

PIRELIOMETRIA DE BANDA LARGA E TURBIDEZ ATMOSFÉRICA EM SÃO PAULO*

A. Plana-Fattori¹ & J. R. Rozante²

Este trabalho analisa observações de irradiância direcional solar incidente à proximidade do solo sob céu aberto, em São Paulo (SP, Brasil; 23°34'S, 46°44'W, 730 metros de altitude), no intuito de se avaliar a importância do material particulado em suspensão (aerossol) sobre a transparência da atmosfera no espectro visível. Esta influência é discutida em termos da profundidade óptica do aerossol, avaliada a partir de dados pireliométricos coletados com filtros de banda larga. Testes de sensibilidade avaliam a importância de algumas fontes de erros sistemáticos, como as características dos filtros e a calibração do instrumento. A qualidade de estimativas de profundidade óptica aumenta com o próprio nível de turbidez atmosférica, sendo normalmente baixa (incertezas relativas acima de 100 %) sob condições atmosféricas associadas a reduzido conteúdo em aerossol. A análise de todo o conjunto de dados coletado entre março de 1995 a janeiro de 1996 mostra que a profundidade óptica do aerossol pode assumir valores muito reduzidos após a ocorrência de chuva. Ainda, esta profundidade óptica pode exibir variações importantes em poucas horas, talvez como consequência do regime de ventos e do ciclo diurno da umidade relativa do ar. Estudos futuros neste tema devem empregar instrumental mais acurado, instalado num sítio onde ocorram observações meteorológicas de rotina.

Palavras-chave: Meteorologia; Radiação Solar; São Paulo; Aerossol; Pireliômetros; Turbidez Atmosférica.

BROADBAND PYRHELIOMETRY AND ATMOSPHERIC TURBIDITY IN SÃO PAULO -

This study analyzes direct-normal solar irradiances received at the ground level in cloudless conditions, in São Paulo (SP, Brazil; 23°34'S, 46°44'W, 730 meters above the mean sea level), with the objective of evaluating the importance of the particulate matter in suspension (aerosol) on the atmospheric transparency in the visible spectrum. Such influence is assessed in terms of the values assumed by the aerosol optical depth, which is obtained from pyrhelemetric measurements performed with different broadband filters. Sensitivity tests assess the importance of some sources of systematic errors such as the filter characteristics and the instrument calibration. The reliability of aerosol optical depth estimates increases with the own turbidity level, being usually low (relative uncertainties greater than 100 %) under clean atmospheric conditions. The analysis of the entire data set collected between March 1995 and January 1996 shows that aerosol optical depths are very low after the occurrence of rain. Also, aerosol optical depths may exhibit important variations in few hours; this might be the consequence of the wind field and/or of the daily cycle of the relative humidity. Future studies in this subject must employ more accurate instrument installed in the same site with meteorological routine observations.

Key words: Meteorology; Solar Radiation; São Paulo; Aerosol; Pyrhelemeters; Atmospheric Turbidity.

¹Departamento de Ciências Atmosféricas
Instituto Astronômico e Geofísico - Universidade de São Paulo
Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, CEP 05508-900 - São Paulo (SP)
tel.: (011)-818-4712 - fax: (011)-818-4714
e-mail: artemio@model.iag.usp.br

²Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Rodovia Presidente Dutra, km. 40 - Cachoeira Paulista (SP)

*artigo dedicado ao 70º aniversário do Professor Paulo Marques dos Santos

INTRODUÇÃO

A composição do ar afeta as temperaturas reinantes à proximidade do solo, e o melhor exemplo disto reside no assim-chamado "efeito estufa" associado sobretudo à presença de vapor d'água e de dióxido de carbono na atmosfera terrestre. Diversos grupos de pesquisa têm dedicado considerável esforço ao longo dos últimos anos no intuito de se avaliar o possível impacto decorrente do aumento da concentração global de alguns gases (entre os quais o próprio dióxido de carbono) sobre as condições climáticas num futuro próximo. Parte deste esforço tem mostrado que diversos outros agentes radiativos, tais como compostos de enxofre provenientes do consumo de combustíveis fósseis, poderiam apresentar um impacto com sinal contrário, no sentido de reduzir a magnitude do tantas vezes discutido (mas ainda insuficientemente comprovado) "aquecimento global". Uma visão geral acerca do conhecimento hoje disponível sobre os múltiplos aspectos da questão foi recentemente publicada (Houghton et al., 1996).

O impacto climático de um dado agente radiativo (seja ele um gás ou um determinado tipo de partícula em suspensão na atmosfera) requer que este agente apresente tanto abrangência espacial quanto persistência temporal. Estudos teóricos (p.ex., Venkatram & Viskanta, 1977) têm mostrado que o aerossol urbano - material particulado em suspensão em regiões urbanas, constituído em parte por produtos de atividades humanas - pode afetar as temperaturas reinantes à proximidade do solo. Este impacto seria dependente das características físico-químicas das partículas envolvidas. Entretanto, este impacto deve ocorrer de forma episódica, e sua magnitude deve depender da (in)eficiência de processos atmosféricos de dispersão e de remoção, tanto seca quanto úmida.

Os resultados aqui apresentados constituem parte de um esforço a ser continuado ao longo dos próximos anos, voltado à avaliação do impacto do aerossol urbano sobre a magnitude de alguns processos meteorológicos na Região Metropolitana de São Paulo. Esta região, com seus 15 milhões de habitantes, seus 4 milhões de veículos e suas 30.000 indústrias, representa uma das mais formidáveis concentrações humanas do planeta.

Este trabalho procura, a partir de dados coletados com instrumental relativamente modesto (um pireliômetro e filtros de banda larga), avaliar a presença de aerossol na Região Metropolitana de São Paulo sob o ponto de vista óptico assim como quantificar sua variabilidade natural. A pre-

sença de aerossol é aqui julgada em termos da assim chamada turbidez atmosférica, ou seja de sua influência sobre a transparência da atmosfera ao longo da parte visível do espectro solar. As observações de irradiância direcional solar aqui relatadas e analisadas não representam as primeiras a serem realizadas na Região Metropolitana de São Paulo no intuito de se avaliar a turbidez atmosférica. No mínimo dois outros conjuntos de dados devem ser lembrados, ainda que cada um inclua não mais que escassas observações em um par de datas. O primeiro, obtido em 1981 mediante um piranômetro equipado com quatro filtros de banda larga e um dispositivo manual de ocultamento do feixe direto de radiação solar, tornou evidente o impacto da penetração da brisa marítima sobre a turbidez atmosférica (Plana-Fattori & Ceballos, 1984). O segundo conjunto, obtido em 1988 empregando-se um pireliômetro Sontag equipado com oito filtros de banda larga, proporcionou resultados até certo ponto inconsistentes, com dependência espectral caracterizada por máximos e mínimos relativos (Plana-Fattori, 1989). À luz destas experiências anteriores, o presente trabalho procura também identificar os limites deste tipo de instrumentação, discutindo e sempre que possível avaliando a importância das fontes de erro envolvidas.

O procedimento seguido para avaliação da turbidez atmosférica a partir de observações do feixe direto de radiação solar com pireliômetros e filtros de banda larga é descrito no item 2. O instrumental empregado e os conjuntos de dados disponíveis são apresentados no item 3. Algumas hipóteses levadas em conta no tratamento de observações deste tipo são discutidas no item 4, à luz de testes de sensibilidade e de algumas análises acerca dos erros experimentais envolvidos. O item 5 inclui uma discussão geral a partir do conjunto de dados coletado entre março de 1995 e janeiro de 1996. Conclusões preliminares e recomendações para trabalhos futuros são sintetizadas no item 6.

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA

A transparência da atmosfera ao longo do espectro visível é tanto menor quanto mais importantes os processos de atenuação (espalhamento e absorção) do feixe direto de radiação solar, ou seja, quanto menor a transmitância t oferecida pela coluna atmosférica. Na ausência de nuvens nas proximidades do disco solar, esta transmitância pode ser interpretada como o produto entre dois termos, t_a

correspondente à atenuação devida ao aerossol e t_c "de céu limpo" (sem aerossol). A transmitância de céu limpo resulta da ocorrência de dispersão molecular (espalhamento Rayleigh) e de absorção gasosa (vapor d'água, ozônio, etc). A adoção da transmitância t_a como indicador de turbidez atmosférica não é muito conveniente, em função de sua dependência com a posição do disco solar acima do horizonte local. A influência do aerossol sobre a transparência da atmosfera pode ser quantificada de forma inequívoca em termos dos valores assumidos pela profundidade óptica do aerossol τ_a , associada à transmitância t_a através da relação:

$$t_a(\lambda, Z_0) = \exp(-m(Z_0) \cdot \tau_a(\lambda)) \quad (1)$$

A quantidade $m(Z_0)$ constitui a massa óptica relativa, dependente da distância zenital solar Z_0 . A profundidade óptica do aerossol representa um valor integrado desde a altitude z do observador até o "topo" (óptico) da atmosfera:

$$\tau_a(\lambda) = \int_z^{\infty} \alpha(\lambda, z') \cdot dz' \quad (2)$$

sendo $\alpha(\lambda, z')$ o coeficiente linear de atenuação do aerossol, cujo valor exprime a magnitude local dos efeitos combinados do espalhamento e da absorção de radiação com comprimento de onda λ pela população de partículas em suspensão à altitude z' . Estes e outros conceitos pertinentes ao tema são suficientemente cobertos por textos básicos em Radiação Atmosférica (p.ex.: Paltridge & Platt, 1976; Liou, 1980).

Pireliometria de Banda Larga

Avaliações de profundidade óptica do aerossol pode ser obtidas analisando-se observações da irradiância direcional solar, ou seja, de quantidades de energia provenientes do ângulo sólido ocupado pelo disco solar que, por unidade de tempo, alcançam uma superfície de área unitária disposta perpendicularmente à incidência do feixe solar direto. No que se segue, são deixados de lado os efeitos de pró-espalhamento experimentados por este feixe causados pelo aerossol, ainda que se reconheça sua importância

sob condições atmosféricas significativamente túrbidas (p.ex.: Thomalla et al., 1983).

A irradiância direcional percebida sob céu aberto (sem nuvens) à proximidade do solo através de um filtro espectral de banda larga com transmitância $\varphi_i(\lambda)$ pode ser expressa como:

$$E_i = (1/d)^2 \cdot \int_0^{\infty} E_{o\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot \varphi_i(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

sendo d a distância que separa a Terra e o Sol (em unidades astronômicas), e $E_{o\lambda}$ a irradiância espectral ($W \cdot m^{-2} / \mu m$) associada à constante solar. Os limites de integração na Eq.(3) podem ser justificados pelo fato de que a transmitância $\varphi_i(\lambda)$ pode assumir valores não-nulos sobre uma larga faixa do espectro eletromagnético, desde algum comprimento de onda no visível solar (λ entre 0,4 e 0,7 μm) até aproximadamente 5 μm . Considerando-se apenas a região espectral ao longo da qual esta transmitância assume valores superiores a 50 % (¹), então a Eq.(3) pode ser re-escrita como:

$$E_i = \varphi_i \cdot (1/d)^2 \cdot \int_{\lambda_i}^{\Lambda_i} E_{o\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda \quad (4)$$

sendo φ_i a transmitância média do filtro tratado entre os comprimentos de onda de corte λ_i (inferior) e Λ_i (superior), definida através do quociente (WMO, 1983, p. 9.15):

$$\varphi_i = \frac{\int_0^{\infty} E_{o\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot \varphi_i(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\Lambda_i} E_{o\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda} \quad (5)$$

O quociente $1/\varphi_i = \Phi_i$ é denominado fator de redução do filtro, cuja aplicação às observações de irradiância permite que estas sejam analisadas como se tivessem sido obtidas empregando-se um filtro ideal, caracterizado por transmitância unitária entre os comprimentos de onda λ_i e Λ_i :

¹ ... dado que, em geral, a transmitância de filtros de banda larga diminui rapidamente a zero fora da região espectral delimitada por λ_i e por Λ_i (ver Figs. 1 e 2).

$$E_i \cdot \Phi_i = (1/d)^2 \cdot \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} E_{0\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda \quad (6)$$

Em outras palavras, a aplicação de Φ_i a observações efetuadas com um "filtro real" (transmitância inferior à unidade) faz com que estas sejam reduzidas à condição hipotética de filtro ideal. O valor assumido por λ_i constitui uma das principais características de um filtro de banda larga, enquanto que o comprimento de onda de corte superior (λ_i) é basicamente o mesmo para os diferentes filtros disponíveis no mercado, em torno de 2,8 μm . Este último aspecto permite que observações simultâneas efetuadas com dois filtros diferentes possam ser combinadas sob a forma:

$$E_i \cdot \Phi_i - E_{i+1} \cdot \Phi_{i+1} = F(\Delta\lambda_k) \quad (7)$$

$$F(\Delta\lambda_k) = (1/d)^2 \cdot \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} E_{0\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda \quad (8)$$

As irradiâncias direcionais $F(\Delta\lambda_k)$ provenientes de observações simultâneas podem ser comparadas aos seus respectivos valores

$$F_c(\Delta\lambda_k) = (1/d)^2 \cdot \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} E_{0\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda \quad (9)$$

calculados assumindo-se apenas a atenuação de "céu limpo" (sem aerossol), possibilitando avaliações da transmitância média do aerossol sobre o intervalo espectral em questão:

$$t_a(\Delta\lambda_k, Z_0) = \frac{F(\Delta\lambda_k)}{F_c(\Delta\lambda_k)} = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} E_{0\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot t_a(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} E_{0\lambda}(\lambda) \cdot t_c(\lambda, Z_0) \cdot d\lambda} \quad (10)$$

Esta última pode, em primeira aproximação, ser interpretada em termos de um valor médio sobre este mesmo intervalo para a profundidade óptica do aerossol:

$$t_a(\Delta\lambda_k, Z_0) \cong \exp(-m(Z_0) \cdot \tau_a(\Delta\lambda_k)) \quad (11)$$

Em resumo, avaliações de profundidade óptica do aerossol podem ser obtidas a partir de pares de observações simultâneas E_i e E_{i+1} , e de informações o mais acuradas possíveis acerca de Φ_i , Φ_{i+1} , $F_c(\Delta\lambda_k)$ e $m(Z_0)$:

$$\tau_a(\Delta\lambda_k) \cong \frac{1}{m(Z_0)} \cdot \ln \left(\frac{F_c(\Delta\lambda_k)}{(E_i \cdot \Phi_i - E_{i+1} \cdot \Phi_{i+1})} \right) \quad (12)$$

A aplicação deste raciocínio tem conduzido a resultados satisfatórios quando comparados àqueles provenientes de observações semi-monocromáticas com fotômetros solares (p.ex.: Carlson & Caverly, 1977; McCartney & Unsworth, 1978). Entretanto, estes resultados podem ser influenciados de forma significativa por diversas fontes de erros sistemáticos, tais como a calibração do sensor (termopilha ou equivalente) e a disponibilidade de valores confiáveis para o fator de redução de cada um dos filtros empregados. Informações fornecidas pelo fabricante a respeito deste último aspecto devem ser acolhidas com cautela, sendo recomendável a avaliação de fatores de redução a partir do exame detalhado em laboratório da distribuição de transmitâncias $\varphi_i(\lambda)$ associada a cada um dos filtros tratados (Fröhlich & London, 1986, pp.78-79).

Considerações Específicas para este Estudo

O raciocínio exposto acima é aplicado neste estudo a partir de séries de observações de irradiância direcional solar efetuadas com o instrumental apresentado no item 3 abaixo, cada série representando a reunião de diversas medições consideradas instantâneas com cada um dos filtros de banda larga disponíveis. Os cálculos descritos a seguir foram aplicados a cada série de observações.

A distância zenital solar Z_0 foi avaliada aplicando-se o algoritmo apresentado por Michalsky (1988), enquanto que a respectiva massa óptica relativa $m(Z_0)$ foi obtida a partir do ajuste proposto por Kasten & Young (1989). A quantidade $(1/d)^2$ foi avaliada para cada data de interesse através de um polinômio preciso e bem difundido na comunidade meteorológica (Paltridge & Platt, 1976, p.57). Irradiâncias direcionais $F_c(\Delta\lambda_k)$ foram avaliadas aproximando-se a integração indicada na Eq.(9) através da fórmula dos trapézios, adotando-se um passo constante igual a $\Delta\nu = 20 \text{ cm}^{-1}$ (em número de onda, $\nu = 1/\lambda$). A adoção desta resolução foi motivada pela disponibilidade de uma tabela já existente contendo uma distribuição de irradiâncias espectrais $E_{0\lambda}(\lambda)$ equivalente àquela recomendada pela

Organização Meteorológica Mundial (Fröhlich & London, 1986, pp.119-126). A transmitância $t_c(\lambda, Z_0)$ de céu limpo foi avaliada seguindo-se esta mesma resolução espectral, considerando-se apenas os processos de dispersão molecular (espalhamento Rayleigh) e de absorção pelo ozônio:

$$t_c(\lambda, Z_0) = t_r(\lambda, Z_0) \cdot t_{O_3}(\lambda, Z_0). \quad (13)$$

Estas duas transmitâncias podem ser expressas na forma:

$$t_r(\lambda, Z_0) = \exp(-m(Z_0) \cdot (P/P_0) \cdot \tau_r(\lambda)) \quad (14)$$

$$t_{O_3}(\lambda, Z_0) = \exp(-m(Z_0) \cdot U_{O_3} \cdot \sigma_{O_3}(\lambda)). \quad (15)$$

sendo P a pressão atmosférica à superfície, $P_0 = 1$ atm, $\tau_r(\lambda)$ a profundidade óptica associada ao espalhamento Rayleigh, U_{O_3} o conteúdo integrado em ozônio na coluna atmosférica (moléculas por cm^2) e $\sigma_{O_3}(\lambda)$ a seção eficaz de absorção de uma molécula de ozônio (cm^2). Observações de P sempre foram efetuadas paralelamente àquelas de irradiância direcional. Valores de $\tau_r(\lambda)$ foram avaliados através do ajuste proposto por Fröhlich & Shaw (1980), sendo posteriormente corrigidos pelo fator multiplicativo 1,031 proposto por Young (1980). Valores de U_{O_3} para as diferentes datas de interesse foram estimados a partir de informações climatológicas (Robinson, 1966), dada a ausência de medições específicas em paralelo às nossas observações de irradiância direcional. Valores de $\sigma_{O_3}(\lambda)$ compatíveis à resolução adotada foram interpolados a partir de uma distribuição espectral proposta para estudos climáticos (WMO, 1986, pp.358-362).

INSTRUMENTAL E CONJUNTO DE DADOS

Pireliômetro

As observações de irradiância direcional solar aqui analisadas foram efetuadas sob céu aberto (sem nuvens, pelo menos nas proximidades do disco solar), empregando-se um pireliômetro. Esta designação tem sido recomendada pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1981, p.60) para indicar instrumentos concebidos para medir irradiâncias numa superfície plana perpendicular à

incidência do feixe solar direto, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de um campo de visão pequeno, com ângulo sólido equivalente ou um tanto maior que aquele do disco solar, considerando-se apenas o espectro solar. Irradiâncias direcionais são obtidas aplicando-se a relação:

$$E = \frac{V - V_f}{k}, \quad (16)$$

sendo V e V_f saídas potenciométricas do instrumento, obtidas respectivamente com o tubo colimador "aberto" (observação do feixe solar direto) e "fechado" (sinal de referência), e k sua constante de calibração. Estudos específicos têm mostrado que a saída potenciométrica V_f pode assumir valores positivos ou negativos conforme a condição térmica do instrumento (Gulbrandsen, 1978). Filtros de banda larga, interpostos entre o ambiente externo e o sensor instalado no fundo do tubo colimador, proporcionam informações sobre a irradiância direcional solar associada a regiões espectrais relativamente bem definidas.

As observações analisadas no presente estudo foram coletadas empregando-se um pireliômetro Eppley⁽²⁾ modelo NIP, instrumento relativamente bem conhecido na comunidade meteorológica e descrito em diversos textos básicos (p.ex.: Coulson, 1975, pp.70-72). O fabricante alega, na documentação que acompanha o instrumento, que as observações efetuadas com este seriam "compensadas em relação à temperatura [da termopilha] entre -20 e +40°C"; em outras palavras, a influência da temperatura da termopilha sobre a constante de calibração do instrumento poderia ser considerada fraca o suficiente para ser desprezada.

O pireliômetro Eppley NIP aqui tratado (nº28247E6) foi calibrado em agosto de 1990 pelo próprio fabricante frente a padrões internacionais controlados pela Organização Meteorológica Mundial, obtendo-se $k = 9,09 \mu V/(W \cdot m^{-2})$. Pouco uso se fez deste instrumento até o início de nossas observações. Num esforço de se minimizar a incidência de erros sistemáticos em nossas análises, algumas comparações foram efetuadas entre março e julho de 1995 frente a dois pireliômetros de mesmo desenho (Eppley modelo NIP), sendo que um deles (nº29724E6) foi recentemente calibrado pelo fabricante. O outro (nº17586E6) foi, após vários anos de uso, recalibrado em setembro de 1987 fren-

² Fabricantes são mencionados unicamente para conveniência do leitor.

te ao pireliômetro Eppley modelo Hickey-Frieden nº19251. Este último era mantido à época como padrão nacional pelo Centro de Radiação Solar do Instituto Nacional de Meteorologia (CERAS-INEMET), tendo participado de uma intercomparação regional patrocinada pela Organização Meteorológica Mundial em finais de 1986 nas cercanias de Buenos Aires (CIMO, 1987). Comparações efetuadas com estes dois instrumentos entre março e julho de 1995 mostraram que o pireliômetro nº28247E6 proporcionava irradiâncias direcionais sujeitas a erros sistemáticos entre +1,0 e +1,8 %, com valor médio em torno de 1,27 %. Parece significativo que comparações efetuadas frente a dois instrumentos distintos, incluindo em cada caso 8 séries de 6 observações com cada instrumento, proporcionem resultados tão consistentes entre si. Com base nestes resultados, considera-se no que segue a constante de calibração mencionada acima multiplicada pelo fator 1,0127. O subitem 4.2 discute a importância deste fator multiplicativo, interpretado como correção de um erro sistemático, sobre avaliações de profundidade óptica do aerossol.

Seleção de Filtros de Banda Larga

O pireliômetro Eppley NIP nº28247E6 foi fornecido pelo fabricante com cinco filtros de banda larga, designados como GG395, GG495, OG530, RG630 e RG695 pelo fabricante, sendo que os três algarismos finais indicariam valores aproximados para o respectivo comprimento de onda de corte inferior em nanômetros. No que segue, tais filtros são indicados apenas por estes três algarismos.

A Fig.1 ilustra distribuições de transmitâncias "típicas" para tais filtros, fornecidas pelo fabricante do instrumento (Eppley, 1990) e disponível em algumas publicações técnicas (p.ex.: Fröhlich & London, 1986, p.78). A Fig.2 resume os resultados obtidos em laboratório para os filtros do pireliômetro aqui tratado, empregando-se diversos espectro-fotômetros entre dezembro de 1994 e março de 1995 na Universidade de São Paulo. Assume-se que estes resultados experimentais estariam sujeitos a incertezas da ordem de 1 % em transmitância. A comparação entre as figs. 1 e 2 revela algumas discrepâncias com as informações divulgadas pelo fabricante.

Em primeiro lugar, um dos filtros (395) exhibe transmitâncias evidentemente distintas daquelas associadas aos demais para $\lambda > 2,7 \mu\text{m}$, sem qualquer causa aparente. O fato torna problemática a aplicação do raciocínio

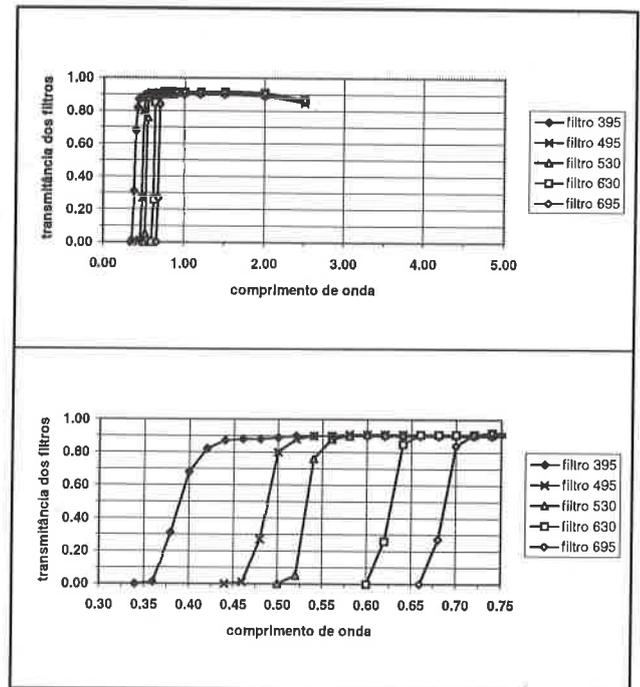


Figura 1 - Distribuições de transmitância fornecidas pelo fabricante para os filtros de banda larga do pireliômetro Eppley NIP nº28247E6. Comprimentos de onda são expressos em μm .

Figure 1 - Filter transmittance distributions stated by the manufacturer to the broadband filters of the pyrheliometer Eppley NIP nº28247E6. Wavelengths are displayed in μm .

exposto no item 2.1 para obtenção de irradiâncias associadas a intervalos espectrais no visível solar, baseado na hipótese segundo a qual todos os filtros apresentariam distribuições de transmitância relativamente redundantes acima de um determinado comprimento de onda. Porém, o comportamento observado indica que a diferença entre as irradiâncias observadas com os filtros 395 e 495 deve fornecer um valor associado não apenas ao intervalo definido pelos respectivos comprimentos de onda de corte inferior mas também à região espectral de desacordo entre as duas distribuições de transmitância. Esta questão teria menor importância para diferenças entre irradiâncias associadas a quaisquer combinações dos outros quatro filtros. Em segundo lugar, as transmitâncias observadas para $0,8 < \lambda < 2,5 \mu\text{m}$ podem apresentar diferenças superiores a 5 % de um filtro para outro, embora o fabricante sugira que tais diferenças não ultrapassariam 2 %. Em terceiro lugar, os

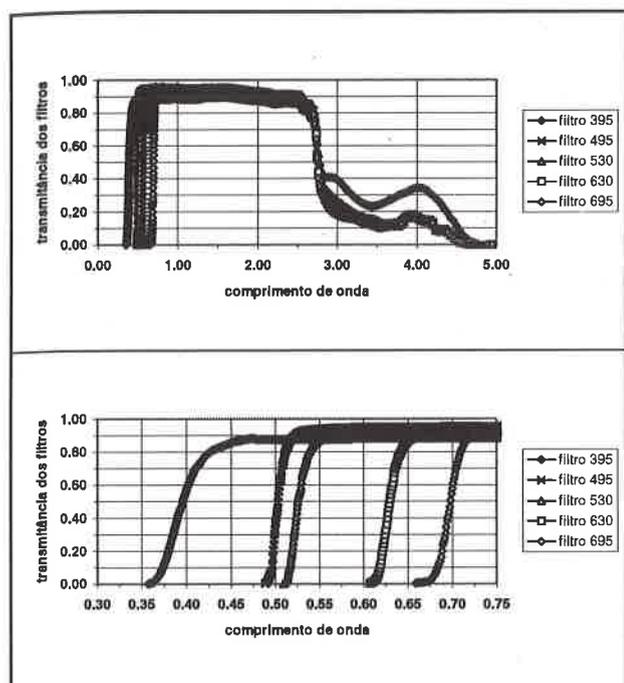


Figura 2 - Distribuições de transmitância observadas em laboratório para os filtros para os filtros de banda larga do pireliômetro Eppley NIP nº28247E6. Comprimentos de onda são expressos em μm .

Figure 2 - Filter transmittance distributions observed in laboratory to the broadband filters of the pyrliometer Eppley NIP nº28247E6. Wavelengths are displayed in μm .

filtros 495 e 530 apresentam distribuições de transmitância muito semelhantes no visível solar, reduzindo a significância (frente aos erros experimentais) da diferença entre as respectivas irradiâncias observadas.

Este terceiro aspecto pode ser melhor avaliado na Tab. I, que compara valores do comprimento de onda de corte inferior para cada um dos cinco filtros analisados. A discrepância entre os valores observados em laboratório e os valores "típicos" divulgados pelo fabricante superou $0,010 \mu\text{m}$ em três dos cinco casos, alcançando quase $0,020 \mu\text{m}$ num deles. Em outras palavras, as diferenças entre irradiâncias obtidas com um dado par de filtros poderiam, ser atribuídas a intervalos espectrais mais largos ou mais estreitos que aqueles efetivamente válidos. Mesmo um certo deslocamento em comprimento de onda poderia ser notado para alguns destes intervalos, como no caso dos pares 395-495 e 630-695. Pode-se afirmar que alguns intervalos

Filtro	395	495	530	630	695
Fabricante	0,385	0,485	0,529	0,623	0,686
Este estudo	0,396	0,503	0,525	0,629	0,698

Tabela 1 - Comprimentos de onda de corte inferior, divulgados pelo fabricante e identificados a partir de distribuições de transmitância observadas em laboratório, para os filtros de banda larga do pireliômetro Eppley NIP nº28247E6. Valores são expressos em μm .

Table 1 - Lower cut-off wavelengths relative to the broadband filters of the pyrliometer Eppley NIP nº28247E6, reported by the manufacturer and identified from the filter transmittance distributions observed in laboratory. Values are displayed in μm .

foram "privilegiados" - no sentido de se mostrarem relativamente mais largos, em relação ao indicado pelo fabricante -, tais como aqueles associados aos pares 395-495, 530-630 e 630-695. Inversamente, diferenças entre irradiâncias observadas com os filtros 495 e 530 deveriam apresentar valores mais elevados (e portanto menos sujeitos aos erros experimentais) caso as especificações do fabricante tivessem sido comprovadas.

Em termos práticos, a observação em laboratório das distribuições de transmitância dos cinco filtros de banda larga empregados com o pireliômetro Eppley NIP nº28247E6 provocou uma alteração do protocolo de medições inicialmente imaginado para este instrumento. O filtro 395 foi descartado, pelo seu comportamento anômalo para $\lambda > 2,7 \mu\text{m}$. Decidiu-se também pela rejeição de um dos filtros "amarelos" (495 e 530) quando da análise de observações, em função da magnitude reduzida (poucas dezenas de $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) da irradiância obtida como diferença entre observações simultâneas com os dois filtros. Optou-se pela manutenção do filtro 530, tanto pelo fato de sua distribuição de transmitância assemelhar-se muito mais à dos dois outros filtros restantes (630 e 695) para $\lambda > 2,7 \mu\text{m}$, quanto por uma certa perspectiva histórica neste ramo do conhecimento - a realização de observações pireliométricas com filtros 530, 630 e 695 é recomendada pelo menos desde o Ano Geofísico Internacional (CSAGI, 1958, pp.398-401).

A Tab. 2 compara valores para o fator de redução Φ_i associado a cada filtro. Valores obtidos neste estudo resultaram da aplicação da Eq.(5) às características observadas em laboratório para cada filtro, impondo-se $t_a(\lambda, Z_0) = 1$. Esta escolha possibilitou a avaliação de fatores de redução inteiramente independentes das propriedades ópticas do material particulado em suspensão na atmosfera. Neste contexto específico, a transmitância de céu limpo $t_c(\lambda, Z_0)$ foi avaliada empregando-se o código radiativo LOWTRAN-7 (Kneizys, 1988), permitindo a inclusão dos efeitos associados à absorção de radiação solar pelo vapor d'água e pelo dióxido de carbono, entre outros gases, para $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$. A Tab. 2 contém avaliações de F_i sob diferentes distâncias zenitais (Z_0), para duas condições atmosféricas hipotéticas (modelos *tropical* e *mid-latitude winter* de McClatchey, 1972), associadas a conteúdos integrados em vapor d'água (W) da ordem de 41,4 e de 8,6 kg.m^{-2} , respectivamente. Estes dois valores correspondem a situações um tanto extremas em relação àquelas observadas para a Região Metropolitana de São Paulo.

Filtro	530	630	695
Fabricante	1,095	1,095	1,090
Este estudo			
$W \sim 41,4 \text{ kg.m}^{-2}$			
$Z_0 = 0^\circ$	1,0820	1,0981	1,0626
$Z_0 = 30^\circ$	1,0820	1,0982	1,0627
$Z_0 = 60^\circ$	1,0821	1,0986	1,0629
$Z_0 = 75^\circ$	1,0818	1,0989	1,0630
$W \sim 8,6 \text{ kg.m}^{-2}$			
$Z_0 = 0^\circ$	1,0804	1,0966	1,0618
$Z_0 = 30^\circ$	1,0805	1,0968	1,0619
$Z_0 = 60^\circ$	1,0805	1,0973	1,0625
$Z_0 = 75^\circ$	1,0802	1,0979	1,0632
Este estudo (valores típicos)	1,081	1,098	1,062

Tabela 2 - Valores para o fator de redução, divulgados pelo fabricante e avaliados sob condições hipotéticas (ver texto), para três filtros de banda larga do pireliômetro Eppley NIP n°28247E6.

Table 2 - Filter reduction factors, stated by the manufacturer and evaluated under hypothetical conditions (see text), corresponding to three broadband filters of the pyrheliometer Eppley NIP n°28247E6.

Os resultados apresentados na Tab. 2 mostram a fraca dependência de Φ_i com W e Z_0 , assim como a existência de desvios frente aos valores propostos pelo fabricante. Torna-se possível, a partir desta fraca dependência, identificar um valor típico para o fator de redução associado a cada filtro com vistas à análise de observações pireliométricas. Tais valores típicos são apresentados na última linha da Tab. B. O sub-ítem 4.1 discute a influência das características dos filtros sobre avaliações de profundidade óptica do aerossol.

Protocolo de Observações

Experiência prévia tem mostrado que, independentemente dos efeitos da rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, a irradiância direcional solar apresenta variações na escala de minutos, mesmo na ausência de nuvens nas proximidades do disco solar. Tais variações estariam associadas a diversos fatores, relacionados sobretudo às alterações sofridas pelo conteúdo integrado em vapor d'água na coluna atmosférica atravessada pelo feixe solar direto, às flutuações na concentração de partículas em suspensão nesta coluna, e à influência da umidade relativa do ar sobre as características físico-químicas e por conseguinte sobre as propriedades ópticas destas mesmas partículas. As variações associadas a estes dois últimos fatores apresentariam magnitude tanto maior quanto mais importante a própria turbidez atmosférica a ser avaliada. A disponibilidade de um único pireliômetro e de diversos filtros de banda larga torna aconselhável a adoção de uma estratégia para coleta de dados (ou protocolo de observações) que seja capaz de reduzir o impacto de tais variações sobre os resultados a serem alcançados.

O protocolo adotado pode ser aplicado à coleta de dados com quaisquer pireliômetros, independentemente do número de filtros de banda larga disponíveis. Define-se como série de observações o conjunto completo de leituras da saída potenciométrica do instrumento efetuadas como segue. Toda série tem início com a observação da saída V_f "de tubo fechado", cerca de 30 segundos após a inteira obstrução da entrada do tubo colimador do instrumento (por exemplo, com papel relativamente espesso). A duração deste intervalo de espera representa um compromisso entre o tempo de resposta da termopilha, da ordem de poucos segundos, e o tempo necessário para que se estabeleça um balanço energético à superfície desta significativamente

distinto daquele havido sob iluminação solar (Gulbrandsen, 1978). Uma observação da saída V de "tubo aberto" é então efetuada para cada um dos filtros disponíveis, respeitando-se a estabilização do sinal medido. Este procedimento (uma observação de V_f e uma observação de V para cada um dos filtros) é repetido quatro vezes, efetuando-se no final uma última observação de V_f . Valores médios de $V - V_f$ são então avaliados.

O intervalo de tempo necessário para realização de uma série completa de observações depende sobretudo da quantidade de filtros, da experiência do observador e da própria variabilidade do sinal medido. Considerando-se um pireliômetro Eppley com quatro filtros, a realização de cada série pode requerer de 6 a 8 minutos. A definição de tal protocolo foi inspirada em procedimentos recomendados pela Organização Meteorológica Mundial para a realização de comparações entre pireliômetros, envolvendo várias observações instantâneas com cada instrumento durante um intervalo de tempo pré-estabelecido (CIMO, 1987). Protocolos similares têm sido adotados por outros autores (p.ex.: Forgan, 1979, p.230).

Conjunto de Dados

Os dados analisados neste estudo resultaram de observações efetuadas com o pireliômetro Eppley NIP nº28247E6 acima do edifício do Instituto Astronômico e Geofísico da USP (IAG-USP), na Cidade Universitária (cidade de São Paulo, SP, 23°34'S, 46°44'W, 730 metros de altitude), entre março de 1995 e janeiro de 1996. O pireliômetro esteve constantemente instalado sobre uma montagem equatorial orientada em relação ao Norte geográfico, de forma a assegurar alinhamento satisfatório entre o tubo colimador do instrumento e a orientação do feixe direto de radiação solar.

ANÁLISE DOS ERROS ENVOLVIDOS E TESTES DE SENSIBILIDADE

A avaliação de profundidades ópticas a partir de medições pireliométricas está sujeita a diversas fontes de erros, aleatórios e sistemáticos. Os principais erros aleatórios podem ser associados às próprias observações, em função sobretudo do grau de repetibilidade do instrumento empregado, da perícia do observador, e do caráter não-estacionário do sinal medido. Este último

aspecto depende das condições atmosféricas reinantes durante o período de observações, mais especificamente da variabilidade natural das concentrações do vapor d'água e do material particulado na coluna atravessada pelo feixe solar direto. Por outro lado, os principais erros sistemáticos podem ser associados à adoção de valores incorretos para a constante de calibração do instrumento, para o fator de redução de cada filtro, para os limites do intervalo espectral correspondente a cada par de filtros e para alguns parâmetros envolvidos na avaliação de irradiâncias direcionais $F_c(\Delta\lambda_k)$, como o conteúdo integrado em ozônio e a pressão atmosférica à superfície. O impacto de algumas destas fontes de erros sistemáticos é analisado ao longo dos sub-itens abaixo, sendo em cada caso comparado a uma estimativa da magnitude assumida pelos erros aleatórios envolvidos neste tipo de estudo.

A ordem de grandeza dos erros aleatórios pode ser discutida, pelo menos em primeira aproximação, a partir da Eq.(12). Admitindo-se que as incertezas inerentes à avaliação de $m(\mathbf{Z}_0)$ e de $F_c(\Delta\lambda_k)$ sejam desprezíveis face àquelas envolvidas na obtenção de irradiâncias $F(\Delta\lambda_k)$ através da Eq.(7), então as incertezas envolvidas na avaliação de $\tau_a(\Delta\lambda_k)$ podem ser expressas sob a forma:

$$\begin{aligned} \delta[\tau_a(\Delta\lambda_k)] &= \frac{1}{m(\mathbf{Z}_0)} \cdot \frac{\delta[t_a(\Delta\lambda_k)]}{t_a(\Delta\lambda_k)} \approx \frac{1}{m(\mathbf{Z}_0)} \cdot \frac{\delta[F(\Delta\lambda_k)]}{F(\Delta\lambda_k)} = \\ &= \frac{1}{m(\mathbf{Z}_0)} \cdot \frac{1}{F(\Delta\lambda_k)} \cdot \sqrt{\delta[E_i \cdot \Phi_i]^2 + \delta[E_{i+1} \cdot \Phi_{i+1}]^2} \quad (17) \end{aligned}$$

Cada um dos termos no interior da raiz quadrada à direita foi avaliado levando-se em consideração quatro fatores distintos: (a) 1 % devido à influência, sobre o valor correspondente ao fator de redução, da incerteza associada à determinação experimental da distribuição de transmitância para o filtro em questão; (b) 1 % devido à influência, sobre o mesmo fator de redução, da incerteza atualmente reconhecida acerca do conhecimento da distribuição espectral para $E_{0\lambda}$ no topo da atmosfera; (c) 0,5 % em função da repetibilidade do instrumento, indicada pelo fabricante; e (d) o quociente entre o desvio-padrão e o valor médio sobre as quatro observações instantâneas efetuadas com o filtro em questão. Estes quatro fatores foram supostos independentes entre si, ainda que os dois últimos possam eventualmente apresentar alguma correlação.

Influência das Características dos Filtros de Banda Larga

Valores de profundidade óptica do aerossol obtidas a partir de observações de irradiância direcional solar efetuadas com um pireliômetro equipado com filtros de banda larga dependem das características destes últimos, em função da forma particular assumida pela distribuição de transmitâncias $\varphi_i(\lambda)$ associada a cada um deles. As ca-

racterísticas básicas desta distribuição podem ser descritas satisfatoriamente pelos respectivos valores assumidos pelo fator de redução (Φ_i) e pelos comprimentos de onda de corte inferior λ_i e superior Λ_i (ver sub-item 2.1). Análises efetuadas em laboratório mostraram que os filtros do pireliômetro aqui empregado possuem distribuições de transmitância distintas daquelas advocadas como típicas pelo fabricante (ver sub-item 3.2). Dois filtros foram excluídos de nosso estudo, um deles (identificado como 395)

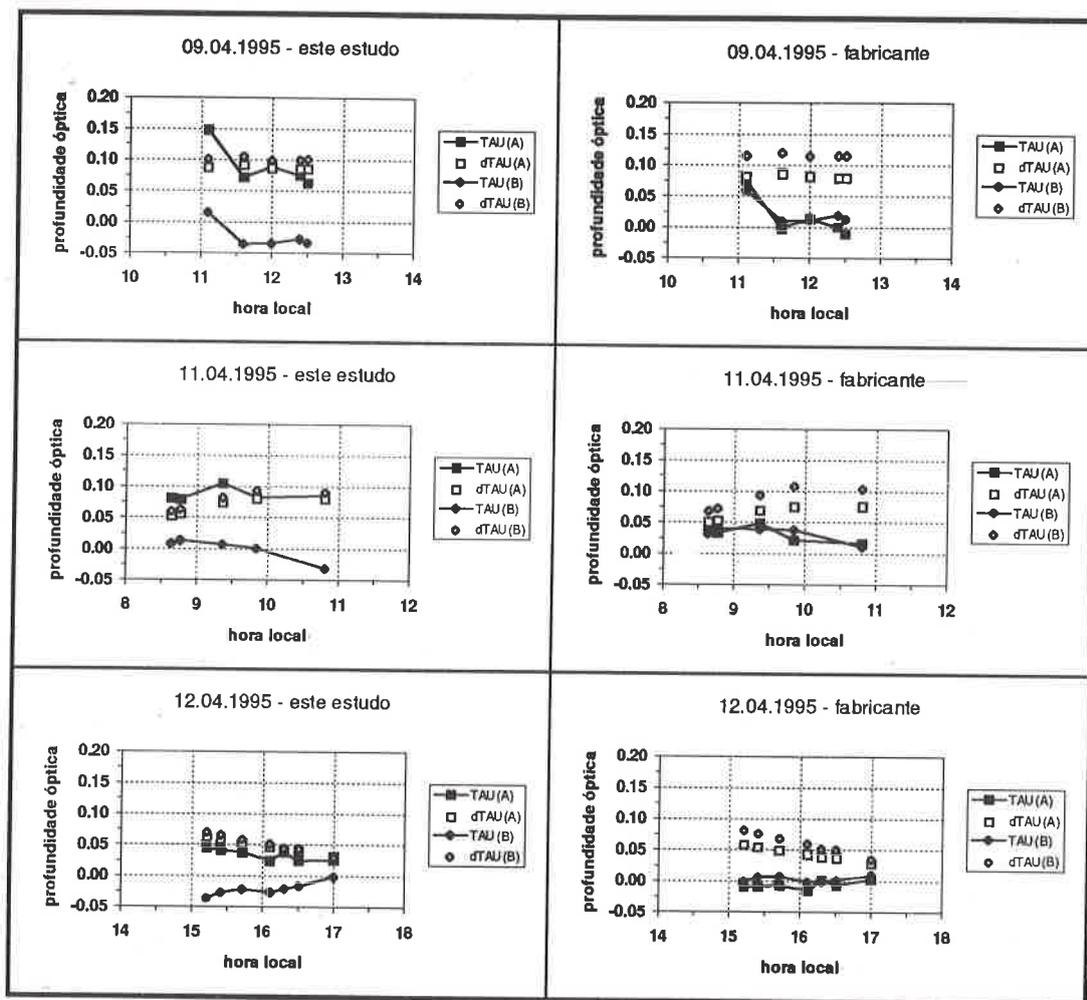


Figura 3 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para os intervalos espectrais "A" e "B" (ver texto), alcançadas a partir de observações efetuadas em três dias de abril de 1995, levando-se em conta informações obtidas neste estudo (quadros à esquerda) ou fornecidas pelo fabricante (quadros à direita) a respeito de comprimentos de onda de corte inferior e fatores de redução.

Figure 3 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral intervals "A" and "B" (see text), achieved from observations performed in three days of April, 1995, by applying information obtained in this study (displays on the left) or stated by the manufacturer (displays on the right) concerning lower cut-off wavelengths and filter reduction factors.

pelo comportamento anômalo de sua distribuição espectral de $\phi_i(\lambda)$, o outro (495) pela proximidade entre seu comprimento de onda de corte inferior e aquele correspondente ao filtro 530. As análises a seguir consideram unicamente os três filtros restantes (530, 630 e 695).

A avaliação da influência das características dos filtros empregados sobre profundidades ópticas pode ser efetuada, pelo menos em princípio, comparando-se resultados alcançados a partir de diferentes escolhas para Φ_i , λ_i e Λ_i . Parece natural a adoção de um critério baseado na procedência dos valores empregados para estes parâmetros. Identifica-se, no que segue, valores destes parâmetros que tenham sido "fornecidos pelo fabricante" (Eppley, 1990) ou "obtidos neste estudo", provenientes da observação de distribuições de transmitância em laboratório. As Tabs. 1 e 2 comparam respectivos valores para Φ_i e para λ_i . A observação de distribuições de transmitância em laboratório indicou valores de Λ_i em torno de 2,75 μm , coerentes com as informações fornecidas pelo fabricante a este respeito.

Os testes de sensibilidade apresentados a seguir consideram apenas observações de irradiância direcional realizadas entre os dias 09 e 12 de abril de 1995 na Cidade Universitária, período ao longo do qual verificaram-se dois episódios associados a precipitação significativa. Considerando-se observações efetuadas na Estação Meteorológica do IAG-USP no Parque do Estado (capital, SP), situada a aproximadamente 20 km da Cidade Universitária, foram verificados 15,2 mm de chuva na tarde do dia 09, e 24,5 mm entre a noite do dia 11 e a manhã do dia 12. Este período foi escolhido pelos reduzidos níveis de turbidez atmosférica então verificados, permitindo uma identificação mais clara dos limites da metodologia aqui empregada.

A Fig.3 reúne diversos resultados. Símbolos pretos e brancos indicam profundidades ópticas do aerossol e respectivas incertezas, sendo que estas últimas foram avaliadas seguindo-se o raciocínio delineado no início deste item. Quadrados e losangos indicam, nesta ordem, resultados referentes aos intervalos espectrais "A" e "B" definidos a partir dos comprimentos de onda de corte inferior associados aos três filtros empregados:

$$\Delta\lambda_A = \lambda_{630} - \lambda_{530}$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{695} - \lambda_{630}$$

Quadrados (losangos) representam o fruto da análise das diferenças entre as observações de irradiância direcional

efetuadas com os filtros 530 e 630 (630 e 695), devidamente multiplicadas pelos respectivos fatores de redução. Por fim, quadros à esquerda e à direita contém resultados decorrentes da aplicação de valores para Φ_i e λ_i obtidos neste estudo e daqueles fornecidos pelo fabricante, respectivamente.

Dois aspectos merecem destaque na Fig.3. Em primeiro lugar, as incertezas experimentais alcançam uma ordem de grandeza muitas vezes superior àquela freqüentemente associada a avaliações de profundidade óptica obtidas a partir de observações efetuadas com fotômetros solares ou *sunphotometers*, inferior a 0,01 (Shaw, 1976). Em outras palavras, a análise de resultados obtidos sob condições atmosféricas relativamente límpidas - reduzidos níveis de turbidez - pode ser prejudicada. A ocorrência de valores negativos de profundidade óptica como aqueles apresentados na Fig.3 poderia, pelo menos em parte, ser atribuída à importância de tal incerteza. O segundo aspecto a ser destacado nesta figura reside no fato de que a procedência dos valores empregados para Φ_i e λ_i é capaz de influenciar avaliações de profundidade óptica do aerossol. Assim, os quadros à esquerda na Fig.3 mostram que a adoção de valores obtidos neste estudo para estes parâmetros proporciona profundidades ópticas com nítida dependência espectral, sistematicamente maiores para o intervalo "A" do que para o intervalo "B". Os quadros à direita nesta mesma figura mostram que esta dependência não aparece caso sejam levados em conta os valores de Φ_i e λ_i divulgados pelo fabricante.

A Fig.4 apresenta profundidades ópticas do aerossol e respectivas incertezas de forma similar àquela empregada na figura precedente, mas considerando-se apenas a reunião dos intervalos espectrais "A" e "B" definidos acima. Em outras palavras, cada avaliação de profundidade óptica resulta da análise da diferença entre as observações de irradiância direcional efetuadas com os filtros 530 e 695, devidamente multiplicadas pelo respectivo fator de redução. A colocação em prática desta estratégia traz consigo uma vantagem e uma desvantagem. Por um lado, a disponibilidade de um intervalo $\Delta\lambda_k$ mais largo propicia a análise de irradiâncias direcionais $F(\Delta\lambda_k)$ com maior magnitude e associadas a menores incertezas relativas, permitindo a obtenção de profundidades ópticas cujas incertezas têm menor valor absoluto (ver Eq.(17)). Por outro lado, a interpretação de irradiâncias referentes a um único intervalo espectral torna inviável qualquer análise acerca da dependência espectral associada à turbidez atmosférica.

A Fig.4 mostra que o abandono de um filtro com comprimento de onda de corte inferior intermediário àqueles de dois outros filtros proporciona profundidades ópticas associadas a menores incertezas. Considerando-se os filtros 530 e 695, assim como a análise de erros envolvidos efetuada no início do presente item, tais incertezas assumiriam valores em torno de 0,05 em unidades de profundidade óptica. Incertezas desta ordem de grandeza ainda poderiam vir a justificar eventuais valores negativos, de reduzida magnitude, para a profundidade óptica do aerossol. O

fato, ocorrido quando do emprego de três filtros aplicando-se tanto valores de Φ_i e λ_i obtidos neste estudo quanto seus correspondentes fornecidos pelo fabricante (ver Fig.3), parece persistir apenas nesta última condição. Em outras palavras, a aplicação de resultados provenientes da observação de distribuições de transmitâncias em laboratório à análise de medições de irradiância direcional efetuadas com um par de filtros parece ser capaz de proporcionar valores positivos de profundidade óptica do aerossol mesmo sob condições atmosféricas relativamente límpidas, desde que

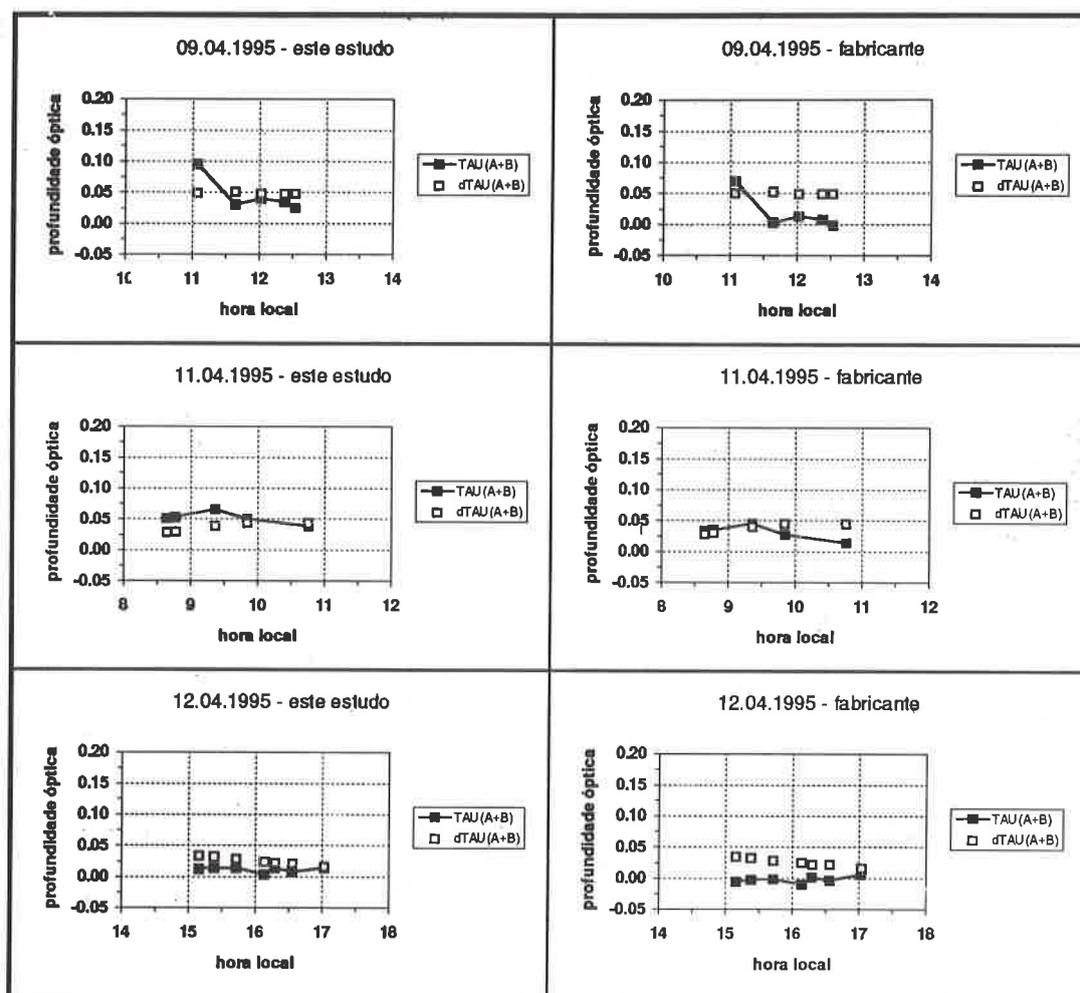


Figura 4 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para o intervalo espectral "A+B" (ver texto), alcançadas a partir de observações efetuadas em três dias de abril de 1995, levando-se em conta informações obtidas neste estudo (quadros à esquerda) ou fornecidas pelo fabricante (quadros à direita) a respeito de comprimentos de onda de corte inferior e fatores de redução.

Figure 4 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral interval "A+B" (see text), achieved from observations performed in three days of April, 1995, by applying information obtained in this study (displays on the left) or stated by the manufacturer (displays on the right) concerning lower cut-off wavelengths and filter reduction factors.

os respectivos λ_i sejam suficientemente afastados (no caso, em torno de $0,170 \mu\text{m}$).

Este último resultado, associando a largura do intervalo espectral $\Delta\lambda_k$ e a significância de resultados $\tau_a(\Delta\lambda_k)$, poderia ser generalizado única e tão somente após a análise de outros conjuntos de observações. Na ausência de tal análise, cabe-nos aqui apenas lançar suspeitas sobre avaliações de turbidez atmosférica obtidas previamente envolvendo observações de irradiância direcional com vários filtros associados a comprimentos de onda de corte inferior relativamente próximos entre si (p.ex.: Plana-Fattori, 1989).

Influência da Calibração do Pireliômetro

Avaliações de profundidade óptica do aerossol alcançadas a partir de observações efetuadas com um dado pireliômetro dependem da acurácia associada à constante de calibração deste último. A magnitude desta influência pode ser facilmente avaliada. Pode ser mostrado, diferenciando-se ambos os membros da Eq.(11), que $\tau_a(\Delta\lambda_k)$ sofre variações absolutas de sinal contrário à variação relativa de $t_a(\Delta\lambda_k)$, e que estas variações absolutas são inversamente proporcionais à massa óptica relativa $m(\text{Z}_0)$. Caso a constante de calibração do instrumento empregado assumira na realidade um valor 2 % maior do que aquele acreditado, então cada valor $V-V_r$ resultante de observações deve acarretar valores 2 % menores de irradiância direcional e portanto valores 2 % menores de transmitância $t_a(\Delta\lambda_k)$, fazendo com que a profundidade óptica do aerossol seja maior por uma quantidade $0,02 / m(\text{Z}_0)$. A Fig.5 apresenta avaliações desta influência a partir de observações efetuadas sob duas condições distintas de turbidez atmosférica (12 de abril de 1995 e 30 de janeiro de 1996). Símbolos pretos e brancos indicam profundidades ópticas e respectivas incertezas, estas últimas avaliadas seguindo-se o raciocínio delineado anteriormente. Profundidades ópticas e incertezas foram obtidas admitindo-se $k = 1,0127 \times 9,09 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ para o instrumento empregado, e aplicando-se características observadas em laboratório para os filtros de banda larga no que diz respeito à definição de intervalos espectrais e à avaliação de fatores de redução. Nesta mesma figura, cruzeiros indicam valores da diferença entre tais profundidades ópticas e aquelas que teriam sido obtidas caso não se levasse em conta o resultado das comparações efetuadas ao longo do ano de 1995 com o instrumento empregado (ou seja, $k = 9,09 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$). Em outras palavras, as cru-

zes indicariam a influência de um erro sistemático de $-1,27\%$ na constante de calibração do instrumento.

A diferença entre profundidades ópticas apresenta, neste caso, valores positivos e ordem de grandeza inferior àquela associada às incertezas devidas a erros aleatórios. Tal resultado não deve entretanto ser generalizado, por envolver dois fatores independentes entre si: conhecimento acurado da constante de calibração do instrumento, e variabilidade do sinal observado. Deve também ser notado que a magnitude

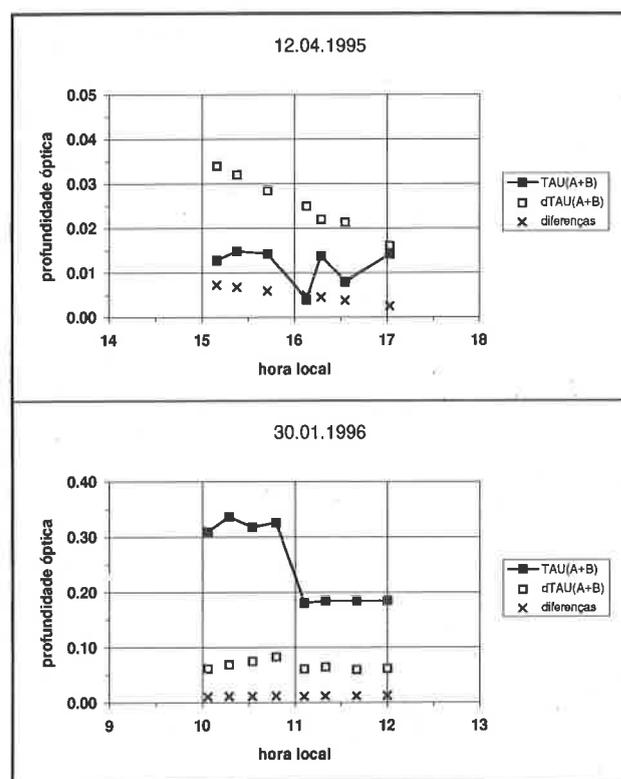


Figura 5 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para o intervalo espectral "A+B" (ver texto), alcançadas a partir de observações efetuadas em dois dias distintos. Cruzeiros indicam diferenças entre tais profundidades ópticas e o respectivo valor obtido admitindo-se um erro sistemático de $-1,27\%$ na constante de calibração do pireliômetro.

Figure 5 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral interval "A+B" (see text), achieved from observations performed in two distinct days. Crosses indicate differences between these optical depths and respective values obtained by assuming a systematic error of -1.27% on the calibration factor of the pyrheliometer.

desta influência iguala, ou quase, o valor mínimo de profundidade óptica de aerossol verificado ao longo de todo o nosso conjunto de dados, correspondente à tarde do dia 12 de abril de 1995 (ver Fig.5). Caso as comparações efetuadas ao longo de 1995 não tivessem sido levadas em conta, este valor mínimo seria praticamente nulo, configurando um grau de turbidez atmosférica inferior até mesmo àquele verificado em regiões polares (Shaw, 1982).

Em resumo, erros sistemáticos que venham eventualmente a afetar a constante de calibração do instrumento empregado devem modificar, e no mesmo sentido, avaliações de profundidade óptica do aerossol obtidas a partir da análise de observações de irradiância direcional. Esta influência não depende do grau de turbidez atmosférica mas apenas da posição do disco solar acima do horizonte e, é claro, da magnitude e do sinal do erro sistemático. Considerando-se eventuais erros sistemáticos da ordem de 1 %, tal influência poderia passar despercebida face às incertezas experimentais envolvidas.

TURBIDEZ ATMOSFÉRICA EM SÃO PAULO

As Figs. 6 e 7 apresentam os resultados provenientes de todo o conjunto de observações efetuadas entre março de 1995 e janeiro de 1996 na Cidade Universitária. Símbolos

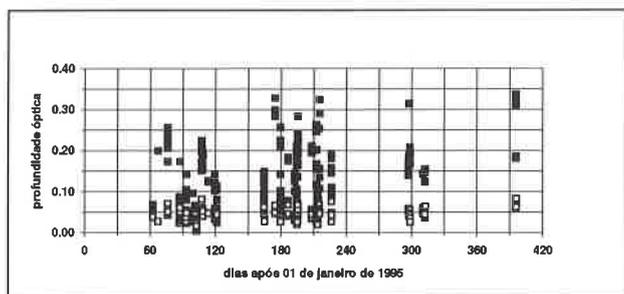


Figura 6 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para o intervalo espectral "A+B" (ver texto), alcançadas a partir de todo o conjunto de observações efetuadas entre março de 1995 e janeiro de 1996.

Figure 6 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral interval "A+B" (see text), achieved from the entire set of observations performed between March, 1995, and January, 1996.

los pretos e brancos indicam profundidades ópticas do aerossol e respectivas incertezas, sendo que cada par de símbolos constitui o fruto da análise de uma série de observações instantâneas. As duas figuras apresentam o resultado da análise de 201 séries de observações.

A variabilidade dos valores assumidos por $\tau_p(A+B)$ torna inviável a identificação de possíveis ciclos anual e diurno para a turbidez atmosférica. Um ciclo anual, se presente, poderia em princípio ser relacionado ao regime de precipitação; a Fig.6 apresentaria, sob tal eventualidade, profundidades ópticas mais elevadas ao longo da estação seca (maio a setembro, dias 120 a 270 na escala das abscissas). Um ciclo diurno, se presente, resultaria da ação de diversos processos tais como a evolução da umidade relativa do ar e o desenvolvimento do transporte vertical turbulento entre o nascer de Sol e o início da tarde. A variabilidade presente nestas duas figuras é considerada significativa visto que sua amplitude exhibe ordem de grandeza superior às incertezas experimentais; portanto, pode-se supor que tal variabilidade seja natural, inerente ao próprio sinal observado. Parece bastante plausível que esta variabilidade resulte dos processos atmosféricos de dispersão e de remoção de material particulado em suspensão.

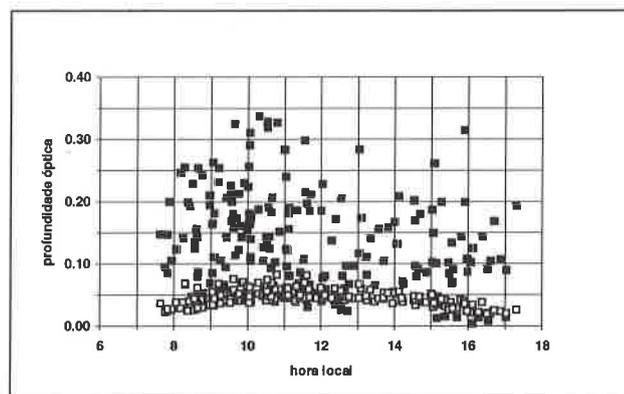


Figura 7 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para o intervalo espectral "A+B" (ver texto), alcançadas a partir de todo o conjunto de observações efetuadas entre março de 1995 e janeiro de 1996.

Figure 7 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral interval "A+B" (see text), achieved from the entire set of observations performed between March, 1995, and January, 1996.

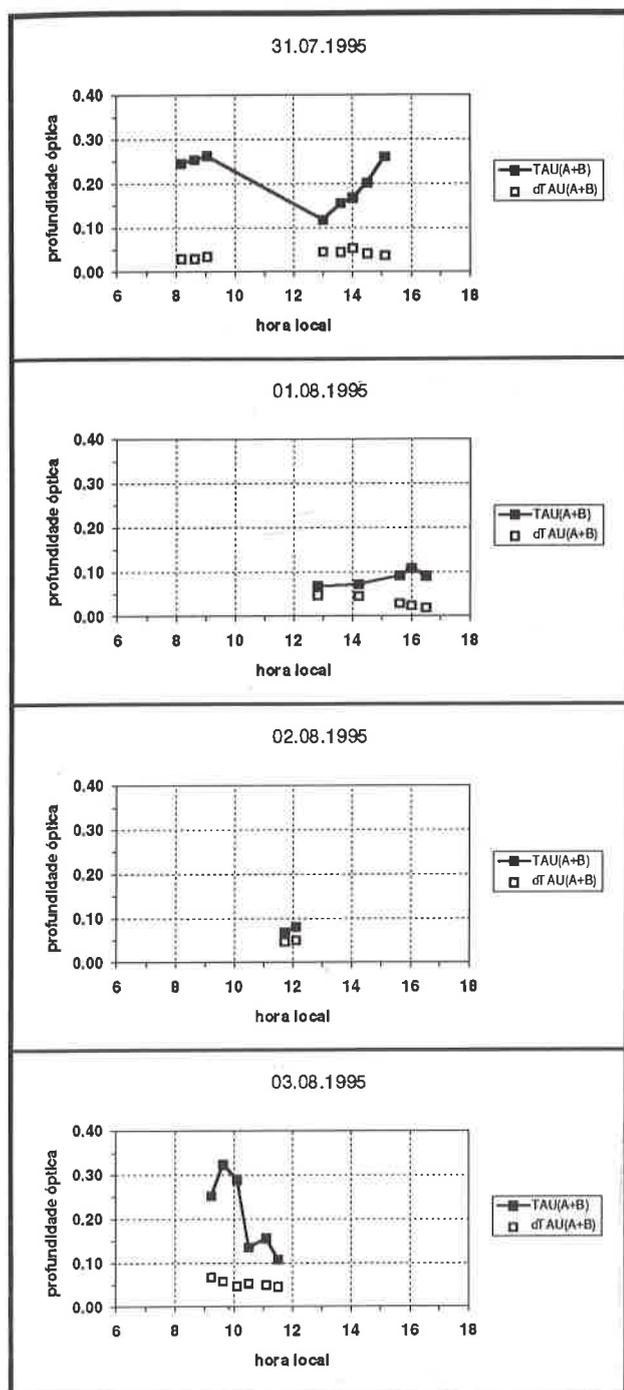


Figura 8 - Profundidades ópticas do aerossol (símbolos pretos) e respectivas incertezas (símbolos brancos) para o intervalo espectral "A+B" (ver texto), alcançadas a partir de observações efetuadas em quatro dias distintos.

Figure 8 - Aerosol optical depths (black symbols) and respective uncertainties (white symbols) for the spectral interval "A+B" (see text), achieved from observations performed in four distinct days.

A Fig.8 ilustra resultados referentes a quatro dias consecutivos com observações pireliométricas. Algumas tendências bem definidas podem ser identificadas, como o aumento da turbidez atmosférica ao longo da tarde do dia 31 de julho. Em outras palavras, parte da variabilidade presente na Fig.7 decorre da superposição de evoluções temporais distintas entre si, cada qual associada a uma condição distinta em termos de estabilidade atmosférica, regime de ventos, etc. A ausência de observações meteorológicas nas proximidades do sítio de observações pireliométricas impede, neste nosso estudo, que análises mais detalhadas sejam efetuadas acerca do ciclo diurno da turbidez atmosférica.

Diversos parâmetros meteorológicos são capazes de influenciar a turbidez atmosférica. A ocorrência de precipitação constitui, talvez, o exemplo mais eloqüente. Os menores valores de $\tau_{\text{a}}(\text{A+B})$ apresentados nas Figs. 6 e 7 correspondem à tarde do dia 12 de abril de 1995, poucas horas após um evento de moderada importância (24,5 mm foram registrados entre a noite do dia 11 e a manhã do dia 12 na Estação Meteorológica do IAG-USP no Parque do Estado). A avaliação do impacto de outros parâmetros meteorológicos sobre a turbidez atmosférica, como o regime de ventos e o ciclo diurno da umidade relativa do ar, não é tão direta quanto no caso da precipitação, sobretudo pela natureza das grandezas que se procura associar; cabe lembrar que a profundidade óptica do aerossol constitui uma grandeza integrada sobre toda a coluna atmosférica (ver Eq.(2)), enquanto que anemômetros e higrômetros fornecem informações pertinentes apenas para o ambiente ao seu redor, poucos metros acima do solo. Além disto, a associação entre evoluções temporais de profundidades ópticas e de parâmetros meteorológicos deve ser tão mais difícil quanto maior a distância entre os respectivos sítios de observação. Neste contexto, a ausência de observações meteorológicas na Cidade Universitária ou em suas proximidades imediatas impede que os resultados contidos nas figuras aqui apresentadas sejam analisadas em detalhe no que diz respeito aos processos atmosféricos em jogo.

Em resumo, a profundidade óptica do aerossol associada ao intervalo espectral "A+B" (aproximadamente 0,53-0,70 μm) logra alcançar valores máximos entre 0,30 e 0,35 para o conjunto de observações coletado entre março de 1995 e janeiro de 1996. Esta ordem de grandeza é semelhante àquela apresentada como valor médio por Shaw (1982) para alguns centros urbanos na Europa, entre 0,20 e 0,40. Tal comparação não deve, entretanto, indicar que a

Região Metropolitana de São Paulo esteja sob a influência de condições atmosféricas menos contaminadas que aqueles centros europeus. Diversos fatores independentes entre si tornam extremamente complexa a discussão do tema, desde aspectos metodológicos (pireliômetros ou fotômetros solares) até o fato de que a turbidez atmosférica não constitui um indicador genérico de poluentes, mas apenas um indicador da presença daqueles que são capazes de influenciar a transferência de radiação solar ao longo do espectro visível.

SÍNTESE E RECOMENDAÇÕES

A avaliação da turbidez atmosférica através da análise de observações efetuadas com pireliômetros e filtros de banda larga apresenta uma série de limitações, mesmo que as diversas fontes de erro sejam objeto de avaliação detalhada. Estas limitações podem conduzir a resultados capazes de indicar o nível em que se encontra a presença de aerossol, ainda que esta informação seja desprovida de qualquer detalhamento espectral e, portanto, incapaz de propiciar qualquer discussão acerca da granulometria associada às partículas em suspensão. As incertezas experimentais podem ser importantes caso a própria turbidez atmosférica em si seja reduzida, tornando-se gradativamente menores à medida que a própria presença de aerossol torna-se mais significativa.

Avaliar turbidez atmosférica constitui uma tarefa necessária sempre que houver interesse em se validar códigos de transferência radiativa sob condições reais, entre outras motivações de cunho ambiental e/ou climatológico. Considerando-se o conjunto de observações coletado entre março de 1995 e janeiro de 1996 na Cidade Universitária, a profundidade óptica do aerossol apresentou elevada variabilidade, seus valores máximos foram realistas, e seus valores mínimos se mostraram praticamente nulos logo após a ocorrência de chuva. A obtenção de tais resultados a partir de observações pireliométricas só se tornou exequível a partir de uma profunda análise das fontes de erro envolvidas, talvez a mais completa já efetuada em nosso país para observações deste tipo.

Esforços que venham a ser dedicados no futuro neste tema devem contemplar decisões distintas daquelas seguidas ao longo deste estudo. A avaliação de propriedades físico-químicas do aerossol (estimativa de granulometria) e a determinação acurada de seu impacto radiativo sobre

irradiâncias recebidas à proximidade do solo tornam imperativo o emprego de instrumentação mais avançada (p.ex.: Harrison, 1994). Por outro lado, associações entre evoluções temporais de profundidades ópticas e de parâmetros meteorológicos requerem que os dois tipos de observação sejam efetuadas em sítios o mais próximos possível. Esta preocupação deve conduzir a bases de dados radiométricos com valor científico ainda maior.

AGRADECIMENTOS

Nossos esforços contaram com o apoio de A.R. Blak (IF-USP) e de C.A. Sasaki (EP-USP) para análise dos filtros de banda larga em laboratório, com a qualidade das informações fornecidas pela Estação Meteorológica do IAG-USP (Parque do Estado, capital), com a cumplicidade de D.S. Moreira (bolsista FAPESP) para a realização de observações, com a acolhida proporcionada pelo pessoal do CERAS-INEMET (Brasília, DF) em setembro de 1987, com a boa fé de N.M.N. Sato (IPT-SP) e de J.F. Escobedo (UNESP-Botucatu) quando do empréstimo de pireliômetros lotados em suas respectivas instituições, com o incentivo de J.C. Ceballos, de E.J.B. Bastos e de P.M. dos Santos, e com o apoio da FAPESP (bolsa de Iniciação Científica, J.R. Rozante). Agradecimentos finais são dirigidos a dois revisores anônimos, cujas sugestões em muito contribuíram à elaboração da versão final do presente texto. Um dos autores (J. R. Rozante) era bolsista de Iniciação Científica (FAPESP) à época de realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- CARLSON, T.N. & CAVERLY, R.S. - 1977** - Radiative characteristics of Saharan dust at solar wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, **82(21)**: 3141-3152.
- CIMO** (Commission for Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization) - **1987** - "Primera Comparación Regional de la O.M.M. de Pireliómetros Patrones Nacionales de la A.R.III: Informe Final". Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina, Buenos Aires, 41pp.
- COULSON, K.L. - 1975** - Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements. Academic Press, New York., 322pp.

- CSAGI** (Comité Spécial de l'Année Géophysique Internationale) - 1958 - Annals of the International Geophysical Year, Vol. V. Pergamon Press, London, 468pp.
- EPPLEY** - 1990 - Instrumentation for the Measurement of the Components of Solar and Terrestrial Radiation. Newport (USA), The Eppley Laboratory, Inc., 12pp.
- FORGAN, B.W.** - 1979 - The Measurement of Solar Irradiance: Instrumentation and Measurements in the Adelaide Region. PhD Thesis, School of Earth Sciences, The Flinders University of South Australia, 380pp.
- FRÖHLICH, C. & SHAW, G.E.** - 1980 - New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, **19(11)**: 1773-1775.
- FRÖHLICH, C. & LONDON, J. (Eds.)** - 1986 - Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements. World Climate Research Programme, WCRP publications series no.7, publication WMO/TD no.149, Geneva (Switzerland), 139pp.
- GULBRANDSEN, A.** - 1978 - On the use of pyranometers in the study of spectral solar radiation and atmospheric aerosols. *Journal of Applied Meteorology*, **17**: 899-904.
- HARRISON, L., J. MICHALSKY & J. BERNDT** - 1994 - Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements. *Applied Optics*, **33(22)**: 5118-5125.
- HOUGHTON, J.T., L.G. MEIRA FILHO, B.A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG & K. MASKELL (Eds.)** - 1996 - Climate Change 1995: The Science of Climate Change (Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, Cambridge (UK), 572pp.
- KASTEN, F. & YOUNG, A.T.** - 1989 - Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, **28(22)**: 4735-4738.
- KNEIZYS, F.X., E.P. SHETTLE, L.W. ABREU, J.H. CHETWYND, G.P. ANDERSON, W.O. GALLERY, J.E.A. SELBY & S.A. CLOUGH** - 1988 - Users guide to LOWTRAN-7. Publication AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophys. Lab., Hanscom (MA, USA), 137pp.
- LIOU, K.-N.** - 1980 - An Introduction to Atmospheric Radiation. Academic Press, 392pp.
- McCARTNEY, H.A. & UNSWORTH, M.H.** - 1978 - Spectral distribution of solar radiation, I: direct radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **104**: 699-718.
- McCLATCHEY, R.A., R.W. FENN, J.E.A. SELBY, F.E. VOLZ & J.S. GARING** - 1972 - Optical properties of the atmosphere (Third Edition). Publication AFCRL-72-0497, Air Force Cambridge Res. Lab., Hanscom (MA, USA), 108pp.
- MICHALSKY, J.J.** - 1988 - The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). *Solar Energy*, **40(3)**: 227-235.
- PALTRIDGE, G.W. & PLATT, C.M.R.** - 1976 - Radiative Processes in Meteorology and Climatology. Developments in Atmospheric Science, 5. Elsevier, Amsterdam, 318pp.
- PLANA-FATTORI, A.** - 1989 - Avaliação da Turbidez Atmosférica a partir de Medidas Pireliométricas com Filtros de Banda Larga. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo.
- PLANA-FATTORI, A. & CEBALLOS, J.C.** - 1984 - Turbidez atmosférica: um estudo da informação fornecida por determinações pireliométricas. Anais, III Congr. Bras. Meteor., 2: 146-154, Belo Horizonte, MG.
- ROBINSON, N.** - 1966 - Solar Radiation. Elsevier, Amsterdam, 347pp.
- SHAW, G.E.** - 1976 - Error analysis in multi-wavelength sun photometry. *Pure and Applied Geophysics*, **114**: 1-14.
- SHAW, G.E.** - 1982 - Atmospheric turbidity in the polar regions. *Journal of Applied Meteorology*, **21**: 1080-1088.
- THOMALLA, E., P. KÖPKE, H. MÜLLER & H. QUENZEL** - 1983 - Circumsolar radiation calculated for various atmospheric conditions. *Solar Energy*, **30(6)**: 575-587.
- VENKATRAM, A. & VISKANTA, R.** - 1977 - Effects of aerosol-induced heating on the convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **34**: 1918-1933.
- WMO** - 1981 - Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source. World Meteorological Organization, publication WMO no.557, technical note no.172, Geneva (Switzerland), 298pp.

WMO - 1983 - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organization, publication WMO no.8 (fifth edition), Geneva (Switzerland).

WMO - 1986 - Atmospheric Ozone 1985. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, report no.16, Geneva (Switzerland), 1095pp.

YOUNG, A.T. - 1980 - Revised depolarization corrections for atmospheric extinction. Applied Optics, **19(20)**: 3427-3428.

Submetido em: 20/12/96

Revisado pelo(s) autor(es) em: 12/08/97

Accito em: 20/09/97

BROADBAND PYRHELIOMETRY AND ATMOSPHERIC TURBIDITY IN SÃO PAULO

This study analyzes direct-normal solar irradiances received at the ground level in cloudless conditions, in São Paulo (SP, Brazil; 23°34'S, 46°44'W, 730 meters above the mean sea level), with the objective of evaluating the importance of the particulate matter in suspension (aerosol) on the atmospheric transparency in the visible spectrum. Such influence is assessed in terms of the values assumed by the aerosol optical depth, which in turn is obtained from pyrhelometric data performed with different broadband filters. The transmittance distributions of these latter were measured with spectrophotometers in laboratory from the visible up to 5 μm , allowing the identification of lower cut-off wavelengths as well as the evaluation of filter reduction factors. It's somewhat surprising to observe that broadband filters may present characteristics distinct from those stated by the manufacturer. Sensitivity tests measure the importance, over aerosol optical depths, of some sources of systematic errors such as the filter characteristics and the instrument calibration. The adoption of lower cut-offs and reduction factors stated by the manufacturer may allow unrealistic (negative) aerosol optical depths under clean atmospheric conditions, even to the case of two filters. The reliability

of aerosol optical depth estimates increases with the own turbidity level, being usually low (relative uncertainties greater than 100 %) under clean atmospheric conditions. The analysis of the entire data set collected between March 1995 and January 1996 shows that aerosol optical depths may exhibit very important variations in a certain day. Several reasons could explain this feature, such as (a) the wind field around of the site of measurements and (b) the daily cycle of the relative humidity. Also, aerosol optical depths may assume very low values after the occurrence of rain; however, this result must be taken with extreme caution because it needs more investigation. Two independent aspects unable a more accurate assessment of the processes involved in both situations (that is, low turbidity and high variability). The first one is related to the distance between the position of the meteorological station and the site where all pyrhelometric measurements were performed. The second aspect is related to the intrinsic uncertainties associated to the procedure followed. Future studies in this subject must employ a more accurate instrument located in the same site producing meteorological routine observations.