

Análise da energia radiativa do fogo para a América do Sul

Gabriel Pereira¹
Francielle da Silva Cardozo¹
Rafael Stockler¹
Saulo Ribeiro de Freitas¹
Elisabete Caria Moraes¹
Yosio Edemir Shimabukuro¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gabriel, cardozo, bete, yosio}@dsr.inpe.br; {saulo.freitas, rafael.stockler}@cptec.inpe.br

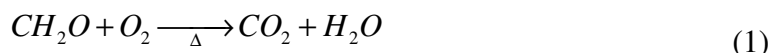
Abstract. Wildfires are frequent in all regions of the world due to its use in different land use activities, being one of the most used processes of forest conversion. In South America, especially in the Amazon Tropical forest, the process of agricultural expansion and production, as pasture renewal, deforestation and pest controls, are common lead by practices that use biomass burning. Consequently, fires release to atmosphere large amounts of trace gases and aerosols, modifying the physical-chemical and biological characteristics of earth's surface, the atmosphere energy budget and the climatic system. Thus, this work aims to asses the performance of fire radiative power, derived from MODIS (TERRA and AQUA) and GOES Imager (GOES platforms) sensors to estimate the emission of trace gases and aerosols from biomass burning. In this work, we decided to estimate the fire radiative energy (FRE) on regular grids with a spatial resolution of 0.17°. Initial results indicate that highest values of FRE are located at the border of Amazon rainforest, in this areas the annual average of FRE reaches values higher than 0.07 MJ.m⁻². Therefore, considering the pixel area (400 km²), the energy released in some grid points is equivalent to approximately 0.2 PJ.year⁻¹ or approximately 400 PJ the energy released per year for Amazon biome.

Palavras-chave: remote sensing, fire radiative power, biomass burning, sensoriamento remoto, potência radiativa do fogo, queimadas.

1. Introdução

No Brasil, especialmente na região Amazônica e no Cerrado, o processo de produção e expansão agropecuária, como as renovações de pastagens, os desmatamentos e os controles de pestes, são realizados principalmente a partir de práticas que utilizam o fogo. Nesta prática, o período de ignição ocorre, sobretudo, na estação seca do Brasil Central, entre os meses de junho a outubro, devido principalmente ao clima seco e a baixa umidade da vegetação, tornando-a mais vulnerável ao fogo (Freitas et al., 2009).

A queima de biomassa pode ser considerada uma fonte de emissão relevante de gases traços e material particulado (constituído principalmente por substâncias orgânicas e de carbono negro) para a atmosfera (Crutzen e Andreae, 1990) e tem recebido destaque na comunidade científica nas últimas décadas devido ao seu papel no aquecimento global. O processo de combustão da biomassa vegetal em condições ideais de completa combustão libera para a atmosfera dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água (H₂O), de acordo com a reação (Levine, 1994):



em que CH₂O representa a biomassa vegetal. Entretanto, a combustão completa dificilmente é alcançada durante a queima de biomassa, sendo comum encontrar outras espécies de gases formados pelas moléculas de carbono como, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), hidrocarbonetos não metanos (NMHC) e partículas suspensas de carbono (C). Além destes gases, no processo de combustão pode-se produzir o monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂), o cloreto de metil (CH₃Cl), o dióxido de enxofre (SO₂), entre outras espécies (Burling et al., 2010).

Os gases traços e aerossóis liberados na queima de biomassa, compostos principalmente por materiais orgânicos oxidados, possuem propriedades físico-químicas que interagem com a radiação eletromagnética (REM) e ocasionam a absorção e espalhamento da mesma. As interações desses compostos radiativamente ativos com a REM e as alterações das propriedades da superfície terrestre provocam alterações significativas no balanço de radiação, nos fluxos de calor latente e sensível, nos ciclos biogeoquímicos e na nucleação de nuvens (Kaufman et al., 1990).

Neste Contexto, para compreender e modelar os efeitos das queimadas e seu papel nas interações biosfera-atmosfera, o sensoriamento remoto orbital atualmente representa a principal alternativa tecnológica que auxilia na detecção, no dimensionamento e no entendimento dos processos derivados da queimada devido às suas características de visão sinóptica, alta eficiência de atualização de informações sobre a mesma área e baixo custo, quando comparados com outros métodos convencionais de detecção e mapeamento. Na última década, o surgimento de novos satélites ambientais proporcionou uma melhor cobertura espacial e temporal dos processos terrestres. A grande maioria dos estudos relacionados à queima de biomassa utilizam dados de satélites com órbita polar, porém, o uso deste tipo de satélite constitui uma limitação na frequência de observações dos focos, uma vez que as queimadas apresentam um ciclo diurno bem definido, que não pode ser caracterizado com poucas observações diárias (Ichoku et al., 2008; Jordan et al., 2008). A limitação temporal apresenta-se inconsistente para a utilização destes dados em modelos de qualidade do ar. Desta forma, o uso de satélites geoestacionários, com alta frequência de observações, tornou-se uma alternativa de fundamental importância.

Para analisar o efeito da queima de biomassa em diferentes escalas de atuação é imprescindível estimar, espacialmente e temporalmente, a emissão de gases traços e aerossóis. Neste contexto, as informações orbitais foram, por muito tempo, utilizadas apenas para indicar os focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes sobre a quantidade de vegetação queimada e as emissões liberadas no processo de combustão. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho do uso da potência radiativa do fogo para estimar a emissão de gases traços e aerossóis provenientes da queima de biomassa.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Focos de queimada

O sensor *GOES Imager* a bordo da constelação de satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), cobre o espectro eletromagnético do visível até o infravermelho termal separados em 5 bandas. O algoritmo para a detecção de anomalias termais utiliza as faixas espectrais centradas em 3,9 μm e 10,7 μm (Prins e Menzel, 1992) e baseia-se na metodologia proposta por Roberts and Wooster (2008). O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) é um produto para detecção de focos de queimada baseado no satélite GOES e utiliza o método proposto por Wooster et al. (2005) para o cálculo da FRP (maiores informações podem ser encontradas em Xu et al., 2010).

Atualmente estão em funcionamento três satélites da constelação GOES (GOES-12, GOES-13 e GOES-15) que adquirem informações da América do Sul, Central e do Norte em intervalos regulares (15-30 minutos). Entretanto, as estimativas das anomalias térmicas são realizadas desde o ano de 1997, compreendendo uma série histórica de 16 anos. Uma das vantagens do uso de satélites geoestacionários de baixa resolução espacial é a alta frequência de observações, que permite a caracterização do ciclo de vida de um determinado foco (Figura 1). Porém, a principal desvantagem é que aproximadamente 5-10% dos focos detectados pelo sensor saturam, inviabilizando a estimativa destas emissões (Pereira et al., 2009).

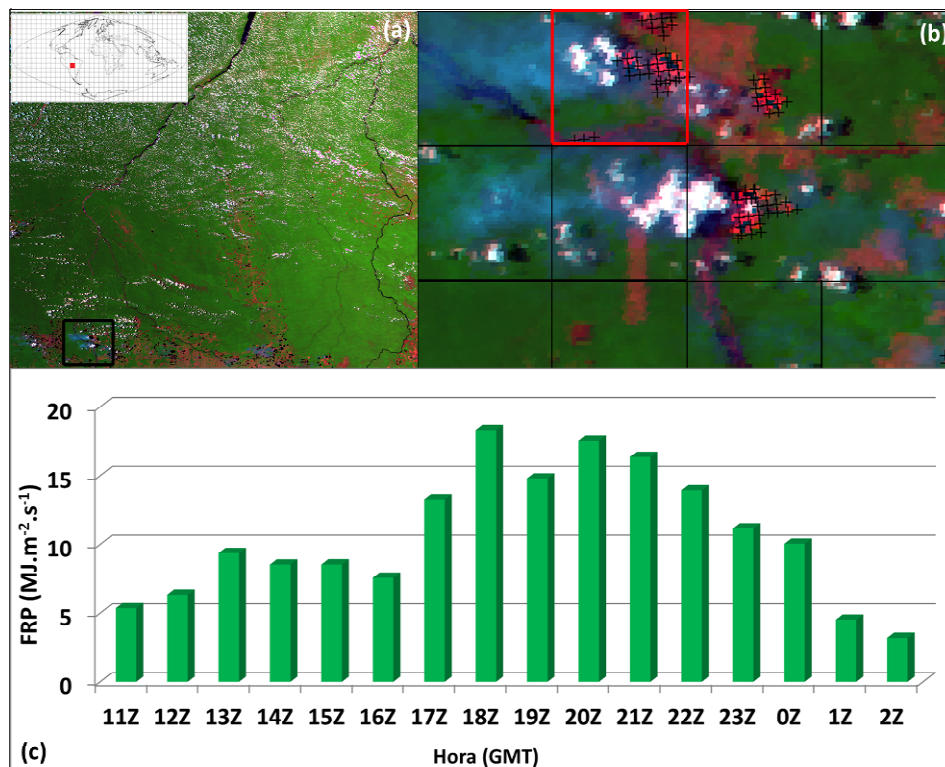


Figura 1. a) Imagem de sensor MODIS/Aqua, composição 1B2G7R, caracterizando os focos de queimada ocorridos no dia 29 de setembro de 2007 (em preto) no arco do desmatamento; b) Área com os focos de queimada detectados e disponibilizados pelo produto MYD14 e quadrículas definidas pela máscara de convolução; e c) Caracterização do ciclo de vida referente aos focos encontrados na quadrícula vermelha e utilizados para a integração da potência radiativa do fogo (FRP, MJ.s⁻¹) ao longo da série temporal.

O sensor MODIS das plataformas Terra e Aqua possuem 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 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min (GIGLIO, 2005). Os produtos que contêm as informações sobre os focos de queimada e FRP são denominados MOD14 e MYD14, conforme metodologia proposta por Kaufman et al. (1996).

2.2 Integração da potência radiativa do fogo

Para a integração dos dados de FRP provenientes dos dados do GOES e do MODIS utilizou-se a metodologia proposta por Kaiser et al. (2012). Entretanto, optou-se por estimar a energia radiativa do fogo (FRE) em grades regulares com resolução espacial de $0,17^\circ$, uma melhora de aproximadamente nove vezes na escala do produto. A primeira etapa para originar as estimativas de FRE consistiu na eliminação de pixels com baixa confiabilidade (valores abaixo de 50% para os produtos MOD14 e MYD14 e flags 4 e 5 para o produto WFABBA/GOES). Ainda, para minimizar o efeito *bow-tie* presente no MODIS, adotaram-se os procedimentos descritos em Freeborn et al. (2010).

Todavia, ao invés de remover os pixels saturados, que ocorrem quando o tamanho e temperatura do fogo superam a sensibilidade do sensor em captar a radiação eletromagnética, e ocasionar uma perda de eventos importantes da queima de biomassa, utilizou-se uma

alternativa para a estimativa da FRP baseada no método da radiância no infravermelho médio (MIR). Esta metodologia é fundamentada na premissa que a radiância espectral ($M\lambda$) emitida na banda centrada em $3,9 \mu\text{m}$ é linearmente proporcional à FRP emitida (Wooster, 2003; Wooster et al., 2005):

$$FRP_{MIR} = \frac{Ag}{a} \sigma \int_{3.76}^{4.03} M(\lambda, T) d\lambda - M_b$$

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (2)$$

em que Ag representa a área do pixel proveniente do imageamento do sensor GOES Imager/GOES; a é a constante baseada na resposta espectral na banda referente ao MIR; $M\lambda$ representa a emitância radiante espectral; c_1 e c_2 são constantes ($3,74 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}$ e $1,44 \times 10^4 \mu\text{m.K}$, respectivamente); λ é o comprimento de onda (μm); T representa a temperatura (Kelvin) e M_b é a emitância radiante para o background, integrada nos comprimentos de onda da banda utilizada (110 MW).

Após o cálculo da FRP para os pixels saturados provenientes do produto WFABBA/GOES, originou-se uma grade composta pelos focos detectados por ambos os sensores. Nesta etapa, pode-se definir o tamanho da matriz que percorre a grade e agrupa os dados de FRP. Consequentemente, a convolução de uma máscara $\eta(\gamma, \kappa)$, de tamanho $M \times N$ (colunas x linhas), sobre a grade com os valores de FRP estimados por diferentes satélites $\xi(\text{lon}, \text{lat})$, resultará na grade (FRP_{grid}) contendo o agrupamento de todos os focos de queimadas para um determinado passo de tempo (*timestep*).

$$FRP_{\text{grid}(\text{lon}, \text{lat}, t)} = \sum_{\gamma=-\alpha}^{\alpha} \sum_{\kappa=-\beta}^{\beta} \eta(\gamma, \kappa) \xi(\text{lon} + \gamma, \text{lat} + \kappa, t) \quad (3)$$

em que a grade resultante é definida para todos os pontos na qual a máscara de tamanho $M \times N$ sobrepõem completamente a imagem ($\text{lon} \in [\alpha, M - \alpha]$, $\text{lat} \in [\beta, N - \beta]$). Ressalta-se que neste trabalho o algoritmo desenvolvido percorre a matriz em grades de 400 km^2 ($20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$). A partir do agrupamento da FRP para todos os focos detectados pelos satélites Aqua, Terra, GOES-10, GOES-11, GOES-12, GOES-13 e GOES-15, as informações da evolução temporal destes focos foram armazenadas. Desta forma, com base nos valores de FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada ponto de grade, a FRE foi calculada pela seguinte fórmula:

$$FRE_{\text{grid}(\text{lon}, \text{lat})} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot (T_{n+1} - T_n) \quad (4)$$

em que $FRE_{\text{lon}, \text{lat}}$ representa a localização geográfica (longitude e latitude) de determinado ponto da grade regular; T o intervalo entre as observações; e n representa a n ésima observação. Nesta estimativa, assume-se que a distribuição espacial observada em parte da grade regular é representativa para a sua totalidade. Ainda, se na etapa de integração da FRP o intervalo entre duas aquisições for maior que 4 horas ($\Delta T > 14400 \text{ s}$), assume-se a hipótese de duas ou mais queimadas independentes, iniciando, desta forma, a integração novamente a partir do $T = 0$.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 exibe a distribuição espacial da FRE para a América do Sul para o período compreendido entre 1997 e 2011, estimada a partir dos dados dos satélites GOES e MODIS. De um modo geral, os maiores valores de FRE estão localizados na borda da Floresta Amazônica, região conhecida como arco do desmatamento, pois é nesta região que ocorrem

os principais processos de extração vegetal e posterior expansão agropecuária. Em muitas áreas da Amazônia, a energia média anual pode chegar a valores superiores a $0,07 \text{ MJ.m}^{-2}$. Desta forma, considerando a área do pixel (400 km^2), pode-se dizer que a energia liberada equivale a aproximadamente $0,2 \text{ PJ.ano}^{-1}$ em algumas regiões. Consequentemente, integrando-se todos os valores, obtém-se, por exemplo, aproximadamente 400 PJ para o bioma Amazônia, valores próximos ao estimado por Kaiser et al. (2012).

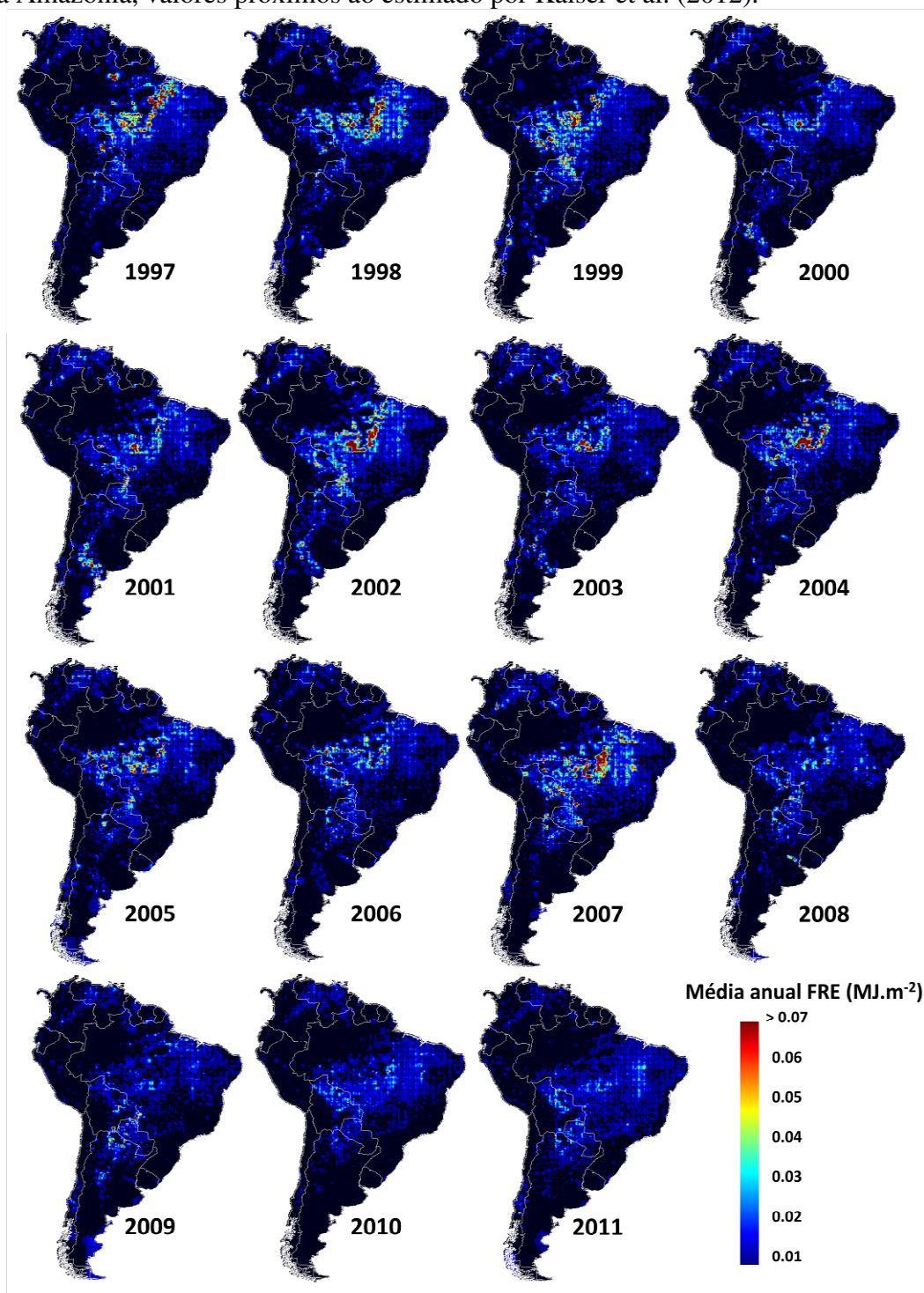


Figura 2. Distribuição espacial da FRE (MJ.m^{-2}) para a América do Sul para o período entre 1997 e 2011, estimada a partir do somatório das FRE diárias para cada ano

Na Figura 2 é possível verificar que os valores de FRE apresentam uma variabilidade temporal e espacial decorrente dos processos econômicos e dos fatores climáticos. Na América do Sul, a época de queimadas ocorre principalmente na estação seca, entre julho e outubro (para a região central do continente), com algumas incidências de queimadas na transição da estação seca para a estação chuvosa. Entre os anos com uma maior incidência de focos e consumo de biomassa pelo fogo, pode-se destacar 2002, 2005 e 2007. Nestes, a distribuição espacial da FRE localiza-se principalmente nos estados brasileiros do Mato Grosso, Pará e Rondônia, que compõem o eixo de expansão agrícola e pecuária do Brasil. Na série temporal de FRE é possível verificar episódios anômalos de queimadas, como por exemplo: I) o ocorrido para o Acre em 2005, superando consideravelmente a média anual para a região; II) a intensa liberação de energia ocorrida em 2003 e 2007 no estado de Roraima. Além disto, percebe-se que nos anos mais chuvosos, a energia liberada diminui consideravelmente em todas as regiões, como observado em 2008-2009. Ainda, nos últimos 16 anos o Mato Grosso (MT) é a região com o maior número de queimadas, superando $1,3 \times 10^6$ focos, seguido pelo Estado do Pará (PA) com $0,9 \times 10^6$ focos (INPE, 2012).

Atualmente encontram-se na literatura alguns métodos para estimar a massa emitida para a atmosfera de diversas espécies de aerossóis e gases traços. Métodos tradicionais baseiam-se na quantidade de biomassa seca disponível, fatores de combustão, além da área queimada e dos fatores de emissão baseados no tipo de vegetação. Entre as limitações destes métodos pode-se citar a maneira estática em abordar o mapa de uso e cobertura da terra e da quantidade de biomassa presente em cada pixel. Os métodos atuais, em sua grande maioria, utilizam a FRP para relacionar o total de biomassa queimada e a emissão de gases traços e aerossóis. Entre as principais vantagens destes métodos está a relação direta com o total de biomassa disponível na vegetação. Além disto, fatores que alteram a eficiência de queima são contabilizados junto à energia liberada, uma vez que a presença de umidade no solo e na vegetação influencia diretamente na redução da FRP.

A Figura 3 mostra a variação temporal (jan/2000 a dez/2011) das estimativas de CO (10^{-6} kg.m⁻²) para todo o Bioma Amazônia, originada a partir da FRP dos sensores MODIS, plataformas TERRA (2000-2011) e Aqua (2002-2011), e GOES Imager (2000-2011), constelação GOES. Nesta figura é possível constatar que os anos com a maior emissão de gases traços e aerossóis foram 2011, 2007, 2005 e 2002, ocasionando valores superiores a 80 kg.m⁻² nos meses de agosto e setembro. Ainda, as estimativas de gases traço e aerossóis, obtidas a partir da FRP, proporciona a relação direta com o total de biomassa disponível na vegetação. Além disto, fatores que alteram a eficiência de queima são contabilizados junto à energia liberada, uma vez que a presença de umidade no solo e na vegetação influencia diretamente na redução da FRP. Porém, neste método as fontes de erro estão associadas à caracterização do ciclo diurno da FRP e às diferentes sensibilidades dos sensores utilizados. Além disto, alguns fatores responsáveis por estas incertezas decorrem das observações simultâneas do foco de queimada e da fumaça liberada (erro aproximado de $\pm 11\%$), a cobertura de nuvens ($\pm 11\%$), a acurácia e consistência da FRP ($\pm 16\%$), entre outros fatores, como exemplificados por Vermote et al. (2009).

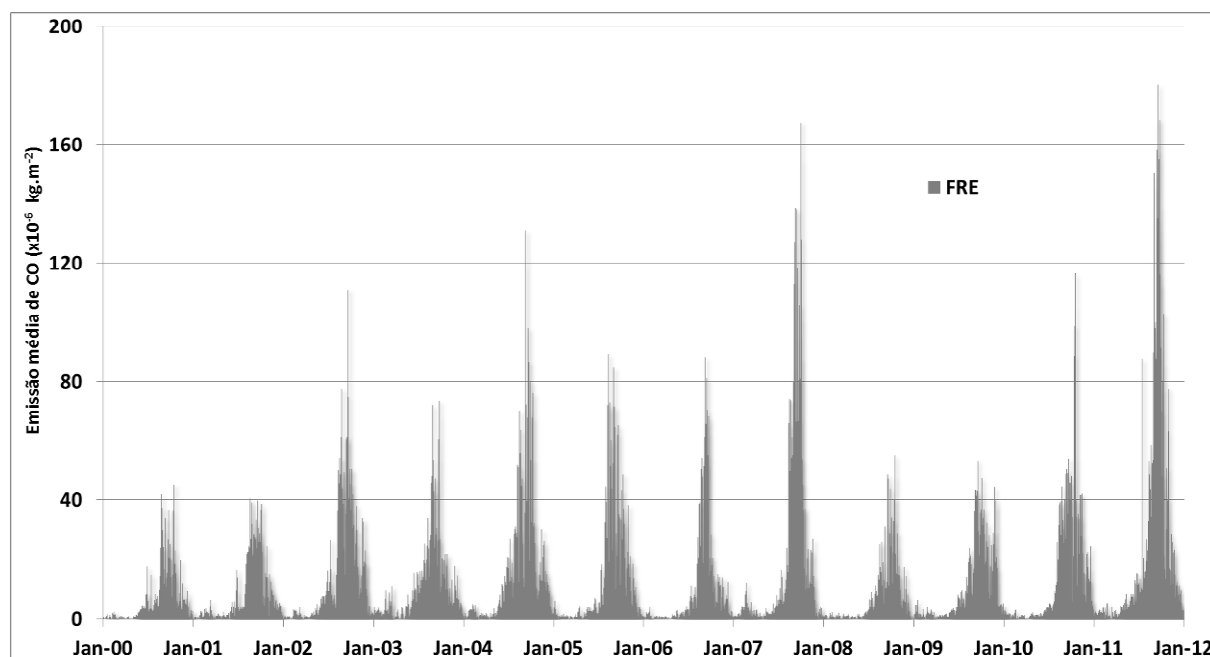


Figura 3. Estimativa dos valores médios de CO provenientes da FRE para o período compreendido entre 2000 e 2011.

4. Conclusões

A queima de biomassa está vinculada essencialmente às atividades agropecuárias e ao desflorestamento, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. Atualmente encontram-se na literatura alguns métodos para estimar a massa emitida para a atmosfera de diversas espécies de aerossóis e gases traços. Métodos tradicionais baseiam-se na quantidade de biomassa seca disponível, fatores de combustão, além da área queimada e dos fatores de emissão baseados no tipo de vegetação. Os métodos atuais, em sua grande maioria, utilizam a FRP para relacionar o total de emissão de gases traços e aerossóis injetados na atmosfera. Além disso, uma melhor estimativa das emissões de gases traços e aerossóis pode ocasionar uma evolução na previsão do tempo e na modelagem climática, pois os gases e aerossóis emitidos no processo de combustão alteram significativamente a incidência de radiação solar e, conseqüentemente, o balanço de radiação, o balanço hídrico, a microfísica das nuvens, a composição química da atmosfera, a troca e os fluxos de calor entre superfície e atmosfera, entre outros elementos meteorológicos.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio (2008/04490-4, 2010/07083-0, 2010/17437-4 e 2011/08000-4).

Referências Bibliográficas

Burling, I. R.; Yokelson, R. J.; Griffith, D. W. T.; Johnson, T. J.; Veres, P.; Roberts, J. M.; Warneke, C.; Urbanski, S. P.; Reardon, J.; Weise, D. R.; Hao, W. M.; De Gouw, J. Laboratory measurements of trace gas emissions from biomass burning of fuel types from the Southeastern and Southwestern United States. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 10, p. 16425-16473, 2010.

Crutzen, P.J.; Andreae, M.O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, p. 1669-1678, 1990.

Freeborn, P.H.; Wooster, M.J.; Hao, W.M.; Ryan, C.A.; Nordgren, B.L.; Baker, S.P.; Ichoku, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires, **J. Geophys. Res.**, v. 113, n. D1, D01102, 10.1029/2007JD008489, 2008.

Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F.; Chatfield, R.; Silva Dias, P.; Artaxo, P.; Andreae, M. O.; Grell, G.; Rodrigues, L. F.; 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.**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.

Ichoku, C.; Giglio, L.; Wooster, M.; Remer, L. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950-2962. doi: 10.1016/j.rse.2008.02.009, 2008.

Kaiser, J. W.; Heil, A.; Andreae, M. O.; et al. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v. 9, p. 527-554, 2012.

Kaufman, Y. J.; Tucker, C. J.; Fung, I. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D7, p. 9927-9939, 1990.

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.

Jordan, N.S.; Ichoku, C.; Hoff, R.M. Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. **Atmospheric Environment**, v. 42, n.9, p. 2007- 2022, 2008.

Pereira, G.; Freitas, S. R.; Moraes, E. C.; Et Al. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 40, p. 6388-6397. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.09.013, 2009.

Prins, E. M.; Menzel, W. P. Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2783-2799, 1992.

Roberts, G.; Wooster, M. J.; Perry, G. L. W.; et al. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **J. Geophys. Res.**, v. 110, 2005.

Vermote, E.; Ellicott, E.; Dubovik, O.; Lapyonok, T.; Chin, M.; Giglio, L.; Roberts, G.J. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power. **Journal of geophysical research**, v. 114, n. D18, 2009.

Wooster, M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 21 (doi: 10.1029/2002GL015487), 2002.

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.

Xu, W.; Wooster, M.; Roberts, G.; Freeborn, P. New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1876-1895, 2010.