

Avaliação da assimilação da potência radiativa do fogo no Brazilian Biomass Burning Emission Model e comparação com inventários utilizados no SAMBBA

Gabriel Pereira¹
Saulo Ribeiro de Freitas²
Rafael Stockler Santos Lima²
Karla Maria Longo²

¹ Universidade Federal de São João del-Rei – DEGEO/UFESJ
Campus Tancredo Neves, Av. Visconde do Rio Preto, s/n - 36301-360 – São João del-Rei –
MG, Brasil
pereira@ufesj.edu.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{ saulo.freitas, rafael.stockler, karla.longo }@cptec.inpe.br

Abstract. Wildfires devastate large areas of shrublands, forest and grasslands over the world. Biomass burning plays a trade-off role in the ecosystem services arena by opening spaces for agriculture or livestock, controlling pests, or recycling nutrients. Also, this phenomena modify the carbon-cycling mechanisms, the atmospheric composition, and biodiversity patterns. Therefore, this work aims to improve the Fire radiative power (FRP) method for real-time assimilation in the Brazilian Biomass Burning Emission Model (3BEM) derived from the Aqua and Terra satellites, the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) and the Meteosat Second Generation (MSG) data. Initial results indicates that the spatial distribution of Carbon Monoxide (CO) for the years 2000, 2002, 2010 and 2012 that uses de FRP present higher emissions but these differences have annual variability. For example, in 2000 and 2002, CO emissions in the states of Mato Grosso and Rondonia are lower than in the 3BEM. However, in 2010 and 2012 this sign is reversed. Moreover, each inventory contains certain specificity, the rate of emission of CO estimated by 3BEM and FINN models have a tendency to overestimate these emissions in nearby regions of deforestation arc (in Amazon rainforest border), especially in the state of RO and Midwest portion of the state of Mato Grosso. This feature is not seen in the models that uses the FRP (3BEM_FRP and GFAS) to estimate the biomass burning emissions. Also, models based on FRP presentes a higher rate of CO in eastern portion of the Cerrado, especially in the border between Bahia and Tocantins, with 3BEM_FRP model higher than GFAS.

Palavras-chave: fire radiative energy, biomass burning, aerosol and trace gases emission, energia radiativa do fogo, queimadas, emissão de aerossóis e gases traços.

1. Introdução

Mundialmente a queima de biomassa está vinculada essencialmente às atividades agropecuárias e ao desflorestamento, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. A queima de biomassa afeta significativamente o meio ambiente, alterando o balanço de energia, os ciclos biogeoquímicos, o clima e ocasionam problemas de saúde em populações localizadas em áreas por onde estes gases e aerossóis escoam. Além disso, alguns gases emitidos no processo de combustão da vegetação (CO, CO₂, CH₄, O₃ troposférico, 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, um dos gases do efeito estufa (IPCC, 2001).

Atualmente encontram-se na literatura alguns métodos para estimar a massa emitida para a atmosfera de diversas espécies de gases traços e aerossóis. 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 (WOOSTER et al., 2005; KAISER et

al., 2012). 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 influenciam diretamente na redução da FRP.

A taxa na qual a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo, ou a potência radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP) liberada no processo de combustão, constitui-se como um indicador da quantidade de biomassa consumida ou mesmo da taxa de emissão de gases traços e aerossóis liberados para a atmosfera. Ao se conhecer a distribuição de temperatura no interior de um *pixel*, a FRP integrada em todos os comprimentos de onda, pode ser calculada pela equação 2.1 (WOOSTER et al., 2005):

$$FRP = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (1)$$

em que FRP representa a energia radiativa do fogo ($J.s^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$), A_n representa a área fracional (m^2) da n -ésima componente termal, T_n^4 é a temperatura (K) da n -ésima componente e ε representa a emissividade. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a assimilação da FRP no modelo 3BEM e comparar os resultados com os inventários existentes para o ano de 2012.

2. Materiais e Métodos

2.1 Produtos orbitais

Para as estimativas de energia radiativa do fogo (FRE) utilizaram-se diferentes produtos orbitais. Nas plataformas Terra e Aqua, os produtos de focos de queimada e de potência radiativa do fogo (FRP) são denominados MOD14 e MYD14. Estes produtos, com resolução espacial nominal de 1 km, são disponibilizados em formato HDF e suas informações separadas em diferentes camadas (GIGLIO, 2005). O sensor GOES *Imager*, a bordo da constelação de satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), cobre faixas do espectro eletromagnético referente ao visível e ao infravermelho termal. O produto derivado deste sensor é denominado *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA), disponibilizado a cada 15 minutos (PRINS et al., 1992). O *Meteosat Second Generation* (MSG) é um satélite geoestacionário desenvolvido pela agência espacial europeia (*European Space Agency* - ESA) em parceria com a organização europeia para a exploração de satélites meteorológicos (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* – EUMETSAT). O principal sensor a bordo deste satélite, o *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI), possui 12 bandas que adquirem informações nas faixas espectrais do espectro eletromagnético referentes ao visível, infravermelho próximo, médio e termal (ROBERTS et al., 2005). Desta forma, os três sensores descritos acima foram utilizados no processamento e estimativa da FRP e FRE e respectiva assimilação no modelo 3BEM.

2.2 Metodologia

Para cada produto orbital (MOD14, MYD14, WFABBA, METEOSAT), realiza-se um pré-processamento para converter os produtos em diferentes formatos (HDF4 e HDF5) no padrão *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) contendo as

informações necessárias as demais etapas da assimilação. Os dados Meteosat são disponibilizados no formato *Hierarchical Data Format* versão 5 (HDF5), enquanto que os dados MODIS são disponibilizados em HDF4. Neste caso, ambos são processados na linguagem de programação *Interactive Data Language* (IDL) ou em programas FORTRAN.

No pré-processamento dos dados contendo a FRP provenientes dos produtos MOD14 e MYD14, os pixels com baixa confiabilidade (menor que 30%) são eliminados e a área do *pixel* é calculada (Equação 2).

$$A_{real} = \left\{ R_e \cdot S \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2 \theta}} - 1 \right] \right\} * \left\{ [r \cdot S (\cos \theta - \sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2 \theta})] \right\} \quad (2)$$

$$\theta = \left(-\frac{1}{2} N \cdot S + \frac{1}{2} S + (i - 1) S \right) \quad (3)$$

em que R_e é igual ao raio da Terra (6378,13 km); h a altitude do sensor (705 km), r é a soma de $R_e + h$; $S = p/h$, sendo que 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 da coluna do *pixel*.

Para eliminar os efeitos *bow-tie* nas estimativas de FRP pode-se utilizar alguns ajustes com o intuito de minimizar a replicação dos focos de queimada, decorrentes da sobreposição da área imageada (Equação 4). Neste caso, o algoritmo que realiza o pré-processamento dos dados MODIS utiliza a equação proposta por Kaiser et. al. (2012), em que a FRP estimada pelo sensor MODIS (FRP_e) é ponderada pelo cosseno ao quadrado do ângulo de varredura (θ_i).

$$FRP_c = FRP_e \cdot \cos^2 \theta_i \quad (4)$$

No pré-processamento dos focos de queimada provenientes do WFABBA, *pixels* com baixa confiabilidade (flag = 5) são eliminados. Entretanto, ao invés de remover os *pixels* saturados, utiliza-se a premissa que a radiância espectral ($M\lambda$) emitida na banda centrada em 3,9 μm é linearmente proporcional à FRP emitida (WOOSTER et al., 2005):

$$FRP_{MIR} = \frac{Ag}{a} \sigma \int_{3,76}^{4,03} M(\lambda, T) d\lambda - M_b \quad (5)$$

$$M(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \frac{c_1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (6)$$

em que Ag representa a área do *pixel* 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 ($3,74 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $1,44 \times 10^4 \text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$, 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 (110 MW).

No pré-processamento dos dados do Meteosat, os dados disponibilizados em formato HDF5 são convertidos para ASCII a partir de um programa em IDL ou FORTRAN. Neste algoritmo, os pixels com confiabilidade menor que 30% são retirados da análise. A subestimativa da FRP ocorre principalmente pela diferença entre as resoluções espaciais dos sensores, inviabilizando a detecção de pequenos focos de queimada pelo Meteosat. Em geral,

os valores de FRP são subestimados entre 30-50%. Neste caso, no pré-processamento dos dados provenientes do Meteosat e do GOES, os valores de FRP são corrigidos em relação aos dados MODIS.

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 $\xi(lon, lat)$, resultará na grade (FRP_{grid}) contendo o agrupamento de todos os focos de queimadas para um determinado *timestep*.

$$FRP_{grid(lon, lat, t)} = \sum_{\gamma=-\alpha}^{\alpha} \sum_{\kappa=-\beta}^{\beta} \eta(\gamma, \kappa) \xi(lon + \gamma, lat + \kappa, t) \quad (7)$$

em que a grade resultante é definida para todos os pontos na qual a máscara de tamanho $M \times N$ sobrepõem completamente a imagem ($lon \in [\alpha, M - \alpha]$, $lat \in [\beta, N - \beta]$). Ainda, com base nos valores de FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada ponto de grade, a FRE é estimada pela seguinte fórmula:

$$FRE_{grid(lon, lat)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot (T_{n+1} - T_n) \quad (8)$$

em que $FRE_{lon, lat}$ representa a localização geográfica (longitude e latitude) de determinado ponto da grade regular; T o intervalo entre as observações; e n representa a enésima observação. Em relação ao código anterior, ressalta-se a estimativa da área de influência do fogo (fração chamas e fração *smoldering*), além da estimativa do fluxo de energia convectiva, necessário ao modelo *plume-rise* implementado no CCATT-BRAMS.

Neste trabalho, adaptou-se o modelo 3BEM para assimilar os dados de FRE, área queimada e energia convectiva. Assim, a Equação 3.9 pode ser expressa, em termos da FRE:

$$Q_{plumerise}^{[\epsilon]}(t) = \frac{gf(t)}{p_0 \Delta V} \cdot (EF^{[\epsilon]} \cdot \mathfrak{G} \cdot FRE_{grid(lon, lat)}) \quad (9)$$

em que \mathfrak{G} representa o coeficiente relacionado com o consumo de biomassa (1,37 kg.MJ⁻¹, KAISER et al., 2012) e $FRE_{grid(lon, lat)}$ corresponde aos valores de energia liberada pelo fogo estimados pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho.

3. Resultados e Discussões

A espacialização dos inventários de CO (kg.m⁻²) para os anos de 2000, 2002, 2010 e 2012 (ano em que ocorreu a campanha do South American Biomass Burning Analysis – SAMBBA) estimados a partir do 3BEM e 3BEM_FRP podem ser visualizados na Figura 1. Nestas, são apresentados a emissão de CO para o período entre os meses de setembro a outubro. Comparando as duas estimativas, percebe-se que o método que utiliza a FRP proveniente dos satélites Aqua, Terra, Meteosat e GOES, resultou em maior emissão em algumas áreas e menores emissões em áreas distintas, principalmente em algumas regiões da Amazônia. Ainda, estas diferenças apresentam variabilidade anual. Por exemplo, em 2000 e 2002, as emissões nos estados do MT e RO são mais baixas no 3BEM do que no 3BEM_FRP. Porém, em 2010 e 2012 este sinal se inverte.

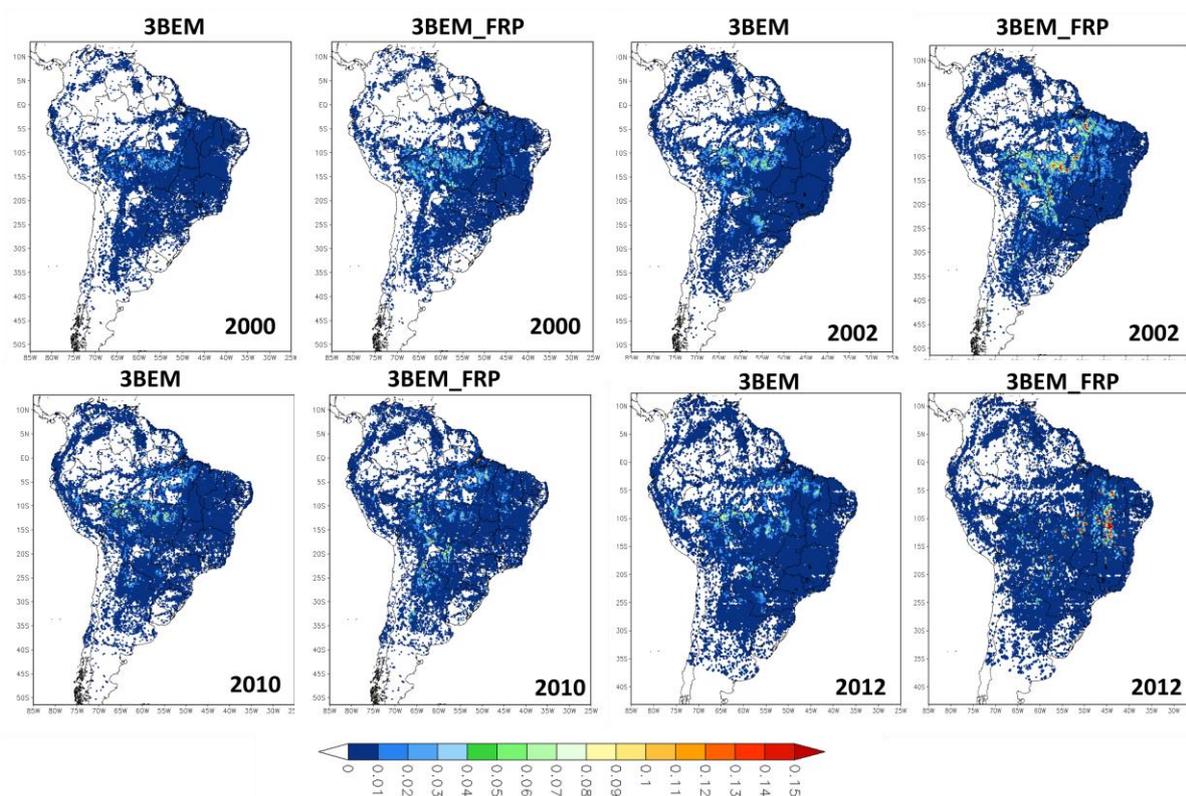


Figura 1. Distribuição espacial de CO [kgm⁻²] estimado a partir do 3BEM (a esquerda) e pelo 3BEM_FRP (a direita) para 2000, 2002, 2010 e 2012, período entre setembro e outubro.

Para o período do SAMBBA (setembro e outubro de 2012), os inventários utilizados nos modelos operacionais que serviram para o planejamento dos voos (3BEM, *Fire INventory from NCAR* - FINN e *Global Fire Assimilation System* - GFAS) e o novo inventário 3BEM-FRP foram intercomparados (Figura 2). Os inventários estimados pelo FINN (WIEDINMYER et al., 2011) são disponibilizados diariamente com resolução espacial de 1 km, com cobertura global. O método para estimar a emissão baseia-se nos mesmos procedimentos metodológicos adotados pelo 3BEM, que utiliza fatores de emissão para a espécie (g.kg⁻¹), a área queimada (m²), a biomassa média por unidade de área em dado ecossistema (g.m⁻²), a fração de biomassa acima do solo (kg) e a eficiência de queima (%). O GFAS (KAISER et al., 2012) utiliza os dados do sensor MODIS e sua relação com a energia liberada em cada *pixel* (FRP).

Neste contexto, cada inventário possui determinada especificidade, a taxa de emissão de CO dos modelos 3BEM e FINN possuem a tendência a valores mais altos nas regiões próximas ao arco do desmatamento, principalmente no estado de RO e na porção centro-oeste do estado do MT. Esta característica não é visualizada nos modelos que utilizam as estimativas de FRP (3BEM_FRP e GFAS). Outra característica é que os modelos baseados na FRP apresentam uma maior taxa de emissão de CO para a porção leste do bioma Cerrado, principalmente na divisa da Bahia com o Tocantins. Entretanto, o modelo 3BEM_FRP apresenta valores mais elevados que o GFAS nesta região.

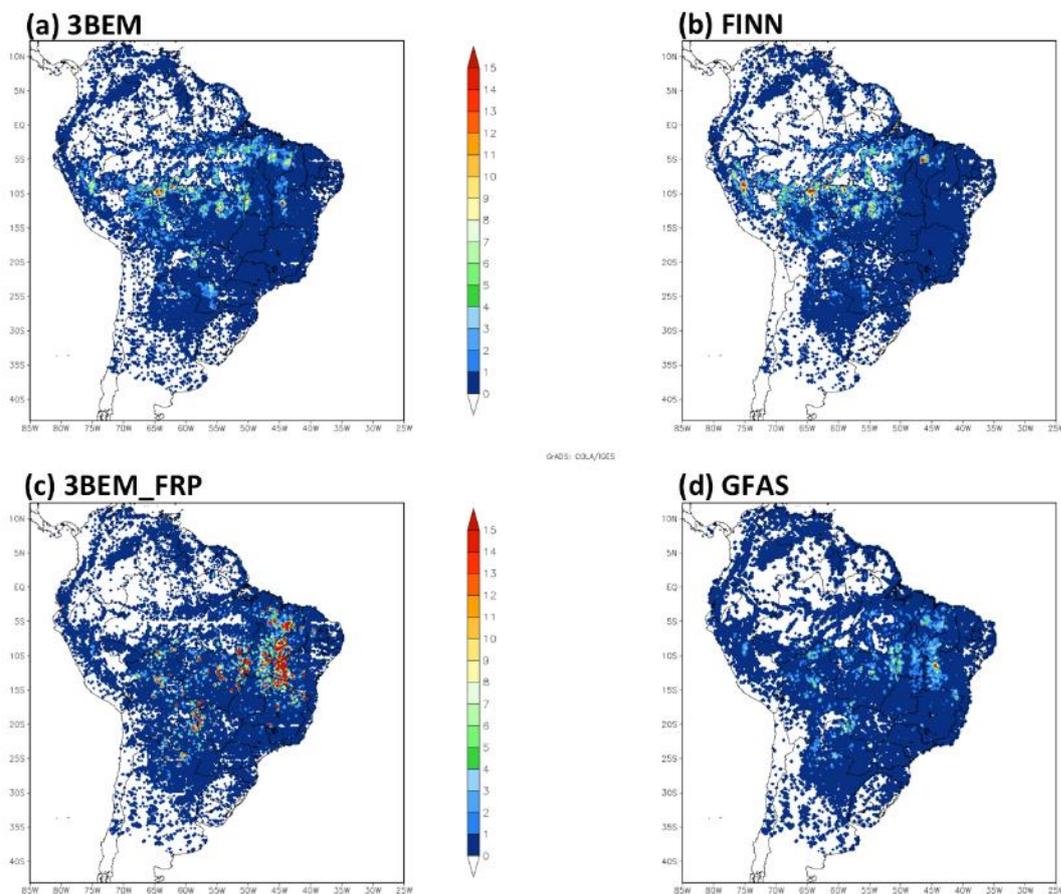


Figura 2. Emissões de CO (10^4 kg m^{-2}) para o período de setembro-outubro de 2012, estimados por (a) 3BEM, (b) FINN, (c) 3BEM_FRP, e (d) GFAS.

A regressão da comparação entre os diferentes inventários para a América do Sul pode ser visualizada na Figura 3. Em geral, as melhores correlações entre os dados são encontradas entre os modelos 3BEM e FINN, com aproximadamente 87% de correlação. Porém, o modelo FINN apresenta estimativas das taxas de CO superiores ao 3BEM, isto ocorre praticamente em todos os grids, com exceção dos grides 4 e 7, centralizados no Mato Grosso e Paraguai. Ainda, o modelo GFAS apresenta as menores estimativas de CO, quando comparados com os outros inventários, com exceção do gride 5 (oeste da Bahia). Neste contexto, o modelo 3BEM_FRP apresentou a melhor correlação com o GFAS (aproximadamente 80%), neste caso, as emissões proveniente do 3BEM_FRP apresentam valores maiores, principalmente para os grides 5, 6 e 7. Em geral, o 3BEM_FRP apresenta valores mais baixos que os demais modelos quando comparadas as emissões em RO e MT.

As medidas realizadas durante o experimento SAMBBA indicaram que, sistematicamente, o CCATT subestimou a carga de fumaça na região leste de MT e sobre TO, onde a emissão do 3BEM_FRP apresenta os maiores valores. Ainda, em relação ao noroeste de Rondônia, o modelo CCATT apresenta muito aerossol, associado a um conjunto de focos que aparece no 3BEM e no 3BEM_FRP, entretanto, o 3BEM_FRP apresenta valores mais baixos, indicando um melhor ajuste em relação ao observado.

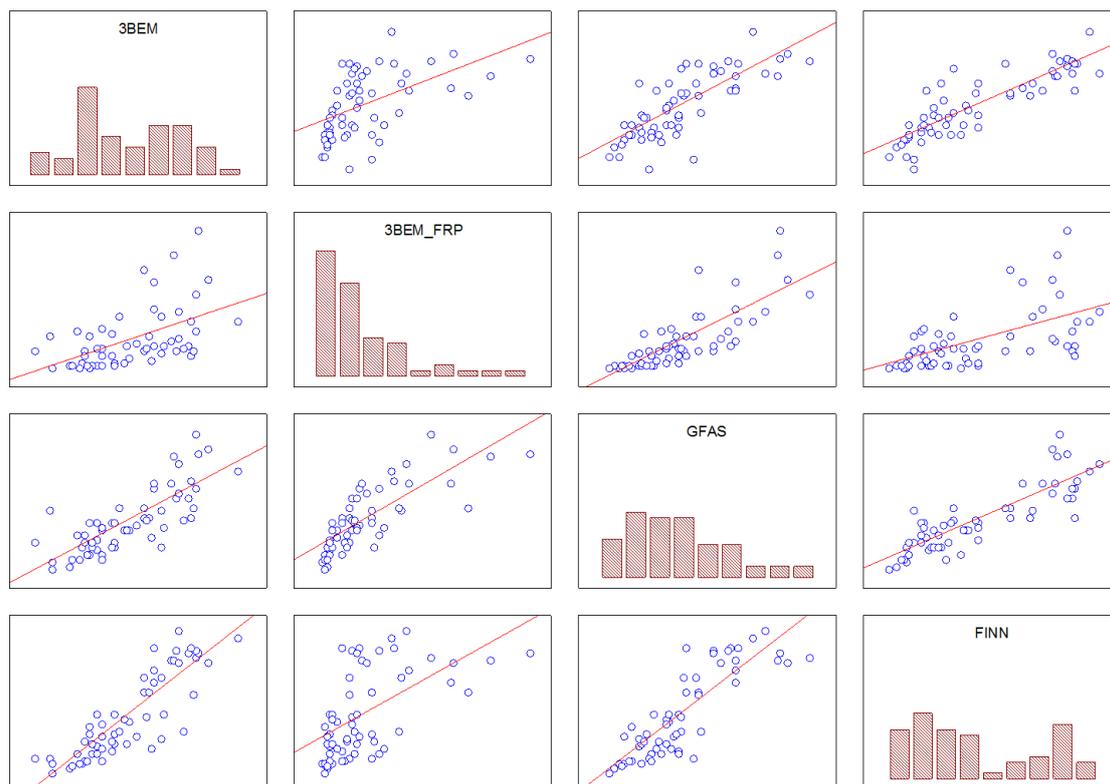


Figura 3. Regressão entre os diferentes inventários de emissão de monóxido de carbono (CO) para os modelos 3BEM, 3BEM_FRP, FINN e GFAS.

4. Considerações Finais

A modelagem das emissões e a assimilação em tempo quase-real das emissões de gases traços e aerossóis são de fundamentais importâncias para detectar e mitigar os impactos das altas concentrações de gases traços e aerossóis, que além de poderem ser nocivos aos seres humanos, dificultam o transporte público. Atualmente, a maioria dos métodos desenvolvidos para estimar a quantidade de gases traços e aerossóis desprendida no processo de queima de biomassa vegetal utiliza a FRP. Entre as principais vantagens destes métodos está a relação direta da FRP 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.

Em geral, o algoritmo acoplado ao modelo 3BEM (modelo de emissão que utiliza a relação entre a massa de biomassa queimada e os fatores de emissão para cada espécie) que se baseia na FRP (3BEM_FRP) e nas estimativas de área de influência do fogo para diferentes formações vegetais indicam os dados estimados por este algoritmo são subestimados em até 20%, porém, em alguns casos é possível encontrar valores acima dos observados (superestimados em até 20%).

5. Referências Bibliográficas

Giglio, L. **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 03/08/2010.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Third Assessment Report (TAR), climate change, the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the international panel on climate change**, New York : Cambridge Univ. Press, 2001.

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.

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.

Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., And Soja, A. J. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning, **Geosci. Model Dev.**, 4, 625-641, doi:10.5194/gmd-4-625-2011, 2011.

Wooster, M.J.; Roberts, G.; Perry, G.; Kaufman, Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21111: doi: 10.1029/2005JD006318, 2005.