

ESTUDO DA CLIMATOLOGIA REGIONAL DE COEFICIENTE DE ANGSTROM COMO EXTENSÃO DO PROCEDIMENTO DE CLOUD-SCREENING DA AERONET

Carlos Pires¹, Alexandre Correia², Melina Andrade Paixão¹, Paulo Artaxo¹

RESUMO: A AERONET (Aerosol Robotic Network) é uma rede mundial de radiômetros para o monitoramento de aerossóis, e utiliza um protocolo padronizado de aquisição e processamento de dados, bem como de calibração de instrumentos. Na passagem da base de dados de nível 1.0 para nível 1.5, aplica-se um procedimento de cloud-screening visando eliminar medidas contaminadas por nuvens. Este trabalho utiliza os resultados do procedimento de cloud-screening usual da AERONET, juntamente com a climatologia regional de Coeficiente de Angstrom, para obter um método de extensão do processo operacional que permite uma identificação mais rigorosa de medidas contaminadas remanescentes nas medidas de nível 1.5. São apresentados os resultados obtidos para 7 locais de medição da AERONET na América do Sul, para os quais a aplicação da metodologia descrita neste trabalho permitiu a identificação e exclusão de cerca de 2 a 13% de medidas de nível 1.5, contaminadas por nuvens. Mostra-se também um exemplo de aplicação deste método realizado em estudos de comparação entre medidas da profundidade óptica do aerossol obtidas pela AERONET com aquelas obtidas por um sensor à bordo de satélites sobre os locais de medição estudados.

ABSTRACT: AERONET (Aerosol Robotic Network) is a global sun/sky radiometer network for aerosol monitoring, using standard protocols for data acquisition, processing and instrument calibration. Processing data from base levels 1.0 to 1.5, a cloud-screening procedure is applied, in order to eliminate cloud contaminated measurements. This work uses the standard AERONET cloud-screening procedure results, in addition to regional Angstrom coefficient climatology, to derive a method for extending the operational procedure allowing a more restrictive identification of cloud contaminated measurements remaining in level 1.5 data base. We present the results obtained for 7 AERONET sites over South America, for which the use of the methodology described in this work allowed identification and removal of about 2 to 13% of level 1.5 measurements contaminated by clouds. We also present an application example of this method in a comparison study between aerosol optical depth measurements obtained by AERONET and those obtained by a satellite sensor over the studied sites.

Palavras-Chave: sensoriamento remoto de aerossóis, AERONET, cloud-screening.

INTRODUÇÃO

A AERONET (Aerosol Robotic Network) é uma rede mundial de monitoramento óptico de aerossóis atmosféricos, mantida pela NASA e expandida por diversas instituições de pesquisa ao redor do mundo. Contando com mais de 200 locais de medição, utiliza protocolo padronizado de aquisição e processamento de dados, bem como de calibração de instrumentos. O instrumento utilizado em toda a rede é o radiômetro espectral automático CIMEL CE-318, que realiza medidas

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 – Phone: +55-11-3091-6925 – e-mail: capjr@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 – Phone: +55-12-3186-9372 – e-mail: acorreia@cptec.inpe.br

de radiações direta e difusa a cada 15 minutos em média, mantido por energia solar e com colimador direcionado roboticamente (Holben et al., 1998).

Como o instrumento realiza medidas independentemente da presença de nuvens, cujo efeito é especialmente difícil de detectar em medidas apontando diretamente para o sol, é necessário um procedimento automático de cloud-screening, ou seja, de limpeza ou exclusão das medidas contaminadas pela presença de nuvens da base considerada. Tal procedimento foi apresentado por Smirnov et al. (2000), e utiliza critérios ligados à variação temporal das medidas, partindo da hipótese de que maior variabilidade indica maior probabilidade de contaminação por nuvens. Por esse procedimento, ficam definidos dois níveis de bases de dados: o primeiro, chamado de nível 1.0, corresponde ao conjunto de medidas não processadas; o segundo, chamado de nível 1.5, contém as medidas que não foram excluídas pelos critérios do cloud-screening.

Por considerar apenas critérios relacionados à variação temporal das medidas, e por ser projetado para processar de modo automatizado resultados obtidos em todos os locais de medição pelo mundo, o algoritmo operacional de cloud-screening apresenta algumas limitações. No mesmo trabalho em que o procedimento é apresentado (Smirnov et al., 2000) é discutida uma dessas limitações, referente ao chamado Coeficiente de Angstrom. Esse parâmetro, definido em função da dependência espectral da profundidade óptica do aerossol, é um bom indicador qualitativo do tamanho das partículas de aerossol (Angstrom, 1929). O Coeficiente de Angstrom possui valores típicos entre 0 e 4, sendo que valores mais altos correspondem a populações de partículas de raios efetivos menores e vice-versa. Valores muito próximos de 0, inclusive valores negativos, podem indicar a contaminação pela presença de nuvens, que possuem partículas significativamente maiores do que as partículas de aerossol tipicamente encontradas. Por isso, o Coeficiente de Angstrom é apontado como um possível parâmetro de verificação de contaminação por nuvens, podendo ser utilizado para restringir a base de dados estudada a partir de um valor limite inferior desse parâmetro, valor limite este que deve variar de acordo com o local e os tipos de aerossol considerados (Smirnov et al., 2000).

O objetivo do presente trabalho foi estabelecer um método de identificação dos valores limite de Coeficiente de Angstrom para cada local estudado, e aplicar esse método para medidas coletadas em vários locais com radiômetros da AERONET na América do Sul. Os valores limite obtidos poderão ser utilizados por outros autores para realizar um cloud-screening mais restritivo sobre medidas AERONET de nível 1.5, possibilitando uma exclusão mais criteriosa de medidas realizadas sob efeito da presença de nuvens e que eventualmente não tenham sido excluídas pelo procedimento operacional utilizado pela própria AERONET.

MÉTODOS

Foram utilizadas medidas AERONET de nível 1.0 e 1.5 coletados em 7 locais na América do Sul: Cuiabá-Miranda, Alta Floresta, São Paulo, ABRACOS Hill, no Brasil; Santa Cruz de la Sierra, na Bolívia; Córdoba e Buenos Aires, na Argentina. Os períodos analisados e os respectivos números de medidas para cada local estudado podem ser vistos na Tabela 1.

Foram analisados os valores de coeficiente de Angstrom (440-675 nm) de nível 1.0. Histogramas construídos para cada local de medidas apontaram a ocorrência, em geral, de valores entre -1,0 e 4,0, distribuídos em duas modas principais, cuja ocorrência indica a existência de populações diferentes para o coeficiente de Angstrom. Pelos motivos já expostos anteriormente (Smirnov et al., 2000), especial atenção foi dada à moda correspondente aos valores mais baixos, geralmente centrada em valores próximos de zero, possivelmente relacionada à contaminação das medidas pela presença de nuvens.

Partindo do princípio de que o procedimento de cloud-screening da AERONET é capaz, de um modo tão geral quanto o possível (Smirnov et al., 2000), de minimizar a contaminação por nuvens nas medidas de nível 1.5, uma primeira abordagem para testar a hipótese da relação entre baixos valores de Coeficiente de Angstrom e a contaminação por nuvens foi a comparação dos histogramas obtidos a partir dos dados de nível 1.0 com seus correspondentes de nível 1.5. Essa comparação mostrou que a principal consequência da aplicação do procedimento operacional de cloud-screening sobre a base de nível 1.0 é a quase total eliminação da moda inferior em análise, tendo a moda superior aproximadamente mantido suas características, como pode ser observado na Figura 01 (a).

Para estudar a definição de um limite entre as modas do Coeficiente de Angstrom de forma objetiva, foi procurada uma função que, ajustada à distribuição de frequências das medidas de nível 1.0, apresentasse, no limite superior da região correspondente à moda superior, tida como livre de contaminação por nuvens, as mesmas características estatísticas que permaneceram intactas na passagem dos dados de nível 1.0 para nível 1.5. A função procurada deveria representar um comportamento assimétrico em relação a posição de seu valor máximo, apresentando elevação gradual até esse máximo e queda relativamente rápida após esse ponto. Entre as funções analisadas, a que apresentou melhor adequação aos objetivos traçados foi a sigmoïdal assimétrica (Equação (1)).

$$y = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c+w_1}{w_2}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c-w_1}{w_3}}} \right) \quad (1)$$

Na Figura 01 (b), vemos os resultados da Figura 01 (a) sobrepostos pela curva ajustada (em azul) sobre as medidas de nível 1.0 (em vermelho). É possível observar a manutenção das

propriedades da distribuição no limite superior, sendo o limite inferior influenciado pela moda de valores mais baixos de Coeficientes de Angstrom, tida como sinal de contaminação pela presença de nuvens.

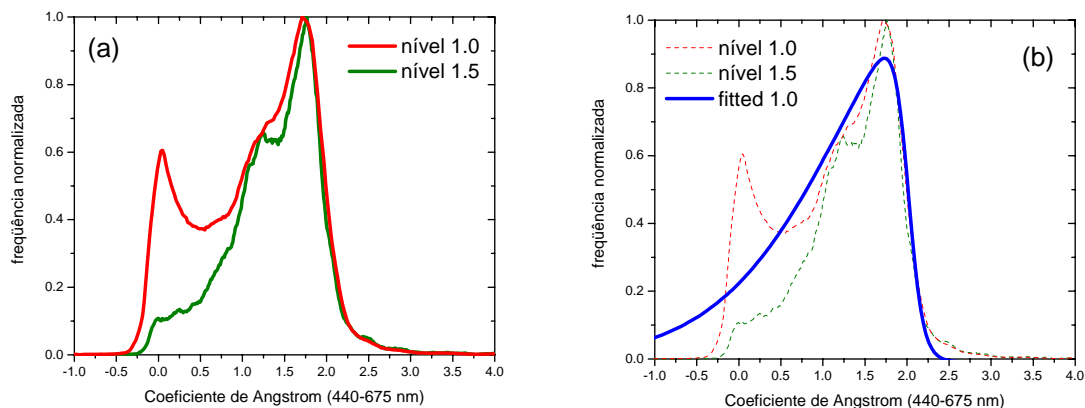


Figura 01. (a) Exemplo de comparação entre a frequência de ocorrências de valores de Coeficiente de Angstrom nas bases de dados de nível 1.0 (antes do procedimento operacional de cloud-screening) e de nível 1.5 (após a aplicação do procedimento pela AERONET). (b) Gráfico anterior, agora incluindo a curva ajustada a partir dos dados de nível 1.0, que contém, na moda superior, as propriedades da distribuição dos dados de nível 1.5. Em ambos os gráficos, os resultados referem-se aos dados coletados em Alta Floresta (MT), entre os meses de Janeiro de 1999 e Agosto de 2006.

Em busca de uma maneira objetiva e operacional de identificar valores de Coeficiente de Angstrom que pudessem ser utilizados como limites inferiores de uma distribuição relativamente livre de contaminação, foi estudado o comportamento dos resíduos resultantes desse procedimento de ajuste, apresentado na Figura 02. Nesse ponto, o valor do Coeficiente de Angstrom correspondente à primeira intersecção entre a distribuição original e a curva ajustada, após a moda inferior, foi adotado como limite inferior adequado. É importante ressaltar que tal escolha não se apresentou como fruto do estudo do processo físico envolvido, e sim se deveu apenas ao objetivo de determinar de modo operacional um critério de refinamento do procedimento de cloud-screening utilizado em larga escala pela AERONET. Assim, a obtenção de tais valores limite de Coeficiente de Angstrom presta-se à função de proporcionar uma limpeza mais rigorosa sobre os dados de nível 1.5, de acordo com a necessidade e a relação custo operacional / benefício em cada caso. Além disso, esse procedimento possibilita a estimativa de um desvio padrão associado ao valor limite apontado, feita a partir da razão entre a frequência de ocorrência desse valor e as áreas de cada uma das modas observadas nos histogramas dos dados de nível 1.5. Tal desvio padrão estimado pode ser usado como medida do rigor aplicado na nova limpeza dos dados já processados. Aplicações que necessitem maior ou menor rigor podem utilizar valores limites de Coeficiente de Angstrom acrescidos ou diminuídos da quantidade de desvios-padrão adequada. Ao elevar o valor limite utilizado, elimina-se uma parcela de dados não contaminados por nuvens, mas aumenta-se a confiança na eliminação de dados contaminados, e vice-versa. Resultados preliminares já apontaram que os resíduos do ajuste realizado podem conter informações importantes sobre outras

modas presentes na distribuição estudada, modas essas que podem representar diferentes tipos de aerossol influenciando cada um dos locais estudados.

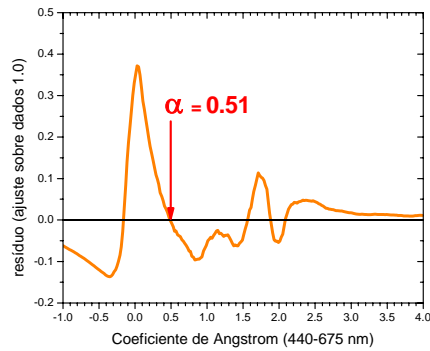


Figura 02. Gráfico de resíduos resultantes do ajuste da curva descrita pela Equação (1) à distribuição de dados de nível 1.0. O valor apontado, $\alpha = 0,51$, corresponde ao limite inferior de valores de Coeficiente de Angstrom (440-675 nm) considerado como indicativo do efeito da presença de nuvens. O gráfico e o valor apontado correspondem aos resultados obtidos sobre o conjunto de dados coletados em Alta Floresta (MT), entre os meses de Janeiro de 1999 e Agosto de 2006.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 03 a seguir podemos observar os resultados obtidos para cada um dos locais estudados na América do Sul. Em vermelho, vemos a curva de frequência normalizada de ocorrência de valores de Coeficiente de Angstrom na base de medidas de nível 1.0, enquanto que em verde são apresentados os resultados referentes às medidas de nível 1.5.

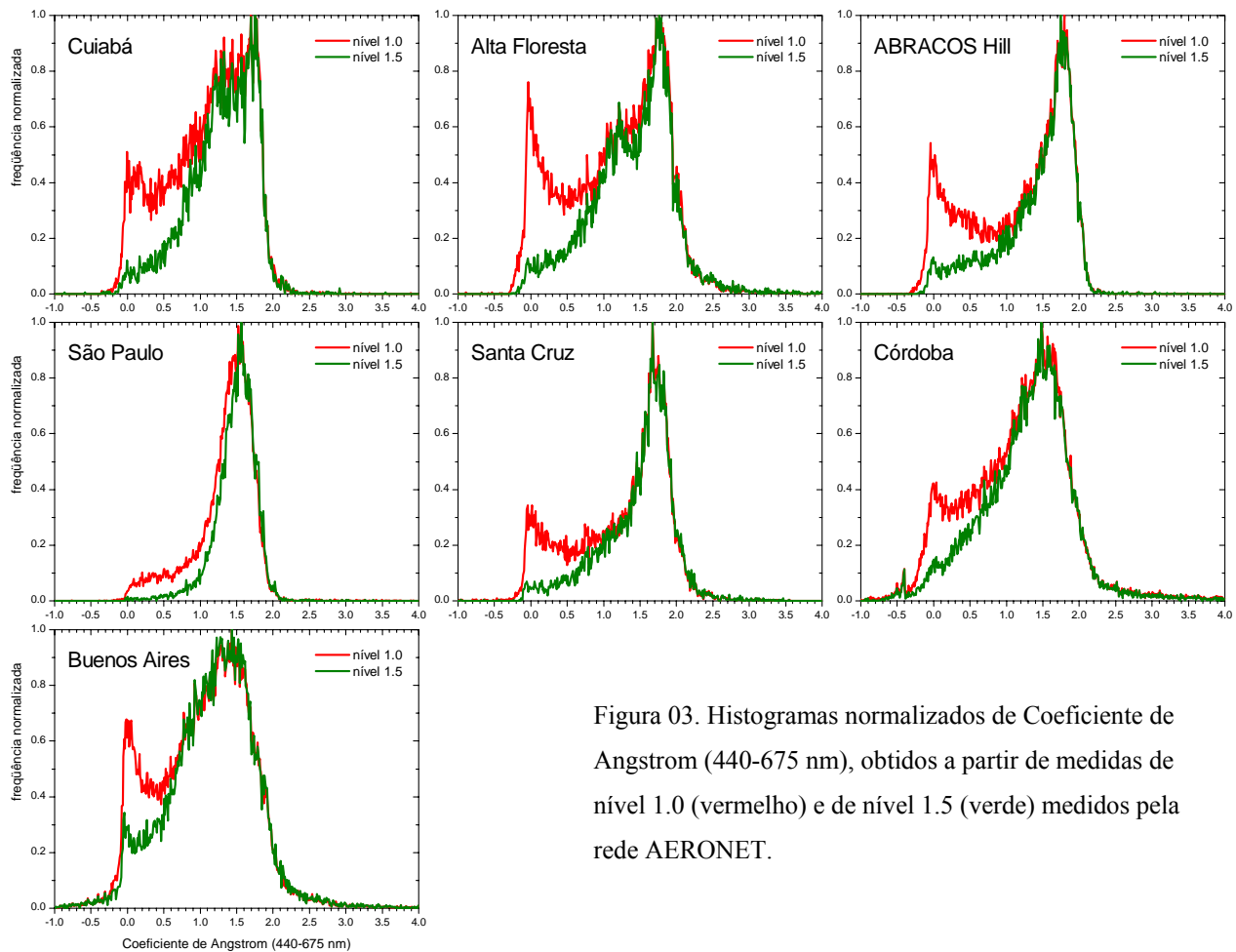


Figura 03. Histogramas normalizados de Coeficiente de Angstrom (440-675 nm), obtidos a partir de medidas de nível 1.0 (vermelho) e de nível 1.5 (verde) medidos pela rede AERONET.

A Tabela 1 mostra os resultados da aplicação do método de extensão do procedimento de cloud-screening às medidas ilustradas na Figura 03, identificando os valores de Coeficiente de Angstrom apontados pelo método como limites inferiores adequados para a exclusão, da base de nível 1.5, de medidas contaminadas pela presença de nuvens, acompanhados de seus respectivos desvios padrão. Na última coluna, podemos observar a porcentagem de dados de nível 1.5 excluídos utilizando os valores limite apontados. Vemos que essa porcentagem ilustra o quanto determinados locais são mais afetados pela presença de medidas contaminadas na base de nível 1.5, como Córdoba, enquanto que outros são relativamente pouco afetados, como São Paulo.

Tabela 1. Valores identificados como limites inferiores de Coeficiente de Angstrom, para cada local analisado, incluindo o período e o tamanho da base de dados utilizada, bem como a porcentagem de dados de nível 1.5 com valores abaixo do limite e, assim, apontados como contaminados por nuvens.

<i>Site AERONET</i>	<i>Período analisado</i>	<i>Número de dados nível 1.0</i>	<i>Coeficiente de Angstrom (440-675 nm) limite inferior identificado</i>	<i>Porcentagem de dados nível 1.5 excluídos</i>
Cuiabá-Miranda	2001-2006	30864	0,41 (11)	5,15 %
Alta Floresta	1999-2006	51820	0,51 (12)	6,50 %
Abracos Hill	1999-2005	35818	0,61 (10)	11,21 %
São Paulo	2000-2006	38906	0,84 (12)	2,25 %
Santa Cruz	1996-2006	25753	0,68 (11)	8,15 %
Córdoba	1999-2006	69028	0,57 (17)	12,99 %
Buenos Aires	1999-2006	72281	0,34 (09)	10,17 %

Esses resultados, apesar de ainda em estágio preliminar, já vêm sendo aplicados com sucesso na seleção de bases de dados utilizadas para validação do produto de Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD) obtido pela DSA-CPTEC/INPE a partir de medidas de radiância efetuadas pelo sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua da NASA (Correia et al., 2006). A aplicação do método apresentado neste trabalho melhorou os resultados da comparação entre as medidas de superfície em sites da AERONET com aquelas feitas pelo sensor em órbita da seguinte maneira:

- Antes da aplicação do método:

$$\text{AOD}(\text{MODIS}) = -0,033(11) + 0,769(39) * \text{AOD}(\text{AERONET}),$$

com coeficiente de correlação $R = 0,71$;

- Após a aplicação do método (excluindo pontos contaminados por nuvens):

$$\text{AOD}(\text{MODIS}) = -0,089(66) + 1,25(27) * \text{AOD}(\text{AERONET}),$$

com coeficiente de correlação $R = 0,92$.

CONCLUSÕES

Foi apresentado um novo método para a identificação de valores limite de Coeficiente de Angstrom como indicador da contaminação por presença de nuvens em medidas de nível 1.5 da rede AERONET. Esse método leva em consideração os resultados do procedimento operacional de cloud-screening já utilizado, e fornece meios para uma seleção mais rigorosa, baseada em características regionais de cada local analisado, dificilmente abrangidas por procedimentos gerais como o usado globalmente. Sua aplicação permitirá que outros autores, deparando-se com a necessidade de utilizar resultados AERONET ainda mais livres de medidas contaminadas por nuvens do que as encontradas no nível 1.5, possam usar o Coeficiente de Angstrom como parâmetro auxiliar nesse processo.

Apesar de se tratar de trabalho ainda em desenvolvimento, esse método já apresenta resultados interessantes, não só do ponto de vista de validação como de aplicação em estudos correlatos, como o apresentado por Correia et al. (2006).

Os próximos passos a serem dados são a obtenção dos valores limite de Coeficiente de Angstrom para outros locais de medidas AERONET, a validação dos resultados obtidos com a aplicação desse método e, principalmente, a caracterização das propriedades ópticas obtidas nos pontos excluídos pelo método, para um aprimoramento cada vez maior do conhecimento sobre os efeitos da contaminação pela presença de nuvens nas medidas AERONET analisadas.

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angstrom, A. On the atmospheric transmission of Sun radiation and dust in the air. *Geogr. Ann.*, 11, 156-166, 1929.
- Correia, A., Pires, C. Validation of aerosol optical depth retrievals by remote sensing over Brazil and South America using MODIS. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.
- 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., Lavenu, 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.
- Smirnov, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Dubovick, O., Slutsker, I. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database, *Remote Sensing of the Environment*, v.73, p.337-349, 2000.