

## **Avaliação do sensor OMI na inferência da Coluna Total de Ozônio para a cidade de Bauru, SP.**

Hallan Souza de Jesus<sup>1</sup>  
Simone M. Sievert Costa<sup>1</sup>  
Ramon Campos Braga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 01. 12630-000 – Cachoeira Paulista - SP, Brasil  
{hallan.souza, simone.sievert, ramon.braga}@cptec.inpe.br

**Abstract.** This study aims to validate total ozone column of Ozone Monitoring Instrument (OMI) on board NASA EOS-AURA satellite e evaluate the impact of ozone uncertainties on UV radiation. The comparison was done using co-located ground based observation of Brewer spectrophotometer over a site located at Bauru, SP- Brazil. The comparison was performed on daily and monthly bases for seven years (2005-2011). Comparison of satellite and ground data shows correlation of around 0.7 and differences of 2-8% for both daily and monthly data. The OMI data seems to underestimate the observation. These ozone errors have small impact of 1% on UV Radiation.

**Palavras-chave:** remote sensing, ozone, validation.

### **1. Introdução**

O ozônio ( $O_3$ ) é um dos gases minoritários com representação inferior a 0,0001% do total dos gases atmosféricos. Possui variação na vertical e sua maior concentração está localizada na parte inferior da estratosfera, aproximadamente entre 19 a 30 km acima da superfície - região conhecida como camada de ozônio (Siavasakthivel e Reddy, 2011). Seu principal papel é a atenuação da radiação solar ultravioleta (R-UV) do qual tem grande impacto no sistema terrestre. Dados provenientes de sensores a bordo de satélites indicam que a concentração média global anual do  $O_3$  na atmosfera terrestre é de aproximadamente 300 Unidades Dobson (DU) com variações conforme a latitude e a sazonalidade (Liou, 2002; Wallace e Hobbs, 2006). A coluna total de ozônio é menor nos trópicos e aumenta em direção aos polos devido aos padrões de circulação atmosférica.

Por causa do  $O_3$  ser um dos principais componentes atmosféricos que atenua a radiação solar com grande impacto na saúde humana dentre outros, seu monitoramento é extensamente realizado por meio de sensores à superfície e a bordo de satélites. Os espectrofotômetros Dobson são sensores passivos baseados na R-UV transmitida em direção ao sensor do qual emprega o princípio do diferencial da absorção do ozônio na banda espectral de 300 a 460nm. Estes sensores utilizam de dois a seis canais da banda de Huggins, onde a absorção varia rapidamente com o comprimento de onda.

Devido à importância da relação direta do  $O_3$  estratosférico na quantidade de R-UV (100nm a 400nm) incidente à superfície, este gás tem sido constantemente monitorado através de instrumentos instalados em plataformas orbitais. TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer - John e Krueger, 1989), SBUV-2 (Solar Backscatter UltraViolet Radiometer/2 - Miller et al., 2002), OMPS (Ozone Mapping Profile Suite - Remud et al., 2004) e OMI (Ozone Monitoring Instrument - Levelt et al., 2006; Veefkind et al.,

2006) são exemplos de sensores que monitoram a coluna total de ozônio através das diferentes técnicas (nadir, limbo e ocultação). Neste estudo, a ênfase é do sensor OMI a bordo do satélite Aura que realiza o monitoramento da coluna total de ozônio desde 2004 (Levelt et al., 2006; Veefkind et al., 2006).

Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar as estimativas de inferência do sensor OMI através de dados medidos por meio do espectrofotômetro Dobson à superfície na cidade de Bauru (SP) durante o período de Janeiro/2005 à Dezembro/2011. Também, busca-se avaliar a influência do O<sub>3</sub> nos fluxos descendentes da R-UV (100 a 400nm).

## 2. Metodologia de Trabalho

A motivação deste estudo é analisar a qualidade dos dados de ozônio inferidos pelo sensor OMI e avaliar o impacto das incertezas destes dados nas estimativas de R-UV na cidade de Bauru, SP. O presente estudo é dividido em três etapas.

Na primeira etapa, foram realizados testes de sensibilidade para avaliar o papel do ozônio na radiação espectral de UV. Considerou-se uma atmosfera padrão tropical com ângulo 0° e ozônio integrado na coluna atmosférica de 300 DU. Tendo em vista que a R-UV possui três divisões, UVA (100nm a 280nm), UVB (280nm a 315nm) e UVC (315nm a 400nm) dos quais apresentam diferentes influências dos constituintes atmosféricos, a avaliação foi feita para cada espectro do R-UV. A radiação espectral foi calculada através do código de transferência radiativa SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer – Ricchiazzi et al., 1998). O SBDART calcula diversas grandezas radiométricas para uma ampla variedade de condições atmosféricas possíveis. Especificamente, o modelo possui seis atmosferas padrões pré-estabelecidas. Neste estudo é utilizado o perfil tropical padrão, o qual apresenta características típicas de temperatura e umidade. O modelo ainda permite incluir perfis de radiossondagem, assim como, incluir propriedades ópticas de nuvens e aerossóis.

No teste de sensibilidade foram calculadas as radiâncias e irradiâncias espectrais considerando três casos, conforme descrito: caso **i**) apenas espalhamento Rayleigh ; caso **ii**) espalhamento Rayleigh e atenuação do Oxigênio e caso **iii**) igual caso anterior mais atenuação do O<sub>3</sub>. Para cada um dos casos foram estimados a percentagem da radiação UVA, UVB e UVC atenuada ao ser transmitida do topo da atmosfera até a superfície terrestre.

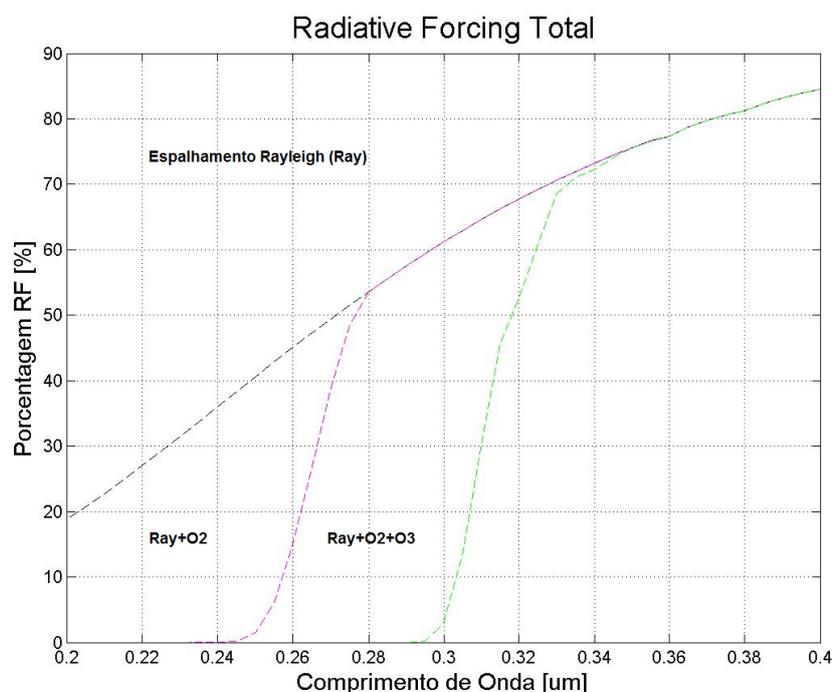
Na segunda etapa, dados do sensor OMI são comparados com dados de ozônio inferido por espectrofotômetro Dobson. Os dados de ozônio inferidos pelo sensor OMI são provenientes do projeto TEMIS, assim como, os monitorados à superfície são provenientes do projeto “World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center” (WOUDC - [http://www.woudc.org/index\\_e.html](http://www.woudc.org/index_e.html)). A estação está localizada a 22°34' S latitude, 49°02' W longitude e 640 m de altura. O produto OMI/TEMIS apresenta conjunto de informações adicionais à concentração total de ozônio, tais como erro da concentração, ângulo zenital solar, fração de nebulosidade entre outros. O erro da concentração da coluna de ozônio é baseada no estudo prévio de validação realizado por Veefkind et al., (2006) no período de Março a Junho de 2005. Este estudo compara os dados do OMI com correção (referenciada neste estudo como OMI [cor]) e sem as correções (OMI) indicadas por Veefkind et al., (2006). Dados diários e mensais do OMI

são comparados com aqueles do Dobson. E as métricas de avaliação são através dos índices estatísticos, tais como correlação ( $R$ ) e viés médio.

Na última etapa foi realizado um estudo considerando os erros estimados na etapa 2 sobre o impacto nas estimativas de R-UV à superfície. Neste sentido, foi calculada a R-UV integrada e a UVB usando o código SBDART para diferentes valores de  $O_3$ .

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra a percentagem da radiação UV espectral atenuada ao ser transmitida do topo da atmosfera até a superfície terrestre. Verifica-se de acordo com a Tabela 1 que os fluxos descendentes à superfície no espectro UVC são atenuados (~60%) devido ao espalhamento Rayleigh, sendo o restante absorvido pelo  $O_2$  e  $O_3$ . Nesta região, toda a radiação é atenuada na atmosfera. No espectro UVB ocorre atenuação nos “casos  $i$  e  $ii$ ” em (~40%) e o ozônio absorve em (~45%) os fluxos globais descendentes. Em termos do espectro UVA, ocorre atenuação somente no “caso  $i$ ” (~27%), a atenuação é insignificante para os outros (casos  $i$  e  $ii < 1\%$ ). Os resultados concordam com a literatura, indicando que o espalhamento Rayleigh é mais expressivo para comprimentos de onda menores. Sendo assim, verifica-se que o ozônio tem papel importante na R-UV incidente à superfície, principalmente em comprimentos de onda menores dos quais são os mais letais a vida no planeta. Nos próximos parágrafos são analisadas as incertezas dos dados de ozônio inferidos por sensores a bordo de satélite, e como suas incertezas podem afetar a modelagem da R-UV à superfície.



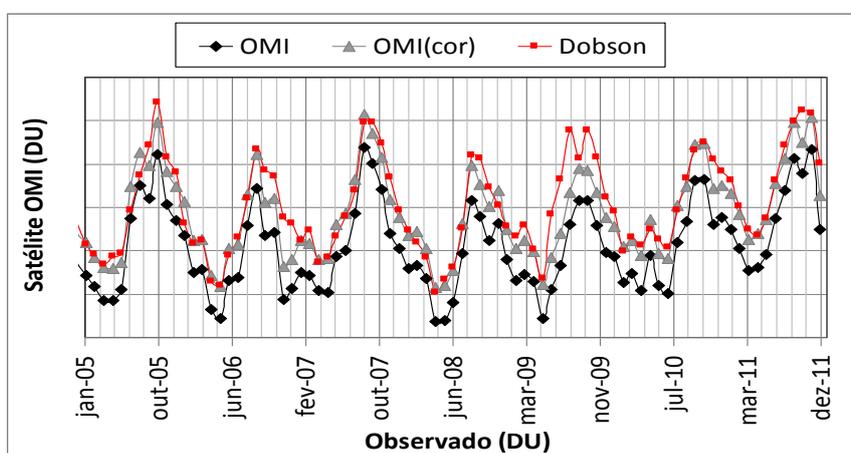
**Figura 1** – Análise do comportamento dos fluxos descendentes (RUV) à superfície na presença de (Ray,  $O_2$  e  $O_3$ ).

**Tabela 1** – Atenuação em porcentagem do Fluxo Descendente à superfície para os três casos considerados.

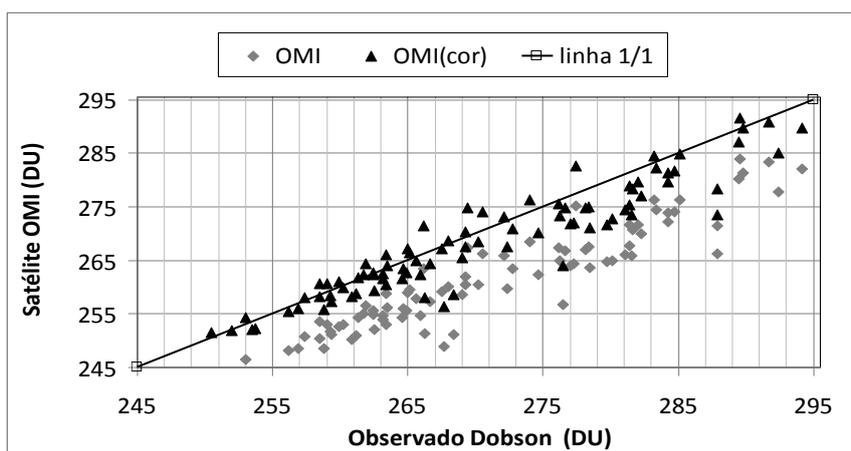
	UVA	UVB	UVC
<i>Caso i)</i>	22.00%	38.41%	57.80%
<i>Caso ii)</i>	22.30%	38.54%	94.08%
<i>Caso iii)</i>	23.53%	85.79%	100.00%

De maneira geral, o sensor OMI subestima a concentração de ozônio para todo o período de estudo (Tabela 2). As concentrações médias anuais para o OMI e Dobson nos sete anos são 262 e 271 DU, respectivamente. Verifica-se uma diferença de aproximadamente 4% entre os dados de satélite e espectrofotômetro à superfície. Considerando o erro estimado por Veefkind et al. (2006), a diferença entre OMI[cor] e Dobson é menor do que 1%.

a)



b)



**Figura-2:** Concentração média mensal integrada na coluna atmosférica inferida utilizando dados de superfície (Dobson) e de satélite (OMI). a) variação sazonal e b) dispersão para Bauru, SP.

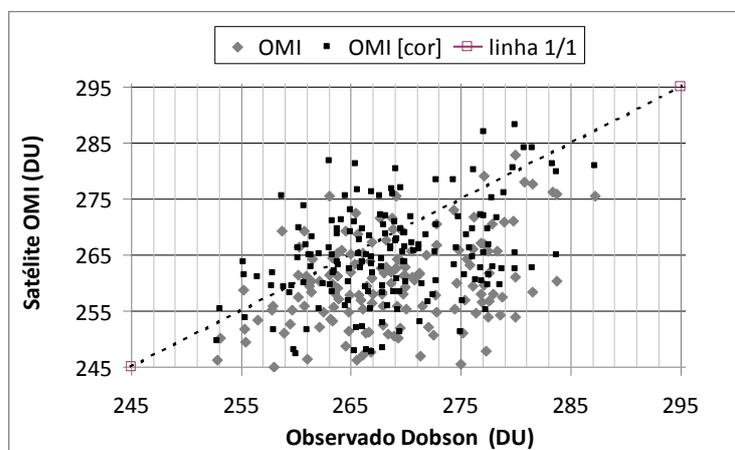
**Tabela 2** – Ozônio integrado na coluna atmosférica (em DU) inferido por sensor OMI e espectrofotômetro Dobson, e diferenças absolutas e relativas.

Meses	Obs. Dobson	Satélite		Viés (OMI - Dobson)		Viés (OMI[cor] - Dobson)	
		OMI	OMI[cor]	DU	%	DU	%
Jan	269	261	268	-8	-2,9	-1	-0,4
Fev	265	257	265	-7	-2,8	1	0,3
Mar	265	257	265	-7	-2,8	0	0,1
Abril	259	253	261	-6	-2,4	2	0,6
Mai	257	251	259	-6	-2,4	2	0,8
Junho	262	254	260	-8	-3,1	-2	-0,8
Julho	267	257	263	-9	-3,5	-4	-1,4
Ago	275	267	271	-8	-3,0	-5	-1,7
Set	284	276	279	-8	-2,7	-5	-1,8
Out	285	274	281	-11	-4,0	-5	-1,6
Nov	282	272	281	-10	-3,6	-2	-0,7
Dez	275	263	273	-12	-4,3	-1	-0,5
<b>Média</b>	<b>271</b>	<b>262</b>	<b>269</b>	<b>-8</b>	<b>-3,1</b>	<b>-2</b>	<b>-0,6</b>

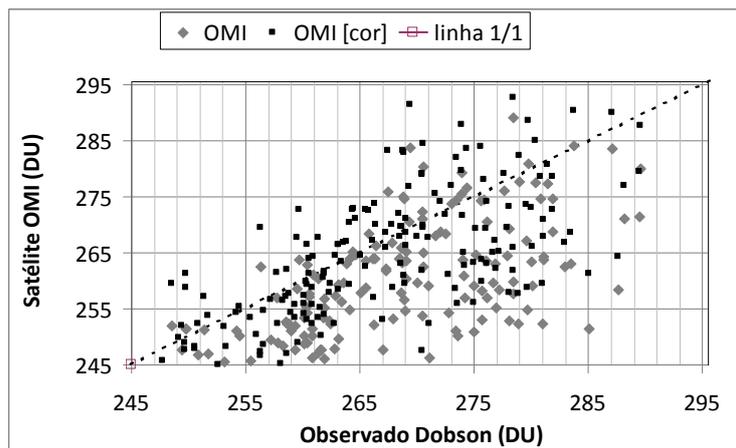
Na Figura 3, é visualizada a dispersão dos dados diários para os meses de Janeiro e Julho. Os erros dos dados diários são da mesma magnitude dos dados mensais. A correlação dos dados corrigido do OMI com as observações Dobson é aproximadamente 0.7. Observa-se uma maior dispersão dos dados, fato que corrobora para a influência da nebulosidade nas inferências.

As diferenças apresentadas na Tabela-3 de 4% entre observações à superfície são similares encontrado por outros autores para o OMI (Balis et al., 2007; Buchard et al., 2008) e TOMS (Kalliskota et al., 2000; Kazantzidis et al., 2006). Os erros de ozônio da ordem de 2% a 5% modificam a estimativa da R-UV à superfície em menos de 1% (A+B+C, não mostrada aqui) e de aproximadamente 3 a 10% para UVB (Figura 4).

a) Janeiro



b) Julho



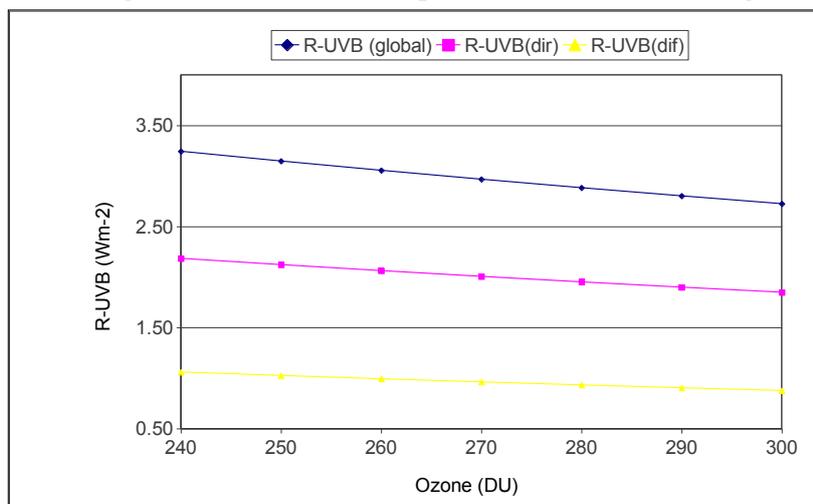
**Figura 3** – Dispersão da concentração média mensal integrada na coluna atmosférica inferida utilizando dados de superfície (Dobson) e de satélite (OMI) a) janeiro e b) Julho para Bauru, SP.

**Tabela 3** – Viés e correlação dados diários de O<sub>3</sub> inferido via satélite e observações à superfície.

	Janeiro		Julho	
	OMI	OMI_cor	OMI	OMI_cor
<b>Viés</b>	-9,34	2,70	-9,29	-6,10
<b>Correlação</b>	0,37	0,67	0,69	0,68

Na Figura 4 é possível avaliar o impacto que o acréscimo na concentração de O<sub>3</sub> apresenta para os fluxos radiativos à superfície. Assim, mostra-se que o aumento da concentração de O<sub>3</sub> em 60 DU apresenta um decréscimo de aproximadamente 1 W/m<sup>2</sup> nos fluxos diretos à superfície. É visto que é necessária uma maior análise sobre o motivo de haver pouco influencia na irradiância à superfície do UVB.

**Figura 4** – UVB (global, direta e difusa) para diferentes concentrações de ozônio.



## 4. Conclusões

Portanto, através deste trabalho pode-se observar que as inferências do sensor OMI são subestimadas numa fração média de -3,1%, onde na estação de inverno esta fração se encontra entre -3,0 a -3,5% e verão entre -2.9 a -4.3%, mostrando uma relação com o ângulo zenital. Ou seja, na época de verão os valores são subestimados em uma fração maior. Com a correção apresentada essa fração diminui, onde no inverno fica entre -0.8 a -1.7% e no verão -0.5 a 0.3. Conclui-se que no verão as estimativas corrigidas são mais representativas, pois subestimam em menor proporção. Na análise dos meses de janeiro e julho, observa-se a influência da fração de nebulosidade do qual apresenta maior dispersão dos dados. As estimativas são subestimadas, entretanto quando corrigido apresenta uma superestimativa pouco expressiva.

Nos testes de sensibilidade, verifica-se que o O<sub>2</sub> possui impacto somente no UVC, fato do qual se atribui à localização das bandas de absorção (linhas e do continuum) de *Schumann-Runge e do continuum de Herzberg*. O O<sub>3</sub> por sua vez, possui impacto predominante no UVB devido à forte banda de absorção de *Hartley bands* e o espalhamento Rayleigh tem papel fundamental no UVC. No caso da UVA, o espalhamento Rayleigh é o principal processo de extinção da radiação.

Também, nota-se a necessidade de um estudo mais detalhado sobre a influência do acréscimo do conteúdo total de ozônio no decréscimo dos fluxos descendentes à superfície. Pelo observado neste estudo há ínfima diminuição na radiação ultravioleta B.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas, ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudo.

## Referência Bibliográfica

Balis, D.; Kroon, M.; Koukouli, M.E.; Brinkma, E.J.; Labow, G.; Veefkind, J.P.; McPeters, R.D. Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-10, 2007.

Buchard, V.; Brogniez, C.; Auriol, F.; Bonnel, B.; Lenoble, J.; Tanskanen, A.; Bojkov, B.; Veefkind, P.; Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites. **Atmospheric Chemistry and Physics**. V. 8, p. 4517-4528. 2008.

John, D.L.; Krueger, F.A.J. The ultraviolet radiation environment of Antarctica: McMurdo Station during September-October 1987. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 8491-8496, 2006.

Kalliskota, A.; Kaurola, J.; Taalas, P.; Herman, J.R.; Celarier, E.a.; Krotkov, N.A. Comparison of daily UV doses estimated from Nimbus 7/TOMS measurements and ground-based spectroradiometric data. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, 2000.

Kazantzidis, A.; Bais, A.F.; Gröbner, J.; Herman, J.R.; Kazadzis, S.; Krotkov, N.; Kyrö, E.; Den Outer, P.N.; Garane, K.; Görts, P.; Lakkala, K.; Meleti, C.; Slaper, H.; Tax, R.b.; Turunen, T.; Zerefos, C.S.

Comparison of satellite-derived UV irradiances with ground-based measurements at four European stations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006.

Levelt, P.F.; Van Den Oord, G.H.J.; Dobber, M.E.; Mälkki, A.; Visser, H.; Vries, J.; Stammes, P.; Lundell, J.O.V.; Saari, H.; The Ozone Monitoring Instrument. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 5, 2006.

Liou, K.N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Academic Press, San Diego – California. 583 pag., 2<sup>o</sup> ed., 2002.

Miller, A.J.; Nagatani, R.M.; Flynn, L.E.; Kondragunta, S.; Beach, E.; Stolarski, R.; Mcpeters, R.D.; Bhartia, P.K.; Deland, M.T.; Jackman, C.H.; Wuebbles, D.J.; Patten, K.O.; Cebula, R.P.; A cohesive total ozone data set from the SBUV(2) satellite system. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D23, 2002.

Remund, Q.P.; Newella, D.; Rodriguez, J.V.; Asbury, S.; Jaross, G.; The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS): On-Orbit Calibration Design. **Passive Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds IV**, v. 5652, p. 165-173, 2004.

Ricchiuzzi, P.; Yang, S.; Gautier, C.; Sowle, D.; SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. **American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2101-2114, 1998.

Sivasakthi, T.; Reddy, K.K.S.K.; Ozone Layer Depletion and Its Effects: A Review. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 2, n. 1, 2011.

Veefkind, J.P.; De Haan, J.F.; Brinksma, E.J.; Kroon, M.; Levelt, P. F.; Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique, **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 44(5), 1239–1244, 2006.

Wallace, J.; Hobbs, P.V. **Atmospheric Science: An Introduction Survey**. 2<sup>o</sup> ed.: University of Washington, San Diego – California. p. 505, 2006.