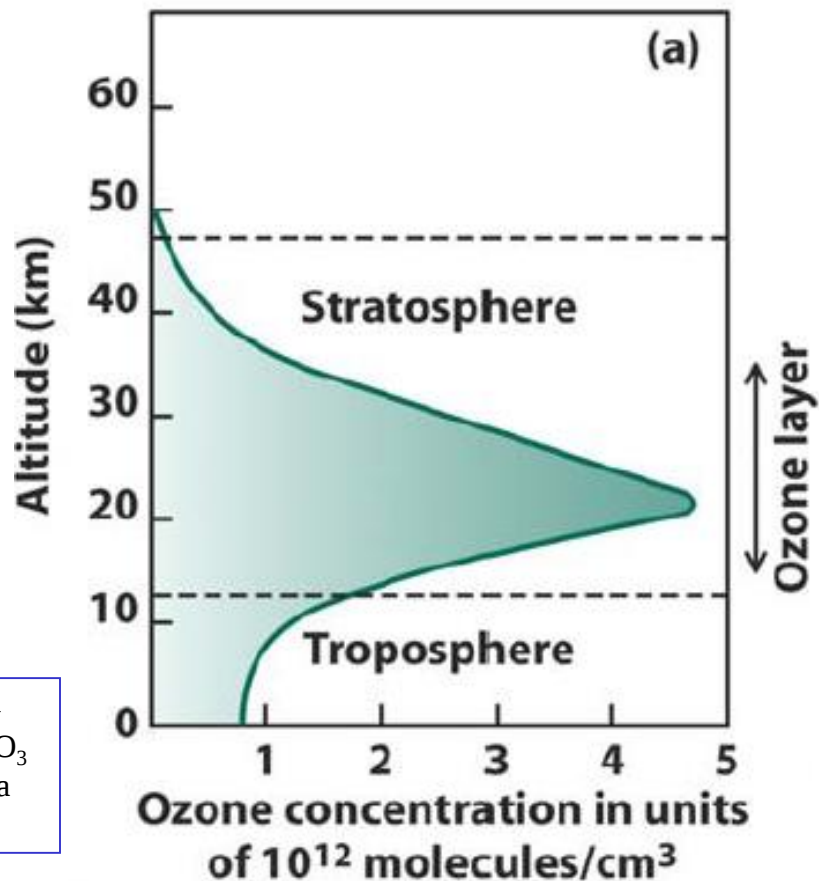
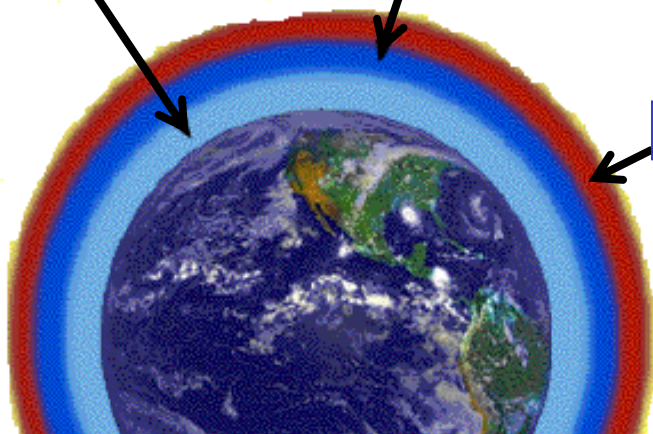
Susan Solomon , STRATOSPHERIC OZONE DEPLETION: A REVIEW
OF CONCEPTS AND HISTORY, Reviews of Geophysics, 37(3), 275–316, 1999



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

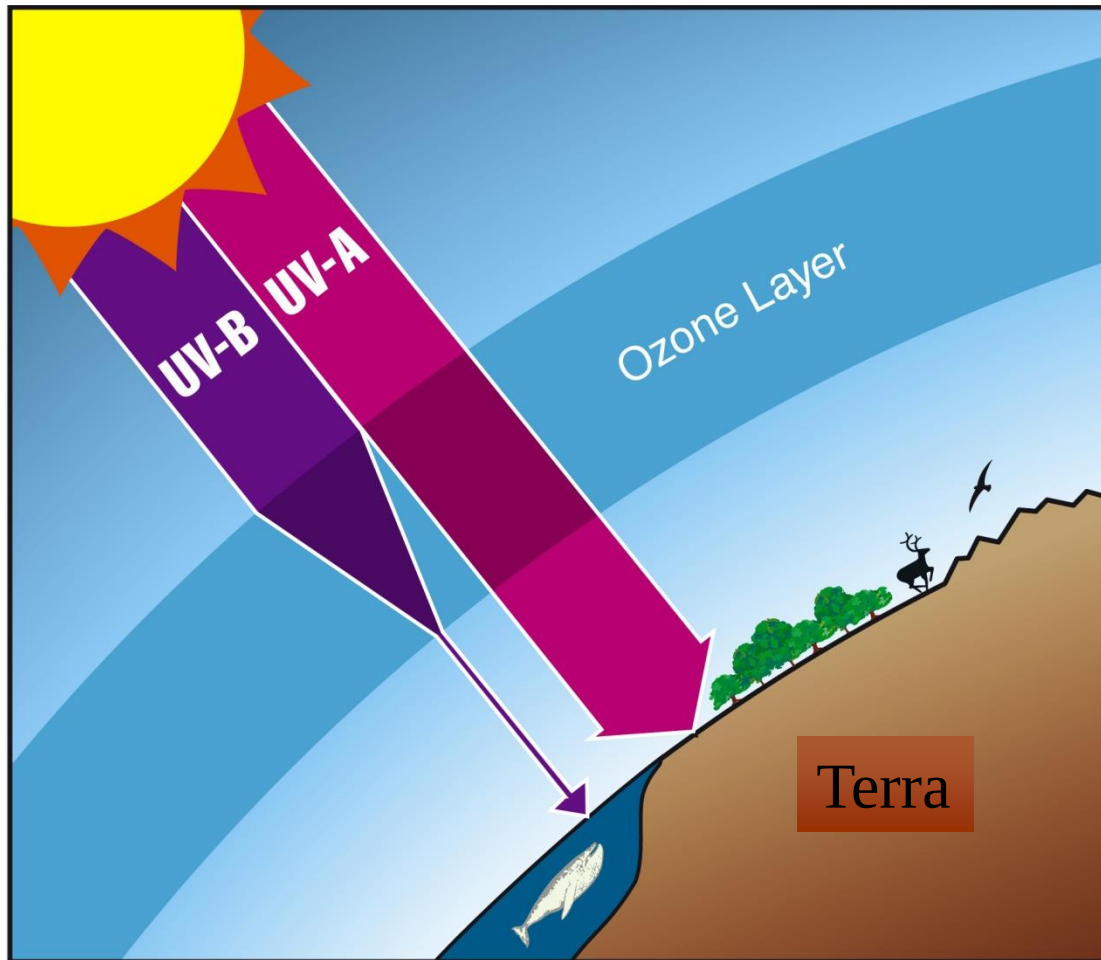
Estratosfera – nesta região, O_3 nos protege da radiação UV

Mesosfera



Importância do ozônio estratosférico:

Proteção da radiação UV a partir da camada de ozônio

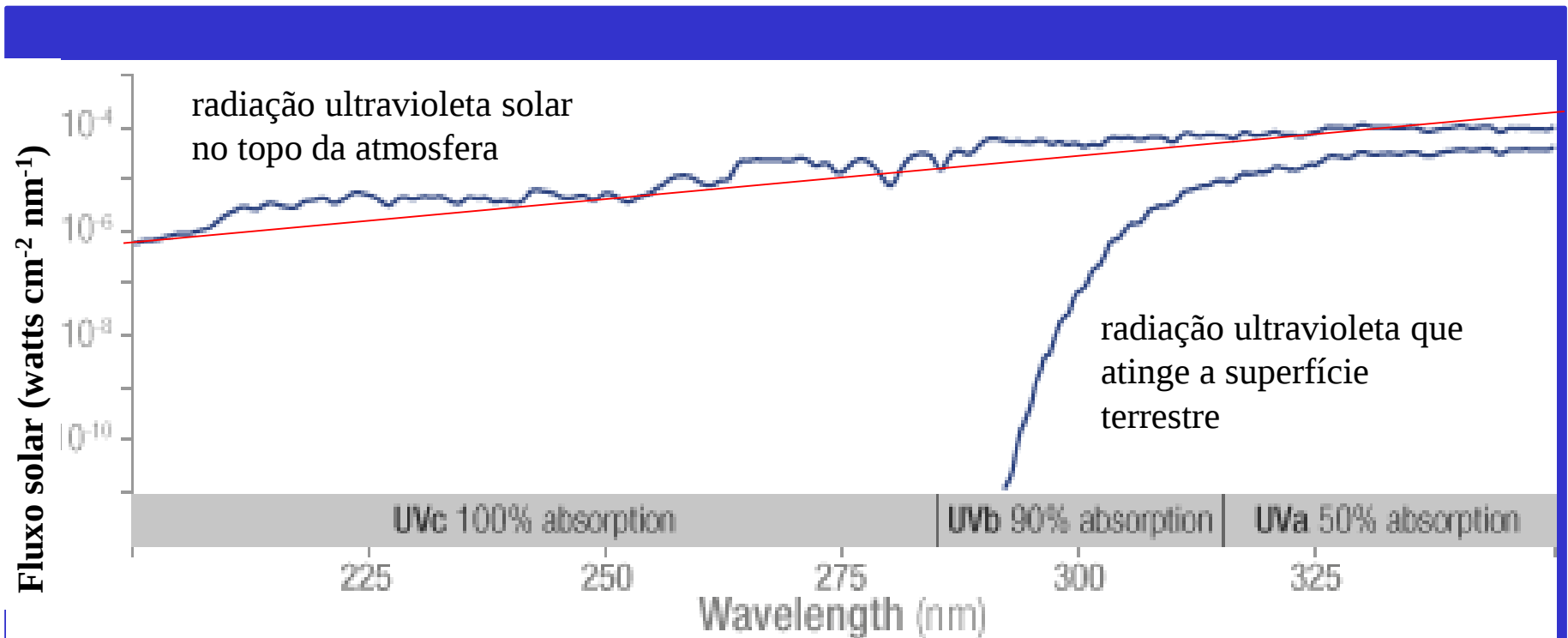


UVC (100 – 280 nm) → absorção por O_2

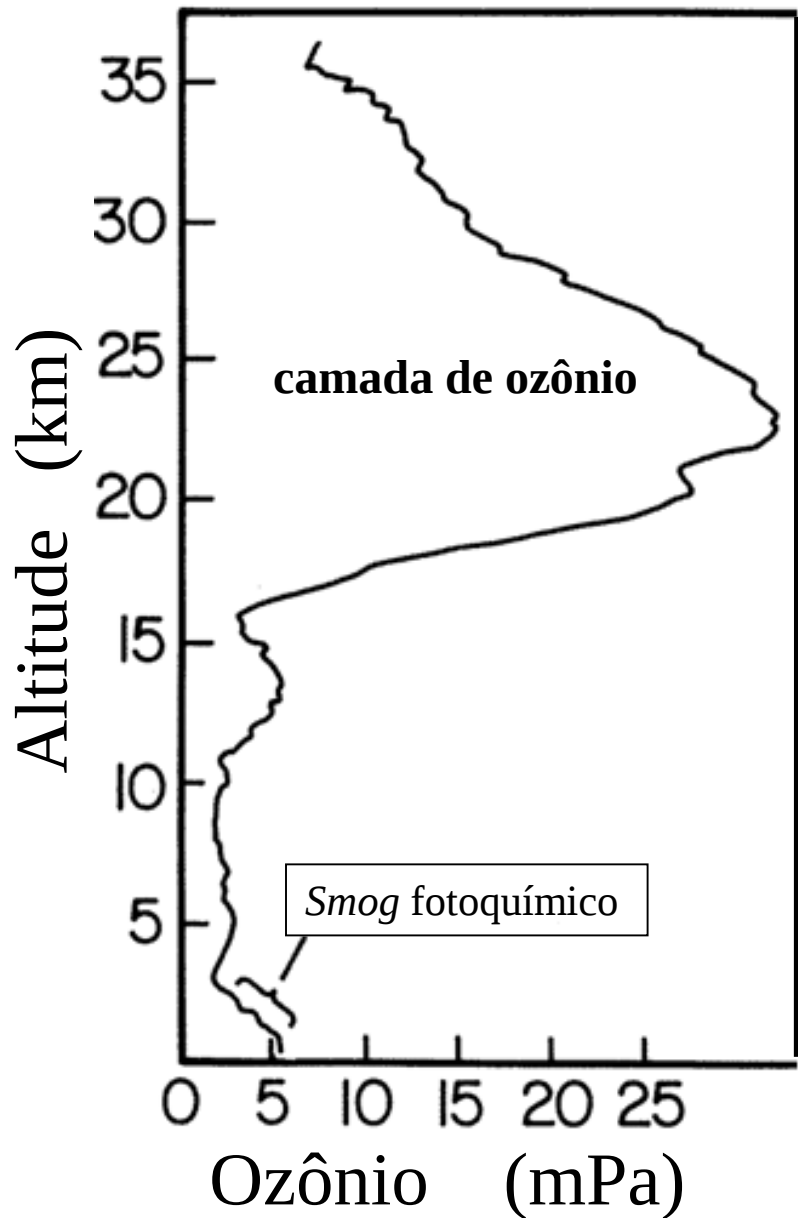
UVB (280 – 320 nm) → absorção por O_3

UVA (320 – 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.



Ozônio atmosférico

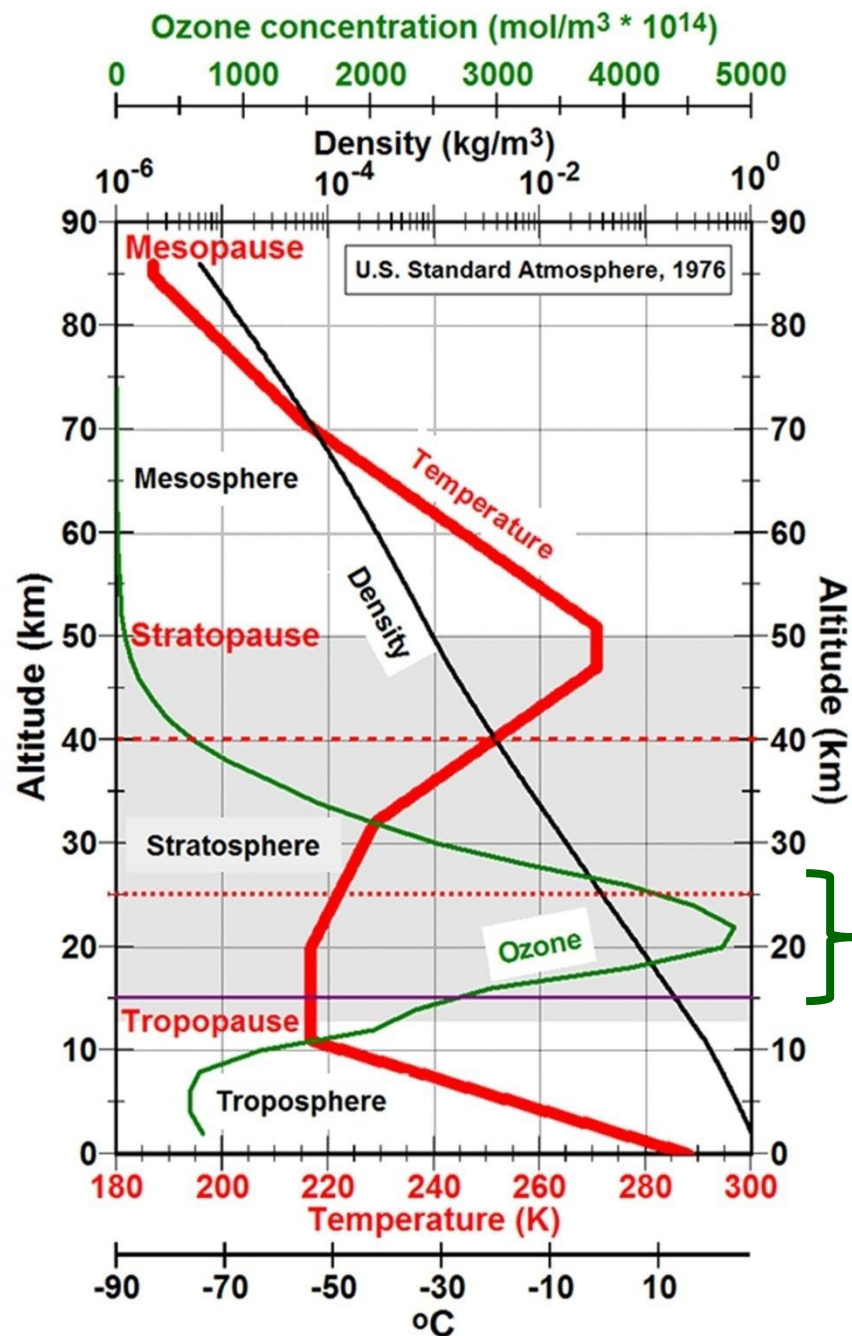


Ozônio estratosférico

- ☐ 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

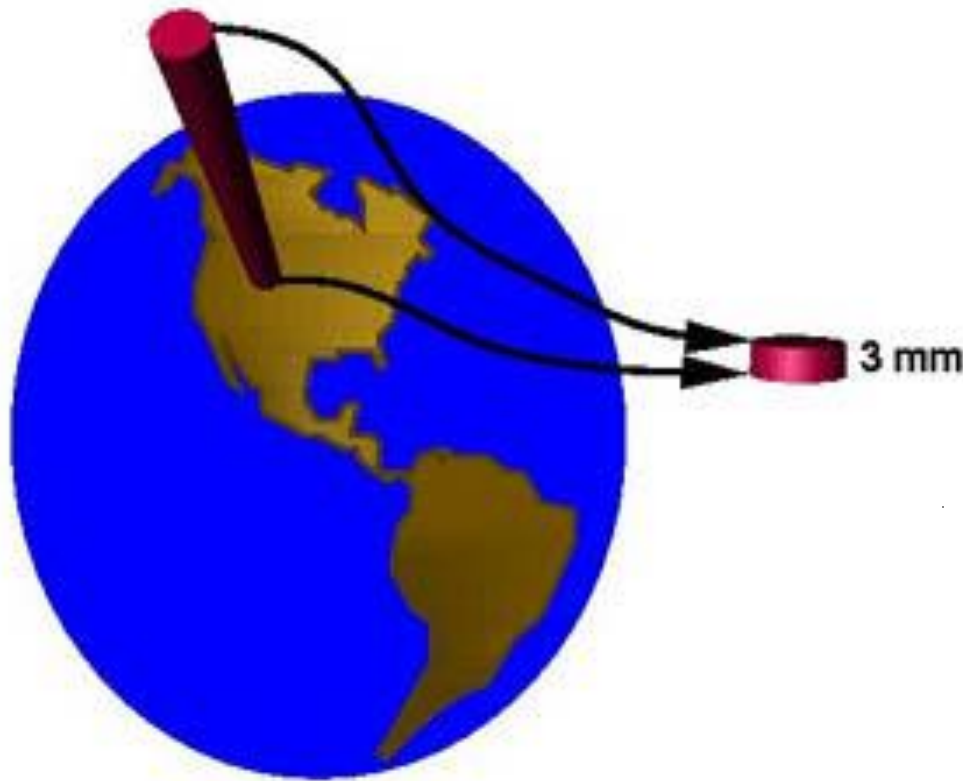


Perfil de ozônio, densidade e temperatura na atmosfera terrestre

Camada de ozônio
na estratosfera

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

Unidades Dobson (UD)

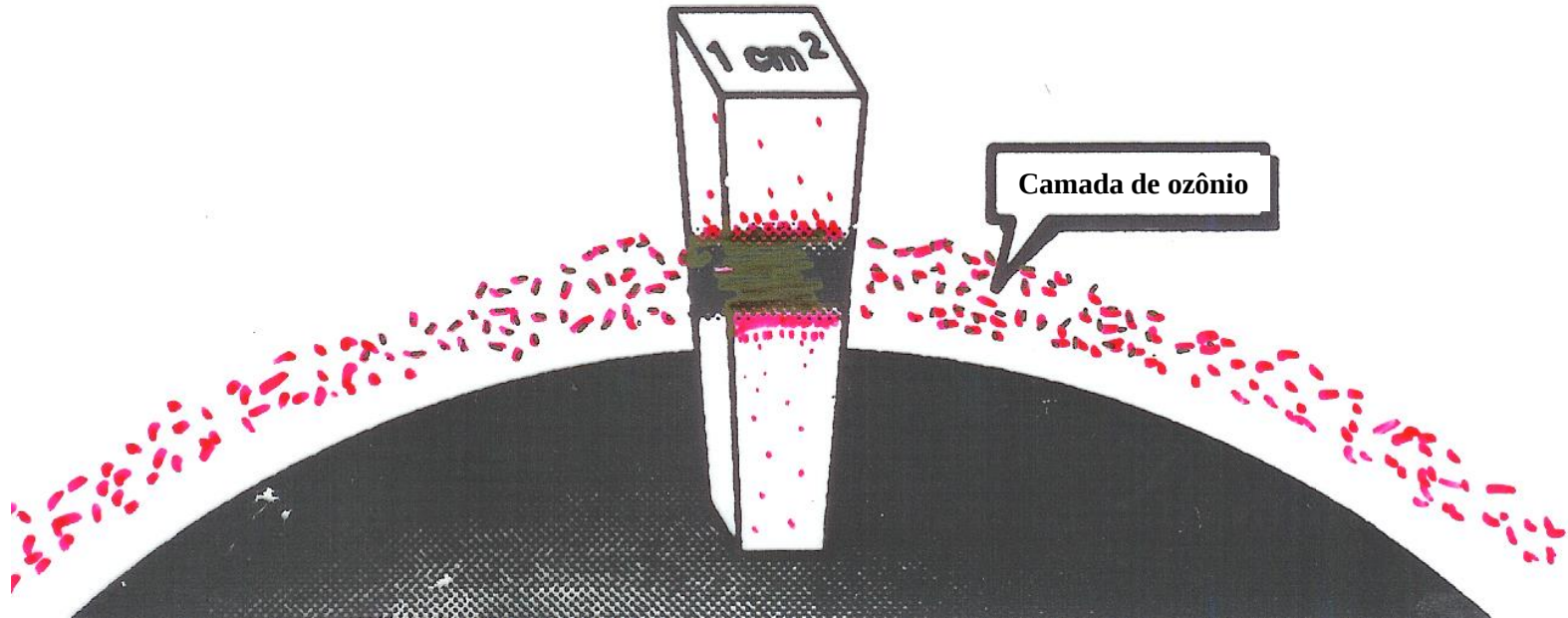


- Considera todo o ozônio acima de uma localização em condições de 0°C e 1 atm.
- A espessura desta camada mede 3 mm, correspondendo a 300 UD (aproximadamente à média global).
- 100 unidades Dobson corresponde a 1mm de espessura.



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

Coluna de ozônio

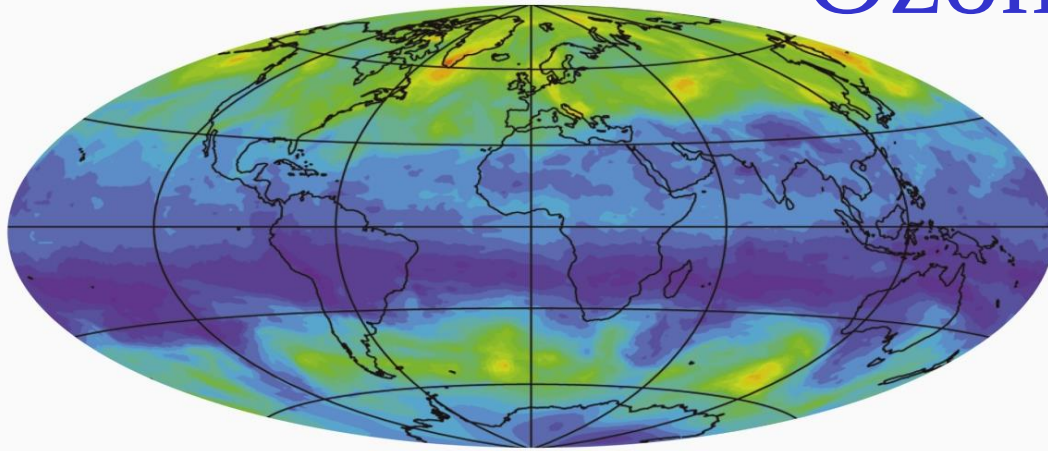


Define 100 DU = 1mm de espessura de O_3 na STP (1 atm e 273 K)

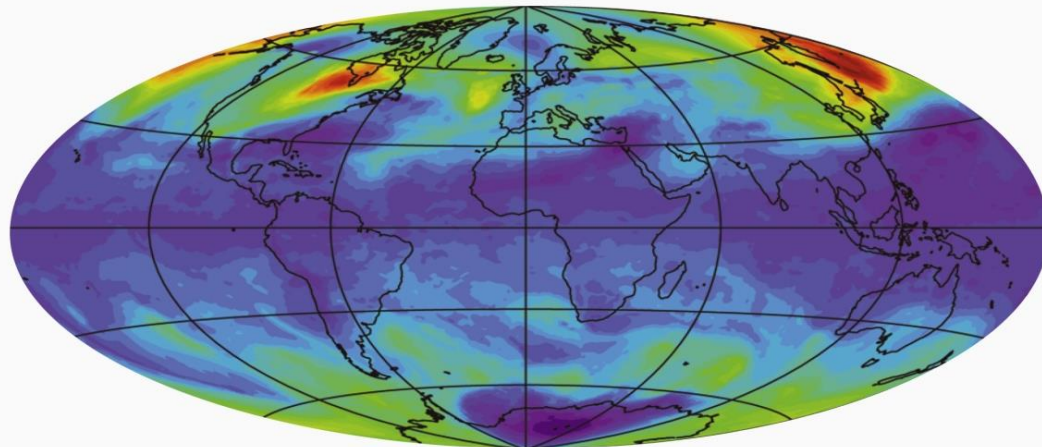
$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{1 \text{ atm}}{.0821 \frac{\text{l-atm}}{\text{mole-K}} 273 \text{ K}} \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ cm}^3} \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ molec}}{1 \text{ mole}} = 2.7 \times 10^{19} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3}$$

$$1 \text{ DU} = 2.7 \times 10^{19} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3} 0.001 \text{ cm} = 2.6 \times 10^{16} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$$

Ozônio Estratosférico



22 June 1999



22 December 1999

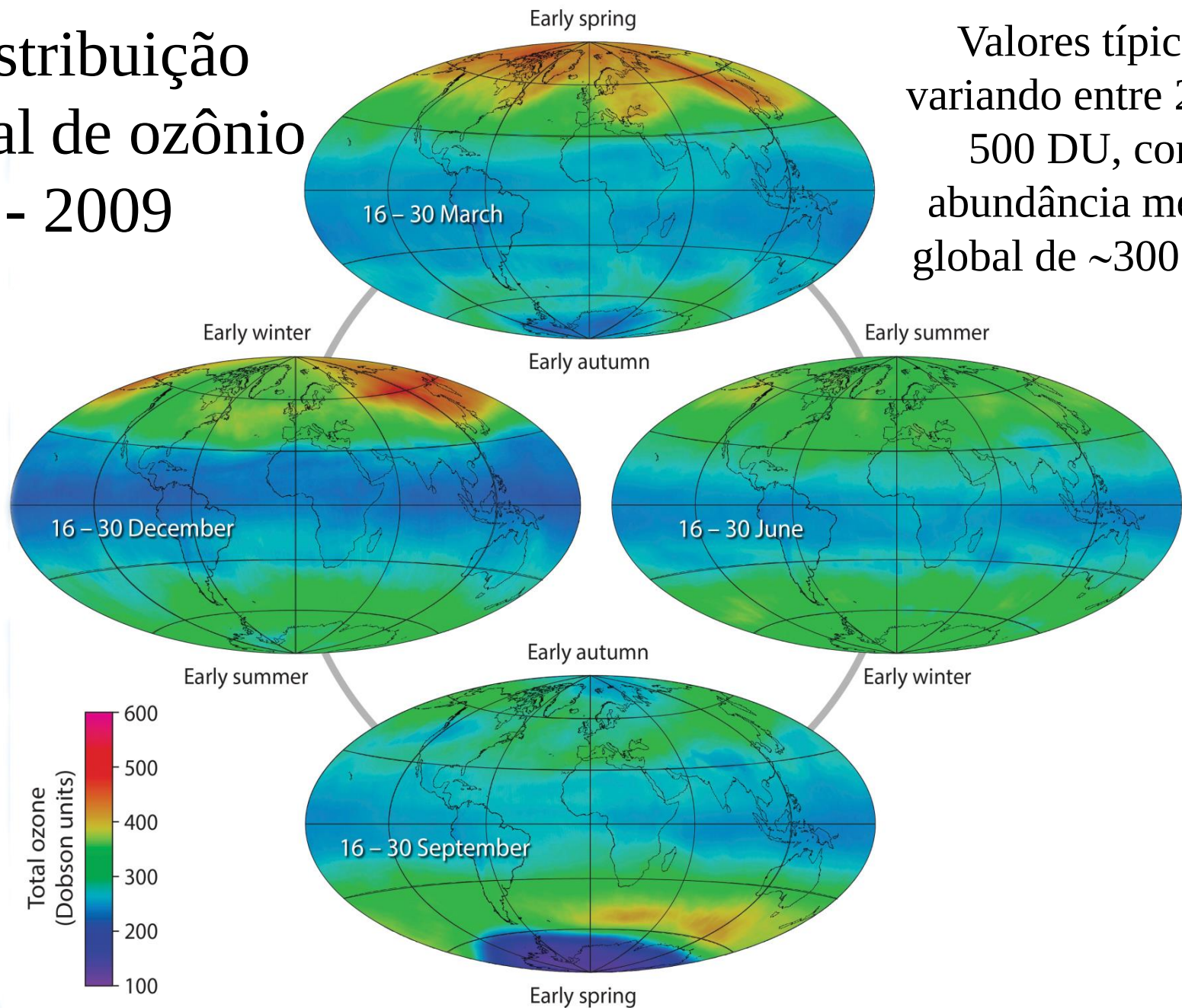


Total Ozone (Dobson units)

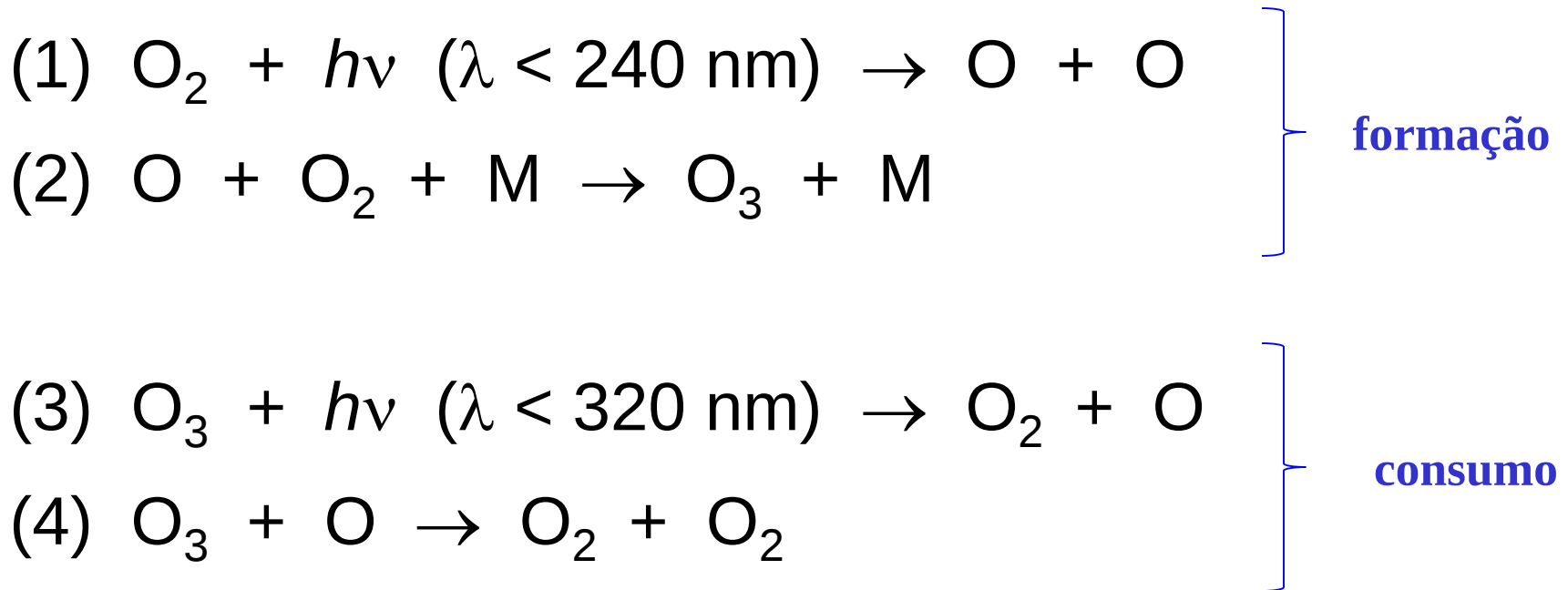
Dados de satélite – mapas da
coluna de ozônio total global

Distribuição global de ozônio - 2009

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

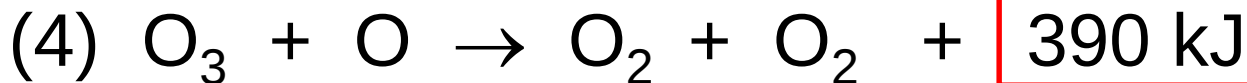
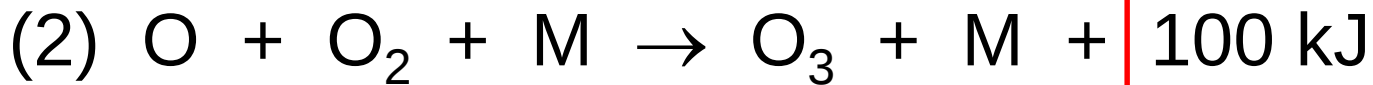


Ciclo de Chapman – mecanismo de formação de ozônio estratosférico



M → chamado terceiro corpo (atenua energia, em excesso estabilizando o ozônio produzido), N_2 ou O_2

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:

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

→ Concentração no ar
→ Velocidade de remoção

Exemplo: o tempo de vida da conversão de O em O_3 , reação 2.

$$\tau_O = \frac{[O]}{k_2[O][O_2][M]} = \frac{1}{k_2[O_2][M]}$$

$\tau_O \ll$ segundos

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

Mecanismo de reação:



Equações de velocidade:

$$v_1 = -k_1[O_2]$$

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

$$v_3 = -k_3[O_3]$$

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

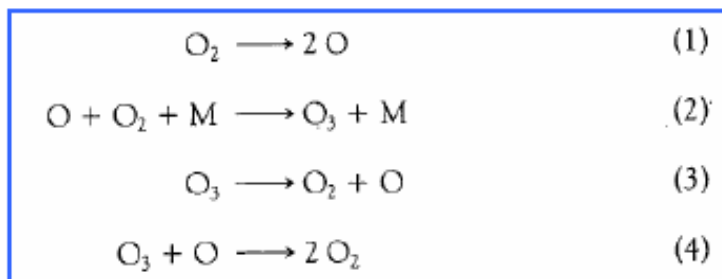
São quatro equações e quatro incógnitas (O, O₂, O₃ e M)!!!

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 $[\text{O}] = 2 \times \text{velocidade 1} - \text{velocidade 2} + \text{velocidade 3} - \text{velocidade 4} = 0$

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

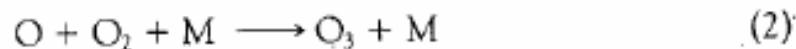
(A) + (B) =

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

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

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[O_3] = ???$$



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

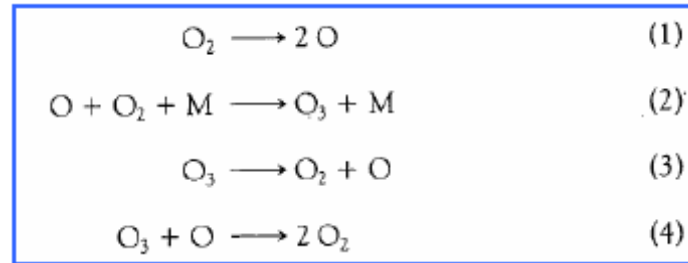
$$= 2k_1[O_2] - 2k_4[O_3][O] = 0$$

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

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

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

$$[O_3] = ???$$



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

(B) Velocidade de mudança de $[O_3] = \text{velocidade 2} - \text{velocidade 3} - \text{velocidade 4} = 0$

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

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

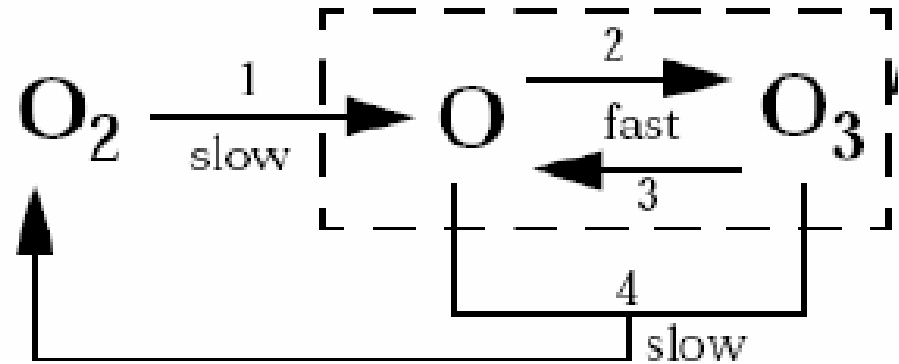
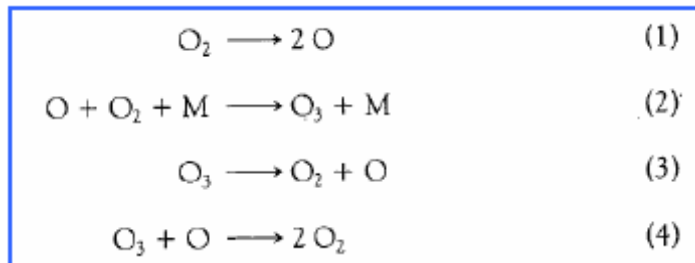
$$\mathbf{(A) - (B) =}$$

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

E agora?

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

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



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

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

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

$\Rightarrow$ portanto velocidade 1 pode ser desprezada nessa condição de estado pseudo-estacionário

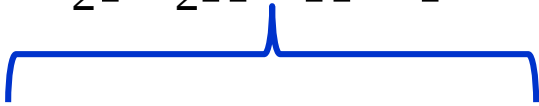
$$\text{velocidade 3} = \text{velocidade 2}$$

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

Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário

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

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


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

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

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

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

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

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

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	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}

$[M]$
diminui
~40 vezes

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

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

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

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

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

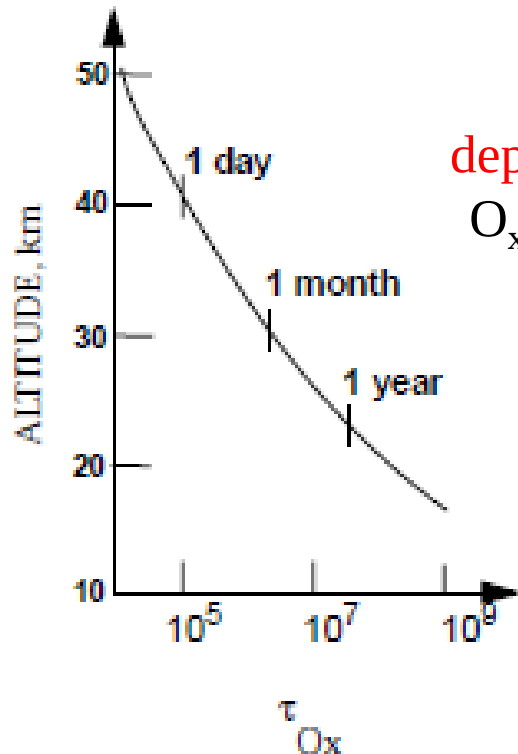
$$45\text{km}, T = 270\text{K}, k_4 = 3.9 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ molecules}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

@ 20 km,

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

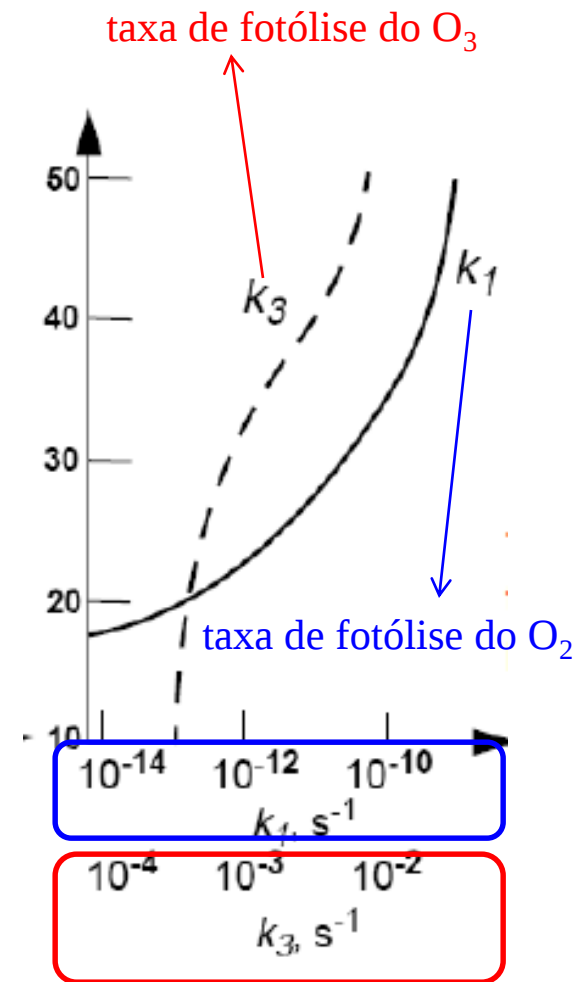
@ 40 km,

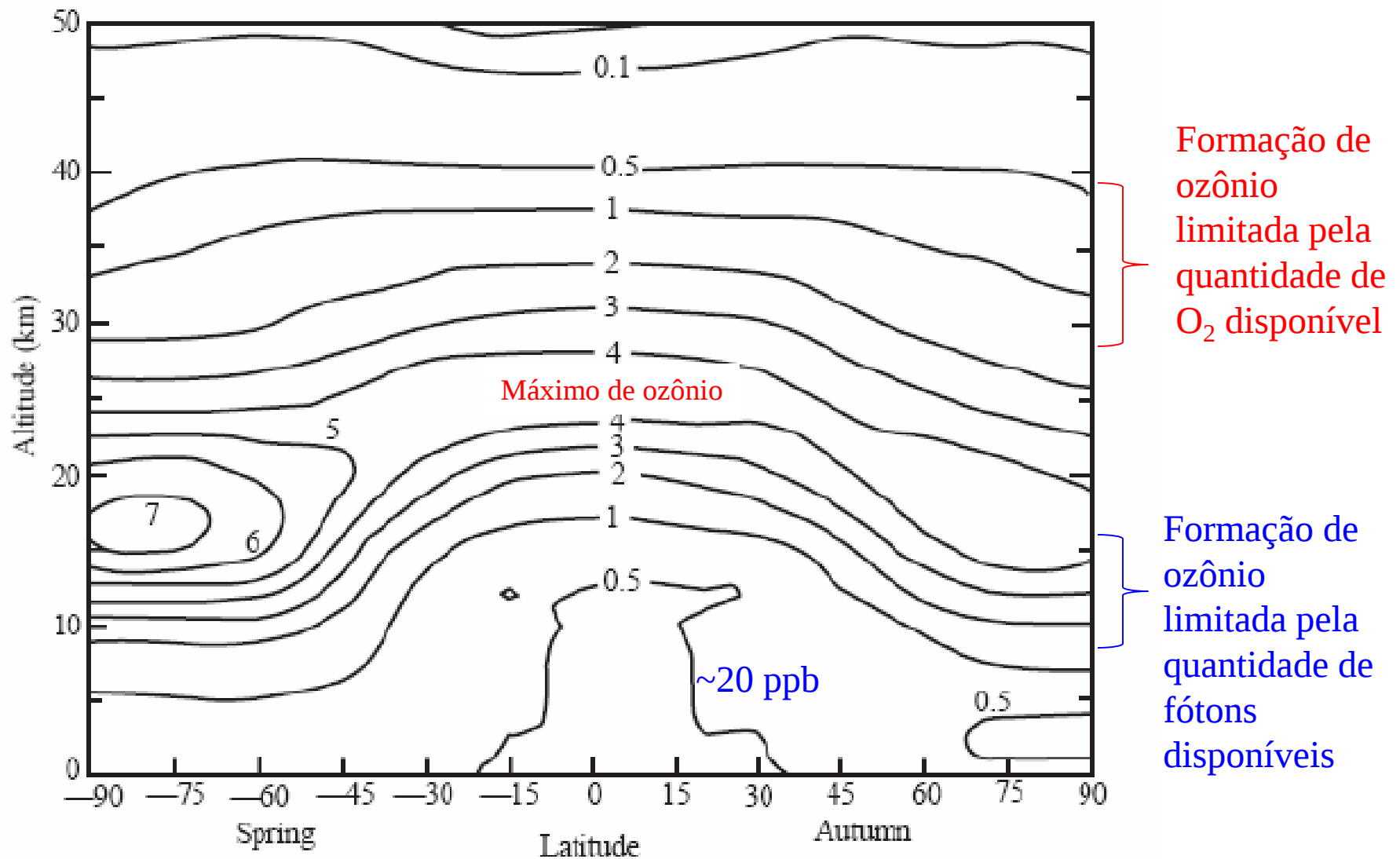
$$[M] = 4.1 \times 10^{16} \text{ molecules/cm}^3$$



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.



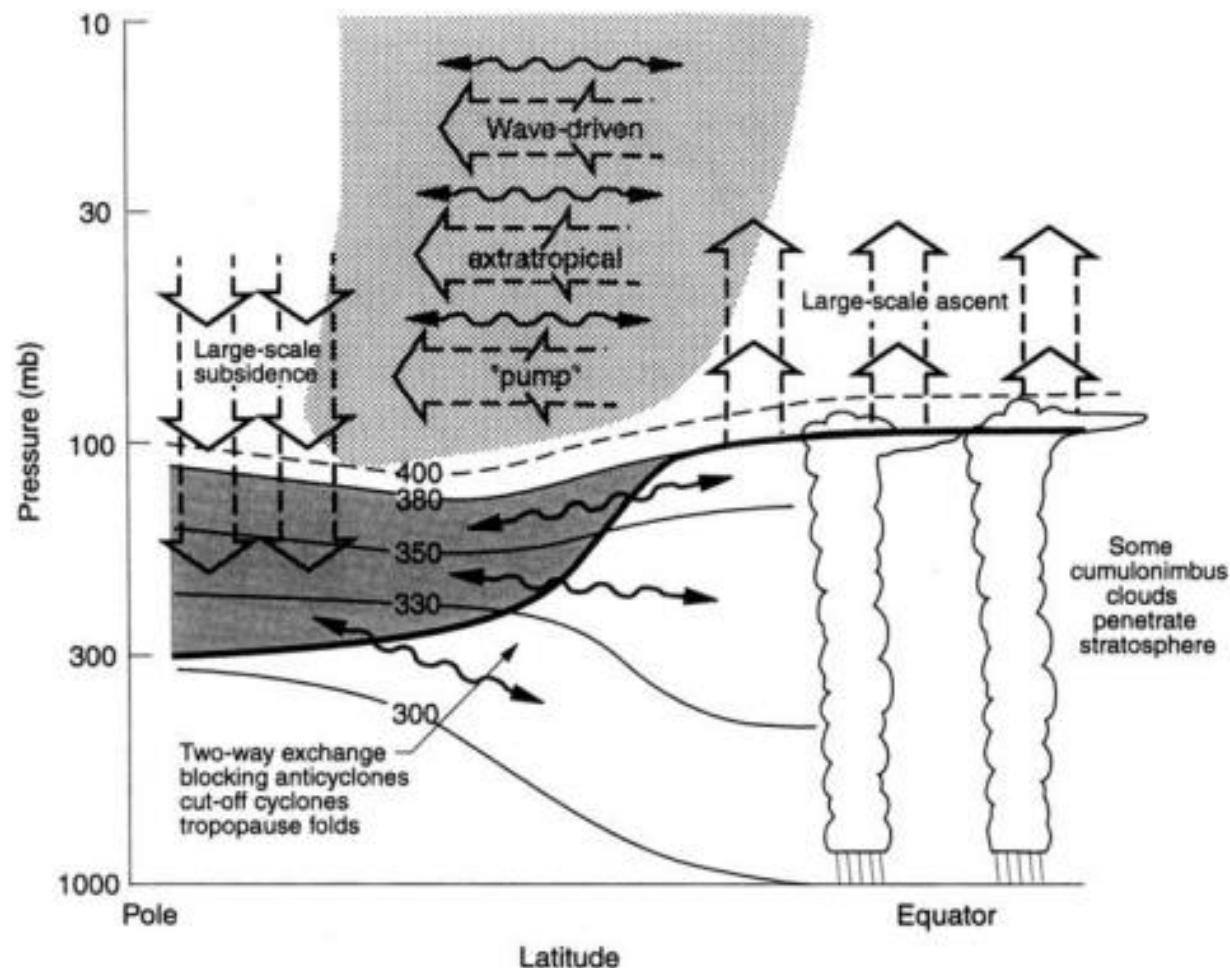


Camada natural de ozônio: distribuição vertical e longitudinal de O_3 (10^{12} moléculas cm^{-3}) no equinócio, baseada em medidas dos anos 1960

(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

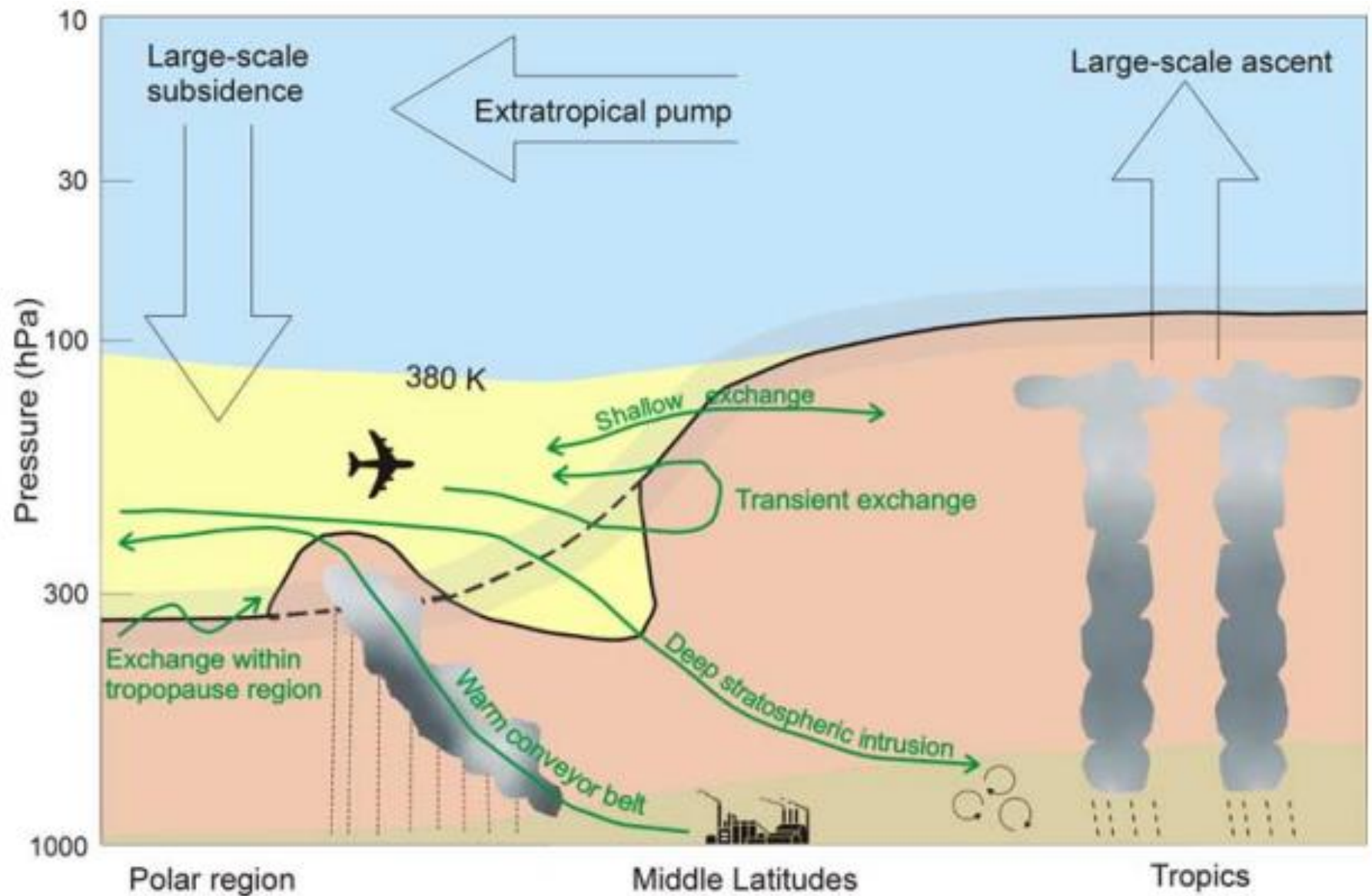
Circulação atmosférica global explica máximos de O₃ nos pólos.



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 extratrópicos 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.

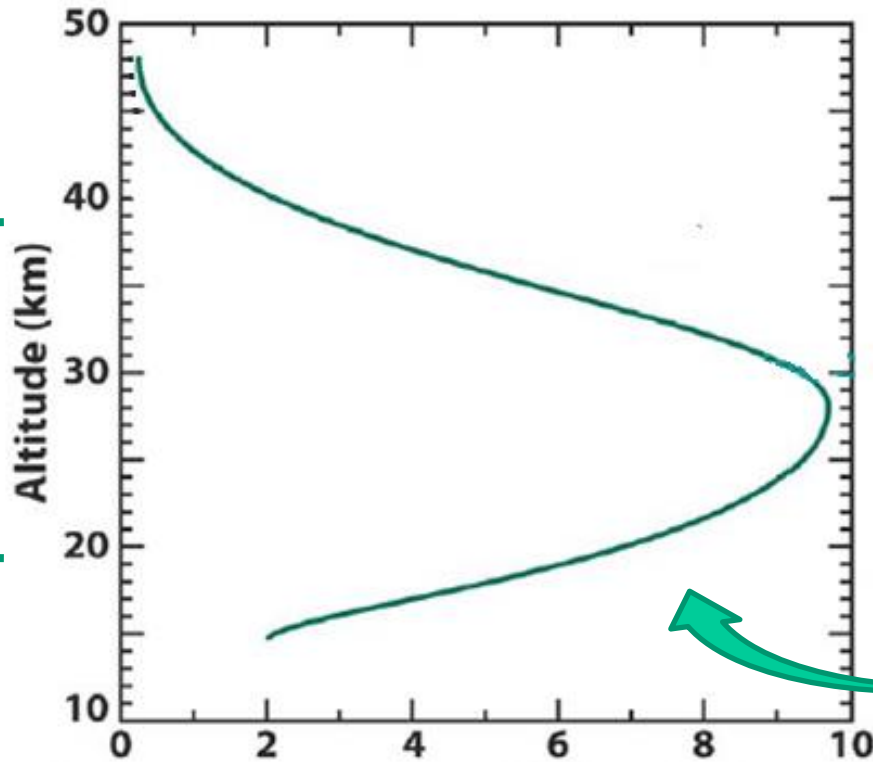
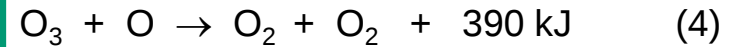
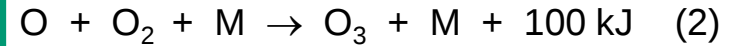
Stohl et al., Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO, J. Geophys Res., 108 (D12), 8516, doi:10.1029/2002JD002490, 2003

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:

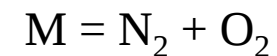
Ozônio estratosférico → teoria de Chapman (1935) considera apenas espécies de oxigênio (O, O₂ e O₃) → explica a existência e posição da camada de ozônio



Mecanismo de Chapman – análise do estado pseudo-estacionário
[O₃] = ???

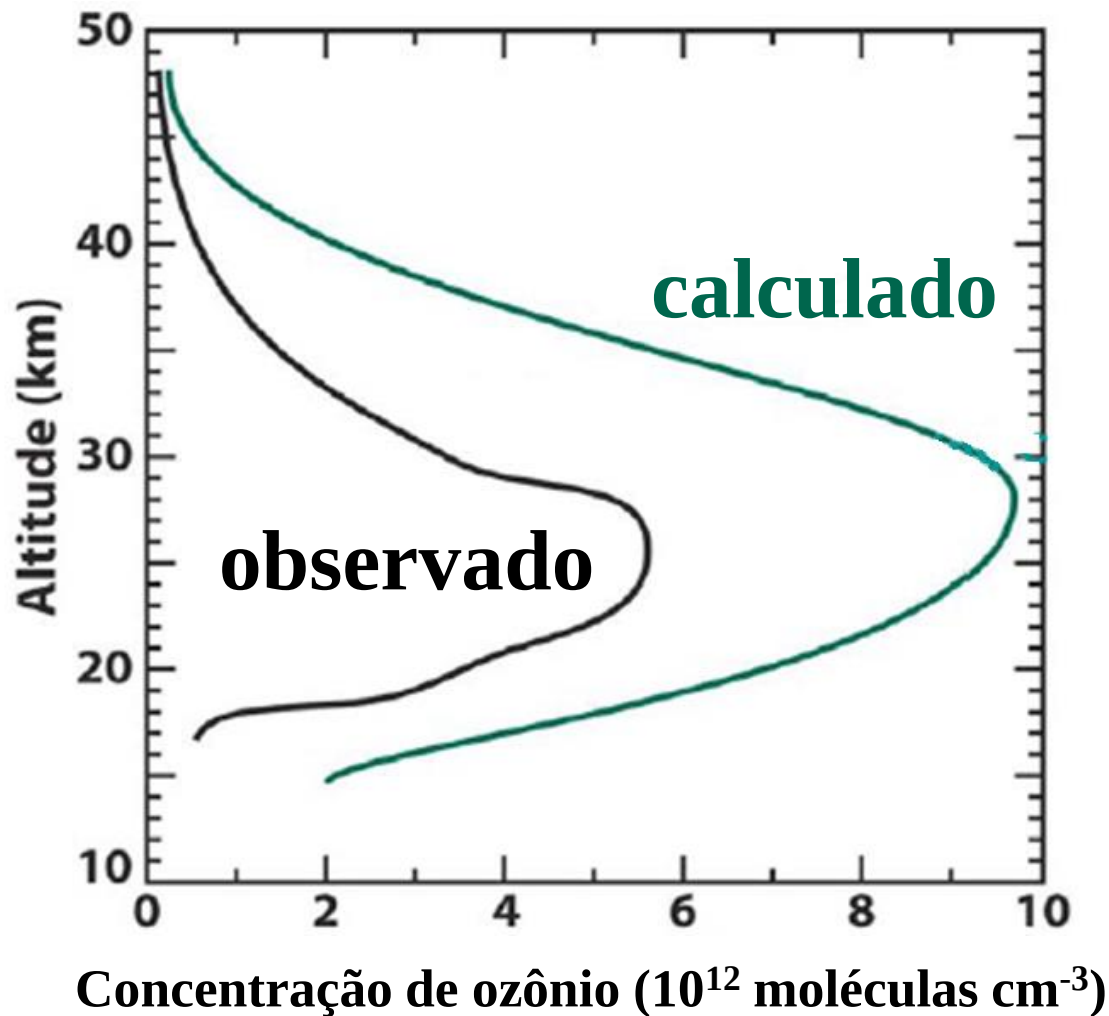
$$[\text{O}_3] = (k_1 k_2 [\text{M}] / k_3 k_4)^{1/2} [\text{O}_2]$$

calculado

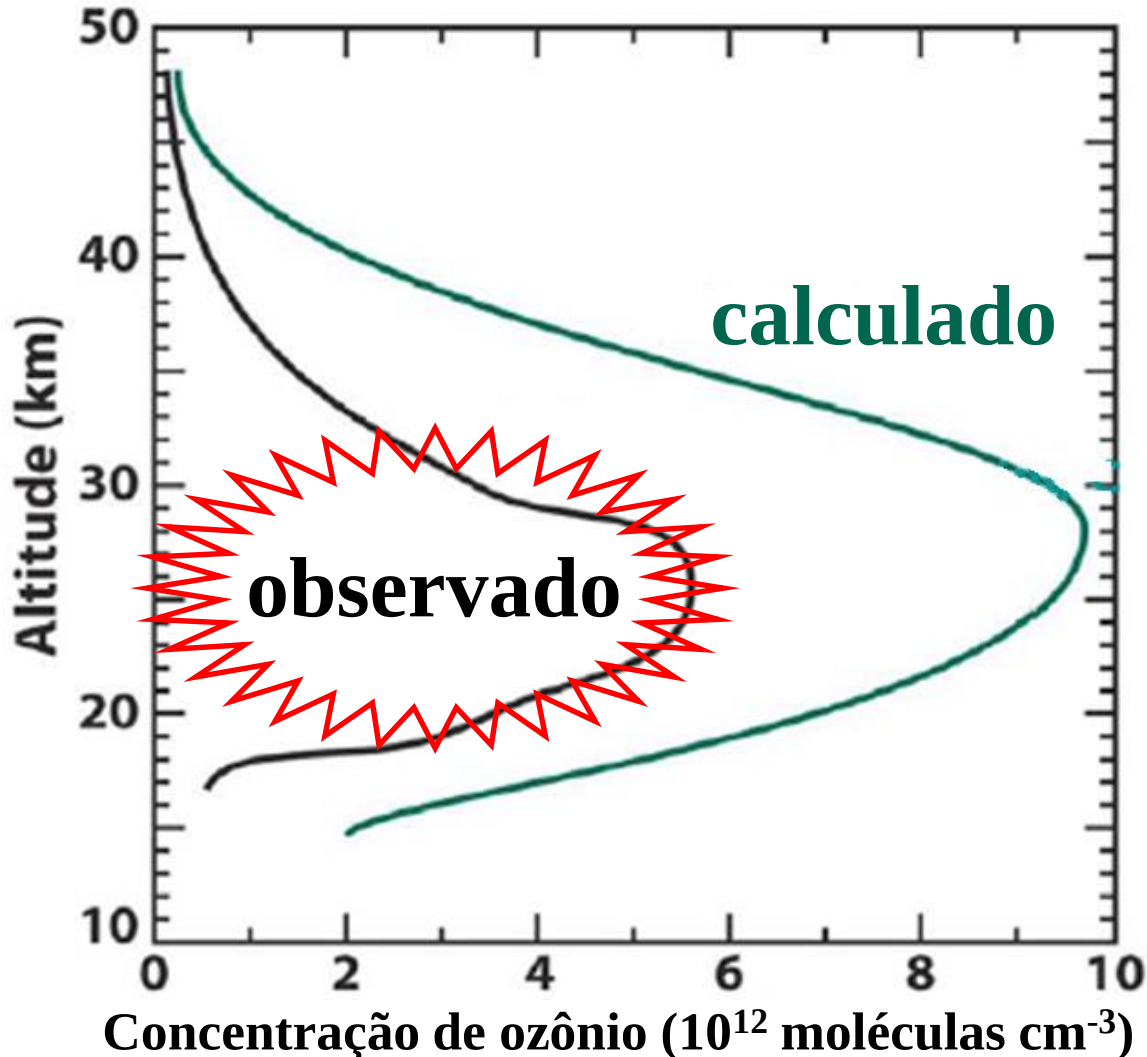


Concentração de ozônio (10¹² moléculas cm⁻³)

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).

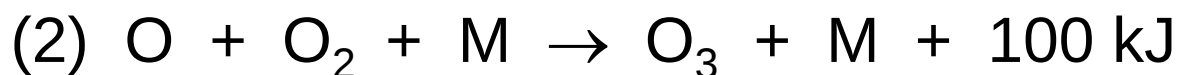


Camada de ozônio: Ozônio estratosférico previsto pela **teoria de Chapman (apenas espécies de oxigênio)** vs observado → modelo de Chapman prevê um valor de O_3 duas vezes mais alto do que o observado (ao longo do século passado).

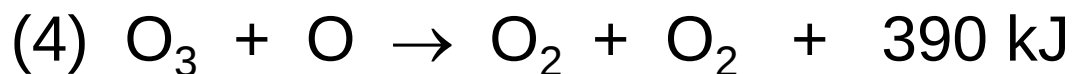


E agora?

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



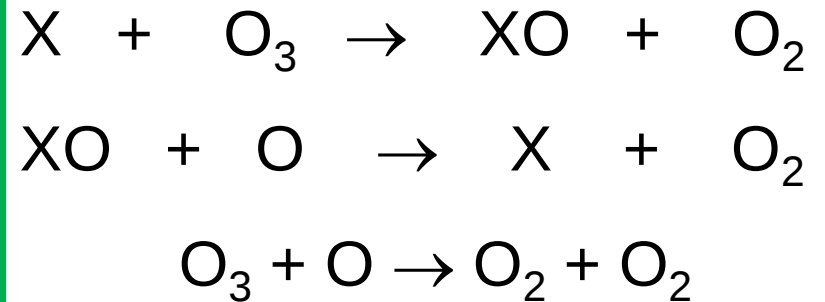
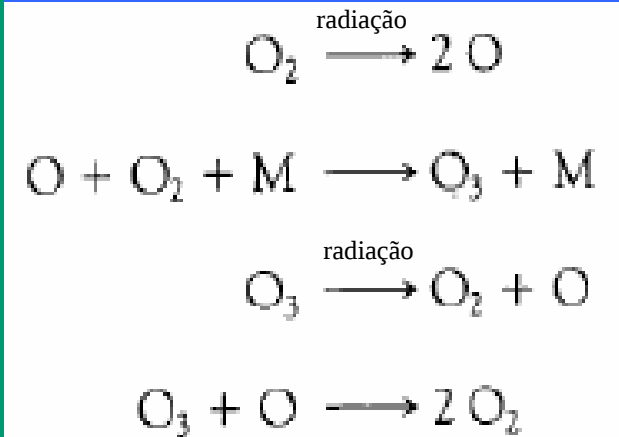
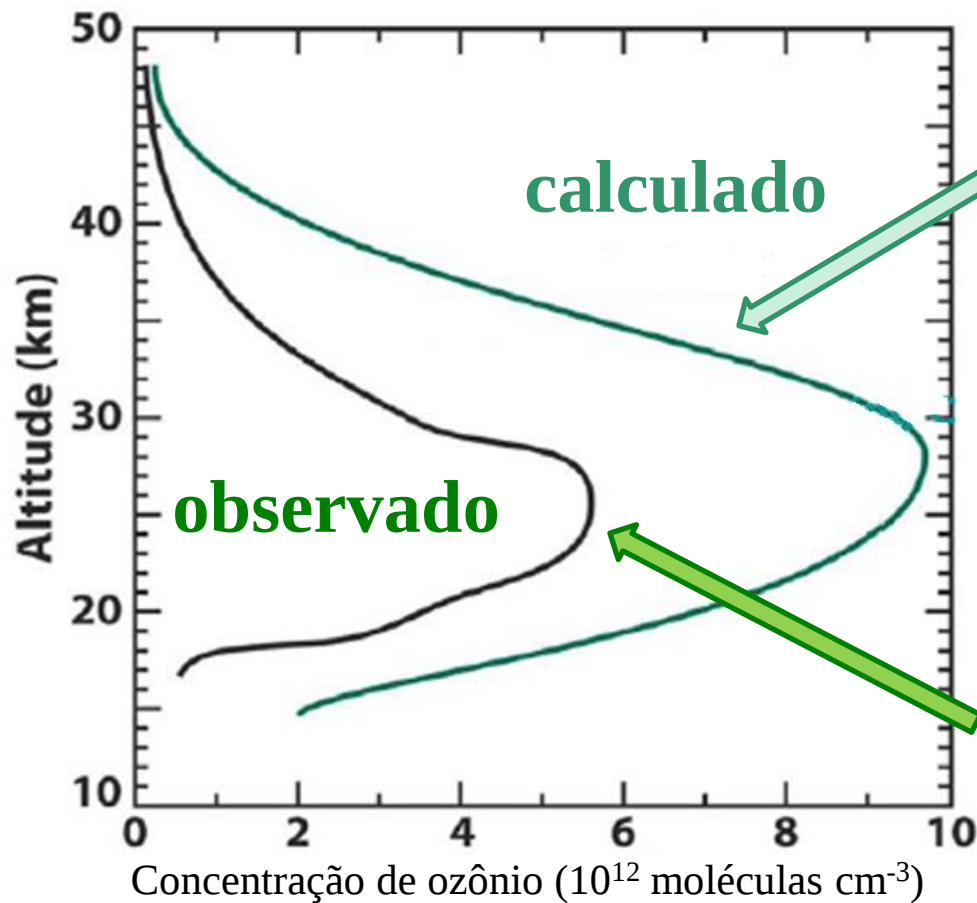
X pode ser H, OH, NO, Cl, ou Br. A reação (2) é a etapa mais lenta. Portanto, é considerada a etapa limitante do processo.

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

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 NO_x

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

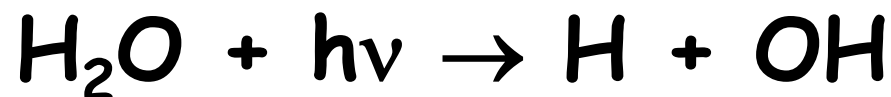
Ciclo dos halogênios

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

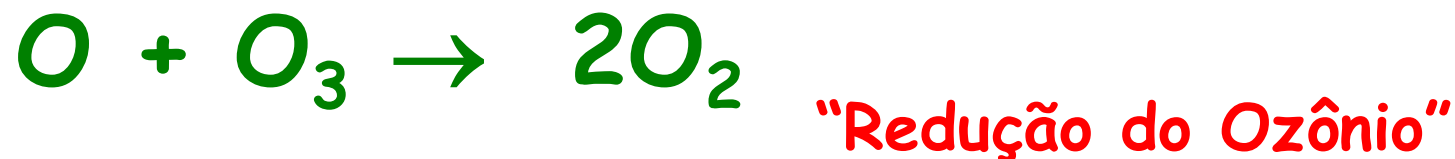
H, OH e HO_2 - espécies formadas pela reação de átomos de O excitados com compostos atmosféricos contendo H, como H_2O e CH_4 .



Reações das espécies de HO_x com O_3



Reação global:



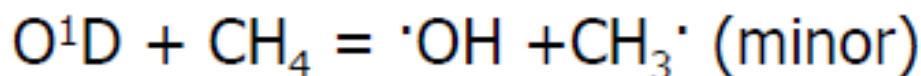
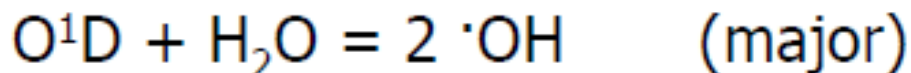
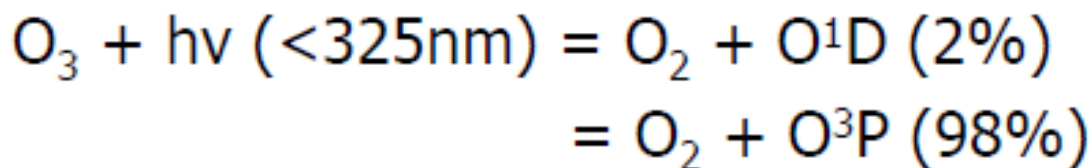
Porém na baixa estratosfera, a concentração de O é muito baixa. Assim as reações importantes para destruir ozônio são:



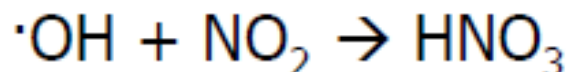
Hydroxy radical

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

- Sources



- Termination reaction



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

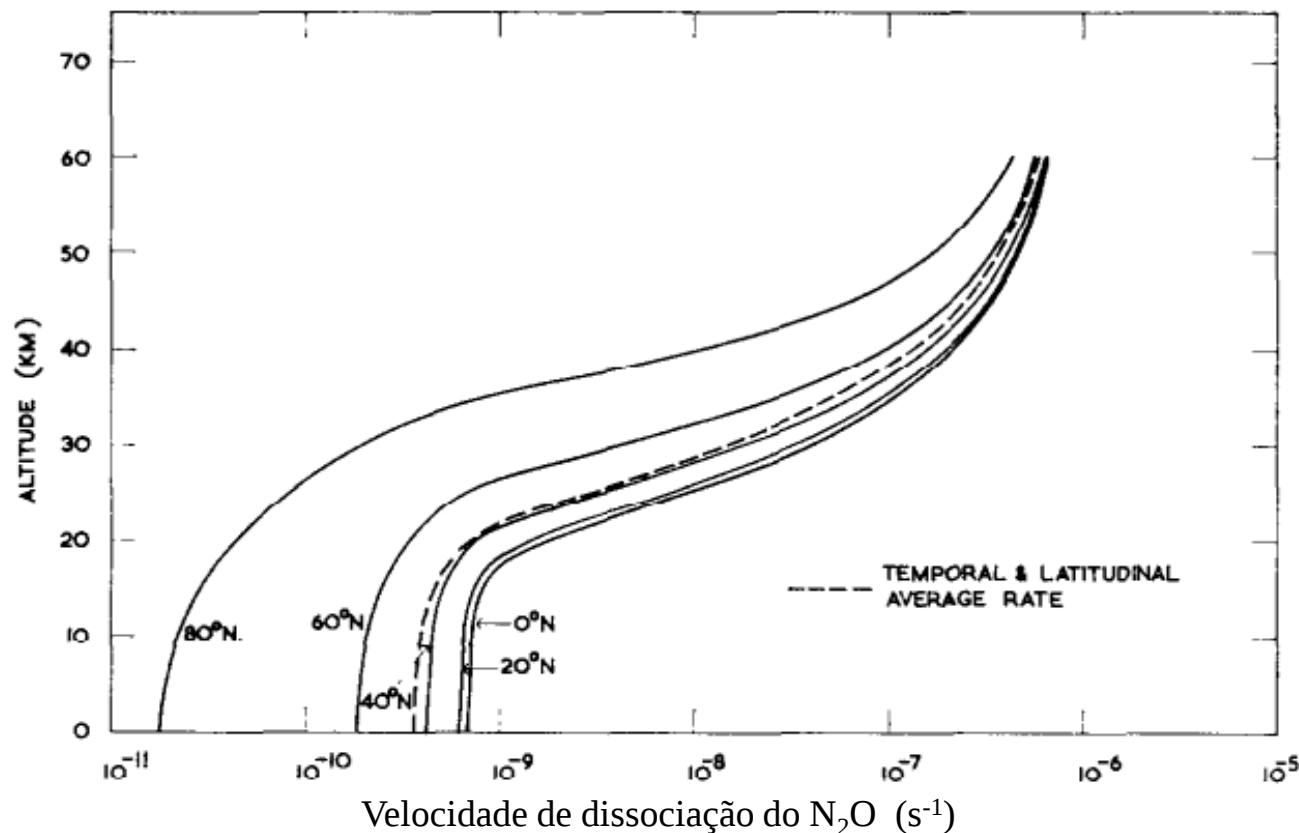


Reação global



“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

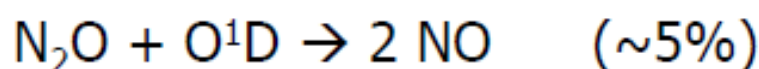
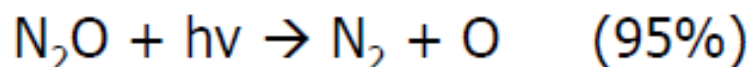


"Redução do Ozônio"

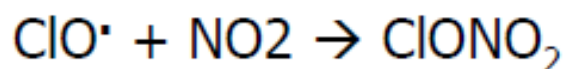
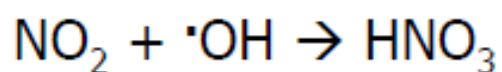
Crutzen 1970, 1971 então usou essas concentrações projetadas por Bates e Hays (1967) para mostrar que as reações de óxidos de nitrogênio, formados a partir de N₂O produzido naturalmente, com O₃ foram o principal "elo perdido" na determinação das concentrações de ozônio estratosférico. Este trabalho foi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

Nitric oxides

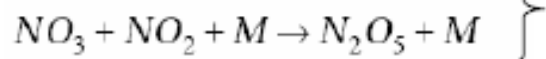
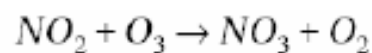
- NO is produced abundantly in the troposphere, but all of it is converted into $\text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$ (removed through precipitation)
- NO in the stratosphere is mainly produced from nitrous oxide (N_2O), which is much less reactive than NO.



- Removal processes:



} Inhibit the HO_x and ClO_x cycles



} Nighttime termination reactions

O óxido nitroso (N₂O) é um sub-produto dos processos de nitrificação e denitrificação.

Fluxo anual de óxido nitroso por diferentes fontes

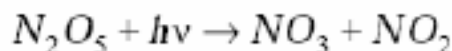
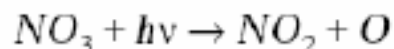
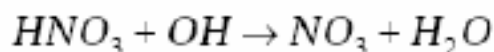
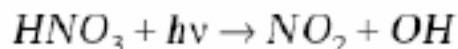
	Rate, Tg N yr ⁻¹ best estimate and range of uncertainty
SOURCES, natural	9 (6-12)
Oceans	3 (1-5)
Tropical soils	4 (3-6)
Temperate soils	2 (0.6-4)
SOURCES, anthropogenic	6 (4-8)
Cultivated soils	4 (2-5)
Biomass burning	0.5 (0.2-1.0)
Chemical industry	1.3 (0.7-1.8)
Livestock	0.4 (0.2-0.5)
SINK Stratosphere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

Reservoir species for NO_x

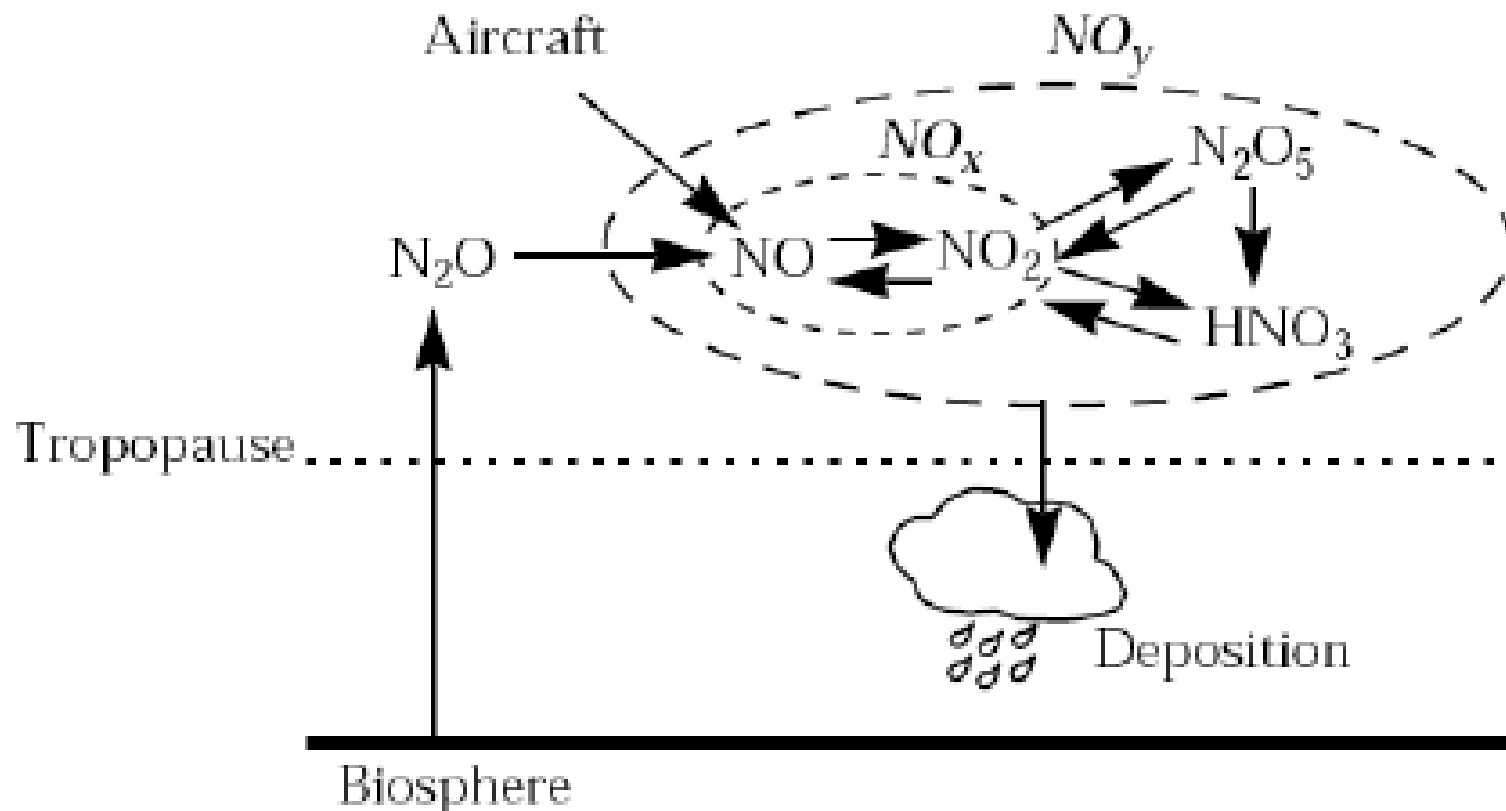
HNO₃ and N₂O₅ have longer lifetime than NO_x, and can eventually converted back to NO_x through photolysis. For this reason, they are called reservoir species for NO_x.

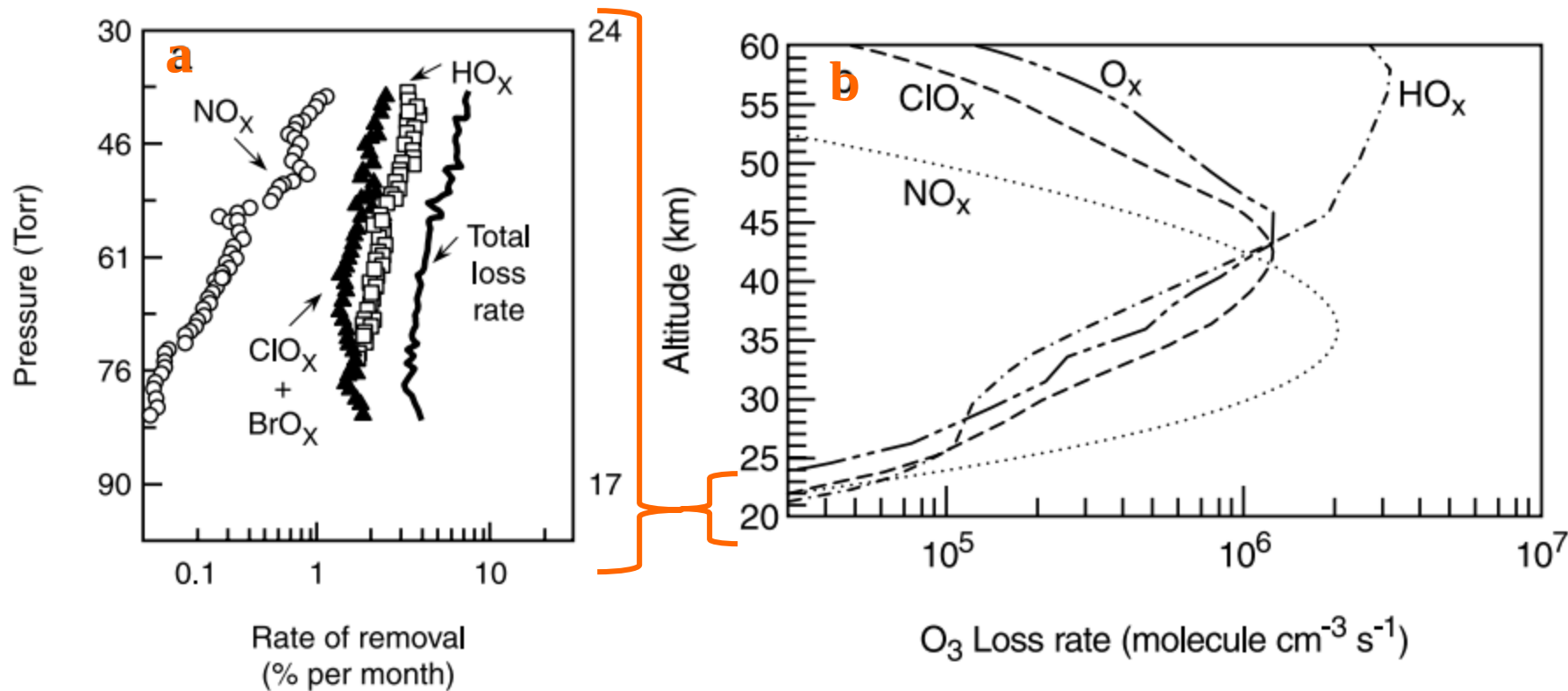
NO_y: NO_x + its reservoir species

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°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)

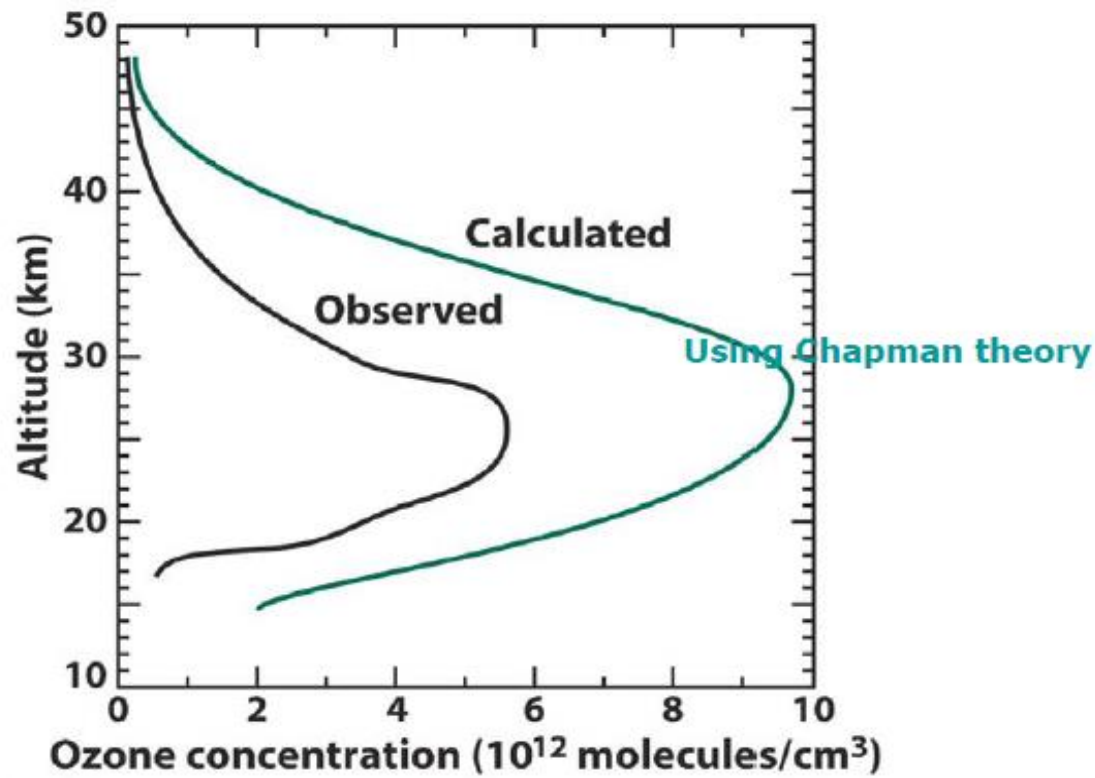


Paul J. Crutzen at the Max Planck Institute for Chemistry. © C. Costard/MPI for Chemistry

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.

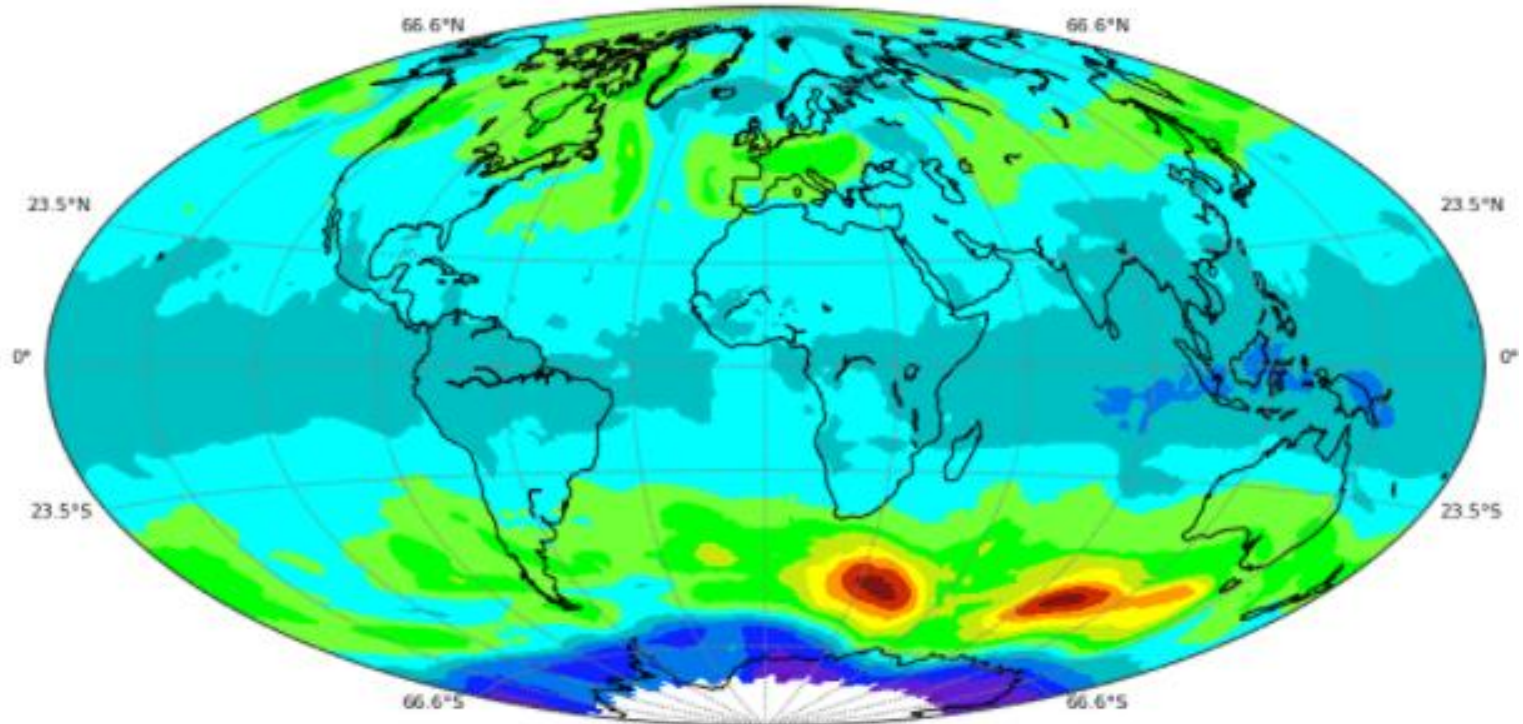
Portanto, a presença de outras espécies “naturais” (p. ex., H_2O , CH_4 , N_2O , CH_3Cl) que são ativas fotoquimicamente na estratosfera, explicam as diferenças observadas em relação ao modelo de Chapman para a camada de ozônio.



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



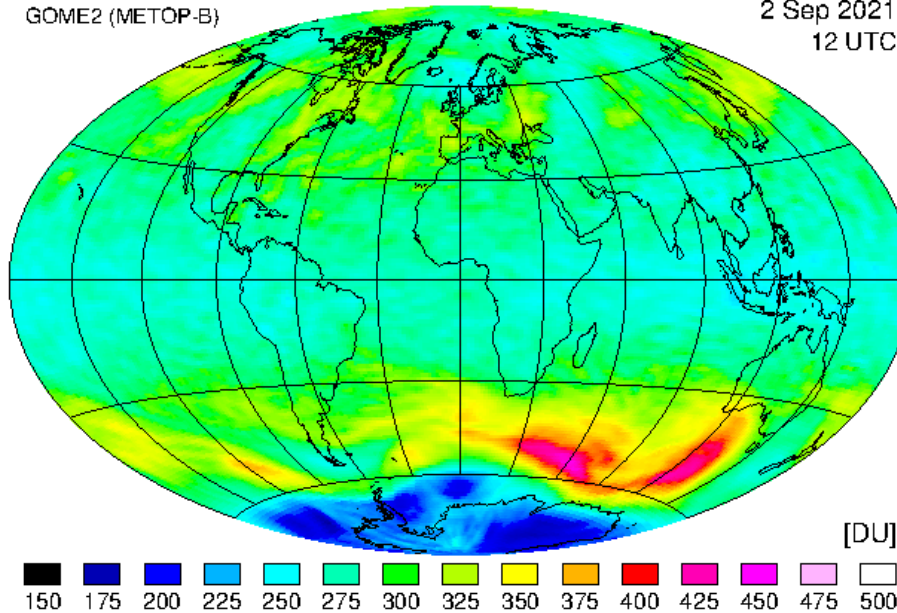
Suomi NPP_OMPS Nadir Mapper // Data Product = NMTO3-L3-DAILY // PGE = NMTO3-L3-DAILY-2.0.9 in AS61004 @ 2021-09-02 13:15Z

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

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

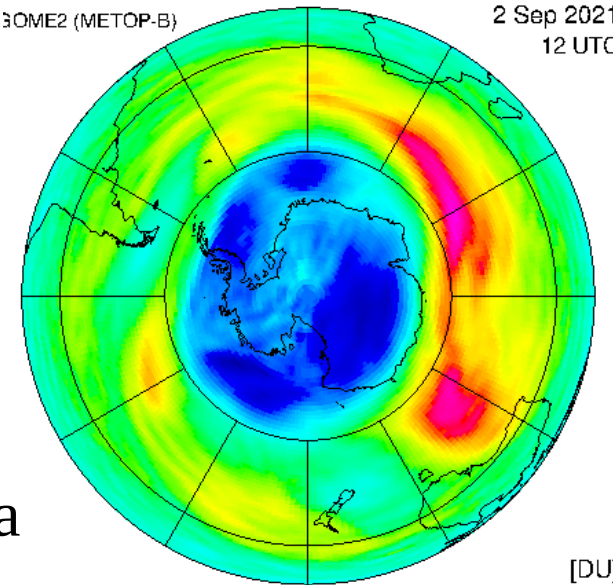
KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

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



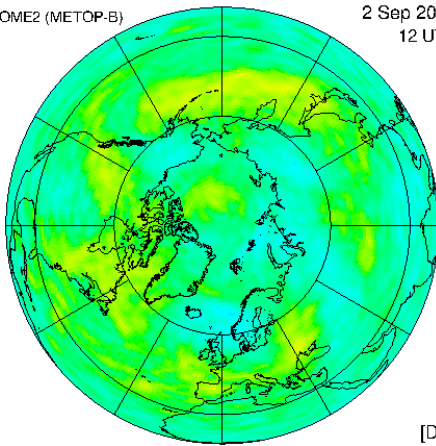
KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

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



KNMI / DLR / EUMETSAT
GOME2 (METOP-B)

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



Ártico

Antártica

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

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

<https://www.temis.nl/protocols/O3global.php>

Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update

Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018

Lead Author

Ross J. Salawitch

Coauthors

David W. Fahey

Michaela I. Hegglin

Laura A. McBride

Walter R. Tribett

Sarah J. Doherty

Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update

Scientific Assessment of
Ozone Depletion: 2018



<https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/downloads/twentyquestions.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

<https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/twentyquestions/>

Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update file is a component of the Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 report. The report is prepared quadrennially by the Scientific Assessment Panel (SAP) of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.