

Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/4: 419-428
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ESTIMATIVA DA ÁREA DE FOGO ATIVO A PARTIR DA POTÊNCIA RADIATIVA DO FOGO

Active Fire Area Estimation Through Fire Radiative Power

**Gabriel Pereira^{1,2}, Francielle da Silva Cardozo¹,
Yosio Edemir Shimabukuro¹, Elisabete Caria Moraes¹ &
Saulo Ribeiro de Freitas¹**

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

²Universidade de São Paulo – USP
Av. Prof. Lineu Prestes, 159 - Caixa Postal 26097
05513-970 - São Paulo - SP - Brasil
gabrielpereira@usp.br

Recebido em 01 de Julho, 2012/ Aceito em 18 de Setembro, 2011
Received on July 01, 2012/ Accepted on September 18, 2011

RESUMO

Anualmente as queimadas devastam grandes porções territoriais de florestas, campos e regiões agrícolas, consumindo uma grande quantidade de biomassa. No Brasil, as variações espaço-temporais no manejo do uso e cobertura da terra ocorrem, principalmente, devido à renovação de áreas agrícolas e de pastagem e o desmatamento de áreas na Floresta Amazônica provocam alterações nos ciclos das queimadas antropogênicas. Estes fatores influenciam diretamente na modificação do clima e do meio ambiente, onde os principais fatores modificadores incluem os impactos da energia liberada pelo fogo, os gases traços emitidos para a atmosfera, alteração do albedo, assim como modificações no balanço radiativo da atmosfera e nos ciclos biogeoquímicos. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é analisar os valores médios da área de fogo ativo para a América do Sul para diferentes fisionomias vegetais a partir da potência radiativa do fogo (FRP) calculada por satélites de média/baixa resolução. Para isto, utilizaram-se os sensores orbitais *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo da plataforma Terra, *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, respectivamente, e *GOES Imager* a bordo da constelação de satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES). Para determinar os valores médios da área de fogo ativo amostraram-se aleatoriamente 79 órbitas/pontos do Landsat estratificadas pela área dos ecossistemas brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Pampa e Mata Atlântica) e pela distribuição dos valores médios de energia radiativa do fogo. Os resultados da análise climatológica indicaram que os tamanhos médios das áreas de fogo ativo para regiões de Florestas, agricultura, pastagem e vegetação herbáceo-arbustiva foram estimados em 4500 m², 13.000 m², 14.000 m² e 9600 m², respectivamente. Ainda, o coeficiente encontrado para estimar o tamanho de fogo ativo para as áreas de pastagem/gramíneas (0,00029 km².MW⁻¹) foi aproximadamente 38% maior que o encontrado para as áreas de Floresta (0,00021 km².MW⁻¹) e 31% maior que o mesmo coeficiente utilizado para estimar o tamanho do fogo em áreas de vegetação herbáceo-arbustiva (0,00022 km².MW⁻¹) e 11% maior que o coeficiente empregado

em áreas agrícolas ($0,00026 \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$).

Palavras chaves: Energia Radiativa do Fogo, Área de Fogo Ativo, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

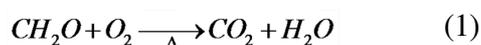
Annually fires have devastated large areas of forests, grasslands and agricultural fields, consuming a large amount of biomass. In Brazil, temporal and spatial variability in land-use and land-cover due to agricultural land clearing, grassland management and deforestation of the Amazon tropical rainforest leads to variations in anthropogenic biomass burning. These factors have a directly effect in the climate and in the environment, which the main modifying factors include the impacts of fire radiative power, the trace gases emitted into the atmosphere, albedo alterations, as well as, changes in atmospheric radiative balance and biogeochemical cycles. Therefore, the main objective of this study is to analyze and estimate the active fire area to South America to different vegetation types from fire radiative power (FRP) calculated by satellites of medium / low resolution. Also, we used orbital sensors such as Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard the Terra platform, Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) aboard Landsat 5 and Landsat 7, respectively, and GOES Imager aboard of Geostationary Operational Environmental satellite (GOES) constellation. To create the Brazilian fire size climatology, 79 path/row Landsat scenes were randomly sampled by Brazilian ecosystems (Amazonia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Pampa and Mata Atlantica) and fire Radiative power distribution. The results indicate that climatological average of active fire areas to Forest, agriculture, pasture/grassland and herbaceous and shrub vegetation were estimated to be 4500 m^2 , $13,000 \text{ m}^2$, $14,000 \text{ m}^2$ and 9600 m^2 , respectively. Moreover, the coefficient found for estimating the size of active fire to pastures/grasslands ($0.00029 \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$) is approximately 38% higher than that found for forest areas ($0.00021 \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$), 31% higher than the same coefficient used to estimate the fire size in areas of herbaceous and shrub vegetation ($0.00022 \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$) and 11% higher than the coefficient used in agricultural areas ($0.00026 \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$).

Keywords: Fire Radiative Power, Active Fire Size, Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

As queimadas desempenham papel fundamental no ciclo biogeoquímico mundial. A partir da reação química que ocorre no processo de combustão, os compostos orgânicos presentes na biomassa vegetal são restituídos à atmosfera e ao solo de maneira cíclica. Estima-se que aproximadamente 100 milhões de toneladas de aerossóis e gases traços derivados da fumaça são lançados na atmosfera, dos quais 80% ocorrem em regiões tropicais do globo (HAO e LIU, 2000).

A queima de biomassa pode ser considerada uma fonte de emissão significativa de gases traços e material particulado para a atmosfera (CRUTZEN e ANDREAE, 1990) e tem recebido destaque na comunidade científica nas últimas décadas devido ao seu papel no forçamento radiativo global. O processo de combustão de biomassa vegetal em condições ideais de completa combustão libera para a atmosfera dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O), de acordo com a reação (LEVINE, 1994):



Em que CH_2O representa a composição média da biomassa vegetal. Entretanto, a combustão

completa dificilmente é alcançada durante a queima de biomassa, sendo comum encontrar outras variedades de gases formados pelas moléculas de carbono como, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), o metano (CH_4), 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 (NO_2), o cloreto de metil (CH_3Cl), o dióxido de enxofre (SO_2), entre outras espécies (BURLING et al., 2010).

Os gases traços e os 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 o 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). Consequentemente, a queima de biomassa extrapola a escala de atuação local e passa a afetar em escalas

regionais, modificando o ciclo hidrológico e o padrão de distribuição de energia dos trópicos para latitudes médias e altas.

Nos dias atuais estima-se que 90% das queimadas possuam alguma ligação com processos antropogênicos (ANDREAE, 1991), vinculados essencialmente às atividades agropecuárias, desflorestamento, controle de pestes e renovação de pastos e campos. A queima de biomassa consome vastas áreas de vegetação no globo e constitui um dos maiores modificadores dos ecossistemas terrestres. Estima-se que anualmente o total de área queimada no globo ultrapasse 3 milhões de quilômetros quadrados (GIGLIO et al., 2006).

Para compreender e modelar os efeitos das queimadas e seu papel nas interações biosfera-atmosfera, torna-se necessário o conhecimento do tamanho da queimada. Muitos modelos utilizam o valor da área queimada necessário para as estimativas de emissão de gases traços e aerossóis. Além disto, um dos grandes desafios na modelagem numérica de concentrações de gases traços e aerossóis é determinar a área de fogo ativo, uma vez que este parâmetro está diretamente ligado à estimativa da altura de injeção da pluma originada no processo de combustão.

Um dos métodos para estimar a temperatura e a área real do fogo no subpixel (elementos que formam um determinado pixel) foi introduzido por Dozier (1981). Este método, considerado como bi-espectral, consiste em separar o pixel em duas componentes, uma contendo a região com o fogo e a outra referente ao seu entorno como demonstrado nas Equações 2 e 3:

$$L_{4\mu m} = A_f \cdot B(\lambda_{4\mu m}, T_f) + (1 - A_f) \cdot B(\lambda_{4\mu m}, T_b) \quad (2)$$

$$L_{11\mu m} = A_f \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_f) + (1 - A_f) \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_b) \quad (3)$$

Em que L representa a radiância espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) nos canais centrados em 4 μm e 11 μm , $B(\lambda, T)$ é a lei de Planck, A_f representa a área do fogo (m^2), λ é o comprimento de onda (μm) e T_f e T_b correspondem a temperatura do fogo e do background (K), respectivamente.

As desvantagens de utilizar o método proposto por Dozier (1981) é que erros introduzidos no processo de aquisição dos dados para cada

banda como, por exemplo, ruídos eletrônicos, correção atmosférica, erros de registros entre bandas de diferentes resoluções espaciais, estimativa da temperatura do background, diferenças de sensibilidade, saturação e da função de espalhamento pontual podem ocasionar variações superiores a 100% nos valores obtidos (GIGLIO et al., 2003; WOOSTER et al., 2005; PEREIRA et al., 2009). Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal estimar a área de fogo ativo e seus valores climatológicos para diferentes fisionomias vegetais a partir da potência radiativa do fogo (FRP) calculada por satélites de média/baixa resolução.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Potência Radiativa do Fogo (FRP)

A taxa na qual a REM é emitida pelo fogo, ou a potência radiativa do fogo (do inglês Fire Radiative Power, FRP) liberada no processo de combustão, constituiu-se como um indicador da quantidade de biomassa consumida ou mesmo da taxa de emissão de aerossóis e gases traços 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 4:

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

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), A_n representa a área fracional (m^2) da n ésima componente termal, T é a temperatura (K) da n ésima componente e ϵ representa a emissividade.

2.2 Dados Orbitais utilizados

2.2.1 MODIS/EOS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (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 contém as informações sobre os focos de queimada e 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).

2.2.2 WFABBA/GOES

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. Atualmente a detecção dos focos de queimada utilizam as faixas espectrais centradas em 3,9 μm e 10,7 μm que possuem uma resolução espacial nominal de 2,3 km x 4,0 km, que varia de acordo com o ângulo de imageamento (PRINS et al., 1992).

O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) é um produto para detecção de focos de queimada baseado no satélite GOES, disponibilizado com uma alta frequência de observações. Os dados disponibilizados contém a hora da passagem do satélite, a longitude, a latitude, o ângulo de imageamento do satélite, o tamanho do pixel, a temperatura em 4 μm e 11 μm , a temperatura e a área do subpixel com fogo, a FRP, o tipo de ecossistema e a característica do pixel (XU et al., 2010).

2.2.3 TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7

Os sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo dos satélites Landsat 5 e Landsat 7, respectivamente, apresentam resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 30 metros para as bandas multiespectrais. Estes satélites são provenientes do programa *Earth Resource Technology Satellite* (ERTS) criado na década de 60. O satélite Landsat 5 foi lançado em março de 1984 e possui órbita quase-polar, com altitude de 705 km. Este satélite possui 7 bandas espectrais, obtendo informações das regiões do espectro eletromagnético referentes ao visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal.

O satélite Landsat 7 foi lançado em abril de 1999 e apresenta algumas melhorias em relação ao

Landsat 5, entre elas pode-se destacar a banda pancromática de 15 metros e o aumento da resolução espacial (120 m para 60 m) da banda do infravermelho termal.

2.3 Metodologia

A Figura 1 mostra o fluxograma da metodologia adotada para estimar os valores médios da área de fogo ativo (I) e para originar os coeficientes de área de fogo ativo baseados na FRP (II). A primeira etapa consistiu na utilização das imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7 de 1985 a 2010 a partir da amostragem aleatória de 79 órbitas/pontos do Landsat estratificadas pela área dos biomas presentes no Brasil e pela distribuição dos valores médios de FRP. Foram selecionadas 32 cenas na região amazônica, 17 cenas no bioma Cerrado, 11 cenas no bioma Mata Atlântica, 7 cenas no bioma Caatinga, 4 cenas no bioma Pantanal, 1 cena no bioma Pampa e 6 cenas referentes à amostragem na Bolívia e Paraguai.

Após a determinação de cada órbita/ponto pelo processo de amostragem aleatória estratificada, foram selecionadas todas as cenas disponíveis. Nesta etapa, optou-se por eliminar cenas com cobertura de nuvem superior a 50%, totalizando ao final aproximadamente 4700 cenas. Após a seleção, as imagens foram inseridas no programa ENVI e a banda 7 dos sensores TM e ETM+, referente ao infravermelho médio (2,08 a 2,35 μm), foi classificada adotando-se como limiar os valores saturados da imagem (nível de cinza acima de 254). Nesta etapa não houve a necessidade de correção atmosférica das imagens, pois apenas os valores saturados foram analisados.

Selecionou-se a banda 7 devido à sensibilidade para temperaturas elevadas, uma vez que áreas em combustão podem alcançar valores superiores a 1700 K e, segundo a lei de deslocamento de Wien, possuem máxima emissão de radiação eletromagnética em comprimentos de onda inferiores a 2 μm .

Após a classificação da imagem, o processamento da área com fogo ativo baseou-se na comparação simultânea de imagens nas composições 1B2G3R e 3B4G5R e na imagem classificada. Após a estimativa de área de fogo ativo para cada cena, estas foram separadas de acordo com as seguintes classes: floresta, vegetação herbáceo-arbustiva, pastagem e agricultura.

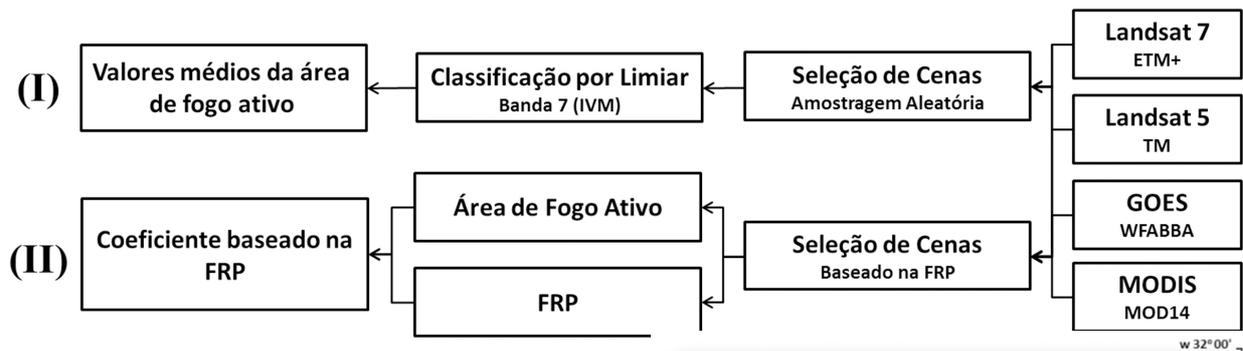


Fig. 1 – Fluxograma da Metodologia.

A segunda etapa consistiu na determinação do coeficiente de área de fogo ativo baseado na FRP. Nesta etapa, selecionaram-se imagens aleatórias por todo o Brasil de acordo com as observações simultâneas das áreas de fogo ativo extraídas das imagens dos sensores TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7 e da FRP provenientes dos produtos MODIS14 e WFABBA. A partir da análise da FRP liberada para cada foco de calor e para a área de fogo ativo, determinaram-se os coeficientes para floresta densa, vegetação herbáceo-arbustiva, pastagem e agricultura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Valores médios da área de fogo ativo para a América do Sul

A Figura 2 mostra a distribuição dos pontos de fogo ativo obtida a partir do processamento de 4700 imagens. A partir destes pontos realizaram-se os processamentos para a determinação dos valores médios de área de fogo ativo, correspondente apenas à fração chamusca, para diferentes formações vegetais. Ressalta-se que algumas cenas selecionadas não puderam ser estimadas devido à presença de nuvens e ausência de áreas com plumas.

Desta forma, das 79 cenas selecionadas pela amostragem aleatória estratificada, apenas 68 apresentaram observações de fogo ativo, contabilizando aproximadamente 800 pontos, espalhados pelo Brasil, Bolívia e Paraguai. Percebe-se que as maiores concentrações de pontos estão localizadas nas órbitas/pontos 220/65, 224/65, 223/66, 220/67 e 220/75, as quais englobam quantidade significativa dos pontos dos biomas Amazônia e Cerrado.

A Figura 3 apresenta os valores das estimativas de área de fogo ativo a partir dos 800

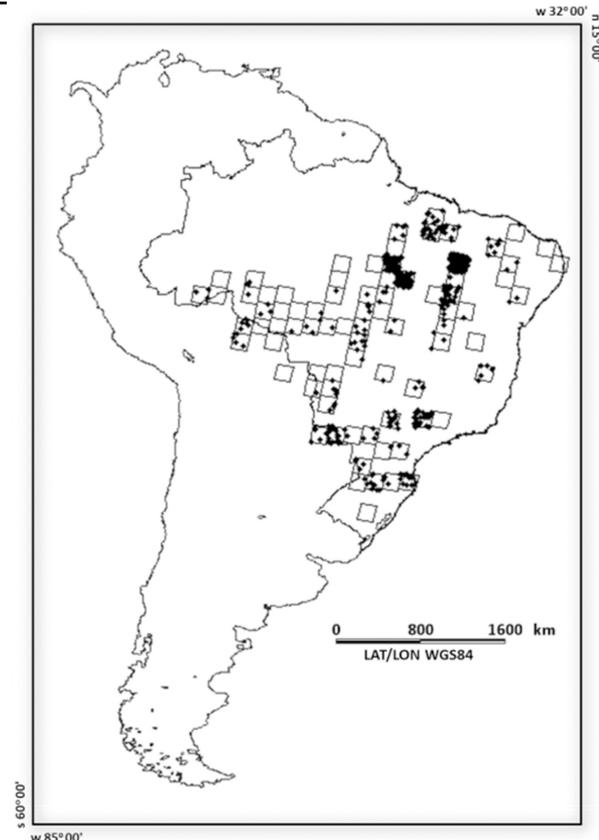


Fig. 2 – Distribuição dos pontos com informações da área de fogo ativo para a América do Sul

pontos coletados a partir das imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7. Observa-se que os tamanhos das áreas variam de acordo com a formação vegetal e uso do solo. Para áreas de Floresta (Figura 3A), como, por exemplo, a Floresta Amazônica e a Floresta Ombrófila Densa, aproximadamente 50% das amostras possuem valores entre 1170 e 4042 m². Ainda, 90% das amostras apresentam valores até 7000 m², na qual, o valor médio de área de fogo ativo foi estimado em 4500 m². Porém, para áreas de floresta é comum encontrar valores que podem superar 20.000 m².

Para regiões onde o uso do solo é predominantemente composto por áreas agrícolas e áreas de pastagem (Figuras 3B e 3C), os valores médios encontrados para a área de fogo ativo

correspondem a aproximadamente 13.000 m² e 14.000 m², respectivamente. Para regiões agrícolas e de pastagem, aproximadamente 83% dos valores estimados correspondem a áreas em processo de combustão de até 20.500 m².

A Figura 3D mostra os valores encontrados para fisionomias vegetais predominantemente compostas por vegetação herbáceo-arbustiva. Percebe-se que aproximadamente 78% dos valores encontrados correspondem as áreas de até 11.000 m², com valores médios de 9600 m². Ainda, a classe composta por vegetação herbáceo-arbustiva apresenta valores com pouca variação nas observações, porém, é comum encontrar áreas na qual o fogo ativo possa alcançar 70.000 m².

Entre as categorias analisadas, as áreas de Florestas, relativas à Floresta Amazônica, Floresta Ombrófila Densa e Florestas Estacionais Semidecíduais, apresentaram os menores valores de fogo ativo (variando entre 2.000 m² e 7.000 m²), em que estas estimativas estão relacionadas com a frente de fogo, uma vez que é comum encontrar pequenas frentes de fogo em áreas com grande concentração de biomassa. Ao contrário, áreas de vegetação rasteira possuem frentes de fogo que podem superar 70.000 m². Uma vez que a quantidade de biomassa encontrada nestas regiões é muito baixa, fatores como a velocidade do vento e a umidade presente na biomassa vegetal podem espalhar o fogo para áreas adjacentes, consumindo

rapidamente a biomassa presente acima do solo e criando grandes frentes de fogo.

3.2 Relação entre a potência radiativa do fogo e a área de fogo ativo

A Figura 4A mostra a relação entre o tamanho de fogo, estimado a partir de observações de áreas em processo de combustão presentes nas imagens dos sensores TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7, e a potência radiativa do fogo estimada pelos produtos MOD14/Terra e WFABBA/GOES no horário de aquisição das imagens, para regiões do Brasil onde a cobertura do solo é predominantemente composta por Florestas Ombrófilas, Florestas Deciduais ou Florestas Semidecíduais.

Para cada regressão realizada, analisou-se o grau de incerteza do modelo em relação ao coeficiente angular e sua respectiva correlação, adotando-se a técnica proposta por Efron (1982). Nesta, a partir de um universo amostral de 1,0 x 10⁴, a curva original dos dados é reconstruída e os parâmetros para avaliar o intervalo de confiança para o coeficiente angular e para a correlação do modelo são fornecidos.

Para áreas de Florestas Ombrófilas, Florestas Deciduais ou Florestas Semidecíduais encontrou-se correlação de aproximadamente 94% (significativa a p<0.01, teste *t-student*) entre a área em processo de combustão, composta pela fração

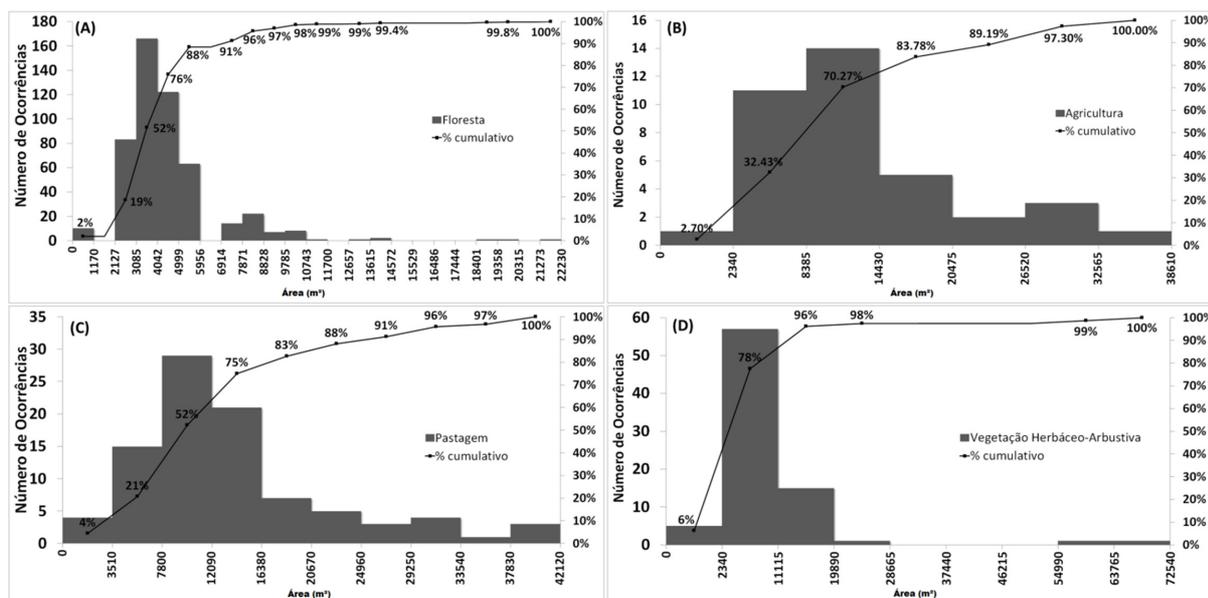


Fig. 3 – Distribuição do tamanho da área de fogo ativo e frequência cumulativa do número de ocorrências para: (A) Floresta; (B) Agricultura; (C) Pastagem; e (D) Vegetação Herbáceo-Arbustiva.

chama e fração brasa, e a potência radiativa do foco estimada pelos satélites, variando entre 90% e 99% (Figura 4C). Nestas áreas, o coeficiente que relaciona ambas as variáveis encontra-se entre $1,6 \times 10^{-4}$ e $2,4 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$ (Figura 4B), com a maior probabilidade de ocorrência em $2,1 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$.

Assim como na análise climatológica das áreas de fogo ativo para regiões de Florestas que apresentam plumas (Fig. 3A), este tipo de formação vegetal apresenta a menor estimativa de área em processo de combustão. Porém, para estas regiões, menor área libera maior quantidade de energia radiativa devido à quantidade de biomassa disponível no processo. Para áreas de Florestas Ombrófilas, Florestas Deciduais ou Florestas Semideciduais foram analisadas 54 observações simultâneas entre 2000 e 2010, que compõem regiões de Floresta Amazônica, Florestas alagáveis do Pantanal Sul-mato-grossense e áreas de Mata Atlântica no Sul e Sudeste do Brasil.

Para estas regiões, os valores de potência radiativa do fogo variaram entre 66 e 2650 MW, que corresponderam a regiões com poucas áreas em processo de combustão e regiões na qual existiam diversas queimadas nas áreas correspondentes ao imageamento de determinado sensor.

Como observado na Figura 5, para regiões com o predomínio de vegetação herbáceo-arbustiva, encontrou-se correlação de aproximadamente 90% (significante a $p < 0.01$, teste *t-student*) entre o tamanho de fogo ativo e a potência radiativa do foco estimada pelos produtos MOD14/Terra e WFABBA/GOES, variando entre 75% e 99% (Figura 5C). Nestas áreas, o coeficiente que relaciona ambas as variáveis encontra-se principalmente entre $1,5 \times 10^{-4}$ e $2,5 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$ (Figura 5B), com a maior probabilidade de ocorrência em $2,2 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$.

Assim como na análise climatológica das áreas de fogo ativo para regiões de vegetação herbáceo-arbustiva (Fig. 3D), este tipo de formação vegetal apresenta comportamento similar às áreas de Floresta. Para esta classe, foram analisadas 41 observações entre 2000 e 2010, que compõem regiões de regeneração no bioma Amazônia, Pastos sujos do Pantanal Sul-mato-grossense, áreas de Cerrado no Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e na Caatinga dos Estados de Pernambuco, Ceará e Bahia.

Como observado na Figura 6, para áreas agrícolas encontrou-se correlação de aproximadamente 95% (significante a $p < 0.01$, teste *t-student*) entre o tamanho de fogo ativo e a

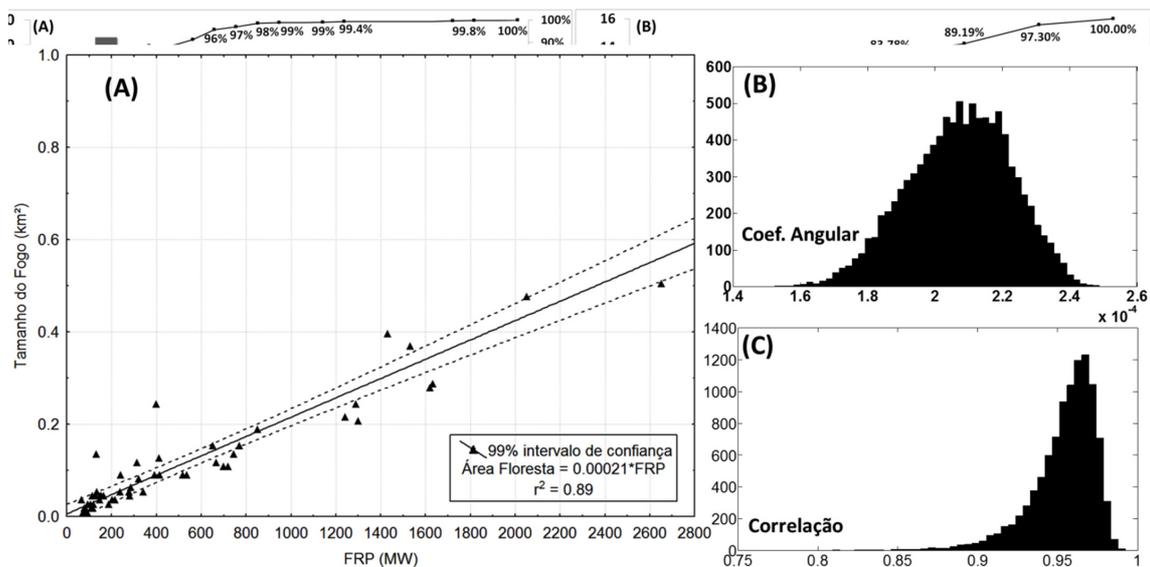


Fig. 4 – (A) Relação entre o tamanho de fogo para áreas de Florestas Ombrófilas, Florestas Deciduais ou Florestas Semideciduais, estimado a partir de imagens TM e ETM+, e a potência radiativa do fogo simultânea à observação, provenientes dos produtos MOD14 e WFABBA; (B) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação ao coeficiente angular; e (C) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação à correlação.

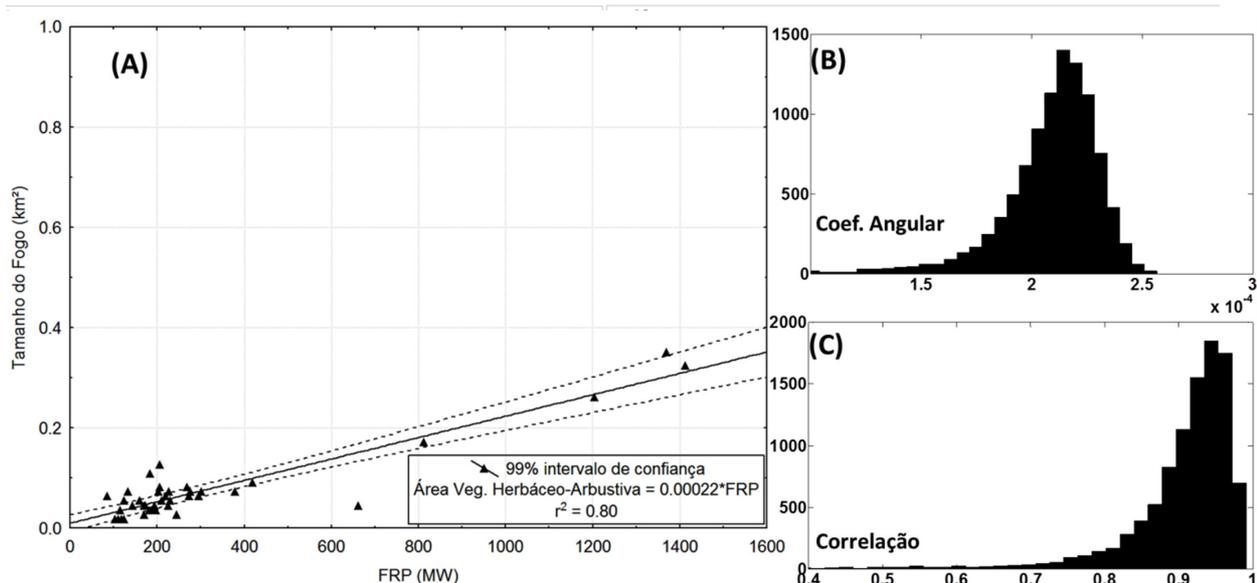


Fig. 5 – (A) Relação entre o tamanho de fogo para área de vegetação herbáceo-arbustiva, estimada a partir de imagens TM e ETM+, e a potência radiativa do fogo simultânea à observação, provenientes dos produtos MOD14 e WFABBA; (B) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação ao coeficiente angular; e (C) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação à correlação.

potência radiativa do fogo estimada pelos produtos MOD14/Terra e WFABBA/GOES, variando entre 80% e 99% (Figura 6C). Em áreas agrícolas o coeficiente que estima o tamanho do fogo a partir da FRP varia entre $2,2 \times 10^{-4}$ e $3,3 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$ (Figura 6B), com a maior probabilidade de ocorrência em $2,6 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$.

Do mesmo modo que os resultados encontrados na análise climatológica das áreas de fogo ativo para áreas agrícolas (Fig. 3B), este tipo de uso do solo apresenta comportamento distinto das áreas de floresta e vegetação herbáceo-arbustiva. Para esta classe, foram analisados 33 pontos entre 2000 e 2010, que compõem regiões de cana-de-açúcar em São Paulo, regiões agrícolas no Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins e Minas Gerais, além de áreas presentes na Bolívia e Paraguai.

O coeficiente para estimar o tamanho de fogo ativo para áreas agrícolas foi aproximadamente 24% maior que o encontrado para áreas de Floresta e 18% maior que o mesmo coeficiente utilizado para estimar o tamanho do fogo em áreas de vegetação herbáceo-arbustiva. Tal fato é atribuído à quantidade de biomassa presente no processo de renovação de áreas agrícolas, que apresenta baixa quantidade de biomassa e processo de combustão rápido.

Como visualizado na Figura 7, para áreas de pastagem/gramíneas encontrou-se uma correlação

de aproximadamente 92% (significante a $p < 0.01$, teste *t-student*) entre o tamanho de fogo ativo e a potência radiativa do fogo estimada pelos produtos MOD14/Terra e WFABBA/GOES, variando entre 80% e 99% (Figura 7C). Em áreas de pastagem/gramíneas o coeficiente que estima o tamanho do fogo a partir da FRP varia entre $2,5 \times 10^{-4}$ e $3,8 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$ (Figura 7B), com a maior probabilidade de ocorrência em $2,9 \times 10^{-4} \text{ km}^2 \cdot \text{MW}^{-1}$.

Do mesmo modo que os resultados encontrados na análise climatológica (Fig. 3C), este tipo de uso e cobertura do solo apresenta comportamento distinto das áreas de floresta e vegetação herbáceo-arbustiva, apresentando característica similar às áreas agrícolas. Para áreas de pastagem/gramíneas, foram analisados 47 pontos entre 2000 e 2010, que compõem regiões do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Pará, assim como, áreas desmatadas na região amazônica.

O coeficiente para estimar o tamanho de fogo ativo para áreas de pastagem/gramíneas é aproximadamente 38% maior que o encontrado para áreas de Floresta e 31% maior que o mesmo coeficiente utilizado para estimar o tamanho do fogo em áreas de vegetação herbáceo-arbustiva e 11%

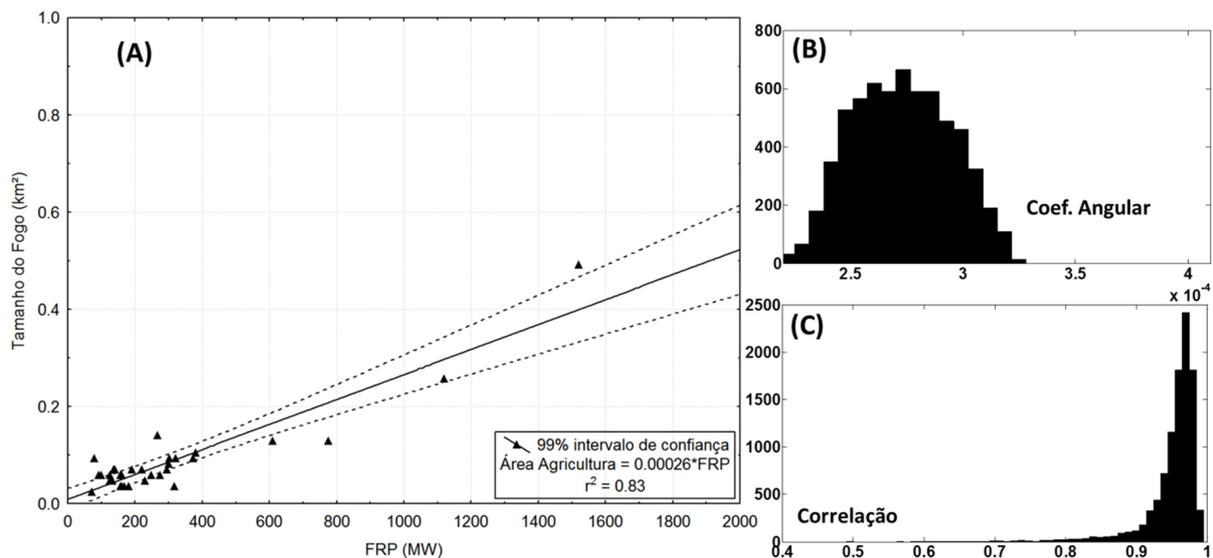


Fig. 6 – (A) Relação entre o tamanho de fogo para áreas agrícolas, estimado a partir de imagens TM e ETM+, e a potência radiativa do fogo simultânea à observação, provenientes dos produtos MOD14 e WFABBA; (B) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação ao coeficiente angular; e (C) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação à correlação.

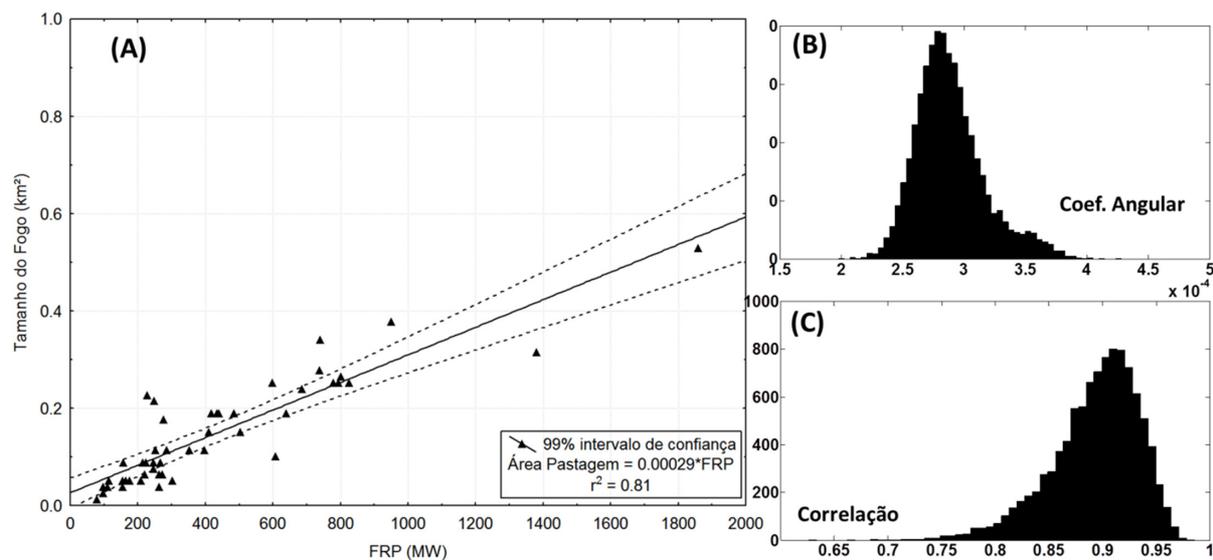


Fig. 7 – (A) Relação entre o tamanho de fogo para áreas de pastagem e gramíneas, estimado a partir de imagens TM e ETM+, e a potência radiativa do fogo simultânea à observação, provenientes dos produtos MOD14 e WFABBA; (B) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação ao coeficiente angular; e (C) Grau de incerteza do modelo de regressão em relação à correlação.

maior que o coeficiente empregado em áreas agrícolas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os produtos operacionais possam estimar a área de fogo ativo, fatores inerentes à aquisição dos dados e registro das informações podem ocasionar variações significativas nos valores obtidos. Além disto, a sensibilidade de saturação dos detectores dos sensores aliadas à função de espalhamento pontual e às características de cada

sensor ocasionam variações significativas nestas estimativas. Desta forma, percebe-se uma tendência de redução na estimativa da área de fogo ativo com o aumento da temperatura do fogo, assim como, uma tendência de aumento da área do fogo para pixels que apresentem temperaturas baixas. Conseqüentemente, o desenvolvimento de mapas climatológicos e coeficientes baseados na FRP permitem originar estimativas de área de fogo ativo para todo o globo, os quais estão relacionados com

os produtos derivados de satélites ambientais e ponderados pela energia desprendida no processo de combustão.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, p. 221-229, 1981.

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

GIGLIO, L.; KENDALL, J.; MACK, R. A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the TRMM VIRS, **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 4505-4525, 2003.

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 26/06/2011.

GIGLIO, L.; VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P.S. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations.

Atmospheric Chemistry and Physics, v. 6, p. 957-974, 2006.

HAO, W. M.; LIU, M-H. Spatial and temporal distribution of biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 8, p. 495-503, 2000.

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.

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, 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.

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.

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.