

EFEITOS LOCAIS E REMOTOS DA POLUIÇÃO ORIGINADA EM REGIÕES DE QUEIMADA E ÁREAS URBANAS

*Éder Paulo Vendrasco¹, Pedro Leite da Silva Dias², Edmilson Dias de Freitas³,
Saulo Ribeiro de Freitas⁴ e Karla Maria Longo⁵*

RESUMO - Este trabalho tem como objetivo principal verificar o impacto causado por três diferentes fontes de emissão de material particulado (queimada no Brasil Central, queimada de cana-de-açúcar no interior do estado de São Paulo e emissões urbanas na Grande São Paulo) em regiões remotas. Um módulo de emissões foi acoplado ao BRAMS que, entre outros processos, é capaz de realizar o transporte de traçadores. Também foi analisado o impacto causado sobre a radiação solar que atinge a superfície através do modelo CARMA de transferência radiativa. O método de separação de fatores foi usado para a identificação da importância relativa de cada fonte de emissão. Os resultados mostram que existem regiões distantes das fontes que são significativamente influenciadas pelo transporte de material particulado. Também foi observado que existem situações em que a influência de fontes remotas é maior que a das fontes locais. Verificou-se que a emissão de material particulado no Brasil Central pode causar redução na radiação solar incidente na superfície em até 50 W m^{-2} na região Sul do Brasil ou até maior, conforme a proximidade da fonte. Além destes aspectos, verifica-se que existe um efeito não linear de interação entre as emissões, provocando diferentes resultados no valor da redução da radiação solar.

ABSTRACT - The goal of this work was to verify the impact caused by three different sources of particulate matter (biomass burning in Central Brazil, sugar cane burning in the State of Sao Paulo and urban emissions in the Metropolitan Area of Sao Paulo) over remote regions. The impact of these emissions over the solar radiation was also explored. An emission module was added to the BRAMS model, which contains a transport module for tracers. The effect of aerosols in the radiative processes was solved using CARMA. The factor separation method was applied to allow the identification of the relative importance of each type of emission source and their interactions. The results show that some regions where there are no particulate matter sources are significantly influenced by the transport from remote areas. The factor analysis also shows situations with larger impact by the remote sources than the local ones. It was observed that the emission in Central Brazil can reduce the downward solar radiation by up to 50 W m^{-2} in the Southern Brazil or even larger decrease near emission sources. It was also shown that a nonlinear effect can be caused by the interaction among sources, causing different values in the solar radiation reduction.

Palavras-chave – Modelagem Numérica, Material Particulado, Separação de Fatores, Transporte.

Introdução - O uso de queimadas como um recurso agropecuário é frequentemente encontrado na Amazônia e no Centro-Oeste brasileiro. No estado de São Paulo a queima antes da colheita da cana-de-açúcar é comum. O uso de métodos onde não há queima é crescente, porém ainda constituem uma pequena minoria quando comparados aos métodos tradicionais. É conhecido na literatura que a queima de biomassa emite para a atmosfera grande quantidade de material particulado, além de alguns gases como CO_2 , CO , NO_x e compostos orgânicos voláteis (COV). Muitas vezes estes poluentes são

¹ Departamento de Ciências Atmosféricas – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP
Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária – São Paulo – SP, CEP 05508-090. Email: eder@master.iag.usp.br.

²Email: pldsdias@master.iag.usp.br - ³Email: efreitas@model.iag.usp.br - ⁴Email: sfreitas@cptec.inpe.br - ⁵Email: klongo@cptec.inpe.br

transportados para regiões distantes da fonte, provocando impacto no balanço radiativo e na concentração destes gases/partículas em regiões remotas (Aires e Kirchhoff, 2001).

A intensa emissão de poluentes associada às fontes veiculares e industriais é responsável por inúmeros episódios de baixa qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Contudo, alguns trabalhos sobre o transporte de gases e material particulado emitidos pela queima de biomassa na Amazônia e Brasil Central (Freitas et al. 2005), assim como pela queima de cana-de-açúcar no interior do estado de São Paulo, indicam contribuição destas fontes nos níveis de poluição na RMSP (Vendrasco et al. 2005a,b – Sánchez-Ccoyllo et al. 2006). Este trabalho tem como objetivo principal explorar, através de modelagem numérica, o impacto remoto, principalmente na RMSP, da emissão por queimadas na Região Amazônica, Brasil Central e interior do estado de São Paulo.

Metodologia - As simulações numéricas foram realizadas com a versão 2.0 do BRAMS (www.cptec.inpe.br/brams) a qual tem acoplada em seu código um módulo de emissão e transporte de material particulado e gases (Freitas, 1999; Vendrasco, 2005) e um modelo de transferência radiativa para uma atmosfera com aerossóis, CARMA (Toon et al. 1988). O modelo foi configurado com três grades aninhadas com 32, 16 e 4 km de resolução, respectivamente. A integração foi iniciada às 00 GMT de 22/08/2005 e, como condição inicial e de fronteira, usou-se as re-análises do NCEP (Kalnay et al. 1996) com 2,5° de resolução espacial e 6 h de resolução temporal. Foram realizadas oito simulações descritas na tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos tipos de emissão realizadas em cada simulação.

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8
Local de emissão	Sem emissão	CA	BC	CA BC	UR	CA UR	BC UR	Todos

CA – Cana-de-açúcar (estado de São Paulo); BC – Pastagem/Floresta/Cerrado (Brasil Central); UR – Emissão urbana (RMSP)

O modelo de emissão é ilustrado na figura 1. Um arquivo diário de focos de queimada (www.cptec.inpe.br/queimadas) é lido pelo módulo de emissão no início da simulação; verifica-se se existe algum foco neste instante e, em caso positivo, o modelo localiza este foco e avalia a cobertura de vegetação do local, diferenciando pastagem, cerrado, floresta e cana-de-açúcar, aplicando taxas de emissões distintas para cada tipo de vegetação. O modelo faz a emissão de CO, NO, NO₂, COV e PM_{2,5} (material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm).

O método de separação de fatores (Stein e Alpert 1993) é utilizado para analisar a influência da emissão no: 1) Brasil Central; 2) estado de São Paulo pela queima da cana; 3) emissão urbana na RMSP, na concentração de material particulado na RMSP e vizinhanças. O método exige 2^k simulações, sendo k o número de fatores. Neste trabalho serão analisados 3 fatores (8 simulações), considerando a concentração de PM_{2,5} como a variável de interesse. Definindo $F_0, F_1, F_2, F_3, F_{12}, F_{13}$,

F_{23} e F_{123} como as respostas para cada simulação, em que: F_0 é a simulação com nenhum fator atuando (i.e., sem emissão), F_a é a simulação com apenas o fator a atuando ($a=1,2,3$), F_{ab} com apenas os fatores ab atuando simultaneamente ($ab=1-2,1-3,2-3$) e F_{123} com todos os fatores atuando simultaneamente.

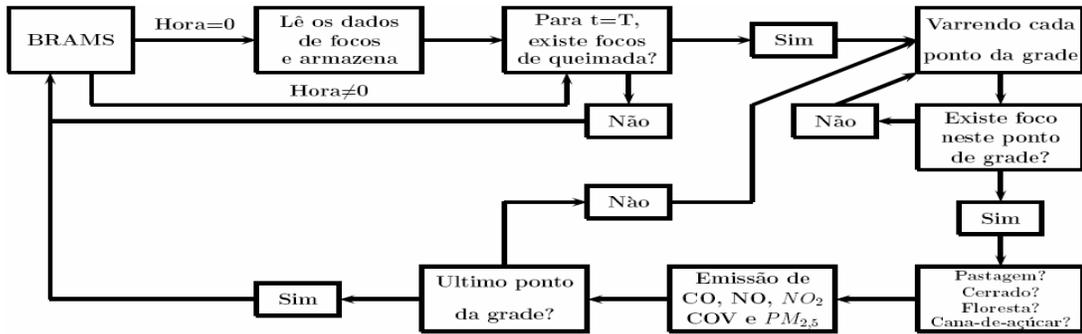


Figura 1: Fluxograma esquemático dos procedimentos realizados no módulo de emissão da fonte de queimada.

Pode-se escrever a contribuição de cada fator na resposta final como:

$\hat{F}_1 = F_1 - F_0$	$\hat{F}_2 = F_2 - F_0$	$\hat{F}_3 = F_3 - F_0$
$\hat{F}_{12} = F_{12} - (F_1 + F_2) + F_0$	$\hat{F}_{13} = F_{13} - (F_1 + F_3) + F_0$	$\hat{F}_{23} = F_{23} - (F_2 + F_3) + F_0$
$\hat{F}_{123} = F_{123} - (F_{12} + F_{13} + F_{23}) + (F_1 + F_2 + F_3) - F_0$		

Note-se que \hat{F}_{12} , \hat{F}_{13} , \hat{F}_{23} e \hat{F}_{123} representam as contribuições provocadas puramente pelas interações entres os fatores correspondentes.

Resultados - A modelagem da emissão de material particulado em queimadas é uma grande fonte de incerteza. Foram utilizados os dados de profundidade óptica do aerossol (AOT), obtidos via satélite (sensor MODIS - Kaufman et al. 1997) para aferir o módulo de emissões.

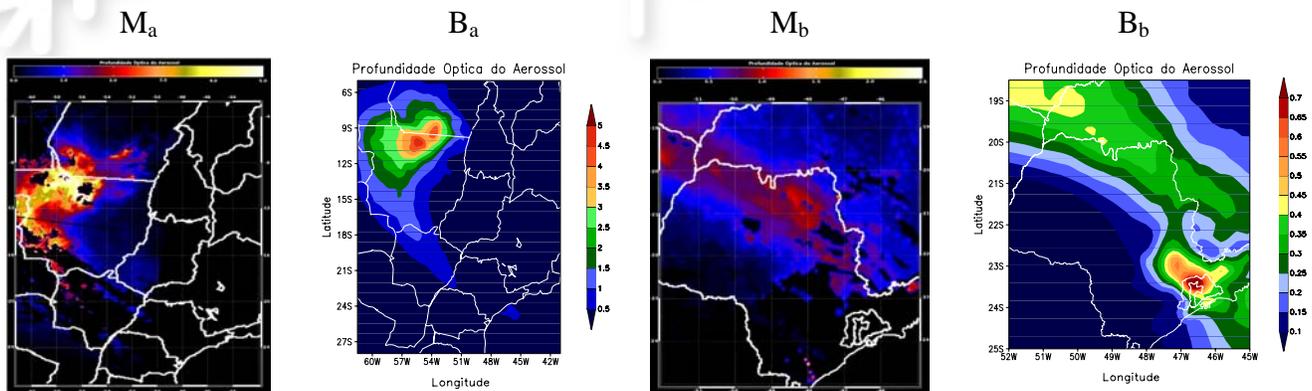


Figura 2: Profundidade óptica do aerossol obtida via satélite com o sensor MODIS no comprimento de onda $0.55 \mu\text{m}$ para o dia 24 às 14 GMT (M_a) e para o dia 25 às 13 GMT (M_b). (B_a) e (B_b) referem-se à profundidade óptica no comprimento de onda $0.55 \mu\text{m}$ simulada com o BRAMS.

A figura 2 mostra que o modelo reproduz bem a AOT observada. Contudo, existe um pequeno deslocamento dos núcleos de máximo (figuras 2- B_a e 2- B_b) e a magnitude é subestimada pelo modelo na pluma. No núcleo mais intenso da pluma (figura 2- M_b) a AOT é aproximadamente três vezes a

estimada pelo modelo, sugerindo que o módulo de transporte não se mostrou eficaz no transporte para regiões muito distantes. O núcleo de AOT sobre a RMSP (figura 2-B_b) estimado pelo modelo não é observado na figura 2-M_b, pois havia uma camada de nuvens impedindo o cálculo da AOT pelo algoritmo do MODIS.

Através do método de separação de fatores, pode-se observar na figura 3 que a emissão no Brasil Central tem grande abrangência, afetando até a região Sul. A pluma sobre o Paraná às 13 GMT do dia 23 tem maior influência das queimadas de cana, diferentemente do que se imagina quando são observados apenas os dados de profundidade óptica da simulação com todas as emissões. O fator 1 indica que a queima da cana provoca grande impacto na concentração de material particulado sobre Paraná. Contudo, em situações com escoamento de oeste, os produtos das queimadas podem atingir o litoral de São Paulo e interagir com a emissão urbana na RMSP (fator 3). Analisando o fator 2 conclui-se que a região Central é uma grande fonte de material particulado, além de mostrar que parte da concentração de PM_{2,5} encontrada sobre a RMSP e litoral paulista é proveniente de emissão remota. Com o fator 3 é possível observar que somente as emissões urbanas (principalmente na RMSP) são responsáveis por grande quantidade de PM_{2,5} no litoral do Paraná e paulista. Desta forma, conclui-se que regiões potencialmente emissoras, como a RMSP (emissão urbana), Brasil Central e interior de São Paulo (queimadas), além de causar impacto remoto, também sofrem este mesmo impacto, apenas com diferentes intensidades. Vendrasco (2005) mostra que o transporte de produtos de queimadas que ocorrem no Brasil Central e no interior de São Paulo afeta significativamente o balanço radiativo sobre regiões remotas, em especial a RMSP, causando alterações nas concentrações de ozônio e outros gases sobre estas regiões.

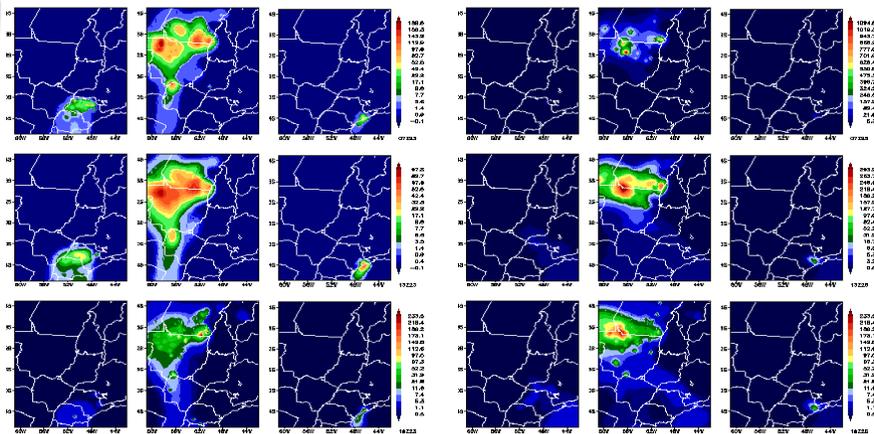


Figura 3: Concentração de PM_{2,5} [$\mu\text{g m}^{-3}$] devido a três fatores distintos. A coluna esquerda refere-se ao fator \hat{F}_1 (emissão pela queima de cana-de-açúcar), a coluna central refere-se ao fator \hat{F}_2 (emissão pela queima na Amazônia/Brasil Central) e a coluna direita refere-se ao fator \hat{F}_3 (emissão urbana)

Na figura 4 são mostrados os três fatores para a radiação solar incidente na superfície. Pode-se observar que a emissão de material particulado causa redução significativa na radiação solar na superfície. A emissão pela queima da cana-de-açúcar, além de reduzir a radiação solar em até 45 W m^{-2} próximo da fonte, também provoca grande redução no litoral do Paraná e Santa Catarina (figura 4a).

Contudo, com o favorecimento da circulação de oeste, os estados Rio de Janeiro e Espírito Santo também são atingidos (figura 4b). As queimadas no Brasil Central ocorrem em maior quantidade, provocando redução de até 450 W m^{-2} sobre a fonte (figura 4b), além de perturbar o balanço radiativo em regiões remotas. Apesar dos valores apresentados na figura 3, ao longo da simulação ocorrem períodos com redução de até 700 W m^{-2} (sobre a fonte) causada pelo fator 2, principalmente entre 16 e 19 GMT, quando a ocorrência de queimadas é mais intensa. O fator 3 indica que a emissão urbana/industrial também é responsável pela redução de até 100 W m^{-2} sobre a RMSPP. Portanto, pode-se notar que existem regiões onde ocorre contribuição conjunta de diferentes fontes, ou até mesmo situações onde existe contribuição maior de fontes mais distantes que a contribuição das fontes locais, como pode ser visto no litoral paulista (figura 4b).

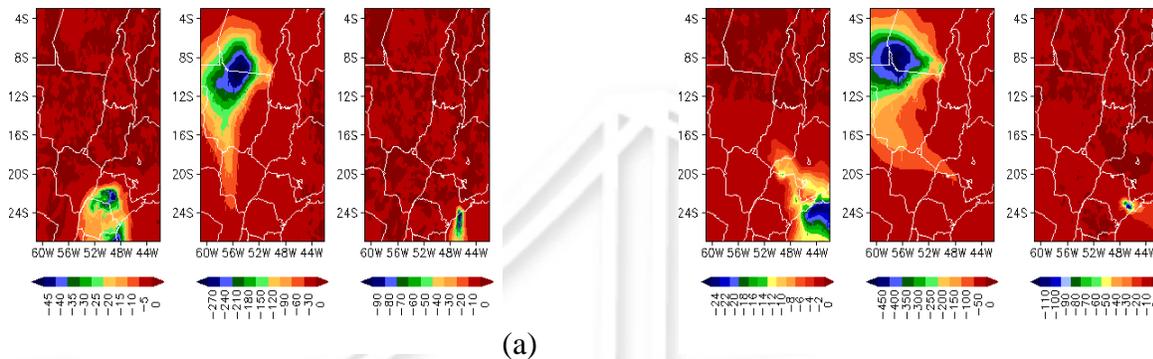


Figura 4: Radiação solar incidente na superfície [W m^{-2}] às 13GMT do dia 23 (a) e dia 25 (b) devido a três fatores distintos. A coluna esquerda refere-se ao fator \hat{F}_1 (emissão pela queima de cana-de-açúcar), a coluna central refere-se ao fator \hat{F}_2 (emissão pela queima na Amazônia/Brasil Central) e a coluna direita refere-se ao fator \hat{F}_3 (emissão urbana).

A contribuição atribuída puramente à interação entre os fatores é mostrada na figura 5. Pode-se observar que apesar dos baixos valores, existem valores positivos. Isto indica que a interação dos fatores implica em menor redução na radiação solar incidente na superfície quando comparada com a redução causada por cada fator individualmente. Tomando, como exemplo, a interação entre os fatores 1 e 2 (\hat{F}_{12}), a redução causada na radiação solar incidente no norte de São Paulo e sul de Minas Gerais devido a emissão pela queima de cana-de-açúcar (simulação 2) somada à redução causada pela emissão no Brasil Central (simulação 3) é maior que a redução causada quando ocorrem as duas emissões simultaneamente (simulação 4). No caso de valores negativos, como se pode observar próximo a RMSPP, ocorre o inverso. Os fatores de interação a princípio revelam algo surpreendente. A análise revela que estes valores positivos na interação são oriundos do fato de que o aumento de material particulado diminui a radiação solar direta, mas aumenta a radiação difusa. Quando a emissão é realizada simultaneamente, o acréscimo da radiação difusa é superior à soma do acréscimo da

radiação difusa em cada simulação com cada fator. Desta forma, o componente não linear da interação atua no sentido de diminuir a redução causada pela emissão de $MP_{2,5}$.

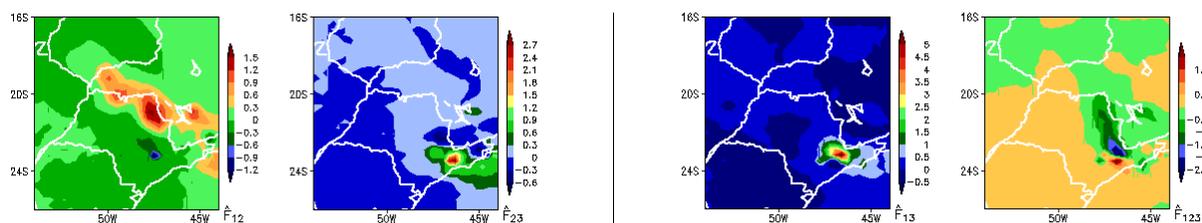


Figura 5: Radiação solar incidente na superfície [$W m^{-2}$] às 13GMT do dia 25 devido, puramente, as interações entre os fatores 1, 2 e 3 (\hat{F}_{12} , \hat{F}_{13} , \hat{F}_{23} e \hat{F}_{123}).

Conclusões – Este trabalho identifica o efeito individual da emissão de material particulado por 3 diferentes fontes (queimada no interior do Brasil, na cana em São Paulo e as emissões urbanas na Grande São Paulo), além de analisar o impacto que estas emissões causam na radiação solar incidente na superfície. O método de separação de fatores mostrou-se útil para identificar a contribuição de cada emissão na concentração total de $PM_{2,5}$ e expor os efeitos não lineares da interação das três fontes estudadas. Mostrou-se que o $PM_{2,5}$ emitido em uma determinada região pode atingir locais remotos e alterar a quantidade de radiação que atinge a superfície, implicando em diversos mecanismos que são diretamente relacionados com a quantidade de radiação líquida disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, C. B. e V. W. J. H. Kirchhoff, 2001: Transporte de monóxido de carbono gerado em queimadas para regiões onde não se queima. *Rev. Bras. Geof.*, 19(1), 61-74.
- Freitas, S. R., 1999: Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases e aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical na América do Sul. Tese de doutorado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Freitas, S. R. et al., 2005: Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, 5 (1-2), p. 135 - 167.
- Kalnay, E. et al., 1996: The NCEP-NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 77 (3) 437-471.
- Kaufman, Y. J. et al., 1997: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS. *J. Geophys. Res.*, 102 D(14), 17051-17068.
- Sánchez-Ccoyllo et al., 2006: Determination of O_3 -, CO - and PM_{10} -transport in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 92, 83-93.
- Stein, U. e P. Alpert, 1993: Factor separation in numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2107-2115.
- Toon, O. B. et al., 1988: A multidimensional model for aerosols: Descriptions of computational analogs. *J. Atmos. Sci.*, 45, 2123-2143.
- Vendrasco, E. P., 2005: Efeito dos aerossóis de queimadas nas concentrações de oxidantes fotoquímicos. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísicas e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Vendrasco, E. P. et al., 2005a: Efeito da poluição por queimada de cana-de-açúcar na radiação solar e nos fluxos turbulentos na superfície. *Ciência e Natura*, edição especial – Dezembro, 143-146.
- Vendrasco, E. P. et al., 2005b: Queimadas da cana-de-açúcar e potencial efeito na poluição fotoquímica por ozônio. *Ciência e Natura*, edição especial – Dezembro, 163-166.