

Estimativa da emissão de gases do efeito estufa para o Bioma Pantanal

Gabriel Pereira¹
Elisabete Caria Moraes¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Saulo Ribeiro de Freitas¹
Francielle da Silva Cardozo¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gabriel, bete, yosio}@dsr.inpe.br; saulo.freitas@cptec.inpe.br;
franciellecardozo@yahoo.com.br

Resumo. Frequentes em todas as regiões do mundo, as queimadas consomem grandes quantidades de biomassa e liberam enormes quantidades de gases traços e aerossóis para a atmosfera, influenciando nos ciclos biogeoquímicos, no balanço de energia da superfície e alterando o clima da região. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar o inventário de emissões dos gases do efeito estufa e dos aerossóis liberados pelas queimadas no Bioma Pantanal a partir de dados de satélites orbitais. Foram utilizados os dados multitemporais de energia radiativa do fogo (ERF) estimados a partir do produto Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm (WFABBA) do satélite Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) e do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) das plataformas Aqua e Terra. Além disso, os dados estimados de taxa de emissão para as principais espécies foram assimilados no modelo ambiental Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modelling System (CCATT-BRAMS) e as estimativas de emissão calculadas. Estima-se que aproximadamente 0,83 Gt de Dióxido de Carbono (CO₂), 0,06 Gt de Monóxido de Carbono (CO), 0,004 Gt de Metano (CH₄) e 0,005 Gt de Material Particulado com diâmetro menor que 2,5µm (PM_{2,5µm}) foram emitidos para a atmosfera durante o período de análise. Analogamente, para o mesmo período, o Estado do Mato Grosso, que apresenta a maior incidência de focos de queimada e abrange diversos biomas, inclusive a Floresta Amazônica, emitiu aproximadamente 11,46 Gt de CO₂.

Palavras-chave: energia radiativa do fogo, queimadas, CCATT-BRAMS.

Abstract. World wildfires consume large quantities of vegetation biomass and release trace gases and aerosols to the atmosphere, altering the biogeochemical cycles, surface energy balance and change the climate of the region. In this context, this work has as main objective to derive through satellite data the greenhouse and aerosols emissions inventory for Pantanal biome. Fire radiative power (FRP) multitemporal data estimated from Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm / Geostationary Operational Environmental Satellite (WFABBA/GOES) and from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) from Terra and Aqua platforms were utilized in this work. Moreover, the emission rates were assimilated in Coupled Chemistry-Aerosol-Tracer Transport model coupled to Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (CCATT-BRAMS) to obtain the spatial concentration. A release of 0.83 Gt of carbon dioxide (CO₂), 0.06 Gt of carbon monoxide (CO), 0.004 Gt of methane (CH₄) and 0.005 Gt of Particulate Matter with diameter less than 2.5 µm (PM_{2,5µm}) to the atmosphere by Pantanal biome were estimated. Similarly, for the same period, the Mato Grosso State emitted to the atmosphere approximately 11.46 Gt of CO₂.

Key-words: fire radiative power, biomass burning, CCATT-BRAMS.

1. Introdução

Anualmente grandes extensões terrestres são submetidas a processos de degradação ambiental e de mudança de uso da terra. No Brasil, estes processos de conversão de áreas naturais em áreas antropizadas estão associados com a constante expansão agrícola e, geralmente, utilizam as queimadas como prática para desflorestar e renovar pastos. Os impactos ambientais provocados por estas ações são muitos e variados, estimando-se que aproximadamente 90% das queimadas mundiais provenham de ações antropogênicas (Andreae, 1991).

As queimadas afetam significativamente os ciclos biogeoquímicos, o balanço de energia na superfície, o balanço radiativo da atmosfera, o ciclo hidrológico e liberam para a atmosfera grandes quantidades de gases do efeito estufa e aerossóis. Estes fatores afetam diretamente o clima e o meio ambiente (Andreae et al., 2004). No Pantanal, o ciclo hidrológico bem definido e as características físicas da região proporcionam a expansão de atividades agropecuárias, estas podem ocasionar episódios pontuais de intensa queima de biomassa. O começo e a manutenção das queimadas dependem basicamente do regime hidrológico, do tipo de biomassa, dos componentes geográficos, da temperatura do ar, da umidade do ar e do solo, assim como, do regime de ventos. Este bioma possui uma das maiores diversidades biológicas do mundo, o que justifica o seu estudo e o empenho da comunidade científica em tratá-lo como área de proteção ambiental.

As queimadas são fontes de gases do efeito estufa (CO₂, CH₄), que propiciam o aquecimento global, principal responsável pelas mudanças climáticas. Além disso, alguns gases emitidos na queimada (monóxido de carbono, hidrocarbonetos não-metanos, ácido nítrico, entre outros) são quimicamente ativos e interagem com as concentrações de hidroxilas (OH) presentes na atmosfera, alterando a eficiência de oxidação e modificando a quantidade de ozônio troposférico, que é um dos gases do efeito estufa (Kaufman et al., 1992; Galanter et al., 2000).

No processo de combustão da vegetação é comum a emissão de Dióxido de Carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O), como descrito na **equação (1)**. Porém, o processo químico que define a produção de gases e aerossóis para a atmosfera é, na maioria das vezes, incompleto. Este evento induz a produção de outras espécies de gases, entre os quais, pode-se citar o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), o monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o cloreto de metil (CH₃Cl) (Levine, 1994; Badarinath et al., 2004).



onde CH₂O representa a composição média da biomassa vegetal.

Com o avanço tecnológico, o sensoriamento remoto se firmou como uma ciência capaz de dar suporte ao estudo de diversas variáveis ambientais, face à sua natureza de aplicabilidade nas ciências físicas, biológicas e sociais. As informações obtidas por aeronaves, satélites e os dados terrestres foram, por muito tempo, utilizadas apenas para indicar focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes sobre a quantidade de vegetação queimada e as emissões liberadas no processo de combustão (Wooster et al., 2003). 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).

2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo utilizar a energia radiativa do fogo derivados do sensor MODIS e do GOES para estimar as emissões de CO, CO₂, CH₄ e material particulado com diâmetro menor que 2,5 µm e 10 µm (PM_{2,5µm} e PM_{10µm}, respectivamente) para o período entre 2000 e 2008 para o Pantanal brasileiro, e modelar estas emissões no CCATT-BRAMS para a estação seca de 2002.

3. Material e Métodos

A **Figura 1** mostra a área de estudo que abrange o bioma Pantanal. O Pantanal é uma das maiores planícies de sedimentação do globo sujeita a inundações periódicas que geralmente ocorrem nos meses do verão, sendo o período seco nos meses de inverno.

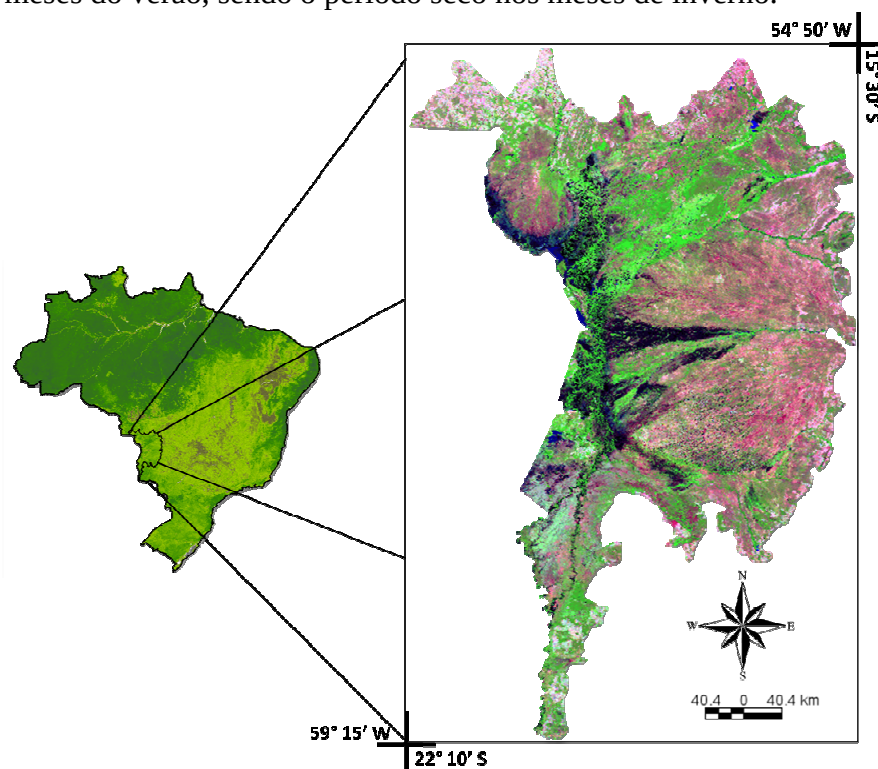


Figura 1. Localização da área de estudo. Imagem do sensor MODIS de junho de 2009, composição 1B2G6R.

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 de fogo originados destas recebem a sigla MOD14, cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD14, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min (Giglio, 2005).

O WFABBA 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 x 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 3,9µm e outra localizada no canal em 10,7µm (Prins et al., 1998).

Os produtos MODIS14 (referentes aos dados de queimada de ambas as plataformas) disponibilizam as estimativas da ERF, obtida a partir de uma relação semi-empírica entre a ERF e a radiância espectral do infravermelho, referente à banda 21 do MODIS centrada em 4µm, expressa pela **equação (2)** proposta por Kaufman et al. (1996).

$$ERF = [4,3 \times 10^{-12} \cdot (T_{f4\mu m}^0 - T_{b4\mu m}^0)] \cdot A_{sampler} \quad (2)$$

onde $A_{sampler}$ representa o tamanho da área do pixel (km²), $T_{f4\mu m}$ a temperatura do fogo no canal centrado próximo a 4 µm (K) e $T_{b4\mu m}$ refere-se a temperatura do background (K) no mesmo canal.

Embora os produtos de queimada WFABBA ainda não possuam um algoritmo para se estimar a ERF, adotou-se a **equação (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 (km²), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_f é a temperatura da fração do sub-pixel com fogo (K). Em ambos os casos, a área e a temperatura do fogo são derivadas pelo método de Dozier (1981).

Com base nas informações acima descritas, Ichoku e Kaufman (2005) e Pereira (2008) propuseram uma metodologia para estimar a taxa de emissão de fumaça através da ERF para o MODIS e GOES, respectivamente. A relação linear entre a taxa de liberação da ERF, integrada no tempo, e o consumo de biomassa, permitiram a determinação de um coeficiente de emissão de fumaça baseado na energia radiativa do fogo (C_e), dada em kg/MJ. O produto deste coeficiente com a ERF, em MJ, resulta no total de aerossóis de fumaça liberados para a atmosfera, como mostra a **equação (4)**:

$$M_x = C_e \cdot ERF \quad (4)$$

onde M_x representa a taxa de emissão de fumaça calculada pelo satélite. A taxa de emissão de fumaça, quando multiplicada pelos fatores de emissão descritos por Andreae e Merlet (2001), permite a obtenção da taxa de emissão de diversos gases para a atmosfera.

Após as estimativas da taxa de emissão dos principais gases, realizou-se uma simulação para o período de queimadas de 2002 no modelo ambiental CCATT-BRAMS. O CCATT, modelo de transporte Euleriano acoplado ao BRAMS, é um modelo numérico que simula e estuda os processos e transportes associados à emissão de queimadas. A equação de conservação de massa para o CO e para o PM_{2,5µm} é calculada, sob a forma de equação de tendência, expressa pela **equação (5)** (Freitas et al., 2007):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBLturb} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Rasa} + \left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Prof.} + W_{PM2.5\mu m} + R + Q \quad (5)$$

onde $\frac{\partial s}{\partial t}$ representa a tendência local, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{adv}$ a advecção na escala da grade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{PBLturb}$ o transporte turbulento na camada limite planetária na sub-grade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Rasa}$ o transporte em sub-grade associado com a convecção rasa de umidade, $\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_{Conv. Prof.}$ o transporte em sub-grade associado com a convecção profunda de umidade, $W_{PM2.5\mu m}$ 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.

4. Resultados e Discussão

A **Figura 2** mostra a energia radiativa do fogo (em gigawatts) extraída a partir dos dados coletados pelos sensores MODIS (Plataformas Aqua e Terra) e do produto WFABBA/GOES para o período de 2000 a 2008. As informações pontuais da energia liberada no processo de combustão foram integradas em grades regulares para ambos os sensores e, posteriormente, agregadas em uma única grade com 10 km de resolução espacial, correspondendo às informações de latitude, longitude e ERF. O somatório dos múltiplos focos de queimada foi inserido no sistema de informações geográficas (SIG) denominado Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e interpolado para melhor visualização da distribuição espacial dos focos.

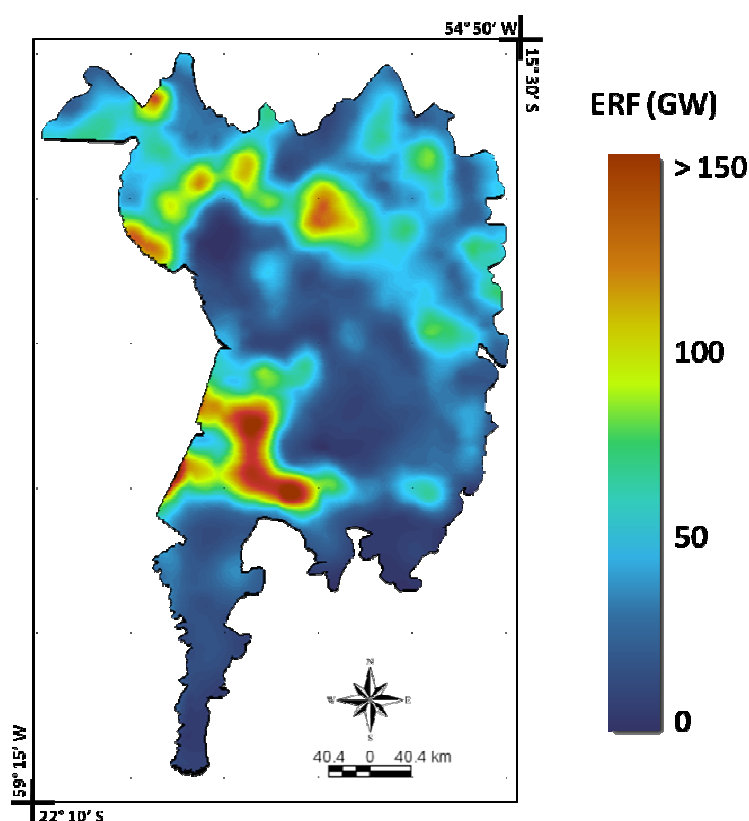


Figura 2. Energia radiativa do fogo (em giga watts) liberada pelas queimadas entre 2000 e 2008 estimada a partir das plataformas EOS e GOES.

Percebe-se que a distribuição espacial das queimadas no bioma Pantanal concentra-se principalmente nos municípios de Corumbá (MS), Barão de Melgaço (MT) e Poconé (MT). Nestas regiões, os valores emitidos de ERF podem superar 150 GW ou 150.000 Megawatts. A energia liberada pelos focos de queimada na região do Pantanal está diretamente relacionada com a quantidade de biomassa consumida, podendo-se estimar que aproximadamente 1 kg de biomassa vegetal deva ser consumida pelo processo de combustão para liberar na forma de energia química 1 MW, que será captado pelos sensores orbitais na forma de temperatura (Pereira, 2008). Desta forma, a **Figura 2** pode ser relacionada com a quantidade de biomassa consumida e, conseqüentemente, com a quantidade de gases traços e aerossóis emitidos para a atmosfera.

A **Figura 3** mostra a taxa de emissão de CO (kg/m^2) estimada a partir da ERF proveniente dos satélites EOS e GOES para a estação seca e de transição (15/07/2002 a 15/11/2002). Estes dados foram pré-processados e assimilados no modelo ambiental CCATT-BRAMS com resolução espacial horizontal de 50 km^2 . Diretamente relacionada com a quantidade de energia emitida, as maiores taxas de emissão encontram-se na região noroeste-nordeste e na área centro-sudoeste do bioma Pantanal com valores que podem alcançar $0,04$ e $0,1 \text{ kg}/\text{m}^2$, respectivamente.

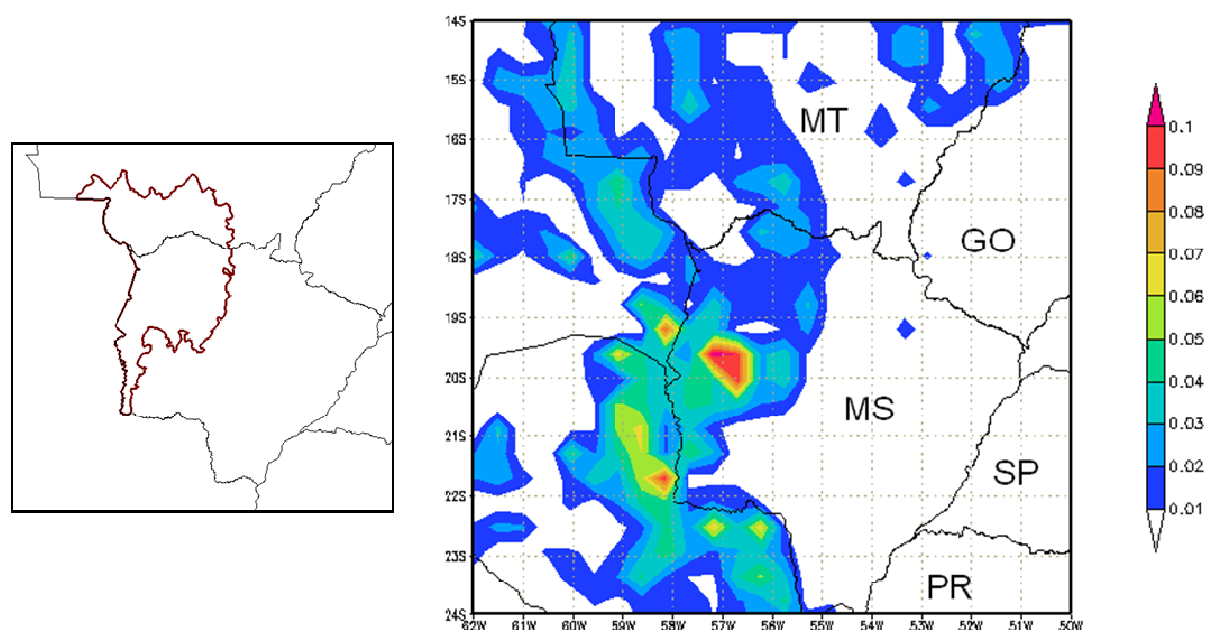


Figura 3. Estimativa da taxa de emissão de CO (kg/m^2) para o período de 15 de julho a 15 de novembro de 2002, utilizada como entrada de dados no modelo ambiental CCATT-BRAMS.

Com os dados da taxa de emissão para cada espécie, o resultado do pré-processamento foi inserido no modelo CCATT-BRAMS, e a espacialização da concentração média dos gases foi calculada considerando fatores como os processos de transporte pelos fluxos atmosféricos, remoção convectiva úmida, remoção seca genérica e transformações químicas que ocorrem na atmosfera (**Figura 4**). Na região do Pantanal brasileiro, as concentrações médias de CO variam entre 200 e 350 ppb, porém, em eventos de intensas queimadas, essa concentração pode atingir níveis críticos e alcançar valores superiores a 3500 ppb, considerados prejudiciais à saúde humana.

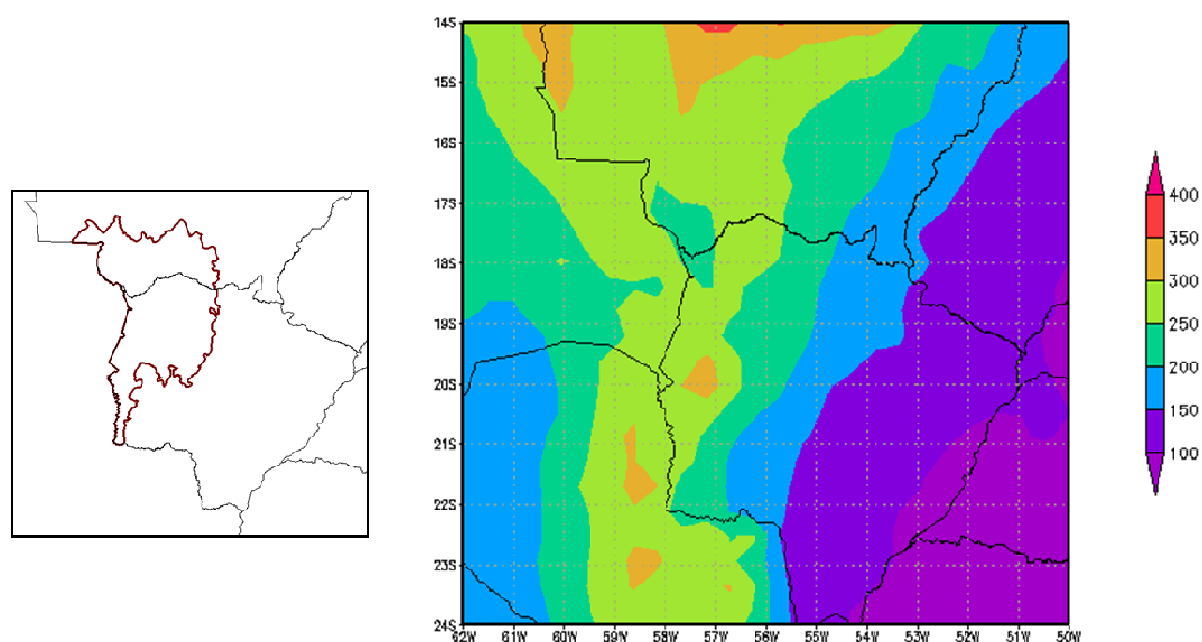


Figura 4. Concentração média de CO (ppb) para o período de 15 de julho a 15 de novembro de 2002.

A **Tabela 1** mostra o resultado das estimativas de emissão dos principais gases do efeito estufa e aerossóis para o Bioma Pantanal, utilizando as metodologias propostas por Ichoku e Kaufman (2005) para os dados do MODIS e por Pereira (2008) para os dados do WFABBA/GOES. Para a conversão dos valores de MP com diâmetro maior que $10\mu\text{m}$ utilizaram-se os valores propostos por Andreae e Merlet (2001). Desta forma, as taxas de emissão para cada espécie (em kg/s) foram integradas no tempo e permitiram o cálculo da emissão total de cada espécie, cujos valores foram transformados em Gt (gigatoneladas - 10^{15} gramas). Estima-se que aproximadamente 0,83 Gt de CO_2 , 0,06 Gt de CO, 0,004 Gt de CH_4 e 0,005 Gt de $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ foram emitidos para a atmosfera nestes últimos 9 anos. Para o mesmo período, o Estado do Mato Grosso, que apresenta a maior incidência de focos de queimada e abrange diversos biomas, inclusive a Floresta Amazônica, emitiu aproximadamente 11,46 Gt de CO_2 , estimada a partir da mesma metodologia.

Tabela 1. Total de CO_2 , CO, CH_4 e $\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$ emitido para a atmosfera entre 2000 e 2008.

Taxa de emissão total de MP (kg/s)	Fator de Emissão (g[espécie]/ kg[biomassa queimada])		Emissão (Gt)
1,3x10 ⁶	CO_2	1580	0,83
	CO	117	0,06
	CH_4	6,6	0,004
	$\text{PM}_{2,5\mu\text{m}}$	9,9	0,005

5. Conclusões

Estimativas de emissões dos gases do efeito estufa e de aerossóis provenientes da queimada são necessárias para inventários anuais. Embora as estimativas de emissão para diversas espécies apresentem, segundo os autores, variações de até 50% no valor real medido, as incertezas e superestimativas obtidas são comparáveis às incertezas dos métodos tradicionais de cálculo de emissão dos gases. Entre as principais causas, estão as incertezas que cercam o

Sensoriamento Remoto e os parâmetros utilizados, como por exemplo, os coeficientes mássicos de absorção e espalhamento. Portanto, esta metodologia, através de melhorias nas parametrizações, demonstra grande aplicabilidade na modelagem dos gases emitidos e alimentação de modelos.

6. Referências

- Andreae, M. O. **Biomass Burning**: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: Levine, J. S. (Ed.). *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, The MIT Press, Cambridge, MA, p. 2-21, 1991.
- Andreae, M.O.; Merlet, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochem. Cycles**, n. 15, v.4, p. 955-966, 10.1029/2000GB001382, 2001.
- Andreae, M.; Rosenfeld, D.; Artaxo, P.; Costa, A.; Frank, G.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon, **Science**, v. 303, p. 1342-1345, 2004.
- Badarinath, K.V.S.; Latha, K. M.; Chand, T. R. K.; Gupta, P. K.; Ghosh, A. B.; Jain, S. L.; Gera, B. S.; Singh, R.; Sarkar, A. K.; Singh, N.; Parmar, R. S.; Koul, S.; Kohli, R.; Nath, S.; Ojha, V. K. Singh, G. Characterization of aerosols from biomass burning – a case study from Mizoram (Northeast), India. **Chemosphere**, n. 54, p. 167-175, 2004.
- Dozier, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, p. 221-229, 1981.
- Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Dias, M. A. F. S.; Chatfield, R.; Dias, P. L. S.; Artaxo, P.; Andreae, M.; Grell, G. A.; Rodrigues, L.; Fazenda, A.; Panetta, J. 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.**, v.7, p. 8525-8569, 2007.
- Galanter, M.; Levy II, H.; Carmichael, G. R. Impacts of biomass burning on tropospheric CO, NO_x and O₃. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D5, p. 6633-6653, 2000.
- Ichoku, C.; Kaufman, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Trans. on Geosc. & Rem. Sens.**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.
- Kaufman, Y. J.; Setzer, A. W.; Ward, D.; Tanré, D.; Holben, B. N.; Menzel, P.; Pereira, M. C.; Rasmussen, R. Biomass Burning and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A). **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14581-14599, 1992.
- Kaufman, Y. J.; Remer, L.; Ottmar, R.; Ward, D.; Rong-R, L.; Kleidman, R.; Fraser, R.; Flynn, L.; McDougal, D.; Shalton, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: Levine, J. (Ed.), **Global biomass burning**, Maryland: MIT Press, p. 685-696, 1996.
- Levine, J. S. Biomass burning and the production of greenhouse gases. In: Zepp, R. G. (Ed.) **Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change**, Isbn 0-471-58943-3, 1994. Disponível em: http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/biomass.html. Acesso em 24/01/2007.
- Pereira, G. **O uso de satélites ambientais para a estimativa dos fluxos de gases traços e de aerossóis liberados na queima de biomassa e sua assimilação em modelos numéricos de qualidade do ar**. 2008. 108 p. (INPE-15390-TDI/1407). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.13.16.15>>. Acesso em: 19 ago. 2009.
- Prins, E. M.; Felz, J. M.; Menzel, W. P.; Ward, D. E. An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America, **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24. p. 31821-31825, 1998.
- Wooster, M. J.; Zhukov, B.; Oertel, D. 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**, n. 86, p. 83-107, 2003.