

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA PARAMETRIZAÇÃO DE AEROSSÓIS DE QUEIMADA NO  
MODELO FÍSICO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA BRASIL-SR**

**Fernando Ramos Martins**

**Enio Bueno Pereira**

Departamento de Geofísica Espacial – DGE

Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE

Caixa Postal 515. CEP: 12201-970. São José dos Campos, SP, Brasil

[fernando@dge.inpe.br](mailto:fernando@dge.inpe.br)

**Igor Trosnikov**

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE

Caixa Postal 01. CEP: 12630-000. Cachoeira Paulista, SP, Brasil

[igor@cptec.inpe.br](mailto:igor@cptec.inpe.br)

**ABSTRACT**

This report presents the first results of an approach to account for biomass burning contribution to the atmospheric transmittance on the BRASIL-SR radiation model. Global Aerosol Data Set (GADS) were used to get the optical properties of three different compositions: with 5%, 7.8% and 10% of black carbon present in the aerosols. The aerosol profile (input data for the code) was obtained from a transport model for estimation of tracers spreading from biomass burning areas. This aerosol parameterization reduces the bias of irradiance estimations and improves the correlation between estimates and measured values.

**INTRODUÇÃO**

O aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais causados por crises políticas em regiões produtoras e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente vêm levando o homem a pesquisar, desenvolver e utilizar fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ao meio ambiente. A energia solar vem se apresentando como um projeto viável técnica e economicamente dentre as fontes de energia alternativas que produzem reduzido impacto ambiental (Pereira e Colle, 1997). O custo elevado da energia solar, que se apresenta como principal desvantagem para sua utilização, vem sendo reduzido rapidamente e espera-se que nas próximas duas décadas esteja competitivo com o custo das formas convencionais de produção de energia (Goldemberg, 1998). O primeiro passo para a utilização deste potencial é conhecer a disponibilidade e a variabilidade espacial e temporal da radiação solar no território brasileiro e, para isso, um modelo computacional operacional, que emprega dados de satélite geoestacionário, foi desenvolvido pelos autores para este fim e denominado BRASIL-SR (Colle e Pereira, 1998).

Um dos fatores que influenciam a precisão das estimativas fornecidas é o conhecimento disponível sobre as propriedades óticas e a distribuição geográfica dos aerossóis (Box *et al.*, 1996). A grande variabilidade geográfica da concentração de aerossóis associada a fenômenos naturais e eventos sazonais, como as queimadas, são fatores que dificultam e introduzem incertezas na parametrização dos processos radiativos (Pinker e Laszlo, 1989).

Os efeitos climáticos e ambientais dos aerossóis lançados à atmosfera em eventos de queimada vem sendo tema de muitas pesquisas (Ross *et al.*, 1998; Eck *et al.*, 1998; Reid *et al.*, 1998; Echalar *et al.*, 1998), mas pouco se estudou sobre a influência destes aerossóis na disponibilidade da radiação solar na superfície. Os aerossóis de queimada reduzem a irradiação solar na superfície devido aos processos de espalhamento e absorção da radiação. Witlock e Tarpley (1996) verificaram que os produtos de combustão lançados à atmosfera em eventos de queima de biomassa ocorridos na África reduziram a irradiação solar na superfície em valores de até 120W/m<sup>2</sup>. Estudos mostram que um forçamento radiativo da ordem de -25W/m<sup>2</sup> pode ser observado decorrente do aumento da profundidade ótica da atmosfera causado pelos aerossóis de queimada (Anderson *et al.*, 1996).

Em vista do exposto acima, este trabalho tem como objetivo descrever a implantação e avaliar uma parametrização dos processos de interação destes aerossóis com a radiação solar a ser adotada na obtenção de estimativas mais confiáveis da disponibilidade de energia solar no território brasileiro.

**METODOLOGIA**

**Descrição do Modelo BRASIL-SR**

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o

uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite. Foi inicialmente desenvolvido na Alemanha (GKSS, Geesthacht) e, posteriormente, adaptado e aperfeiçoado no Brasil por meio de convênio estabelecido entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica e as demais propriedades óticas da atmosfera são parametrizadas a partir de seus valores climatológicos. A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície pode ser dividida em três etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e imagens de satélite; b) determinação das condições de contorno; c) cálculo da radiação global.

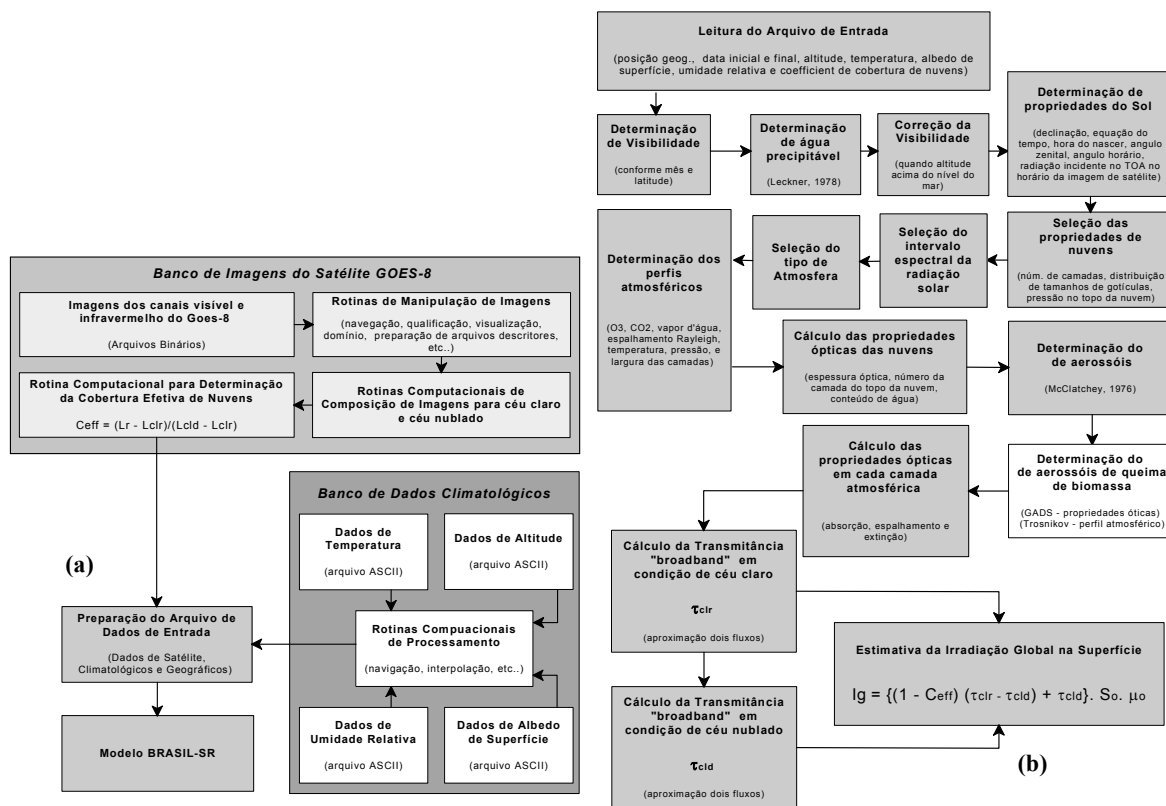


Figura 1. (a) Fluxograma dos procedimentos para manipulação dos dados de entrada para uso no BRASIL-SR. (b) Fluxograma do código computacional BRASIL-SR. O módulo em destaque em (b) foi incluído no modelo durante a execução deste trabalho.

A Figura 1(a) mostra o diagrama em blocos dos processos executados na primeira etapa. O banco de dados de temperatura e umidade relativa foi desenvolvido a partir dos valores médios dos últimos 30 anos de medidas em estações meteorológicas distribuídas pelo território brasileiro e operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A fonte dos valores de albedo de superfície foram os produtos do DAAC-Langley, e os dados de altitude foram obtidos da base de dados GTOPO produzido pelo EROS Data Center.

O tratamento de imagens inclui o recebimento das imagens fornecidas pelo CPTEC/INPE via INTERNET, a qualificação das imagens, o gerenciamento do banco de imagens e a determinação estatística do coeficiente de cobertura de nuvens utilizado como dado de entrada do modelo BRASIL-SR. Para determinação do coeficiente de cobertura de nuvens é necessário a composição de imagens de céu claro e de céu completamente nublado por meio de análise estatística de imagens do período de interesse. Os valores  $C_{eff}$  descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: cobertura de nuvens e as variações espaciais da profundidade ótica das nuvens.

As etapas seguintes são realizadas no código do próprio modelo BRASIL-SR. A Figura 1(b) apresenta um fluxograma descritivo dos procedimentos principais do modelo BRASIL-SR. O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas - céu claro e céu encoberto (Pereira et al., 2000, Colle e Pereira, 1997; Stuhlmann et al., 1990). Dessa forma, o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera é descrito por:

$$\Phi_r = (1 - C_{eff})\Phi_{rClr} + C_{eff} \cdot \Phi_{rCld} \quad (1)$$

onde  $\Phi_r$  é a o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera;  $\Phi_{rCld}$  e  $\Phi_{rClr}$  são, respectivamente, o valor máximo e o valor mínimo de  $\Phi_r$ . O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, de modo que se pode escrever:

$$\Phi_g = \Phi_0 \{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \} \quad (2)$$

onde  $\Phi_g$  é fluxo de radiação solar incidente na superfície,  $\Phi_0$  é a radiação incidente no topo da atmosfera,  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$  são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente. Dessa forma, a determinação da radiação solar incidente na superfície pode ser estimado a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro,  $\tau_{Clr}$ , e a segunda refere-se à condição de céu encoberto,  $\tau_{Cld}$ . A natureza estocástica do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura de nuvens. A componente  $\tau_{clear}$  é função do albedo de superfície, ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos. A componente  $\tau_{cloud}$  é função do ângulo zenital solar, da espessura ótica e altitude do topo das nuvens. As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos.

Para determinação das transmitâncias  $\tau_{clear}$  e  $\tau_{cloud}$ , o modelo divide o espectro de radiação solar em 135 intervalos e a atmosfera em 30 camadas. Os processos de interação considerados são: nuvens, espalhamento Rayleigh, absorção por gases atmosféricos ( $O_3$ ,  $CO_2$  e vapor d'água), e espalhamento Mie devido aos aerossóis.

Os perfis atmosféricos são utilizados para determinação da espessura ótica de cada processo de interação. Os perfis da temperatura, espessura de cada camada, densidade do ar seco, ozônio, dióxido de carbono e o vapor d'água são estabelecidos com base no tipo de atmosfera selecionado a partir do valor da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). O modelo permite a seleção entre 5 tipos de atmosferas-padrão: tropical, verão ou inverno em latitudes médias, verão ou inverno subártico. Na determinação do perfil de água o modelo considera também a parametrização de água precipitável descrita Leckner (1978). O perfil de  $CO_2$  é calculado em função da pressão; da temperatura do ar e de uma concentração média de  $CO_2$  na atmosfera. (Martins, 2001).

Um perfil de espalhamento Rayleigh, para altitudes de 0 a 50 km, é utilizado pelo modelo para cálculo da espessura ótica de espalhamento em cada camada atmosférica. O perfil de aerossóis adotado é descrito por McClatchey (1972) para altitudes de 0 a 50km. Uma correção é aplicada aos primeiros 5 km de altitude do perfil de aerossóis com base em valores climatológicos de visibilidade estabelecidos em função da latitude e do mês do ano.

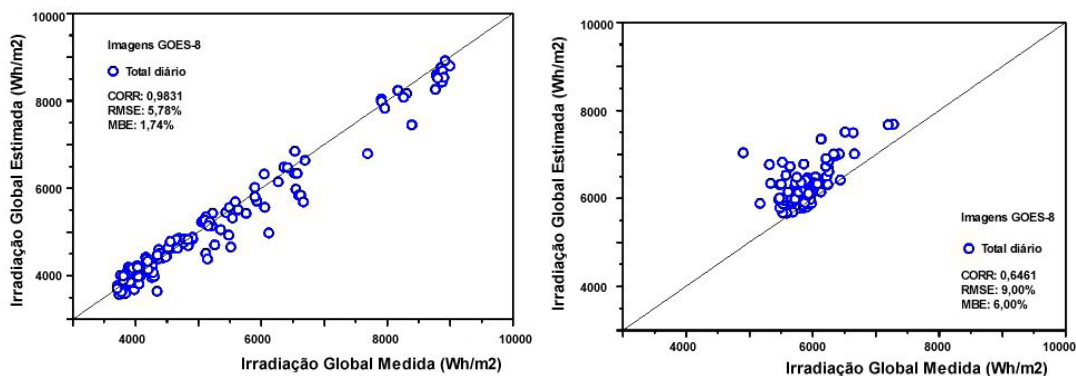
Para parametrizar a absorção e espalhamento da radiação solar por nuvens, o modelo assume a existência de uma relação linear entre a cobertura efetiva de nuvens e a transmitância das nuvens (Stuhmann, 1990). As propriedades físicas utilizadas para parametrização da influência das nuvens na radiação incidente na superfície são: número de camadas atmosféricas com nuvens, distribuição de tamanhos de gotículas, tipo de nuvens, pressão atmosférica no topo da nuvem e conteúdo total de água líquida na nuvem. O modelo BRASIL-SR assume que: (a) a microfísica de nuvens é representada pela distribuição de tamanhos de gotículas do tipo de nuvem presente; (b) as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol e (c) as nuvens são vertical e horizontalmente homogêneas. A altura da nuvem dependerá do perfil de pressão atmosférica estabelecido para a atmosfera padrão selecionada. O modelo utiliza a parametrização de Stephens (1978) das propriedades microfísicas para determinar o coeficiente de extinção total e o conteúdo total de água líquida na nuvem. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotropicamente distribuída.

A contribuição da radiação difusa é estimada considerando o efeito das múltiplas reflexões entre as diversas camadas atmosféricas e que o albedo de superfície é idêntico para a radiação difusa e radiação direta. Após estimar os valores das duas transmitâncias a expressão (2) é utilizada para cálculo da radiação incidente em todas as situações de cobertura de nuvens.

A Figura 2 apresenta a comparação entre as estimativas de irradiação global diária fornecidas pelo modelo e os valores medidos na superfície em dias de céu claro antes da inclusão da parametrização dos processos radiativos com os aerossóis de queimada. Os valores de RMSE (erro quadrático médio relativo) e MBE (desvio médio relativo) apresentados são valores relativos ao valor da irradiação medida. Observa-se que as estimativas para as estações localizadas no sul do Brasil (Figura 2a) apresentaram melhor concordância com os valores medidos em superfície (RMSE=5,8% e MBE=1,7%). A correlação entre as estimativas do modelo e os valores medidos nas estações de Florianópolis e Lebon Régis foi 0,98, mostrando que o modelo executa uma modelagem adequada dos processos radiativos em condições de céu claro fora da área de influência das queimadas. As estações localizadas na região Centro Norte apresentaram maior discrepância com os valores medidos, conforme mostra a Figura 2(b).

A causa da maior dispersão e imprecisão das estimativas do modelo é a ocorrência de queimadas na região Centro-Norte durante a estação seca que é o período do ano em que ocorreram os dias de céu claro. Estes resultados foram

obtidos antes da implementação da parametrização da influência dos aerossóis de queimada nos processos radiativos, e, assim a transmitância atmosférica estimada em condições de céu claro é maior do que seu valor real.



**Figura 2.** Comparação entre valores estimados e medidos das irradiações globais em dias de céu claro nas estações mantidas (a) pelo LABSOLAR/UFSC e (b) Projeto ABRACOS. (fonte: Colle e Pereira, 1998).

### Parametrização das propriedades óticas dos aerossóis

A modelagem da absorção e espalhamento da radiação solar por aerossóis adotada no modelo baseia-se no estudo desenvolvido por Angstrom (1964) no qual a transmitância para a radiação solar direta é descrita por:

$$\tau_{a\lambda} = e^{(-\beta \cdot \lambda^{-\alpha} \cdot m)} \quad (3)$$

onde  $\beta$  é o coeficiente de turbidez de Angstrom,  $\alpha$  é o expoente de comprimento de onda  $\lambda$  da radiação solar. O modelo parametriza, também, a influência da distribuição de tamanho das partículas em diferentes altitudes por meio da definição de três intervalos de altitude: menores que 2 km; entre 2 km e 10 km; maiores que 10 km.

Essa aproximação simplificada é insuficiente para caracterizar a variabilidade e importância dos aerossóis para a ótica atmosférica e falha em grandes centros urbanos (Gambi *et al.*, 1998) e regiões sujeitas à ocorrência de fenômenos sazonais como eventos de queimada durante a estação seca na região centro-norte do Brasil (Martins, 2001).

A parametrização para os aerossóis de queimada adotada neste trabalho utiliza valores das propriedades óticas de aerossóis obtidas a partir da base de dados "Global Aerosol Data Set/GADS" (Köepke *et al.*, 1997). Esta base de dados apresenta as propriedades óticas obtidas utilizando a teoria de Mie para 10 tipos aerossóis. Com o uso do software OPAC (Hess *et al.*, 1998), fornecido pela GADS, pode-se determinar as propriedades óticas para qualquer modelo de aerossol atmosférico baseado numa mistura de tipos de aerossóis selecionados entre os 10 disponíveis.

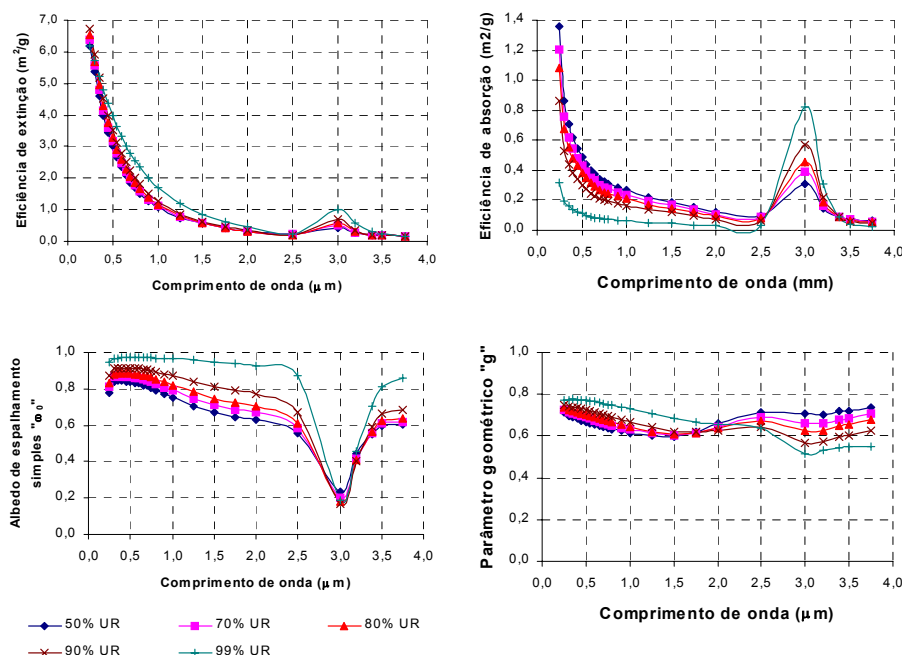
Este estudo estabeleceu três modelos de aerossóis diferentes para a parametrização dos aerossóis de queimada cuja composição e razões de mistura estão descritas na Tabela 1. Estes modelos de aerossóis foram selecionados em função da composição dos aerossóis de queimada descrita em trabalhos desenvolvidos durante a missão SCAR-B (Artaxo *et al.*, 1998; Echalar *et al.*, 1998). Os particulados de compostos solúveis em água são originados na conversão gás-partícula (sulfatos, nitratos, e compostos orgânicos), enquanto que os compostos insolúveis são partículas maiores e estão associados a partículas de solo com pequena quantidade de material orgânico (Hess *et al.*, 1998). Os valores adotados para a razão de mistura do carbono elementar na atmosfera tiveram como base os valores apresentados por Ferek *et al.* (1998) e que estão em concordância com diversos estudos publicados (Reid *et al.*, 1998b; Artaxo *et al.*, 1998; Echalar *et al.*, 1998). A emissão de carbono elementar em eventos de queimada é bastante variável, com sua concentração podendo variar entre valores da ordem de 4 a 12% do total de compostos particulados emitidos (Reid *et al.*, 1998b; Ferek *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 1996).

A Figura 3 mostra o comportamento das propriedades óticas dos aerossóis de queimada em função do comprimento de onda da radiação e da umidade relativa da atmosfera para o modelo Queimada 1. Observa-se uma redução forte do albedo de espalhamento simples no comprimento de onda de 3 $\mu$ m causada pelos constituintes solúveis em água. Além disso, pode-se observar que as curvas obtidas para o albedo de espalhamento simples apresentam um decréscimo com o comprimento de onda na faixa de 0,3 $\mu$ m a 0,7 $\mu$ m, o que está de acordo com o comportamento observado por Eck *et al.* (1998) durante a missão SCAR-B. O albedo de espalhamento simples na região do visível cresce com o aumento de umidade relativa enquanto o parâmetro de assimetria de espalhamento decresce, resultado que está em concordância com o estudo desenvolvido por Kotchenruther e Hobbs (1998). Os valores do albedo de espalhamento simples obtidos estão em boa concordância com os valores medidos por Reid *et al.* (1998b) – valores entre 0,75 e 0,85. Comportamento semelhante é verificado nos demais modelos de aerossóis estudados.

**Tabela 1. Composição dos modelos de aerossóis utilizados no BRASIL-SR para a parametrização dos aerossóis emitidos em eventos de queimada na transmitância atmosférica (valores em %).**

TIPO DE AEROSSOL	MODELO DE AEROSSÓIS		
	Queimada 1	Queimada 2	Queimada 3
Compostos solúveis em água	65,3	64,5	56,3
Compostos insolúveis em água	29,7	25,5	35,8
Carbono elementar	5,0	10,0	7,9

Formatado

**Figura 3.** Comportamento das propriedades óticas dos aerossóis de queimada descritos pelo modelo Queimada 1 em função do comprimento de onda da radiação solar: (a) eficiência de extinção; (b) eficiência de absorção; (c) albedo de espalhamento simples; (d) parâmetro geométrico

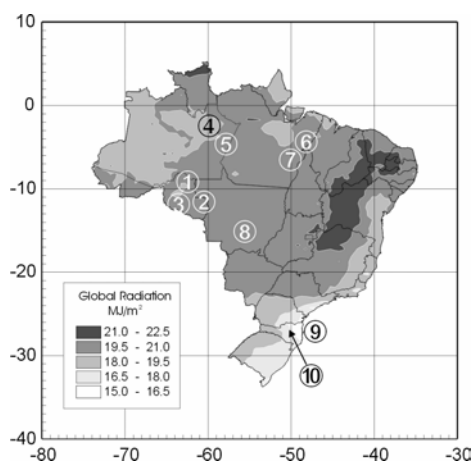
A principal dificuldade na parametrização dos aerossóis de queimada reside no conhecimento da concentração de aerossóis presentes em cada camada da atmosfera. A intensa emissão de aerossóis para a atmosfera durante os meses de julho a outubro (estação seca) produz uma espessa camada de fumaça sobre as regiões Norte e Centro Oeste do Brasil. Além disso, as altas temperaturas envolvidas na combustão e a entrada de frentes frias convectivas provenientes do sul do continente favorecem o movimento convectivo ascendente e podem ser responsáveis pela elevação destes poluentes até altitudes suficientes para serem transportados para regiões distantes das fontes emissoras. Os efeitos destas emissões excedem, portanto, a escala local e afetam regionalmente toda a composição da atmosfera na América do Sul (Trosnikov e Nobre, 1998).

Em virtude da escassa quantidade de informações e medidas experimentais que permitam a obtenção dessa informação necessária como dado de entrada da parametrização dos aerossóis de queimada, adotou-se estimativas fornecidas por um modelo de simulação numérica do transporte de aerossóis e gases traços em áreas de ocorrência de queimadas, desenvolvido por Trosnikov e Nobre (1998), que determina a concentração na coluna atmosférica e o perfil dos aerossóis emitidos em eventos de queimadas a partir de dados de localização das fontes (focos de queima) e dos processos de dispersão e remoção dos aerossóis na atmosfera utilizando a técnica semi-Lagrangiana. O modelo de transporte atmosférico inclui a simulação dos principais processos de larga escala: sedimentação dos aerossóis, advecção horizontal e vertical, e movimento turbulento vertical. O modelo transporte foi acoplado com a versão de 40 km do modelo ETA do CPTEC e, durante a integração sincronizada, acessa os dados de vento, temperatura, altura geopotencial, e parâmetros verticais de turbulência previstos a cada 48 minutos. O modelo acoplado utiliza a análise e previsões de cinco dias do Modelo Global do CPTEC como condição inicial e de fronteira lateral. A determinação das fontes de aerossóis é realizada através dos dados de focos de queimadas

obtidos do sistema de monitoração de queimadas realizado em rotina operacional pelo CPTEC utilizando os satélites orbitais NOAA. As estimativas do modelo de transporte mostraram boa concordância com o transporte de aerossóis observado em imagens do satélite GOES-8 e apresentou bons resultados com relação à descrição da distribuição geográfica dos aerossóis emitidos em eventos de biomassa durante o experimento de campo SCAR-B.

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando dados de 10 estações solarimétricas localizadas nas regiões Centro-Norte e Sul do Brasil dos anos 1995 e 1996 (exceto para Florianópolis com dados no período de 1994 a 1997) foi possível verificar que o desvio médio das estimativas de irradiação global cresce para as estações localizadas em regiões de ocorrência de queimadas nos meses correspondentes a estação seca. A Tabela 2 apresenta os dados geográficos das estações utilizadas nesta avaliação. A Figura 4 apresenta a localização aproximada das estações e a média do total diário de irradiação global para o território brasileiro estimado pelo modelo BRASIL-SR. As estações 1, 2, 3, 6 e 7 estão localizadas no arco de desflorestamento, as estações 4 e 5 estão localizadas no interior da Floresta Amazônica, e a estação 8 localiza-se em uma região típica de Cerrados. As estações 9 e 10 estão localizadas na região sul do país onde a incidência de queimadas é pequena. Um aspecto interessante a ser observado na Figura 4 é que a distribuição de focos de queimada coincide com a região brasileira que recebe a maior irradiação solar (Martins, 2001).



**Figura 4.** Os círculos numerados mostram a localização das estações utilizadas na avaliação da influência dos aerossóis emitidos em queimadas na irradiação solar na superfície e os níveis de cinza indicam os níveis de irradiação estimados pelo modelo BRASIL-SR, para a média anual.

A Figura 5(a) apresenta uma comparação dos valores dos MBE e RMSE de estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para estações solarimétricas com e sem ocorrência de queimadas nas proximidades. Verificou-se que os desvios aumentam quando existe a ocorrência de queimadas nas proximidades da estação em ambas as condições - céu claro e céu nublado. Observou-se, que em condição de céu claro, o MBE de estimativas de irradiação global na superfície cresce cerca de 3 vezes e o valor de RMSE duplica para as “estações próximas a focos de queimadas”. Deve-se destacar que a proximidade de focos de queima produz um incremento do MBE da mesma ordem daquele produzido pela presença de nuvens, o que permite avaliar a importância das queimadas na transferência radiativa da atmosfera. No entanto, a existência de queima de biomassa produz uma variação do RMSE (de 4% para 8%) menor do que aquela causada pela presença de nuvens (de 4% para 20%). Além disso, a proximidade de focos de queima de biomassa não reduz a correlação entre valores estimados e valores medidos verificada para as “estações distantes de focos de queima” em condição de céu claro. Destas observações conclui-se que a proximidade de focos de queimadas produz um erro sistemático nas estimativas do modelo BRASIL-SR devido a superestimação da irradiação solar por não considerar a atenuação devida aos aerossóis emitidos durante a queima. Já a ocorrência de nebulosidade induz erros não sistemáticos devido a imprecisões na modelagem de nuvens. A Figura 5(b) mostra a evolução dos desvios MBE e RMSE durante o ano, e comparando com os gráficos de evolução do número de focos de queimada determinados por satélite, pode-se notar que os desvios atingem seu valor máximo no período de pico da ocorrência de queimadas.

A avaliação da parametrização dos processos radiativos com aerossóis de queimadas foi realizada utilizando-se valores de radiação solar incidente medidos nas estações 2 a 7 pertencentes ao Projeto ABRACOS durante o

período de 20 a 30 de agosto de 1995. O curto período foi utilizado em virtude do elevado tempo computacional envolvido no modelo de transporte atmosférico devido a manipulação de grande quantidade de dados de entrada – focos de queimada, direção dos ventos e outras variáveis meteorológicas. A Figura 6 indica que a parametrização dos aerossóis de queimadas mostrou-se eficiente nas estações Boa Sorte, Dimona e Ducke, que apresentaram maior número de dias de céu claro para análise. É difícil a avaliação do comportamento da parametrização nas estações Aparecida e Rio Doce onde apenas um dia de céu claro foi determinado e, além disso, foi o primeiro dia do período em estudo (20/08) quando maiores desvios na concentração de aerossóis são observados uma vez que nenhuma informação sobre os dias anteriores é utilizada no modelo de transporte atmosférico.

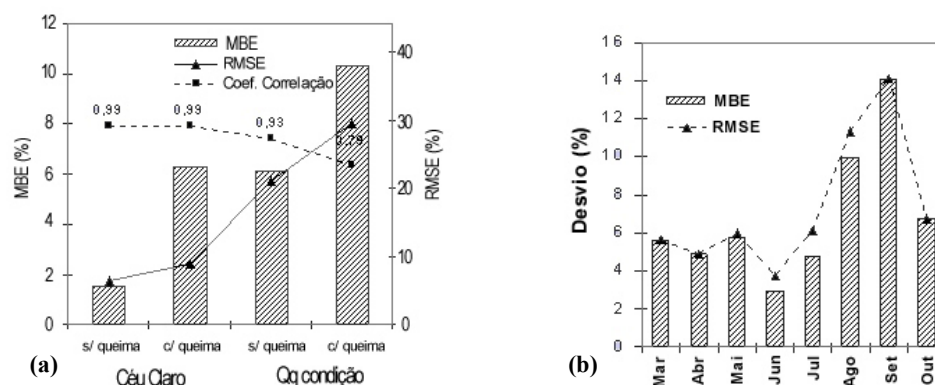
**Tabela 2. Estações solarimétricas utilizadas na avaliação da influência dos aerossóis de queimada nos desvios das estimativas de irradiação solar na superfície. Os valores dos desvios RMSE e MBE são maiores para as estações 1 a 8, localizadas na região sujeita a ocorrência de queimadas.**

Id	Estação Solarimétrica	Operador	Lat.	Long.	Altitude (m)	RMSE (%)	MBE (%)	Dias de céu claro
1	Mina Potosi (RO)	Tom Eck	9,78°S	62,87°W	80	nc	43,6	1
2	Jarú (RO)	ABRACOS	10,08°S	61,92°W	120	8,5	5,8	53
3	N. Sra Aparecida (RO)	ABRACOS	10,75°S	62,87°W	220	8,4	7,4	28
4	Dimona (AM)	ABRACOS	2,32°S	60,32°W	120	nc	nc	0
5	Ducke (AM)	ABRACOS	2,57°S	59,95°W	80	nc	9,3	1
6	Boa Sorte (PA)	ABRACOS	5,17°S	48,75°W	170	6,6	6,4	8
7	Vale do Rio Doce (PA)	ABRACOS	5,75°S	49,17°W	150	7,2	6,4	14
8	Cuiabá (MT)	Tom Eck	15,33°S	56,07°W	152	nc	17,1	1
9	Florianópolis (SC)	LABSOLAR	27,60°S	48,57°W	15	4,9	1,2	121
10	Lebon Régis (SC)	LABSOLAR	26,98°S	50,71°W	1036	2,8	-0,4	8

nc – quantidades de dados insuficientes para determinação.

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina.

ABRACOS – Projeto Anglo Brasileiro CPTEC-INPE

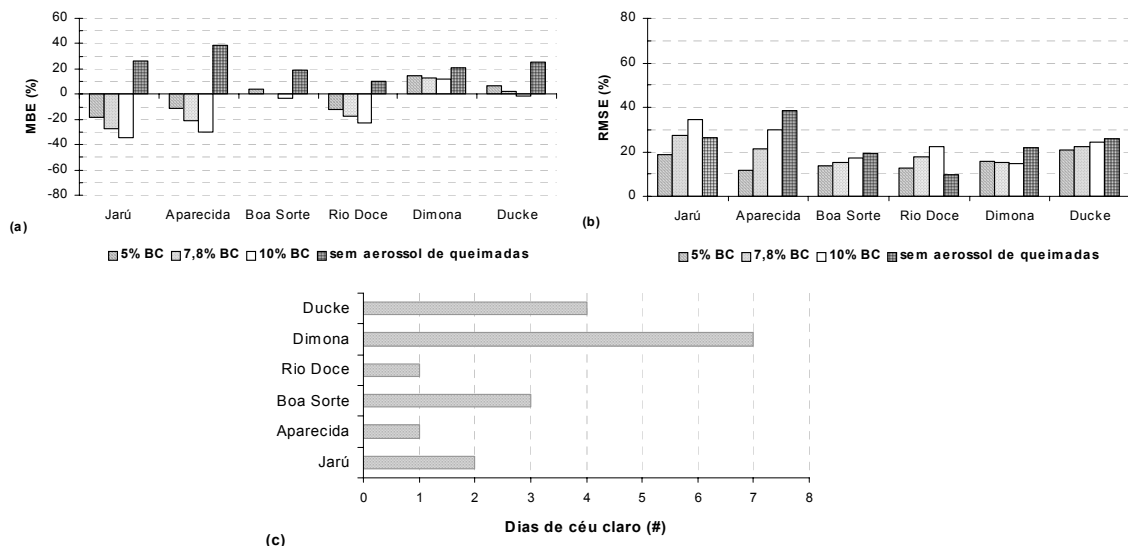


**Figura 5. (a)** Comparação dos desvios entre valores estimados e medidos do total diário de irradiação solar global, em condições de céu claro e em quaisquer condições de nebulosidade, determinados para estações descritas na Tabela 2. **(b)** Evolução dos desvios apresentados pelas estimativas do modelo BRASIL-SR ao longo do ano.

A Figura 7 apresenta a correlação entre valores medidos e valores estimados de radiação global incidente na superfície em quatro situações utilizando apenas os dias que apresentaram a média do coeficiente de cobertura de nuvens inferior a 0,2. As quatro situações são: estimativas obtidas com a parametrização dos aerossóis de queimada com concentrações de carbono elementar em 5%, 7,8% e 10% e estimativas obtidas sem a aplicação da parametrização dos aerossóis de queimadas.

Verifica-se que o algoritmo que parametriza os aerossóis de queimada com participação de 5% de carbono elementar (Queimada 1) apresenta maior correlação com os valores medidos de radiação solar incidente. Deve-se ressaltar que apesar de o valor 0,61 não indicar uma correlação elevada entre as duas grandezas, mostra que a

parametrização dos aerossóis está sendo executada de forma adequada. A dispersão elevada pode ser resultado dos diversos fatores que influenciam a emissão de aerossóis na queima de biomassa que não foram considerados na determinação da concentração dos aerossóis na coluna atmosférica. Além disso, a concentração de carbono elementar nos aerossóis atmosféricos não é fixa para todos os eventos de queimada e pode variar, inclusive, durante um determinado evento de queimada (Ferek *et al.*, 1998). Outro fator que certamente influencia na redução coeficiente de correlação é a pequena quantidade de dados disponíveis. Para análise estatística mais adequada é necessário determinar a concentração dos aerossóis em toda a estação seca de um ano. A dispersão pode ser reduzida com o uso de valores médios mensais uma vez que a influência de fatores climatológicos, como temperatura e umidade relativa será menor do que em valores de totais diários.



**Figura 6.** Comparação do MBE (a) e RMSE (b) das estimativas de radiação global incidente na superfície em dias de céu claro obtidas com o uso da parametrização dos processos radiativos envolvendo aerossóis de queimada; (c) o número de dias de céu claro em cada estação utilizada no estudo.

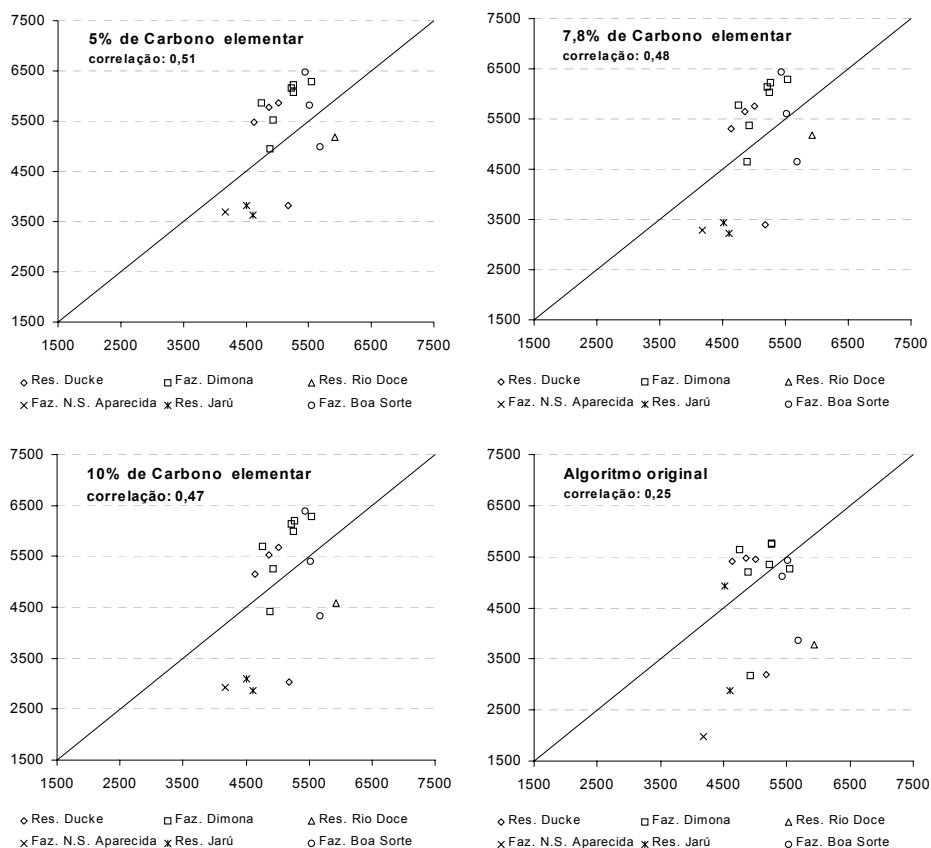
Um aspecto que deve ser discutido e desenvolvido é identificar uma forma de diferenciar entre a presença de fumaça ou de nuvens na determinação do coeficiente de cobertura de nuvens utilizando as imagens de satélite. No caso da presença de fumaça, o coeficiente de cobertura de nuvens obtido a partir de imagens de satélite será maior que o real e, dessa forma, o modelo BRASIL-SR parametrizará a influência dos aerossóis com as propriedades óticas das nuvens. Se a parametrização dos aerossóis de queimada estiver implementada, a atenuação de nuvens não deve ser utilizada a menos que realmente exista a presença de nuvens. Em função dessa observação, no estudo descrito acima, avaliou-se apenas os dias que apresentaram valores de coeficiente de cobertura de nuvens próximos ao valor zero (céu claro) de modo a reduzir a possibilidade da presença de nuvens no céu.

## CONCLUSÕES

Para avaliação da influência dos aerossóis de queimada na precisão das estimativas de irradiação solar do modelo BRASIL-SR foi realizado um estudo utilizando medidas de superfície de 10 estações solarimétricas sendo 8 na região sujeita à ocorrência de queimadas e 2 na região sul do Brasil. Observou-se que os desvios MBE e RMSE das estimativas do modelo aumentam quando existe a ocorrência de queimadas nas proximidades da estação solarimétrica em ambas as condições - céu claro e céu nublado. Em condições de céu claro, o MBE de estimativas de irradiação global na superfície cresce cerca de 3 vezes e o valor de RMSE duplica para as “estações próximas a focos de queimadas”. A fim de minimizar estes desvios, foi implementada no modelo uma parametrização que utiliza as propriedades óticas dos aerossóis de queimada obtidas a partir do Global Aerosol Data Set (GADS) para a determinação da transmitância atmosférica pelo método de dois fluxos na resolução da equação de transferência radiativa. Três modelos de aerossóis que diferiam na razão de mistura de carbono elementar presente foram estudados. A variável de entrada para a parametrização proposta é o perfil atmosférico de aerossóis de queimada. Neste estudo, essa informação foi obtida com um modelo de transporte atmosférico que determina a concentração



na coluna atmosférica e o perfil dos aerossóis emitidos em eventos de queimadas. Os dados necessários para estimar as trajetórias e a dispersão dos aerossóis atmosféricos foram obtidos na base de dados do CPTEC.



**Figura 7.** Correlação entre valores de irradiação global na superfície (em  $\text{Wh/m}^2$ ) estimados e os valores medidos. Os valores medidos estão representados no eixo das abcissas e os valores estimados estão no eixo das coordenadas. (a) estimativas obtidas com aerossóis Queimada 1; (b) com Queimada 2; (c) com Queimada 3 e (d) estimativas sem a parametrização de aerossóis de queimada.

Com a adoção da parametrização de aerossóis de queimada, verificou-se que a razão de mistura com 5% de carbono elementar nos aerossóis de queimada produziu estimativas com desvios MBE menores e que apresentaram uma correlação 2,5 vezes maior com medidas de superfície do que a parametrização original do modelo. A dispersão observada é resultado da variabilidade da composição dos aerossóis nos eventos de queimada e de diversos fatores que influenciam a emissão de aerossóis na queima que não foram considerados pelo modelo de transporte atmosférico e. É necessário a realização do estudo em toda a estação seca de um ano para uma avaliação mais detalhada das situações em que a parametrização apresenta os piores resultados.

#### AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento de uma bolsa de doutoramento e infraestrutura computacional, através do processo 96/01243-7 (Fernando R. Martins). Ao LABSOLAR/UFSC pela cessão dos dados solarimétricos de Florianópolis e Lebon Régis. Ao CPTEC/INPE pelo apoio no desenvolvimento do trabalho por meio da cessão de dados solarimétricos do Projeto ABRACOS, imagens de satélite GOES-8 e infraestrutura computacional. À Tom Eck pela cessão dos dados referentes às estações localizadas em Mina Potosi e Cuiabá.

**REFERÊNCIAS**

- Anderson, B.E. et al. **Aerosols from burning over the tropical South Atlantic region: Distributions and impacts.** Jour. Geophys. Res., 101(D19), 24,117-137, 1996.
- Angström, A. **The parameters of atmospheric turbidity.** Tellus, 16, 64-75, 1964
- Artaxo, P. et al. **Large scale aerosol source apportionment in Amazonia.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 31837-31847, 1998.
- Box, M. A., Beck, S., Trautmann, T. **Computational techniques to incorporate aerosol variability in climate models.** Jour. Geophys. Res., 101(D14), 19293-19297, 1996.
- Colle, S., Pereira, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil (primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície).** Brasília: INMET, 1998.
- Echalar, F., et al. **Long term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon Basin: source identification and apportionment.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 31849-31864, 1998.
- Eck, T. F., et al. **Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia.** Jour. Geophys. Res., 103(D-24), 31865-31878, 1998.
- Ferek, R. J. et al. **Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 32107-32118, 1998.
- Gambi, W.; et al. **Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar do modelo "IGMK" no Brasil.** Revista Brasileira de Geofísica, 16(1):15-25, 1998.
- Goldemberg, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP, 1998.
- Hess, M., Koepcke, P., Schult, I. **Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC.** Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 5, 831-844, 1998.
- Köepke, P., Hess, M., Schult, I., Shettle, E. P. **Global aerosol data set.** Report number 243. Hamburg: Max Planck Institut für Meteorologie, 1997.
- Kotchenruther, R. A., Hobbs, P. V. **Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 32081-32089, 1998.
- Leckner, B. **The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface – elements of a model.** Solar Energy, 20, 2, 143-150, 1978.
- Martins, F. R. **Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR.** Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2001.
- McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. E. A., Volz, F. E., Garin, J. S. **Optical properties of atmosphere.** Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, (AFCRL-72-0497), 108p, 1972.
- Pereira, E.B., et al., **Airborne measurements of burning of biomass aerosols in Brazil related to "TRACE-A" experiment,** Jour. Geophys. Res. 101(D19):23983-2399, 1996
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S. **Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil.** Solar Energy, 68, 1, 91-107. January, 2000.
- Pereira, E. B., Colle, S. **A energia que vem do Sol.** Revista Ciência Hoje, 22, 130, 25-35, 1997.
- Pinker, R. T., Laszlo I. **Derivation of Surface Solar Radiation on a Continental Scale with the ISCCP B3 Data.** IRS'88 Current Problems, 272-274, 1989.
- Reid, J. S. et al. **Physical, chemical and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 32059-32080, 1998.
- Ross, J. L., et al. **Radiative characteristics of regional hazes dominated by smoke from biomass burning in Brazil: Closure tests and direct radiative forcing.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 31925-31941, 1998.
- Stephens, G. L. **Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes.** Journal of Atmospheric Science, 35,2123-2132, 1978.
- Stuhlmann, R., Rieland, M., Raschke, E. **An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data.** Journal of Applied Meteorology, 29, 7, 586-603, July, 1990.
- Trosnikov, I. V., Nobre, C. A. **Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during SCAR-B experiment.** Jour. Geophys. Res., 103(D24), 32129-32137, 1998.
- Whitlock, C. H., D. Tarpley. **Satellite-Based solar radiation data archives and new data.** Proceedings of the workshop: *Satellites for Solar Energy Resource Information*, Washington, DC, April 10-11,1996.