

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/6: 1247-1264
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE EMISSÃO 3BEM E 3BEM_FRP NO ESTADO DE RONDÔNIA

Evaluation of 3BEM and 3BEM_FRP Emissions Models in the Rondônia State

**Francielle da Silva Cardozo¹, Gabriel Pereira²,
Guilherme Augusto Verola Mataveli³, Yosio Edemir Shimabukuro³
& Elisabete Caria Moraes³**

¹Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ

Programa de Pós Graduação em Geografia – PPGEOG

Avenida Visconde do Rio Preto, s/n, Colônia do Bengo, São João del-Rei/MG, CEP: 36301-360, Brasil
franciellecardozo@gmail.com

²Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ

Departamento de Geociências – DEGEO

Avenida Visconde do Rio Preto, s/n, Colônia do Bengo, São João del-Rei/MG, CEP: 36301-360, Brasil
pereira@ufs.edu.br

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos/SP, CEP: 12227-010, Brasil
{mataveli ,yosio, bete}@dsr.inpe.br

Recebido em 25 de Novembro, 2014/ Aceito em 03 de Agosto, 2015

Received on November 25, 2014/ Accepted on August 03, 2015

RESUMO

As queimadas consomem grandes quantidades de biomassa e são consideradas como uma importante fonte de emissões de gases traços e aerossóis para a atmosfera, fatores que causam a modificação das características físico-químicas e biológicas da superfície terrestre e do sistema climático, além de alterar o balanço de energia atmosférico, ocasionando variações no clima local, regional e global. Assim, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos inventários de emissão de CO pelos modelos *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) e *Brazilian Biomass Burning Emission Model with Fire Radiative Power* (3BEM_FRP), obtendo-se, desta forma, o indicativo da superestimativa e subestimativa das emissões originadas pelos modelos no estado de Rondônia. Esta avaliação foi realizada a partir dos dados de biomassa viva acima do solo provenientes de SAATCHI *et al.*, 2009 e dos inventários de área queimada originados a partir do mapeamento em imagens dos produtos MOD09GA e MOD09GQ do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) no período de 2000 a 2011. Os resultados indicam que, para todos os anos analisados, o modelo 3BEM apresentou uma considerável superestimativa nos dados de CO, que girou em torno de 50%. Presume-se que a superestimativa dos dados de CO em áreas de floresta ocorre devido à contabilização do número de focos de queimadas mesmo nos dias em que a queimada já ocorreu e a biomassa diminuiu, e nas áreas de pastagem e de cerrado, que possuem uma quantidade menor de biomassa, possivelmente ocorre a contabilização repetida dos focos ao longo dos dias, sem levar em consideração a modificação na biomassa. Por outro lado, o modelo 3BEM_FRP apre-

sentou resultados mais semelhantes comparados com os dados de referência, apresentando pequenas superestimativas na emissão do CO, em torno de 5%, denotando um melhor desempenho.

Palavras chaves: Queimadas, Modelos de Emissão, Rondônia.

ABSTRACT

Fires consume large amount of biomass and are considered as a major source of emissions of trace gases and aerosols into the atmosphere, causing the modification of physicochemical and biological characteristics of the land surface and the climate system, and altering the energy balance of the atmosphere, causing variations in local, regional and global climate. Then the objective of this work is the evaluation of CO emission inventories by Brazilian Biomass Burning Emission Model (3BEM) and Brazilian Biomass Burning Emission Model with Fire Radiative Power (3BEM_FRP), obtaining the indicative of overestimation and underestimation of CO emissions in the Rondônia state. The evaluation was performed based on aboveground live biomass data from SAATCHI *et al.* (2009) and burned areas inventories from the mapping in MOD09GA and MOD09GQ products of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor images in the period of 2000 to 2011. The results indicate that for all analyzed years, the 3BEM model presented a considerable overestimation of 50% in CO data. The overestimation of CO data in forest areas probably occurs due to the accounting of active fires even on days where the fires already occurred and the biomass declined. In grassland and savanna areas, which have a much lower biomass, the overestimation possibly occurs due to the repeated accounting of active fires during the days, without considering the change in biomass. Moreover, it is noticed that 3BEM_FRP model presented more similar results compared with the reference data, with small overestimates in CO emission, around 5%, showing better performance.

Keywords: Burning, Emission Models, Rondônia.

1. INTRODUÇÃO

As queimadas são um fenômeno comum em grande parte da superfície terrestre, podendo gerar, em alguns casos, prejuízos econômicos e sociais, além de serem responsáveis por mudanças no uso e cobertura da terra (ANDREAE e MERLET, 2001; VERAVERBEKE *et al.*, 2014). Devido ao consumo da biomassa, as queimadas liberam para a atmosfera grandes quantidades de gases traços e aerossóis, fatores que alteram as características físico-químicas e biológicas da superfície terrestre e do sistema climático, ocasionando variações no clima local, regional e global (ICHOKU e KAUFMAN, 2005; MORAES *et al.*, 2004; CARDOSO *et al.*, 2009).

A combustão da biomassa florestal provenientes das queimadas promovem uma concentração elevada de partículas de aerossóis e gases traço na atmosfera. Estimativas indicam que cerca de 4 milhões de toneladas de carbono provenientes das queimadas são liberados anualmente no mundo, sendo que aproximadamente 80% ocorrem em regiões tropicais (CRUTZEN e ANDREAE, 1990; ANDREAE e MERLET, 2001; ANDREAE *et al.*, 2004).

Os principais gases e aerossóis liberados

são o dióxido de carbono (CO₂), o vapor de água (H₂O), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e materiais particulados. Entretanto, o transporte das emissões provenientes das queimadas podem influenciar regiões distantes das fontes emissoras, extrapolando a escala de atuação local e modificando o padrão de distribuição de energia em escala regional e global (KAUFMAN, 1996; ANDREAE *et al.*, 2004; LONGO *et al.*, 2013).

Atualmente encontram-se disponíveis diversos produtos que estimam a área queimada a partir de diferentes sensores como, por exemplo: o GLOBSCAR obtido a partir do *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR-2) a bordo do satélite *European Remote-Sensing Satellites* (ERS-2); o *Global Burnt Area* do sensor VEGETATION a bordo do satélite *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT); e os produtos MCD45 e MCD64 do sensor MODIS (SIMON *et al.*, 2004; TANSEY *et al.*, 2004; ROY *et al.*, 2002; LI *et al.*, 2004). Porém, os valores estimados por estes produtos quando comparados com dados observados em campo mostram diferenças significativas, ocasionando incertezas na estimativa da biomassa total queimada.

Na literatura, o primeiro método empregado

para assimilar a quantidade de gases traços e aerossóis em modelos numéricos de emissão utiliza o total de biomassa consumida, estimado a partir da área queimada e da densidade de biomassa (KAUFMAN *et al.*, 1992, LONGO *et al.*, 2010). Atualmente, os inventários de emissão são gerados a partir da Potência Radiativa do Fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP), que permite relacionar o total de biomassa queimada com as emissões de gases traços para a atmosfera (WOOSTER *et al.*, 2005; PEREIRA *et al.*, 2009; KAISER *et al.*, 2012; SHIMABUKURO *et al.*, 2013).

No entanto, a validação dos inventários de emissão a partir de dados obtidos em campo é difícil de ser realizada, devido aos altos custos envolvidos nos trabalhos de campo e ao fato de que dados pontuais geralmente não são representativos das queimadas, já que esse fenômeno é muito dinâmico. Assim, embora as estimativas das emissões provenientes da queima de biomassa a partir de dados orbitais tenham aumentado consideravelmente na última década, as incertezas nos dados de entrada e as distintas metodologias utilizadas ocasionam erros de até 50% nos valores estimados (VERMOTE *et al.*, 2009).

Entre as principais fontes de distorções podem-se citar os erros nas estimativas de umidade do solo e conteúdo de água no interior da planta, fatores de emissão para cada espécie e generalização de diversas propriedades físicas para grandes áreas (WOOSTER *et al.*, 2005; ROBERTS *et al.*, 2005, KAISER *et al.*, 2012). Ainda, outras duas grandes fontes de distorções decorrem da estimativa da área queimada obtida a partir de sensores de baixa resolução espacial e a partir de produtos de focos ativos, não fornecendo um parâmetro de entrada confiável para a obtenção da biomassa consumida pelo fogo (PEREIRA *et al.*, 2009; SHIMABUKURO *et al.*, 2013).

Com isso, uma alternativa para validar os inventários de emissão é o uso de inventários de área queimada, uma vez que a biomassa queimada e suas emissões estimadas a partir do mapeamento da área queimada apresentam um custo relativamente baixo e proporcionam validar as estimativas obtidas em toda a área de estudo analisada. Em geral, modelos de emissão,

acoplados a modelos numéricos, utilizam os focos de queimada ou a FRP para estimar a área queimada e a biomassa queimada e, a partir desta, simulam o transporte atmosférico das emissões de gases traços e aerossóis (LONGO *et al.*, 2010).

Porém, a validação das emissões de gases traços e aerossóis e da biomassa queimada nestes modelos é dificultada pelo pouco número de trabalhos de campo. Além disto, estes trabalhos de campo consistem em estimar a concentração de Monóxido de Carbono (CO) e Material Particulado com diâmetro menor que 2,5 μ m (PM_{2,5 μ m}) e comparar com as concentrações simuladas para determinado ponto da grade do modelo (FREITAS *et al.*, 2009; ROSÁRIO *et al.*, 2013). Neste contexto, a estimativa de inventários de área queimada e, posteriormente, da biomassa queimada, podem auxiliar consideravelmente na validação destes modelos, uma vez que o método permite a distribuição de parcelas amostrais por todos os biomas do Brasil e da América do Sul, sem necessitar de recursos financeiros elevados, avaliando, desta forma, o comportamento do modelo em sua totalidade e não pontualmente.

Portanto, estimativas da biomassa consumida pelas queimadas obtidas a partir da área queimada é uma variável fundamental para a avaliação e calibração de modelos de emissão. Ainda, a utilização destas informações para a calibração de modelos de emissão pode ocasionar um aprimoramento da previsão do tempo e da modelagem climática, pois os gases e aerossóis emitidos pelas queimadas 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 (ICHOKU; ELLISSON, 2014).

Conseqüentemente, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos inventários de emissão de CO pelos modelos *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) e *Brazilian Biomass Burning Emission Model with Fire Radiative Power* (3BEM_FRP), obtendo-se, desta forma, o indicativo da superestimativa e subestimativa das emissões originadas pelo modelo no estado de Rondônia.

2. ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Rondônia está inserido inteiramente no bioma Amazônia, nas coordenadas geográficas 09°45' e 8°00' de latitude sul e 66°50' e 59°50' de longitude oeste. Possui uma área que abrange aproximadamente 237.500 km², fazendo divisa com o Estado do Amazonas à Norte, Acre à Oeste e Mato Grosso à Leste e Sul, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

A vegetação predominante na área de estudo, segundo dados do IBGE (2004), é a vegetação secundária e atividades agrárias da Região da Floresta Ombrófila Aberta, com 73.306 km², localizada na grande mancha desmatada na área central do Estado. Atualmente, segundo o mapa de uso da terra do IBGE (2012),

essa área abrange locais com a presença de pecuária de grande porte, cultivos permanentes diversificados e extrativismo vegetal.

A segunda classe de vegetação predominante é composta pela região da Floresta Ombrófila Aberta Submontana, com 64.841 km², que apresenta atualmente uma redução de 52,5% de sua área original, substituídas por áreas de conservação de uso sustentável (13.497 km²), por áreas de pecuária de grande porte e cultivos permanentes diversificados (7.998 km²) e por áreas de extrativismo vegetal (12.572 km²) e a terceira classe é composta pela Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas, com 31.972 km², que apresenta uma redução de 52,6%, devido à substituição por áreas de conservação de uso sustentável (13.268 km²) e por áreas de extrativismo vegetal (3.568 km²) (CARDOZO *et al.*, 2014).

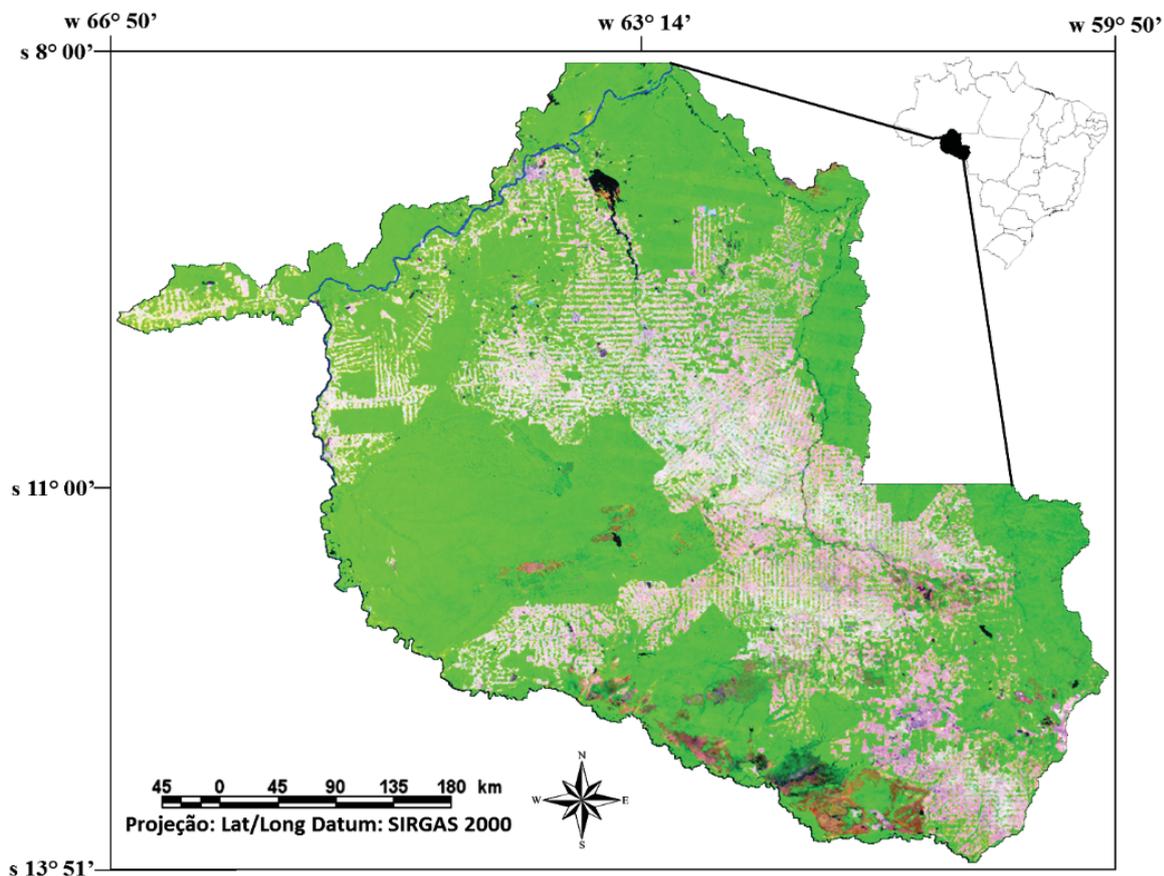


Fig. 1 - Localização da área de estudo. Produto MOD09 do sensor MODIS, composição 3B4G6R do dia 10 de setembro de 2010.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A seguir serão descritos os dados utilizados e os procedimentos metodológicos adotados para a geração dos resultados.

3.1 Dados do Sensor MODIS

O mapeamento das áreas queimadas no Estado de Rondônia foi realizado a partir de imagens do sensor MODIS, a bordo dos satélites

Terra (produtos MOD) e Aqua (produtos MYD). Os produtos utilizados foram o MOD09GA e MOD09GQ, que representam a reflectância espectral da superfície diariamente, possuindo 7 bandas e resolução espacial de 500 metros (MOD09GA) e 2 bandas e resolução espacial de 250 metros (MOD09GQ). A área de estudo compreende o Estado de Rondônia (tiles V09, V10, H11 e H12) e o período estudado abrangeu os meses de junho a novembro no período de 2000 a 2011, totalizando 835 imagens utilizadas.

3.2 Produtos de Anomalias Termiais

Os modelos 3BEM e 3BEM_FRP utilizam diversos produtos para estimar a biomassa queimada, dentre eles pode-se citar o MOD14 e MYD14 do sensor MODIS, que fornece a localização dos focos de queimadas e a FRP baseado na emissão dos alvos centrados em 4 μ m e 11 μ m (ICHOKU *et al.*, 2008), com resolução espacial de 1 km e disponibilização diária dos produtos; o produto *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) do sensor GOES *Imager*, abordo do *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES), que cobre as faixas do visível ao infravermelho termal separados em 5 bandas e com resolução espacial de 4 km (PRINS *et al.*, 1992); e o sensor *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) abordo do satélite *Meteosat Second Generation* (MSG), que possui 12 bandas espectrais referentes ao visível, infravermelho próximo, médio e termal, com resolução temporal de 15 minutos e resolução espacial que varia de 3 km no NADIR até 11 km nas bordas, sendo que no Brasil a resolução espacial média é de 6 km. Ainda, o modelo 3BEM também utiliza o sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) do NOAA's *Polar Orbiting Environmental Satellites* (POES), que possui 6 bandas espectrais, abrangendo as regiões do vermelho e do infravermelho próximo, médio e termal, com resolução espacial de 1 km.

3.3 Dados de Biomassa

Os dados da biomassa vegetal utilizados neste trabalho foram obtidos de <http://www-radar.jpl.nasa.gov/carbon/ab/fbc.htm>, que fornece um único vetor em formato *shapefile* contendo a distribuição espacial da biomassa florestal viva acima do solo na bacia Amazônica. O produto

foi originado a partir de uma metodologia que combina um mapa de uso e cobertura da terra, métricas derivadas do sensoriamento remoto e mais de 500 pontos da biomassa florestal obtidos em campo. O mapa possui resolução espacial de 1 km e separa a biomassa em 11 classes com uma acurácia de 70%. Os dados em campo foram obtidos no período de 1990 a 2000 e o mapa representa a distribuição média da biomassa sobre a bacia Amazônica (SAATCHI *et al.*, 2009).

3.4 Metodologia

A seguir serão abordados os procedimentos metodológicos referentes ao mapeamento das áreas queimadas em imagens do sensor MODIS e a validação dos modelos de emissão 3BEM e 3BEM_FRP a partir da inserção das queimadas, utilizadas como referência, e dos dados da biomassa obtidos de Saatchi *et al.* (2009).

3.4.1 Processamento e Mapeamento das Áreas Queimadas

Os produtos do sensor MODIS foram primeiramente reamostrados do *Hierarchical Data Format* (HDF) para o formato Geotiff a partir da ferramenta *MODIS Reprojection Tool* (MRT). Desta forma foram realizados os mosaicos dos 4 tiles e o recorte para a área de estudo, originando imagens com 7 bandas e 250 metros de resolução espacial. Os dados foram adquiridos de <http://e4ftl01.cr.usgs.gov/>.

Após o pré-processamento foi utilizado o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que consiste na utilização de uma relação linear para representar a mistura espectral dos alvos em cada *pixel* (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Assim, os *endmembers* são selecionados diretamente na imagem a partir de *pixels* que possuam resposta espectral mais próxima da curva teórica esperada para alvos puros, conforme Equação 1.

$$\rho_i = a * \text{veg}_i + b * \text{solo}_i + c * \text{sombra}_i + e_i \quad (1)$$

em que ρ_i é a resposta da reflectância do *pixel* na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra, respectivamente; veg_i , solo_i e sombra_i são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e e_i é o erro na banda

i. A extração dos *endmembers* foi realizada no programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI) e o MLME foi utilizado a partir de um *script* criado no *Interactive Data Language* (IDL), no qual foram geradas as imagens fração sombra, que realçam os alvos de baixa refletância representados pelas áreas queimadas.

Após a aplicação do MLME, todas as imagens fração sombra resultantes foram inseridas no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). O próximo passo consistiu da segmentação e atribuição dos limiares de similaridade 12 e área 20, sendo que posteriormente os polígonos das áreas queimadas foram atribuídos às suas respectivas classes. A etapa final envolveu a edição manual do mapeamento com a finalidade de corrigir eventuais erros decorrentes da classificação (CARDOZO *et al.*, 2014).

3.4.2 Avaliação dos Modelos 3BEM e 3BEM_FRP

O 3BEM é um modelo desenvolvido por Longo *et al.* (2010) que estima a quantidade de biomassa queimada e suas respectivas emissões, além de tratar os focos de queimada diários estimados por diversos sensores. Neste modelo os focos repetidos são eliminados e a área queimada é estimada, sendo que estas informações são cruzadas com o mapa de uso e cobertura da terra desenvolvido por Belward (1996) e Sestini *et al.* (2003) para fornecer os fatores de emissão para cada espécie. A partir de dados referentes ao carbono presente na vegetação viva (OLSON *et al.*, 2000; HOUGHTON *et al.*, 2001), a quantidade de biomassa é estimada, desta forma, para um dado *pixel* do modelo, e a fonte de emissão total para determinada espécie e sua variação ao longo do dia é estimada por:

$$Q_{plumerise}^{[e]}(t) = \frac{gf(t)}{p_0 \Delta V} \cdot (EF^{[e]} \cdot BB) \quad (2)$$

em que t representa o tempo (s); $gf(t)$ é a função gaussiana centrada no período de máxima emissão de queimadas (17:45 UTC) utilizada para simular o ciclo diurno; p_0 está relacionado com a densidade do ar; ΔV é o volume do *pixel*, que leva em consideração a superfície terrestre e a atmosfera acima desta; EF representa o fator

de emissão para uma determinada espécie (ϵ); e BB é a biomassa consumida pelo fogo, que pode ser estimada pela Equação 3:

$$BB = A \cdot B \cdot \alpha \cdot \beta \quad (3)$$

em que A representa a área queimada (m^2), B é a biomassa média por unidade de área em dado ecossistema ($g \cdot m^{-2}$), α é a fração de biomassa acima do solo (kg) e β representa a eficiência de queima, em que os valores implementados no modelo são obtidos da literatura e indicam o total de biomassa queimada. Como exemplo, uma queimada ocorrida em uma área de pastagem consumirá praticamente 90% de toda a biomassa, já em uma área de floresta esse consumo será em torno de 30 a 40% (LONGO *et al.*, 2010). Ainda, como alternativa ao método tradicional, o 3BEM pode assimilar os dados de FRP originando a biomassa queimada diretamente. Desta forma, a Equação 2 pode ser expressa, em termos da FRP (Equação 4):

$$Q_{plumerise}^{[e]}(t) = \frac{gf(t)}{p_0 \Delta V} \cdot (EF^{[e]} \cdot \mathfrak{g} \cdot FRP_{grid(lon,lat)}) \quad (4)$$

em que \mathfrak{g} representa o coeficiente relacionado com o consumo de biomassa ($1,37 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$, KAISER *et al.*, 2012) e $FRP_{grid(lon,lat)}$ corresponde aos valores de energia liberada pelo fogo. O modelo 3BEM é disponibilizado pelo grupo de Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) mediante requerimento. O 3BEM utiliza a linguagem computacional Fortran, permitindo ao usuário compilar o modelo em diversos ambientes computacionais. Desta forma, as áreas queimadas obtidas dos mapeamentos nas imagens do sensor MODIS, a densidade média da biomassa proveniente de Saatchi *et al.* (2009) e a fração da biomassa acima do solo e a eficiência de queima baseados em Longo *et al.* (2010) foram inseridas na Equação 3. Assim, foram realizadas 3 rodadas nos modelos, uma contendo os focos de queimada obtidos de diversos sensores (Equação 2), a segunda contendo a energia radiativa do fogo (Equação 4) e a terceira modificada a partir da Equação 2, contendo os

dados das áreas queimadas mapeadas e validadas em campo. Assim, pôde-se analisar as diferenças ocorridas na emissão do CO provenientes dos modelos 3BEM e 3BEM_FRP após as 3 rodadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra as áreas queimadas para os anos de 2000 a 2011 no Estado de Rondônia.

Percebe-se que há uma grande variabilidade na ocorrência das queimadas no decorrer dos anos, concentradas principalmente na área central da região norte do Estado, no meio leste e no sul do Estado, sendo que o ano de 2005 apresentou as maiores ocorrências, compreendendo 7,7% de todo o Estado, seguido de 2010 (6,13%) e 2004 (5,8%).

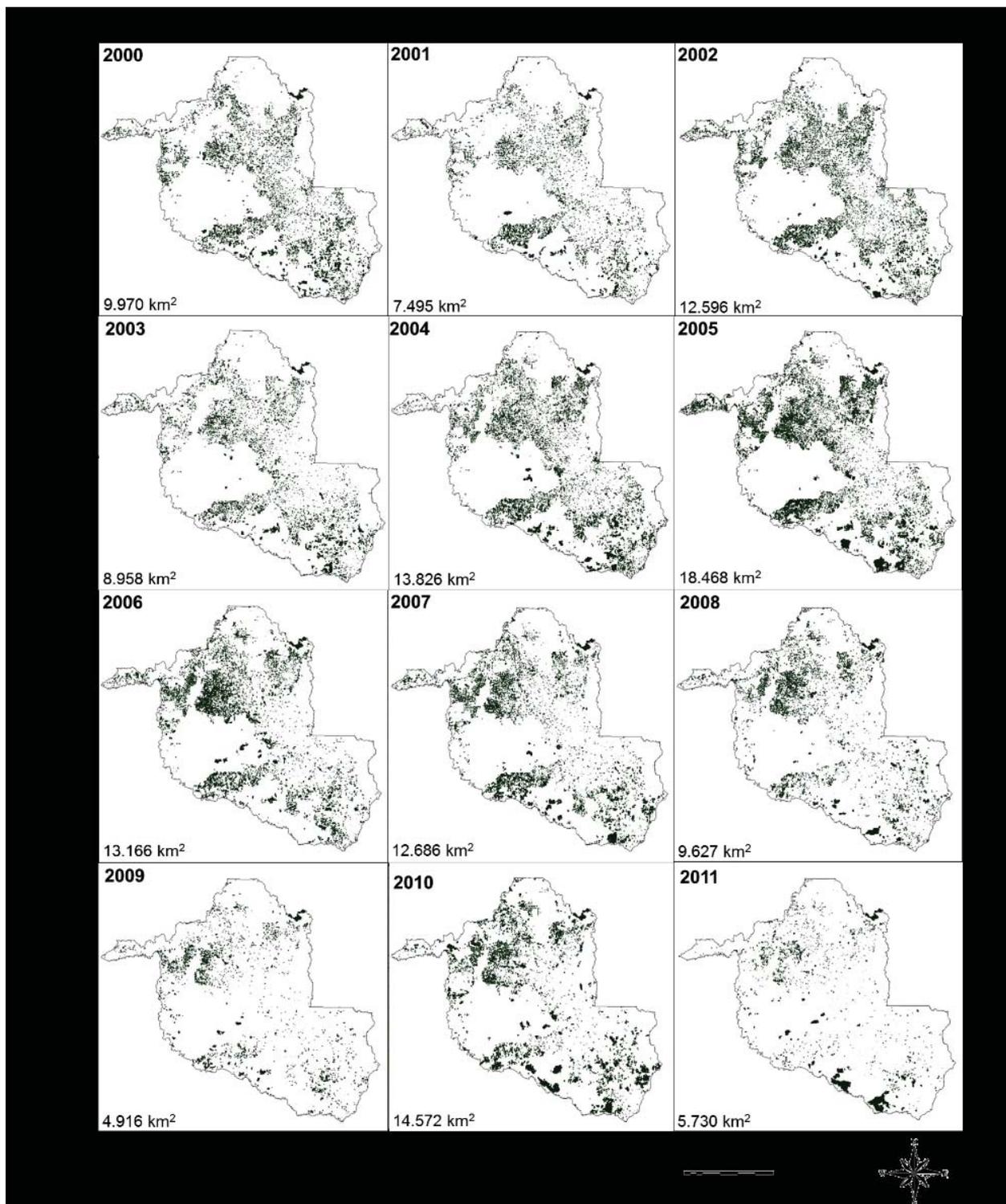


Fig. 2 - Áreas queimadas em Rondônia de 2000 a 2011.

De uma forma geral as queimadas são utilizadas em sua maioria em áreas de extrativismo vegetal, seguida por áreas de pecuária de grande porte e cultivos permanentes diversificados, totalizando 17,6% da área total do Estado (CARDOZO *et al.*, 2014). Assim, percebe-se que as queimadas na área de estudo ocorrem

principalmente devido ao uso e cobertura da terra, com o intuito de abertura e manutenção de locais destinados às práticas agropecuárias.

A Figura 3 mostra o mapa da distribuição da biomassa viva acima do solo para o Estado de Rondônia, obtida de Saatchi *et al.* (2009).

Percebe-se que a classe presente em maior

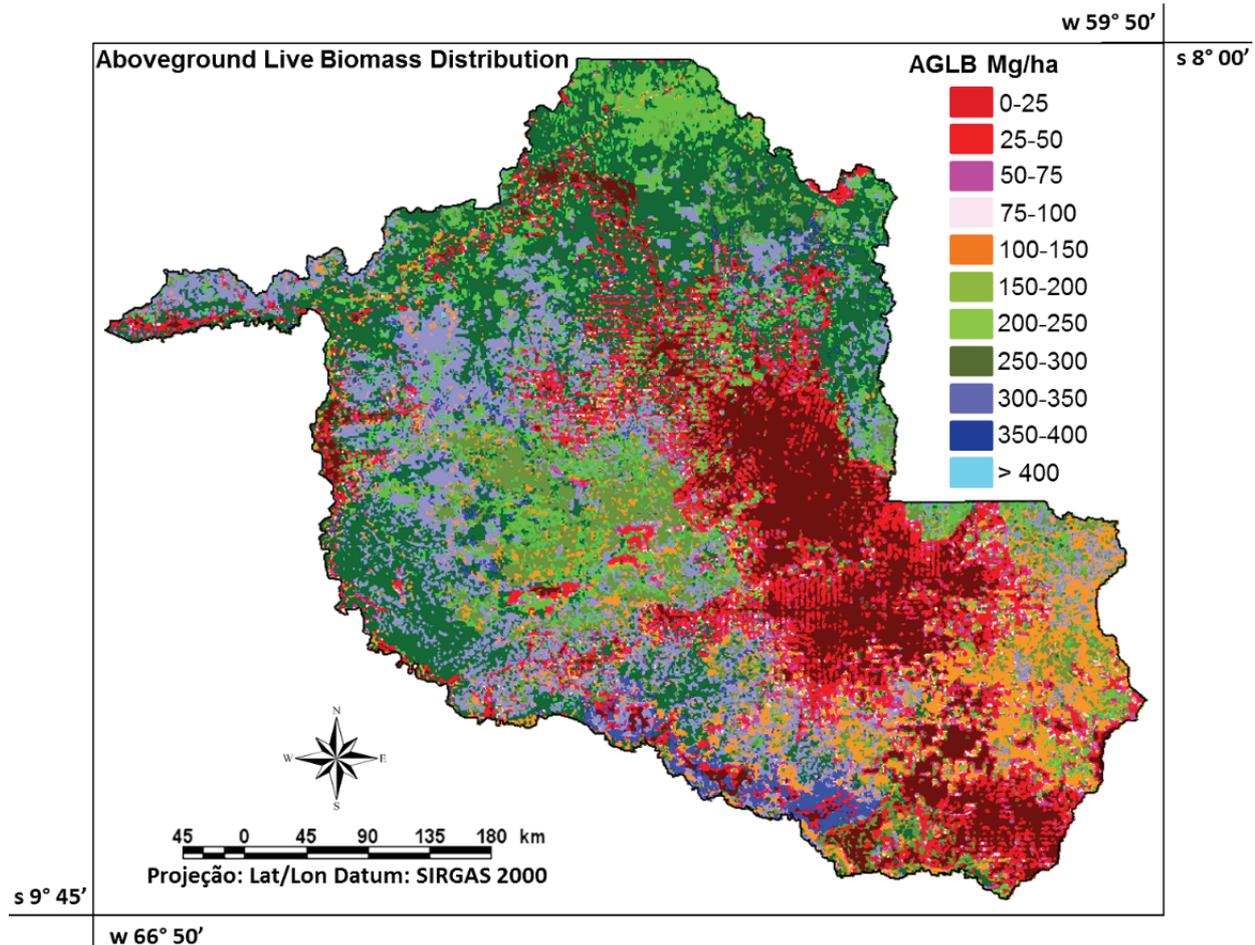


Fig. 3 - Mapa da distribuição da biomassa viva acima do solo para o Estado de Rondônia.

extensão na área de estudo é representada pela classe 250-300 Mg/ha, com 54.004 km² de extensão, localizada principalmente em áreas de florestas, seguidas das classes 0-25 Mg/ha (34.906 km²) e 25-50 Mg/ha (30.107 km²), localizadas em áreas de pastagens e agricultura. A classe em menor proporção na área de estudo é representada pela classe > 400 Mg/ha, localizada em áreas de florestas, seguida pela classe 350-400 Mg/ha, localizadas em áreas de influência fluvial/lacustre e pela classe 75-100 Mg/ha, localizada em áreas de pastagens.

A Figura 4 mostra os mapas de CO provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e com a inserção das queimadas mapeadas nas imagens do sensor MODIS, consideradas como referência para validar os dois modelos, nos anos de 2000, 2001, 2002 e 2003.

De uma forma geral, percebe-se visualmente que os resultados provenientes das três modelagens são similares, sendo que para o ano de 2001 a modelagem utilizando a área queimada de referência apresentou duas pequenas áreas a mais de CO que os modelos numéricos, localizadas na porção centro-norte e na porção centro-oeste do estado. Ainda, para os anos de 2001, 2002 e 2003 percebe-se que o modelo 3BEM_FRP superestimou o CO em uma pequena área na porção centro-oeste do estado.

A Figura 5 mostra os mapas de CO provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e com a inserção das queimadas mapeadas nas imagens do sensor MODIS, consideradas como referência para validar os dois modelos, nos anos de 2004, 2005, 2006 e 2007.

Percebe-se que para o ano de 2004, ocorre

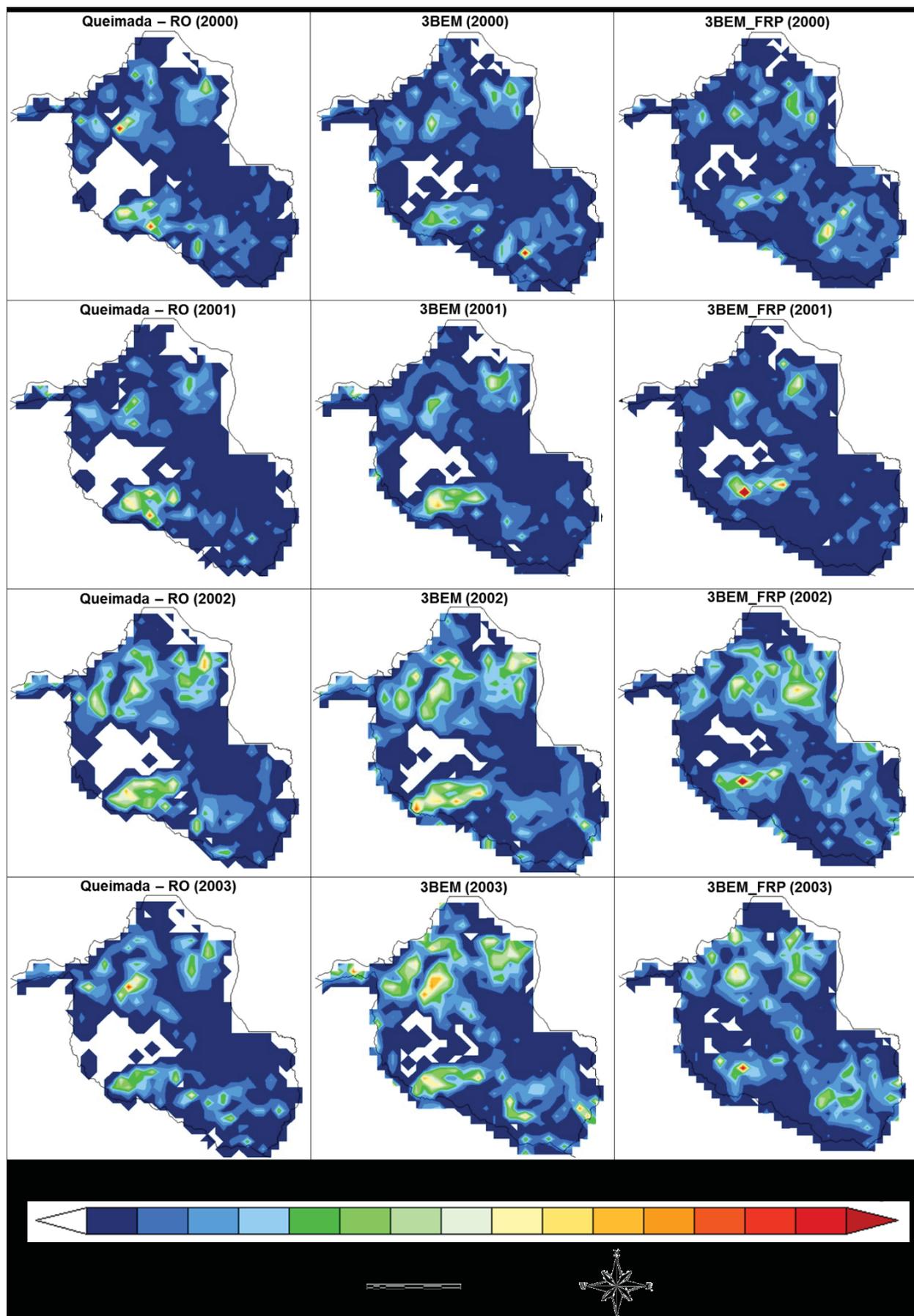


Fig. 4 - Mapas de emissão do CO provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e da modelagem contendo as áreas queimadas de referência para o Estado de Rondônia nos anos de 2000 a 2003.

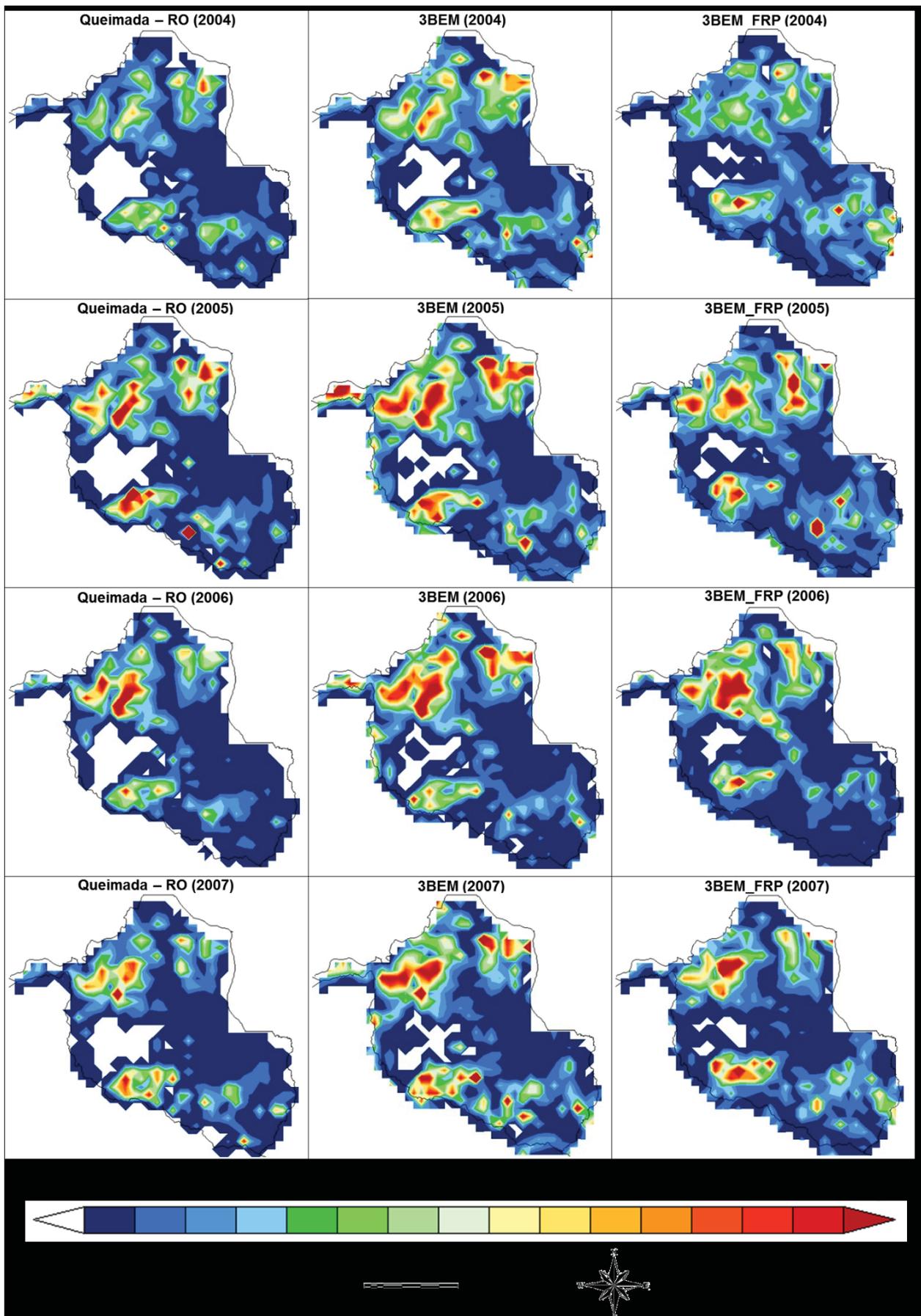


Fig. 5 - Mapas de emissão do CO provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e da modelagem contendo as áreas queimadas de referência para o Estado de Rondônia nos anos de 2004 a 2007.

uma superestimativa do CO pelos modelos 3BEM e 3BEM_FRP quando comparados com o dado de referência, principalmente na porção norte e no centro do estado. Para os anos de 2005, 2006 e 2007 percebe-se que de uma forma geral, as emissões de CO são similares visualmente, porém denotando superestimativas pelos modelos 3BEM e 3BEM_FRP, principalmente em toda a porção centro-norte,

na região oeste do Estado e em algumas áreas da região sul (2005 e 2007).

A Figura 6 mostra os mapas de CO provenientes dos modelos 3BEM e 3BEM_FRP e com a inserção das queimadas mapeadas nas imagens do sensor MODIS, consideradas como referência para validar os dois modelos, nos anos de 2008, 2009, 2010 e 2011.

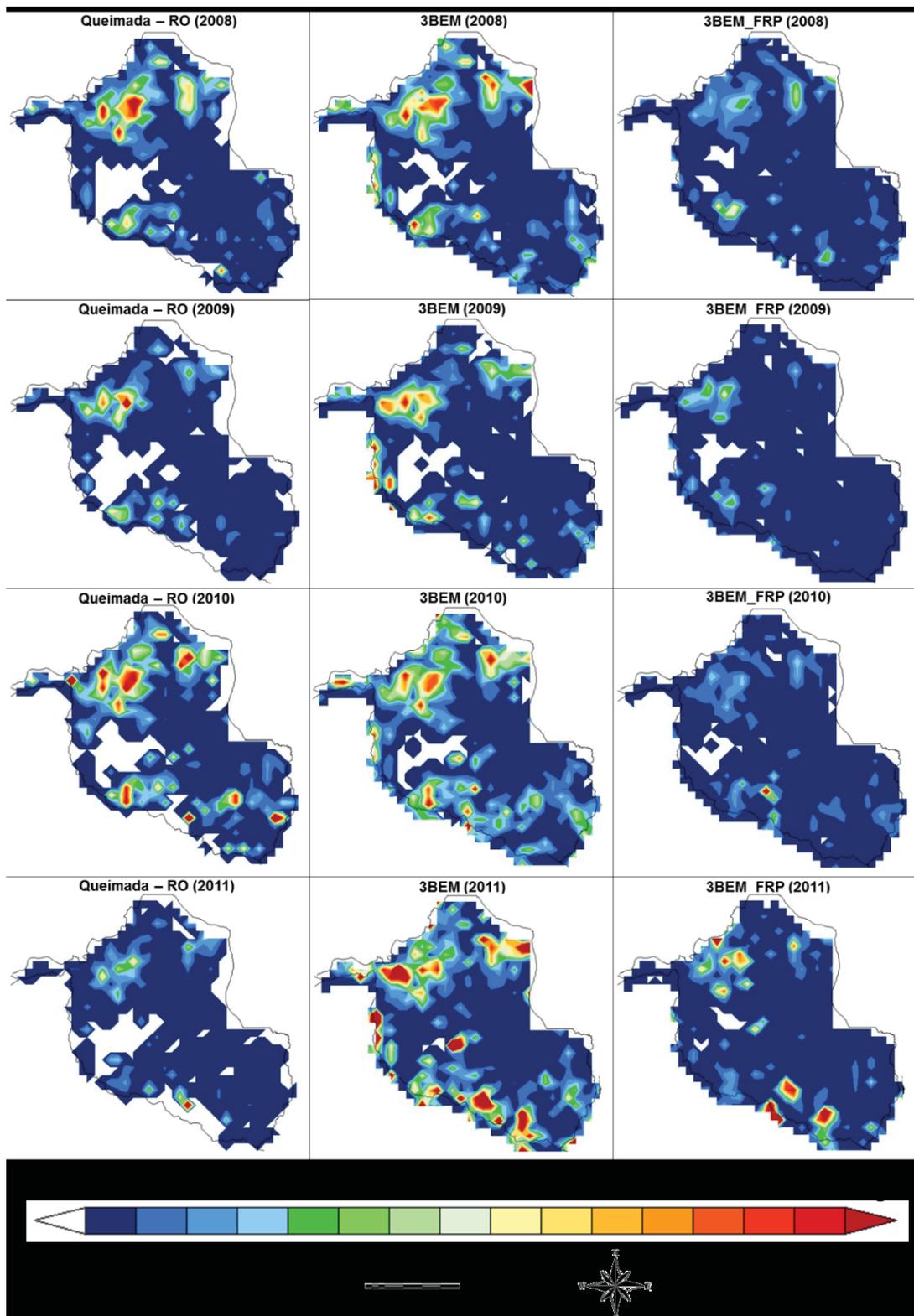


Fig. 6 - Mapas de emissão do CO provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e da modelagem contendo as áreas queimadas de referência para o Estado de Rondônia nos anos de 2008 a 2011.

No ano de 2008 nota-se uma subestimativa nos resultados de CO provenientes da modelagem, principalmente pelo modelo 3BEM_FRP na porção centro-norte do Estado e na região oeste. O mesmo fato é percebido para os anos de 2009 e 2010. Entre os principais fatores responsáveis pela subestimativa do modelo 3BEM-FRP ressalta-se a alteração no algoritmo de estimativa de FRP pelo WFABBA e a desativação e ativação de

novos satélites. No ano de 2011 ocorre a situação inversa, percebe-se que os modelos apresentaram uma acentuada superestimativa nos valores de CO, com destaque para o modelo 3BEM nas mesmas áreas anteriormente mencionadas. A Figura 7 mostra a diferença absoluta entre os dados dos modelos 3BEM e 3BEM_FRP tendo como base os valores obtidos a partir da área queimada, para os anos de 2000 a 2011.

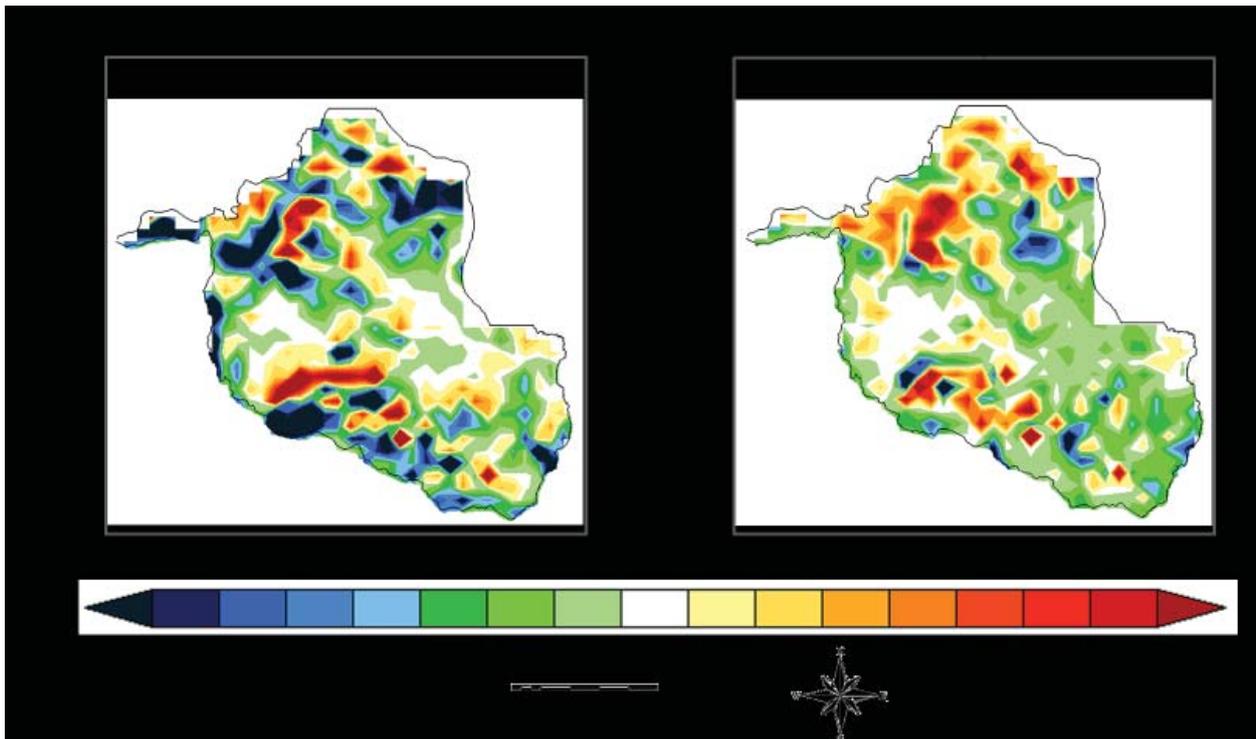


Fig. 7 - Imagem da diferença absoluta das emissões de CO em kg.m^{-2} provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP para os 12 anos analisados no Estado de Rondônia.

De acordo com a Figura 7, as áreas em vermelho indicam que houve uma subestimativa do modelo em relação aos dados de referência, e as áreas em tons azulados indicam que ocorreu uma superestimativa nos dados. Desta forma, percebe-se que os dois modelos apresentaram resultados distintos. Em geral, o modelo que utiliza a área queimada, a biomassa média por unidade de área em dado ecossistema, a fração de biomassa acima do solo e a eficiência de queima, apresentam uma divergência acentuada em relação aos dados de referência. Isto pode ser notado pela alta variabilidade de áreas com valores superestimados e subestimados, muitas vezes em regiões próximas. Uma característica que evidencia esse comportamento refere-se à utilização de um mapa de biomassa florestal e uso e cobertura da terra que são estáticos, ou seja, não

sofrem alterações nos seus valores. Desta forma, para um foco de queimada detectado no mesmo local, porém, em anos diferentes, o modelo irá utilizar o mesmo valor de biomassa média por unidade de área em dado ecossistema, mesmo que essa biomassa já tenha sido consumida em anos anteriores.

Este fator faz com que o modelo 3BEM superestime a biomassa queimada e, conseqüentemente, os valores de gases traços e aerossóis emitidos para a atmosfera, o que inclui o CO.

Entretanto, o modelo adaptado que utiliza a FRP estima diretamente os valores de biomassa consumida a partir da energia liberada. Assim, a quantidade de biomassa influenciará diretamente nos valores estimados. Neste contexto, uma área de floresta que foi queimada no ano anterior,

possuirá uma quantidade de biomassa menor para a queima no ano seguinte, característica que irá influenciar na temperatura do fogo, e, conseqüentemente, na energia liberada e na quantidade de biomassa queimada estimada pelo algoritmo.

Esta característica permite identificar, na Figura 7, que o modelo 3BEM_FRP apresenta diferenças mais sutis em relação aos dados de referência, com poucos valores superiores à 0,35 kg/m². Em geral, este modelo apresenta subestimativas na ordem de até 0,05 kg/m², com exceção de algumas áreas em Rondônia, compostas por vegetação com grande quantidade

de biomassa florestal (acima de 300 Mg/ha). Entre as principais variáveis que podem interferir e ocasionar a subestimativa nessas áreas, pode-se citar a presença de nuvens (que irão diminuir a energia e afetar a integração dos dados), a interferência da fumaça no sinal coletado e as variações no ângulo de visado do sensor para diferentes aquisições.

A Figura 8 mostra o gráfico das emissões de CO em kg.m⁻² provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e com a estimativa realizada a partir da assimilação da área queimada proveniente do sensor MODIS para os 12 anos analisados.

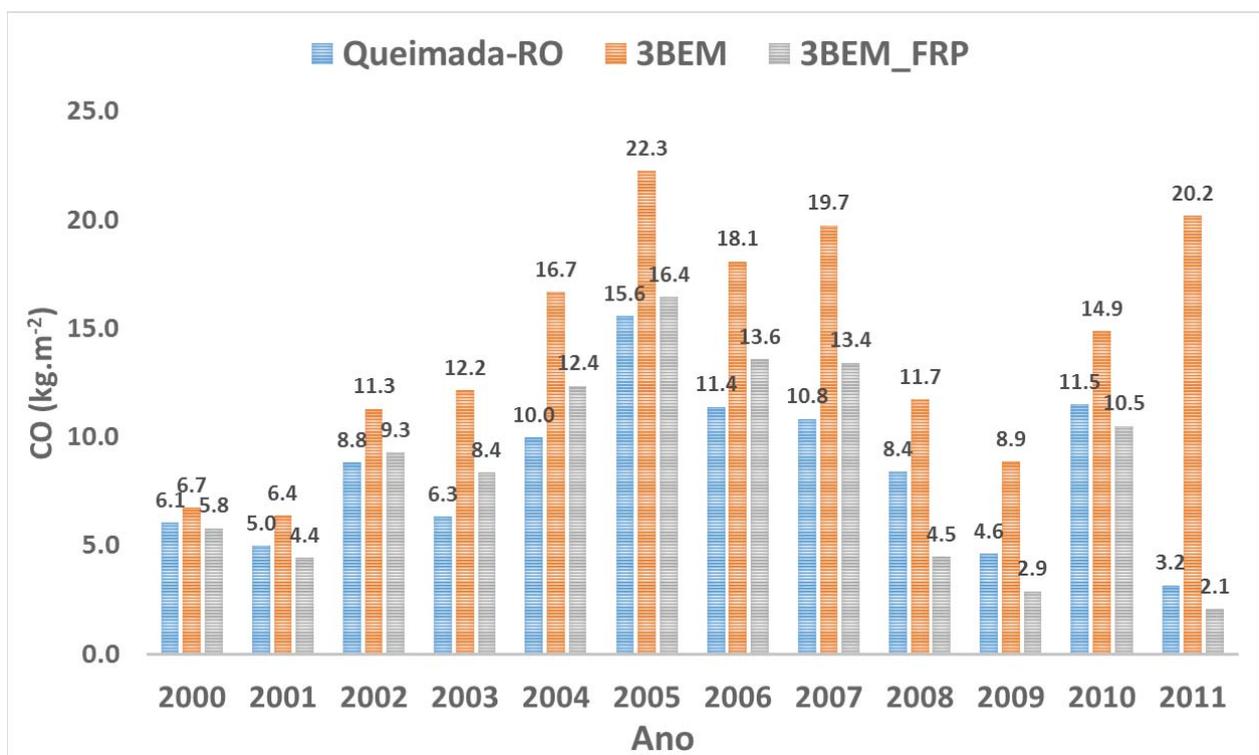


Fig. 8 - Gráfico das emissões de CO em kg.m⁻² provenientes dos modelos 3BEM, 3BEM_FRP e com a área queimada de referência para os 12 anos analisados no Estado de Rondônia.

As áreas onde ocorrem as maiores diferenças estão localizadas na porção central norte do Estado e na região oeste da área central (conforme pode ser visualizado na Figura 7), que abrangem áreas da Unidade de Conservação de Uso Sustentável representada pelas florestas.

Presume-se que nessas áreas o modelo 3BEM está superestimando a emissão de CO devido à contabilização do número de focos de queimadas mesmo nos dias em que a queimada já ocorreu e a biomassa diminuiu.

Outras regiões com destaque estão localizadas no sul do Estado presentes em

áreas de pastagem e de cerrado, que possuem uma quantidade menor de biomassa, portanto, presume-se que o modelo está contabilizando os focos repetidamente ao longo dos dias, sem levar em consideração a modificação na biomassa. Ainda, percebe-se que o modelo 3BEM_FRP apresentou resultados mais semelhantes comparados com os dados de referência, com exceção dos anos de 2003, 2004, 2006 e 2007, devido a pequenas superestimativas na emissão do CO, e nos anos de 2008, 2009, 2010 e 2011, em que o modelo apresentou pequenas subestimativas.

A Figura 9 mostra a regressão estatística realizada com a comparação dos dados de referência (eixo y) com os dados dos dois modelos analisados (eixo x). Percebe-se que para todos os anos analisados, o modelo 3BEM apresentou uma considerável superestimativa nos dados de CO, que girou em torno de 50% (Figura 9), com destaque para os anos de 2004 a 2011, sendo este último o que apresentou a maior superestimativa dentre todos os anos analisados. De uma forma geral, o modelo 3BEM_FRP apresentou uma superestimativa em torno de 5% (Figura 9) na liberação do CO comparado com os dados de referência, denotando um melhor desempenho. Para avaliar a significância da regressão e verificar a normalidade e similaridade estatística entre os dados modelados e os dados de referência,

aplicaram-se o teste de normalidade Lilliefors e o teste de Mann-Whitney.

O teste de normalidade de Lilliefors é utilizado para verificar a normalidade dos dados a partir da adaptação do teste estatístico denominado Kolmogorov-Smirnoff. Para os valores resultantes dos modelos 3BEM e 3BEM_FRP, constatou-se que ambos não possuem uma distribuição normal, portanto, o teste de similaridade deve ser não paramétrico. Neste caso, utilizou-se o teste de Mann-Whitney para avaliar a similaridade entre os resultados dos modelos, ou seja, para indicar se existe uma diferença significativa entre ambos. Desta forma, os valores estimados pelo 3BEM e 3BEM_FRP apresentaram diferenças significativas quando relacionados com os dados de referência (teste de Mann-Whitney, $p = 0,05$).

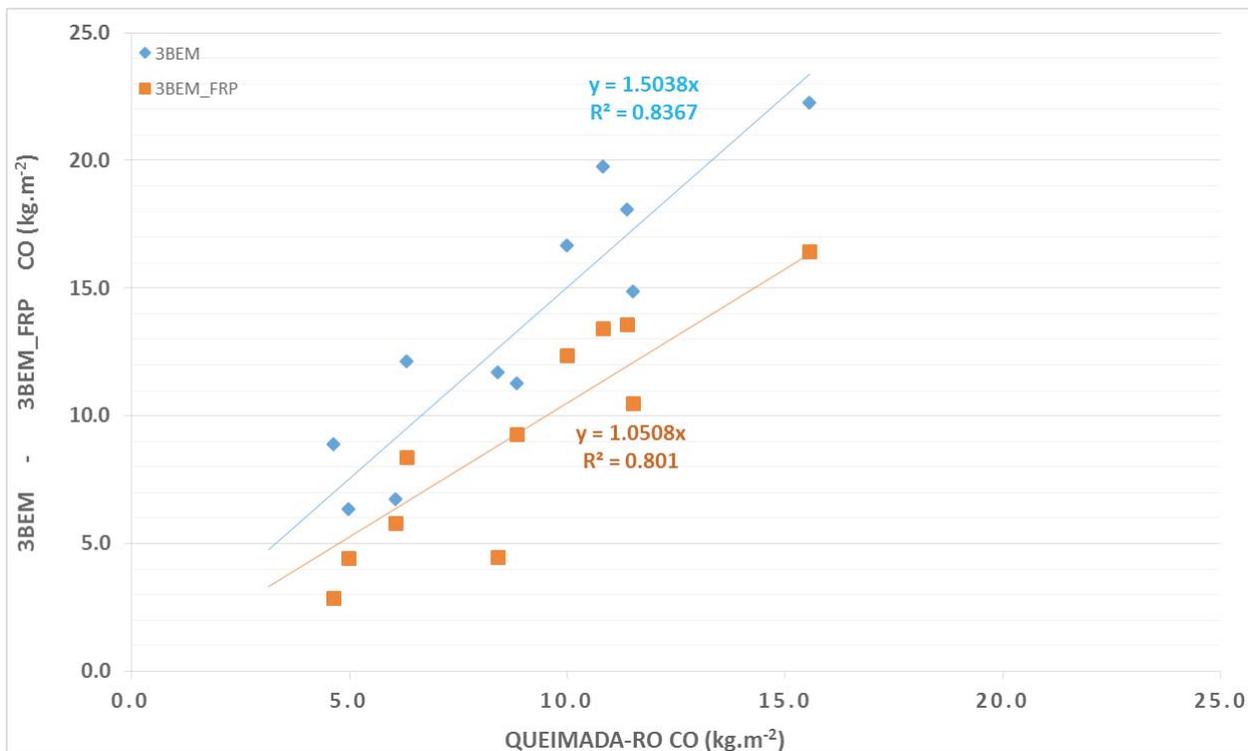


Fig. 9 - Gráfico da análise de regressão realizada para a comparação dos modelos 3BEM e 3BEM_FRP (eixo x) com a área queimada de referência (eixo y) para os 12 anos analisados no Estado de Rondônia.

Na literatura podem ser encontrados vários artigos que fazem a avaliação de novos modelos de emissão provenientes das queimadas em comparação com outros inventários existentes. Dentre eles pode-se citar o artigo de Wiedinmyer *et al.*, (2010), os quais apresentam o modelo *Fire INventory from NCAR version 1.0 (FINNv1)*, que fornece dados de emissão de gases traço e aerossóis provenientes da queima de biomassa.

Os resultados indicam que as estimativas de emissão de CO, CO₂ e outras espécies para o FINNv1 foram em torno de 5-30% maiores do que as estimativas obtidas no *Global Fire Emission Database version 3.1 (GFEDv3.1)*, sendo que as concordâncias variam anualmente e as diferenças decorrem das taxas de consumo de combustível utilizadas em cada modelo.

Em Kaiser *et al.*, (2012), o modelo *Global*

Fire Assimilation System (GFASv1.0) calcula a emissão proveniente da queima da biomassa ao assimilar a FRP, e os resultados foram comparados com os dados provenientes do GFED3.1. Ao utilizar informações quantitativas da taxa de combustão contida na FRP, o GFASv1.0 detecta focos ativos em tempo real em alta resolução espacial e temporal, enquanto que o GFED3.1 possui erros de omissão ao não detectar pequenas queimadas. Ainda, ao comparar os resultados, o GFASv1.0 denotou resultados aprimorados de CO (351 Tg) e CO₂ (6906 Tg) comparados com os resultados do GFED3.1 (331 e 6508 Tg, respectivamente), o que representa numa superestimativa de 6% para ambos os gases (CO e CO₂).

Ainda, Ichoku e Ellison (2014) apresentam o desenvolvimento de um produto de emissão chamado *Fire Energetics and Emissions Research version 1.0* (FEER.v1). Neste modelo, dados de FRP foram integrados no tempo para calcular o total de emissão de material particulado e comparados com três produtos de emissão existentes (GFED.v3, GFAS.v1, e QFED.v2). Os resultados indicaram que globalmente os dados do GFED.v3 and GFAS.v1 constituem apenas 55% dos dados anuais de emissão de material particulado dos dados do FEER.v1, sendo que esses dados provavelmente são mais próximos de valores realísticos.

Em geral, ao analisar a literatura disponível, percebe-se que tanto o modelo 3BEM, quanto o modelo 3BEM_FRP, encontram-se muito próximos ao estimado por outros modelos e métodos existentes. Além disso, modelos que se baseiam em métodos tradicionais possuem erros de até 50%, como exemplificado em Ichoku e Ellison (2014). Todavia, modelos baseados na FRP possuem a tendência de apresentar valores mais próximos aos observados (KAISER *et al.*, 2012), indicando que este novo método possui uma alta aplicabilidade nas estimativas de gases traços e aerossóis emitidos pelas queimadas no âmbito regional e global.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, ao analisar os dois modelos de emissão de CO, pôde-se perceber que o modelo 3BEM_FRP apresentou resultados mais próximos se comparados com os dados de referência, ou seja, que contém as áreas

queimadas mapeadas e validadas. De uma forma geral, o modelo 3BEM_FRP apresentou uma pequena superestimativa de 5% nos resultados referentes à liberação CO, já o modelo 3BEM apresentou uma superestimativa em torno de 50%, devido possivelmente à contabilização repetida dos focos ao longo dos dias, sem levar em consideração a modificação na biomassa.

A avaliação dos modelos de emissão é muito importante, pois torna possível a calibração dos modelos para que sejam gerados resultados mais eficientes. Ainda, resultados mais confiáveis em relação à emissão dos poluentes provenientes das queimadas podem auxiliar no aprimoramento do sistema de previsão de qualidade do ar do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), além da geração de inventários das emissões dos gases do efeito estufa e material particulado que estão sendo liberados para a atmosfera.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio (2010/17437-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochemical 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.
- BELWARD, A. The IGBP-DIS global 1 km land cover data set (DISCover) proposal and implementation plans, **IGBP-DIS Working Paper**, n.13, 1996, 61p.
- CARDOSO, M.; NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; HIROTA, M.; VALERIANO, D.; CÂMARA, G. Long-term potential for tropical-forest degradation due to deforestation and fires in the Brazilian Amazon. **Biologia (Bratislava)**, v. 64, p. 433-437, 2009.
- CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Avaliação das áreas queimadas no Estado de Rondônia

- Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, 66/3, p. 705-716, 2014.
- 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.
- 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, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.
- HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates, **Global Change Biology**, v. 7, p. 731-746, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004, 1p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012, 271p.
- ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.
- 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.
- ICHOKU, C., ELLISON, L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, p. 6643-6667, 2014.
- 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.; SETZER, A. W.; WARD, D.; TANRÉ, D.; HOLBEN, B. N.; MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R. Biomass Burning and Spaceborne Experiment in the Amazon (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.; MCDUGAL, D.; SHELTON, 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.
- LI, R.-R.; KAUFMAN, Y.J.; HAO, W.M.; SALMON, J.M.; GAO, B.-C. A technique for detecting burn scars using MODIS data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 42, no. 6, pp. 1300-1308, Jun. 2004.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 5785-5795, 2010.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MARÉCAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROSÁRIO, N. E.; MOREIRA, D. S.; GÁCITA, M. S.; ARTETA, J.; FONSECA, R.; STOCKLER, R.; KATSURAYAMA, D. M.; FAZENDA, A.; BELA, M. The Chemistry CATT-BRAMS model (CCATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1389-1405, 2013.
- MORAES, E. C.; FRANCHITO, S. H.; BRAHMANANDARAO, V. Effects of biomass burning in Amazonia on climate: A numerical experiment with a statistical-dynamical model. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D05109, p. 1-12, 2004.

- OLSON, J. S.; WATTS, J. A.; ALLISON, L. J. Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database (Revised November 2000). NDP-017. Available on <<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp017.html>>. **Carbon dioxide information analysis center**, 2000. Acesso em 07/09/2014.
- PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations, **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 6388-6397, 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.
- ROY, D. P.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Burned area mapping using multitemporal moderate spatial resolution data - A bi-directional reflectance model-based expectation. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 263-286, 2002.
- ROBERTS, G.; WOOSTER, M. J.; PERRY, G. L. W. ; DRAKE, N. ; REBELO, L.-M.; DIPOTSO, F. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **Journal of Geophysical Research**, vol. 110, no. D21, D21111, 2005.
- ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; YAMASOE, M. A.; FONSECA, R. M. Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. **Atmospheric Chemistry and Physics (Online)**, v. 13, p. 2923-2938, 2013.
- SAATCHI, S. S., HOUGHTON, R. A.; ALVES, D.; NELSON, B. 2009. **LBA-ECO LC-15 Amazon Basin Aboveground Live Biomass Distribution Map: 1990-2000**. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAAC/908.
- SESTINI, M.; REIMER, E.; VALERIANO, D.; ALVALÁ, R.; MELLO, E.; CHAN, C.; NOBRE, C. Mapa de cobertura da terra da Amazônia legal para uso em modelos meteorológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 11, Belo Horizonte. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 2901-2906. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- SHIMABUKURO, Y. E.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; STOCKLER, R.; FREITAS, S. R.; COURA, S. M. C. Biomass burning emission estimation in Amazon tropical forest. In: SEGURA, D. A; DI BELLA, C. M.; STRASCHNOY, J. V. (Org.). **Earth Observation of Ecosystem Services**. 1ed. Oxford, UK: Taylor & Francis, 2013, v. 1, p. 121-144.
- SIMON, M.; PLUMMER, S.; FIERENS, F.; HOELZEMANN, J.J.; ARINO, O. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOSCAR products and their qualification. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D14S02, 2004. DOI: 10.1029/2003JD003622.
- TANSEY K. *et al.* Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D14S03, 2004. DOI: 10.1029/2003JD003598.
- VERAVERBEKE, S.; STRAVOS, E. N.; HOOK, S. J. Assessing fire severity using imaging spectroscopy data from the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and comparison with multispectral capabilities. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 153-163, 2014.
- VERMOTE, E.; ELLICOTT, E.; DUBOVIK, O.; LOPYONOK, 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, p. 1984-2012, 2009.

WIEDINMYER, C.; AKAGI, S. K.; YOKELSON, R. J.; EMMONS, L. K.; AL-SAAD, J. A.; ORLNADO, J. J.; SOJA, A. J. The Fire INventory from NCAR (FINN) – a high resolution global model to estimate the emissions from open burning, **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 3, p. 2439-2476, 2010.

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.