

# ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS ESPESSURAS ÓPTICAS DE AEROSSÓIS COM O COMPRIMENTO DE ONDA NA FAIXA DE ULTRAVIOLETA NO PERÍODO DE 1997 A 2006 NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL

Ana M. Soares<sup>1</sup>, Damaris K. Pinheiro<sup>3</sup>, Nelson J. Schuch<sup>4</sup>, Plínio C. Alvalá<sup>5</sup>, Germano Possani<sup>1</sup>, Nadiara Pereira<sup>2</sup>, Caroline Bertagnoli<sup>1</sup>

[1] Acadêmicos do Curso de Engenharia Química e do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria do Centro de Tecnologia - Universidade de Federal de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM

[2] Acadêmica do Curso de Meteorologia e do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria do Centro de Tecnologia - Universidade de Federal de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM

[3] Professora do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM

[4] Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT

[5] Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial – DGE/INPE - MCT

[anams\\_eq@lacesm.ufsm.br](mailto:anams_eq@lacesm.ufsm.br), [damaris@lacesm.ufsm.br](mailto:damaris@lacesm.ufsm.br), [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br),

[plinio@dge.inpe.br](mailto:plinio@dge.inpe.br), [germano@lacesm.ufsm.br](mailto:germano@lacesm.ufsm.br), [nadi\\_pereira@yahoo.com.br](mailto:nadi_pereira@yahoo.com.br),

[caroline@lacesm.ufsm.br](mailto:caroline@lacesm.ufsm.br)

**Resumo.** Os valores das espessuras ópticas de aerossóis são obtidos através da utilização do banco de dados de Espectrofotômetros Brewer instalados no Observatório Espacial de Sul - OES/CRS/INPE – MCT, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, no âmbito da parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT/UFSM e Laboratório de Ozônio do DGE/CEA/INPE – MCT. Para obter os valores das espessuras ópticas de aerossóis (EOA) é usado o Método de Langley, que consiste na linearização da Lei de Beer. Foram analisados apenas dias limpos. Os valores obtidos são para os cinco comprimentos de onda na faixa de ultravioleta de medição do Brewer, 306,3, 310,1, 313,5, 316,8 e 320,1 nm, nos períodos da manhã e da tarde separadamente. De acordo com a lei de Ångström, as espessuras ópticas de aerossóis são inversamente proporcionais ao comprimento de onda. Neste trabalho verificou-se que, para o período da manhã, as EOA não apresentaram um comportamento definido com o comprimento de onda. Porém, no período da tarde, os valores das EOA aumentaram com o comprimento de onda, contrariando a Lei de Ångström.

**Palavras-chave:** Aerossóis, Espessuras Ópticas, Espectrofotômetro Brewer.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar que incide na atmosfera terrestre é espalhada e absorvida através das Espessuras Ópticas Atmosféricas (EOAtm), que é composta pela espessura de absorção por diversos gases, que na faixa de ultravioleta analisada são ozônio - O<sub>3</sub>, dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub> e dióxido de nitrogênio - NO<sub>2</sub>, por espessura de espalhamento Rayleigh e pelas Espessuras Ópticas de Aerossóis (EOA) (Kirchhoff et al., 2001 [8]; Kirchhoff et al., 2002 [9]; Marengo et al., 1997 [10]). De acordo com a lei de Ångström (Ångström, 1964 [1]), à medida que o comprimento de onda aumenta as Espessuras Ópticas de Aerossóis diminuem.

Trabalhos recentes (Cachorro et al, 1996 [2], Ref. [8], Ref. [9], Silva e Kirchhoff, 2005 [14], Carbone et al., 2006 [3]) tem obtido a espessura óptica de aerossóis na faixa de ultravioleta através do uso de espectrofotômetros Brewer. Kirchhoff et al., 2002 Ref. [9], analisando dados de diversas estações, com diferentes níveis de poluição, mostrou que, para a mesma faixa de UV

analisada neste trabalho, a variação da espessura óptica de aerossóis contraria a Lei de Ångström. Estudo semelhante foi desenvolvido por Giavis, 2005 [6] em diversos locais da Grécia com resultados que vão de acordo com a Lei de Ångström, contrários aos obtidos neste trabalho, para os comprimentos de onda de 350, 400, 450, 500, 675, 778, e 862 nm. Porém a faixa de comprimentos de onda analisados neste trabalho é bem menor que de Giavis, 2005 [6].

## 2. METODOLOGIA

Utilizando o banco de dados de radiação ultravioleta observados com Espectrofotômetros Brewer MKIV #081 (1997 – 2000), MKII #056 (2000 – 2002) e MKIII #167 (2002 – 2006), instalados no Observatório Espacial de Sul - OES/CRS/INPE – MCT, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, no âmbito da parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT/UFSM e Laboratório de Ozônio do DGE/CEA/INPE –MCT, pode-se obter o valor das EOAtm.

Foi utilizado o método de Langley, que consiste em uma linearização da Lei de Beer para a atmosfera terrestre irradiada pela luz solar (Coulson, 1975 [4]) para obter as EOAtm e as Espessuras Ópticas de Aerossóis, calculadas para os comprimentos de onda da faixa do ultravioleta 306,3, 310,1, 313,5, 316,8 e 320,1 nm. A Lei de Beer pode ser escrita como:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \cdot \exp(-\tau_{at} \cdot m) \quad (1)$$

Onde:  $I_{\lambda}$  = Irradiância solar na superfície da terra;  $I_{0\lambda}$  = Irradiância solar no topo da atmosfera;  $\tau_{at}$  = Espessura óptica atmosférica;  $m$  = Massa de ar.

A linearização da Lei de Beer fica:

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{0\lambda} - \tau_{at} \cdot m \quad (2)$$

Os principais processos físicos que atenuam a radiação solar que passa pela atmosfera são o espalhamento e a absorção (Iqbal, 1983 [7]). Nesta faixa, as atenuações são espalhamento de Rayleigh, a absorção através de ozônio, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre, como também absorção e espalhamento através de aerossóis. Todos esses agentes compõem as Espessuras Ópticas Atmosféricas (Ref. [8], [9] e [10]). Ambos os processos de espalhamento e absorção são dependentes do comprimento de onda (El - Shobokshy e Al-Saedi, 1993 [5]). O somatório das contribuições individuais dos agentes atmosféricos fornece a Espessura Óptica Atmosférica.

As espessuras dos gases traços Ozônio ( $O_3$ ) e Dióxido de Enxofre ( $SO_2$ ) são calculadas através da Equação (3):

$$\tau_{xx\lambda} = \sigma_{xx\lambda} \cdot UD \cdot 2,69 \cdot 10^{16} \quad (3)$$

Onde:  $\sigma_{xx\lambda}$  = Seção de choque de absorção (Molina e Molina, 1986 [12]; McGee e Burris Jr, 1987 [11]);  $UD$  = Coluna integrada de gás (Unidade Dobson).

Para se calcular o espalhamento Rayleigh foi utilizado a Equação 4 (Teillet, 1990 [15]), a qual leva em conta a pressão local, os valores de índices de refração do ar e coeficientes de despolarização:

$$\tau_R = 0,00856 \lambda^{-4} (1 + 0,0113 \lambda^{-2} + 0,00013 \lambda^{-4}) p_e \cdot p_a^{-1} \quad (4)$$

Onde:  $p_e$  = pressão local do Observatório Espacial do Sul (960 hPa);  $p_a$  = pressão atmosférica no nível do mar ( $p_a = 1013,15$  hPa);  $\lambda$  = comprimento de onda (em nm).

Mais detalhes desta metodologia pode ser encontrado nos trabalhos de Ref. [3], Ref. [8] e Silva (2001) [13].

A análise foi feita para os períodos da manhã e da tarde separadamente durante os anos de 1997 a 2006 para dias de céu limpo, pois a Lei de Beer é válida apenas para a

radiação direta do Sol (Yavorsky e Detlaf, 1980 [16]), para os cinco comprimentos de onda de medição do Brewer.

### 3. RESULTADOS

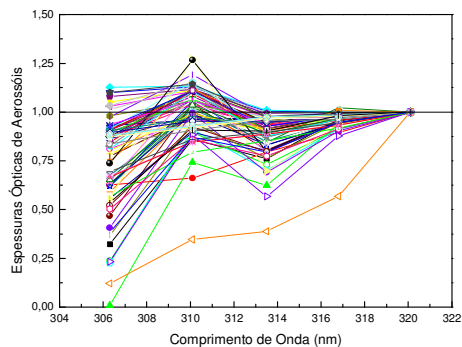


Figura 1: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da manhã entre os anos de 1997 a 2000 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKIV #081 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

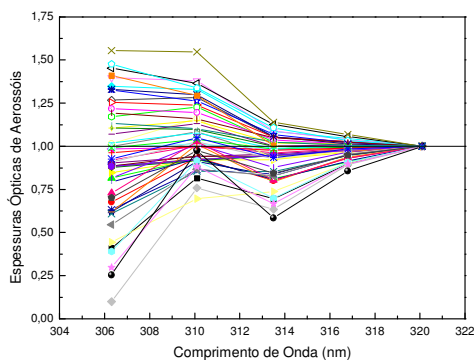


Figura 2: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da manhã entre os anos de 2000 a julho/2002 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKII #056 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

Para uma melhor visualização da variação das Espessuras Ópticas de Aerossóis (EOA) com o comprimento de onda, foi dividido o valor das EOA dos cinco comprimentos de onda pelo valor do comprimento de onda 320 nm. As análises foram feitas separadamente, de acordo com o modelo do Brewer utilizado. O comportamento das Espessuras Ópticas de Aerossóis obtidas para a parte da manhã com o comprimento de onda na faixa de UV está

apresentado nas Figuras 1, 2 e 3 para os Brewers 081, 056 e 167, respectivamente.

O comportamento das Espessuras Ópticas de Aerossóis obtidas para a parte da tarde com o comprimento de onda na faixa de UV está apresentado nas Figuras 4, 5 e 6 para os Brewers 081, 056 e 167, respectivamente.

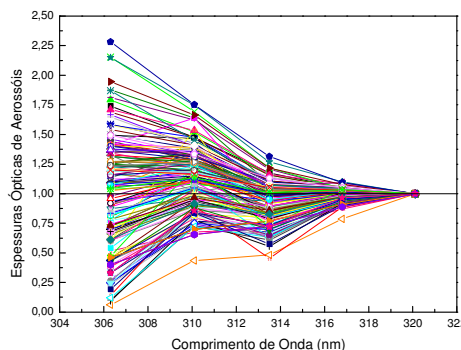


Figura 3: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da manhã entre os anos de agosto/2002 a 2006 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKIV #167 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

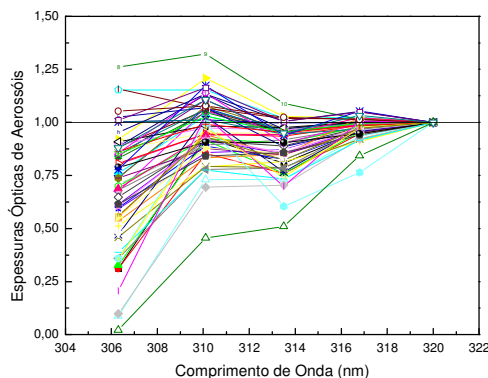


Figura 4: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da tarde entre os anos de 1997 a 2000 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKIV #081 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 1, 2, e 3, observa-se que, para a parte da manhã, as EOA não apresentaram um comportamento com o comprimento de onda bem definido, sendo que em alguns dias o comportamento das EOA contraria a Lei de Ångström (Ref. [1]). Porém, nos resultados

apresentados nas Figuras 4, 5, e 6 para a parte da tarde, pode-se visualizar que, no geral, as Espessuras Ópticas de Aerossóis aumentam com o comprimento de onda. Isso acontece com os dados dos três modelos do Brewer, onde na grande maioria dos dias a diferença entre os valores absolutos em 320.1 e em 306.3 nm é positiva. Este resultado se opõe à Lei de Ångstrom (Ref. [1]).

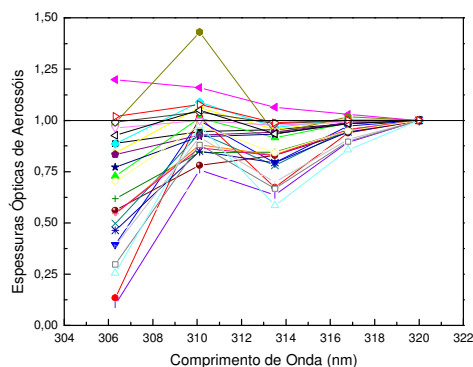


Figura 5: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da tarde entre os anos de 2000 a julho/2002 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKII #056 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

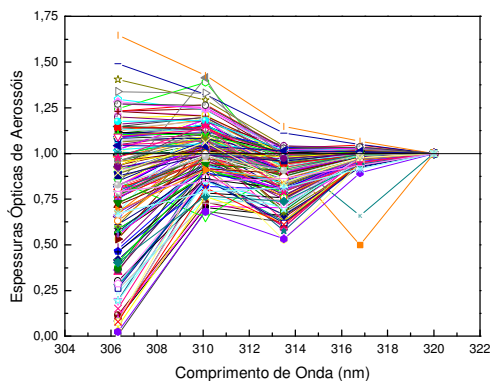


Figura 6: Espessuras Ópticas de Aerossóis em função do comprimento de onda na parte da tarde entre os anos de agosto/2002 a 2006 medidas pelo Espectrofotômetro Brewer MKIV #167 no OES/CRS/CIE/INPE-MCT.

Segundo Kirchhoff et al. [Ref. 8], as causas do comportamento das Espessuras Ópticas de Aerossóis na faixa de ultravioleta contrariar a Lei de Ångstrom não são conhecidas, pois

diversos fatores podem estar influenciando, tais como tipos de aerossóis, diferenças construtivas dos equipamentos e faixa de análise muito pequena.

Um dos fatores que provavelmente influenciaram nos resultados do trabalho é a natureza dos tipos de aerossóis atmosféricos para a parte da manhã e da tarde. Pela manhã, os aerossóis são associados principalmente à serração matinal e alta umidade e à tarde são associados, provavelmente, a eventos de queima de biomassa, tanto regionais ou não.

Referente a problemas construtivos de equipamento, os resultados do trabalho mostram que o comportamento é independente dos modelos dos instrumentos, para cada período da análise foi utilizado um equipamento de modelo diferente e os resultados apontam um mesmo comportamento geral. Ressalta-se que os modelos dos Brewers aqui utilizados têm diferenças construtivas significativas, tais como duplo sistema óptico e dupla rede de difração do modelo MKIII (167), não presente nos modelos MKII (056) e MKIV (081).

Quanto ao fato de que o período de análise ter sido pequeno para avaliar o comportamento das Espessuras Ópticas de Aerossóis com a Lei de Ångstrom, sem dúvidas pode ser considerado como um fator importante na análise, porém, a Lei de Ångstrom representa um espectro contínuo de comprimentos de onda, sendo válida, portanto, para espectros discretizados como o analisado no trabalho.

Os resultados encontrados corroboram os resultados obtidos por Kirchhoff et al. (Ref. [9]) que analisou dados de diversas cidades brasileiras, onde os aerossóis eram ligados tanto a poluição urbana (São Paulo), queima de biomassa (Campo Grande) e aerossóis marinhos (Natal).

## 4. CONCLUSÃO

Através da aplicação do método de Langley nos dados obtidos com Espectrofotômetros Brewer, pôde-se obter os valores das Espessuras Ópticas de Aerossóis e assim observar sua variação com o comprimento de onda. Para o período da manhã as EOA não apresentaram um comportamento definido. No período da tarde, na maioria dos dias as EOA aumentaram com o comprimento de onda, contrariando a Lei de Ångström (Ref. [1]).

O fato das Espessuras Ópticas de Aerossóis obtidas em diversos dias, principalmente a tarde, estarem aumentando com o comprimento de onda pode ser devido, provavelmente, ao fato dos aerossóis analisados serem de concentrações e naturezas diferentes. Além disto, a análise de forma discretizada do comprimento de onda, em uma pequena faixa do ultravioleta, e não de forma contínua em ampla faixa pode ter influenciado nos resultados. Porém, o comportamento mostrou-se independente do modelo do instrumento.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos Programas PIBIC/UFSM – CNPq/MCT, PIBIC/INPE – CNPq/MCT e FAPERGS pelas bolsas concedidas.

### REFERÊNCIAS

- [1] Ångström, A., The parameters of atmospheric turbidity, *Tellus*, XVI, 1964, p. 64-75.
- [2] Cachorro, V.E., p. Dum, and A.M. de Frutos, "Retrieval of vertical ozone content using the Chappuis band with high spectral resolution solar radiation measurements," *Geophys. Res. Letters*, vol. 23, 1996, pp. 3325-3328.
- [3] Carbone, S., Padilha, L.F., Rosa, M.B., Pinheiro, D.K., Schuch, N.J., "First estimations of the aerosol optical thickness using Langley Method at Southern Brazil (29.4°S, 53.8°W)," *Advances in Space Research*, vol. 37, 2006, pp. 2178-2182.
- [4] Coulson, K.L., "Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements," New York: Academic Press, 1975. pp. 322.
- [5] El-Shobokshy, M.S., Al-Saedi, Y.G., "Atmospheric turbidity and transmittance of solar radiation in Riyadh, Saudi Arabia," *Atmos. Environ.* vol. 27B, no. 4, 1993, pp. 401-411.
- [6] Giavis, G.M., "Diurnal variation of the aerosol optical depth for two distinct cases in the Athens area, Greece," *Atmospheric Research*, vol. 78, 2005, pp. 79-92.
- [7] Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York, 1983.
- [8] Kirchhoff, V.W.J.H.; Silva, A.A., Costa, C.A., Leme, N.P., Pavão, H.G., Zaratti, F., "UV-B optical thickness observations of the atmosphere," *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. D3, 2001, pp. 2963-2973.
- [9] Kirchhoff, V.W.J.H.; Silva, A.A. e Pinheiro, D.K., "Wavelength dependence of aerosol optical thickness in the UV-B band," *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 12, 2002, pp. 58.1-58.4
- [10] Marengo, F., Santacesarina, V., Bais, A.F., Balis, D., Di Sara, A., Papayannis, A., Zerefos, C., "Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements (photochemical activity and solar ultraviolet radiation campaign)," *Applied Optics*, vol. 36, no. 27, 1997, pp. 6875-6886.
- [11] McGree, T.J.; Burris Jr, J., "SO<sub>2</sub> absorption cross sections in the near UV," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radioactive Transfer*, vol. 37, no. 2, 1987, pp. 165-182.
- [12] Molina, L.T.; Molina, M.J., "Absolute absorption cross sections of ozone in the 185 to 350 nm Wavelength range," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. D13, Dec. 1986, pp. 14501-14508.
- [13] Silva, Abel Antônio da., Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, INPE, 2001.
- [14] Silva, A.A.; Kirchhoff, V.W.J.H., "UVB direct sun measurements from Brewer Spectrophotometer to determine the aerosol optical thickness at several sites," *Energy*, vol. 30, 2005, pp. 1643-1647.
- [15] Teillet, P.M., "Rayleigh optical depth comparisons from various sources," *Applied Optics*, vol. 29, no. 13, 1990, pp. 1897-1900.
- [16] Yavorsky, B. e Detlaf, A., *Handbook of Physics*. Moscow: Mir, 1980, p. 1135.