

VARIABILIDADE TEMPORAL DO OZÔNIO NA AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO IMAGENS OBTIDAS PELO SENSOR TOMS

Iara Regina Nocentini ANDRÉ¹

Nelson Jesus FERREIRA²

Leticia Palazzi PEREZ³

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento sazonal e interanual do ozônio estratosférico na América do Sul, utilizando-se imagens obtidas pelo instrumento Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) instalado a bordo do satélite Nimbus7. As análises foram feitas aplicando-se a técnica das funções ortogonais empíricas em imagens médias mensais para o período de 1979 a 1992. Os resultados obtidos indicam que os principais modos do padrão espacial do ozônio estão associados com a dependência latitudinal (ciclo anual), expansão do buraco de ozônio na Antártica, a oscilação quase-bianual, e influências de episódios El Niño.

Palavras-chave: ozônio; imagens TOMS; EOF.

Abstract

Time variability of total ozone in South America using TOMS data

This paper deals with the seasonal and inter-annual variability of stratospheric ozone in South America using imagery obtained by the ozone mapping spectrometer (TOMS) instrument carried onboard the Nimbus 7 satellite. The analyses were done applying empirical orthogonal functions in monthly mean images for the jan1979 to dez1992 period. The main spatial modes of the total ozone are related to the latitudinal dependence (annual cycle), expansion of the Antarctic ozone hole, the quasi-biennial oscillation and influences of the El Niño episodes.

Key-words: ozone; TOMS image; EOF.

¹ Pós-doutoranda da Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. Bolsista de Pós-doutorado da Fapesp. E-mail: iara@ltid.inpe.br

² Pesquisador Titular da Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. E-mail: nelson@ltid.inpe.br

³ Bolsista PCI - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE. E-mail: leticia@ltid.inpe.br

INTRODUÇÃO

Diversos estudos enfocaram o problema da variabilidade espacial e temporal do ozônio estratosférico utilizando dados transmitidos por satélites ambientais. Um dos primeiros trabalhos neste sentido foi feito por Stanford et al. (1996) que analisaram o comportamento dos dados TOMS para o período 1979-1991 utilizando a análise espectral para apresentar uma climatologia dessa variável. Bowman (1989) mostrou que a variabilidade da oscilação quase-bianual (QBO) do ozônio na região equatorial geralmente está anticorrelacionada com o ozônio nos subtropicais apresentando inclusive um padrão muito mais simétrico daquele que se imaginava na época. Os dados do TOMS também foram utilizados por Shiotani (1992) que diagnosticou diversos tipos de periodicidades (por exemplo, anual, quase-bianual,, etc) na região equatorial. Kayano (1997) analisou o total de ozônio derivado do TOMS e suas conexões com a Oscilação do Sul (OS). De acordo com os resultados obtidos por ela, os dois primeiros modos das componentes principais da variabilidade mensal de ozônio global estão associados com extremos da Oscilação do Sul. Kane e Sahai (1998) avaliaram as conexões do vento zonal na região equatorial e a temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico com as oscilações QBO e quase-tri-anual. do ozônio. Além deste estudo, Ambrizzi et al. (1998) mostrou que o modo dominante da variabilidade interanual em escala planetária da concentração do ozônio está fortemente associado com o fenômeno El Niño Oscilação do Sul (ENSO). Eles destacaram que a concentração do ozônio mostra uma forte teleconexão com o padrão ENSO de onda 1 nos extratropicais do Hemisfério Sul.

Os trabalhos mencionados relativos ao uso dos dados TOMS para monitoramento do ozônio estratosférico enfatizaram a variabilidade global deste gás. Entretanto, há necessidade de avaliar e caracterizar o seu comportamento a nível regional, principalmente na América do Sul, onde o efeito do buraco do ozônio em áreas habitadas ainda não foi suficientemente avaliado. Neste contexto, os dados transmitidos por satélites ambientais têm um papel muito importante para diagnosticar a dinâmica do ozônio estratosférico. Com o intuito de contribuir para esta problemática, o objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento sazonal do ozônio estratosférico na América do Sul e no setor Ocidental da Antártida, aplicando-se a técnica das funções ortogonais empíricas para identificar os modos dominantes da concentração dessa variável, no período de 1979 a 1992.

DADOS DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO

Para a realização desta pesquisa foi utilizado o conjunto de imagens de ozônio obtido pelo instrumento TOMS instalado no satélite Nimbus7 (MCPETERS et al., 1996). Estas imagens são diárias e estão disponíveis pela NASA/TOMS com resolução espacial de 1° de latitude por 1° 25' de longitude, e abrangem o período da primavera e verão de 1978 a 1992. O instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) faz a medição do ozônio total, registrando a radiação ultravioleta em 6 comprimentos de onda e provê uma contínua medição da coluna de ozônio total. Esta coluna é a quantidade existente deste gás da superfície até o topo da atmosfera sobre determinada localidade. O valor da coluna é calculado pela medição de quanto a radiação de comprimento de onda entre 312 e 340nm foi dispersa na atmosfera. A radiação solar que entra na atmosfera nestes comprimentos de onda, penetra na baixa atmosfera (troposfera) onde é espalhada e refletida para as nuvens e superfície terrestre. As

relações entre a radiação que entra na atmosfera e o que é absorvido possibilita estimar a concentração de ozônio na coluna (KAYE, 1993).

FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS

A análise sazonal e interanual do ozônio estratosférico foram realizadas utilizando a técnica estatística das Funções Ortogonais Empíricas (EOF). As EOFs têm sido amplamente utilizadas em aplicações de sensoriamento remoto e meteorologia (HAAN, 1977; RICHARDS, 1986 e WILKS, 1995). De acordo com essa metodologia, primeiro determina-se a matriz de covariância a partir dos dados mensais de ozônio, posteriormente obtém-se os autovalores e os correspondentes autovetores dessa matriz. Após a obtenção dos autovalores e autovetores, calcula-se a nova matriz de dados, C , que é expressa por:

$$C = A^T F$$

onde, A^T é a matriz transposta dos autovetores; os elementos da matriz, C , recebem o nome de componentes principais, e F é uma matriz de dimensão $P \times M$, com P representando o número de pontos de grade. Após a obtenção da matriz de componentes principais pode-se determinar os *loadings*, que são as correlações entre as componentes principais e a série original dos dados. Na análise por EOF cada modo corresponde a um padrão. A visualização dos padrões espaciais das componentes principais foi feita com o uso do software Grid Analysis and Display System (GrADS) (DOTY, 1997).

RESULTADOS

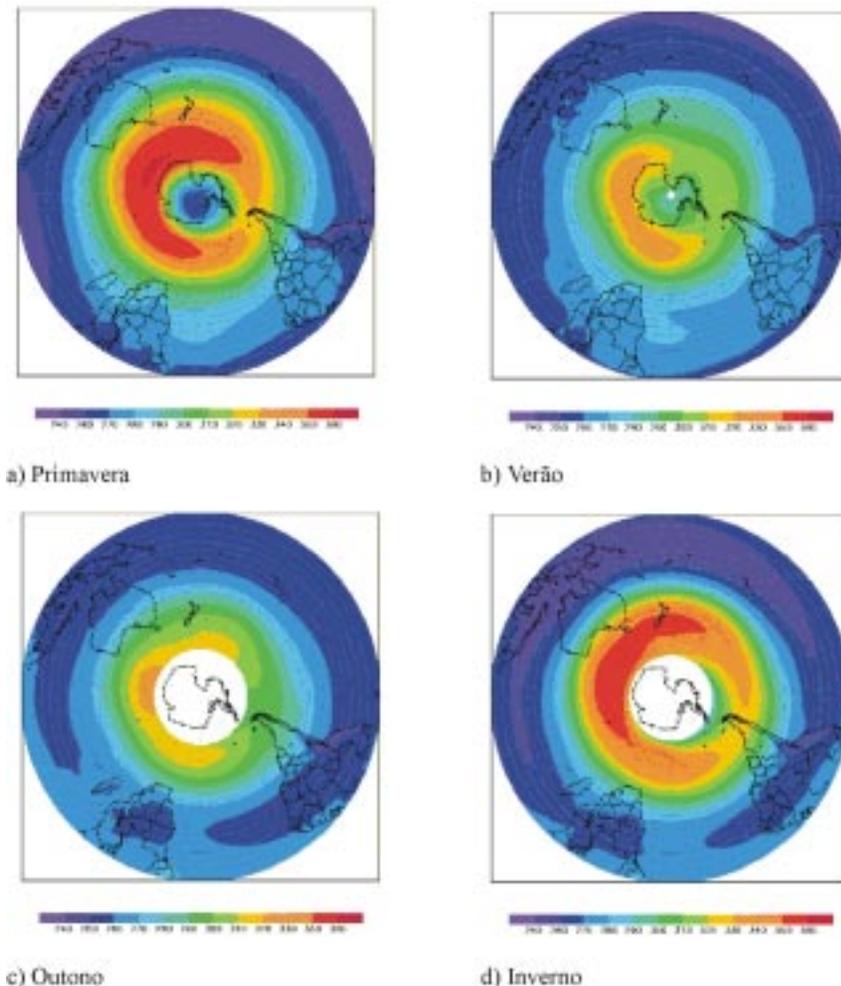
Esta seção avalia as principais componentes associadas à variabilidade mensal do ozônio estratosférico obtidas pelo sensor TOMS. A interpretação dos resultados das funções ortogonais é baseada na análise das imagens componentes e nos gráficos de autovetores. A série temporal dos autovetores reflete o peso de cada uma das imagens utilizadas na obtenção do padrão espacial de cada componente. Assim, se um mês apresenta um alto valor de autovetor, isto indica que ele contém um padrão espacial muito semelhante ao representado pela imagem componente. Quando o autovetor for negativo, o referido mês tem padrão inverso do demonstrado na imagem componente, ou seja, se o valor de ozônio for positivo na imagem componente, na realidade ele será negativo.

Comportamento sazonal do ozônio no Hemisfério Sul

Com o intuito de se ter uma visão geral da variabilidade do ozônio no Hemisfério Sul, e também como "background" para o entendimento dessa variável, apresenta-se na Figura 1 o seu comportamento sazonal. Na primavera (Figura 1a), o período de insolação começa a aumentar; assim, o ozônio produzido nas regiões equatoriais é distribuído para todo o hemisfério. Contudo, no início dessa estação, sob o pólo sul ainda existe a presença do vórtice polar antártico, que impede as trocas de massas

de ar com outras latitudes. Desta forma, a concentração de ozônio na região limite do vórtice tende a aumentar atingindo os maiores valores na primavera. Estas concentrações mais elevadas do ozônio, ao longo de 60°S (na faixa de baixas pressões das frentes polares) são denominadas na literatura de cinturão das altas concentrações, já que chegam a atingir valores de 500 UD em algumas ocasiões e quase contornam todo o hemisfério. Por outro lado, o retorno da luz solar sob o pólo sul proporciona energia suficiente para desencadear as reações químicas destruidoras do ozônio, formando o buraco da camada de ozônio (ANDERSON, 1991; SOLOMON, 1990 e KIRCHHOFF, 1996).

Figura 1 - Média sazonal do ozônio estratosférico, em unidades de Dobson, derivada das imagens obtidas pelo sensor TOMS, período de 1979 a 1992: a) primavera, b) verão, c) outono e d) inverno



No verão (Figura 1b), os valores observados sob o pólo sul são maiores, se comparados com a primavera, quando ocorre o buraco da camada de ozônio. Isto ocorre porque há mudanças na dinâmica atmosférica, quando o vórtice polar perde sua intensidade e torna-se uma circulação inexpressiva (Bowman, 1990). Isto faz com que os altos valores de ozônio encontrados na primavera na área das baixas subpolares comecem a diminuir e se desloquem para as altas latitudes, em direção as regiões polares (DOBSON, 1968).

As medições da concentração do ozônio estão diretamente relacionadas à presença de luz solar. Desta forma, no período do outono, a produção deste gás nas regiões equatoriais não possui a mesma intensidade que a observada na primavera e no verão. Portanto, com o início da noite polar no outono, a concentração deste gás nas regiões polares não é monitorada. No outono (Figura 1c), há uma limitada variação dos valores de ozônio com a latitude, ou seja, a variabilidade deste gás é menor.

No período do inverno (Figura 1d), ocorre à presença da noite polar, característica desta estação, e, portanto, não há o monitoramento deste gás nas regiões polares. Durante este período, estas regiões ficam escuras e o aquecimento pela radiação ultravioleta solar acaba, assim as emissões de radiação térmica resfriam rapidamente a estratosfera polar, apresentando temperaturas menores que as da estratosfera das latitudes médias. À medida que a estratosfera antártica resfria-se, ocorre subsidência de ar durante o inverno. Um gradiente latitudinal de pressão se desenvolve entre o pólo e as latitudes médias. Assim, o efeito de Coriolis gera uma forte circulação de oeste em torno do pólo, produzindo um anel circumpolar de vento para leste, denominado vórtice polar (BOWMAN, 1990; WMO/ UNEP, 1992; WMO/ UNEP, 1994). Devido ao aumento das áreas sob a influência do vórtice polar, inicia-se o cinturão das altas concentrações, nas regiões de limite do vórtice e nas baixas subpolares. A presença do vórtice polar proporciona um aumento geral de ozônio com o aumento da latitude (BASSET; GAHEIN, 2000).

Primeira componente da EOF

O padrão espacial do primeiro modo do ozônio estratosférico reflete o comportamento médio desta variável durante o período de 1979 a 1992. Ele representa 83,22% do total da variância explicada durante o período estudado. Observa-se que a distribuição geográfica da concentração do ozônio é dependente da latitude. Como os coeficientes da série temporal dos autovetores dessa componente são negativos (Figura 2), os loadings na realidade são negativos e menores em latitudes baixas e subtropicais; e positivos e maiores em latitudes médias e altas. Destaca-se a presença de um forte gradiente entre 25° e 45°S, evidenciando a transição entre o regime tropical e extratropical. Na faixa aproximada entre 45° a 60°S, os loadings refletem o cinturão das altas concentrações de ozônio que dominam esta região. A variabilidade espacial do primeiro modo na América do Sul e vizinhanças também sugere que em média a concentração de ozônio no Oceano Pacífico Equatorial Leste é ligeiramente menor que a correspondente sobre o Oceano Atlântico Equatorial. Além disso, observa-se que a Cordilheira dos Andes, aparentemente induz uma diminuição do ozônio no sentido polar.

Uma análise detalhada da série temporal dos autovetores (Figura 3) indica que os meses do verão apresentam menor variação de ozônio, fato diferente do observado nos meses da primavera, uma vez que os valores mais baixos de ozônio são encontrados em setembro e outubro e apresentam recuperação em novembro e dezembro. Este fato ocorre porque em setembro e outubro o cinturão das altas concentrações de ozônio permanece na faixa de aproximadamente 40°S a 60°S. Além disso, o buraco do ozônio está diretamente relacionado ao vórtice polar, que neste período perde sua força e possibilita a ruptura levando massas de ar com baixos valores de

Figura 2 - Primeiro modo do padrão espacial da média mensal de ozônio obtido pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

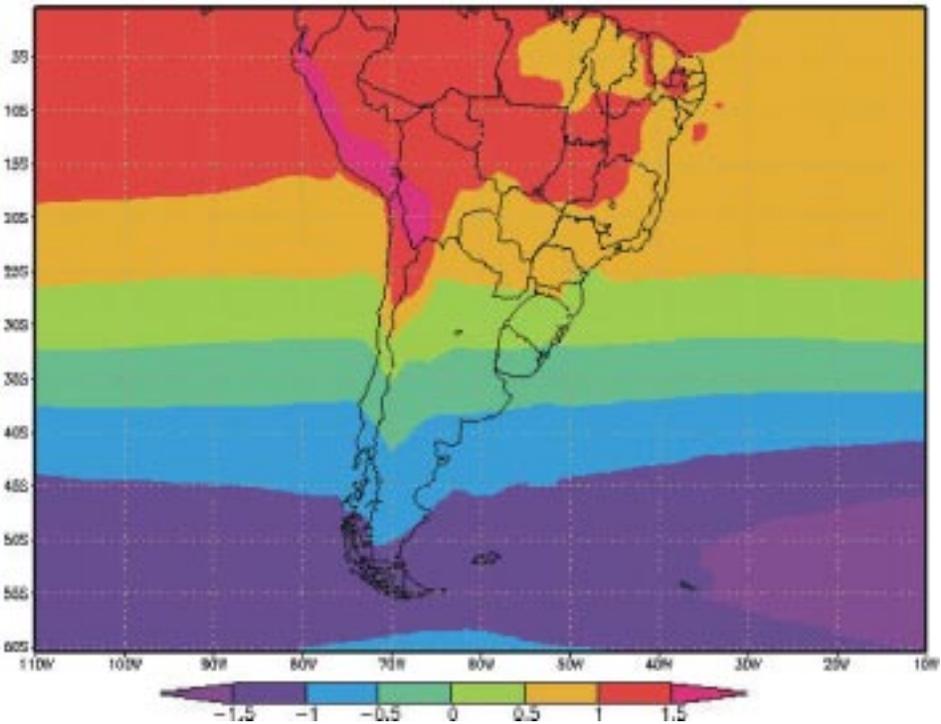
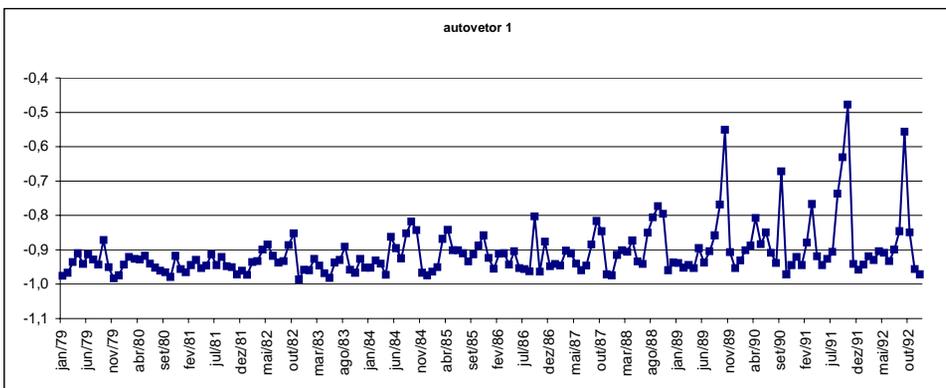


Figura 3 - Série temporal dos autovetores da primeira componente do ozônio (média mensal) derivado pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992



ozônio até as médias latitudes da América do Sul. Por outro lado, as altas concentrações do cinturão são direcionadas ao pólo, onde permanecem até o início do verão.

A concentração do ozônio na Antártida durante a primavera depende do vórtice polar. Os baixos valores deste gás (buraco da camada de ozônio) ocorrem nos meses de setembro e outubro, entretanto no mês de novembro, os valores repentinamente aumentam dentro de uma semana ou duas. Este fenômeno ocorre porque a estratosfera sobre o pólo sul é muito fria no inverno e mantém esse comportamento também durante a primavera, quando a luz solar começa a incidir sobre o pólo, possibilitando as reações químicas destruidoras do ozônio. O aquecimento da camada permite estas reações, entretanto a redução do ozônio faz com que um número menor de moléculas faça a captação de radiação ultravioleta mantendo a estratosfera fria e fazendo com que o vórtice não se dissipe, entretanto no mês de novembro, a temperatura na estratosfera eleva-se rapidamente em poucas semanas. Desta forma, durante o mês de novembro, a estratosfera no pólo sul é submetida a uma fundamental mudança. A presença do vórtice polar com ventos fortes oriundos de oeste no continente antártico, não possibilita a troca de massas de ar, e conseqüentemente, isola ar com baixa temperatura e pouca concentração de ozônio. Importante destacar que a diminuição da amplitude dos coeficientes à partir de 1989 está associado com o aumento observado da extensão do buraco da camada de ozônio.

Segunda componente da EOF

A segunda componente, que representa 6,75% da variância total, mostra um padrão associado à ocorrência do buraco de ozônio na Antártica. Os autovetores (Figura 5) desta componente apresentam os meses de primavera, com valores positivos e com máximos geralmente em setembro.

No sul da América do Sul, a presença de anomalias negativas (Figura 5) sugere que nos meses de primavera a camada de ozônio apresenta um padrão inverso do observado nas regiões com anomalias positivas ao longo da faixa entre 25° a 50° S (cinturão de altas concentrações). Ou seja, na primavera o ozônio das regiões que apresentam anomalias negativas fica abaixo da média, e as regiões com anomalias positivas ficam acima da média; no verão ocorre o oposto, mas o sinal é bem mais fraco. Além disso, nos subtropicais da América do Sul, particularmente entre 10° S e 15° S também ocorre uma diminuição da concentração de ozônio na época em que o buraco da camada de ozônio na Antártica atinge sua máxima amplitude, mas essa diminuição tem uma amplitude pequena. Segundo a série temporal dos autovalores dessa componente (Figura 4), durante o período considerado, o buraco de ozônio na Antártica afetou a vizinhança da América do Sul em 1979, 1984, 1989, 1991 e 1992, sendo que a amplitude aumentou consideravelmente nos últimos 3 eventos.

Terceira componente da EOF

A terceira componente (Figuras 6 e 7) mostra uma estrutura bem definida, envolvendo um dipolo leste/oeste em latitudes médias (AMBRIZZI et al, 1998). Essa componente explica 2,95% do total da variância. Neste caso, quando a amplitude for positiva (negativa) observam-se anomalias positivas (negativas) de ozônio no Oceano Pacífico Sudeste a oeste do sul da América do Sul, e anomalias negativas (positivas) no Oceano Atlântico Sudoeste. A análise da série temporal dos autovetores desta componente mostra que ela está associada com a variabilidade interanual do ozônio, sendo que os coeficientes com amplitudes maiores ocorreram principalmente em anos de El Niño e La Niña, entretanto, outras oscilações de escalas menores, também estavam presente.

Figura 4 - Série temporal dos autovetores da segunda componente do ozônio (média mensal) derivado pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

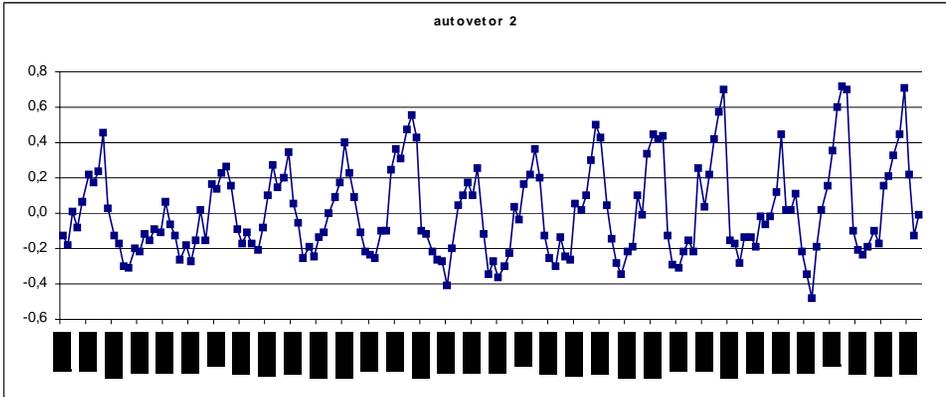


Figura 5 - Segundo modo do padrão espacial da média mensal de ozônio obtido pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

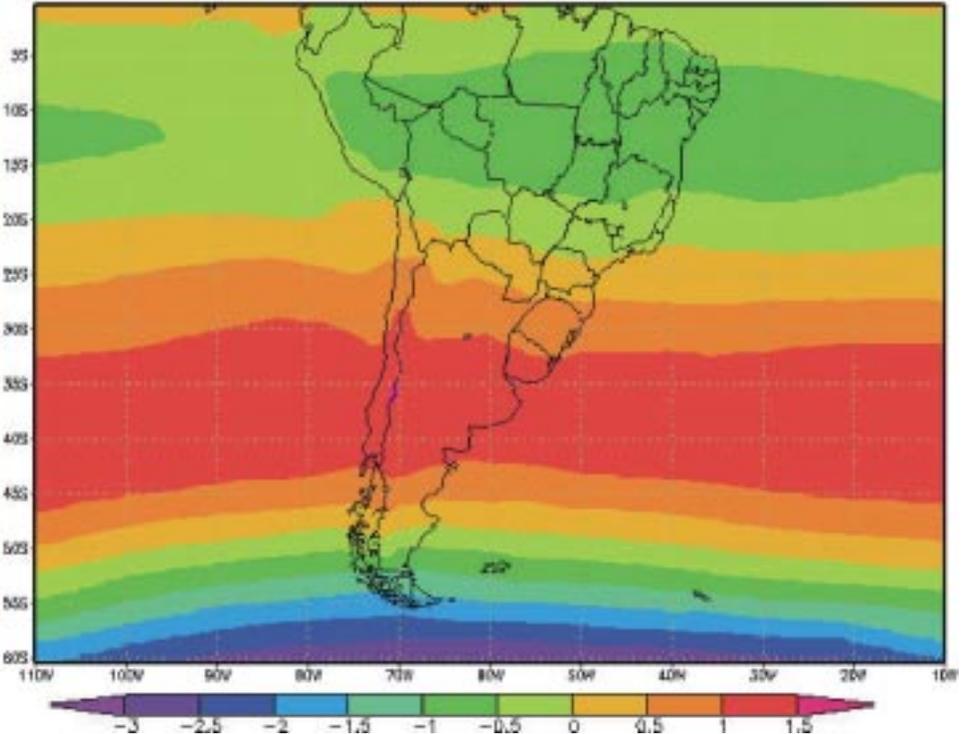


Figura 6 - Série temporal dos autovetores terceira componente do ozônio (média mensal) derivado pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

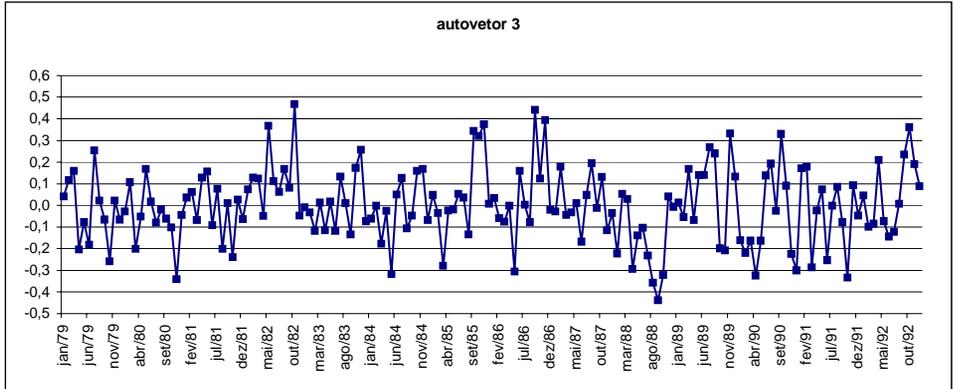


Figura 7 - Terceiro modo do padrão espacial da média mensal de ozônio obtido pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

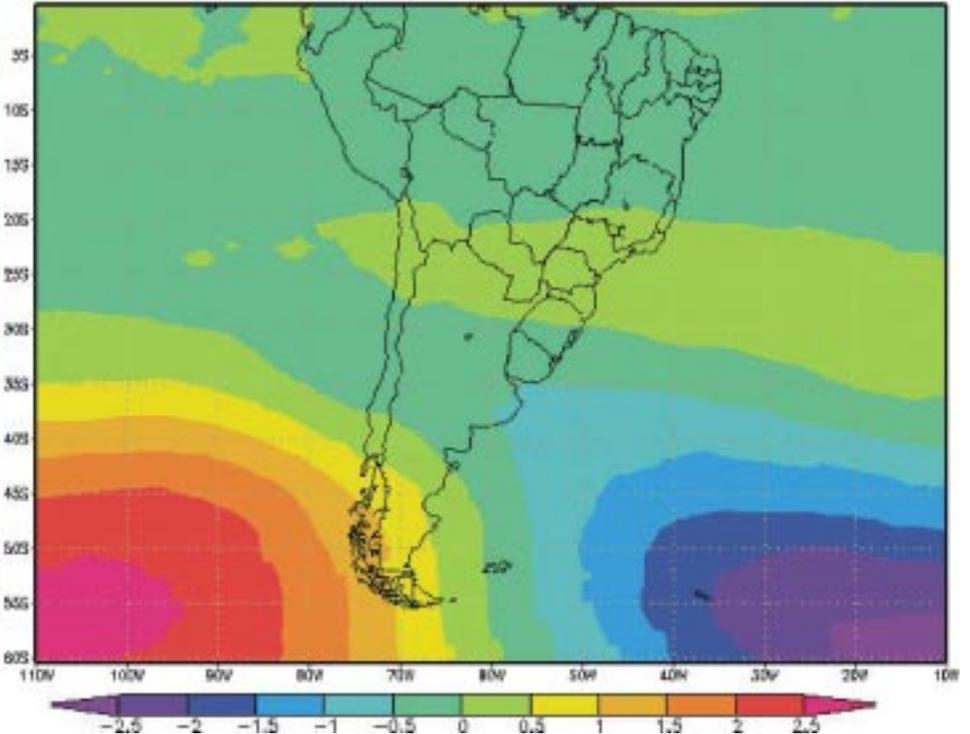


Figura 8 - Série temporal dos autovetores da quarta componente do ozônio (média mensal) derivado pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992

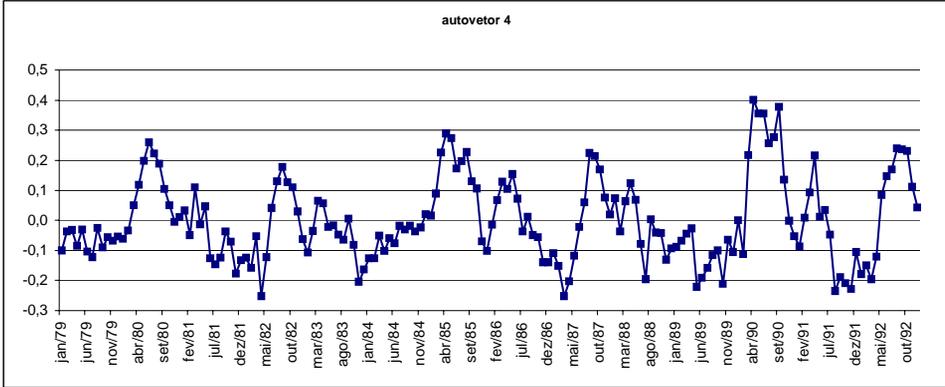
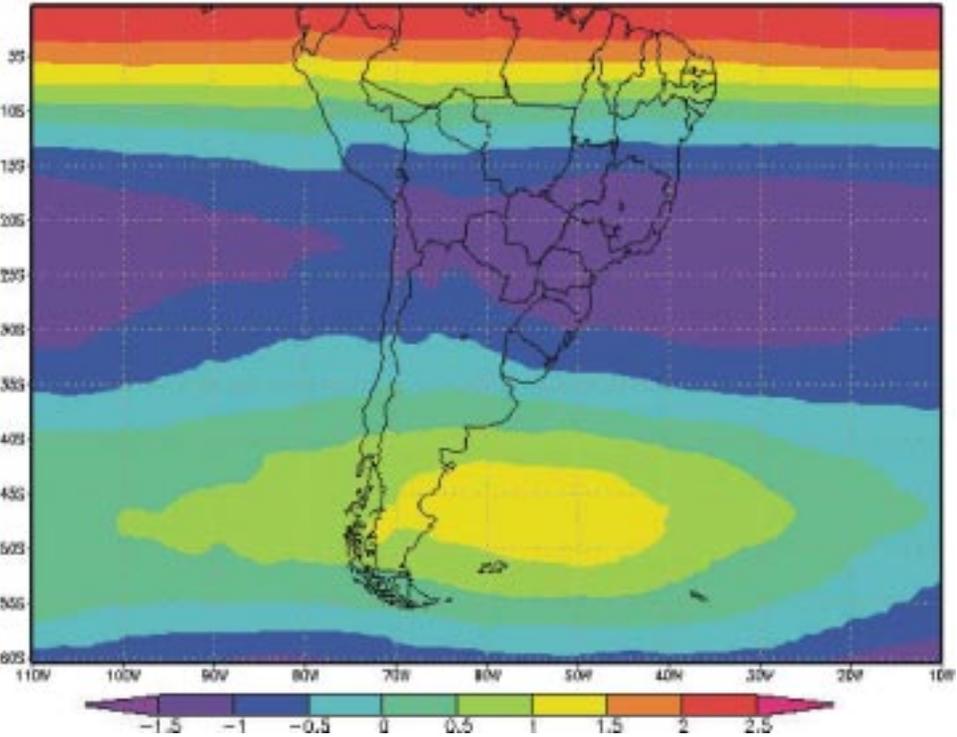


Figura 9 - Quarto modo do padrão espacial da média mensal de ozônio obido pelo sensor TOMS no período de 1979 a 1992



Quarta componente da EOF

A quarta componente (Figuras 8 e 9) revela o padrão de variabilidade associada à oscilação quase-bianual, e representa apenas 1,95% da variância total. A imagem dos loadings deste modo mostra uma faixa de amplitudes máximas ao longo da região equatorial, uma segunda faixa com amplitudes positivas, mas menores no sul da América do Sul e duas faixas com loadings negativos, respectivamente nos subtropicais e latitudes subpolares. Este padrão espacial está associado com a variabilidade da QBO do ozônio e modula a distribuição dessa variável em um amplo domínio espacial. Assim, de acordo com essas figuras, quando a concentração do ozônio aumenta nos trópicos, ela diminui nos subtropicais e latitudes altas. Esta característica está de acordo com os resultados obtidos por Bowman (1989).

CONCLUSÕES

Este trabalho enfoca a variabilidade sazonal e interanual do ozônio estratosférico obtido pelo sensor TOMS utilizando funções ortogonais empíricas. A primeira componente indica o comportamento habitual desta variável, ou seja, nos trópicos e subtropicais a concentração é baixa, entre 40° a 55° S predomina o cinturão das altas concentrações e abaixo de 55° S destaca-se concentrações baixas associadas ao setor polar. A segunda componente que explica 6,75% do total da variância, reflete um padrão dominado pelo buraco do ozônio da Antártica, com amplitudes máximas por volta de setembro. As terceira e quarta componente estão associadas com a variabilidade interanual do ozônio, destacando respectivamente, o padrão El Niño- La Niña e a oscilação quase-bianual. (QBO)

REFERÊNCIAS

- AMBRIZZI, T.; KAYANO, M. T.; STEPHENSON, D. B.: A comparison of global tropospheric teleconnections using observed satellite and general circulation model total ozone column data for 1979-91. **Climate Dynamics**. v. 14, p. 133-150, 1998.
- ANDERSON, J.G. et. al. Free Radicals Within the Antarctic Vortex: The Role of CFCs in Antarctic Ozone Loss, **Science**, v. 251, n. 4989, p. 39-52, 1991.
- BASSET, H. A; GAHEIN, A, 2000 - Diagnostic study on the relation between ozone and potential vorticity, **Atmospheric Ozone**, Proceeding of the Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo, Hokkaido University, Nasda, Japan, p. 305-306
- BOWMAN, K. P., Global patterns of the quasi-biennial oscillations in total ozone, **Journal Atmospheric Science**, v. 46, p. 3328-3343, 1989.
- BOWMAN, K.P. Evolution of the total ozone field during the breakdown of the Antarctic circumpolar vortex, **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16529-16543, 1990.
- DOBSON, G.M.B. – Ozone in the Atmosphere, In: DOBSON, G.M.B. **Exploring the Atmosphere**. Oxford: University Press, 1968. p. 111-136.
- DOTY, B.E.; KINTER III, J.L.; FIORINO, M.; HOOPER, D.; BUDICH, R.; WINGER, K.; SCHULZWEIDA, U.; CALORI, L.; HOLT, T.; K. MEIER, K. The grid analysis and display system (GrADS): An Update for 1997. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IIPS FOR METEOROLOGY, OCEANOGRAPHY AND HYDROLOGY, 13, Longbeach, feb. 1977, **Proceedings**,,,,, Longbeach: American Meteorological Society, 1997, p.117.

- HAAN, C.T. **Statistical Methods in Hydrology**. Ames: Iowa State University Press, 1977. 378p.
- KANE, R. P.; Y., Sahai, Latitude dependence of the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 8477-8490, 1998.
- KAYANO, M. T., Principal modes of the total ozone on the Southern Oscillation timescales and related temperature variations. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 25797-25806, 1997.
- KAYE, J. A., Stratospheric chemistry, temperature, and dynamics. In: GURNEY, R.J.; FOSTER, J.L.; PARKINSON, C.L. **Atlas of satellite observations related to global change**, New York: Cambridge University Press, 484 p, 1993.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. **Atmospheric Environment**, Pittsburg. v. 30, n. 9, p. 1481-1488, 1996.
- MCPETERS, R.D.; KRUEGER, A.J.; BHARTIA, P.K.; HERMAN, J.R. et al, 1996, Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide, **NASA Reference Publication**, 1384.
- RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital images analysis: An introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 281p.
- SOLOMON, S. Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion. **Nature**, England, v.347, p. 347-354, 1990.
- STANFORD J.L.; ZIEMKE, J. R.; MCPETERS, R. D.; KRUEGER, A. J.; BHARTIA, P. K.: Spectral analyses, climatology and inter-annual variability of Nimbus-7 TOMS version 6 Total column Ozone. **Bulletim American Meteorological Society**. v. 77, p. 353-357, 1996.
- WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction**. San Diego: Academic Press, 1995.
- WMO/ UNEP - **Scientific Assessment of Ozone Depletion**: 1991, Genebra, 1992. 470p.
- WMO/ UNEP - **Scientific Assessment of Ozone Depletion**: 1994. Genebra, 1994. 550p.

Recebido em novembro de 2003

Aceito em janeiro de 2004