

## Climatologia da área de fogo ativo para o Brasil

Gabriel Pereira<sup>1</sup>  
Francielle da Silva Cardozo<sup>1</sup>  
Fabrício Brito Silva<sup>1</sup>  
Saulo Ribeiro de Freitas<sup>1</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>

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

**Abstract.** Wildfires plays a fundamental intervention in global biogeochemical cycle, by the chemical reaction that occurs in the combustion process, the organic compounds present in vegetation returns to the atmosphere and soil in a cyclical behavior. It is estimated that the first fires occurred at the end of the Silurian period about 405 million years, mainly caused by lightning and spontaneous combustion. 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. This issue affects the environment, altering the atmospheric and surface radiation balance, besides the hydrological cycles. Therefore, the main objective of this work is to develop a method to estimate the instantaneous fire size to Brazil through Thematic Mapper (TM) aboard of Landsat 5 and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) aboard of Landsat 7. To create the Brazilian fire size climatology, 79 path/row Landsat scenes were randomly sampled by biome and fire Radiative power distribution. The results indicate that average fire size in grasslands and pasture has 10.000m<sup>2</sup> and reaches a maximum of 30.000m<sup>2</sup>. Also, forested areas and herbaceous/shrubby vegetation presented fire size of 4000m<sup>2</sup> and 7500m<sup>2</sup>, respectively.

**Palavras-chave:** biomass burning, active fire area, remote sensing, Landsat 5, queima de biomassa, área de fogo ativo, sensoriamento remoto, Landsat 5.

### 1. Introdução

As queimadas desempenham um 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 as primeiras queimadas ocorreram no final do período Siluriano a aproximadamente 405 milhões de anos, provocadas principalmente por raios e combustão espontânea (Edwards e Axe, 2004). Atualmente, estima-se que aproximadamente 90% das queimadas possuam alguma ligação com processos antropogênicos (Andreae, 1991).

A queima de biomassa consome anualmente vastas áreas de vegetação no globo e constitui um dos maiores modificadores dos ecossistemas terrestres. A queimada antropogênica está vinculada essencialmente às atividades agropecuárias, desflorestamento, controle de pestes e renovação de pastos e campos. Os gases traços do efeito estufa e aerossóis liberados na queima de biomassa, compostos principalmente por materiais orgânicos oxidados, possuem propriedades físico-químicas que interagem com a radiação eletromagnética (REM) e ocasionam a absorção e espalhamento da mesma. As interações desses compostos radiativamente ativos com a REM e as alterações das propriedades da superfície terrestre provocam modificações significativas no balanço de radiação, nos fluxos de calor latente e sensível, nos ciclos biogeoquímicos e na nucleação de nuvens (Kaufman et al., 1990).

Para compreender e modelar os efeitos das queimadas e seu papel nas interações biosfera-atmosfera torna-se necessário conhecer o tamanho da queimada. Estima-se que anualmente o total de área queimada no globo ultrapasse 3 milhões de quilômetros quadrados (Giglio et al., 2006). Muitos modelos utilizam o valor da área queimada necessário para as estimativas de

emissão de gases traços e aerossóis, porém, atualmente estas estimativas podem ser realizadas por métodos indiretos, que utilizam a energia radiativa desprendida pelo fogo, permitindo o monitoramento em tempo quase-real (Pereira et al., 2009). Desta forma, 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 é de fundamental importância na determinação da altura de injeção da pluma originada do processo de combustão.

Um dos métodos para estimar a temperatura e a área real do fogo no subpixel 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 1 e 2:

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

$$L_{11\mu m} = A_f \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_f) + (1 - A_f) \cdot B(\lambda_{11\mu m}, T_b) \quad (2)$$

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

Uma vez que um pixel com fogo é detectado pelos satélites ambientais, a atividade do fogo contida neste pixel pode ser caracterizada em termos de sua energia radiativa (FRP), descrita como a porção do processo de combustão liberada na forma de radiação eletromagnética. Dada as circunstâncias acima descritas, o presente trabalho tem como objetivo originar mapas climatológicos de área de fogo ativo e suas possíveis integrações com os diferentes produtos orbitais disponíveis.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo e seleção de cenas

Para originar uma climatologia da área de fogo ativo amostraram-se aleatoriamente 79 órbitas/pontos do Landsat estratificadas pela área dos biomas presentes no Brasil (Figura 1a) e pela distribuição dos valores médios de energia radiativa do fogo (Figura 1b) extraídos do produto MOD14 (Terra) e MYD14 (Aqua) durante o período de 2000 a 2010. Desta forma, foram selecionadas 32 cenas no bioma Amazônia, 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 contendo informações da área de estudo. Nesta etapa, optou-se por eliminar cenas com cobertura de nuvem superior a 50%, totalizando ao final aproximadamente 4.700 cenas dos sensores *Thematic Mapper* (TM) do Landsat 5 e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do Landsat 7.

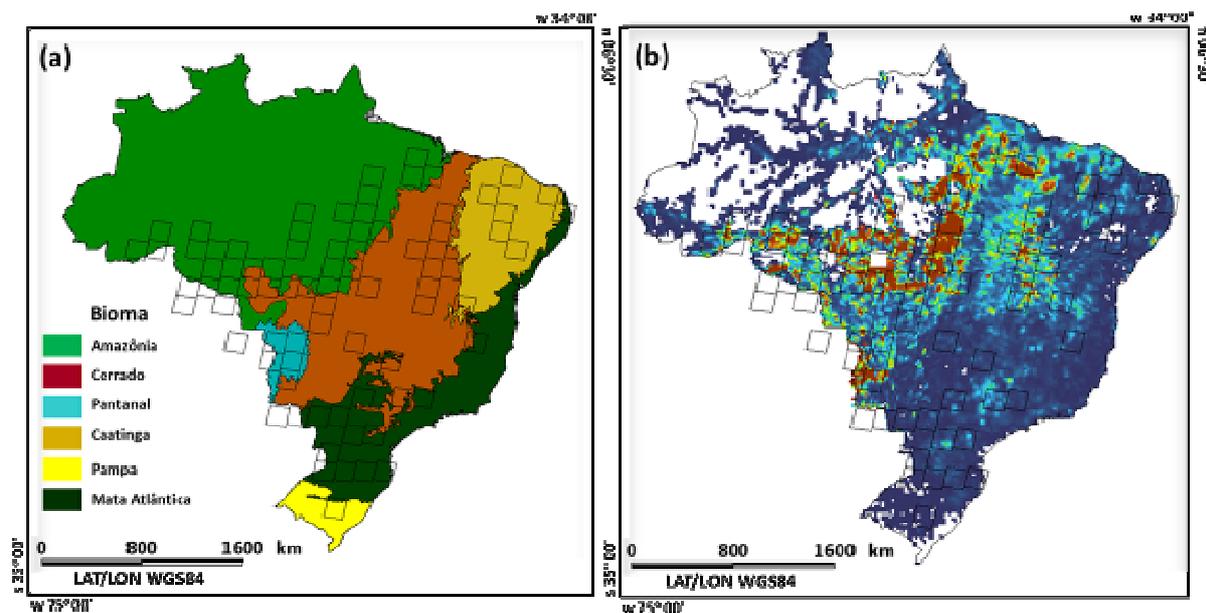


Figura 1. Localização da área de estudo. (a) Biomas encontrados no Brasil e cenas escolhidas para processamento; (b) Energia radiativa do fogo e cenas escolhidas.

## 2.2 Metodologia

A Figura 2 mostra o fluxograma da metodologia adotada para estimar a climatologia do fogo ativo para o Brasil. Na primeira etapa (I) as imagens TM/Landsat 5 e ETM+/Landsat 7 de 1985 a 2010 foram selecionadas e inseridas no programa ENVI, após esta etapa, a banda 7, referente ao infravermelho médio (2,08 a 2,35  $\mu\text{m}$ ), foi classificada adotando-se como limiar os valores saturados da imagem (nível de cinza acima de 254). 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  $\mu\text{m}$ .

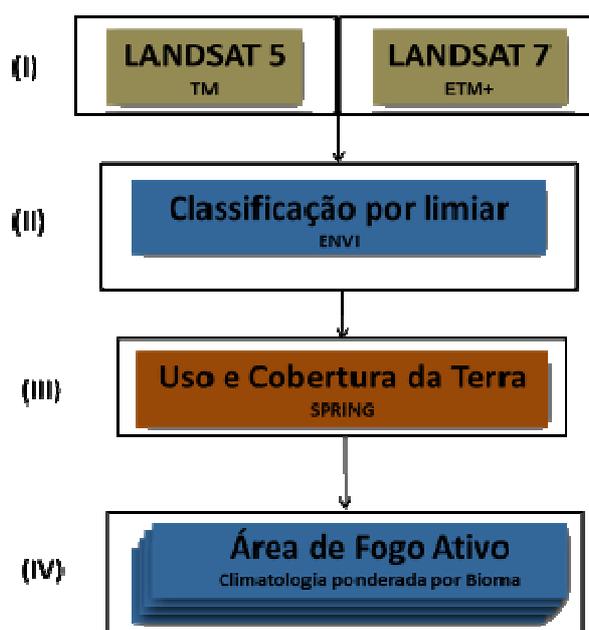


Figura 2. Fluxograma da metodologia.

Após a classificação da imagem, o processamento da área com fogo ativo baseou-se na comparação simultânea de imagens na composição 1B2G3R e 3B4G5R e na imagem classificada. No final do processamento referente à etapa (II) determinou-se a localização geográfica (latitude e longitude), o número de pixels com a presença de fogo e o tipo de uso e cobertura da terra predominante (Área de floresta, Vegetação herbáceo-arbustiva, Pastagem/Gramínea e Agricultura). A Figura 3 mostra um exemplo para estimar uma área de fogo ativo para a cena 223/69, inserida no município de São Miguel do Araguaia em Goiás na data de 13/09/2007. Percebe-se na Figura 3a (composição cor-verdadeira 1B2G3R) e Figura 3b (composição falsa-cor 3B4G5R) duas áreas de intensas queimadas e suas respectivas plumas (uma localizada dentro da área em amarelo e outra abaixo desta). Ainda, pela composição falsa-cor da área em destaque (Figura 3c), pode-se visualizar que além das áreas com plumas, ocorre a presença de diversos pixels saturados devido à elevada temperatura, ocasionado, principalmente, pelas cinzas restantes do processo de combustão e pelo aumento da absorção da radiação eletromagnética devido ao decréscimo do albedo da superfície.

Ainda, é possível visualizar faixas paralelas provocadas pela saturação de determinados detectores ao imagear uma área de intensa queimada, ocasionando ruídos no sentido Leste-Oeste devido ao sistema de imageamento *wisk broom*. Para o mapeamento do fogo ativo utilizaram-se apenas focos com plumas, como indicados em (2), eliminando, desta forma, pixels saturados que não apresentam valores significativos de emissão de gases traços e aerossóis, descrito em (3).

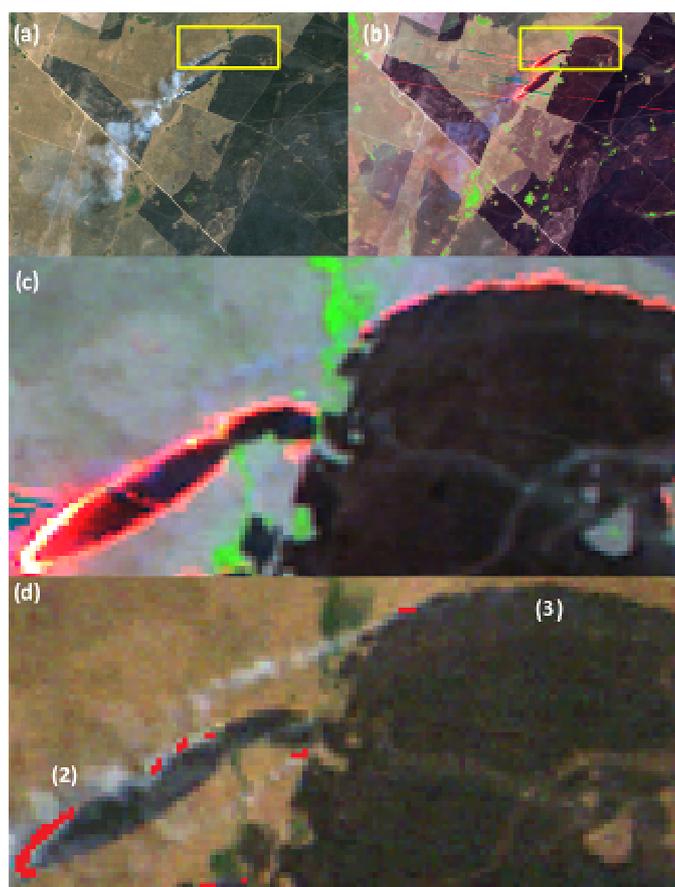


Figura 3. (a) Imagem 223/69 composição cor-verdadeira 1B2G3R; (b) Imagem composição falsa-cor 3B4G5R; (c) Área ampliada que mostra pixels saturados devido à sensibilidade do detector em imagear áreas com elevada temperatura; (d) Área ampliada indicando, em vermelho, os pixels mapeados com a presença de fogo.

Após a estimativa de área de fogo ativo para cada cena, estas foram agrupadas em Floresta densa, Vegetação herbáceo-arbustiva, Pastagem, Floresta derrubada e Agricultura, e seus valores atribuídos às classes de uso e cobertura da terra similares obtidas dos produtos *Global Land Cover Characterization (GLCC)*, originado a partir de dados orbitais do sensor AVHRR a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* com resolução espacial nominal de 1 km para o ano de 1992, e do produto MCD12 proveniente dos dados do sensor MODIS para o ano de 2006.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 4a mostra a distribuição dos pontos de área de fogo ativo obtidos a partir do processamento de 4700 imagens. 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 por Brasil, Bolívia e Paraguai. A Figura 4b mostra a densidade de distribuição espacial dos pontos a partir do estimador de densidade por Kernel, que representa uma medida de influência dos pontos na área de estudo selecionada. Percebe-se que as maiores concentrações de pontos estão localizadas nas cenas 220/65, 224/65, 223/66, 220/67 e 220/75, as quais englobam uma quantidade significativa dos pontos dos biomas Amazônia e Cerrado.

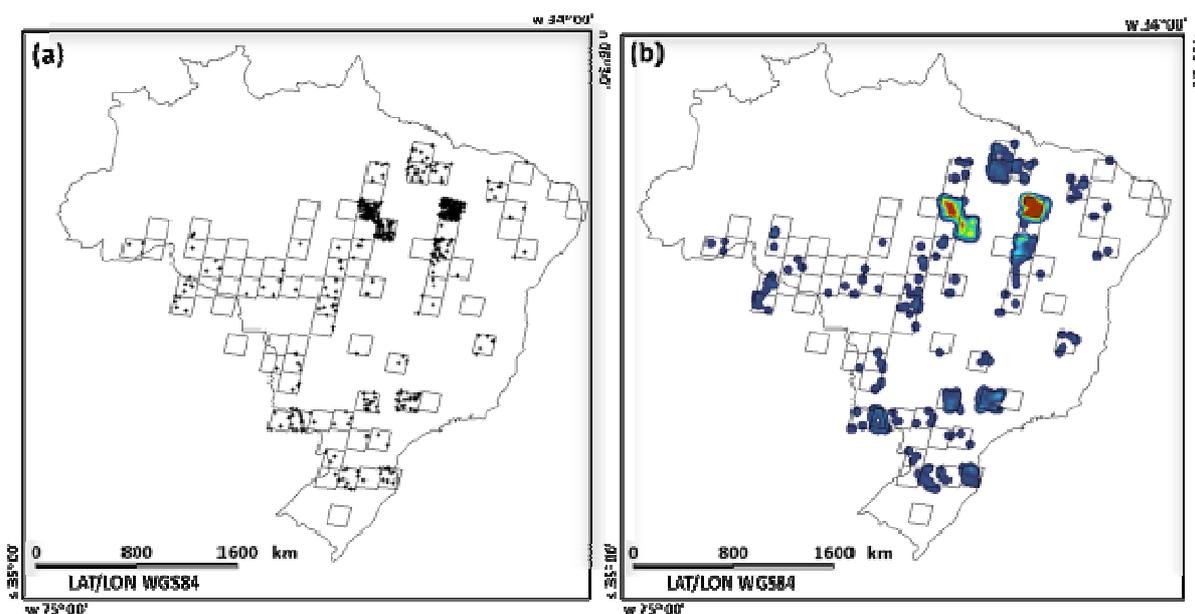


Figura 4. (a) Pontos contendo informações sobre a estimativa de área com fogo ativo de 1985 a 2010; (b) Estimador de densidade por Kernel, indicando em vermelho as maiores concentrações de pontos.

A Figura 5 apresenta a distribuição da área de fogo ativo para 4 classes de uso e cobertura da terra (Pastagem/Gramínea, Vegetação herbáceo-arbustiva, Agricultura e Floresta), assim como, os valores médios, intervalos de confiança para cada conjunto de dados, intervalo de previsão (intervalo dentro do qual 95% das amostras são previstas a partir de uma determinada classe de uso e cobertura da terra), amplitude interquartil (referente ao primeiro quartil subtraído o terceiro quartil), valores não-discrepantes (círculos) e valores discrepantes (*outliers*, asterisco). A partir da análise estatística descritiva, é possível verificar que as classes que apresentam os maiores valores médios de fogo ativo são

Pastagem/Gramíneas e Agricultura, Figuras 5a e 5c, respectivamente. Nestas, os valores médios estimados correspondem a aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup> (1 ha), além disto, estas classes diferem significativamente em relação aos valores máximos obtidos, uma vez que a classe Pastagem/Gramíneas alcança valores superiores a 30.000 m<sup>2</sup> e áreas de Agricultura chegam a no máximo 27.000 m<sup>2</sup>. Ainda, pode-se constatar que a classe Agricultura apresenta uma maior variabilidade nos valores analisados, porém, há uma proximidade muito grande no intervalo de previsão entre as classes Pastagem/Gramíneas e Agricultura.

As Figuras 5b e 5d mostram a distribuição dos valores de área de fogo ativo para a Vegetação herbáceo-arbustiva e Floresta, respectivamente. Percebe-se que a classe Vegetação herbáceo-arbustiva apresenta valores concentrados próximos a 7.500 m<sup>2</sup> com pouca variação nas observações (entre 2.000 m<sup>2</sup> a 15.000 m<sup>2</sup>), porém, percebem-se alguns valores superiores a 50.000 m<sup>2</sup>. Todavia, a classe Floresta exibiu a menor variância entre as classes analisadas, apresentando valores médios de fogo ativo próximo a 4.000 m<sup>2</sup>. Nesta classe, os valores estimados variam de 900 m<sup>2</sup> a 10.000 m<sup>2</sup>, podendo atingir até 20.000 m<sup>2</sup>.

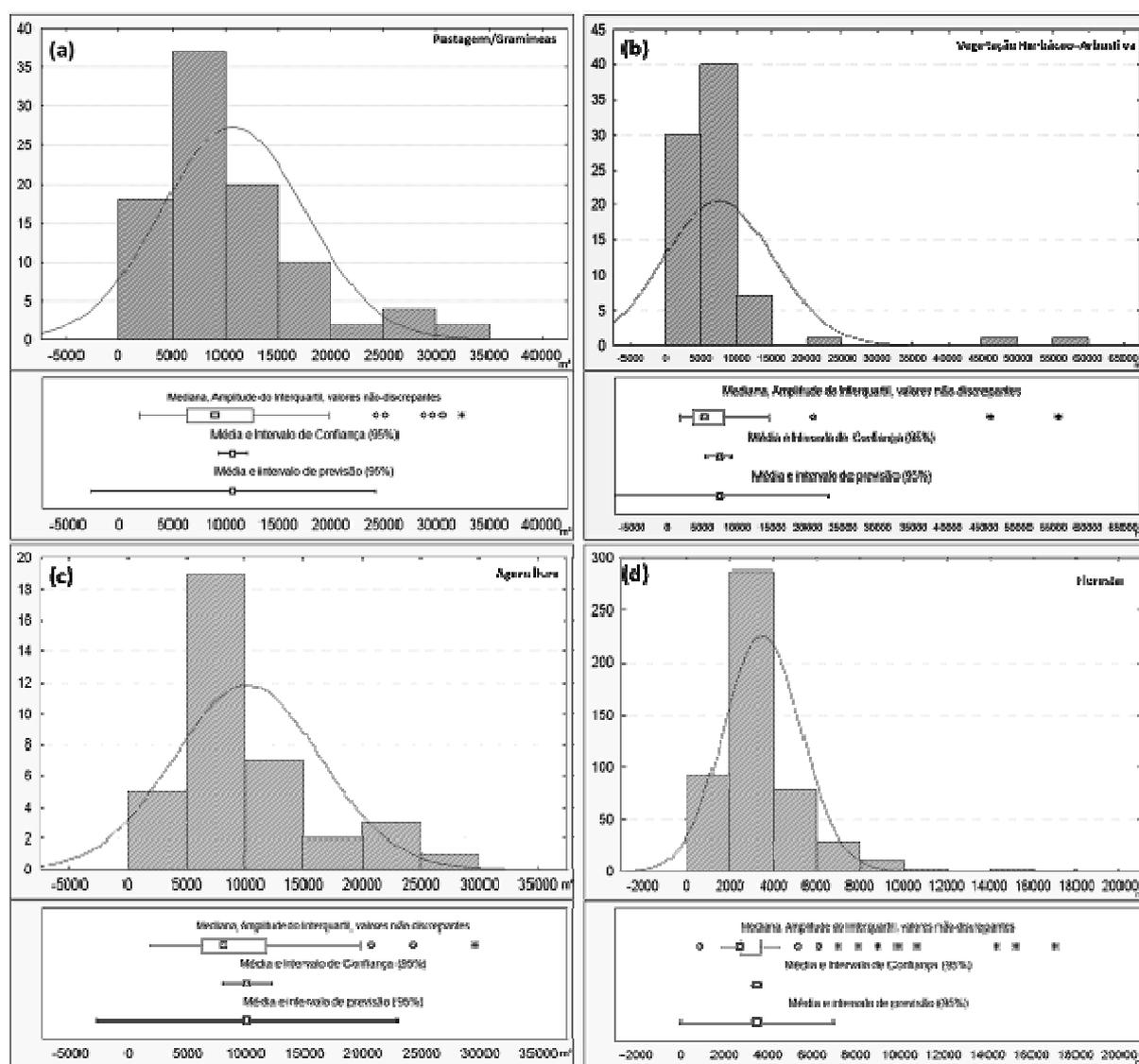


Figura 5. Tamanho da área de fogo ativo para Pastagem/Gramíneas (a), Vegetação herbáceo-arbustiva (b), Agricultura (c) e Floresta (d).

Entre as categorias analisadas, as áreas de Floresta Ombrófila Densa apresentaram os menores valores de fogo ativo (em média de 3.000 m<sup>2</sup> a 7.000 m<sup>2</sup>), 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 50.000 m<sup>2</sup>, uma vez que a quantidade de biomassa encontrada nestas regiões é muito baixa, devido à fatores como a velocidade do vento e facilidade em espalhar o fogo para outras áreas, consumindo rapidamente a biomassa presente acima do solo.

A Figura 6 mostra dois exemplos de mapas temáticos que podem ser utilizados em modelos de qualidade do ar que necessitam da estimativa da área de fogo ativo para calcular a injeção da pluma na atmosfera. Os valores obtidos, referentes à ponderação da média pelo desvio padrão, correspondem à extrapolação das estimativas obtidas pela amostragem aleatória estratificada para todas as classes de uso e cobertura da terra presentes nos produtos derivados de satélites ambientais como, por exemplo, o AVHRR/NOAA (GLCC) e MODIS/EOS (MCD12) para os anos de 1992 e 2006, respectivamente.

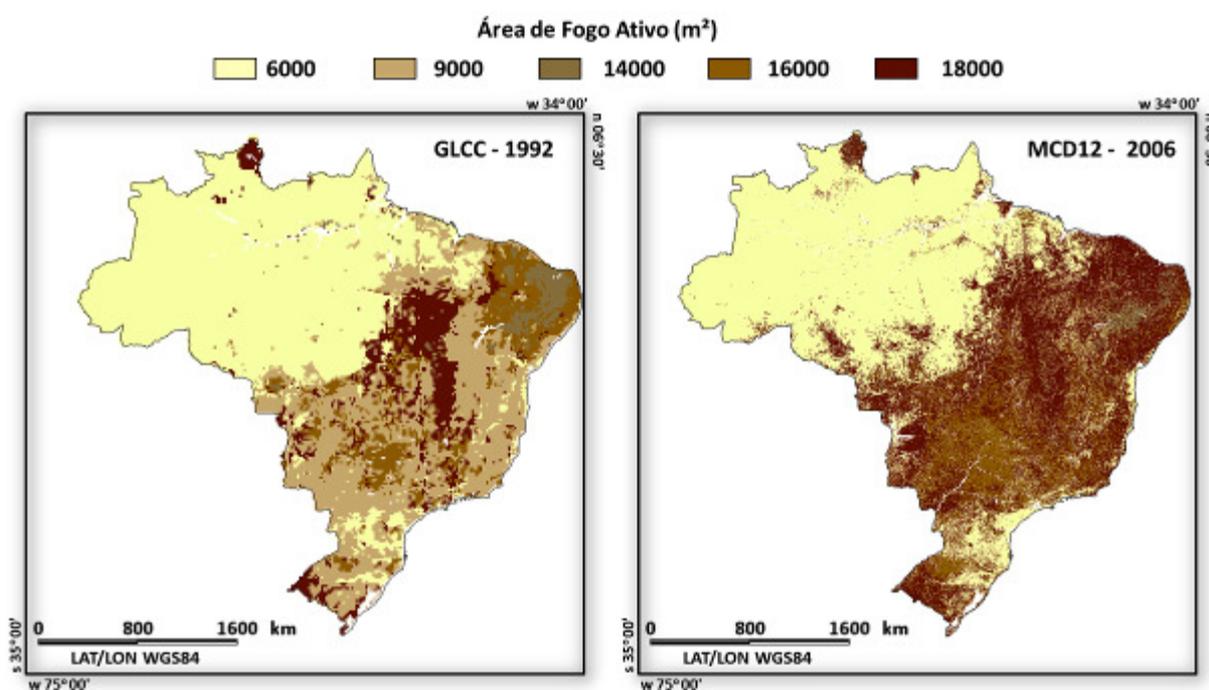


Figura 6. Mapa com as estimativas de fogo ativo para o Brasil a partir dos produtos derivados de satélite GLCC (1992) e MCD12 (2006).

#### 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 satélites 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. Consequentemente, o desenvolvimento de mapas climatológicos permite 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).

## 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.

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

EDWARDS, D.; AXE, L. Anatomical evidence in the detection of the earliest wildfire. **Palaios**, v. 19, p. 113–128, 2004.

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.; 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.

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.

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

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.