










## IX Encontro Sul Brasileiro de Meteorologia

# Análise da climatologia do ozônio troposférico em Santa Maria – RS a partir dos instrumentos OMI/MLS

Analysis of tropospheric ozone climatology in Santa Maria - RS from OMI/MLS instruments

Karen Leandra Ávila da Silva<sup>I</sup> , Damaris Kirsch Pinheiro<sup>I</sup> , Lucas Vaz Peres<sup>II</sup>   
Gabriela Dornelles Bittencourt<sup>I</sup> , Lucas da Rocha Silva<sup>II</sup> ,  
José Valentin Bageston<sup>III</sup> , Vagner Anabor<sup>I</sup> , Luiz Angelo Steffene<sup>IV</sup> ,  
Hassan Bencherif<sup>V</sup> , Maria Paulete Pereira Martins<sup>VI</sup> 

<sup>I</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>II</sup>Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil

<sup>III</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Maria, RS, Brasil

<sup>IV</sup>Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, França

<sup>V</sup>Université de La Reunion, Saint-Denis, La Reunion, França

<sup>VI</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

## RESUMO

O ozônio ( $O_3$ ) é um importante gás traço na atmosfera e um dos principais elementos da poluição na região troposférica. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento e as tendências da coluna de ozônio troposférico ( $O_{3trop}$ ) na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (29,42°S e 53,41°O) entre 2005 e 2020, utilizando dados dos instrumentos Ozone Monitoring Instrument (OMI) e Microwave Limb Sounder (MLS) a bordo do satélite AURA, aplicando a técnica do Tropospheric Ozone Residual (TOR). Os resultados revelaram um ciclo anual bem definido, com valores mínimos no inverno e máximos na primavera, além de uma tendência de aumento de 2,3% por década, altas concentrações de  $O_{3trop}$  ocorreram em períodos com ação do fenômeno La Niña. A análise wavelet destacou influências interanuais significativas, associadas a fenômenos como El Niño Oscilação Sul (ENSO) e a Oscilação Quase-Bienal (QBO).

**Palavras-chave:** Climatologia; Tendência; Ozônio Troposférico

## ABSTRACT

Ozone ( $O_3$ ) is an important trace gas in the atmosphere and one of the main elements of pollution in the tropospheric region. This work aims to analyze the behavior and trends of the tropospheric ozone column ( $O_{3trop}$ ) in the city of Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil (29.42°S and 53.41°W) between 2005

and 2020, using data from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and Microwave Limb Sounder (MLS) instruments on board the AURA satellite, applying the Tropospheric Ozone Residual (TOR) technique. The results revealed a well-defined annual cycle, with minimum values in winter and maximum values in spring, in addition to an increasing trend of 2.3% per decade; high  $O_{3\text{trop}}$  concentrations occurred in periods with the action of the La Niña phenomenon. Wavelet analysis highlighted significant interannual influences, associated with phenomena such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Quasi-Biennial Oscillation (QBO).

**Keywords:** Climatology; Trend; Tropospheric Ozone

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século vinte, a pesquisa sobre poluição atmosférica tornou-se um dos assuntos mais abordados no meio científico. A importância de compreender a composição atmosférica e suas interações com certos constituintes atmosféricos torna-se cada vez mais necessário para entender as mudanças climáticas globais. O ozônio ( $O_3$ ) é um importante gás traço na atmosfera e um dos principais elementos da poluição da coluna troposférica (Zhu *et al.*, 2022).

A troposfera é a região mais baixa da atmosfera, podendo se estender a uma altura de aproximadamente de 15 a 18 km, que é o limite superior da troposfera e o limite inferior da estratosfera (tropopausa), variando sua altura de acordo com a latitude. A coluna de ozônio troposférico ( $O_{3\text{trop}}$ ) é essencial para determinar a circulação química e o equilíbrio do ambiente atmosférico. Mudanças nas concentrações de ozônio afetam o balanço de radiação, influenciando assim no Clima (Zhu *et al.*, 2022).

Além disso, o ozônio troposférico, é um poluente fotoquímico secundário e danoso, devido aos seus efeitos nocivos à saúde humana, principalmente para as populações de risco, como idosos, crianças e pessoas com problemas respiratórios, também provoca dos efeitos na vegetação e danos materiais (Eea, 2020).

Segundo Gonçalves (2013), o ozônio é considerado um gás de efeito estufa e desempenha um papel crucial na química da atmosfera devido a sua reatividade e o seu fator oxidante, participando nos mecanismos de oxidação com vários poluentes atmosféricos. A molécula de  $O_3$  troposférico é produzida através de reações fotoquímicas

envolvendo precursores gerados por fontes naturais e, em maior parte, por atividade antrópica (Krupa *et al.*, 1988). A queima de biomassa é um dos principais contribuintes para a produção antrópica de ozônio troposférico e, conseqüentemente, para o aumento da poluição do ar, pois libera na atmosfera aerossóis e gases traços que impactam na composição atmosférica em escala global e local (Bégué *et al.*, 2021).

Normalmente, os estudos de poluição do ar em uma determinada região são baseados nos dados de medições de concentração de poluentes ao nível da superfície (estações de monitoramento fixas no solo). Entretanto, existem observações de satélite sobre a coluna total de ozônio e ozônio troposférico, oferecem a vantagem de quantificar o poluente em grandes áreas, permitindo análises em larga escala temporal e espacial (Gonçalves, 2013), Essas observações possibilitam expandir as pesquisas para regiões sem cobertura de estações de monitoramento em superfície, ampliando significativamente o alcance das análises.

Atualmente, existem vários instrumentos remotos, utilizados para a medição de ozônio troposférico, por exemplo, citamos o GOME - 2 (*Global Ozone Monitoring Experiment*), TOMS (*Total Ozone Mapping System*), MLS (*Microwave Limb Sounder*), OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*), MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*), IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) entre outros. Nos últimos anos, as pesquisas realizadas com o sensoriamento remoto vêm sendo aplicadas em estudos sobre poluentes atmosféricos.

Por exemplo, Bencherif *et al.* (2019), analisou vinte anos de dados durante os períodos de 1998 até 2017, com dados de medições de ozônio em superfície coletado do programa *Southern Hemisphere Additional Ozonesondes* (SHADOZ) e dados de satélites (TOMS, OMI, MLS) com o objetivo de avaliar a variabilidade e tendências nas colunas de ozônio troposférico e estratosférico sobre Irene, localizado na África do sul.

O autor Zhu *et al.* (2021) discutiu em seu artigo as mudanças na coluna total de ozônio e os fatores de influências na China, utilizando dados de sensoriamento remoto OMI nos últimos 15 anos, com o objetivo de controlar a poluição do ar e melhorar a

qualidade de vida dos habitantes. Casallas *et al.* (2023) analisou a concentração dos poluentes atmosféricos, para entender as variações de ozônio no norte da América do Sul (Colômbia), durante o período pré e pós lockdown, utilizando dados de reanálises e do satélite Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). Ziemke *et al.* (2019) revisou a tendência de ozônio troposférico desde 1970 até 2016, comparando dados de sensoriamento remoto, TOMS, OMI, MLS e Ozone Mapping Profiler Suite (OMPS), a fim de explicar os padrões de tendência regionais e sua evolução (aumento ou diminuição) durante esses anos.

Além disso, o Relatório de Avaliação do Ozônio Troposférico (TOAR) fornece análises de tendências no ozônio troposférico calculadas a partir de uma grande variedade de fontes de dados, incluindo satélites, aeronaves, ozônio sondas e medições de superfície (Gaudel *et al.*, 2018).

No contexto brasileiro, Souza (2019) empregou dados do sistema AIRS/AQUA para investigar a variabilidade espacial e temporal do monóxido de carbono (CO) e ozônio (O<sub>3</sub>) na Amazônia. Calderaro (2016), por sua vez, analisou a variabilidade temporal do perfil vertical de ozônio na região metropolitana de Manaus, correlacionando-a com índices de variabilidade climática, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Quase-Bienal (QBO), utilizando dados do satélite AQUA (2003-2014).

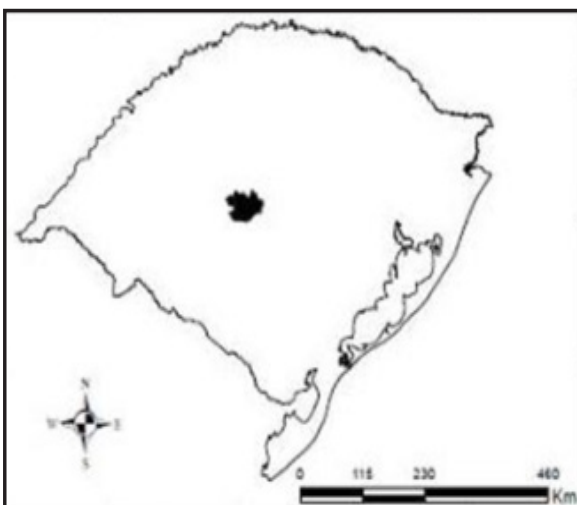
A técnica do Ozônio Troposférico Residual (TOR), foi introduzida por Fishman *et al.* (1990, 2003) e posteriormente aplicada por Chandra *et al.* (2003) e Ziemke (2006) com dados do OMI e MLS, essa técnica, é uma das metodologias existentes para a obtenção de dados de O<sub>3</sub> troposférico. Atualmente, existe uma falta de pesquisas que utilizem a técnica TOR para estudar o ozônio troposférico no Hemisfério Sul, principalmente no Brasil e também na região Sul do país. Nesse contexto, este trabalho se propõe a suprir essa lacuna, apresentando um estudo pioneiro que aplica a técnica TOR com dados dos instrumentos OMI e MLS a bordo do satélite Aura para com o intuito de investigar a climatologia do ozônio troposférico na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1. Área de estudo

Denominada como “coração de Rio Grande”, devido a sua posição geográfica, a cidade de Santa Maria (29,42°S e 53, 41°O) é um município localizado no estado do Rio Grande do Sul (RS), no sul do Brasil. Segundo o último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a cidade possui aproximadamente 285.159 habitantes e é considerada pólo universitário, a qual sedia três universidades e diversas faculdades, sendo a maior a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), tornando-se, assim, uma cidade de grande influência na região central do estado (figura 1).

Figura 1 – Localização da cidade de Santa Maria - RS



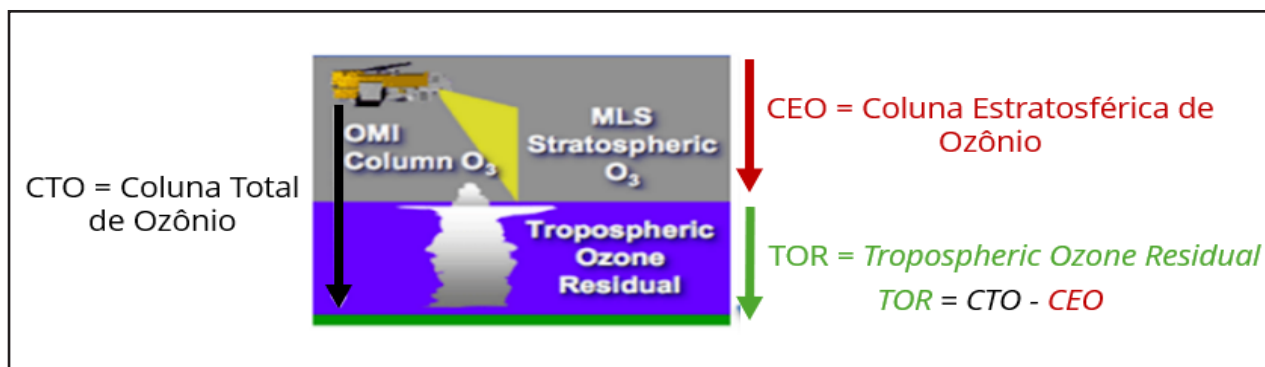
Fonte: Os autores (2023)

### 2.2 Metodologia de obtenção dos dados

Neste trabalho, utilizou-se a técnica do ozônio troposférico, conhecida como *Tropospheric Ozone Residual* (TOR), conforme ilustrado na Figura 2. Essa técnica consiste em calcular a coluna de ozônio troposférico ( $O_3$ trop) subtraindo a coluna total de ozônio (CTO) da coluna estratosférica de ozônio (CEO).

O conceito foi introduzido pela primeira vez por Fishman (1987), posteriormente ampliado por Ziemke *et al.* (1998) e Chandra *et al.* (2003), trabalharam com a combinação de dados dos instrumentos a bordo de satélites *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) e *Upper Atmosphere Research Satellite* (UARS) *Microwave Limb Sounder* (MLS) e por Fishman *et al.* (2003), o qual usou a combinação de dados do TOMS e *Solar Backscatter Ultraviolet* (SBUV). No presente artigo, a metodologia TOR foi implementada através dos campos CTO e CEO do satélite Aura, do qual a coluna total de ozônio (CTO) é medida pelo instrumento *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) (Levelt *et al.*, 2006), e a coluna estratosférica de ozônio (CEO) é medida pelo instrumento *Microwave Limb Sounder* (MLS) (Walter *et al.*, 2006).

Figura 2 – Representação esquemática do método TOR, usado para obter a coluna de ozônio troposférico



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2013)

A utilização do instrumento MLS, a bordo do satélite AURA, é uma melhoria significativa (Ziemke, 2006), pois resolve alguns dos problemas associados ao uso do SBUV e UARS outro ponto importante são as medições globais do ozônio total e da coluna estratosférica desde o lançamento do AURA em 15 de julho de 2004. Isso permitiu medições globais da coluna de ozônio troposférico (O<sub>3</sub>trop), concomitante com as colunas totais (CTO) e estratosférica (CEO), quase diariamente desde o final de agosto de 2004 até o presente.

O MLS e OMI são dois de um total de quatro instrumentos a bordo do satélite Aura, o qual encontra-se em uma órbita polar síncrona a 705 km de altitude com uma inclinação de 98,2°. A espaçonave tem um tempo de travessia equatorial de 13h45min com cerca de 98 min por órbita (uma média de 14,6 órbitas por dia).

O instrumento MLS mede perfis verticais de temperatura da mesosfera, estratosfera e troposfera superior, ozônio e outros constituintes atmosféricos. As medições do MLS são realizadas 7 minutos antes de que o OMI faça uma varredura do mesmo local (órbitas diurnas).

O instrumento OMI mede a coluna total de ozônio com cobertura global sobre a Terra com uma resolução de 13 km x 24 km (varredura nadir). Além do O<sub>3</sub>, o OMI também mede aerossóis, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e outros constituintes presentes na estratosfera e troposfera. Uma descrição mais detalhada sobre estes instrumentos e sobre a metodologia TOR pode ser obtida no artigo de Ziemke *et al.* (2006).

### 2.3 Metodologia de análise dos dados

Os dados climatológicos do ozônio da coluna troposférica (em unidades Dobson), foram obtidos no site *Goddard Earth Science Data and Information Service Center* (GES DISC), da *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa, 2022) e abrangem um período entre 01 de janeiro de 2005 até 31 de dezembro de 2020, totalizando em 15 anos dados. Para melhor compreensão dos dados, calculou-se os parâmetros estatísticos listados abaixo, os quais foram baseados nas teorias do livro Wilks (2006):

Média: é calculada pela soma de todos os elementos do conjunto (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>... X<sub>n</sub>), dividida pela quantidade de elementos do conjunto (n).

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X \quad (1)$$

Desvio-padrão: é uma medida de dispersão do conjunto, ou seja, uma medida que indica quão uniformes são os dados do conjunto. O desvio-padrão demonstra a

distância dos valores em relação à média do conjunto, quanto mais próximo de zero for o desvio-padrão, menor será a dispersão do conjunto de dados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi - \bar{x}} \quad (2)$$

De acordo com as equações descritas acima, média (equação 1) e desvio padrão (equação 2), foram calculadas as médias climatológicas e seus respectivos desvios padrões, a fim de compreender o comportamento da série temporal para a cidade de Santa Maria.

A partir dessas análises, foi possível gerar uma climatologia representativa, usando o Diagrama de Tukey (boxplot). Este é um gráfico onde a mediana representa uma barra representada por Q2 (segundo quartil), dentro da caixa, com o primeiro quartil Q1 abaixo dela, o menor valor representado pelos 25 %, e a parte superior indica que Q3 (terceiro quartil) tem o maior valor de 75 %. As hastes representam valores que ficam entre a caixa e o limite, conforme definido pelas especificações das equações 3 apresentadas abaixo Wilks (2006):

$$\begin{aligned} X_1 &= Q_{0,75} + 3 * IQR \\ X_2 &= Q_{0,75} + 1,5 * IQR \\ X_3 &= Q_{0,25} - 1,5 * IQR \\ X_4 &= Q_{0,25} - 3 * IQR \end{aligned} \quad (3)$$

Onde "IQR" representa o intervalo interquartil e os pontos fora destes limites são considerados valores discrepantes (*outlier*)

Outra metodologia abordada nesta pesquisa foi a técnica da regressão linear (equação 4), baseada no método dos mínimos quadrados, onde as análises das tendências climáticas são verificadas para ver se houve um aumento ou diminuição dos valores médios ao longo do período analisado (Roncato, 2002). Esta técnica consiste no ajuste de uma reta a estes conjuntos de pontos, buscando minimizar a soma dos

quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores correspondentes na reta de tendência determinada pela equação 4 (Bieras, 2006).

$$Y(t) = a + b.t \quad (4)$$

Onde:

Y é o valor estimado da observação, dependente do tempo t

a é o coeficiente angular, ou tendência linear ( $\Delta y/\Delta t$ )

b é o intercepto (valor de y quando a reta ajustada cruza o eixo das ordenadas, em t=0)

t é o contador temporal de cada observação

### 2.3.1 O método de wavelet

A identificação das principais variabilidades climáticas que se destacam durante o período de dados (2005-2020) foi através da análise das transformadas de wavelets. As wavelets identificam as periodicidades que mais se destacam na série de dados temporais, neste caso a coluna troposférica de O3 em Santa Maria, juntamente com sua evolução (Torrence e Compo, 1998; Rigozo *et al.*, 2012). Neste trabalho, foi utilizada a wavelet transformada de Morlet que consiste em uma onda plana modulada por uma função Gaussiana, representada por:

$$\Psi_0(\eta) = \frac{1}{4} \exp(i\omega_0 \eta) \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right) \quad (5)$$

$\omega_0$  é a frequência adimensional e  $\eta$  é o parâmetro tempo não dimensional. Considerando a série temporal discreta ( $X_n$ ), com um espaçamento de tempo fixo ( $\Delta t$ ) e  $n = 0, \dots, N-1$ , a transformada wavelet contínua está na Equação:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \Psi^* \left[ \frac{(n'-n)\Delta t}{s} \right] \quad (6)$$

O  $\Psi^*$  é o complexo conjugado e  $s$  é o período (escala wavelet). A Equação do espectro wavelet global (6) permite calcular a estimativa imparcial do espectro de potência real da série temporal, calculando o espectro wavelet médio ao longo de um período.

Observe que o espectro de potência é o quadrado da amplitude da transformada wavelet  $(W_n(f))^2$ . Assim, o espectro wavelet global é encontrado calculando a média do espectro de potência da transformada wavelet em escala temporal. É assim expresso:

$$W^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)| \quad (7)$$

A wavelet é composta pelo espectro de potência, onde os efeitos na borda dessa curva em “U” chamada de cone de influência, são desprezados e dentro dela existe um nível de confiança de 95% mostrando os valores mais significativos da série de dados analisada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa, investigando a dinâmica temporal do ozônio troposférico ( $O_3$  trop) em Santa Maria – RS, ao longo de um período de 15 anos (2005-2020). A análise compreende a aplicação de regressão linear para identificar tendências, a avaliação da evolução mensal e anual do  $O_3$  trop, e a investigação das influências anuais e interanuais sobre suas concentrações de ozônio.

A figura 3 ilustra a evolução espaço temporal do  $O_3$  trop por meio do diagrama de Hovmöller, onde o eixo vertical representa a escala temporal anual e o eixo horizontal, a variação sazonal ao longo dos meses. Observa-se um padrão sazonal, caracterizado por valores mínimos entre abril e julho (outono-inverno), associadas à menor incidência de radiação solar em latitudes médias, e máximas entre setembro e dezembro (primavera-verão), coincidentes com o período de maior intensidade da radiação solar no hemisfério sul e, conseqüentemente, aumento da produção fotoquímica de ozônio troposférico (Pinheiro e Peres, 2017).

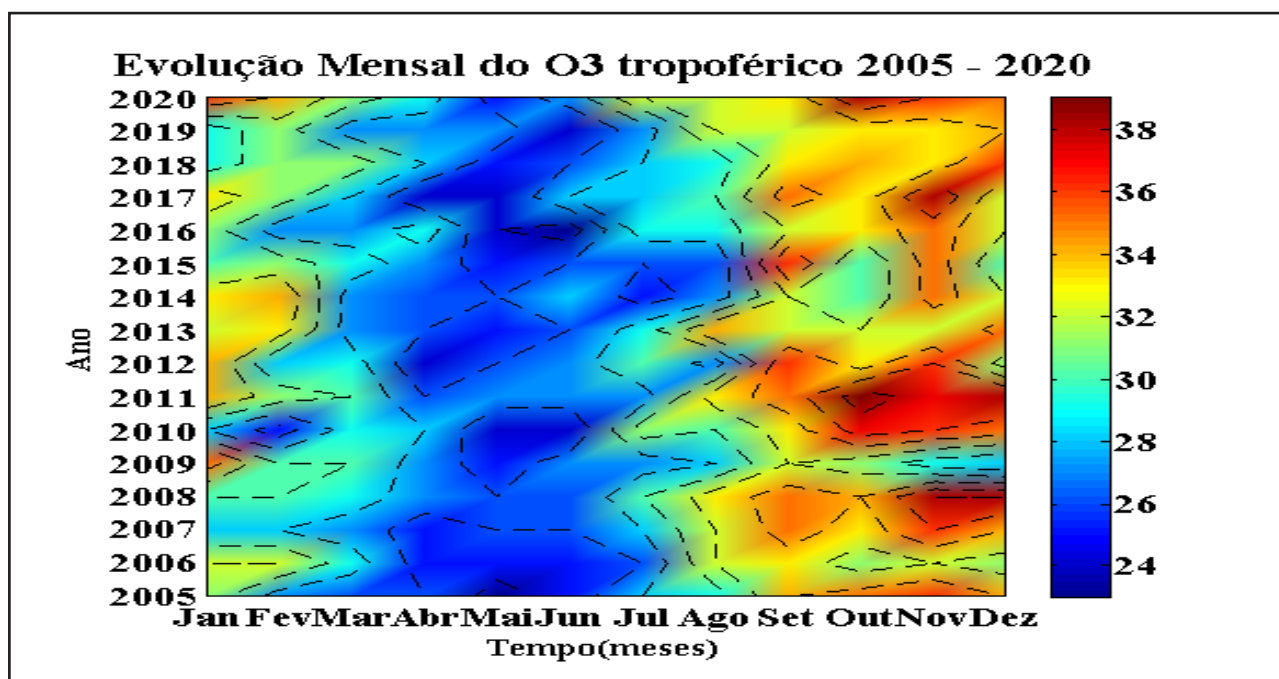
É importante salientar que nos anos de 2008, 2009, 2011, 2012 e 2018 (destacados em vermelho na figura 3), apresentaram altas concentrações de  $O_3$  trop. Sugere-se que tais picos possam estar relacionados à influência do fenômeno La Niña (Noaa,

2023). Estudos anteriores mostraram que a La Niña provoca alterações atmosféricas em escalas local e global (Rossato, 2011 ; Boening, 2012 ; Ferreira, 2014), incluindo a redução da precipitação na região sul do Brasil.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), a precipitação na cidade de Santa Maria - RS é distribuída mensalmente, com pouca variação anual, sendo janeiro o mês com maior volume de chuva, em torno de 160 milímetros e novembro o menos chuvoso, com 120 milímetros, mesmo que a precipitação na cidade seja bem distribuída durante o ano, propicia a formação do  $O_3$  tropo, inclusive em anos de La niña.

A análise da evolução temporal da série mensal do ozônio troposférico, ilustrada nas Figuras 3 e 4, permite a compreensão da variabilidade desse constituinte atmosférico em Santa Maria - RS ao longo do período de 2005 a 2020.

Figura 3 – Diagrama de Hovmöller apresentando a evolução anual e mensal da coluna de ozônio troposférico (em Unidades Dobson) entre os anos de 2005 a 2020, obtido a partir dos instrumentos OMI e MLS a bordo do satélite AURA para o município de Santa Maria - RS

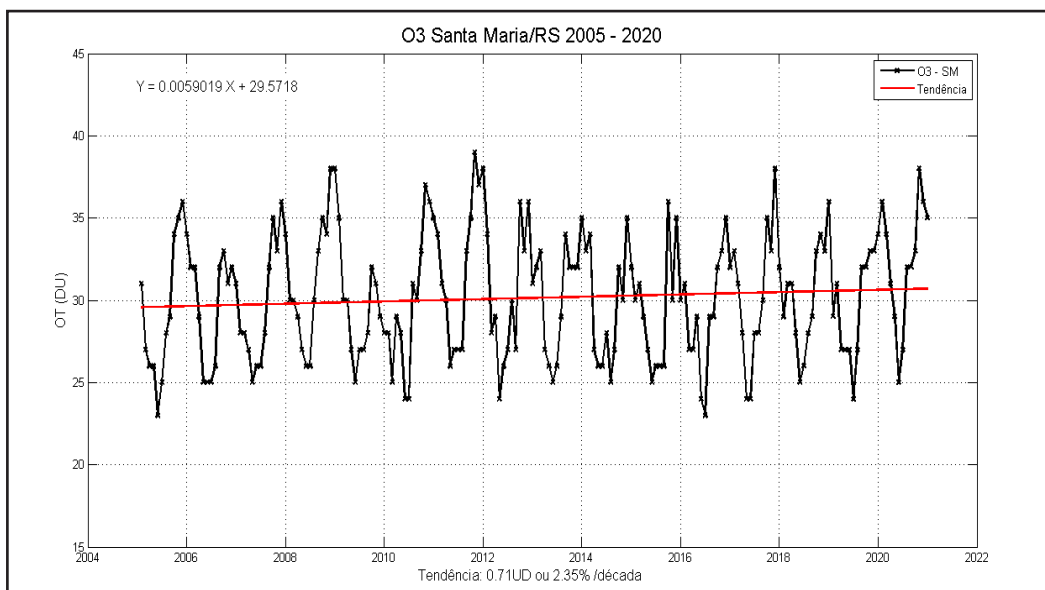


Fonte: Autores (2023)

A figura 4, observa-se mais claramente o ciclo anual bem definido, no qual os valores oscilam entre mínimos e máximos ao longo de cada ano. Além disso, a análise da tendência por modelo de regressão linear (linha vermelha) apresentou um coeficiente angular de inclinação positiva e um aumento de 0,71 UD ou 2,3% por década, durante esses 15 anos (2005 até 2020).

Esses resultados demonstram concordância com estudos anteriores, Mulumba *et al.* (2015), ao investigarem a climatologia do ozônio troposférico sobre Irene (África do Sul), também observaram uma tendência crescente, com aumento na coluna troposférica de ozônio durante a primavera e verão. Bencherif *et al.* (2020) corroboram essa tendência, reportando um aumento de O<sub>3</sub> na coluna troposférica de +2,37% e +3,6% por década em Irene, com base em dados de 1990 a 2017. A inclinação positiva observada em Santa Maria alinha-se com a tendência global de aumento do O<sub>3</sub> trop reportada em outras regiões (Ziemke *et al.*, 2019; Thompson *et al.*, 2014).

Figura 4 – Série de dados da coluna de ozônio troposférico entre os anos de 2005 e 2020 a partir dos instrumentos OMI e MLS do satélite AURA para o município de Santa Maria – RS. Na linha vermelha é apresentada a tendência linear de aumento do O<sub>3</sub> trop



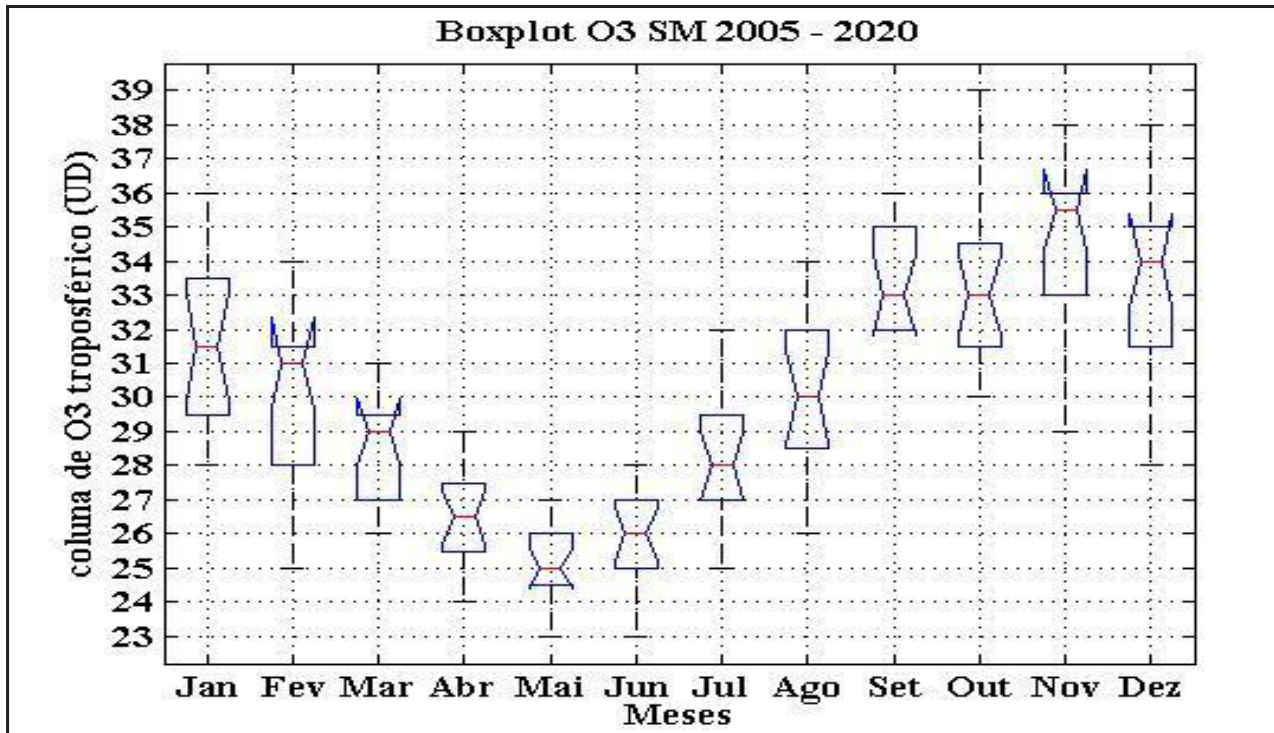
Fonte: Autores (2023)

Essa elevação nas concentrações de ozônio troposférico é associada a uma complexa interação entre mudanças climáticas e atividades antropogênicas, incluindo o manejo da terra, queimadas, alterações nos recursos hídricos e emissões de poluentes atmosféricos por fontes industriais e veiculares (IPCC, 2021). É crucial ressaltar que a complexidade dos processos envolvidos exige investigações mais aprofundadas para quantificar as contribuições relativas de cada fator na região de estudo.

Na Figura 5, é apresentada a variabilidade climatológica do ozônio troposférico ( $O_3$  trop) na cidade de Santa Maria - RS, por meio de diagramas de Tukey (boxplots). Observa-se o predomínio de uma variabilidade sazonal marcada pelo ciclo anual, com os valores mínimos ocorrendo em maio, aproximadamente 23 DU, e os máximos registrados em novembro, em torno de 39 DU. Esse comportamento sazonal, com variações entre as estações do outono, inverno, primavera e verão, é consistente com resultados encontrados em estudos anteriores, que apontaram valores mínimos de  $O_3$  trop durante o inverno e máximos no verão devido ao transporte associado à circulação de Brewer-Dobson (Peres, 2016; Bittencourt, 2022).

Esse aumento no ozônio nos períodos da primavera e do verão também pode estar relacionado a altas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, oriundas de fontes industriais e urbanas (Bencherif *et al.*, 2020; Mulumba *et al.*, 2015). Além disso, altas concentrações de ozônio na troposfera durante a primavera podem estar relacionadas às queimadas naturais ou antropogênicas, tanto de fontes locais quanto de regiões vizinhas, como o centro e norte do Brasil, Bolívia, Paraguai e norte da Argentina. Estudos mostraram que a grande maioria da queima de biomassa na América do Sul acontece durante os meses de julho a novembro (Bencherif *et al.*, 2020; Bégué *et al.*, 2021).

Figura 5 – Climatologia da coluna de ozônio troposférico, em unidades Dobson, para a cidade de Santa Maria — RS, a partir dos instrumentos OMI e MLS do Satélite Aura entre 2005 e 2020



Fonte: Autores (2023)

A análise da Figura 6, com base na técnica de wavelet, evidencia influências anuais e interanuais nas anomalias de ozônio troposférico ( $O_3$  trop), destacando periodicidades de 16, 32 e 64 meses. Para facilitar a identificação de variações que poderiam ser mascaradas pelo forte padrão sazonal, o ciclo anual foi previamente removido. Os intervalos temporais detectados indicam, predominantemente, interações entre o  $O_3$  trop e os fenômenos El Niño Oscilação Sul (ENSO) e Oscilação Quase-Bienal (QBO).

Conforme demonstrado por Oman *et al.* (2013), o ENSO exerce uma influência significativa na variabilidade do  $O_3$  trop, afetando os padrões de circulação na troposfera tropical e nas latitudes médias. Essas alterações estão associadas ao deslocamento das células de Walker e Hadley, o que impacta diretamente a distribuição de gases

traços, como o  $O_3$  trop. De maneira semelhante, Ziemke *et al.* (2019) destacaram a relevância do ENSO e da QBO na química da troposfera, apontando implicações em escalas regionais e globais.

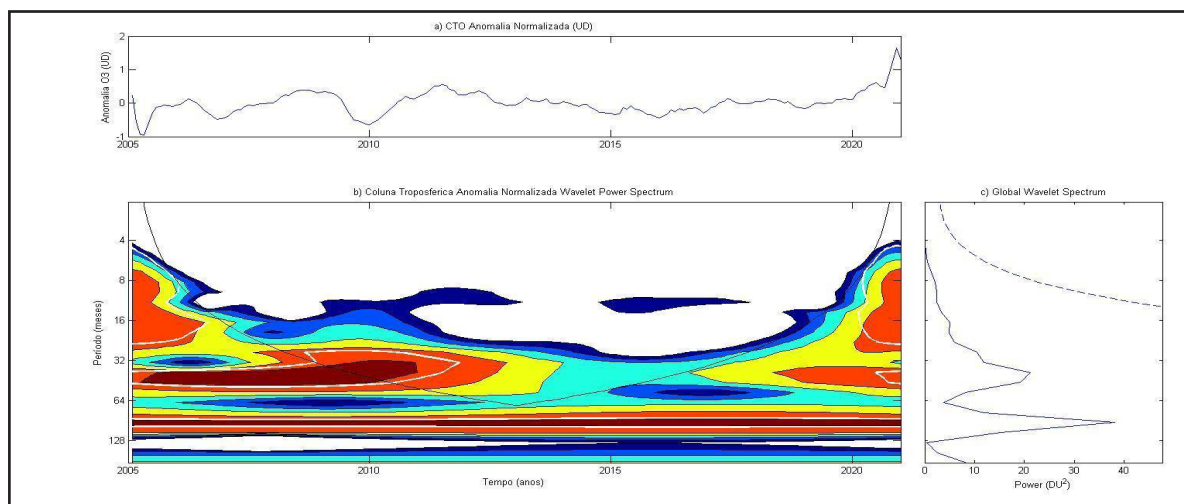
Além disso, estudos como os de Ziemke *et al.* (2010) reforçam que o ENSO influencia a coluna troposférica de ozônio por meio de interações complexas entre o oceano e a atmosfera, com periodicidades de 3 a 7 anos. A QBO também desempenha um papel relevante ao influenciar a circulação estratosfera-troposfera, modificando a dinâmica vertical e o transporte de ozônio entre essas camadas atmosféricas (Baldwin *et al.*, 2001).

Resultados semelhantes foram encontrados por Bencherif *et al.* (2020), que utilizaram a técnica de wavelet para analisar a variabilidade do  $O_3$  trop e identificaram a influência da forçante ENSO na baixa troposfera, em função da interação oceano-atmosfera. Em âmbito regional, Bittencourt (2022) demonstrou a relação da variabilidade do ENSO com o  $O_3$  trop em Santa Maria, ressaltando que o impacto do ENSO afeta diretamente a circulação troposférica e a ressurgência tropical, promovendo mudanças significativas na distribuição do ozônio (Oman *et al.*, 2013).

Embora o ciclo solar esteja fora do nível de confiança de 95% na análise da Figura 6, os resultados sugerem uma possível influência desse fenômeno no período analisado (128 meses). Pesquisas anteriores já demonstraram a relação entre o fluxo solar e o ozônio estratosférico (Bittencourt, 2022; Bencherif, 2020; Peres, 2016), com implicações indiretas para a troposfera por meio do mecanismo de transporte de energia de cima para baixo, conhecido como mecanismo *top-down* (Gray *et al.*, 2010).

No entanto, para confirmar a influência do ciclo solar na variabilidade da coluna de  $O_3$  trop, seria necessário ampliar o período de análise de dados para mais anos, uma vez que 15 anos não seriam suficientes para entender a dinâmica desse ciclo. Ainda assim, os resultados prévios apresentaram evidências positivas, reafirmando a importância das interações climáticas interanuais, como ENSO e QBO, na dinâmica do ozônio troposférico em regiões de latitudes médias.

Figura 6 – (a) Série mensal das anomalias da coluna de ozônio troposférico obtida através dos instrumentos OMI e MLS usada para análise de wavelets sobre Santa Maria – RS, entre 2005 e 2020. (b) Espectro de potência, normalizado por  $1 / \sigma^2$ . (c) espectro global de wavelet onde a linha tracejada é a confiança de 95%



Fonte: Autores(2023)

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma análise abrangente da climatologia e variabilidade do ozônio troposférico ( $O_3$  trop) na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, durante o período de 2005 a 2020. Utilizando a técnica do Tropospheric Ozone Residual (TOR) com dados dos instrumentos OMI e MLS a bordo do satélite Aura, foi possível identificar padrões sazonais e tendências temporais que evidenciam a dinâmica do  $O_3$  trop na região.

Os resultados mostraram que as maiores concentrações ocorreram na primavera, no mês de novembro, com o valor médio de 35 UD, e os menores valores foram registrados, no mês de maio, durante o inverno, com valor de 23 UD, mostrando que o ozônio na troposfera varia sazonalmente, devido a incidência da radiação solar e influências da dinâmica da atmosfera.

Além disso, a análise de tendência apresentou um aumento gradual na coluna de ozônio troposférico, mostrando que os níveis tendem a se elevar, aproximadamente, 2,3 % durante o período de 2005 até 2020, indicando que a cidade de Santa Maria sofre influências de ciclos de poluição e queimadas de fontes locais ou de fontes oriundas de outras localidades, que chegam no município através do transporte atmosférico. A análise wavelet destacou a influência de fenômenos climáticos interanuais, como o ENSO e a QBO, na variabilidade do  $O_3$  trop. Embora o ciclo solar tenha apresentado sinais de influência, os dados disponíveis não foram suficientes para uma análise conclusiva, apontando para a necessidade de períodos de observação mais longos para tal afirmação.

Este estudo apresenta as primeiras análises realizadas na tese, representa um avanço pioneiro no uso da técnica TOR no contexto brasileiro, especialmente em uma região de médias latitudes onde estudos sobre o  $O_3$  trop são escassos. Os resultados deste artigo, contribuem significativamente no meio científico, estabelecendo uma base metodológica para futuras pesquisas sobre  $O_3$  trop em outras regiões do Brasil e da América do Sul.

## REFERÊNCIAS

BÉGUE, N. BENCHERIF, H.; JÉGOU, F. VÉREMES, H. KHAIKIN, S.; KRYSZTOFIK, G.; PORTAFAIX, T.; DUFLOT, V.; BARON, A.; BERTHET, G. (2021) Transport and Variability of Tropospheric Ozone over Oceania and Southern Pacific during the 2019–2020 Australian Bushfires. **Remote Sens.** 13, 3092. <https://doi.org/10.3390/rs13163092>

BENCHERIF, H.; BÉGUE, N.; PINHEIRO, D.; DU PREEZ, D.J.; CADET, J.M.; DA SILVA LOPES, F.J.; CLERBAUX, C. (2020) Investigating the Long-Range Transport of Aerosol Plumes Following the Amazon Fires (August 2019): A Multi-Instrumental Approach from Ground-Based and Satellite Observations. **Remote Sens.**, 12, 3846. doi:10.3390/rs12223846.

BITTENCOURT, G. D. **Influence of the Antarctic Ozone Hole and Atmospheric Dynamics on Ozone in Southern Brazil.** 2022. 287f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, centro de ciências exatas, 2022.

BOENING, C., J. K. WILLIS, F. W. LANDERER, R. S. NEREM, and J. FASULLO (2012), The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell, **Geophys. Res. Lett.**, 39, L19602, doi:10.1029/2012GL053055.

BIERAS, A. R. **Variabilidade e tendência climática e a produtividade da soja no estado de São Paulo**. 2006. 201 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/104322>.

CALDERARO, G. L. **Variabilidade do perfil vertical de ozônio sobre a região metropolitana de Manaus: uma abordagem por satélite**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, Amazonas, 2016.

CASALLAS, A., CASTILLO-CAMACHO, M.P., SANCHEZ, E.R. *et al.* Surface, satellite ozone variations in Northern South America during low antropogenic emission conditions: a machine learning approach. **Air Qual Atmos Health** 16, 745–764 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01303-6>

CHANDRA, S., J. R. ZIEMKE, MARTIN, R. V. (2003), Tropospheric ozone at tropical and middle latitudes derived from TOMS/MLS residual: Comparison with a global model, **J. Geophys. Res.**, 108(D9), 4291,doi:10.1029/2002JD002912.

CHEN, D.M.; FENG, Y.; ZHANG, X.Y. (2017) Comparison of variability and change rate in tropospheric NO<sub>2</sub> column obtained from satellite products across China during 1997–2015. **Int. J. Digit. Earth**, 10, 814–828.

EEA - European Environment Agency. The European environment — state and outlook 2020 Knowledge for transition to a sustainable Europe. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020>. Acesso em: 21 fev. 2023

FERREIRA, M. G. **Análise da Variabilidade da Precipitação e da Estiagem no Município de Erechim e Região Norte do Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

FISHMAN, J., WOZNIAK, A.E, CREILSON J. K. (2003), Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification Of the regional aspects of air pollution, **Atmos. Chem. Phys.**, 3, 893–907.

GAUDEL, A., COOPER, O. R., ANCELLET, G., BARRET, B., BOYNARD, A., BURROWS, J, P., *et al.* 2018. Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation. **Elem Sci Anth**, 6: 39. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.291>

GONÇALVES, A. M. F. **Avaliação do ozono troposférico em Portugal - Análise integradora**. 2013. 90p. (Dissertação de mestrado) - Universidade de Aveiro - Aveiro.

GRAY, L. J., BEER, J., GELLER, M., HAIGH, J. D., LOCKWOOD, M., MATTHES, K., CUBASCH, U., FLEITMANN, D., HARRISON, G., HOOD, L., LUTERBACHER, J., MEEHL, G. A., SHINDELL, D., VAN GEEL, B., WHITE, W.: Solar influence on climate, **Rev. Geophys.**, 48, RG4001, <https://doi.org/10.1029/2009RG000282>, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística . Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/santa-maria.html?>. Acesso em: 04 mai 2023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <http://inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 06 dez. 2022.

KRUPA, S.V.; MANNING, W.J. (1988) Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation. **Environ. Pollut.**, 50, 101–137.

LEVELT, P. F., *et al.* (2006), The Ozone Monitoring Instrument, IEEE Trans. **Geophys. Remote Sens.**, 44(5), 1093 – 1101.

MULUMBA, J.-P. VENKATARAMAN, S.; THOMAS, J.O. Modeling Tropospheric Ozone Climatology over Irene (South Africa) Using Retrieved Remote Sensing and Ground-Based Measurement Data. **J. Remote Sens. GIS** 2015, 4, 151

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Tropospheric Ozone data from AURA OMI/MLS. Disponível em: ([https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/cloud\\_slice/new\\_data.html](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/cloud_slice/new_data.html)). Acesso em: 15 dez. 2022.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Southern Oscillation (ENSO). Disponível: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.ph](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.ph). Acesso em: 15 abr 2023.

OLSEN, M. A., WARGAN, K., PAWSONP, S. (2016): Tropospheric column ozone response to ENSO in GEOS-5 assimilation of OMI and MLS ozone data, **Atmos. Chem. Phys.**, 16, 7091–7103, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7091-2016>.

OMAN, L. D., A. R. DOUGLASS, J. R. ZIEMKE, J. M. RODRIGUEZ, D. W. WAUGH, AND J. E. NIELSEN (2013) The ozone response to ENSO in Aura satellite measurements and a chemistry-climate simulation, **J. Geophys. Res.**, 118, 965–976.

PERES, V. L. **Monitoramento da Coluna Total de Ozônio e as Ocorrências de Eventos de Influência do Bruaco de Ozônio Antártico sobre o sul do Brasil**. 2016. 246f. Tese(Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, centro de ciências exatas, 2016.

PINHEIRO, D. K.; PERES, LUCAS VAZ . **A Camada de Ozônio**. In: Silvio Crestana; Elisabete Gabriela Castellano; Alexandre Rossi. (Org.). Direito Ambiental - Volume 3 - Bens e Recursos Ambientais e o Direito Ambiental. 1 ed. Brasília: EMBRAPA, 2017, v. 3, p. 457-484.

ROGERSON, P.A. (2012) **Métodos estatísticos para Geografia: um guia para o estudante**. 3ed. Porto Alegre-RS: Bookman, 2012.

RONCATO, R. A. (2002) **Variabilidade e tendência climática na região de Campinas (SP) e sua relação com o uso do solo. Rio Claro. 2002**. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP.

ROSSATO, M. S. **Os Climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, Tendências e Tipologia**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2011.

SOUZA, L. **Variabilidade espaço-temporal das concentrações de ozônio e monóxido de carbono durante anos extremos de secas na Amazônia**. 2019. 45 f. Dissertação (Mestrado em clima e ambiente) – Universidade do estado do Amazonas, Manaus, Amazonas, 2019.

TOMPSON, A.M.; BALASHOV, N.V. WITTE, J.C. THOURET, V.; Posny, F. Tropospheric ozone increases over the southern Africa region: Bellwether for rapid growth in Southern Hemisphere pollution? **Atmos. Chem. Phys.** 2014, 14, 9855–9869.

TORRENCE, C.; COMPO, G.P. **A Practical Guide to Wavelet Analysis.** Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998, 79, 61–78.

WALTER, J. W., FROUDVAUX, L., HARWOOD, R., JARNOT, R., PICKETT, H., READ, W., *et al.* (2006), The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite, **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, 44(5), 1075 – 1092.

ZIEMKE, JR, CHANDRA, S, BHARTIA, PK. (1998) Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: Assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques. **J. Geophys. Res.** 103(D17): 22115–22128. DOI: <https://doi.org/10.1029/98JD01567>

ZIEMKE, J. R., S. CHANDRA, B. N. DUNCAN, L. FROIDEVAUX, P. K. BHARTIA, P. F. LEVELT, AND J. W. WATERS (2006), Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative’s Chemical Transport Model, **J. Geophys. Res.**, 111, D19303, doi:10.1029/2006JD007089.

ZHU, L.; LIU, M.; SONG, J. Spatiotemporal Variations and Influent Factors of Tropospheric Ozone Concentration over China Based on OMI Data. **Atmosphere** 2022,13, 253. <https://doi.org/10.3390/atmos13020253>

## Contribuição de Autoria

### 1 – Karen Leandra Ávila da Silva

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia/Universidade Federal de Santa Maria, Mestre em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0003-0918-3387> • e-mail: [silva.karen@acad.ufsm.br](mailto:silva.karen@acad.ufsm.br)

Contribuição: Escrita do texto, Redução e Análise dos dados

### 2 – Damaris Kirsch Pinheiro

Departamento de Engenharia Química/Universidade Federal de Santa Maria, Doutora em Geofísica Espacial

<https://orcid.org/0000-0001-6939-7091> • e-mail: [damaris@ufsm.br](mailto:damaris@ufsm.br)

Contribuição: Escrita e revisão do texto, Análise dos dados, Coordenadora de projeto, Obtenção de apoio financeiro

### 3 – Lucas Vaz Peres

Universidade Federal do Oeste do Pará, Doutor em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0002-5612-5991> • e-mail: [lucas.peres@ufopa.edu.br](mailto:lucas.peres@ufopa.edu.br)

Contribuição: Escrita e revisão do texto, Redução e Análise dos dados

#### **4 – Gabriela Dornelles Bittencourt**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Doutora em Meteorologia  
<https://orcid.org/0000-0002-4572-119X> • e-mail: [gadornellesbittencourt@gmail.com](mailto:gadornellesbittencourt@gmail.com)  
Contribuição: Escrita e revisão do texto, Redução e Análise dos dados

#### **5 – Lucas da Rocha Silva**

Universidade Federal do Oeste do Pará, Graduando em Meteorologia  
<https://orcid.org/0009-0005-9888> • e-mail: [lukasrocha2205@gmail.com](mailto:lukasrocha2205@gmail.com)  
Contribuição: Escrita do texto, Redução dos dados

#### **6 – José Valentin Bageston**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Doutor em Geofísica Espacial  
<https://orcid.org/0000-0003-2931-8488> • e-mail: [jose.bageston@inpe.br](mailto:jose.bageston@inpe.br)  
Contribuição: Revisão do texto, Análise dos dados

#### **7 – Vagner Anabor**

Departamento de Física/Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Física  
<https://orcid.org/0000-0002-7301-2075> • e-mail: [vanabor@ufsm.br](mailto:vanabor@ufsm.br)  
Contribuição: Revisão do texto, Análise de dados, Coordenador de projeto, Obtenção de apoio financeiro

#### **8 – Luiz Angelo Steffemel**

LICIIS - Laboratoire d'Informatique en Calcul Intensif et Image pour la Simulation/ Université de Reims Champagne-Ardenne, Ph.D. in Computer Sciences  
<https://orcid.org/0000-0003-3670-4088> - e-mail: [luiz-angelo.steffemel@univ-reims.fr](mailto:luiz-angelo.steffemel@univ-reims.fr)  
Contribuição: Revisão do texto, Análise de dados, Coordenador de projeto, Obtenção de apoio financeiro

#### **9 – Hassan Bencherif**

Université de La Reunion, PhD in Atmospheric Science  
<https://orcid.org/0000-0003-1815-0667> - e-mail: [hassan.bencherif@univ-reunion.fr](mailto:hassan.bencherif@univ-reunion.fr)  
Contribuição: Revisão do texto, Análise de dados, Coordenador de projeto, Obtenção de apoio financeiro

#### **10 – Maria Paulete Pereira Martins**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Doutora em Geofísica Espacial  
<https://orcid.org/0000-0003-2344-0765> - e-mail: [maria.paulete@inpe.br](mailto:maria.paulete@inpe.br)  
Contribuição: escrita do texto, redução dos dados

## Como citar este artigo

SILVA, K. L. A.; PINHEIRO, D. K.; PERES, L. V.; BITTENCOURT, G. D.; SILVA, L. R.; BAGESTON, J. V.; ANABOR, V.; STEFFENEL, L. A. BENCHERIF, H.; MARTINS, M. P. P. Análises da climatologia do ozônio troposférico em Santa Maria - RS a partir dos instrumentos OMI/MLS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 47, n. esp. 3, e84033, 2024. DOI 10.5902/2179460X84033. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X84040>.