

Análise espaço-temporal da ocorrência de áreas queimadas no Cerrado para o período de 2005 a 2014 e sua relação com a precipitação

Tales Bernardes Paulucci¹
Fausto Machado-Silva¹
Renata Libonati¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Meteorologia, CEP 21941-916 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
(tales_bernardes@hotmail.com; fausto.eco@gmail.com; renata.libonati@igeo.ufrj.br)

Abstract. Forest fires, both of natural and anthropogenic origin, have an important role in regional and global ecological and climatic systems. They account for a significant portion of greenhouse gas emissions and soil degradation. Despite the high frequency and significant disturbance caused to the Cerrado biome, fire dynamics and dependence on climatic factors is still not well understood. It is necessary to study the monthly and annual variation of burned areas and their relation to precipitation. This work has estimated monthly burned areas during the period 2005 to 2014 for this biome. The estimates are from the AQM algorithm (INPE / UFRJ), while the rainfall data used are from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). It was identified and mapped the frequency of burned areas in the Cerrado in pixels of 1 km² for the mentioned period. The Cerrado has an average annual burned area of 381.186 ± 128.845 km². There is a significant positive relationship between precipitation and burned areas, both intra and inter-annual scale. The intra-annual analysis showed that the occurrence of fires has a strong relation with the dry season, with a delay of two months. Public policies should be concentrated in the critical drought months because the months on their influence represent almost all of the fires each year.

Palavras-chave: *remote sensing, biomass burning, hot spot, forest fire*; sensoriamento remoto, queima de biomassa, focos de calor, incêndio florestal.

1. Introdução

A ocorrência de queimadas é um processo periódico que possui um papel importante nos sistemas ecológicos e climáticos globais (Van Der Werf et al. 2004). Elas são responsáveis por alterações regionais geomorfológicas, que degradam o solo e transformam a estrutura da vegetação (Levine 1996). Além disso, os fogos na vegetação emitem para a atmosfera aerossóis e gases de efeito estufa (e.g. CO₂, CH₄, N₂O, CO) cerca de 8 vezes mais que a combustão de combustíveis fósseis (Lioussé et al. 2004). Em savanas a incidência de fogo é maior que em outras formações vegetais devido à sua biomassa e variação de precipitação (Bowman et al. 2009). Desta forma, torna-se crucial entender a dinâmica intra e interanual da incidência de áreas queimadas no Cerrado brasileiro, maior savana do planeta e considerada hotspot de biodiversidade (Myers et al. 2000; Da Silva e Bates 2002).

O Cerrado brasileiro pode ser classificado como um bioma dependente do fogo, em que as queimadas ocorrem periodicamente e os seres vivos e os processos ecológicos presentes estão adaptados ao regime do fogo (Hardesty et al. 2005). Porém, nas últimas décadas, as condições climáticas como as secas severas e a pressão do desmatamento devido a agricultura e pastagem contribuíram para aumentar os efeitos das atividades antropogênicas, e consequentemente incêndios florestais nesta região (Pivello 2011).

Informações sobre a extensão, localização e variações temporais das áreas queimadas são cruciais para uma melhor compreensão sobre os diversos forçamentos naturais e antropogênicos no regime do fogo. Portanto, torna-se necessário identificar a influência das variáveis climáticas no regime de fogo no Cerrado através da combinação das informações sobre as ocorrências de fogo via sensoriamento remoto com dados ambientais relevantes para compreender e quantificar as interações entre as causas climáticas, ecológicas e humanas do impacto do fogo.

Vários estudos têm sido realizados utilizando imagens de sensoriamento remoto para mapeamento de área queimada e atenção especial tem sido dedicada ao uso de sensores remotos à escala global. Recentemente foi desenvolvida a base de dados regional de áreas queimadas AQM (Libonati et al. 2015) para o Brasil utilizando dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) com 1 km de resolução espacial. A validação do produto no Cerrado em comparação com os produtos MODIS de área queimada da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) chamados de MCD45 (Roy et al., 2008) e MCD64A1 (Giglio et al. 2009), indica que o produto AQM fornecem informações mais precisas sobre a localização e extensão das cicatrizes de queimadas.

O objetivo deste trabalho é compreender a frequência espacial e temporal de áreas queimadas no Cerrado no período de 2005 a 2014 (10 anos), analisar a variabilidade sazonal e interanual do fogo através da base de dados regional de área queimada regional AQM e comparar com dados de precipitação.

2. Dados e Métodos

2.1 Caracterização do Bioma Cerrado

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando uma área de 2.036.448 km², cerca de 24% do território nacional (Da Silva e Bates 2002; IBGE, 2016). A sua área contínua incide sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, além dos enclaves no Amapá, Roraima e Amazonas. Este bioma é considerado um hotspot de biodiversidade de interesse mundial de conservação, pois apresenta altos valores de riquezas naturais e extrema abundância de espécies endêmicas (Figura 1).

A pressão econômica sobre a região é responsável pela substituição da vegetação nativa em campos de pastagens e áreas agrícolas. Estas atividades utilizam o fogo como ferramenta de expansão das áreas (Pivello 2011) e atualmente o bioma encontra-se reduzido à pelo menos 50% (Klink e Machado, 2005).

2.2 Base de Dados Regional de Área Queimada AQM

Neste trabalho utilizou-se dados mensais de áreas queimadas do produto AQM (Libonati et al. 2015) com 1 km de resolução espacial durante o período de 2005 a 2014. O produto AQM é uma estratégia para estimar a extensão de área queimada em nível regional localizado no Brasil, utiliza dados de sensoriamento remoto e permite a construção de uma base de dados regional mensal e de longo prazo. Atualmente, o algoritmo AQM está operacional no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde experimentos de validação constantes são desenvolvidos para o aprimoramento destas estimativas. Mais sítios de validação estão em processo de desenvolvimento no INPE, que utiliza imagens de Landsat para avaliar a acurácia do mapeamento de fogo em diferentes tipos de vegetação.

2.3 Base de Dados de Precipitação

Os dados de precipitação mensal acumulada são derivados do produto TRMM 3B31 (Haddad, et al. 1997) com 1 km de resolução espacial. Integram a base de dados *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), que é uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration* (JAXA). Esta missão possui o objetivo de fornecer dados mais precisos de precipitação em pesquisas atmosféricas e climáticas através do sensoriamento remoto. O satélite TRMM coletou dados de final de novembro de 1997 até 15 de abril de 2015, produziu mais de 17 anos de um conjunto de dados de precipitação tropical global e descargas elétricas. Para execução deste

estudo foram extraídos dados correspondentes a precipitação mensal sobre o Cerrado durante o período de 2005 a 2014.

2.4 Métodos

Foram extraídos os dados mensais georreferenciados de área queimada do Cerrado pelo algoritmo AQM descrito acima, e elaborado um mapa de distribuição espacial de área queimada no bioma Cerrado a partir das informações de área queimada utilizando o software Matlab. O mapa foi gerado com resolução de 25 km, destacando as áreas com maiores densidades de ocorrência de queimadas ao longo de todo o período.

A manipulação dos dados de área queimada e precipitação mensal foi realizada através do software Excel utilizando os parâmetros estatísticos adequados (regressão linear, média, desvio padrão e correlação). A partir desse método, analisa-se a variabilidade interanual e intraanual da área queimada e precipitação ao longo do período de 10 anos (2005 a 2014) sobre o Cerrado.

3. Resultados e Discussão

3.1 Distribuição Espacial

A distribuição da densidade de áreas de queimada entre os anos de 2005 e 2014 no Cerrado pode ser observada na Figura 1. Nota-se que a região do norte do Cerrado, principalmente próximo ao estado do Tocantins possui maior densidade de ocorrência de fogo, enquanto na porção sul foi detectada menor presença de fogo no período.

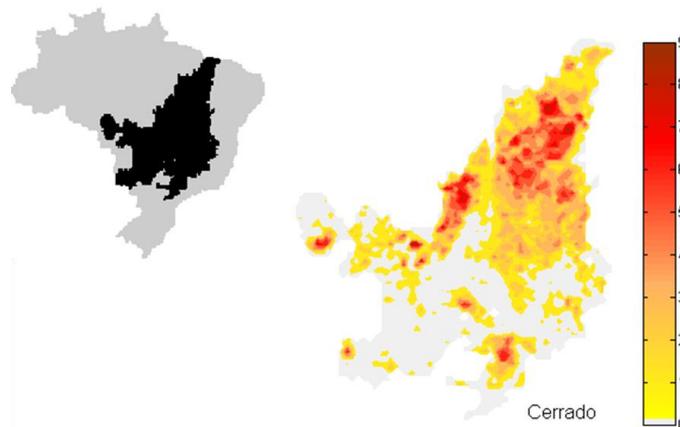


Figura 1. Localização e distribuição espacial de área queimada do Cerrado no período de 2005 a 2014. A escala de cores indica o número de vezes em que foi detectada ocorrência de fogo em cada pixel na última década segundo dados do AQM (grade 25 x 25 km).

3.2 Variabilidade Interanual

A distribuição de área queimada mensal mostrou-se relativamente constante ao longo dos anos. Nos boxplots as barras representam a mediana, 1º e 3º quartil e amplitude e a média está destacada com o “x” (Figura 2). O ano de 2007 apresentou a maior mediana, de 21.650 km²/mês, enquanto o ano com a menor foi o de 2006 com 4.479 km²/mês. O que caracteriza uma amplitude de variação das medianas de 17.172 km²/mês. As médias mensais possuem valores maiores que a mediana, o que indica uma distribuição não normal em que os maiores valores de áreas queimadas concentram acima da mediana e indicam que os poucos meses que apresentam grande quantidade de área queimada contribuem significativamente para a média anual.

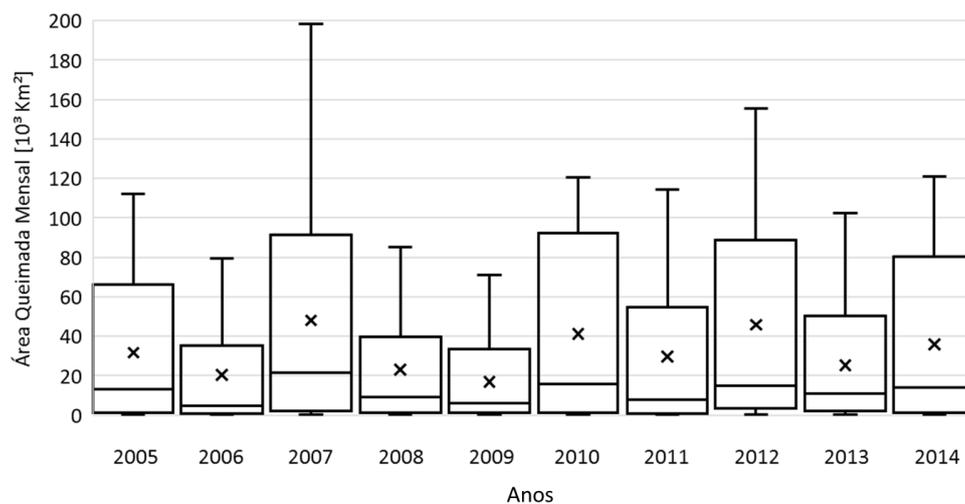


Figura 2. Área queimada mensal (10^3 km^2) em cada ano durante o período de 2005 a 2014. Nos boxplots as barras representam mediana, 1º e 3º interquartil e amplitude. Média destacada com x.

A figura 3 revela que o total anual de áreas queimadas detectado no Cerrado tem relação inversa com a precipitação anual. Durante a década analisada, observa-se uma média anual de áreas queimadas de 381.186 km^2 (com desvio padrão de 128.845 km^2). Neste período destacam-se os anos de 2007 e 2012 com maior ocorrência de área afetada pelo fogo (com anomalias padronizadas superiores a um desvio padrão – círculos fechados), enquanto os anos de 2006 e 2009 foram considerados anos com baixa ocorrência de queimadas (com anomalias padronizadas inferiores a -1 desvio padrão – círculos abertos, Figura 3).

Os anos de maiores valores acumulados de precipitação foram 2009 (1.677 mm) e 2013 (1.615 mm) enquanto os anos mais secos foram 2010 (1.230 mm) e 2007 (1.324 mm). Existe uma forte correlação negativa entre a área queimada e a precipitação anual ($r^2 = 0,65$ e $p < 0,01$). Isso indica que as anomalias anuais de precipitação exercem forte influência na variação de área queimada ao longo dos anos, o que estabelece uma forte relação entre essas duas variáveis (Figura 4).

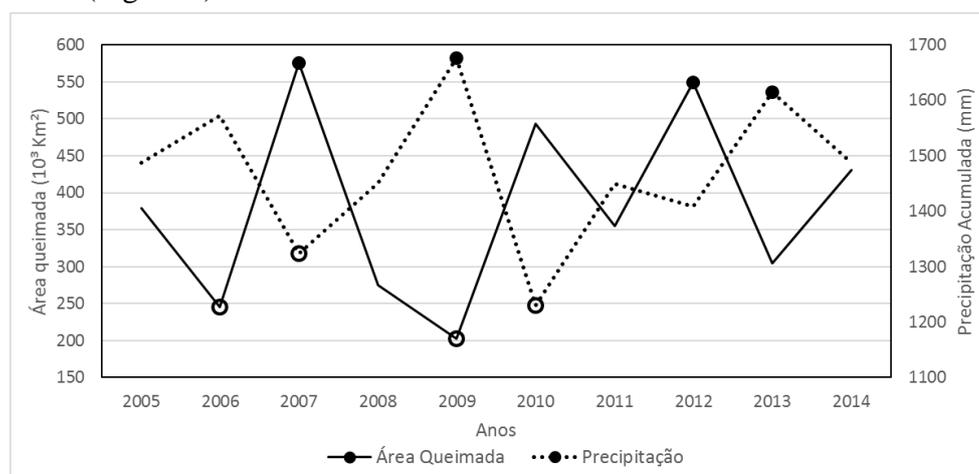


Figura 3: Variabilidade interanual de área queimada (10^3 km^2 , linha sólida) e de precipitação (mm, linha pontilhada) durante o período de 2005 a 2014 no Cerrado. Círculos abertos e fechados representam, respectivamente, anomalias padronizadas menores (maiores) que -1 (1) desvio padrão.

Dos quatro anos que apresentaram quantidades anômalas de área queimada (2006, 2007, 2009 e 2012), somente dois coincidiram com os anos de precipitação anômala (2007 e 2009, Figura 3). Isso indica que, apesar da correlação negativa com áreas queimadas, há outros fatores que influenciam o regime anual da ocorrência de fogo no bioma Cerrado. A ação humana poderia ser um importante fator que explicaria estes resíduos do modelo, como fora reportado por estudos anteriores. Por exemplo, mudanças na estrutura da vegetação devido ao desmatamento para expansão agrícola ou pastagem aumentam a incidência de áreas queimadas (Da Silva & Bates 2002; Ramos-Neto & Pivello 2000). Em contrapartida, políticas públicas de conservação, como proteção e fiscalização, podem aumentar ou diminuir incidência de fogo em savanas (Swaine et al. 1992; Da Silva e Bates 2002). Ambas intervenções possuem suas próprias variações entre os anos estudados e não necessariamente dependem de variação climática.

Conforme descrito anteriormente, existe uma relação linear entre o aumento da precipitação e a diminuição das áreas queimadas ($r = -0,81$; $r^2 = 0,65$ e $p < 0,01$, Figura 4). O coeficiente angular mostra que, em média, a cada aumento de 1 mm de precipitação anual há uma diminuição de 783,23 km² na área queimada. A intercepção reforça que o máximo de 600.000 km² de áreas queimadas em um ano ocorre na precipitação anual mínima de 1200 mm.

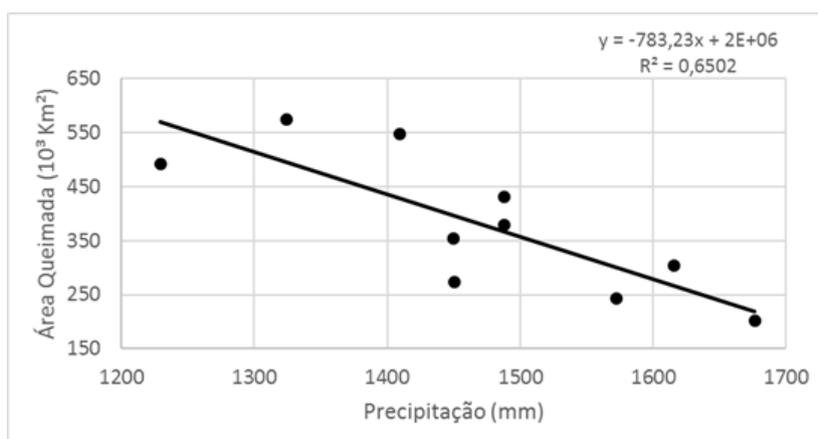


Figura 4. Relação entre precipitação anual (mm) e área queimada no Cerrado durante o período de 2005 a 2014.

3.3 Variabilidade Intraanual

A distribuição intraanual dos dados de área queimada (Figura 5 - painel superior) e precipitação (Figura 5 - painel inferior) durante o período de 2005 até 2014 (10 anos) mostra que existe uma relação entre o período com mais eventos de fogo e de menor precipitação. O mês de setembro apresentou a maior mediana de 108.471 km²/mês enquanto o mês de fevereiro apresentou a menor, de 368 km²/mês, o que caracteriza uma diferença entre medianas de 108.103 km²/mês (Figura 5).

Essa amplitude entre as medianas de áreas queimadas entre os meses foi mais de 6 vezes maior que a entre anos (17.172 km²/mês, Figura 2). Os meses de maior ocorrência de fogo, de julho a outubro, contribuem em média com 84% no somatório do número de queimadas durante o ano (Figura 5). Desta forma, a implementação de políticas públicas, como por exemplo, fiscalização, combate ao fogo, e ainda, a mitigação de seus efeitos, devem ser intensificados neste período crítico.

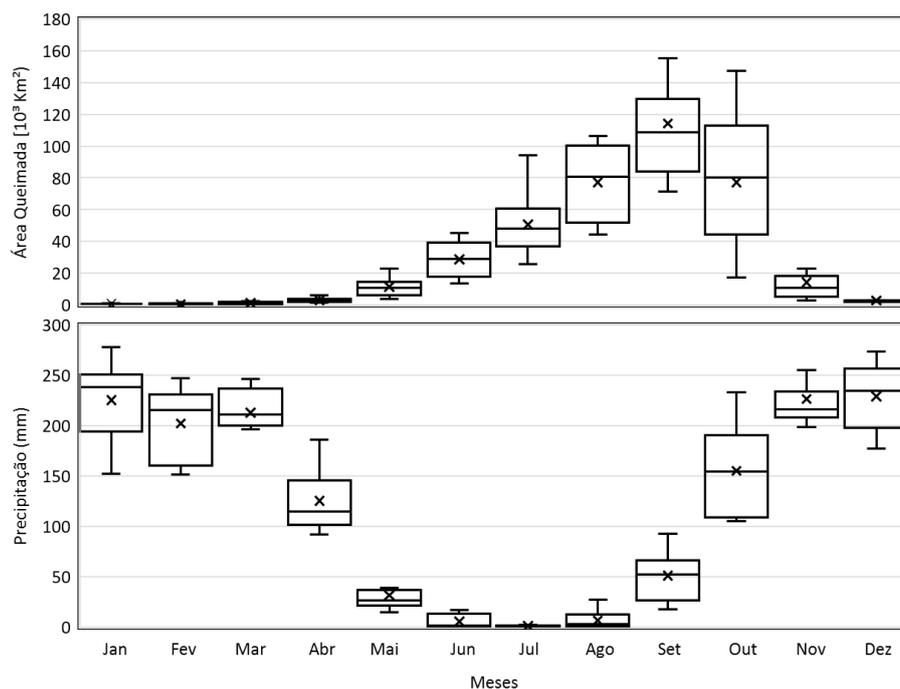


Figura 5: Variação mensal de área queimada (10^3 km^2 , painel superior) e precipitação (mm, painel inferior) no Cerrado durante o período 2005 – 2014. Barras dos boxplots representam mediana, 1º e 3º quartil, e amplitude; “x” é a média de cada mês no período.

A variabilidade sazonal de área queimada no Cerrado está intimamente relacionada com a variabilidade da precipitação, que é caracterizada por um forte período seco de maio a setembro. Há um deslocamento médio de dois meses entre o pico de área queimada (setembro) e o mínimo de precipitação (julho). Esse atraso ocorre naturalmente devido ao tempo que a vegetação leva para entrar em um nível de estresse hídrico crítico para frequência máxima de ocorrência de fogo. Ou seja, a vegetação se torna mais suscetível ao fogo após aproximadamente dois meses de estiagem (Figura 5).

Existe uma relação linear negativa entre a precipitação mensal e a área queimada após dois meses, no Cerrado, durante o período estudado ($r^2 = 0,75$; $p < 0,01$, Figura 6). Em média, o aumento de 1 mm de precipitação no mês evita que $346,06 \text{ km}^2$ sejam queimados dois meses depois. O modelo estima que, em média, ocorre a queima de 74.165 km^2 quando não há precipitação no mês anterior. Portanto, considerando o tempo de resposta que a vegetação leva para se tornar mais suscetível ao fogo, o período com maior atividade de queimadas está intimamente ligado à estação seca de cada ano.

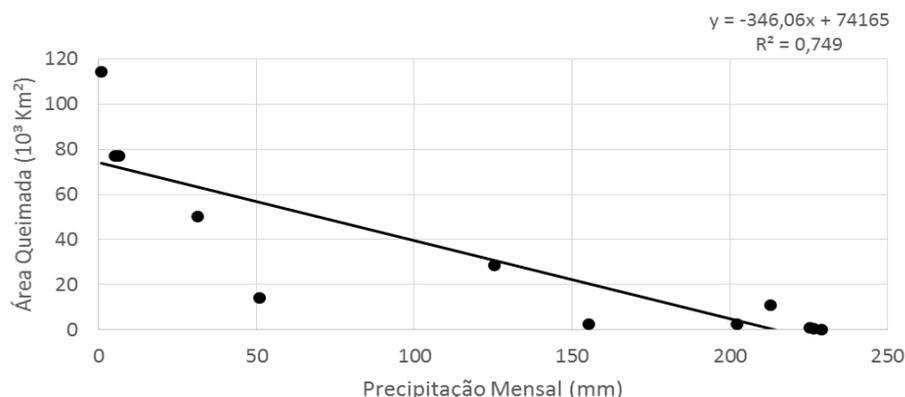


Figura 6. Relação entre precipitação mensal (mm, com atraso de 2 meses) e a área queimada (10^3 km^2) no Cerrado durante o período de 2005 a 2014.

4. Conclusões

Este presente trabalho analisa a variação de áreas queimadas durante os anos de 2005 e 2014 no Cerrado utilizando o do produto AQM, derivado do MODIS, já validado para a região (Libonati et al. 2015). Os dados de áreas queimadas foram gerados com precisão de 1 km^2 , satisfatória para escala regional e para a comparação da sua variação no período de anos estudados. Consequentemente, foi possível identificar a relação da pluviosidade e a frequência de áreas queimadas no Cerrado.

Os meses de junho a outubro influenciam em mais de 84% o somatório da ocorrência de áreas queimadas no ano. O período crítico para o início da ocorrência de estiagem é em julho, dois meses antes de setembro quando ocorre o máximo de áreas queimadas (30% do total). O Cerrado apresenta estação seca bem definida que influencia diretamente no regime de fogo (Figura 5).

A heterogeneidade da vegetação que apresenta estruturas mais e menos susceptíveis ao fogo (Durigan et al. 1994) e as atividades humanas que variam de acordo com parâmetros políticos e econômicos (Da Silva e Bates 2002) contribuem para os erros do modelo de dependência do número de áreas queimadas em relação a precipitação. Mesmo assim, a influência da precipitação na variação de ocorrência de áreas queimadas apresentou modelos significativos com alto grau de explicação. Por conseguinte, a variabilidade da precipitação tem papel fundamental no regime de fogo do Cerrado, tanto sazonal quanto interanual.

O Cerrado é a maior savana do planeta e é considerado área prioritária de conservação por ser *hotspot* de biodiversidade – alta riqueza de espécies de plantas e animais com significativo grau de endemismo (Myers et al. 2000; Da Silva e Bates 2002). Estudos anteriores mostraram que estratégias de conservação como, por exemplo, proteção, fiscalização e combate ao fogo funcionam e recuperam áreas de savanas em menos de três anos (Swaine et al. 1992). No Brasil, a proteção contra o fogo se mostrou eficiente no estabelecimento de espécies mais sensíveis o que aumenta formação vegetal de lenhosas (Moreira 2000).

Apesar da grande influência dos fatores climáticos em guiar a variabilidade sazonal e interanual, a atividade antropogênica, através da expansão das áreas agrícolas e de pastagem (Da Silva e Bates 2002), também possui um papel importante na dinâmica do fogo nessa região e não pode ser desprezado. Nosso estudo mostra que a fiscalização e combate ao fogo devem ser intensificados nos meses de seca, entre os meses de julho e outubro.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a bolsa PIBIC/CNPQ – UFRJ, o segundo autor agradece a bolsa de pós-doc CAPES/FAPERJ (E45/2013). Este trabalho foi elaborado no âmbito do Projeto BrFLAS Brazilian Fire-Land-Atmosphere System (FAPESP/1389/2014).

Referências Bibliográficas

- Van Der Werf, G.R. et al., 2004. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science*, 303(5654), pp.73–76.
- Levine, Joel S. *Biomass Burning and Global Change: Remote sensing, modeling and inventory development, and biomass burning in Africa*. Vol. 1. MIT Press, 1996.
- Lioussé, C. et al., 2004. Deriving global quantitative estimates for spatial and temporal distributions of biomass burning emissions. In *Emissions of atmospheric trace compounds*. Springer, pp. 71–113.
- Bowman, D.M.J.S. et al., 2009. Fire in the Earth system. *science*, 324(5926), pp.481–484.
- Myers, N. et al., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), pp.853–858.
- Da Silva, J.M.C. & Bates, J.M., 2002. Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot The Cerrado, which includes both forest and savanna habitats, is the second largest South American biome, and among the most threatened on the continent. *BioScience*, 52(3), pp.225–234.
- Hardesty, J., R. Myers, and W. Fulks. 2005. Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum* 22: 78-87.
- Pivello, Vânia R. "The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present." *Fire ecology* 7.1 (2011): 24-39.
- Libonati, R. et al., 2015. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 µm MODIS Imagery. *Remote Sensing*, 7(11), pp.15782–15803.
- Roy, D.P., Boschetti, L., Justice, C.O., e Ju, J. (2008). The Collection 5MODIS burned area product: Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sens. Environ.*, 112(9), 3690– 3707.
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D. P., Quayle, B., and Justice, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor, *Remote Sens. Environ.*, v. 113, p. 408–420, 2009.
- Klink, Carlos A., and Ricardo B. Machado. "Conservation of the Brazilian cerrado." *Conservation biology* 19.3 (2005): 707-713.
- Haddad13, Ziad S., et al. "The TRMMDay-1 Radar/Radiometer Combined Rain-Profiling Algorithm." (1997).
- Ramos-Neto, M.B. & Pivello, V.R., 2000. Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: rethinking management strategies. *Environmental management*, 26(6), pp.675–684.
- Swaine, M.D., Hawthorne, W.D. & Ogle, T.K., 1992. The effects of fire exclusion on savanna vegetation at Kpong, Ghana. *Biotropica*, pp.166–172.
- Durigan, G., Leitao Filho, H.F. & Rodrigues, R.R., 1994. Phytosociology and structure of a frequently burnt cerrado vegetation in SE-Brazil. *Flora*, 189(2), pp.153–160.
- Moreira, A.G., 2000. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. *Journal of biogeography*, 27(4), pp.1021–1029.