

O USO DA ENERGIA RADIATIVA DO FOGO PARA ESTIMAR AS EMISSÕES DE QUEIMADAS PARA A AMÉRICA DO SUL

Gabriel Pereira¹, Francielle da Silva Cardozo¹, Fabrício Brito Silva¹, Yosio Edemir Shimabukuro¹,
Elisabete Caria Moraes¹, Saulo Ribeiro de Freitas² e Nelson Jesus Ferreira²

Recebido em 20 junho, 2008 / Aceito em 11 março, 2010
Received on June 20, 2008 / Accepted on March 11, 2010

ABSTRACT. Every year large areas of the globe are submitted to the action of anthropogenic and natural fires. It is estimated that more than 100 million tons of aerosols from smoke are emitted into the atmosphere, which 80% occur in tropical regions of the globe. The process of biomass burning releases into the atmosphere trace gases and aerosol particles that affect significantly the air quality, the tropospheric and stratospheric chemistry, the radiation balance and the dynamics and microphysics of clouds. This study aims to use the fire radiative energy (FRE) derived from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) to estimate emissions of carbon monoxide (CO) and particulate matter with diameter less than 2.5 micrometer ($PM_{2.5\mu m}$) for 2002 South America fires, and to model these emissions in CCATT-BRAMS (Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System). With a correlation greater than 86% between the aerosol emission data (in $kg.s^{-1}$) and the FRE ($MJ.s^{-1}$), three coefficients for GOES satellite data were originated. The use of FRE and emission coefficients to estimate the $PM_{2.5\mu m}$ and CO emitted in biomass burning showed a correlation of approximately 91% between modeled data and the data used as ground truth obtained from LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia) SMOCC (Smoke, Aerosols, Clouds, rainfall, and Climate) and RaCCI (Radiation, Cloud, and Climate Interactions).

Keywords: fire radiative energy, MODIS, GOES.

RESUMO. A cada ano grandes extensões terrestres sofrem com a ação antropogênica e natural das queimadas. Estima-se que mais de 100 milhões de toneladas de aerossóis provenientes da fumaça sejam lançados na atmosfera, dos quais 80% ocorrem em regiões tropicais do globo. O processo de combustão da biomassa libera para a atmosfera gases traços e partículas de aerossóis que afetam significativamente a qualidade do ar, a química troposférica e estratosférica, o balanço de radiação e a dinâmica e microfísica das nuvens. O presente trabalho tem como objetivo principal utilizar a energia radiativa do fogo (ERF) derivada do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e do GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) para estimar as emissões de monóxido de carbono (CO) e de material particulado com diâmetro menor que $2,5\mu m$ ($PM_{2,5\mu m}$) para o período de queimadas de 2002 na América do Sul, e modelar estas emissões no CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*). Com uma correlação superior a 86% entre os dados de emissão de aerossóis ($kg.s^{-1}$) e a ERF ($MJ.s^{-1}$), originaram-se três coeficientes para os dados provenientes do satélite GOES. O uso da ERF e dos coeficientes de emissão para estimar o $PM_{2,5\mu m}$ e CO emitido na queimada mostrou uma correlação de aproximadamente 91% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre obtidos a partir dos experimentos do LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia*) SMOCC (*Smoke, Aerosols, Clouds, rainfall, and Climate*) e RaCCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions*).

Palavras-chave: energia radiativa do fogo, MODIS, GOES.

¹Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Avenida dos Astronautas, 1758, Jd. Granja, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55(12) 3945-6668; Fax: +55(12) 3945-6488 – E-mails: gabriel@dsr.inpe.br; cardozo@dsr.inpe.br; fabricio@dsr.inpe.br; bete@dsr.inpe.br; yosio@dsr.inpe.br

²Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Avenida dos Astronautas, 1758, Jd. Granja, 12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: +55(12) 3945-6668; Fax: +55(12) 3945-6817 – E-mails: saulo.freitas@cptec.inpe.br; nelson.ferreira@cptec.inpe.br

INTRODUÇÃO

Anualmente as queimadas devastam imensas porções territoriais de florestas, campos e regiões agrícolas, consumindo uma grande proporção de biomassa e liberando enormes quantidades de gases do efeito estufa para a atmosfera (Kaufman et al., 1990). Estes fatores influenciam diretamente o clima e o meio ambiente, onde os principais fatores modificadores incluem os impactos da energia liberada pelo fogo, os gases traços emitidos para a atmosfera, alteração do albedo (Ichoku & Kaufman, 2005), assim como modificações no balanço radiativo da atmosfera e nos ciclos biogeoquímicos e hidrológicos (Andreae et al., 2004).

O impacto das queimadas nos ciclos biogeoquímicos e na biodiversidade constitui-se numa grande preocupação mundial, estudos indicam que a ocorrência de grandes queimadas irá aumentar significativamente nas próximas décadas (IPCC, 2001). Desta forma, esta problemática induz a busca de metodologias que visem estimar a quantidade de aerossóis e gases emitidos para a atmosfera, sem a necessidade de calcular a quantidade de biomassa queimada, assim como, a fração de biomassa acima do solo e a eficiência de queima (Kaufman et al., 1998). Segundo Freitas et al. (2005) o começo e manutenção das queimadas dependem principalmente do tipo de biomassa, da localização geográfica, da temperatura do ar, da precipitação, da umidade e dos ventos. Ainda, estes conjuntos de fatores permitem que as queimadas extrapolem a escala de atuação local e passem a afetar escalas regionais, interferindo no padrão de distribuição de energia dos trópicos para latitudes médias e altas.

Os métodos tradicionais de estimativas de emissão utilizam a localização geográfica do pixel com anomalia térmica e a partir desta informação, cruzam os focos com a densidade de biomassa e outras informações necessárias ao cálculo de emissão. Entretanto, a área queimada dentro do pixel detectado como foco de queimada pode variar em algumas ordens de grandeza para cada caso. Por exemplo, a área mínima detectada pelo VAS/GOES (*Visible Infrared Spin Scan / Geostationary Operational Environmental Satellite*) a uma temperatura de 450 K é 0,03 km², enquanto que para o sensor AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration*) essa área é de 0,00015 km² (Prins & Menzel, 1992). Desta forma, um pixel detectado pelo sensor MODIS pode variar a área queimada desde 50 m² (área mínima detectada) a 1 km² (tamanho máximo do pixel no NADIR).

O método tradicional de estimativa de emissão pode ser descrito na Eq. (1), na qual para um dado pixel detectado como queimada pelos produtos de sensoriamento remoto, a localização

geográfica é cruzada com dados de densidade de biomassa e com dados das características fisiológicas e ecológicas da vegetação (Belward, 1996; Olson et al., 2000; Houghton et al., 2001).

$$M^{[\epsilon]} = \alpha_{veg} \cdot \beta_{veg} \cdot EF_{veg}^{[\epsilon]} \cdot a_{fogo} \quad (1)$$

onde $M^{[\epsilon]}$ representa a emissão da espécie ϵ ; α_{veg} e β_{veg} caracterizam a fração de biomassa acima do solo e a eficiência de queima da vegetação; $EF_{veg}^{[\epsilon]}$ é o fator de emissão para cada espécie ϵ ; e a_{fogo} a área queimada.

Com a dificuldade de se obter todas as informações necessárias para estimar a emissão proveniente das queimadas, Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito de energia radiativa do fogo (ERF), que permite gerar dados capazes de serem relacionados diretamente com a intensidade do fogo e com o total de vegetação consumida por unidade de tempo. A ERF pode ser definida como a parte da energia química liberada na queima de biomassa emitida como radiação no processo de combustão (Wooster et al., 2003). Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal utilizar a energia radiativa do fogo derivados do sensor MODIS e do GOES para estimar as emissões de monóxido de carbono (CO) e de material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm (PM_{2,5 μm}) para o período de queimadas de 2002 na América do Sul, e modelar estas emissões no CCATT-BRAMS.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características da área de estudo

Existe uma ampla e importante biodiversidade na América do Sul distribuída em diferentes biomas. O Brasil é o maior país em extensão, no qual ocorrem dois grandes conjuntos vegetacionais: um florestal, que ocupa mais de 60% do território nacional, e outro campestre. As formações florestais são constituídas pelas florestas ombrófilas e estacionais, situadas tanto na região amazônica quanto nas áreas extra-amazônicas, mais precisamente na Mata Atlântica. Na Amazônia, predominam as florestas ombrófilas densas e abertas, com árvores de médio e grande porte, com ocorrência de cipós, bromélias e orquídeas. As florestas extra-amazônicas, também chamadas de domínio dos "mares de morros" florestados da fachada atlântica brasileira, coincidem com as formações florestais que compõem a Mata Atlântica, onde predominam as florestas estacionais semidecíduais (em que 20 a 50% das árvores perdem as folhas no período seco do ano), e as florestas ombrófilas densas e mistas, também classificada como domínio dos planaltos de Araucárias, do Brasil Meridional. Em ambos os conjuntos florestais ocorrem, em menor proporção, as florestas estacionais decíduais, em que mais de 50% das árvores

perdem as folhas no período seco. No sudeste e sul do país esse bioma se expande para oeste alcançando as fronteiras com o Paraguai e Argentina, avançando também sobre o Planalto meridional até o Rio Grande do Sul (Ab'Saber, 1977).

As formações campestres são constituídas pelas tipologias de vegetações abertas, mapeadas como savana, classificadas como domínio dos chapadões recobertos por cerrados e penetrados por florestas-galerias, correspondente ao Cerrado que predomina no Brasil central, ocorrendo também em pequenas áreas de outras regiões do país, inclusive na Amazônia, e também no Paraguai, Bolívia e Venezuela, possuindo o nome de chaco nesses países; a savana estépica, também classificada como domínio das depressões interplanálticas semi-áridas do Nordeste, que inclui a caatinga nordestina, os campos de Roraima, o Pantanal mato-grossense e uma pequena área no extremo oeste do Rio Grande do Sul; e a estepe, que corresponde aos campos do planalto e da campanha do extremo sul do Brasil, também classificada como domínio das pradarias mistas do sudeste do Rio Grande do Sul, terras uruguaias e argentinas (IBGE, 2004).

Metodologia

Produtos MODIS

O sensor MODIS das plataformas Terra/Aqua possui órbita polar, ângulo de imageamento de $\pm 55^\circ$, altitude de 700 km e faixa imageada de 2330 km. O horário de passagem varia sobre um dado ponto da superfície de acordo com a plataforma: enquanto a plataforma Terra, cujos produtos originados destas recebem a sigla MOD, cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30 min e 22h30 min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30 min e 01h30 min. Obtém-se, desta maneira, aproximadamente quatro passagens diárias sobre uma mesma área.

Os produtos de profundidade óptica do aerossol em 550nm (AOT_{550nm}) MOD04/MYD04-C005 com resolução de 10 km \times 10 km, separados em *granules* (áreas) de 5° (2330 km por 2030 km), gerados no formato HDF (*hierarchical data format*) e armazenados na forma de SDS (*scientific data set*), são obtidos a partir de dois algoritmos distintos. Um algoritmo é utilizado para se estimar os valores de AOT_{550nm} para a superfície terrestre e o outro para a superfície do oceano (Kaufman & Tanré, 1998). Neste trabalho utilizou-se 1825 granules, referentes ao período seco da região central da América do Sul (15/julho/2002 a 15/novembro/2002).

Os produtos de fogo nível 2 MOD14 e MYD14 (*MODIS Thermal Anomalies / Fire 5-MIN L2 SWATH 1KM*

V004) são disponibilizados pelo *EOS Data Gateway* (<<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>>). Estes incluem informações de fogos ativos e outras anomalias termais e cobrem uma área de aproximadamente 2330 por 2030 km no sentido *across* e *along-track*, respectivamente, com resolução espacial nominal de 1 km (Giglio, 2005). A Eq.(2) representa a ERF obtida através do sensor MODIS.

$$ERF = (4.34 \times 10^{-19}) \cdot (T_{f4\mu m}^8 - T_{b4\mu m}^8) \cdot A_{sample} \quad (2)$$

onde A_{sample} representa o tamanho da área do pixel (km^2), $T_{f4\mu m}$ a temperatura de brilho do pixel com anomalia térmica e $T_{b4\mu m}$ a temperatura do *background*.

Produtos WFABBA/GOES

O WFABBA (*Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm*) é um produto para detecção de anomalias termais/fogo baseado no satélite GOES, disponibilizado com uma alta frequência de observações, numa resolução espacial nominal de 4×4 km no NADIR. O algoritmo do WFABBA, assim como no MODIS, utiliza duas bandas para a detecção do pixel com anomalia térmica, uma banda localizada no canal em $3,9\mu m$ e outra localizada no canal em $10,7\mu m$ (Prins et al., 1998).

Os dados disponibilizados pela Universidade de Wisconsin – Madison contêm informações referentes à hora da passagem do satélite, longitude, latitude, tamanho e temperatura do subpixel com o foco, quantidade de CO, tipo de ecossistema, fração de chamas, temperatura no canal em $3,9\mu m$ e temperatura no canal em $10,7\mu m$. Os produtos de queimada WFABBA ainda não possuem um algoritmo para se estimar a ERF, estuda-se a possibilidade de adotar a Eq. (3) para o cálculo desta grandeza física.

$$ERF = A \cdot \sigma \cdot T_f^4 \quad (3)$$

onde A representa a fração de área de fogo no pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_f é a temperatura da fração do subpixel com fogo. Em ambos os casos, a área e a temperatura do fogo são derivadas pelo método de Dozier (1981).

Método para gerar o coeficiente de emissão para os dados WFABBA/GOES

A metodologia para derivar a taxa de emissão de fumaça proposta por Ichoku & Kaufman (2005), consiste em estimar a densidade de aerossol da coluna (M_d) é obtido a partir da densidade de massa da fumaça (τ_{a550nm}), onde, para cada pixel contendo áreas queimadas, o valor de AOT_{550nm} é extraído para o pixel central e para os 8 vizinhos mais próximos. Assim, o valor

mínimo de AOT_{550nm}^b é assumido como o valor de *background* e o valor máximo estimado é denominado como AOT_{550nm}^f proveniente da queimada. Esse procedimento é necessário para se eliminar casos onde uma queimada na borda de um pixel tenha sua emissão representada no pixel adjacente (Ichoku & Kaufman,

2005). Desta forma, as relações entre a densidade de massa da fumaça emitida na queima da biomassa e a eficiência mássica de extinção (β_e), composta pela soma dos coeficientes mássicos de absorção (β_a) e espalhamento (β_s), representa a M_d em m^2/gr (Eq. 4).

$$M_d = (AOT_{550nm}^f - AOT_{550nm}^b) / (\beta_a + \beta_s) \quad (4)$$

Segundo Kaufman et al. (1998) dependendo do tamanho da queimada e da sua intensidade, a emissão dos materiais pode alcançar altitudes que variam de metros a quilômetros. Dada à resolução espacial nominal do produto MOD11 (1×1 km), estima-se que a injeção de gases seja de no mínimo 500 metros. Para este estudo foi adotada a altura média global de 1500 metros. Assim, para o cálculo do tempo (T_p) necessário para limpar os gases emitidos do pixel (Eq. 5), utilizou-se as componentes meridionais (u) e zonais (v) do vento em 850 milibares (mb).

$$T_p = \left(\frac{\sqrt{\left(R_e \cdot S \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{((R_e/r)^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} - 1 \right) \right) \cdot \left(r \cdot S \cdot \left(\cos \theta - ((R_e/r)^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right) \right)}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right) \quad (5)$$

onde $\theta_i = -\frac{1}{2}N \cdot S + \frac{1}{2}S + (i - 1) \cdot S$, R_e é igual ao raio da Terra (6378.137 km); h a altitude do sensor (750 km), r é a soma de $R_e + h$; $S = p/h$, onde p representa a resolução espacial do pixel no NADIR em km; θ é o ângulo de varredura calculado para um dado pixel i e N é o número de pixels de cada linha na passagem do satélite.

Com essas informações pode-se, finalmente, obter a taxa de emissão de fumaça por unidade de tempo (R_{sa}) em quilogramas por segundo (kg/s). A R_{sa} é obtida através do somatório das variáveis calculadas anteriormente, onde N_{af} representa o total de pixels de aerossol que contém áreas que estão sendo queimadas e N_{aa} são os pixels que possuem informações sobre a camada de espessura óptica desta área, como descrito na Eq. 6.

$$R_{sa} = \left\{ \frac{\left[\left[\left(\sum_{i=1}^{N_{aa}} (M_d)_i \right) / N_{aa} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{af}} (\Delta S \cdot \Delta T)_i \right] \right]}{\left[\sum_{i=1}^{N_{aa}} (T_p)_i / N_{aa} \right]} \right\} \quad (6)$$

A metodologia acima descrita foi inicialmente empregada por Ichoku & Kaufman (2005) utilizando dados do sensor MODIS de 2002 em diferentes regiões do globo. Neste trabalho este método foi aplicado para os dados provenientes do satélite GOES, permitindo a obtenção de 3 novos coeficientes de emissão de fumaça baseado na energia radiativa do fogo (kg/MJ). Este novo coeficiente é um excelente parâmetro para o cálculo de emissões de gases do efeito estufa através do sensoriamento remoto, permitindo a obtenção dos dados de emissão em tempo quase-real. Para a América do Sul foram propostos três coeficientes, separados principalmente de acordo com o tipo de vegetação predominante: Região de Cerrado, Região de Floresta Tropical e Região da América do Sul abaixo de 20°.

O modelo CCATT-BRAMS

O modelo CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), desenvolvido para simular a circulação atmosférica em várias escalas, baseia-se no modelo numérico de previsão do tempo BRAMS, originado do modelo RAMS (Walko et al., 2000). O modelo BRAMS apresenta

novas parametrizações e funcionalidades, desenvolvidas principalmente por pesquisadores brasileiros aplicadas à América do Sul, apropriadas para simular transferências radiativas, quantidades de vapor na atmosfera, trocas de calor, transporte turbulento na camada limite planetária, entre outros (Freitas et al., 2007).

O CCATT, modelo de transporte Euleriano acoplado ao BRAMS, é um modelo numérico que simula e estuda os proces-

tos e transportes associados à emissão de queimadas. O transporte dos gases traço e aerossóis são feitos simultaneamente com a evolução do estado atmosférico, utilizando os mesmos tempos de simulação e as mesmas parametrizações dinâmicas e físicas da atmosfera. A equação de conservação de massa para o CO e para o $PM_{2,5\mu m}$ é calculada, sob a forma de equação de tendência, expressa pela seguinte equação (Freitas et al., 2007):

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{adv} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{PBL\ turb} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{Conv.\ Rasa} + \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{Conv.\ Prof.} + W_{PM_{2,5\mu m}} + R + Q \quad (7)$$

onde $\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}$ representa a tendência local, *adv* a advecção na escala da grade, *PBL turb* o transporte turbulento na camada limite planetária na subgrade, *Conv. Rasa* o transporte em subgrade associado com a convecção rasa de umidade, *Conv. Prof.* o transporte em subgrade associado com a convecção profunda de umidade, $W_{PM_{2,5\mu m}}$ a remoção convectiva úmida para o material particulado, *R* o termo associado com a remoção seca genérica e/ou transformações químicas e *Q* a fonte de emissão associada com o processo de queimada (Freitas et al., 2007).

Para avaliar o desempenho das simulações realizadas no CCATT-BRAMS, os resultados foram comparados com os dados de campo coletados na região de Rondônia e Mato Grosso descritos em Freitas et al. (2007). Estes dados fazem parte dos experimentos da LBA, SMOCC e RaCCI medidos na região amazônica no período de queimadas de 2002. Obtiveram-se os dados em superfície de CO e de $PM_{2,5\mu m}$ na localidade de Ouro Preto do Oeste (62,37°O, 10,75°S; RO) durante as campanhas do SMOCC/RaCCI ocorridas de 10/setembro/2002 a 04/novembro/2002 (Andreae et al., 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de emissão baseados na ERF permitem calcular o total de $PM_{2,5\mu m}$ e CO liberado para a atmosfera a partir da temperatura do fogo. Inicialmente esta metodologia foi desenvolvida por Ichoku & Kaufman (2005) para os produtos MOD14 e MYD14 do sensor MODIS. Neste trabalho, utilizaram-se as mesmas técnicas aplicadas aos dados do MODIS para gerar os coeficientes para os produtos WFABBA/GOES. Os coeficientes de emissão baseados na ERF originados para o GOES foram separados de acordo com o tipo de cobertura vegetal definidos por Ichoku & Kaufman (2005) para a América do Sul. A Figura 1 mostra os gráficos de dispersão e os valores dos coeficientes de emissão baseados na ERF para três diferentes regiões.

O coeficiente de emissão para a região amazônica ($0,03\text{ kg.MJ}^{-1}$) obteve uma correlação de 88% (significativa pelo teste *t*-student, $\alpha = 0,05$) e considerou 4.561 amostras, agrupadas em 112 dias. Para a região típica de Caatinga e Nordeste brasileiro, entre outros biomas, obteve-se uma correlação de 0,92 (significativa pelo teste *t*-student, $\alpha = 0,05$). A regressão linear entre a emissão de aerossóis e a ERF liberada apresentou um coeficiente de emissão de $0,006\text{ kg.MJ}^{-1}$, referentes a 772 amostras agrupadas em 54 dias. A análise realizada para a região da América do Sul abaixo de 20° que abrange os biomas de Floresta Ombrófila Densa e Mista, Pradarias, Campos, Floresta Estacional Semidecidual, entre outros, apresentou uma correlação de 0,93 (significativa pelo teste *t*-student, $\alpha = 0,05$). Para este caso, o valor do coeficiente de emissão baseado na ERF obtido foi de $0,02\text{ (kg.MJ}^{-1}\text{)}$, referentes a 294 amostras, agrupadas em 17 dias. A Figura 2 mostra a área de abrangência de cada coeficiente de emissão e seus respectivos valores para os produtos MODIS14 e WFABBA.

A Figura 3 mostra o mapa da média diária de $PM_{2,5\mu m}$ e CO emitida para a atmosfera no período de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002, cuja simulação utilizou a ERF e os coeficientes de emissão baseados na ERF extraídos dos dados do MODIS (Ichoku & Kaufman, 2005) e dos dados do GOES assimilados no modelo CCATT-BRAMS. Neste método os maiores valores de $PM_{2,5\mu m}$ localizam-se nos Estados brasileiros do Mato Grosso, de Rondônia, do Pará e do Mato Grosso do Sul e na Bolívia e Paraguai, onde os valores médios diários acumulados de $PM_{2,5\mu m}$ excederam $42\mu\text{g.m}^{-3}$. Para o mesmo período modelou-se a emissão total de CO para a atmosfera a partir da conversão de $PM_{2,5\mu m}$ em CO (Andreae & Merlet, 2001), e percebe-se que os mapas de CO são muito similares aos resultados encontrados na modelagem do $PM_{2,5\mu m}$. Os maiores valores médios de CO localizaram-se no Estado brasileiro do Mato Grosso, onde podem chegar a 600 ppb.

O uso da ERF e dos coeficientes de emissão para estimar o $PM_{2,5\mu m}$ emitido na queimada mostrou uma correlação de aproximadamente 91% entre os dados estimados e os dados utilizados como verdade terrestre (Fig. 4a). Os valores simulados foram subestimados em 20%, contudo, percebe-se uma melhora significativa nas estimativas de grandes queimadas. A principal vantagem deste método está na independência de uma base de dados de carbono disponível para a queima. Neste método a utilização da temperatura permite o cálculo da emissão de $PM_{2,5\mu m}$ e, possivelmente, possibilita uma melhor estimativa das emissões nas regiões abaixo do trópico de Capricórnio.

A assimilação dos dados de ERF e da estimativa direta de

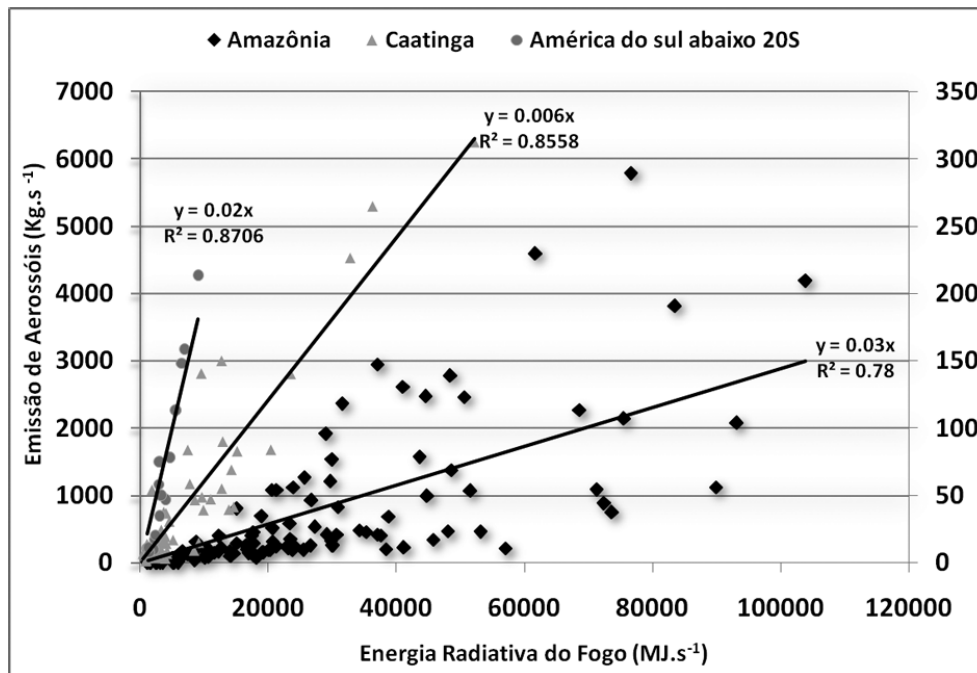
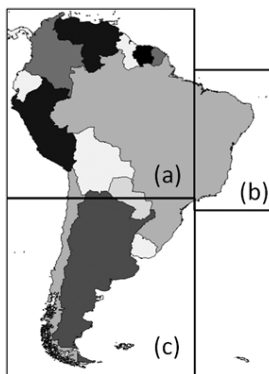


Figura 1 – Regressão entre a ERF e a emissão de aerossóis para três regiões da América do Sul. O eixo x representa a energia radiativa do fogo, em MJ.s^{-1} , e o eixo y a emissão de aerossóis, em kg.s^{-1} . Para os dados referentes à Amazônia, os valores do eixo x e estão posicionados à esquerda, para os dados da Caatinga e América do Sul abaixo de 20°S estão localizados à direita do gráfico.



Localização	MODIS (kg/s)	GOES (kg/s)
(a)	0,063	0,03
(b)	0,048	0,006
(c)	0,061	0,02

Figura 2 – Área correspondente aos coeficientes de emissão baseados na ERF e seus respectivos valores para o MODIS e GOES. (a) Região de Floresta Tropical; (b) Região Nordeste; e (c) Região da América do Sul abaixo da latitude 20°S .

CO no modelo CCATT-BRAMS apresentou correlação de aproximadamente 91% entre os dados modelados e os dados observados (Fig. 4b). Porém, ao contrário dos valores de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$, os dados de concentração de CO foram subestimados em aproximadamente 21%. Entretanto, a regressão mostra um melhor ajuste dos dados modelados com os dados observados entre os dias de maior emissão. Este método, que emprega apenas a ERF e o uso dos coeficientes, possui a característica de aumentar a emissão na maioria das regiões, inclusive na Bolívia,

no Paraguai e na Argentina.

Ainda, analisou-se o grau de incerteza do modelo em relação aos dados de campo a partir da técnica *bootstrap* (Efron, 1982) que, a partir do universo amostral de $1,0 \times 10^4$, reconstrói a curva original dos dados e fornece os parâmetros para originar o intervalo de confiança para as estimativas do modelo. Os resultados obtidos a partir da ERF apresentam valores de correlação entre 88 e 94% para o $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ e entre 86 e 93% para o CO com coeficientes angulares que variam de 1,1 e 1,3.

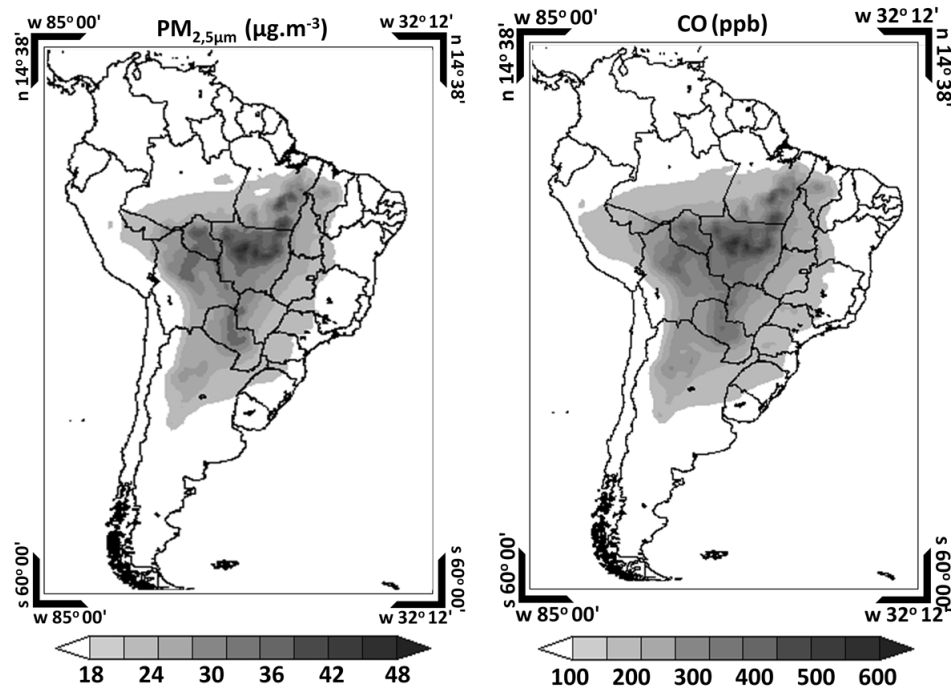


Figura 3 – Mapa da emissão total de $PM_{2,5\mu m}$ ($\mu g \cdot m^{-3}$) e CO (ppb) para o período de 15/julho/2002 a 15/novembro/2002 modelados no CCATT-BRAMS.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estimativa das emissões dos gases do efeito estufa provenientes da queima de biomassa é necessária para inventários anuais e sua estimativa a partir de dados derivados dos satélites ambientais é de fundamental importância para a modelagem do tempo e clima, pois permite a assimilação de dados por modelos como o CCATT-BRAMS, rodado diariamente pelo CPTEC/INPE.

Com uma correlação superior a 86% entre os dados de emissão de aerossóis ($kg \cdot s^{-1}$) e a energia radiativa do fogo ($MJ \cdot s^{-1}$), originaram-se três coeficientes para os dados provenientes do satélite GOES. Estes coeficientes permitem estimar a partir da ERF a quantidade de $PM_{2,5\mu m}$ liberada para a atmosfera a partir de três grandes biomas: região de Floresta Tropical e Cerrado; vegetação típica da Caatinga e Floresta Ombrófila Densa e Pradarias/Campos. Estes coeficientes seguem a metodologia proposta por Ichoku & Kaufman (2005) e podem ser desenvolvidos para outros satélites que atualmente detectam os focos de queimada, como, por exemplo, os dados do SEVERI/METEOSAT-8 e do AVHRR/NOAA.

Ainda, o método que utiliza a ERF do MODIS e GOES pode ser apontado como uma metodologia inovadora e adequada, pois mostrou uma boa correlação com os dados medidos em campo. Entre as principais vantagens deste método podem-se citar:

a) a independência de uma base de dados de carbono disponível para a queima; b) a utilização da temperatura e da área queimada para calcular a emissão dos gases e aerossóis que são extraídos com uma boa confiabilidade e c) uma melhor estimativa das emissões nas regiões entre as latitudes $20^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER AN. 1977. Potencialidades paisagísticas brasileiras. Seleção de Textos de Geomorfologia. São Paulo, SP: Instituto de Geografia/USP, 55: 01–25.
- ANDRAE MO & MERLET P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, 15(4): 955–966, doi: 10.1029/2000GB001382.
- ANDRAE MO, ROSENFELD D, ARTAXO P, COSTA AA, FRANK GP, LONGO KM & SILVA DIAS MAF. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 303: 1337–1342.
- BELWARD A. 1996. The IGBP-DIS global 1 km land cover data set (DISCover) proposal and implementation plans. IGBP-DIS Working Paper, 13.
- DOZIER J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 11: 221–229.

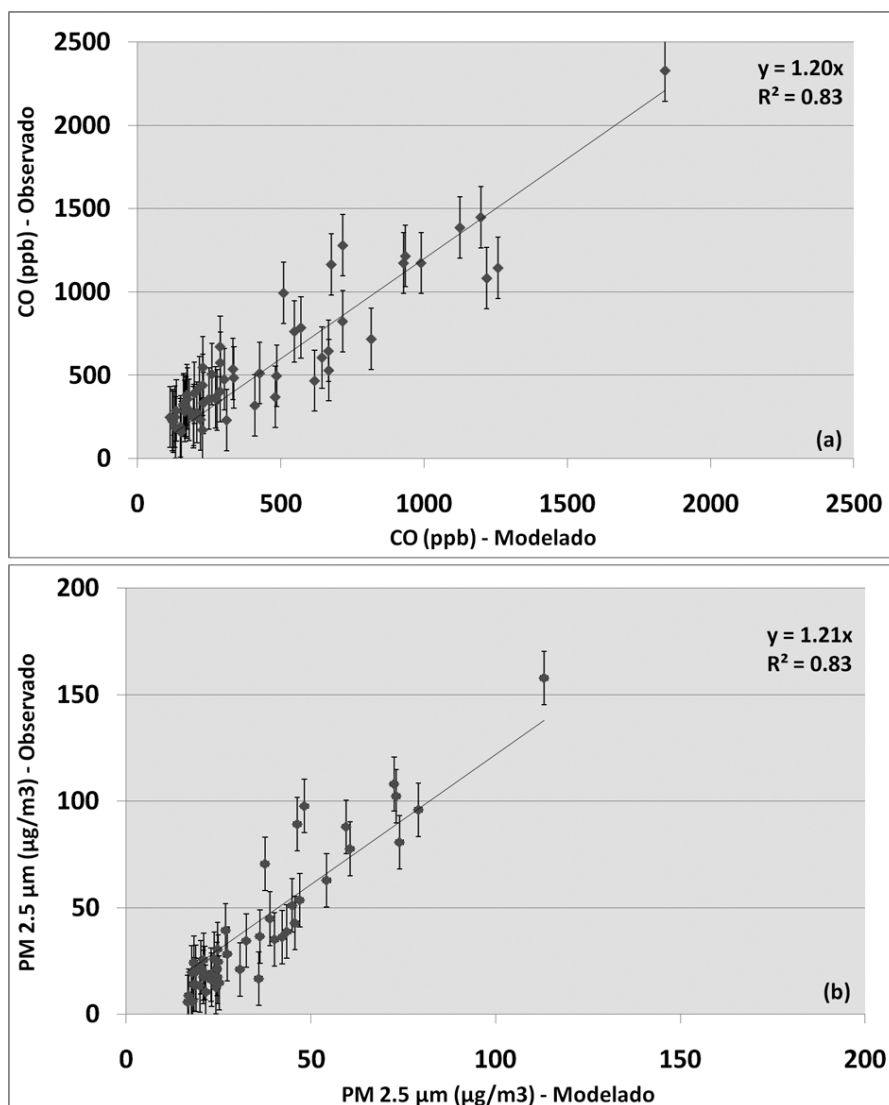


Figura 4 – Regressão linear entre os dados modelado e observado. (a) Valores modelados a partir da assimilação dos dados de ERF e do coeficiente de emissão de $PM_{2.5\mu m}$ no modelo CCATT-BRAMS (eixo x) e valores observados nas campanhas SMOCC/RaCCI ocorridas de 10/setembro/2002 a 04/novembro/2002 em Ouro Preto do Oeste (eixo y); (b) valores modelados a partir da assimilação dos dados de ERF e do coeficiente de emissão de CO e dados observados nas campanhas SMOCC/RaCCI ocorridas de 12/setembro/2002 a 14/novembro/2002.

EFRON B. 1982. The jackknife, the bootstrap and other resampling plans. SIAM. 100 p.

FREITAS SR, LONGO KM, SILVA DIAS MAF, DIAS PLS, CHATFIELD R, PRINS E, ARTAXO P, GRELL GA & RECUERO FS. 2005. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, 5: 135–167.

FREITAS SR, LONGO KM, SILVA DIAS MAF, CHATFIELD R, DIAS PLS, ARTAXO P, ANDREA M, GRELL GA, RODRIGUES L, FAZENDA A & PANETTA J. 2007. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling

System (CATT-BRAMS). Part 1: Model description and evaluation. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7: 8525–8569.

GIGLIO L. 2005. MODIS collection 4 active fire product user's guide. Version 2.2. 2005. Disponível em: <maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.2.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2007.

HOUGHTON RA, LAWRENCE KT, HACKLER JL & BROWN S. 2001. The spatial distribution of 10 forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biol.*, 7: 731–746.

- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Mapa de Biomas do Brasil. Diretoria de Geociências. Ministério do Meio Ambiente.
- ICHOKU C & KAUFMAN YJ. 2005. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. *IEEE Trans. Geosc. & Rem. Sens.*, 43(11): 2636–2649.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Third Assessment Report (TAR), climate change, the scientific basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge Univ. Press. 873 p.
- KAUFMAN YJ & TANRÉ D. 1998. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. MODIS ATBD02, NASA/GSFC. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2007.
- KAUFMAN YJ, TUCKER CJ & FUNG I. 1990. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. *Journal of Geophysical Research*, 95: 9927–9939.
- KAUFMAN YJ, REMER LA, OTTMAR RD, WARD DE, RONG-R L, KLEIDMAN R, FRASER RS, FLYNN L, McDOUGAL D & SHELTON G. 1996. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: LEVINE JS (Ed.). *Biomass burning and Global Change*. Maryland: MIT Press, 685–696.
- KAUFMAN YJ, JUSTICE CO, FLYNN LP, KENDALL EMP, GIGLIO L, WARD DE, MENZEL WP & SETZER AW. 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 103: 32215–32238.
- OLSON JS, WATTS JA & ALLISON LJ. 2000. Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database. NDP-017. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Disponível em: <<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>>. Acesso em: 15 jan. 2008.
- PRINS EM & MENZEL WP. 1992. Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 2783–2799.
- PRINS EM, FELZ JM, MENZEL WP & WARD DE. 1998. An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America. *Journal of Geophysical Research*, 103: 31821–31825.
- WALKO R, BAND L, BARON J, KITTEL F, LAMMERS R, LEE T, OJIMA D, PIELKE R, TAYLOR C, TAGUE C, TREMBACK C & VIDALE P. 2000. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *J. Appl. Meteorol.*, 39: 931–944.
- WOOSTER MJ, ZHUKOV B & OERTEL D. 2003. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 86: 83–107.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Gabriel Pereira. Possui graduação em Geografia pela Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC (2004). Possui curso técnico em Meteorologia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFET/SC (2005) e mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2008). Atualmente é doutorando em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e membro do Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Sensoriamento Remoto, atuando principalmente na modelagem global dos fluxos de gases traços e de aerossóis liberados na queima de biomassa.

Francielle da Silva Cardozo. Possui graduação em Geografia pela Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC (2005). Possui curso técnico em Meio Ambiente pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFET/SC (2004). É mestre em Geografia pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2009). Atualmente é bolsista PCI-DTI-7D do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2009), onde desenvolve trabalhos com ilhas de calor, poluição e doenças do trato respiratório. Possui experiência na área de Geociências, atuando principalmente com Sensoriamento Remoto, diagnóstico ambiental, uso e ocupação da terra, áreas de riscos e desastres naturais.

Fabício Brito Silva. Possui curso técnico em Processamento de Dados, graduação e mestrado em Agronomia e atualmente é doutorando em Sensoriamento Remoto no INPE. Tem experiência na área de Modelagem Ambiental, com ênfase em Fertilidade do Solo e Monitoramento de Áreas Degradadas, atuando principalmente em modelagem de carbono em ecossistemas utilizando recursos de Sensoriamento Remoto.

Yosio Edemir Shimabukuro. Possui graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (1972), mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1977), doutorado em Ciências Florestais/Sensoriamento Remoto pela Colorado State University (1987) e pós-doutorado pela Nasa Goddard Space Flight Center (1993). Atualmente é Pesquisador Titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Recursos Florestais e Engenharia Florestal. Atuando principalmente nos seguintes temas: modelo linear de mistura espectral, Landsat MSS TM, imagem fração-solo, áreas reflorestadas, modelagem matemática.

Elisabete Caria Moraes. Possui graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Viçosa (1980), mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1986) e doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2002). Atualmente é Tecnologista Sênior do

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia. Atuando principalmente nos seguintes temas: processos de transferência radiativa, interação biosfera-atmosfera, radiação global, balanço radiativo, mudança climática.

Saulo Ribeiro de Freitas. É graduado em Física (Bacharelado) pela Universidade Federal de Goiás (1987), possui Mestrado em Física pela Universidade Federal de Pernambuco (1991) e Doutorado em Física pela Universidade de São Paulo (1999). Realizou Pós-Doutorado na NASA Ames Research Center (EUA, 2000/2001) e participou do programa Jovem Pesquisador da FAPESP entre 2001 e 2003. Atualmente é Pesquisador Associado do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE) e Professor da Pós-Graduação em Meteorologia e Ciência do Sistema Terrestre do INPE e do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Clima da UFRN.

Nelson Jesus Ferreira. Possui graduação em Física pela ex-Fundação Educacional de Bauru, atual Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e doutorado em Meteorologia – University of Wisconsin – Madison. Atualmente é pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Meteorologia Sinótica, atuando principalmente nos seguintes temas: climatologia, satélites meteorológicos, e nebulosidade.