

CLIMATOLOGIA DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DO AEROSSOL NA AMAZÔNIA COM BASE NA REDE AERONET

Melina Andrade Paixão¹, Carlos Pires^{1,2}, Paulo Artaxo¹, Alexandre Correia²

RESUMO: A AERONET (*Aerosol Robotic Network*) é uma rede mundial de radiômetros para o monitoramento de aerossóis, e possui 4 radiômetros em situação ativa na região amazônica, dos quais um na cidade de Alta Floresta (MT) e um na cidade de Ji Paraná (RO). O presente estudo discute a climatologia das propriedades ópticas do aerossol obtidas através da AERONET nesses dois locais, representativos da região afetada por queimadas na Amazônia. Para cada local apresentam-se as médias mensais de espessura óptica do aerossol (AOD), albedo de espalhamento único (SSA), fator de assimetria (g), índice de refração complexo ($n + ik$), coeficiente de Angstrom e água precipitável, além de médias sazonais (estação seca e chuvosa) e de eventos extremos (elevada quantidade de aerossóis, $AOD > 1,1$) dos parâmetros SSA e AOD. As médias de AOD, em ambos locais, apresentam valores próximos de 0,1 durante a estação chuvosa e início da estação seca, passando rapidamente para valores em torno de 0,7 em agosto e 0,9 em setembro. O valor de albedo encontrado durante a estação de queimadas foi de 0,935. Os resultados fornecem detalhada caracterização do aerossol da região amazônica, oferecendo parâmetros realísticos que podem contribuir para o aperfeiçoamento de modelos numéricos regionais de previsão de tempo e estudos climáticos.

ABSTRACT: AERONET (*Aerosol Robotic Network*) is a global sun/sky radiometer network for aerosol monitoring, with 4 active measurement sites in the Amazon region, among which one at Alta Floresta (MT) and Ji Paraná (RO). This study discusses the climatology of aerosol optical properties obtained at these two AERONET sites, which are representative of the biomass burning affected area in Amazonia. We present monthly averages of parameters such as aerosol optical depth (AOD), single scattering albedo (SSA) asymmetry factor (g), complex refraction index ($n + ik$), Angstrom coefficient, and precipitable water. AOD averages, for both sites, presented values around 0,1 during wet and early dry seasons, changing rapidly to values around 0,7 in August and 0,9 in September, near the peak of the biomass burning season. The typical SSA value during the biomass burning season was 0,935. The results in this work allow for a detailed optical characterization of atmospheric aerosols over the Amazon region, supplying realistic parameters that can be contribute for the enhancement of regional numerical models for weather forecast and climate studies.

Palavras-Chave: propriedades ópticas de aerossol, AERONET, queimadas.

INTRODUÇÃO

Os aerossóis participam no balanço radiativo da Terra de forma direta, espalhando e absorvendo a radiação solar que chega à atmosfera, e de forma indireta, atuando como núcleo de condensação de nuvem, afetando o perfil de temperatura por aquecer/esfriar a camada da atmosfera em que se encontra, entre muitas outras formas. A caracterização das propriedades ópticas do

¹ Instituto de Física da Universidade de São Paulo – Laboratório de Física Atmosférica – Rua do Matão, Trav. R, 187 – CEP 05508-900 – São Paulo/SP – Telefone: (11) 3091-6925 – e-mail: melina@if.usp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Rod. Pres Dutra, km 39 – CEP 12630-000 – Cachoeira Paulista/SP – Telefone: (12) 3186-9372 – e-mail: acorreia@cptec.inpe.br

aerossol atmosférico é fundamental para a obtenção de mapas realísticos da carga atmosférica de aerossóis sobre o Brasil por sensoriamento remoto, assim como para o aperfeiçoamento de modelos computacionais que simulam a físico-química da atmosfera (Correia *et al.*, 2006).

Na região da floresta Amazônica ocorrem queimadas de grandes proporções, anualmente, no período da estação seca, como ferramenta agrícola de limpeza do solo. Essas queimadas afetam não somente a região amazônica, mas também são exportados esses aerossóis para o sudeste do país e países vizinhos como a Bolívia, tal a quantidade de material particulado emitido nessas ocasiões (Freitas *et al.*, 2005).

A AERONET (*Aerosol Robotic Network*) é uma rede de monitoramento óptico de aerossóis através de radiômetros padronizados e calibrados, instalados em mais de 200 lugares em todo o mundo, sendo 9 só no Brasil e 5 na Bacia Amazônica, com medidas regulares desde 1999 (Holben *et al.*, 1998). A AERONET é mantida pela NASA e estendida por outras instituições de pesquisa e ensino como o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e disponibiliza através da internet as medidas realizadas e vários produtos derivados.

Este trabalho discute os resultados obtidos entre 1999 e 2005 em dois locais de medidas da rede AERONET na Amazônia, com a caracterização de longo prazo das propriedades ópticas do aerossol com especial enfoque no estudo do aerossol de queimada.

METODOLOGIA

Foram utilizadas as medidas da rede AERONET realizadas em Ji Paraná (RO) e Alta Floresta (MT) no período de janeiro de 1999 a dezembro de 2005. As propriedades ópticas analisadas foram:

- a) AOD (*Aerosol Optical Depth*), profundidade óptica do aerossol: é um indicativo da quantidade e da eficiência de extinção de radiação solar pela matéria opticamente ativa num dado comprimento de onda.
- b) SSA (*Single Scattering Albedo*), albedo de espalhamento único: é definido como a razão entre o coeficiente de espalhamento e o coeficiente de extinção num dado comprimento de onda, ou seja, a fração de um feixe de radiação que é espalhado em relação à soma do espalhamento e absorção.
- c) Fator de assimetria (g): é um parâmetro que varia de -1 a 1 e reflete a simetria do espalhamento de radiação para um certo comprimento de onda. Para $g=0$, tem-se um espalhamento isotrópico, para $g=-1$ o feixe incidente é totalmente retro-espalhado e para $g=1$ o espalhamento é totalmente frontal. O fator de assimetria é importante na avaliação da contribuição das partículas de aerossol na transferência radiativa ao longo da atmosfera.
- d) Índice de refração complexo ($n + ik$): parâmetro associado à mudança de velocidade das ondas eletromagnéticas em um meio em relação ao vácuo e que depende do comprimento de onda.

Os índices de refração das partículas e moléculas são compostos por uma parte real, n , e uma parte imaginária, k , que correspondem, respectivamente, às propriedades de espalhamento e absorção da radiação pelo meio material.

e) Coeficiente de Angstrom: é calculado a partir da espessura óptica em dois comprimentos de onda e fornece indícios a respeito do tamanho das partículas. Para coeficiente de Angstrom com valor próximo de zero tem-se partículas grandes como gotas de nuvens, enquanto valores mais altos representam partículas menores, como aerossóis de queimada.

f) Água precipitável (cm): quantidade de vapor d'água integrado na coluna.

A AERONET possuiu dois tipos de medidas: as diretas e as derivadas. As medidas diretas são obtidas com o colimador do radiômetro apontando diretamente para o sol, e são feitas aproximadamente a cada 15 minutos. Já as derivadas são obtidas através do chamado *almucantar*, quando o colimador não aponta diretamente para o sol, e são, portanto, menos numerosas pois precisam que não haja nuvens ao redor, enquanto que as medidas diretas exigem apenas que não haja nuvens entre o sol e o radiômetro. As medidas diretas utilizadas foram as de profundidade óptica do aerossol nos canais de 340nm, 380nm, 440nm, 500nm, 670nm, 870nm e 1020nm, água precipitável que é obtida a partir do canal 932nm e coeficiente de Angstrom 440-675nm. As medidas derivadas utilizadas foram o albedo de espalhamento simples, fator de assimetria e índice de refração, parte real e complexa. Como a interação entre as partículas de aerossol de queimadas e a radiação solar depende do comprimento de onda (λ) segundo uma lei de potências proporcional a $\lambda^{-\alpha}$, com $1 < \alpha < 2$ (Kaufman, 1993), o menor comprimento de onda disponível, de 441nm, foi escolhido para o estudo dos parâmetros derivados.

Para assegurar que as medidas se referem apenas às partículas de aerossol foram utilizadas as medidas de nível 1.5 da AERONET, associadas a um processo rigoroso de remoção de contaminação por nuvens (Pires *et al.*, 2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1-a) mostra os valores médios mensais de água precipitável entre 1999 e 2005 em Alta Floresta (MT) e Ji Paraná (RO). A partir desses valores podem-se estabelecer duas estações diferentes: estação chuvosa, compreendida entre os meses de novembro a abril, e estação seca, definida entre os meses de maio a outubro. Há um período de transição para a estação chuvosa entre os meses setembro e outubro, quando os valores de água precipitável começam a subir. A estação de queimadas inicia-se ao final da estação seca, compreendendo os meses de agosto, setembro e outubro. Nesse período a emissão de aerossóis de queimada aumenta abruptamente e a profundidade óptica do aerossol aumenta cerca de 12 vezes nessa época, como pode ser visto na Figura 1-b). Na Figura 1-c) são apresentadas as médias de espessura óptica do aerossol em função

do comprimento de onda no mês de setembro (auge das queimadas) e no mês de janeiro (estação chuvosa). Note-se a modificação dos valores de profundidade óptica entre os regimes das estações úmida e seca, assim como a inclinação das curvas denotando um aumento da dependência espectral para os comprimentos de onda medidos.

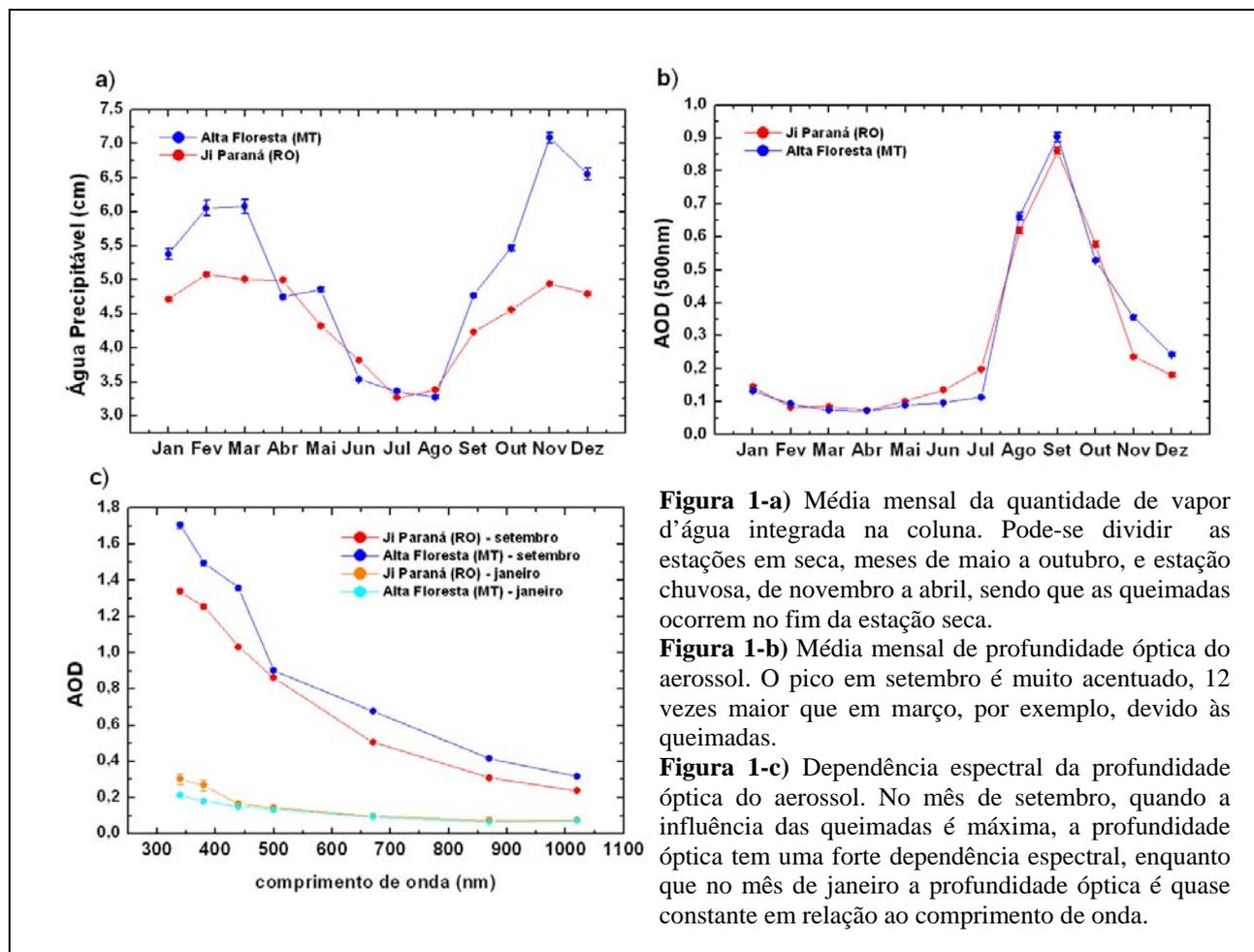


Figura 1-a) Média mensal da quantidade de vapor d'água integrada na coluna. Pode-se dividir as estações em seca, meses de maio a outubro, e estação chuvosa, de novembro a abril, sendo que as queimadas ocorrem no fim da estação seca.

Figura 1-b) Média mensal de profundidade óptica do aerossol. O pico em setembro é muito acentuado, 12 vezes maior que em março, por exemplo, devido às queimadas.

Figura 1-c) Dependência espectral da profundidade óptica do aerossol. No mês de setembro, quando a influência das queimadas é máxima, a profundidade óptica tem uma forte dependência espectral, enquanto que no mês de janeiro a profundidade óptica é quase constante em relação ao comprimento de onda.

Tabela 1: Valores médios mensais e respectivos desvios da média das propriedades ópticas estudadas em Alta Floresta (MT). O número de medidas utilizado para o cálculo das médias variou de 20 para medidas derivadas durante o mês de janeiro a 5043 para medidas diretas durante a estação seca.

	AOD 500	SSA 441	<i>g</i>	Angstrom 440-675	<i>n</i>	<i>k</i>
Janeiro	0,133 ± 0,003	0,946 ± 0,015	0,674 ± 0,008	1,181 ± 0,012	1,465 ± 0,026	0,006 ± 0,003
Fevereiro	0,094 ± 0,002	0,928 ± 0,019	0,668 ± 0,008	1,091 ± 0,013	1,539 ± 0,026	0,007 ± 0,003
Março	0,074 ± 0,001	0,908 ± 0,017	0,679 ± 0,009	1,315 ± 0,030	1,467 ± 0,022	0,012 ± 0,004
Abril	0,073 ± 0,001	0,910 ± 0,013	0,672 ± 0,005	1,488 ± 0,020	1,472 ± 0,011	0,018 ± 0,004
Mai	0,089 ± 0,001	0,930 ± 0,005	0,655 ± 0,002	1,559 ± 0,010	1,467 ± 0,007	0,007 ± 0,001
Junho	0,097 ± 0,001	0,884 ± 0,009	0,639 ± 0,002	1,613 ± 0,009	1,456 ± 0,006	0,036 ± 0,005
Julho	0,113 ± 0,002	0,883 ± 0,005	0,639 ± 0,002	1,533 ± 0,006	1,476 ± 0,005	0,019 ± 0,002
Agosto	0,661 ± 0,011	0,914 ± 0,003	0,644 ± 0,002	1,757 ± 0,004	1,512 ± 0,004	0,013 ± 0,001
Setembro	0,902 ± 0,013	0,946 ± 0,002	0,663 ± 0,002	1,673 ± 0,004	1,503 ± 0,005	0,008 ± 0,001
Outubro	0,529 ± 0,006	0,951 ± 0,002	0,666 ± 0,002	1,610 ± 0,005	1,491 ± 0,006	0,007 ± 0,001
Novembro	0,355 ± 0,007	0,944 ± 0,010	0,684 ± 0,004	1,514 ± 0,011	1,459 ± 0,011	0,010 ± 0,004
Dezembro	0,242 ± 0,006	0,967 ± 0,005	0,681 ± 0,004	1,366 ± 0,011	1,452 ± 0,014	0,004 ± 0,001

Tabela 2: Valores médios mensais e respectivos desvios da média das propriedades ópticas estudadas em Ji Paraná (RO). O número de medidas utilizado para o cálculo das médias variou de 23 para medidas derivadas durante o mês de janeiro, chegando a 3621 para medidas diretas durante a estação seca.

	AOD 500	SSA 441	g	Angstrom 440-675	n	k
Janeiro	0,145 ± 0,004	0,917 ± 0,013	0,680 ± 0,009	1,268 ± 0,014	1,494 ± 0,026	0,009 ± 0,003
Fevereiro	0,083 ± 0,002	0,867 ± 0,020	0,694 ± 0,016	1,176 ± 0,015	1,443 ± 0,032	0,015 ± 0,004
Março	0,085 ± 0,002	0,931 ± 0,014	0,663 ± 0,011	1,236 ± 0,013	1,470 ± 0,027	0,006 ± 0,002
Abril	0,074 ± 0,001	0,853 ± 0,023	0,677 ± 0,011	1,388 ± 0,017	1,447 ± 0,017	0,028 ± 0,009
Mai	0,102 ± 0,001	0,810 ± 0,012	0,700 ± 0,004	1,514 ± 0,012	1,403 ± 0,008	0,035 ± 0,004
Junho	0,136 ± 0,002	0,803 ± 0,009	0,683 ± 0,003	1,473 ± 0,007	1,421 ± 0,006	0,041 ± 0,003
Julho	0,199 ± 0,002	0,840 ± 0,006	0,662 ± 0,002	1,658 ± 0,004	1,439 ± 0,005	0,032 ± 0,003
Agosto	0,620 ± 0,009	0,915 ± 0,002	0,669 ± 0,001	1,839 ± 0,003	1,483 ± 0,004	0,013 ± 0,001
Setembro	0,860 ± 0,011	0,933 ± 0,002	0,684 ± 0,002	1,715 ± 0,004	1,467 ± 0,004	0,010 ± 0,001
Outubro	0,576 ± 0,009	0,932 ± 0,003	0,679 ± 0,002	1,669 ± 0,006	1,466 ± 0,006	0,011 ± 0,001
Novembro	0,236 ± 0,004	0,926 ± 0,011	0,687 ± 0,006	1,409 ± 0,011	1,454 ± 0,018	0,011 ± 0,003
Dezembro	0,181 ± 0,005	0,934 ± 0,009	0,694 ± 0,008	1,333 ± 0,013	1,412 ± 0,019	0,006 ± 0,001

Tabela 3: Valores médios de albedo de espalhamento único no canal de 441nm e profundidade óptica do aerossol no canal de 500nm. A estação seca total é definida como os meses entre maio e outubro, a estação seca 1 (sem queimadas) são os meses maio, junho e julho, e a estação de queimadas os meses agosto setembro e outubro. A estação chuvosa está compreendida entre os meses de novembro a abril.

	Alta Floresta (MT)		Ji Paraná (RO)	
	SSA 441	AOD 500	SSA 441	AOD 500
Estação seca total	0,918 ± 0,030	0,399 ± 0,349	0,872 ± 0,061	0,415 ± 0,313
Estação seca 1 (sem queimadas)	0,899 ± 0,027	0,100 ± 0,012	0,818 ± 0,020	0,145 ± 0,049
Estação seca 2 (queimadas)	0,937 ± 0,020	0,698 ± 0,189	0,927 ± 0,010	0,685 ± 0,153
Estação chuvosa	0,934 ± 0,023	0,162 ± 0,114	0,905 ± 0,035	0,134 ± 0,065
Eventos com AOD 440>1,1	0,948 ± 0,002	-	0,948 ± 0,005	-

As Tabelas 1 e 2 mostram as médias mensais das propriedades ópticas estudadas em Alta Floresta e Ji Paraná. O fator de assimetria, g , é praticamente constante durante o ano e sua variabilidade é mais correlacionada com a estação do ano que com a estação de queimadas. A média de todos os valores de g é de $0,681 \pm 0,012$ em Ji Paraná e de $0,664 \pm 0,016$ em Alta Floresta.

Os valores de coeficiente de Angstrom aumentam durante a estação seca atingindo os maiores valores entre agosto e setembro devido à emissão de aerossol de queimada, que é tipicamente composto de partículas de raios efetivos menores que durante a estação chuvosa.

A parte real do índice de refração não apresenta comportamento claramente relacionado à estação de queimadas. A parte imaginária do índice de refração, relacionada com as propriedades de absorção de radiação pelas partículas, tem seu pico em julho, no auge da estação seca. Também relacionado com as propriedades de espalhamento e absorção das partículas, o albedo de espalhamento único é menor na estação seca do que na estação chuvosa, indicando um aerossol mais absorvedor da radiação na estação seca. No entanto, se considerarmos apenas os meses altamente influenciados por queimadas, o albedo cresce e se torna mais parecido com o da estação

chuvosa, ou até maior no caso de Ji Paraná. A fim de analisar apenas a contribuição do aerossol de queimada, os eventos com profundidade óptica do aerossol maior que 1,1, ou seja, eventos altamente impactados por queimadas, foram separados da estação seca. A média de albedo, nos dois locais estudados, foi de $0,948 \pm 0,005$ e é esse valor, portanto, o sugerido como típico do aerossol de queimada na Amazônia, não representando, porém, um valor típico de toda a estação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das características ópticas de aerossóis atmosféricos na Amazônia é importante para a compreensão de processos de transferência radiativa e conseqüentes impactos climáticos diretos e indiretos que ocorrem nessa região. Este trabalho discute resultados de longo prazo, correspondentes a seis anos de medidas de propriedades ópticas de aerossóis, de 1999 a 2005, realizadas com radiômetros da rede AERONET em dois locais da região amazônica. Para cada local apresentam-se as médias mensais de espessura óptica do aerossol (AOD), albedo de espalhamento único (SSA), fator de assimetria (g), índice de refração complexo ($n + ik$) e coeficiente de Angstrom, além de médias sazonais (estação seca e chuvosa) e de eventos extremos (alta quantidade de aerossóis, $AOD > 1,1$) dos parâmetros SSA e AOD.

As propriedades ópticas do aerossol atmosférico na Bacia Amazônica são influenciadas majoritariamente pela quantidade de vapor d'água disponível na atmosfera, relacionada à estação do ano, e pela emissão de grande quantidade de aerossol de queimada nos meses de agosto a outubro. Com base nos valores de água precipitável foi possível determinar duas estações na Amazônia: estação seca, compreendida entre os meses de maio a outubro, e estação chuvosa, do mês de novembro a abril. A profundidade óptica média do aerossol durante a estação de queimadas é de $0,642 \pm 0,061$, enquanto que no resto do ano o valor médio é de $0,139 \pm 0,002$, mostrando um drástico aumento na quantidade de matéria opticamente ativa na atmosfera durante o período de queimadas. O albedo de espalhamento único durante a estação chuvosa é de 0,919, já na estação seca, excluindo-se o período de queimadas, é de 0,858. Durante o período de queimadas o albedo aumenta para 0,935, indicando o aumento do espalhamento da radiação devido a esses aerossóis, sendo esses valores as médias entre os dois locais. A razão desse comportamento não é clara e constitui tema de pesquisa atual, no entanto o número de observações durante a estação seca (5043 em Alta Floresta e 3621 em Ji Paraná) permite inferir que se trata de um comportamento típico, e não uma anomalia, para aerossóis de queimadas nos locais estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Brent Holben por seus esforços em estabelecer e manter os sites da AERONET utilizados neste trabalho, bem como a Gilberto Nishioka por seu importante papel na

construção da base de dados estudada. M. Andrade Paixão e C. Pires agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro (Processos PIBIC 100961/2006-1 e 117362/2006-9). A. Correia agradece à FAPESP pelo suporte financeiro (Processos 04/10084-8 e 05/51356-3).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Correia, A.L., Castanho, A.D.A., Martins, J.V., Longo, K.M., Yamasoe, M.A., Artaxo, P. Inferência de Aerossóis. In: Rudorff, B.F.T., Shimabukuro, Y.E., Ceballos, J.C. (org.) O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil. Bookimage, p.297-314, ISBN 85-8739329-4, 2006.
- Freitas, S., Longo, K., Silva Dias, M., Silva Dias, P., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G., Recuero, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America, *Environmental Fluid Mechanics*, doi:10.1007/s10652-005-0243-7, v.5, p.135–167, 2005.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., Smirnov, A. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of the Environment* v.66, n.1, p1-16, 1998.
- Kaufman, Y.J. Measurements of the aerosol optical thickness and the path radiance – Implications on aerosol remote sensing and atmospheric corrections. *Journal of Geophysical Research*, v.98, p.2677-2692, 1993.
- Pires, C., Correia, A., Paixão, M.A., Artaxo, P. Estudo da climatologia regional de Coeficiente de Angstrom como extensão do procedimento de cloud-screening da AERONET. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.