



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Variabilidade espaço-temporal da coluna total de ozônio e sua relação com a radiação ultravioleta na América do Sul

Mateus Dias Nunes¹, Glauber Lopes Mariano², Marcelo Félix Alonso³,

¹Doutorando do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Professor do Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e-mail: nunes.mateusdias@gmail.com; (autor correspondente); ²Professor do Instituto de Ciências Atmosféricas – Universidade Federal de Alagoas, e-mail: glauber.mariano@icat.ufal.br; ³Professor da Faculdade de Meteorologia - Universidade Federal de Pelotas - (UFPEL), e-mail: mfapel@gmail.com

Artigo submetido em 17/03/2020 e aceite em 25/06/2020

RESUMO

O ozônio (O₃) representa menos de 1% dos gases da atmosfera terrestre, entretanto, é indispensável para a vida na Terra, devido sua influência no balanço energético do planeta filtrando a Radiação Ultravioleta (RUV) do tipo UV-B, nociva à saúde. O objetivo geral deste trabalho é investigar o impacto da coluna total de ozônio sobre a variabilidade da RUV na América do Sul, utilizando dados diários de RUV e Coluna Total de Ozônio (CTO) do sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) da Aura/NASA (National Aeronautics and Space Administration). Na análise mensal, o valor médio da coluna total de ozônio para o decênio de 2005 a 2014 apresentou uma maior variabilidade no trimestre SON na região da América do Sul. A Análise de Componentes Principais mostrou que nos meses JJA e SON apresenta-se uma correlação direta entre CTO e RUV. As análises dos casos estudados comprovaram que apenas os baixos níveis de ozônio não são determinantes para os altos valores de RUV. Os meses entre julho e outubro apresentam grandes áreas na América do Sul com forte correlação inversa apresentando regiões estatisticamente significantes. Os resultados exprimem a relação entre a CTO e RUV que depende da sazonalidade nas diferentes regiões, entre outros fatores.

Palavras-chave: Radiação Solar, Sensor OMI, Dose Eritêmica Diária

Spatio-temporal variability of total ozone column and ultraviolet radiation: assessment of relationship in South America

ABSTRACT

Ozone (O₃) represents less than 1% of the earth's atmosphere gases, however, it is indispensable for life on Earth, due to its influence on the planet's energy balance as well as filtering out harmful UV-B type UVR-B the health. The general objective of this work is to investigate the impact of the total ozone column on UVR variability in South America, using daily Aura/NASA Ozone Monitoring Instrument (OMI) sensor and Total Column Ozone (TOC) data daily. National Aeronautics and Space Administration). In the monthly analysis, the average value of the total ozone column for the decade from 2005 to 2014 showed a greater variability in the SON quarter in the South American region. The Analysis Principals Components pattern showed that in the JJA and SON months, there is a direct correlation between TOC and RUV. Analyzes of the case studies have shown that only low ozone levels are not determinant for high UVR values. The months between July and October present large areas in southern South America with strong inverse correlation showing statistically significant regions. The results express that the relationship between TOC and UVR depends on seasonality and different regions, among other factors.

Keywords: Solar Radiation, OMI Sensor, Daily Erythmic Dose

Introdução

O ozônio é um gás minoritário presente na atmosfera e está contido tanto na estratosfera quanto na troposfera. O ozônio presente na região troposférica tende a agir como um gás poluente, já na estratosfera, uma de suas funções é absorver parte da Radiação Ultravioleta (RUV) incidente na superfície terrestre, que pode ser nociva (em casos de superexposição) aos seres vivos (Salby, 1996; Fioletov, 2008; Correa et al., 2019). O gás ozônio O_3 , mesmo estando em pequenas quantidades é de extrema relevância para a manutenção da vida dos seres na Terra, além a influência do balanço de energia do planeta. Devido aos processos fotoquímicos envolvidos em sua formação, o ozônio tem sua máxima concentração na estratosfera (onde a temperatura tende a aumentar com a altitude devido às reações fotoquímicas que liberam calor em forma de energia no processo de formação do ozônio), aproximadamente entre 20 e 25 km de altura (Fioletov, 2008; Seinfeld e Pandis 2016; Mariano et al., 2017). No entanto, a concentração e a distribuição vertical do ozônio variam com a latitude e estação do ano (Solomon et al., 2014; 2016) e são influenciadas pela dinâmica da estratosfera.

As concentrações de O_3 presentes na atmosfera são muito pequenas, tipicamente algumas moléculas por milhão de moléculas de ar (Mohanakumar, 2008; Seinfeld e Pandis, 2016). Logo nos primeiros quilômetros da estratosfera absorve principalmente a RUV do tipo UV-B (entre 0,28 μm e 0,315 μm micrômetros) como descrito em Sliney (2007), criando uma barreira para que parte desta radiação não chegue na sua totalidade à superfície (Salby, 1996; Mariano et al., 2017). A radiação UV-B, bem como a radiação UV-A, é prejudicial aos seres vivos, sendo a causadora de vários tipos de doenças como, por exemplo, catarata, câncer de pele, queimadura entre outros (Lenzi e Favero, 2000; Seinfeld e Pandis, 2016).

A distribuição do O_3 sobre uma determinada região pode ser constituída de três processos, a produção, distribuição e transporte dentro ou fora da região. Dentro da estratosfera superior (aproximadamente 40km de altitude) é onde existe a abundância de RUV que favorece aos processos fotoquímicos que produzem as quantidades de ozônio. Os processos de transporte do O_3 referem-se aos padrões de circulação do vento que movem as parcelas de ar que contém ozônio (Slusser et al., 1999; Peres et al., 2016,

Peres et al., 2017). Nesta região o tempo de residência de uma molécula de ozônio é breve (aproximadamente um dia), o que resulta num tempo muito curto entre formação e destruição da molécula de O_3 comparado com o tempo que demora a se deslocar o ozônio pelos processos de transporte. Já na estratosfera inferior, o tempo de residência do ozônio é maior, o que é fator fundamental para determinar a distribuição de ozônio (Salby, 1996; Seinfeld e Pandis 2016; Mariano et al., 2017).

A maior produção do ozônio se dá dentro da estratosfera tropical por um processo de criação-destruição muito rápido fazendo com que as moléculas de O_2 reajam com outros átomos de oxigênio para formar o Ozônio (Mohanakumar, 2008; Mariano et al., 2017; Bresciani et al., 2018). A explicação está na circulação Brewer-Dobson (CBD), um esquema de transporte horizontal e vertical na estratosfera, responsável por levar o ozônio dos trópicos para os pólos, além das trocas de ozônio entre a troposfera e a estratosfera que ocorrem em regiões de médias latitudes (Stohl et al., 2003).

O tempo de transporte do ozônio presente na região estratosférica do equador para as regiões polares é de aproximadamente de três a quatro meses, sugerindo que o tempo de residência do ozônio na estratosfera seja muito mais longo que o tempo necessário para que o transporte ocorra, podendo variar no equador, de três anos em 15 km a um dia em 40 km (Seinfeld e Pandis, 2006; McPeters et al., 2015; Mariano et al., 2017).

Quando o inverno no hemisfério sul (inverno austral) se aproxima, a atmosfera na região polar tende a ter um resfriamento fazendo que aumentem os movimentos subsidentes, assim elevando os valores do gradiente latitudinal de pressão entre as médias latitudes e a região polar. Formada na região polar, a intensa circulação de oeste que se intensifica no começo do outono, o Vórtice Polar Antártico (VPA), começa a aumentar a variação latitudinal de ozônio, tendo suas maiores concentrações no Hemisfério Sul durante a primavera aproximadamente sobre a latitude de 60°S onde se localiza a região da faixa de baixa pressão das frentes polares (Hauchecorne et al., 2002; WMO, 2002; Mohanakumar, 2008; Solomon et al., 2014; Peres et al., 2016).

No entanto, quaisquer alterações do ozônio podem estar associadas com as possíveis mudanças de temperatura e na circulação atmosférica, Grise et al., (2013; 2014) e Gonzalez

et al., (2014), por exemplo, os baixo conteúdo ozônio estratosférico, na primavera resulta em menores taxas de aquecimento/resfriamento por ondas curtas/longas, as temperaturas permanecendo baixas por mais tempo, e o gradiente de temperatura meridional permanece acentuado (Braesicke et al. 2013).

O transporte meridional do ozônio estratosférico é um dos fatores essenciais para a concentração deste constituinte atmosférico sobre as diferentes regiões do planeta (Gettelman et al. 2011; Ploeger et al. 2012; Bracci et al. 2012). Isto ajuda a explicar as maiores concentrações do ozônio nas regiões polares ao invés da região equatorial, onde há maior produção, em virtude da circulação Brewer-Dobson, onde massas de ar estratosféricas da região equatorial são transportadas em direção aos pólos (Brewer, 1949; Dobson, 1968; Oberländer-Hayn et al., 2016), sendo esta circulação estratosférica ainda muito estudada nos dias atuais (Weber et al. 2011; Young et al. 2012; Polvani et al. 2019). Além disso, Koch et al. (2002), Solomon et al. (2016) e Vargin et al. (2020), explicam que, as anomalias no conteúdo total de ozônio presente nas latitudes médias da estratosfera estão associadas ao transporte no sul de regiões onde as concentrações climatológicas são menores ou maiores.

As prováveis alterações na temperatura estratosférica e na circulação podem ser projetadas sob o aumento da concentração tanto das concentrações de ozônio, quanto ao de gases de efeito estufa (Chiodo et al., 2018). Como resultado, o ozônio na baixa estratosfera está altamente correlacionado com vários parâmetros meteorológicos (Son et al., 2010; Gettelman et al., 2011). Foram relatadas altas correlações entre temperaturas estratosféricas e ozônio estratosférico em Karl et al., (2006) e Maycock, (2016) e correlação entre vorticidade potencial e razão de mistura de ozônio, observado no estudo de Bencherif et al., (2011). Como a tropopausa serve como uma fronteira entre a alta taxa de mistura de ozônio, na estratosfera e a baixa taxa de mistura na troposfera é possível inferir que são bem correlacionadas a altura da tropopausa com as concentrações de ozônio em escalas de tempo diárias e mais longas (Hegglin et al., 2010; Gettelman et al., 2011; Oberländer-Hayn et al., 2016).

Com base no exposto acima, o objetivo deste trabalho é quantificar o comportamento da CTO e a sua influência sobre a RUV, através de uma avaliação espaço-temporal no sul da América do sul, bem como compreender a relação entre que uma variável exerce sob a outra nesta região. No

entanto, a maioria dos estudos avaliam o comportamento de uma localização e não de uma área como o sul da América do Sul, devido a presença de algum fotômetro em superfície (Peres et al., 2016; 2017; Bittencourt et al., 2016; 2019 Bresciane et al., 2018; Coariti et al., 2018). Estes estudos buscam compreender as características locais, diante da maior facilidade de se relacionar a RUV com os filtros atmosféricos, como por exemplo, ozônio, nuvens e aerossóis. A motivação para esta pesquisa, busca explorar a influência do UV sobre seres vivos na região de estudo, uma vez que redução de 1% no conteúdo de ozônio pode causar um aumento médio de aproximadamente 1,2% na RUV incidente na superfície (Guamieri et al., 2004, Correa et al., 2006, DuPreez et al., 2019).

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é investigar a influência dos padrão espaço-temporal da CTO na variabilidade da RUV sobre o sul da América do Sul.

Material e Métodos

Dados

Neste trabalho são utilizados dados diários da Coluna Total de Ozônio (CTO) e RUV para a região da América do Sul (AS), entre as latitudes 20°S, 55°S e as longitudes de 30°W, 90°W, durante o período de 2005-2014, obtidos através do sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo do satélite Aura. O sensor OMI determina a CTO indiretamente pelo mapeamento da radiação ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre de volta para o sensor a bordo do satélite, nas faixas espectrais de RUV entre 0,270nm a 0,314nm e 0,306nm a 0,380nm. Estes dados são de resolução global, tendo resolução temporal diária e resolução espacial de 1,0° latitude x 1,0° longitude para as variáveis de Ozônio e RUV (Krotkov et al., 2006; Tanskanen et al., 2006). Para a análise dos dados de O₃ foi utilizado o produto OMTO3 disponível em <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>, a qual se refere a CTO presente na atmosfera, dada em Unidades Dobson (UD). Os dados de RUV do tipo UV-B para análise foram o do Índice Ultravioleta (UV index) utilizando o máximo valor diário e Dose Eritermal Diária (J/m²), obtidos através do produto OMUVB dentro do espectro 305, 310, 324, 380 nm. Todas estas variáveis acima têm como a resolução espacial de 1°x1° e resolução temporal diária para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014.

Metodologia

Utilizando a série temporal dos dados de CTO e RUV, disponibilizados pelo sensor OMI, no período de Janeiro de 2005 a Dezembro de 2014 para o sul da América do Sul, calculou-se as médias mensais para cada pixel da AS a partir dos dados diários de CTO e Índice Ultravioleta (I-UV). A análise sazonal, tanto para dados de CTO quanto os dados de RUV, foi elaborada a partir dos dados diários de 2005 a 2014 do sensor OMI, representadas pelos trimestres DJF (Dezembro-Janheiro-Fevereiro), MAM (Março-Abril-Maio), JJA (Junho-Julho-Agosto) e SON (Setembro-Outubro-Novembro) dentro da região da AS de acordo com (André, 2003).

Calculou-se o grau de correlação entre as variáveis (pixel a pixel) de Coluna Total de Ozônio Inclinada (CTO $_{inc}$) e de Dose Eritêmica Diária (DED), para os dados diários, assim chegando às correlações mensais e sazonais. O método de correlação linear ou correlação de Pearson visa estimar (mensurar) uma relação que possa existir entre duas variáveis na população. Caso os pontos das variáveis, representados num plano cartesiano (X, Y) ou gráfico de dispersão, apresentam uma dispersão ao longo de uma reta imaginária, dizemos que os dados apresentam uma correlação linear (Wilks, 2006). A fim de verificar a significância estatística das correlações mensais e sazonais da CTO $_{inc}$ e DED no sul da América do Sul, aplicou-se o teste-t de Student (Wilks, 2006). Para estas correlações entre os conteúdos de ozônio a sua influência no comportamento de outras variáveis (Grise et al., 2013; Polvani et al., 2019), adotou-se o nível de significância estatística de

95%, que corresponde a uma significância estatística de 5%. Ressalta-se que para este tipo de análise (correlação entre CTO $_{inc}$ e RUV) é necessário que seja utilizado a variável Coluna Total de Ozônio Inclinada (CTO $_{inc}$) no lugar de CTO devido a estas correlações não serem lineares e sim exponenciais, de acordo com a Lei de Beer (Echer et al., 2001), indicando que, a intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente. Para chegarmos aos dados de Coluna Total de Ozônio Inclinada foi realizado o procedimento proposto por Echer et al., (2001). A expressão utilizada para o cálculo está apresentada na Eq.(1):

$$CTO_{inc} = CTO \cdot \sec(\theta) \quad \text{Equação (1)}$$

onde CTO $_{inc}$ é a Coluna Total de Ozônio inclinada, CTO é a Coluna Total de Ozônio e $\sec(\theta)$ corresponde a secante do ângulo solar zenital. Os dados de ângulo solar zenital, que é o ângulo formado entre a posição do Sol e o zênite, foram obtidos do sensor OMI, com resolução temporal diária e resolução espacial de 1°x1°, porém foram utilizados somente ângulos menores que 65°. Para uma aproximação plano-paralela da atmosfera, a massa de ar ótica que é atravessada pelo feixe de radiação é dada por $\mu = \theta$ (Echer et al., 2001; Guarniere et al., 2004).

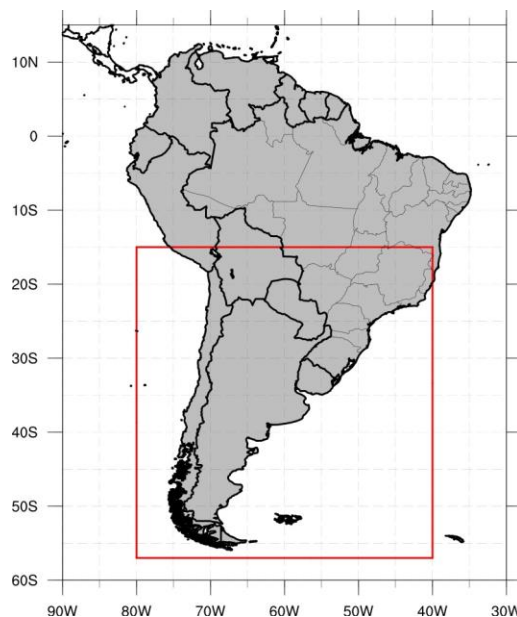


Figura 1 - Área de estudo onde é mostrada a localização da área da América do Sul, destacando (em vermelho) a área delimitada representando o sul da América do Sul.

Os padrões que dominam a variabilidade da RUV na AS, será determinado aplicando-se o método de Análise de Componentes Principais (ACP) (do inglês, *Empirical Orthogonal Functions - EOF*). A ACP é assumida baseada na matriz de correlação, onde os autovetores para cada modo de variabilidade representam padrões de correlação com sinais correspondentes aos sinais das anomalias das quantidades de RUV. Para que seja definido o número de Componentes Principais a serem analisadas, foi adotado o critério de Kaiser (Wilks, 2006). Para a análise da ACP é possível utilizar as variáveis variando tanto no espaço quanto no tempo, o que auxilia este estudo que tem como objetivo uma avaliação espaço-temporal da variabilidade da CTO e RUV. Existem basicamente dois modos para avaliação espaço-temporal. O primeiro chamado Modo-S está ligado com a séries temporais associadas aos pontos espaciais, que permite que a variável analisada possa ser considerada uma variável contínua no espaço e tempo. Em contrapartida, o Modo-T, utilizado nesta pesquisa, permite a caracterização e/ou classificação de campos atmosféricos espaciais, sintetizando padrões de circulação atmosféricos, bem como sua variabilidade espacial e frequência (Wilks, 2006, Dennison et al., 2016).

Nesta pesquisa, analisou-se os valores dos percentis individualmente em cada ponto de grade, ou seja, cada ponto de grade terá um valor independente à vizinhança, tanto mensalmente quanto sazonalmente. Será investigado os valores extremos de RUV com base nas análises do percentil 95% (P95) (Wilks, 2006), que mostrará onde se concentram os 5% dos casos extremos encontrados, tanto sazonalmente quanto mensalmente (Wilson et al., 2011; Cohen et al., 2018 e Ball et al., 2019).

Para determinar a variação das séries mensais e sazonais de RUV do tipo DED (Dose Eritêmica Diária), foi utilizado o cálculo de anomalias padronizadas como medidas de dispersão, envolvendo basicamente normalizações, médias e análise de variância. Estas normalizações são feitas em cada um dos pontos de grade, individualmente, para que através de suas médias e desvios padrões altos não se sobreponham às demais. Assim, para cada um dos pontos de grade as respectivas normalizações são feitas através da subtração da RUV observada da média mensal e dividindo essa diferença do seu desvio padrão.

Os campos de anomalias padronizadas de DED foram confeccionados para os quatro trimestres DJF, MAM, JJA, SON, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014, individualmente em cada trimestre de cada ano.

Resultados e Discussão

Distribuição espacial de O₃ e a sua correlação RUV na América do Sul

Analisando as médias mensais obtidas a partir dos dados diários do sensor OMI da NASA, comprova-se que, assim como já proposto por Dobson (1968), existe um predomínio da variabilidade meridional dos valores da Coluna Total de Ozônio no sul da América do Sul (latitudes maiores que 25°S), sendo que essa maior amplitude variacional nos registros se inicia pouco antes dos meses da primavera austral (primavera no Hemisfério Sul), de julho a novembro. Essa variabilidade ocorre devido ao fortalecimento do VPA, que desfavorece o deslocamento de massas de ar que leva massa de ar rica em ozônio para as regiões polares aprisionando-as (agindo como uma barreira) nessa região por aproximadamente de 120 a 150 dias (Figura 2g a 2k). Pode-se observar um ciclo sazonal com boa definição, apresentando maiores valores durante o período da primavera e menores valores durante o período do outono. Este comportamento pode ser considerado normal para a Camada de Ozônio em regiões de médias latitudes (London, 1985; Solomon et al., 2016).

O período registrado para os dados de dezembro de 2004 a novembro 2014 com menores índices de variabilidade da Coluna Total de Ozônio é compreendido entre os meses de janeiro a abril, conforme também relatado por diversos autores (Schmalfuss et al., 2014; Peres et al., 2017; Toihir et al., 2018). Nota-se também que nos meses em que há a atuação do VPA (julho a setembro) e conseqüentemente favorecendo o aprisionamento da CTO na faixa compreendida entre as latitudes 40°S e 60°S, desenvolve-se um aumento nos valores da CTO na região equatorial, variando de uma média de 250 UD para 280 UD (cerca de 11%), aumento este causado pela possível existência da quebra do padrão da circulação Brewer-Dobson.

Após analisar as médias mensais da CTO, no sul da América do Sul, notou-se a necessidade de conhecer o grau de dispersão destes dados. Sendo assim, o Desvio Padrão (σ) representa o quanto um conjunto de dados é uniforme (Wilks, 2006).

Os meses de Dezembro a Março (Figura 2l, 2a, 2b e 2c), basicamente apresentam valores de $\pm 15\sigma$ UD, representando pouca variação, ou seja, regiões mais homogêneas no sul da América do Sul (Peres et al., 2016). Segundo Hauchecorne et al., (2002) e Mohanakumar (2008), Solomon et al., 2016, esta distribuição mais homogênea da

CTO nestes meses, ocorre porque a CBD não é interferida pelo VPA, que neste período apresenta uma fraca intensidade.

Já nos meses de Abril e Maio (Figura 2d e 2e, respectivamente), mostram-se como meses de transição entre os valores mais homogêneos (outono) e os meses como maior variabilidade (inverno) da CTO no sul da América do Sul. Contudo, nestes meses, são observados valores mais elevados do desvio padrão, com relação aos

meses de verão, com valores de aproximadamente $\pm 25\sigma$ UD, próximo ao sul da Argentina e Atlântico Sul, em torno das médias que ficam entre 250 e 280 UD. Junho (Figura 2f), apresenta um aumento dos valores médios da CTO, porém os valores dos desvios padrões do mês seguem os mesmos dos meses Abril e Maio (Schmalfluss et al., 2014).

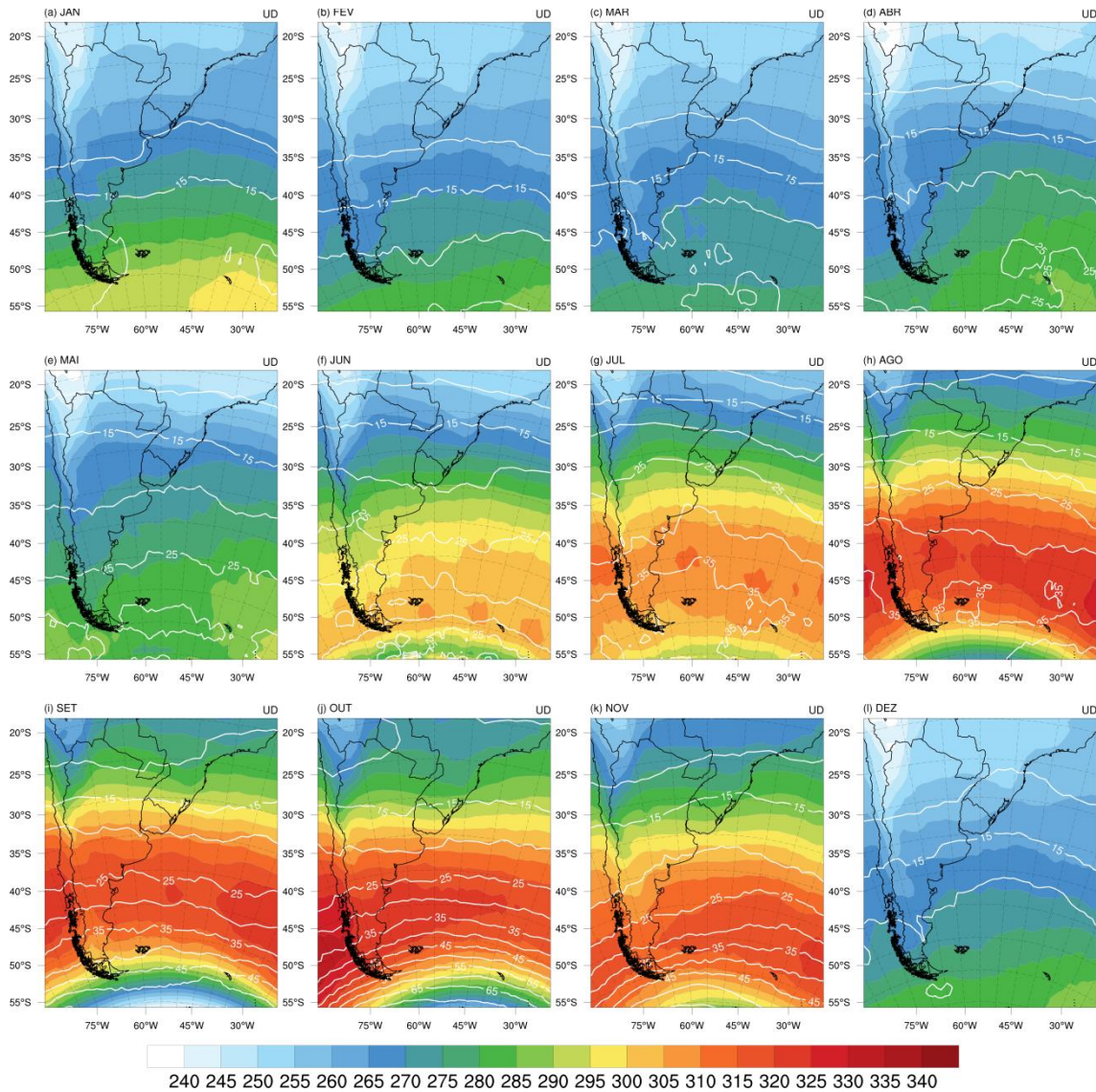


Figura 2 - Campos médios mensais da Coluna Total de Ozônio (sombreado) e desvios padrões mensais (contornos em linhas brancas) em UD, para a América do Sul entre 2005 a 2014.

Os meses que apresentam as maiores variações da CTO no sul da América do Sul são precedidos pelo mês de julho, onde é possível observar um aumento dos valores médios e do desvio padrão, estando entre 280 e $310 \pm 25\sigma$ UD, na região que compreende as faixas latitudinais de

35° S e 55° S. Os maiores valores da CTO na região sul da América do Sul, se concentram nos meses entre agosto e novembro (Figura 2h-k). Semelhantes ao encontrado por Schmalfluss et al., (2014) e Du Preez et al., (2019), os valores médios da CTO chegam próximo de 330 UD nos meses de

agosto, setembro e outubro, tendo as maiores variações dos desvios padrões nos meses de agosto e setembro, com valores entre $\pm 35\sigma$ e $\pm 45\sigma$.

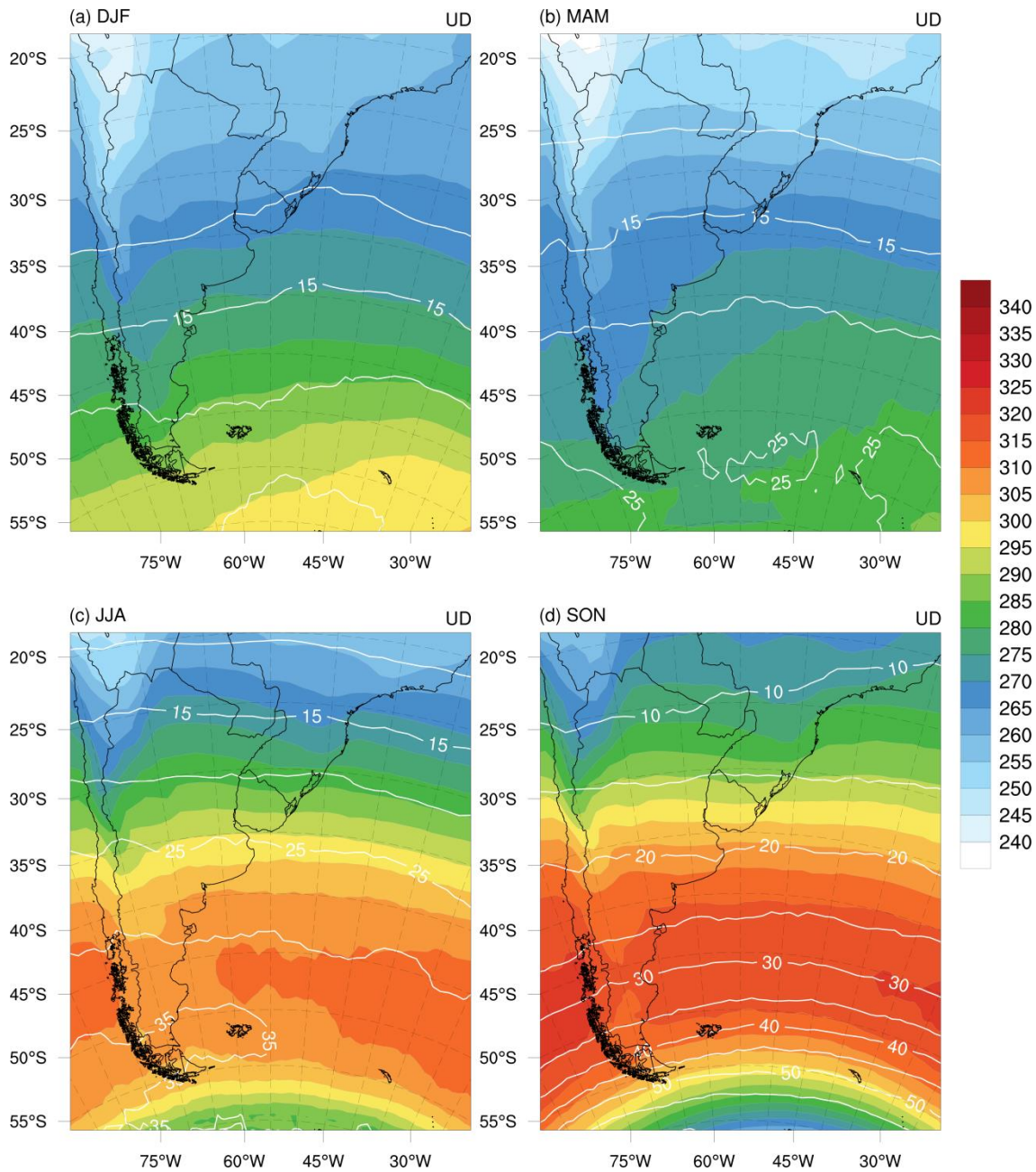


Figura 3 - Média sazonal da Coluna Total de Ozônio (sombreado) e desvios padrões sazonais (contornos em linhas brancas) em UD, para o período de 2005 a 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

Nota-se que nos meses de Outubro, a maior variabilidade dos desvios padrões é registrado, chegando a aproximadamente $\pm 65\sigma$, onde no Hemisfério Sul, durante a noite polar, há uma intensificação do VPA, fazendo com que aumente as concentrações da CTO na região entre 20°S e 55°S, devido ao VPA agir como uma barreira à circulação Brewer-Dobson. Semelhante

ao que foi encontrado por (André et al., 2003; Schmalfluss et al., 2014, Levelt et al., 2018), no período JJA, a Coluna Total de Ozônio já se apresenta mais elevada em relação ao trimestre MAM (Figura 3b), tendo na região entre 40°S e 50°S seus maiores valores chegando a uma média de $310 \pm 35\sigma$ UD. Na região entre 30°S e 40°S há uma maior variação gradiente da Coluna Total de

Ozônio com valores entre 260 a 310 $\pm 25\sigma$ UD (Figura 3c). O trimestre SON, apresenta a maior variabilidade dos valores médios da CTO, juntamente com maiores variações dos desvios padrões, registrando na faixa entre 30°S e 55°S, valores entre 290 a 330 ± 20 a 50σ UD, influenciados pela presença marcante do VPA (Hauchecome et al., 2002). A média mensal do I-UV mostra que os entre os meses de novembro e fevereiro (Figura 4k, 4l, 4a, 4b), considerados meses de verão na América do Sul, temos os valores do I-UV entre 7 e 13 na maioria das regiões, em comparação com os resultados encontrados por Tanskanen et al., (2007). Países como Paraguai, Chile, sul da Bolívia, norte da Argentina e grande parte do Brasil (até a latitude de 40°S) têm nesses meses (novembro a fevereiro) valores do I-UV entre 10 e 13, primeiramente devido a posição zenital ao meio dia solar, associado aos mais baixos valores de CTO nesse período, que ficam em torno de 240 e 270 UD, como apresentou Krzýscin (1996), Guarnieri et al., (2004) Lamy et al., (2018), afirmando que a redução de 1% da quantidade de ozônio pode aumentar em até 1,2% o I-UV.

Nota-se que nos meses ditos frios na América do Sul, entre abril e agosto, há uma diminuição considerável dos valores do I-UV principalmente no intervalo das latitudes 20°S a 60°S. O I-UV apresentou valores entre 2 e 9 unidades nos meses de abril e maio (Figura 4d e 4e) e nos meses de junho a agosto entre 2 e 5 unidades (Figura 4e-h). Logo, percebe-se que, quando começam a se elevar os valores da CTO na região, onde também são sentidos os efeitos do Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico entre 40°S e 60°S, há uma queda do I-UV incidente na superfície, juntamente associada a sazonalidade da produção e destruição do ozônio. A partir das passagens e massas de ar que tinham origem do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul da América do Sul e do Brasil (29,4 °S; 53,8°W) foi primeiramente observada por Kirchhoff et al. (1996), a qual ocasionou uma queda temporária do conteúdo de ozônio sobre esta região. De acordo com Salby (2008); Butchart (2014); Ball et al., (2016) e Polichtchouk et al., (2018) isso ocorre, pois nesse período o VPA começa a ganhar força,

dificultando a circulação Brewer-Dobson e aprisionando nessa região maiores conteúdos de ozônio produzidos preferencialmente na região tropical.

Sazonalmente, os campos de RUV, em específico as do I-UV, ratificam o que mostra a média mensal da América do Sul, onde nos meses quentes de DJF (Figura 5a) os valores se concentram aproximadamente de 7 a 12 unidades. Os dois trimestres seguintes de MAM e JJA (Figuras 5b, 5c) mostram uma queda brusca na média do I-UV na região de 20°S a 40°S, chegando a registrar média de no máximo 7 unidades. Nas latitudes próximas a 20°S a média é registrada entre 10 e 13 unidades, semelhante aos resultados mostrados por Levelt et al. (2018). Existe um visual gradiente meridional, no sentido norte-sul do I-UV no trimestre SON (Figura 5d), variando entre 7 unidades no trimestre JJA para 12 unidades em algumas regiões da América do Sul.

De acordo com diversos estudos (Kirchhoff et al. 1996; Guarnieri et al., 2004; Salgado et al. 2010; Hupfer et al. 2011), Lamy et al. (2018), Du Preez et al. (2019) e Aun et. al (2019), sabe-se que o padrão de correlação inversa entre CTO e RUV seria mais adequado para representar a relação entre estas duas variáveis, entretanto é notória a presença de grandes áreas dentro da AS com a correlação direta, portanto, o oposto ao padrão esperado entre CTO_{inc} e RUV. As variações de variáveis atmosféricas como, por exemplo, radiação solar global e espessura ótica dos aerossóis (EOA) (Corrêa et al., 2006), vento, nebulosidade (Lopo et al., 2013) também possuem a capacidade de influenciar nas observações da RUV existindo a necessidade de uma verificação em conjunto via EOFs.

Para avaliarmos as regiões onde a correlação entre as variáveis CTO_{inc} e DED possuem significância estatística, foi avaliado a partir do teste-t de Student (Wilks, 2006; Bombardi e Carvalho, 2017), para um nível de significância estatística de 95%. Os valores encontrados na correlação entre CTO_{inc} e a DED para as médias mensais no período entre 2005 e 2014, apresentam características específicas em cada mês.

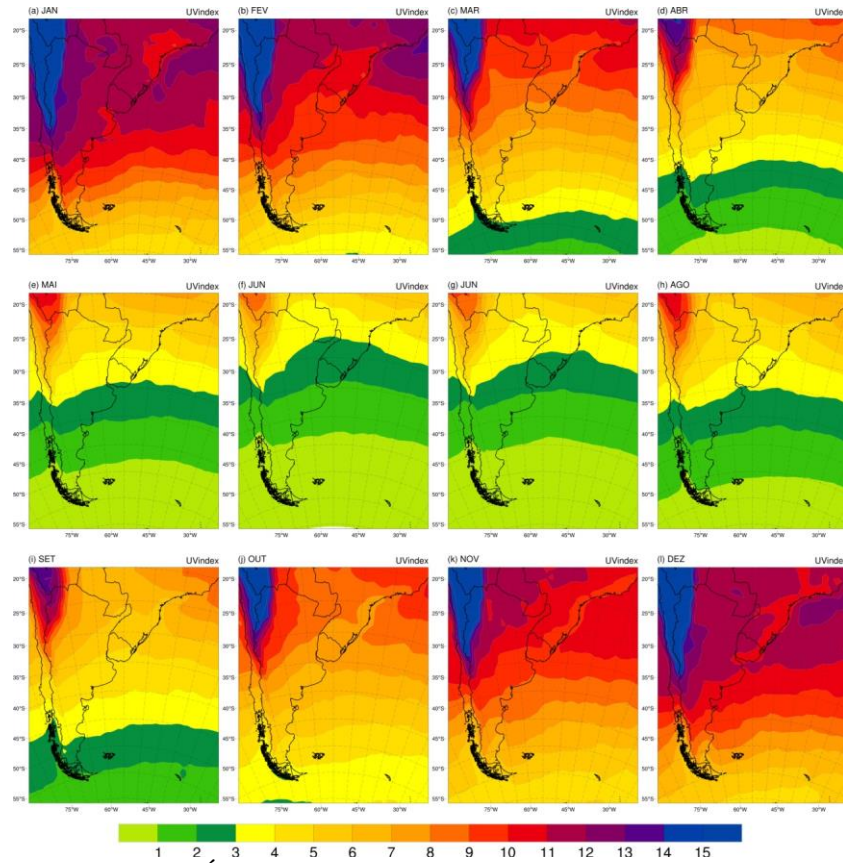


Figura 4 - Média mensal do Índice Ultravioleta (UVindex) para o sul da América do Sul para o decênio entre 2005 a 2014.

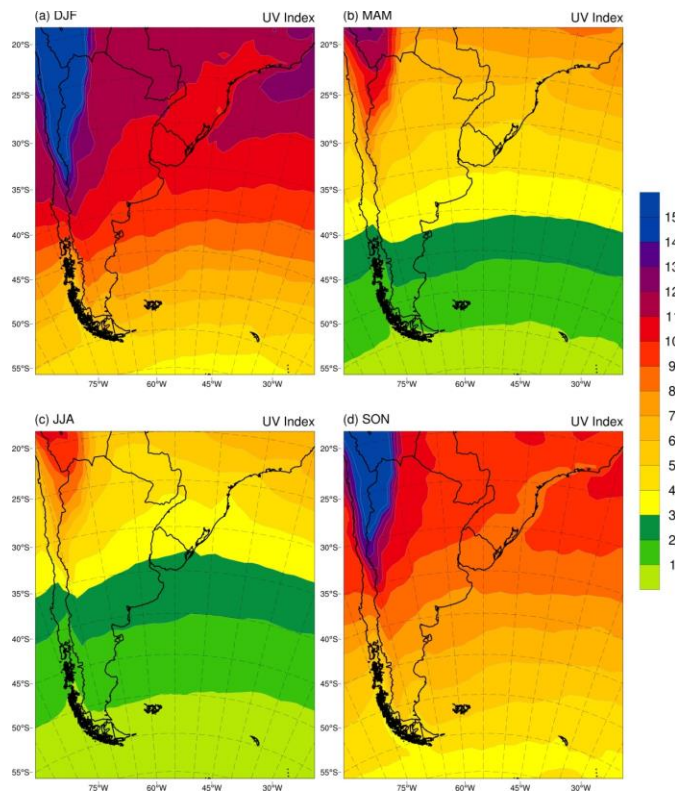


Figura 5 - Média sazonal do Índice Ultravioleta, para o período de 2005 a 2014 na região de América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

Nota-se nos meses de Fevereiro, Abril e Maio (Figura 6b, 6d e 6e), há uma predominância da correlação positiva entre a *CTOinc* e a DED na área do sul da América do Sul. A região sul da Argentina entre 40°S e 50°S, nos meses de fevereiro e maio, apresenta em sua área, valor que são estatisticamente significantes, de acordo com o obtido utilizando o teste-*t* de Student (Bombardi e

Carvalho, 2017), dentro do nível de significância adotado. Os valores encontrados, possivelmente, ocorrem devido a influência de outras variáveis como EOA, como em Corrêa et al. (2006) e Yamamoto et al. (2018), Radiação Global e nebulosidade na alteração do Índice Ultravioleta, como encontrados por Janjai et al. (2014)..

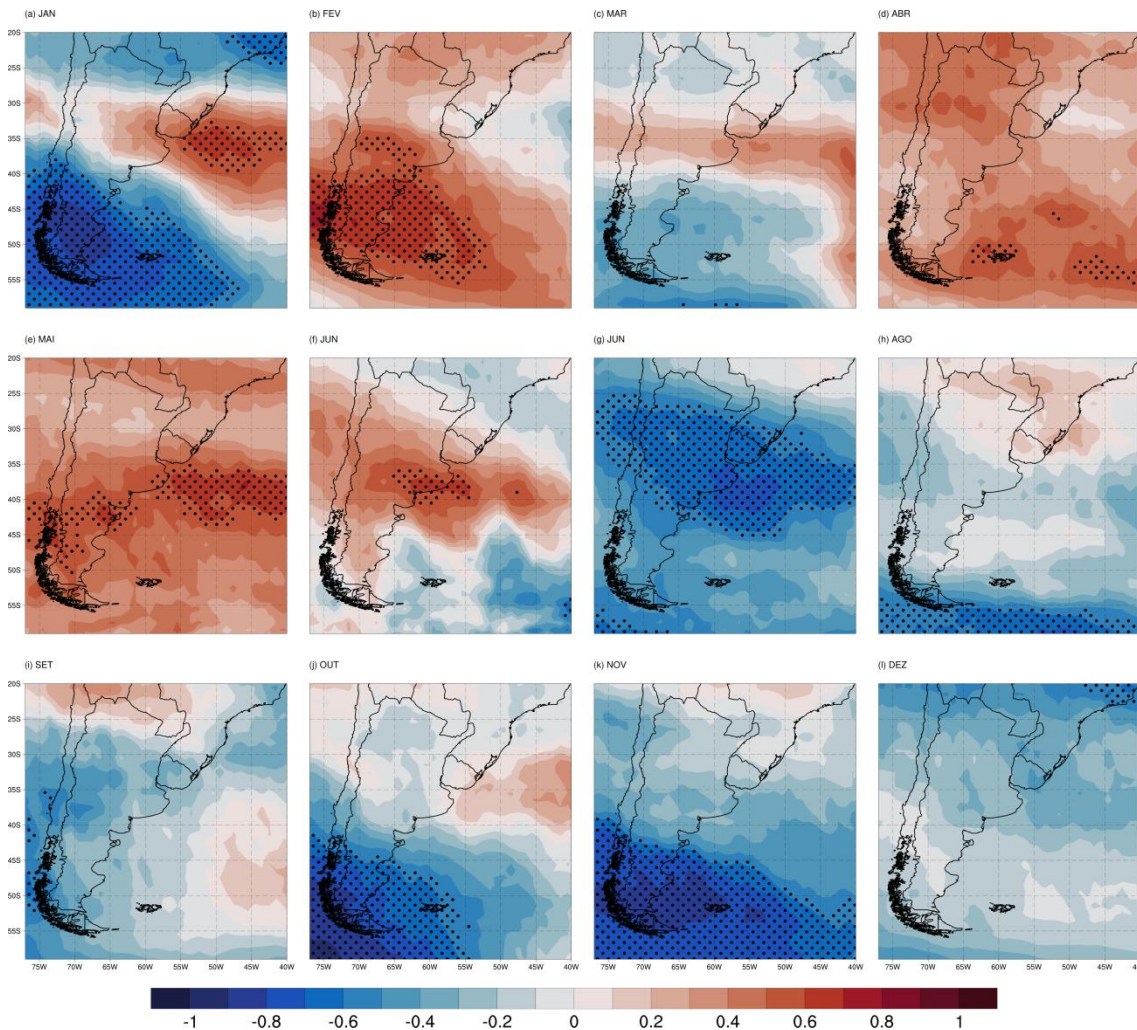


Figura 6 - Correlação mensal entre a *CTOinc* e a DED para a América do Sul para o decênio entre 2005 a 2014. Os valores preenchidos representam as correlações positivas (em vermelho) e correlações negativas (em azul). As áreas pontilhadas (em preto) indicam as regiões estatisticamente significativas (nível de significância de 95% através do teste *t* Student).

A análise da variabilidade anual de RUV, em relação às variáveis, *CTOinc*, EOA, nebulosidade e radiação solar global e vento podem indicar a existência sazonal de uma estabilização/redução na UV em superfície podendo ser evidenciados através de uma correlação parcial que envolve mais de duas

variáveis (Damiani et al., 2014; Bais et al., 2015, Levelt et al., 2018). O padrão dinâmico das correlações entre *CTOinc* e DED, na região sul da América do Sul, nos meses que vão de Junho a Dezembro (Figura 6g-l), expressa um comportamento de correlação inversa, ou seja, quando a *CTOinc* diminui, há uma tendência de

aumento da RUV (Echer et al., 2001, Guarnieri et al., 2004, Levelt et al., 2018). Os meses de junho, outubro e novembro, exibem uma extensa área com valores que indicam correlações estatisticamente significantes. Em junho esta área se concentra mais sobre o sul do Brasil, Uruguai, centro do Chile e sobre o centro-norte da Argentina. Os meses de outubro e novembro indicam essa área com alta correlação inversa significativa ($\sim 0,8$), mais ao sul do continente, abrangendo o sul da Argentina e Chile. Agosto, setembro e dezembro, apresentam correlação inversa não tão acentuada na região sul da América do Sul.

A dinâmica das médias sazonais da correlação entre CTO_{inc} e o I-UV nos trimestres DJF e SON (Figura 7a e 7d) na região da América do Sul, como em Du Preez et al., (2019), também não apresenta valores que possam evidenciar uma exclusiva dependência/influência de uma variável na outra. As correlações na maior parte da área ficam entre os valores de correlação entre ± 3 unidades, sem pontos demarcados pelo nível de significância. As áreas que apresentam significância estatística nos trimestres de DJF e SON concentram-se ao sul da Argentina e Chile, com valores de correlação de até $+0,7$. No entanto, os trimestres apresentaram grandes áreas mais homogêneas, que semelhante ao encontrado em Guarnieri et al. (2004), Nozawa et al. (2007), Lamy et al., (2018) provavelmente tenham casos específicos que comprovem a exclusiva dependência/influência entre as variáveis. Os trimestres MAM e JJA (Figura 7b e 7c), denotam comportamentos bem distintos na área, no que tange os valores de correlações. O trimestre MAM indica uma grande área de correlação positiva, com máximo de $0,7$ positivo, demarcada por uma área de significância estatística sobre grande parte do sul da América do Sul na região entre 25°S e 35°S na faixa que vai do centro do Chile até o sul do Rio Grande do Sul no Brasil e sul do Uruguai. O oposto ocorre no trimestre JJA, meses de inverno, com valores de correlação negativa na maioria da área, com exceção da faixa entre 20°S e 25°S . As áreas de correlação negativa, juntamente com as regiões onde estas correlações são estatisticamente significantes, apontam duas áreas no sul da América do Sul, a primeira mais ao sul do continente, igualmente ao observado no trimestre SON, na região sul da Argentina e Chile. Já a outra região onde há a demarcação dos níveis

significativos de correlação, se concentra mais ao centro do Chile e Centro da Argentina.

Padrões de variabilidade sobre o sul da América do Sul

O método da EOF gerou novas variáveis chamadas componentes principais, ortogonais (não correlacionadas), seguida das correlações das variáveis e variação captada em cada componente resultante Wilks (2006). O cálculo da EOF da Coluna Total de Ozônio para a região sul da América do Sul foi realizado para os dados do sensor OMI, para o período de 2004 a 2014, onde foram calculadas as EOFs para os trimestres DJF, MAM, JJA, e SON. De acordo com o exposto na seção 2, o método de truncamento para a definição das componentes principais que seriam avaliadas foi obtido através do truncamento de Kaiser. O truncamento adotado, limitou às análises na segunda componente principal, o que indica que a maior dos dados ocorre nestas duas primeiras componentes principais. A Figura 8, mostra as duas primeiras componentes principais, para cada semestre.

A maior variabilidade da CTO é encontrada no trimestre DJF (EOF1 = 67.8% e EOF2 = 17.1%), assim explicando a maior variabilidade para esta região. Como ocorrido no trimestre MAM, as maiores contribuições se dão no cinturão entre 40°S e 55°S para as duas primeiras EOFs. A análise da EOF da série temporal do ozônio estratosférico também foi utilizada por Alkemade (1995), para explicar a variância dos dados e também por Thompson e Wallace (2000), Camp et al., (2003) e Dennison et al. (2016), para isolar os sinais da Oscilação Quasi Bienal e El Niño-Oscilação Sul. A EOF2 do trimestre DJF apresenta uma contribuição negativa na faixa que vai de 20°S a 35°S , região que abrange os estados da região sul e sudeste do Brasil, Uruguai, Paraguai, Chile, Sul da Bolívia e região central e região do Chaco na Argentina (Figura 8a). Na análise trimestral da variabilidade da CTO, observa-se que apenas o trimestre de MAM não apresenta o valor da EOF1 (33.3%) próximo a 50% da maior variabilidade dos dados. A Figura 3b, mostra para a região sul da América do Sul o campo de CTO mais homogêneo, análogo a Xie et al., (2014), com relação aos outros trimestres, devido a este período, para esta região apresentar uma menor incidência de radiação solar por conta do ciclo solar anual (Figura 8b).

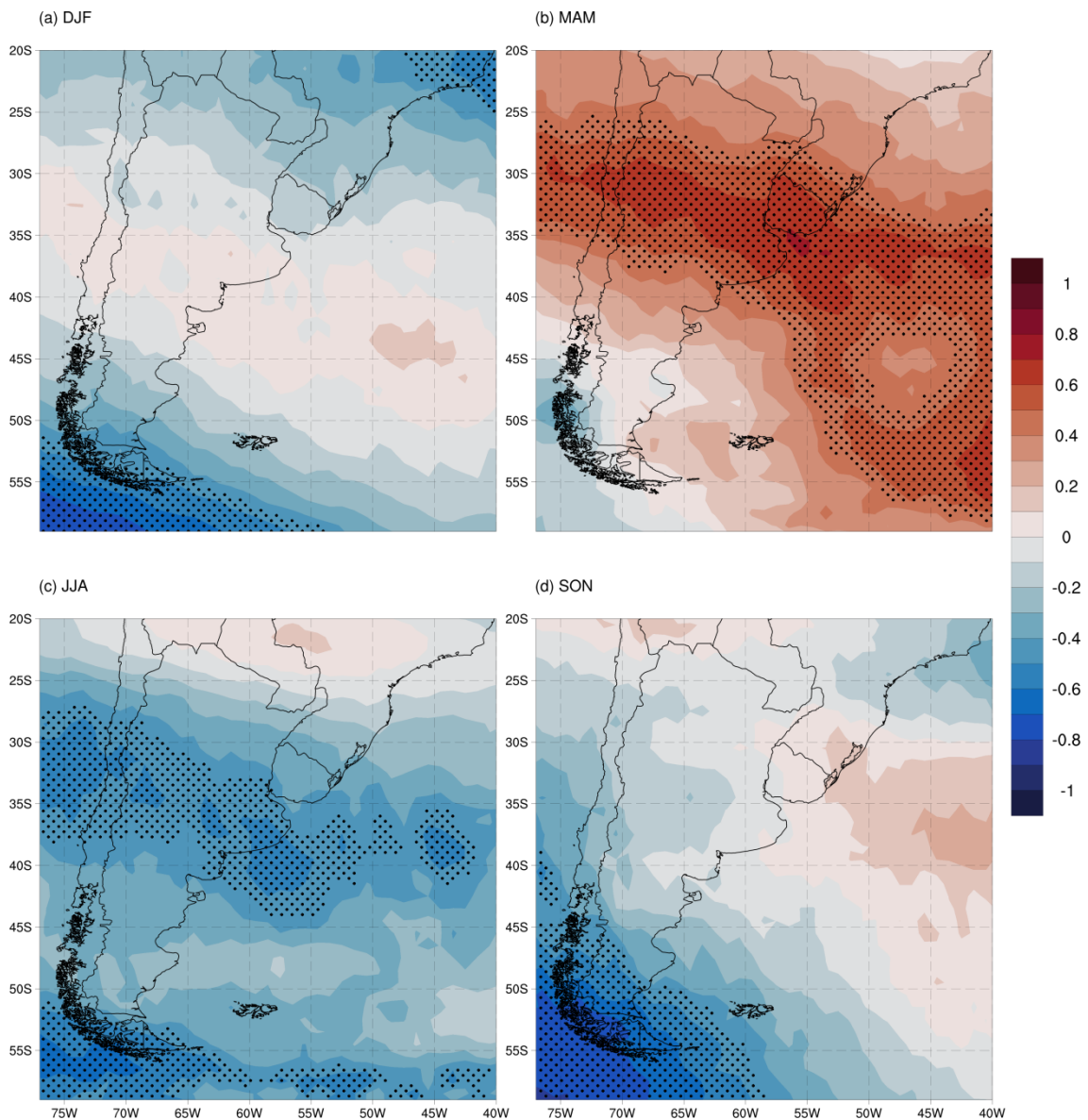


Figura 7 - Correlação sazonal entre a CTOinc e a DED para a América do Sul para o decênio entre 2005 a 2014. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. Os valores preenchidos representam as correlações positivas (em vermelho) e correlações negativas (em azul). As áreas pontilhadas (em preto) indicam as as regiões estatisticamente significativas (nível de significância de 95%).

O comportamento da EOF1 do trimestre JJA (Figura 8c) é caracterizado pela presença do intenso vórtice ciclônico em altos níveis na região da Antártica (Solomon et al., 2016; 2017), que age como uma barreira para a Circulação Brewer-Dobson, assim, aprisionando os conteúdos de ozônio na região. Tal variabilidade, pode ser associada com as constantes passagens de Sistemas Frontais (SF), o que proporciona que os conteúdos da CTO diminuam, sendo transportados para as regiões inferiores da troposfera. Esse comportamento foi exposto por Peres et. al (2012) e Bittencourt et. al (2016), onde o principal

mecanismo que afeta esse transporte é a dobra da tropopausa, que é observada através das superfícies isentrópicas de temperatura potencial. O mesmo comportamento de JJA é observado nos trimestres DJF e MAM na primeira componente principal (EOF1) com contribuições positivas, porém no período DJF essa variabilidade se concentra mais ao sul do continente, já no trimestre MAM a distribuição espacial da variabilidade da CTO é maior, cobrindo quase na totalidade a área de estudo.

O trimestre SON configura-se com uma variabilidade da CTO de aproximadamente 50% na

EOF1 na região sul da América do Sul (Figura 8d). Nota-se um dipolo meridional de variabilidade positiva/negativa entre as latitudes de 35°S e 40°S como encontrado em Xie et al., (2014) e Lu et al. (2019). Neste período do ano a região do sul da AS, é composta pelos maiores valores da CTO em consequência do embarque proporcionado pelo VPA, assim a variabilidade da CTO tende a ter uma contribuição negativa da primeira componente principal.

Quanto a segunda componente principal (EOF2), os trimestres DJF (15.1%) e MAM (18.7%), JJA (17.1%) e SON (16.5%) apresentam uma extensa área com contribuição negativa. Nos trimestres DJF e SON (Figura 8a e 8d), essas contribuições negativas são mais destacáveis sobre a região continental, onde no período DJF há um

dipolo meridional dividindo as contribuições positivas e negativas da EOF2 aproximadamente em 37°S. Semelhante ao trimestre DJF, o trimestre JJA também apresenta faixas latitudinais de contribuição positiva e negativa da segunda componente principal, tendo uma faixa de contribuição positiva aproximadamente entre 23°S e 35°S e uma contribuição negativa de 37°S a 55°S. Esse dipolo de variabilidade positiva/negativa se configura próximo a faixa que se apresentam os maiores acumulados de conteúdos de CTO no sul da América do Sul (Figura 8c) como visto em Xie et al. (2014) e Levelt et al (2018). Contudo, no trimestre SON a contribuição negativa da segunda componente principal é observada em toda a região de estudo, tendo valores menores de variabilidade na região onde se concentram os maiores conteúdos de CTO, entre 30°S e 45°S (Figura 3d).

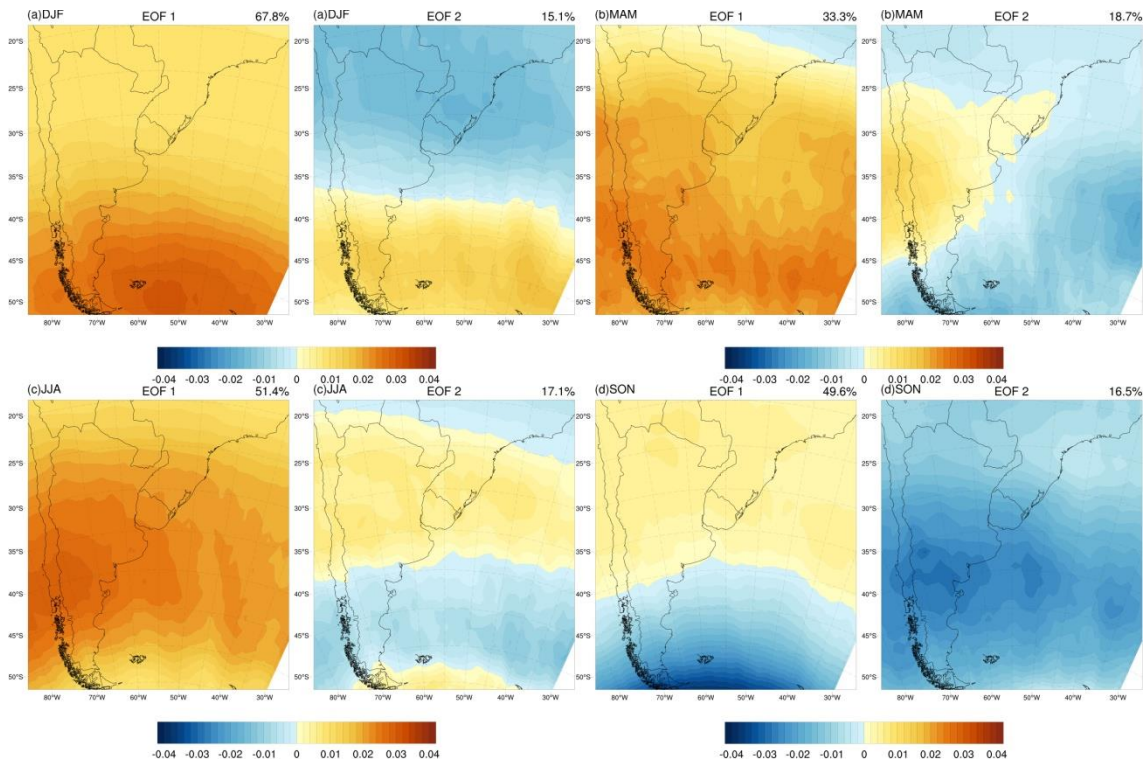


Figura 8 - Distribuição espacial sazonal da primeira e segunda EOF da Coluna Total de Ozônio para a região sul da América do Sul para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Os gráficos da representação espacial, das EOFs para os dados de RUV do tipo DED, possuem apenas a primeira componente principal (EOF1) para os trimestres DJF, MAM, JJA, SON, pois as demais componentes não apresentam valores a serem destacados (DJF: EOF2 2,8% e

EOF3 1,7%, MAM: EOF2 1,9% e EOF3 1,0%, JJA: EOF2 6,8% e EOF3 1,2%, SON: EOF2 2,7% e EOF3 1,6%) pra nenhuma região (Apêndice B), e justamente pela falta de representatividade espacial e temporal e também pelo critério de

Kaiser adotado, neste trabalho discute-se apenas a primeira componente principal (Figura 9).

Através da EOF1 (Primeira Componente Principal) da RUV do tipo DED durante o período de DJF, verifica-se um padrão de variabilidade dos dados de RUV de 87% apresentando contribuições negativas na maioria região do sul da AS, com pouca representação positiva em uma pequena faixa do estado de Minas Gerais (Figura 9a). Para o trimestre MAM é possível observar a contribuição negativa, acumulando 95,5% da variabilidade total dos dados na primeira componente principal (Figura 9b), o que pode ser explicado tanto no trimestre MAM quanto no trimestre DJF, pois a média de RUV nesses dois trimestres é maior nessa região devido à maior incidência de radiação solar nestes períodos, fazendo com que a variabilidade da RUV não seja tão grande.

A variabilidade no trimestre JJA é representada por 86,4% somente na primeira CP

(Figura 9c), de acordo com o truncamento de Kaiser obtida com respeito a Dose Eritêmica Diária, com valores de correlação positivos. Existe assim uma correlação forte direta, indicando que durante o período analisado, existe uma concordância de sinais entre as variáveis originais e o primeiro padrão de sequência obtido, onde nota-se essa contribuição devido a neste período do ano a radiação incidente sobre esta região ser menor, possivelmente por conta dos maiores valores observados da variabilidade Coluna Total de Ozônio (Figura 2c). O trimestre SON (Figura 9d), semelhante ao trimestre JJA apresenta uma contribuição positiva na primeira componente principal com mais de 90% da variabilidade dos dados. Isso pode estar relacionado com as quedas de CTO, que neste período do ano ocorrem provenientes dos efeitos secundários do Buraco de Ozônio na região sul da América do Sul, assim aumentando a variabilidade da RUV.

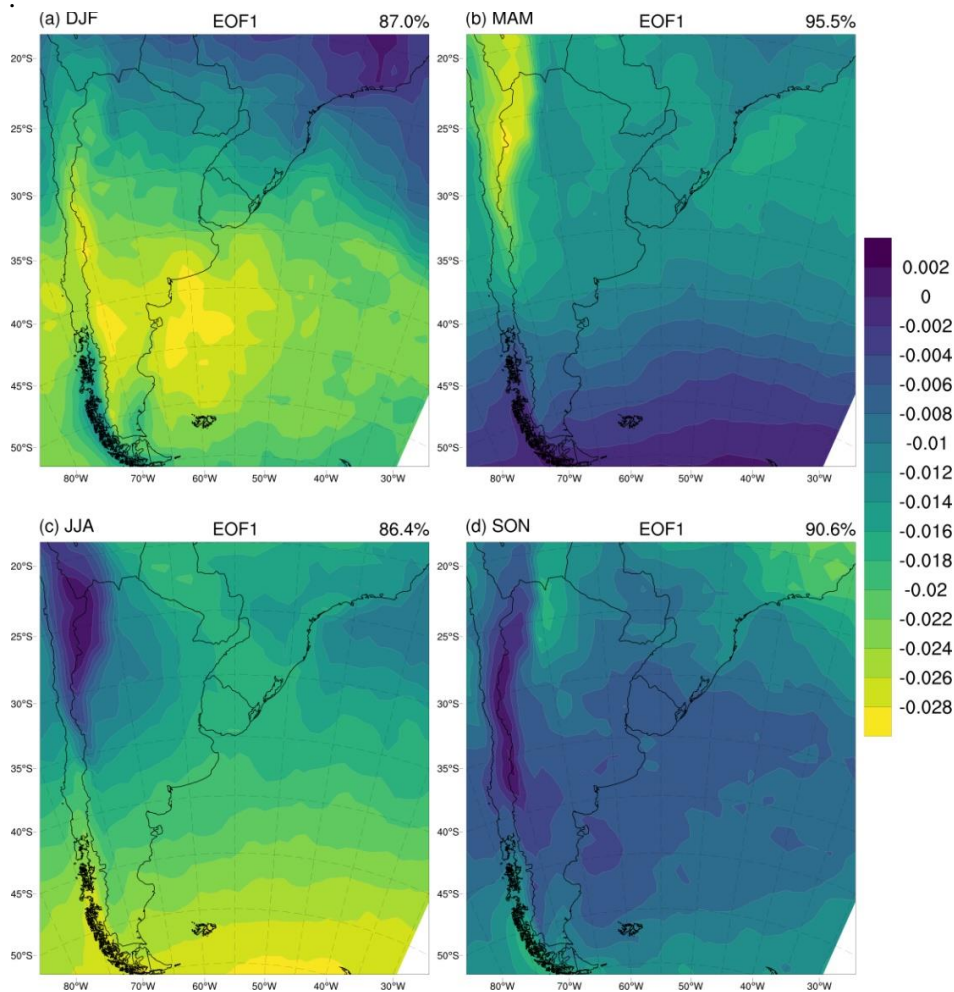


Figura 9 - Distribuição espacial sazonal da primeira EOF da Dose Eritêmica Diária para a região sul da América do Sul para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Em situações onde é necessário mostrar a dependência que uma variável exerce sobre outra, é utilizada a regressão linear simples, na tentativa de explicar estes valores em termos de uma com a outra variável. Aqui, vamos utilizar a regressão linear de forma a determinar as respostas das anomalias de RUV em função da variabilidade sazonal da CTO.

Assim, procurou-se em um primeiro momento verificar a resposta que a variável Coluna

Total de Ozônio dará de representatividade as variações sazonais da RUV através da distribuição espacial de suas anomalias.

Para isto, foi calculada a regressão linear simples entre a primeira componente principal (EOF1) da Coluna Total de Ozônio vs. as anomalias de Dose Eritêmica Diária na região do sul da América do Sul.

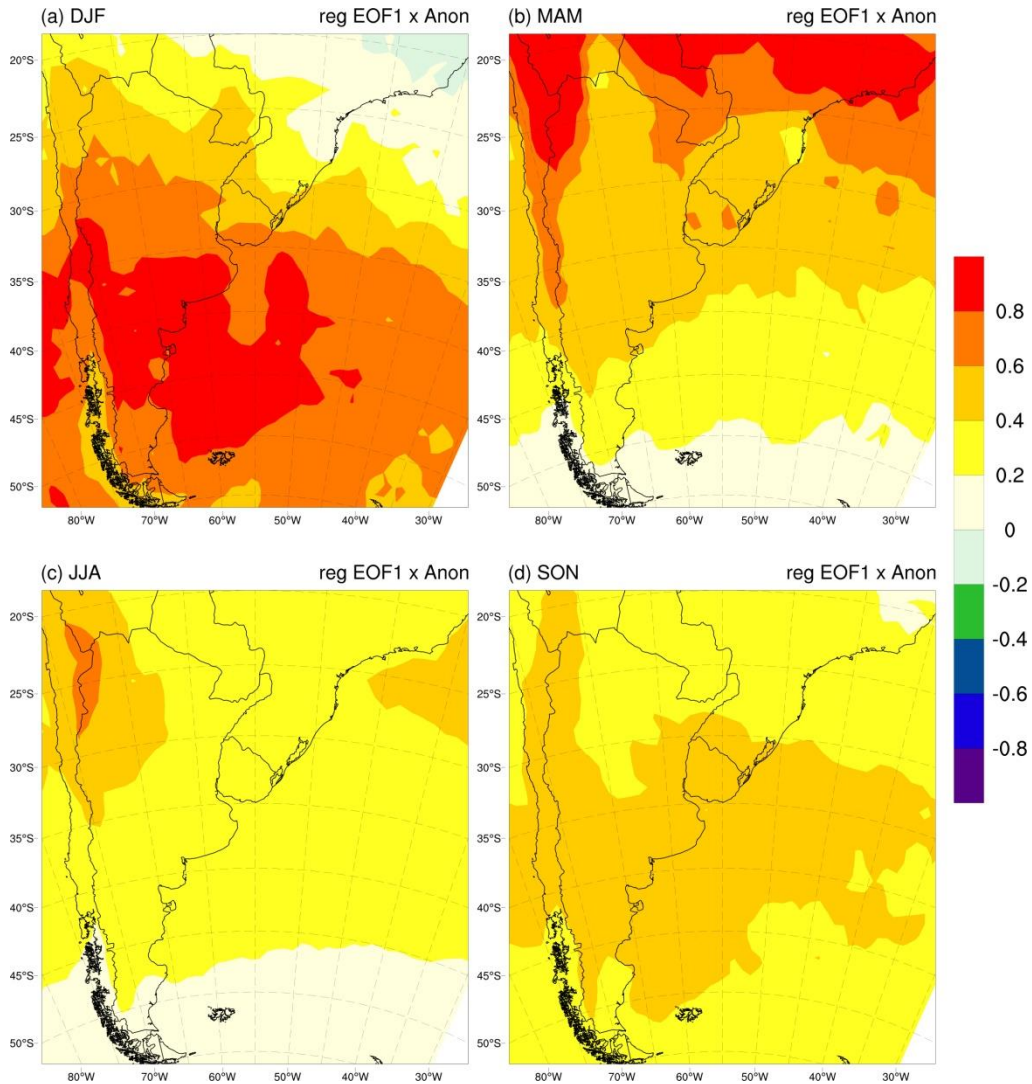


Figura 10 - Regressão linear simples entre a primeira EOF (EOF1) da Coluna Total de Ozônio vs. a anomalia da Dose Eritêmica Diária para os quatro trimestres na região sul da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

A regressão linear entre a EOF1 de CTO vs. as anomalias de RUV para o trimestre DJF (Figura 10a) mostra um padrão semelhante ao da média da RUV, com coeficiente de correlação positivo em toda região da AS, devido à maior incidência de radiação solar nesse período, com o coeficiente de correlação com valores acima de 0,6 no sul do Uruguai e Rio Grande do Sul, chegando a 0,8 na região do sudeste e centro da Argentina. Os trimestres MAM (Figura 10b) e JJA (Figura 10c) mostram uma menor influência da Coluna Total de Ozônio na RUV em relação à observada no trimestre DJF, tendo no trimestre JJA uma maior dependência ($>0,7$) da CTO em relação à RUV na região da Cordilheira dos Andes.

Conclusões

A presente pesquisa buscou avaliar o comportamento da Coluna Total de Ozônio e da RUV no Sul da América do Sul, bem como a influência/dependência da CTO sobre a RUV no período de 2005 a 2014. Foi possível identificar as regiões de maior variabilidade da CTO e RUV de acordo com a sazonalidade. Os resultados deste trabalho mostraram que a análise mensal da Coluna Total de Ozônio para o decênio de 2005 a 2014 apresenta uma maior variabilidade meridional no trimestre SON na região da América do Sul, entretanto os menores valores ficam são encontrados no trimestre MAM. Os resultados mostraram que a análise mensal da Coluna Total de Ozônio, para o decênio de 2004 a 2014 apresentam uma maior variabilidade meridional no trimestre SON na região da América do Sul chegando a registrar diferenças de até 100 UD. Os menores valores da Coluna Total de Ozônio foram encontrados no trimestre MAM, variando entre 40 e 50 UD).

Quanto aos valores encontrados para o Índice Ultravioleta, a análise dos dados do sensor OMI apresenta que o I-UV se concentram de 7 a 13 unidades ao longo de todo continente sul americano no trimestre DJF. Os trimestres MAM e JJA apresentam queda acentuada nos valores do I-UV entre as latitudes de 20°S a 40°S registrando valores entre 2 a 7 unidades devido ao ciclo solar anual.

As análises dos casos estudados comprovaram que apenas os baixos níveis de ozônio não são determinantes para os altos valores de RUV. Os meses entre julho e outubro apresentam grandes áreas no sul da América do Sul com forte correlação inversa apresentando

significância estatística na região do sul do Chile e Argentina.

De acordo com o padrão de variabilidade de CTO e RUV, pode-se perceber que o primeiro padrão da CP mostrou que nos meses que possuem forte correlação direta (maior variabilidade dos dados) ocorrem nos trimestres JJA e SON. A regressão linear apresentou uma maior dependência/resposta da influência da CTO na RUV no trimestre DJF chegando a valores maiores que 0,8. Estes resultados indicam que, a relação entre a CTO e a RUV nem sempre são representados pelo padrão inverso (aumento de RUV devido ao decaimento da CTO), onde essas relações variam de acordo com a sazonalidade e localidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro desta pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas (PPGMET/UFPEL) e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (PGMET/INPE).

Referências

- Alkemade, F. J. M. Empirical Orthogonal Function (EOF) Analysis of Ozone Variability., 1995. In: Studies In Environmental Science. Elsevier p. 275-278. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(06\)80211-6](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(06)80211-6)
- André, I. R. N., Ferreira, N. J., Conforte, J. C. Análise do comportamento do ozônio estratosférico na América do Sul e vizinhanças utilizando-se imagens do satélite Nimbus7/TOMS. Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 11. 2003. Belo Horizonte - Mg. Anais... Belo Horizonte - Mg, 2003.
- Aun, M., Lakkala, K., Sanchez, R., Asmi, E., Nollas, F., Meinander, O., Sogacheva, L., De Bock, V., Arola, A., de Leeuw, G., Aaltonen, V., Bolsee, D., Cizkova, K., Mangold, A., Metelka, L., Jakobson, E., Svendby, T., Gillotay, D., Van Opstal, B. UV radiation measurements in Marambio, Antarctica during years 2017–2019 in a wider temporal and spatial context. Atmospheric Chemistry and

- Physics, Discuss., <https://doi.org/10.5194/acp-2019-896>, in review, 2019.
- Bais, A. F., McKenzie, R. L., Bernhard, G., Aucamp, p. J., Ilyas, M., Madronich, S., Tourpali, K., 2015. ozone depletion and climate change: Impacts on Uv radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 14, 19-52. <https://doi: 10.1039/c4pp90032d>.
- Ball, W. T., Kuchar, A., Rozanov, E. v., Staehelin, J., Tummon, F., Smith, A. K., Schmutz, W., 2016. An upper-branch Brewer-Dobson circulation index for attribution of stratospheric variability and improved ozone and temperature trend analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 15485-15500. <https://doi.org/10.5194/acp-16-15485-2016>
- Ball, W. T., Alsing, J., Staehelin, J., Davis, S. M., Froidevaux, L., Peter, T., 2019. Stratospheric ozone trends for 1985–2018: sensitivity to recent large variability. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss*, 19, 12731–12748. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12731-2019>
- Bencherif, H., Amraoui, L. E., Kirgis, G., Bellevue, J. L. D., Hauchecorne, A., Mzé, n., Portafaix, T., Pazmino, A., Goutail, F., 2011. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4 E, 70.3e). *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, 11, 363–373.
- Bittencourt, G. D., Bresciani, C., Pinheiro, D. K., Bageston, J. v., Schuch, n. J., Bencherif, H., Leme, n. P., Peres, L. v., 2018. A Major Event of Antarctic Ozone Hole Influence In Southern Brazil In October 2016: An Analysis of Tropospheric and Stratospheric Dynamics. *Annales Geophysicae*, 36, 415–424. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-415-2018>.
- Bittencourt, G. D., Pinheiro, D. K., Bageston, J. V., Bencherif, H., Steffanel, L. A., Vaz Peres, L., 2019. Investigation of the behavior of the atmospheric dynamics during occurrences of the ozone hole's secondary effect in southern Brazil, *Annales Geophysicae* Bencherif, H., Amraoui, L. E., Kirgis, G., Bellevue, J. L. D., Hauchecorne, A., Mzé, n., Portafaix, T., Pazmino, A., Goutail, F., 2011. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4 E, 70.3e). *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, 11, 363–373., 37, 1049–1061, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-1049-2019>.
- Bombardi, R. J., Carvalho, L. M. v., 2017. Simple practices in climatological analyses: A review. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 311-320. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230001>
- Bracci, A., Cristofanelli, P., Sprenger, M., Bonafe, U., Calzolari, F., Duchi, R., Laj, P., Marinoni, A., Roccató, F., Vuillermoz, E., Bonasoni, P., 2012. Transport of stratospheric air masses to the Nepal Climate Observatory-Pyramid (Himalaya; 5079 M Msl): A Synoptic-Scale Investigation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 51, n. 8, p. 1489-1507. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0154.1>
- Braesicke, P., Keeble, J., Yang, X., Stiller, G., Kellmann, S., Abraham, n., Archibald, A., Telford, P., Pyle, J., 2013. Circulation anomalies in the Southern Hemisphere and ozone changes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, 13, 10677-10688. <https://doi.org/10.5194/acp-14-10431-2014>
- Bresciani, C., Bittencourt, G. D., Bageston, J. V., Pinheiro, D. K., Schuch, N. J., Bencherif, H., Leme, N. P., Peres, L. V., 2018. Report of a large depletion in the ozone layer over southern Brazil and Uruguay by using multi-instrumental data. *Annales Geophysicae*, 36, 405–413, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-405-2018>.
- Butchart, N., 2014. The Brewer-Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*, v. 52, n. 2, p. 157-184. <https://doi.org/10.1002/2013RG000448>
- Camp, C. D., Roulston, M. S., Yung, Y. L. , 2003. Temporal and spatial patterns of the interannual variability of total ozone in the tropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, D20. <https://doi.org/10.1029/2001JD001504>.
- Cavalcanti, I. F. A., Ferreira n. J., Silva M. G. A. J., Silva Dias M. A. F., 2009. Tempo e clima no Brasil. *oficina De Textos*, São Paulo; 463 p.
- Chiodo, G., Polvani, L. M., Marsh, D. R., Stenke, A., Ball, W., Rozanov, E., Muthers, S., Tsigaridis, K., 2018. The response of the ozone layer to quadrupled CO2 concentrations. *Journal of Climate*, v. 31, n. 10, p. 3893–3907. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0086.1>
- Coariti, J. R., Fernandez, J. H., Spyrides, M. H. C., de Paula Corrêa, M., Leme, N. P., Pedra, G. U., & da Silva, F. R. 2018. Metodologia para validação de dados coletados por espectrofotômetros Brewer (Data validation methodology for Brewer Spectrophotometer operating). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11, 601-611.

- Cohen, Y., Petetin, H., Thouret, v., Marécal, v., Josse, B., Clark, H., Boulanger, D., 2018. Climatology and long-term evolution of ozone and carbon monoxide in The Upper Troposphere Lower Stratosphere (UTLS) at northern midlatitudes, as seen by Iagos from 1995 to 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 5415-5453. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5415-2018>.
- Corrêa, M., Plana-Fattori, A., 2006. Uma análise das variações do índice ultravioleta em relação às observações de conteúdo de ozônio e da espessura óptica dos aerossóis sobre a cidade de São Paulo. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 21, 24–32.
- Damiani, A., Cordero, R. R., Cabrera, S., Laurenza, M., Rafanelli, C., 2014. cloud cover and UV index estimates in Chile from satellite-derived and ground-based data. *Atmospheric Research*, 138, 139-151. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.006>
- Dennison, F. W., A. J. McDonald, and O. Morgenstern, 2016. The influence of ozone forcing on blocking in the Southern Hemisphere, *Journal Geophysical Research: Atmosphere*, 121, 14, 358–14, 371, doi:10.1002/2016JD025033.
- Dobson, G. M. B. , 1968. Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: A history. *Applied Optics*, Optical Society of America, 7, 387–405. <https://doi.org/10.1364/AO.7.000387>
- Du Preez, D., Ajti, J., Bencherif, H., Bèngue, n., Cadet, J. M., Wright, C., Ajtic, J., 2019. Spring and summer time ozone and solar ultraviolet radiation variations over Cape Point, South Africa. In: *Annales Geophysicae*. p. 129-141. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-129-2019>
- Echer, E., Souza, M., Schuch, n., 2001. The Beer's Law applied to the earth's atmosphere. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Scielo Brasil, 23, 276–283.
- Fioletov, v. Ozone climatology, trends, and substances that control ozone., 2008. *Atmosphere-Ocean*, Taylor & Francis, v. 46, 39-67. <https://doi.org/10.3137/ao.460103>
- Gottelman, A., Hoor, P., Pan, L., Randel, W., Hegglin, M. I., Birner, T., 2011. The Extratropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, 49, 3. <https://doi.org/10.1029/2011RG000355>
- Gonzalez, p. L., Polvani, L. M., Seager, R., Correa, G. J., 2014. Stratospheric Ozone Depletion: A key driver of recent precipitation trends in south eastern South America. *Climate Dynamics*, Springer, 42, 1775-1792. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1777-x>
- Grise, K. M., Polvani, L. M., Tselioudis, G., Wu, Y., Zelinka, M. D., 2013. The ozone hole indirect effect: cloud-radiative anomalies accompanying the poleward shift of the eddy-driven jet in the Southern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, 40, 3688-3692. <https://doi.org/10.1002/grl.50675>
- Grise, K. M., Son, S.-W., Correa, G. J., Polvani, L. M., 2014. The response of extratropical cyclones in the Southern Hemisphere to stratospheric ozone depletion in the 20th century. *Atmospheric Science Letters*, Wiley Online Library, 15, 29-36. <https://doi.org/10.1002/asl2.458>
- Grimm, A. M., 2009. *Clima da região sul do Brasil. Tempo E Clima No Brasil. São Paulo: oficina De Textos*, 259-275.
- Guarnieri, R. A., Padilha, L. F., Guarnieri, F. L., Echer, E., Makita, K., Pinheiro, D. K., Schuch, A. M. P., Boeira, L. S., Schuch, N. J., 2004. A study of the anticorrelations between ozone and UV-B radiation using linear and exponential fits in southern Brazil. *Advances In Space Research*, 34, 764–768. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.06.040>
- Hauchecorne, A., Godin, S., Marchand, M., Heese, B., Souprayen, C., 2002. Quantification of the transport of chemical constituents from the polar vortex to midlatitudes in the lower stratosphere using the high-resolution advection model MIMOSA and effective diffusivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, 107, 3 2. <http://doi.org/10.1029/2001JD000491>
- Hegglin, M., Gettelman, A., Hoor, P., Krichevsky, R., Manney, G., Pan, L., Son, S.-W., Stiller, G., Tilmes, S., Walker, K., 2010. Multimodel assessment of the Upper Troposphere and Lower Stratosphere: Extratropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, 115, D3. <https://doi.org/10.1029/2010JD013884>
- Hupfer, N. T., Kall, E., Peres, L. V., Schuch, N. J., Pinheiro, D. K., Lemes, N. M. p. Comparação da radiação ultravioleta quando da ocorrência dos eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil dos dias 16/10/2003 e 28/09/2008. In: *Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society. 12th International Congress of The Brazilian Geophysical Society & Expogef*, Rio De Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011. [S.L.], 2011. 2035–2038.

- Janjai, S., Wisitsirikun, S., Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., Wattan, R., Masiri, I., Bhattarai, B. K., 2014. Comparison of UV Index From Ozone Monitoring Instrument (Omi) With Multi-Channel Filter Radiometers At Four Sites In The Tropics: Effects of Aerosols and Clouds. *International Journal of Climatology*, 34, 453-461. <https://doi.org/10.1002/joc.3698>
- Kirchhoff, v. W. J. H., Schuch, n. J., Pinheiro, D. K., Harris, J. M., 1996. Evidence for an ozone hole perturbation at 30° south. *Atmospheric Environment*, 33, 1481-1488.
- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., Yang, K., 2006. Band Residual Difference algorithm for retrieval of so2 from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Ieee Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, 44, 1259-1266. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.861932>
- Krzyścin, J. W., 1996. UV controlling factors and trends derived from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1976–1994. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, 101, 16797–16805.
- Lamy, K., Portafaix, T., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Morel, B., Pazmino, A., Metzger, J. M., Auriol, F., Deroo, C., Duflet, V., Goloub, P., and Long, C. N., 2018. Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics, *Atmospheric Chemistry Physics*, 18, 227 -246, <https://doi.org/10.5194/acp-18-227-2018>.
- Lenzi, E; Favero, L. O. B. *Introdução À Química Da Atmosfera: Ciência, Vida E Sobrevivência*. Grupo Gen-Ltc, 2000.
- Levelt, P. F., Joiner, J., Tamminen, J., Veefkind, J. P., Bhartia, p. K., Zweers, D. C. S., Duncan, B. n., Streets, D.G., Eskes, H., Van Der, R. A., Mclinden, C., Fioletov, v., Carn, S., De Laat, J., Deland, M., Marchenko, S., Mcpeters, R., Ziemke, J., Fu, D., Liu, X., Pickering, K., Apituley, A., Abad, G. G., Arola, A., Boersma, F., Miller, C. C., Chance, K., De Graaf, M., Hakkarainen, J., Hassinen, S., Ialongo, I., Kleipool, Q., Krotkov, n., Li, C., Lamsal, L., Newman, P., Nowlan, C., Suleiman, R., Tilstra, L., G., Torres, O., Wang, H., Wargan, K., 2018. The Ozone Monitoring Instrument: Overview of 14 years in space. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 5699-5745. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>
- London, J. *Observed Distribution of Atmospheric Ozone and Its Variations*. In: Whitten, R. C., Prasad, S. S. Ed. *Ozone In The Free Atmosphere*. New York: Van Nostrand Reinhold. Cap. 1, 11–80. 1985.
- Lopo, A. B., Spyrides, M. H. C., Lucio, P. S., Sigró, J., 2013. radiação ultravioleta, ozônio total e aerossóis na cidade de Natal-Rn. *Holos*, 6, 3-21.
- Lu, J., Xie, F., Tian, W., Li, J., Feng, W., Chipperfield, M., Ma, X. Interannual Camp, Charles D., Roulston, Mark S.; Yung, Yuk L., 2019. Temporal and spatial patterns of the interannual variability of total ozone in the tropics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, n. D20, 2003. Variations In Lower Stratospheric Ozone During The Period 1984–2016. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 8225-8241.
- Mariano, E. V. C, Mariano, G. L, Moura, M. A. L, 2017. Reações fotoquímicas na troposfera e estratosfera, in: Mariano, G. L, Nunes, A, B. *Meteorologia em Tópicos: Volume 5*. Clube dos Autores, Pelotas, pp. 171-200.
- Maycock, A., 2016. The contribution of ozone to future stratospheric temperature trends. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, 43, 4609-4616. <https://doi.org/10.1002/2016GL068511>
- McPeters, R., Frith, S., Labow, G., 2015. OMI total column ozone: extending the long-term data record. *Atmospheric Measurement Techniques*, Copernicus Gmbh, 8, 4845–4850. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4845-2015>
- Mohanakumar, K. *Stratosphere troposphere interactions: An introduction*. Springer Netherlands, 2009. ISBN 9789048119424.
- Nozawa H., Yamamoto H., Makita, K., Schuch n. J., Pinheiro D. K., Carbone S., Mac-Mahon, R. M., Foppiano A. J., 2007. Ground-Based Observation of Solar UV Radiation In Japan, Brazil and Chile. *Revista Brasileira De Geofísica*, 25, 17-25.
- OMI Team Et Al. *Ozone Monitoring Instrument (Omi) Data User’s Guide*. Washington Dc: Nasa, 2012.
- Oberländer-Hayn, S., Gerber, E. P., Abalichin, J. A., Hideharu K., Andreas K., A, (2016). Is the Brewer-Dobson circulation increasing or moving upward? *Geophysical Research Letters*, 43, 1772-1779. <https://doi.org/10.1002/2015GL067545>
- Peres, L. V., Reis, N. Cordero Simões Dos; Santos, L. De Oliveira Dos; Bittencourt, G. D., Schuch, A. P., Anabor, v., Pinheiro, D. K., Schuch, n. J., Leme, N. M. P., 2016. Análise atmosférica dos eventos de efeito secundário do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil em 2012. parte 1: identificação dos eventos e análise da

- dinâmica da estratosfera. *Ciência E Natura*, Universidade Federal De Santa Maria, v. 38, n. 1.
- Peres, L.V., Bencherif, H., Mbatha, n., Schuch, A.P., Toiher, A. M., Bègue, n., Portafaix, T., Anabor, V., Pinheiro, D. K; Leme, N. M. P., Bageston, J.V., Schuch, N. J., 2017. Measurements of the total ozone column using a Brewer spectrophotometer and TOMS and OMI satellite instruments over the southern space observatory in Brazil. *Annales Geophysicae*, 35, 25-37. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-25-2017>
- Peres, L. V., Pinheiro, D. K., Steffemel, L. A., Mendes, D., Bageston, J. v., Bittencourt, G. D., Schuch, A. P., Anabor, V., Leme, N. M. P., Schuch, N. J., 2019. Monitoramento de longo prazo e climatologia de campos estratosféricos quando da ocorrência dos eventos de influência do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil. *Revista Brasileira De Meteorologia*, Scielo Brasil, 34, 151-163. <https://doi.org/10.1590/0102-77863340030>
- Ploeger, F., Konopka, P., Mueller, R., Fueglistaler, S., Schmidt, T., Manners, J. C., Grooss, J. U., Guenther, G., Forster, p. M., Riese, M., 2012. Horizontal transport affecting trace gas seasonality in the Tropical Tropopause Layer (TTL). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D09303.
- Polvani, L. M., Wang, L., Abalos, M., Butchart, n., Chipperfield, M. P., Dameris, M., Stone, K. A., 2019. Large impacts, past and future, of ozone-depleting substances on Brewer-Dobson circulation trends: A multimodel assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 6669–6680. <https://doi.org/10.1029/2018JD029516>
- Polichtchouk, I., Shepherd, T. G., Hogan, R. J., Bechtold, P. , 2018. Sensitivity of The Brewer–Dobson circulation and polar vortex variability to parameterized nonorographic gravity wave drag in a high-resolution atmospheric model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75, 1525-1543. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0304.1>
- Salby, M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. [S.L.]: Elsevier, 1996.
- Salby, M. L. Involvement of The Brewer–Dobson circulation in changes of stratospheric temperature and ozone. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44, 143-164.
- Schmalfuss, L. S. M., Mariano, G. L., Pinheiro, D. K., & Peres, L. V. (2014). Análise dos dois principais fatores de decaimento da coluna total de Ozônio sobre o sul da América do Sul. *Ciência e Natura*, 36, 415-422.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution To Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Sliney, D. H. , 2007. Radiometric quantities and units used in photobiology and photochemistry: recommendations of the commission internationale de L’éclairage (International Commission On Illumination). *Photochemistry and Photobiology*, 83, 425-432. <https://doi.org/10.1562/2006-11-14-RA-1081>
- Shepherd, T. G., 2008. Dynamics, stratospheric ozone, and climate change. *Atmosphere–Ocean*, Taylor & Francis, 46, 117–138. <https://doi:10.3137/ao.460106>
- Slusser, J., Gibson, J., Bigelow, D., Kolinski, D., Mou, W., Koenig, G., Beaubien, A., 1999. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. *Applied Optics*, Optical Society of America, 38, 1543–1551. <https://doi.org/10.1364/AO.38.001543>
- Solomon, S., Haskins, J., Ivy, D. J., Min, F., 2014. Fundamental differences between Arctic and Antarctic ozone depletion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 6220–6225. doi:10.1073/pnas.1319307111
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., & Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269–274. doi:10.1126/science.aae0061
- Son, S. W., Gerber, E. P., Perlwitz, J., Polvani, L. M., Gillett, N. P., Seo, K. H., Austin, J. (2010). Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D3). <https://doi.org/10.1029/2010JD014271>
- Stohl, A., Wernli, H., Bourqui, M., Forster, C., James, P., Liniger, M. A., Seibert, P., Sprenger, M. 2003. A New perspective of Stratosphere-Troposphere Exchange. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1565-1573. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-11-1565>
- Tanskanen, A., Lindfors, A., Määttä, A., Krotkov, N., Herman, J., Kaurola, J., McKenzie, R. (2007). Validation of daily erythemal doses from Ozone Monitoring Instrument with ground-based UV measurement data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D24). <https://doi.org/10.1029/2007JD008830>
- Toiher, A. M., Portafaix, T., Sivakumar, v., Bencherif, H., Pazmiño, A., Bègue, n.

- Variability and Trend In Ozone Over The Southern Tropics and Subtropics, *Annales Geophysicae*, 36, 381-404, 2018. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-381-2018>
- Thompson, D. W. J; Wallace, J. M., 2000. Annular Modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13, 1000-1016. <https://doi.org/10.1175/1520-0442>
- Vargin, P. N., Nikiforova, M. P., Zvyagintsev, A. M. 2020. Variability of the Antarctic ozone anomaly in 2011-2018. *Russian Meteorology and Hydrology*, 45, 63-73. doi: 10.3103/S1068373920020016
- Veefkind, J. P., Haan, J. F. De; Brinksma, E. J., Kroon, M., Levelt, P. F., 2006. Total Ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) Using The DOAS Technique. *Ieee Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, Ieee, 44, 1239–1244.
- Xie, F., Li, J., Tian, W., Zhang, J., & Shu, J., 2014. The impacts of two types of El Niño on global ozone variations in the last three decades. *advances In Atmospheric Sciences*, 31, 1113-1126. <https://10.1007/s00376-013-3166-0>
- Wakamatsu, S., Uno, I., Ueda, H., Uehara, K., Tateishi, H., 1989. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the Lower Troposphere. *Atmospheric Environment* (1967), Elsevier, 23, 18151826.
- Weber, M., Dikty, S., Burrows, J. P., Garny, H., Dameris, M., Kubin, A. J., Abalichin, J., Langematz, U., 2011. The Brewer-Dobson circulation and total ozone from seasonal to decadal time scales. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11221–11235. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11221-2011>
- Wilks, D. S., 2006 *Statistical Methods in The Atmospheric Science*. California, Usa. 2ed. Academic Press.
- Wilson, R. C., Fleming, Z. L., Monks, p. S., Clain, G., Henne, S., Konovalov, I. B., Menut, L., 2011. Have primary emission reduction measures reduced ozone across Europe? An analysis of european rural background ozone trends 1996–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss*, 11, 18433-18485. <https://doi.org/10.5194/acp-12-437-2012>
- Young, P. J., Rosenlof, K. H., Solomon, S., Sherwood, S. C., Fu, Q., Lamarque, J. F., 2012. Changes in stratospheric temperatures and their implications for changes in the Brewer Dobson circulation, 1979-2005. *Journal of Climate*, 25, 1759–1772. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4048.1>
- Yamamoto, A. L. C., Corrêa, M. D. P., Ccoyllo, O. R. S., 2018. Validation and Analysis of UV Radiation Time Series Collected In Different Peruvian Sites. *Revista Brasileira De Meteorologia*, Scielo Brasil, 33, 298–305. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332011>.