

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRIOCO NA AMÉRICA DO SUL E VIZINHANÇAS UTILIZANDO-SE IMAGENS DO SATÉLITE NIMBUS7/TOMS.

IÁRA REGINA NOCENTINI ANDRÉ¹

NELSON JESUS FERREIRA²

JORGE CONRADO CONFORTE²

¹Bolsista de Pós-doutorado da FAPESP

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos – SP, Brasil

iara@ltid.inpe.br

²INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos – SP, Brasil

{nelson, conrado}@ltid.inpe.br

Abstract. The purpose of the present study is analyze the seasonal variability of the stratospheric ozone over South America and surroundings areas using satellite imagery from Nimbus7/TOMS. The study period ranges from Nov1978 to May1993. Fourier analyses were used to depict the annual cycle of ozone in that region. The results show that in general the ozone variability in the equatorial areas is not significant. The highest rates occur along 60°S during the austral spring and the lowest ones occur in polar latitudes. In the austral autumn, the ozone variability as a function of latitude is not significant. The annual cycle analysis shows that the first harmonic is maximized/minimized around 30°S-50°S in September/March. Also, interannual variability of the annual cycle along the meridians 25°W and 60°W and parallels 90°S and 10°S suggest that over Pacific Ocean the amplitudes are larger than the ones over the Atlantic Ocean. The interannual variability is maximum at high latitudes and minimum at low latitudes.

Keywords: ozone layer, harmonic analysis, stratospheric

1- Introdução

Preocupados com o impacto do buraco do ozônio, nos últimos anos inúmeros trabalhos têm focado o comportamento e causas desse fenômeno no Hemisfério Sul (André e Zavattini, 1998; André, 2001; Bojkov, 1995; Casiccia S., 1996, 2000; Kirchhoff et al., 1987, 1988a, 1988b, 1992, 1994, 1995, 1996; Atkinson, 1989; Cariolle, 1986, 1990; Solomon, 1986, 1988, 1990; Loon e Tourpali, 1995; Jadin, 1998). O aumento ou diminuição do ozônio na estratosfera é essencialmente gerado por processos físico-químicos e transporte meridional (Dobson, 1968). A distribuição da concentração do ozônio estratosférico nas baixas latitudes apresenta pequena variação durante todas as estações. Devido a maior expansão vertical da atmosfera, a tropopausa nestas latitudes, apresenta-se bem definida e a estratosfera é estável sem grandes alterações na concentração do ozônio; em contra partida, as maiores mudanças sazonais dessa variável ocorrem nas altas latitudes (Wakamatzu, 1989). Devido a sua ampla visão espacial e resolução temporal, os satélites ambientais tem tido um papel importantíssimo no sentido de monitorar a variabilidade do ozônio estratosférico. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do ciclo anual dessa variável sobre a América do Sul e vizinhanças, utilizando-se imagens obtidas pelo instrumento (sensor) TOMS a bordo satélite Nimbus-7, durante o período de 1978 a 1993.

2. Dados e Metodologia

As imagens diárias de ozônio estratosférico foram obtidas pelo instrumento TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) dos satélite Nimbus 7 (nov/1978 a maio/1993) (BOJKOV, 1995). Essas imagens mencionadas estão disponíveis em pontos de grade, formato HDF (Hierarchical Data Format) , resolução espacial de 1,00x1,25 graus, sendo distribuídas pela NASA (. O monitoramento de ozônio utilizando o sensor TOMS tem como base principal a técnica de retro-espalhamento de radiação ultravioleta. De acordo com esta metodologia, a razão da luz solar espalhada de volta para o satélite a partir do sistema Terra/atmosfera e aquela incidente no topo da atmosfera é usada para determinar a quantidade de ozônio (Kaye, 1993). Esta técnica que possibilita medir o conteúdo integrado em uma coluna de ozônio e sua distribuição vertical na média e alta troposfera funciona somente durante o dia, desta forma, não possibilita a obtenção de dados durante a noite polar.

2.1 Análise Harmônica.

O objetivo da análise de Fourier é conseguir representar uma função usando uma base constituída por funções seno e co-seno. Essas funções são escolhidas para ter frequências que exibem múltiplos inteiros de uma frequência fundamental determinada pelo tamanho da amostra de uma série de dados. Em geral os primeiros harmônicos conseguem explicar a maior parte da variação total da série. Uma série de dados y consistindo de n pontos pode ser representada exatamente somando-se a série de $n/2$ funções harmônicas expressas por:

$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ C_k \cos \left[\frac{2pkt}{n} - \phi_k \right] \right\}$$

$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ A_k \cos \left[\frac{2pkt}{n} \right] + B_k \sin \left[\frac{2pkt}{n} \right] \right\}$$

onde t é o tempo, k é o número de harmônicos, A_k e B_k são coeficientes e ϕ a fase, respectivamente expressos por:

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos \left(\frac{2pkt}{n} \right)$$

$$B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin \left(\frac{2pkt}{n} \right)$$

$$\phi_k = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k}, & A_k > 0 \\ \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} \pm \pi, \text{ or } \pm 180^\circ, & A_k < 0 \\ \frac{\pi}{2}, \text{ or } 90^\circ & A_k = 0 \end{cases}$$

2.2 Ponteiros harmônicos

As amplitudes e fases dos harmônicos podem ser convenientemente representadas por ponteiros (flechas) onde o comprimento do segmento de reta é proporcional a amplitude C_k , e a direção na qual este aponta (orientação angular) representa o ângulo de fase ϕ . Neste contexto, a direção da flecha aponta para o mês no qual o primeiro harmônico, por exemplo, é maximizado (vide **Figura 1**).

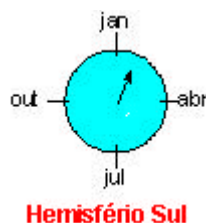
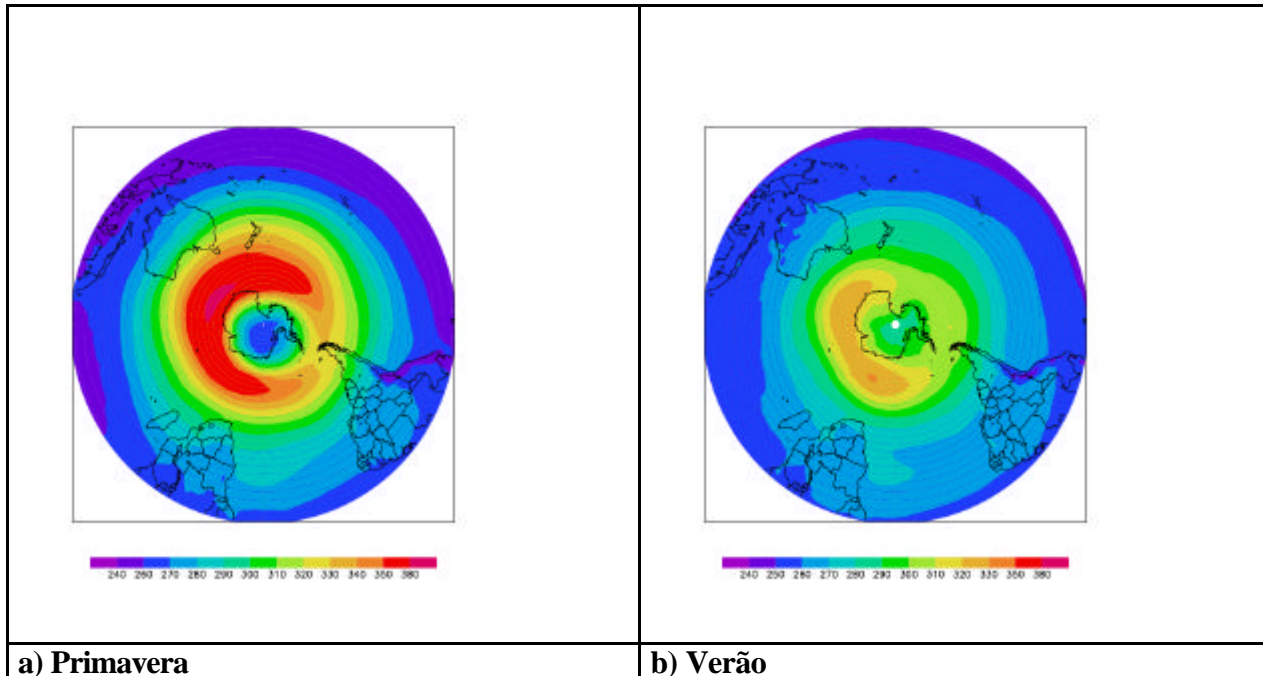


Figura 1 – Representação gráfica de indicadores harmônicos.

3 – Resultados e Discussões

3.1 – Comportamento Médio do Ozônio no Hemisfério Sul.

Na primavera (**Figura 2a**), ocorrem as maiores concentrações do ozônio no hemisfério sul, ao longo de 60°S (na faixa de baixa pressão das frentes polares). Estas concentrações elevadas são denominadas de cinturão das altas concentrações, já que em alguns anos chegam a atingir valores de 500 UD e contornam todo o hemisfério. Neste período são observados, também, os menores valores do ozônio nas regiões polares, denominado de buraco da camada de ozônio. O retorno do aquecimento da estratosfera polar decorrente da absorção da radiação ultravioleta por este gás, após a noite polar (inverno), e a intensa concentração de inúmeros compostos químicos presos no vórtice polar antártico (Anderson, 1991), faz com que as reações químicas destruidoras do ozônio ocorram neste período, no pólo sul (Solomon, 1986; Kirchhoff, 1996).



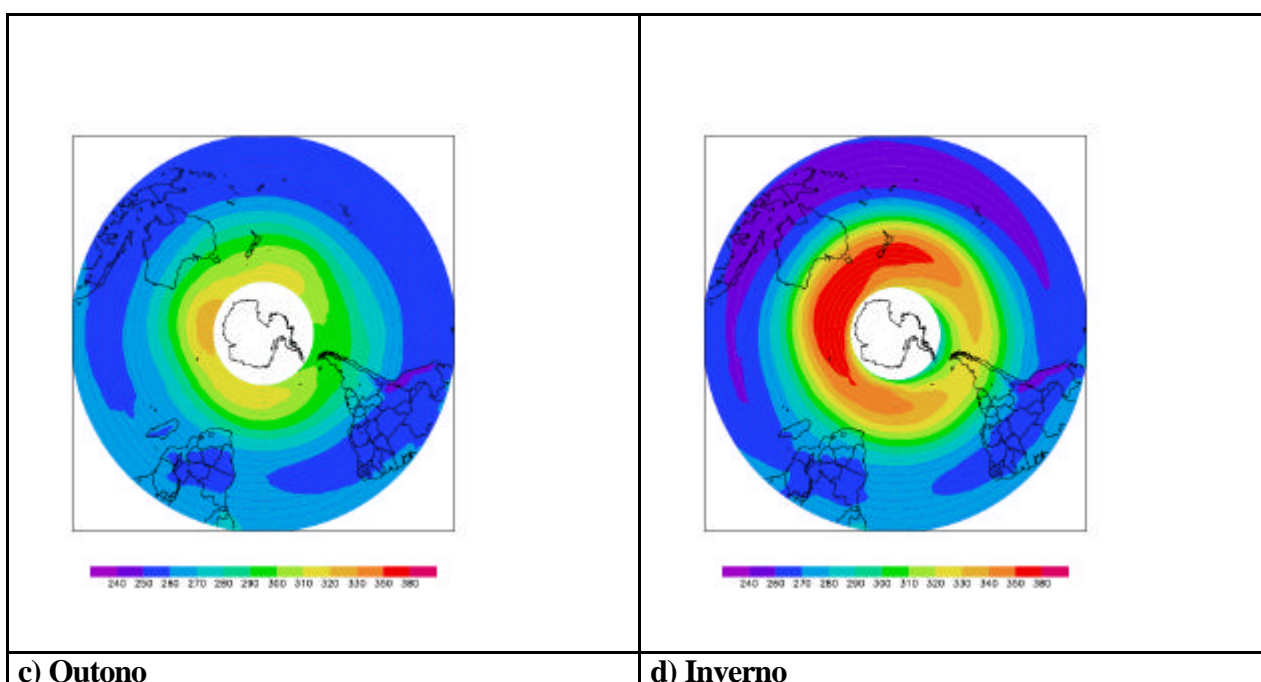


Figura 2 – Média sazonal do ozônio estratosférico, em unidades de Dobson, obtidas pelas imagens do satélite Nimbus7, sensor TOMS, período de 1978 a 1993: a) primavera, b) verão, c) outono e d) inverno.

No verão (**Figura 2b**), os valores observados sobre 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; Atkinson, 1989), proporcionando uma recuperação do ozônio nas altas latitudes. Os valores do ozônio encontrados no cinturão das altas concentrações durante a primavera começam a diminuir durante o verão (Dobson, 1968).

As medições da concentração do ozônio estão diretamente relacionadas à presença de luz solar, sendo assim com o início da noite polar no outono, a concentração deste gás nas regiões polares não é monitorada. No outono (**Figura 2c**), há uma limitada variação dos valores de ozônio com a latitude, ou seja, a variabilidade deste gás é menor (Dobson, 1968).

No período do inverno (**Figura 2d**) ocorre a presença da noite polar, característica desta estação, e portanto, não havendo 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 rapidamente resfriam 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 (WMO/ UNEP, 1992; WMO/ UNEP, 1994). Os valores encontrados neste período demonstram um aumento geral de ozônio com o aumento da latitude. Ao redor do pólo sul tem início o cinturão das altas concentrações do ozônio (Basset e Gahein, 2000).

3.2 Análise Harmônica

A **Figura 3** mostra a variabilidade espacial do primeiro harmônico do ozônio estratosférico na AS e vizinhanças durante o período estudado, caracterizando assim, o ciclo

anual dessa variável. Observa-se que as maiores amplitudes encontram-se entre 30°S a 50°S, no Oceano Pacífico Sudeste e Oceano Atlântico Sudoeste. A orientação dos vetores nestas regiões (fase do harmônico) indica que, em média, ocorre uma maximização deste harmônico em torno de setembro. A minimização ocorre próximo ao mês de março. As menores amplitudes ocorrem entre 10°S e equador, praticamente durante o ano todo, sendo expressivamente menor no Oceano Pacífico e na Cordilheira dos Andes. Entretanto, entre 10°S a 20°S, a menor amplitude ocorre entre outubro e novembro.

Entre 50°S a 55°S, as amplitudes giram em torno de 18UD a 27UD em outubro. Por outro lado, entre o equador e 10°N, a amplitude, que é maior do que a observada na região equatorial do Hemisfério Sul, fica ao redor de 9UD a 24UD e é maior em agosto.

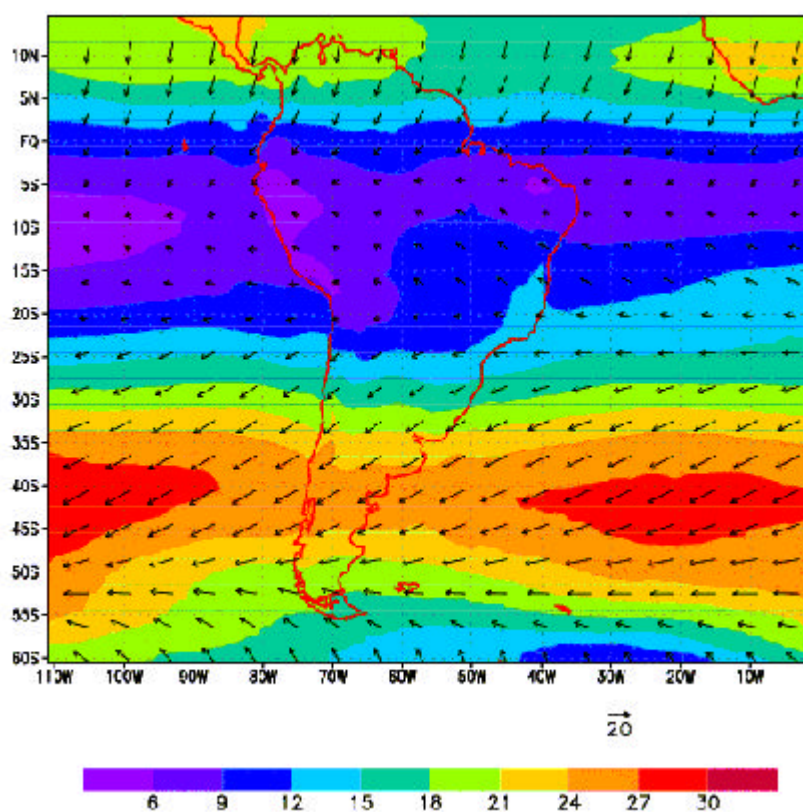


Figura 3 – Amplitude (em UD) e fase do primeiro harmônico do ozônio obtido pelo sensor TOMS, período de 1978 a 1993.

3.3- Variabilidade Interanual da Amplitude do Ciclo Anual

As análises da variabilidade temporal do ciclo anual foram realizadas ao longo dos meridianos 25°W, 60°W e paralelos 90°S e 10°S.

Sobre o Oceano Atlântico, ao longo de 25°W (**Figura 4a**), observa-se que a variabilidade interanual da amplitude do primeiro harmônico é mais acentuada entre 35° e 55°S, principalmente nos anos de 1979, 1981, 1988 e 1991; por outro lado, entre 5°N a 20°S houve pequenas variações. A maior variabilidade (35UD a 40UD) ocorreu em 1979 (45°S e 55°S) e 1988 (55°S a 40°S), porém neste ano, a menor variabilidade aconteceu entre 10°S e o equador, assim como nos anos 1990 e 1991.

Sobre o Oceano Pacífico, ao longo de 90°W (**Figura 4c**), assim como no Oceano Atlântico, a variabilidade interanual da amplitude do primeiro harmônico é máxima nas altas

latitudes e mínima nas baixas latitudes, porém nota-se que a variabilidade interanual no Oceano Pacífico é maior que aquela observada sobre o Oceano Atlântico. Em 1986, os valores maiores foram observados entre 50°S a 35°S e os mínimos entre 25°S até o equador, em 1987.

No corte latitudinal, ao longo de 10°S (**Figura 4c**), evidenciando a Amazônia, a variabilidade interanual da amplitude do primeiro harmônico demonstra uma interferência entre 70° a 80°W, provavelmente devido a presença da Cordilheira dos Andes. Apesar das pequenas variações nas latitudes baixas foi observado valores relativamente altos em todas as longitudes aconteceram em 1987 e 1992, porém foram ainda mais expressivas entre 70° a 40°W.

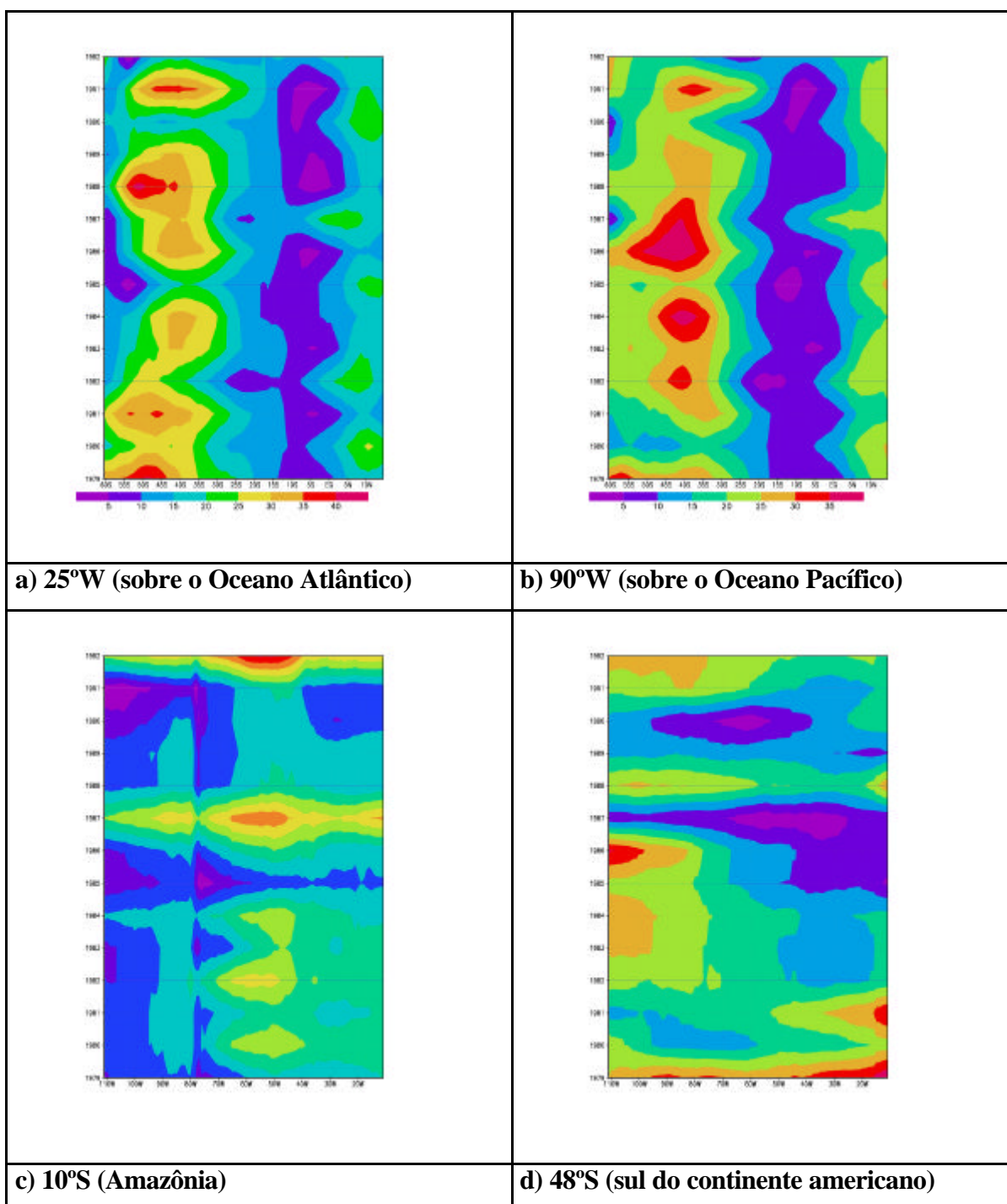


Figura 4 – Variabilidade temporal do ciclo anual do ozônio estratosférico. a) 25°W, b) 60°W, c) 90°W e d) 10°S

Nota-se também que as variações são maiores sobre o continente e Oceano Atlântico, porém em 1987 e 1992, o Oceano Pacífico demonstrou uma maximização. Este fato pode estar relacionado com os eventos de El Niño de intensidade moderada que aconteceram nestes anos, em contra partida, nenhuma alteração foi verificada em 1982/1983, quando houve o fenômeno El Niño mais significativo das últimas décadas.

Em 48°S, no extremo sul do continente americano (**Figura 4d**), foi observada maximização em todas as longitudes em 1979 e a minimização, em 1987. A menor variabilidade (em torno de 5UD a 10UD) no período foi verificada em 1987, entre 25°W a 65°W, e entre 1989 e 1990.

Em 1980 e 1981, a maximização ocorreu entre 50°W e 10°W (Oceano Atlântico) e a minimização entre 110°W a 50°W (continente e Oceano Pacífico). De 1982 a 1986, este comportamento foi invertido e pode ser observada maior variação entre 110°W a 80°W e as menores entre 70° a 10°W.

Conclusões

As análises da variabilidade temporal do ciclo anual evidenciaram a maximização (cinturão das altas concentrações) e a minimização (buraco da camada de ozônio) da concentração de ozônio na primavera. A distribuição geral do ozônio estratosférico no Hemisfério Sul apresenta maior variabilidade nas latitudes altas e menor sobre as latitudes baixas independente das estações do ano. A análise harmônica mostrou que o ciclo anual é mais acentuado entre 30 a 45S e que o primeiro harmônico é mais acentuado em setembro.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de Pós-doutorado da primeira autora (proc. nº00/09902-0) e ao CNPq através do (proc. nº 300486/96-0); pela bolsa de pesquisador do segundo autor.

Bibliografia

- Anderson, J.G. et. al. Free Radicals Within the Antarctic Vortex: The Role of CFCs in Antarctic Ozone Loss, *Science*, 251 (4989), 39-52, Jan., 1991.
- André, I.R.N. e Zavattini, J.A. Alterações na Camada de Ozônio nas Médias e Altas Latitudes da América do Sul Causadas pelo Buraco Antártico, In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 3, Salvador, dez. 1998, *Anais*, Salvador: UFB., 1998, CD-ROM.
- André, I.R.N. – *Análise Geográfica da Variabilidade do Ozônio Estratosférico nas Altas e Médias Latitudes da América do Sul e no Setor Oriental da Antártida na Primavera de 1979/1992 e as Relações com a Dinâmica Atmosférica de 11 a 20 de Outubro de 2000*, Doutorado em Geografia (Tese) – UNESP/IGCE/Rio Claro, 2001. 186p.
- Atkinson, R.J., et al. – Evidence of Mid-Latitude Impact of Antarctic Ozone Depletion, *Nature*, USA, vol. 340, n. 6231, p. 290-293, July, 1989.
- Basset, H. A; Gahein, A, 2000 - "Diagnostic study on the relation between ozone and potencial vorticity", in *Atmospheric Ozone*, Proceeding of the Quadrennial Ozone Symposium, Sapporo, Hokkaido University, Nasda, Japan, 305-306
- Bojkov, R. D. - *The Changing Ozone Layer*, Geneva. WMO/PNUMA, 1995. 32p

- Bowman, K.P. Evolution of the total ozone field during the breakdown of the Antarctic circumpolar vortex, *J. Geophys. Research*, 95(D10), 16529-16543, 1990.
- Cariolle; D. and Déqué, M. Southern Hemisphere Medium-Scale Waves and Total Ozone Disturbances in a Spectral General Circulation Model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, NO. D10, p. 10,825-10,846, september 20, 1986.
- Cariolle, D., et al. - A General Circulation Model Simulation of the Springtime Antarctic Ozone Decrease and Its Impact on Mid- Latitudes. *Journal of Geophysical Research*, Vol 95, D2, p. 1883 -1898,1990.
- Casaccia S., C.A.R.- *Observações do Buraco de Ozônio em Punta Arenas, Chile*, Mestrado em Geofísica (Tese), INPE, 1996. 150p.
- Casaccia S., C.A.R.- *Comparação da distribuição vertical do ozônio em altas e baixas latitudes*. Doutorado em Geofísica (Tese) - INPE, 2000. 180p.
- Dobson, G.M.B. – Ozone in the Atmosphere, In: DOBSON, G.M.B. *Exploring the Atmosphere*. Oxford: University Press, 1968. p. 111-136.
- Jadin, E. A Interannual variability of total ozone and stratospheric angular momentum, *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, v.1, n.2, novembro, 1998.
- Kaye, J. A., 1993: Stratospheric chemistry, temperature, and dynamics.41-57. *Atlas of satellite observations related to global change*. R. J. Gurney, J. L. Foster, C. L. Parkinson; Cambridge University P New York NY.Press
- Kirchhoff, V.W.J.H., et al. Camada de Ozônio: Um Filtro Ameaçado, *Ciência Hoje* vol.5, n. 28, 1987.
- Kirchhoff, V.W.J.H. Geoquímica de média e baixa atmosfera: impactos ambientais por deteriorização da camada de ozônio, *Geochimica Brasiliensis*, vol. II, n.1, jan., 1988^a
- Kirchhoff, V.W.J.H. Ozônio – Ameaça sobre a Antártida, *Rev. Brasileira de Tecnologia*, vol.19, n.4, 1988b.
- Kirchhoff, V.W.J.H. Ozônio Bom Versus Ozônio Ruim, *Ciência Hoje*, n85, 1992
- Kirchhoff, V.W.J.H. et al. Buraco de Ozônio: Novidades no Sul, *Ciência Hoje*, vol 17, 6-7, 1994
- Kirchhoff, V.W.J.H. “Ozônio e Radiação UV-B”, Transtec Editorial, pg. 102, 1995.
- 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.
- Loon, H.V. and Tourpali, K. Antarctic Ozone and Trends in the Troposphere of Southern Hemisphere , *Publication en Castellano Especializada em Temas Meteorológicos*, Vol.20, nº1 e 2, p.101-108, 1995.
- Wakamatzu, S. et al. Observational Study of Stratospheric Ozone Intrusions into the Lower Troposphere, *Atmospheric Environment*, Pittsburg, v. 23, n. 8, p. 1815-1826, 1989.
- Solomon, S. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, England, v. 321, 755-758, 1986.
- Solomon, S. The Mystery of the Antarctic Ozone “Hole”, *Reviews of Geophysics*, vol.26, n.1, 131-148, feb, 1988.
- Solomon, S. Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion. *Nature*, England, v.347, p. 347-354, 1990.
- WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991, Genebra, 1992. 470p.
- WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Genebra, 1994. 550p.