Análise das queimadas e da precipitação em áreas de Cerrado do Maranhão a partir de dados do sensor MODIS e do satélite TRMM para o período 2002-2015

Guilherme Augusto Verola Mataveli[1]
Maria Elisa Siqueira SIlva
Gabriel Pereira
Fernando Shinji Kawakubo
Gabriel Bertani
Bruno Silva Oliveira

Resumo*: No bioma Cerrado, as queimadas naturais podem ser correlacionadas com o ciclo hidrológico. Porém, nas últimas décadas percebe-se um crescimento na incidência de queimadas antrópicas, causado em grande parte pela expansão agrícola. Neste contexto, destaca-se o Cerrado do Maranhão, que perdeu 17% das áreas naturais entre 2002 e 2013. Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar e caracterizar a ocorrência das queimadas e da precipitação no Cerrado do Maranhão entre 2002 e 2015 a partir de dados dos sensores MODIS e do satélite TRMM. Os resultados mostram que 362.066 focos de calor foram detectados na área de estudo e 131.571 km^2 queimados, sendo 72% das ocorrências em áreas naturais e durante a estação seca. As correlações entre as variáveis analisadas foram significativas de acordo com teste t-Student a 5%.*

Palavras-chave*: Queimadas; Precipitação; Cerrado; MODIS; TRMM.*

Analysis of fires and precipitation in Cerrado areas of the Maranhão State during 2002-2015 using MODIS and TRMM data

Abstract*: In the Cerrado biome, wildfires are correlated with the hydrological cycle. However, during the last decades anthropic fires are increasing, mostly related to the agricultural expansion. In this context, the Cerrado biome inserted in the Maranhão State must be highlighted, once it lost 17% of the natural areas between 2002 and 2013. Consequently, this work aims to analyze and characterize the occurrence of fires and precipitation in the Cerrado of Maranhão between 2002 and 2015 using remote sensing data from MODIS sensor and TRMM satellite. Results show that 362.066 hotspots were detected in the study area and 131.571 km^2 were burned, with 72% of the occurrences in natural areas during the dry season. Correlations between the variables analyzed were significant according to the t-Student test with significance level of 5%.*

Keywords*: Fires; Precipitation; Cerrado; MODIS; TRMM.*

Introdução

As queimadas são um fenômeno de origem natural ou antrópica e comum em grande parte da superfície vegetada do planeta (PETERSON et al., 2010; HANTSON et al., 2013). Estas geram

[1] Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, mataveli@usp.br.

impactos sobre a sociedade e o meio ambiente, que incluem a perda da biodiversidade e mudanças no uso e cobertura da terra (ICHOKU et al., 2012), perdas econômicas e sociais (VERAVERBEKE et al., 2014), e problemas respiratórios (RIBEIRO, 2008), diminuição da qualidade do ar (KAISER et al. 2012) e alteração do clima devido à grande quantidade de gases traços e aerossóis emitidos durante a queima de biomassa (VADREVU et al., 2014). Considerando toda a superfície terrestre, cerca de dois terços das queimadas ocorrem nas áreas de savana localizadas nas regiões tropicais, empregadas em atividades ligadas à agropecuária, como a abertura de novas áreas agrícolas e manuseio de pastagens e controle de pragas (BOWMAN et al., 2009; VAN DER WERF et al., 2010; SHIMABUKURO et al., 2013). Anualmente, estima-se que mais de 3.500 teragramas (Tg) de biomassa são queimadas somente pelas queimadas antrópicas na região tropical (LAUK e ERB, 2009).

O bioma Cerrado, que recobre cerca de 22% do território brasileiro (IBGE, 2010), pode ser considerado como a savana com a maior biodiversidade do mundo (DURIGAN et al., 2016). Uma das características da vegetação deste bioma brasileiro é a ocorrência das queimadas naturais, especialmente durante a estação seca, quando a vegetação composta predominante por gramíneas rasteiras apresenta baixo teor de umidade e se torna altamente inflamável (RAMOS NETO e PIVELLO, 2000). Desta forma, a descrição do regime do fogo e do regime da precipitação é importante para compreender a distribuição espacial e a dinâmica do Cerrado, especialmente devido à sazonalidade climática bem definida no bioma (DALDEGAN et al., 2014).

Além disso, o Cerrado passa por um intenso processo de mudança do uso e cobertura da terra desde a década de 1970 devido à expansão da fronteira agrícola no Brasil (FEARNSIDE, 2000), sendo o fogo uma importante ferramenta no processo de conversão das áreas naturais do Cerrado em áreas destinadas às atividades agropecuárias. Atualmente estima-se que 54% da área do Cerrado ainda apresenta cobertura natural, e que entre 2002 e 2013 as áreas naturais diminuíram em 6%, aproximadamente 120.150 km^2 (MMA, 2002; INPE, 2015). Ainda, o Estado do Maranhão, um dos principais vetores de expansão da fronteira agrícola, foi a Unidade da Federação que apresentou a maior diminuição da sua área natural de Cerrado entre 2002 e 2013 (diminuição de 17% das áreas naturais de Cerrado, correspondente a 35.046 km^2) (MMA, 2002; INPE, 2015). No entanto, apesar da crescente pressão antrópica, o bioma foi amplamente negligenciado até o período recente em relação a estudos científicos, especialmente quando comparado com o bioma Amazônia (BEUCHLÉ et al., 2015), o que dificulta o reconhecimento de padrões e tendências nas queimadas, na precipitação e nas mudanças de uso da terra no Cerrado.

Considerando a dimensão da área de estudo, o sensoriamento remoto orbital é a principal fonte de dados para analisar e compreender a dinâmica das queimadas e da precipitação no Cerrado, já que o uso de dados provenientes de sensores orbitais permite observar grande parte da superfície terrestre diária e repetidamente (HANTSON et al., 2013; SHVETSOV e PONOMAREV, 2015; ANDEALA et al., 2016; PEREIRA et al., 2016). Dentre os sensores orbitais disponíveis para a análise das queimadas destaca-se o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), o primeiro sensor da nova geração de sensores orbitais de resolução moderada que fornece produtos voltados para a detecção de focos de calor (MOD14 e MYD14) e estimativa da área queimada (MCD45A1), amplamente utilizados para estudos que visam caracterizar e compreender os impactos das queimadas e da queima de biomassa (JUSTICE et al., 2002; KAISER et al., 2012; HANTSON et al., 2013; SHI et al., 2015; GIGLIO et al., 2016; HUANG et al., 2016). Já em relação à precipitação, a principal fonte de dados utilizada atualmente é derivada do satélite *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM), que fornece desde 1998 estimativas da precipitação a cada três horas, diariamente ou mensalmente na região tropical e subtropical do planeta (KUMMEROW et al., 2000; HUFFMAN et al. 2007).

Considerando a necessidade de mais informações sobre o Cerrado e as vantagens do uso de dados derivados de sensores orbitais, o presente trabalho tem por objetivo caracterizar e analisar a ocorrência das queimadas e da precipitação no Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão entre 2002 e 2015 a partir dos produtos MOD14, MYD14 e MCD45A1, derivados dos sensores MODIS, e da estimativa da precipitação mensal derivada do TRMM (produto 3B43).

Área de Estudo

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, sendo somente menor que o bioma Amazônia, e está espacialmente distribuído em 11 diferentes Unidades da Federação (IBGE, 2010). Sua vegetação é caracterizada por possuir formações vegetais que variam de campos abertos até florestas densas que podem atingir 30 metros de altura e pode ser estruturada em cinco tipos principais: o Cerradão (formações florestais com dossel mais ou menos fechado); Cerrado *sensu stricto* (fitofisionomia densa de árvores e arbustos com até 12 metros de altura, dominado por um estrato herbáceo-graminoso); Campo Cerrado (vegetação arbóreo-arbustiva com presença de árvores que podem alcançar de 2 a 3 metros); Campo Sujo (composta basicamente por vegetação herbáceo-arbustiva); e Campo Limpo (vegetação predominantemente herbácea com presença muito pequena de arbustos) (COUTINHO, 1990). O Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão

(Figura 1) possui uma área de 212.090 km^2, correspondente à 64% da área total do Maranhão, e apresenta 72% da sua área recoberta por áreas naturais, 16% por pastagem, 4% por agricultura e 8% por outros usos (INPE, 2015).

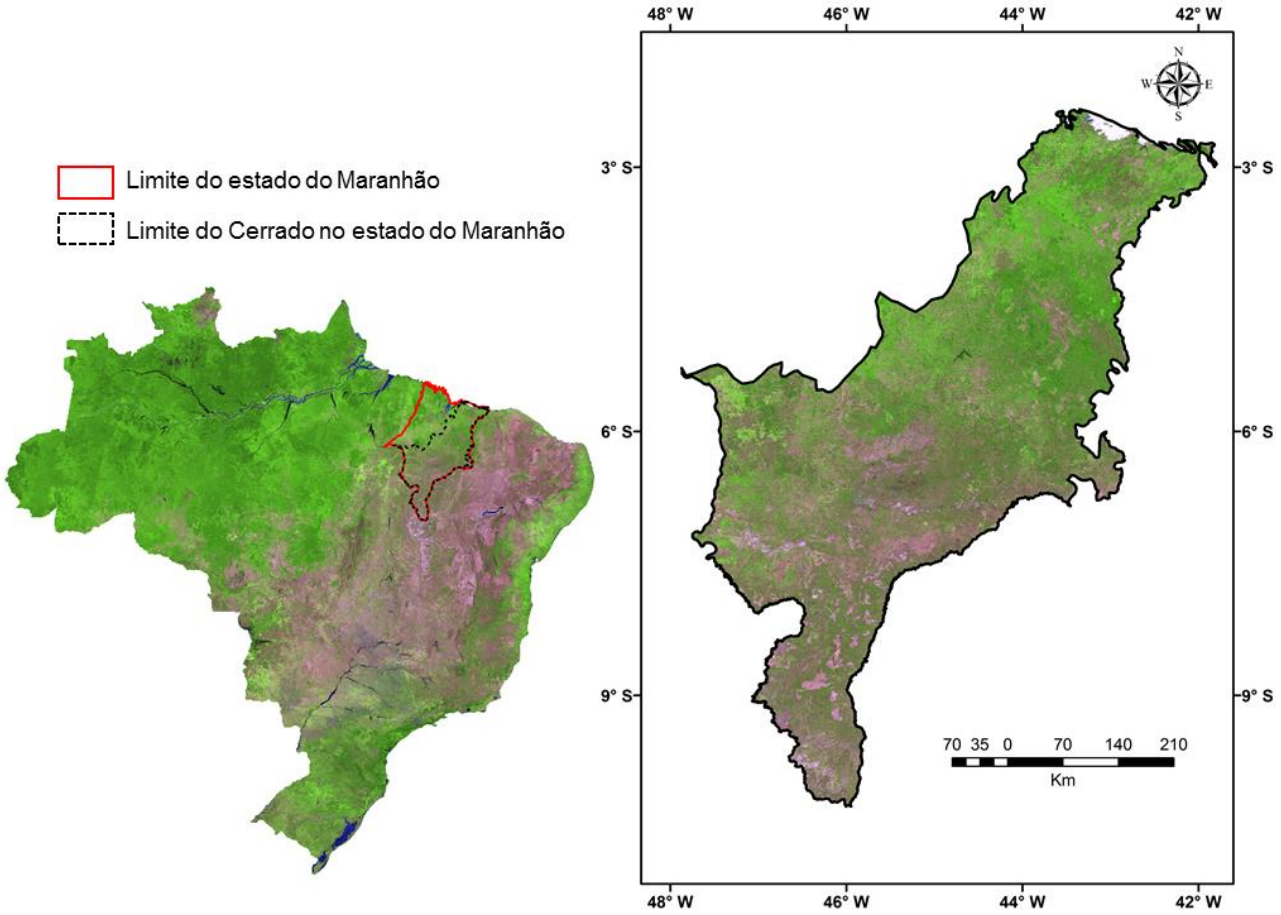

Figura 1: Localização da área de estudo, o Cerrado do Estado do Maranhão, no território brasileiro. Mosaico de imagens MODIS, composiçãoR6G2B1.

Antes da década de 1970, o Cerrado era considerado inapropriado para as atividades agropecuárias devido aos solos pobres do bioma, entretanto, os avanços nas técnicas agrícolas, condições favoráveis para a mecanização, iniciativas governamentais e o preço baixo da terra transformaram o Cerrado em uma das principais vertentes da expansão da fronteira agrícola no Brasil (BICKEL e DROS, 2003).

Materiais e Métodos

Produtos MODIS

O sensor MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, em órbita polar a uma altitude de 700 km, e possui uma resolução radiométrica de 12 *bits*, operando em 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4µm a 14,4µm com resolução espacial que pode variar de

250 a 10.000 metros dependendo do produto em questão e resolução temporal de 1 a 2 dias. Esse sensor foi configurado para fornecer dados sobre a dinâmica da biosfera terrestre visando a compreensão dos processos que ocorrem na superfície da terra, nos oceanos e na atmosfera inferior causados por atividades antrópicas ou pela própria natureza (JUSTICE et al., 2002). Neste estudo foram usados três produtos distintos derivados do sensor MODIS, descritos a seguir.

MOD14 e MYD14

Os produtos de fogo ativo MOD14 e MYD14, derivados, respectivamente, do sensor MODIS a bordo do Terra e do Aqua, identificam anomalias termais em *pixels* com resolução espacial nominal de 1 km usando um algoritmo contextual que detecta as anomalias a partir das informações contidas nas bandas do infravermelho médio e do infravermelho termal e descarta falsas detecções a partir da temperatura de brilho em relação aos *pixels* adjacentes (GIGLIO et al., 2016). O horário de passagem do MODIS sobre um ponto da superfície terrestre varia de acordo com a plataforma: enquanto a plataforma Terra cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min a plataforma Aqua, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min, possibilitando, desta forma, 4 detecções diárias dos produtos de fogo ativo para um determinado ponto da superfície terrestre (JUSTICE et al., 2002). O MOD14 e MYD14 foram utilizados para determinar o total mensal de focos de calor detectados no Cerrado do Estado do Maranhão no período 2002-2015.

MCD45A1

O produto de área queimada MCD45A1 é uma estimativa da área queimada global mensal com resolução espacial de 500 metros que apresenta os pixels considerados como queimada em um determinado mês e informações sobre a qualidade desses pixels, que pode ser 1, 2, 3 ou 4, sendo que os pixels considerados com qualidade 1 tem a maior probabilidade de se tratar de um pixel em que ocorreu a queimada (MODIS ATBD, 2016). O algoritmo do produto MCD45A1 analisa a dinâmica da reflectância diária de ambos os sensores MODIS para determinar a data aproximada em que ocorreu a queimada e mapear a extensão espacial de queimadas recentes (MODIS ATBD, 2016). O produto MCD45A1 foi utilizado para estimar a área queimada total mensal na área de estudo no período 2002-2015.

TRMM

O satélite TRMM resulta de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e tem por objetivo monitorar a distribuição da precipitação na região tropical e subtropical entre as latitudes 50° Norte e 50° Sul e as longitudes 180° Leste e 180° Oeste (KUMMEROW et al., 2000). O TRMM foi lançado em 1997 e transporta três sensores: o *Precipitation Radar* (PR), o *Microwave Imager* (TMI) e o *Visible and Infrared Scanner* (VIRS), que fornecem, respectivamente, informações sobre a estrutura da precipitação em três dimensões, sobre o conteúdo da coluna de água, intensidade e tipo de precipitação e sobre as nuvens, como tipo e temperatura do topo (YANG et al., 2006; YLMAZ et al., 2007). Nesse estudo o produto utilizado foi o 3B43, que fornece a estimativa da precipitação mensal com resolução espacial aproximada de 30 km a partir dos dados derivados dos três sensores descritos acima e de dados provenientes de estações meteorológicas do *Global Precipitation Climatological Center* (GPCC) e do *Climate Assessment and Monitoring System* (CAMS) (HUFFMAN et al., 2007). A utilização do 3B43 teve como objetivo estimar a precipitação média mensal na área de estudo para o período 2002-2015.

TerraClass Cerrado

Considerando o intenso processo de mudança no uso e cobertura da terra que ocorre no Cerrado, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) promoveu a união de instituições públicas nacionais com vasta experiência em sensoriamento remoto, geoprocessamento e mapeamento em larga escala, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), para realizar a primeira versão do projeto “Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra no Cerrado” (Projeto TerraClass Cerrado) (INPE, 2015). O mapeamento do TerraClass Cerrado foi realizado na escala 1:250.000 a partir de imagens do bioma Cerrado adquiridas pelo sensor *Operational Land Imaging* (OLI), abordo do satélite Landsat-8, no ano de 2013. Todas as imagens foram processadas, visualmente classificadas e validadas por uma equipe de profissionais com experiência na área de mapeamento, sendo que a exatidão global do mapeamento final foi de 80,2% (INPE, 2015).

Processamento dos Dados

Os procedimentos adotados durante o processamento dos dados são apresentados na Figura 2.

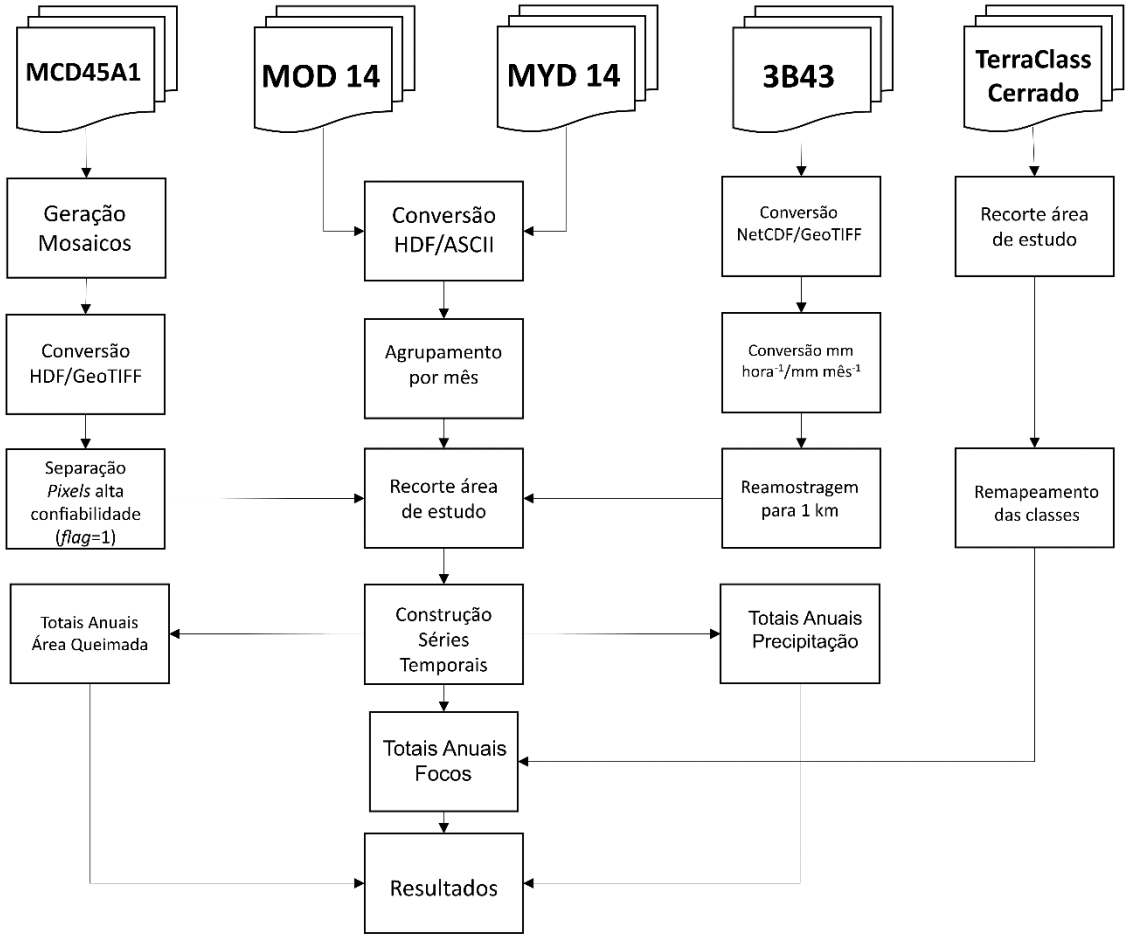

Figura 2: Fluxograma da metodologia aplicada para o processamento dos dados.

Considerando os objetivos estabelecidos, os produtos de fogo ativo derivados dos sensores MODIS, que são globais e não divididos em *tiles*, foram inicialmente convertidos do formato original *Hierarchical Data Format* (HDF) para o formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) contendo as mesmas informações dos arquivos originais. Em seguida, os focos de calor foram agrupados por mês a fim de determinar a série temporal do total mensal de focos e recortados para a área de estudo. Por fim, foram calculados os totais anuais de focos de calor.

Para o MCD45A1, em um primeiro momento foram adquiridos os *tiles* h13v09 e h13v10, que compreendem a área de estudo. Os *tiles* foram então mosaicados, convertidos do formato HDF para Geotiff e reprojetados para o sistema de coordenadas Lat/Long datum WGS84 com o uso do MODIS *Reprojection Tool*, uma ferramenta específica para o processamento de produtos derivados do MODIS. Em seguida, foram separados somente os *pixels* de alta confiabilidade (*flag* =

1) para que fosse gerada a série temporal da área queimada mensal e estimada a área queimada total anual.

Em relação à precipitação, o TRMM foi inicialmente convertido do formato *Network Commom Data Form* (NetCDF) para o formato Geotiff, convertido da unidade mm hora^{-1} para mm mês^{-1} e reamostrado para 1 km, mesma resolução do MOD14 e MYD14. Em seguida, o TRMM foi recortado para a área de estudo e estimada a precipitação média mensal, que deu origem à série temporal desta variável e também à estimativa da precipitação total anual média.

Espacialmente, foi analisada a distribuição da média anual de focos de calor, da área queimada média anual e da precipitação média anual para todo o período 2002-2015, sendo que para isto os produtos de focos de calor e de área queimada foram agrupados em uma grade regular com a mesma resolução espacial original do TRMM.

Ainda, foi realizada uma análise dos principais usos da terra em que ocorrem os focos de calor no Cerrado do Maranhão. Para essa finalidade, o mapa original do TerraClass Cerrado foi recortado para a área de estudo e suas 14 classes originais foram remapeadas para 4 classes: Natural, Agricultura, Pastagem e Outros. Esse remapeamento teve por objetivo agrupar usos da terra semelhantes em uma única classe, como, por exemplo, agricultura perene e agricultura anual na classe Agricultura, ou agrupar usos da terra em que a ocorrência das queimadas não é comum em uma única classe, como, por exemplo, áreas urbanas e de mineração na classe Outros, a fim de facilitar a interpretação dos resultados obtidos. Os focos de calor foram então cruzados com esse mapa de uso a partir da sua localização espacial e foi calculada a porcentagem de focos que ocorreu em cada um desses 4 usos.

A análise estatística da correlação entre os focos de calor e a área queimada, entre os focos de calor e a precipitação e entre a área queimada e a precipitação foi realizada através do cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), sendo que a significância do coeficiente foi testada a partir do teste t-Student a 5%.

Resultados e Discussão

A Figura 3 apresenta a série temporal do total mensal de focos de calor, da área queimada mensal e da precipitação média mensal e o total anual de focos de calor, a área queimada anual e a precipitação total anual média no Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão durante o período 2002-2015.

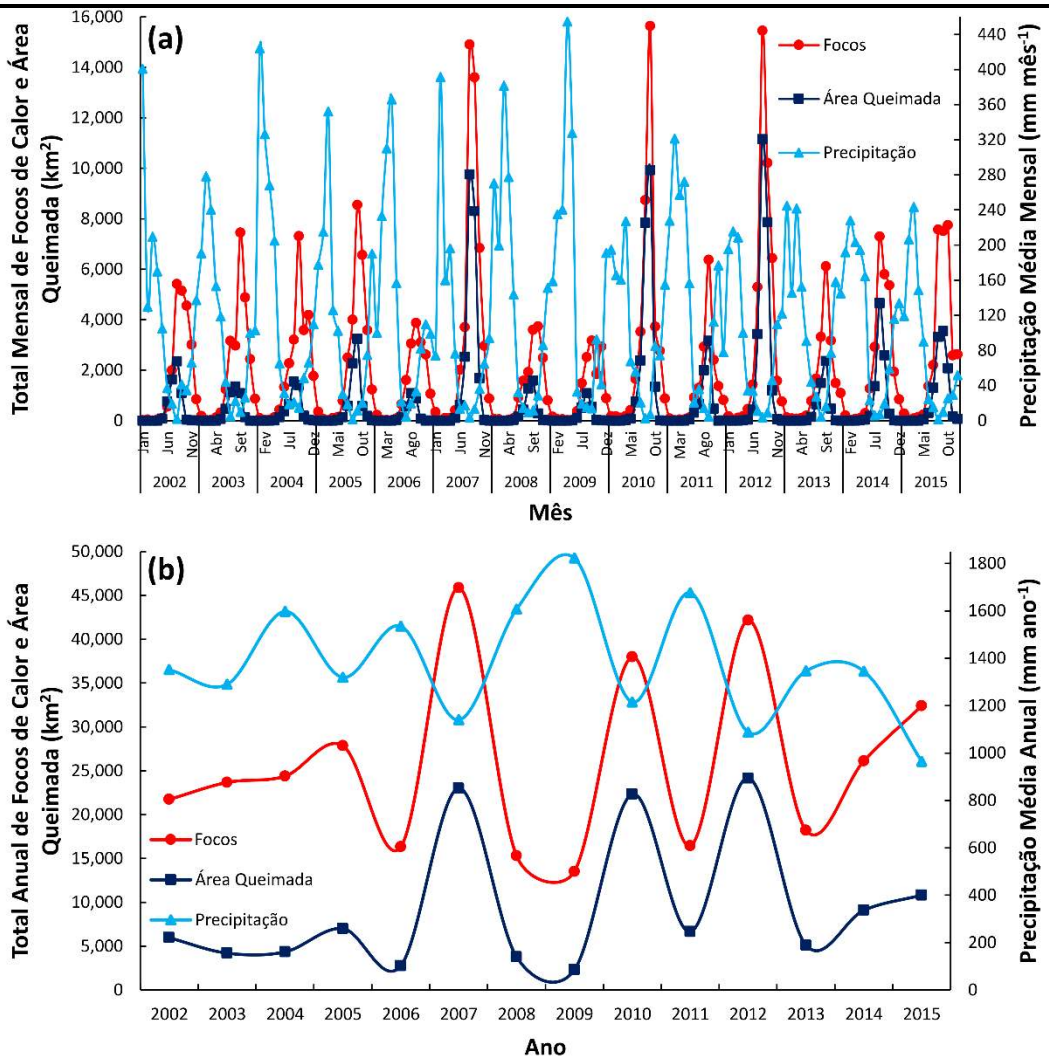

Figura 3: (a) Total mensal de focos de calor, área queimada mensal e precipitação média mensal e (b) Total anual de focos de calor, de área queimada e precipitação anual média no Cerrado do Estado do Maranhão durante o período 2002-2015.

No período 2002-2015 foram detectados 362.066 focos de calor pelos produtos de fogo ativo derivados dos sensores MODIS e foram estimados 131.571 km^2 queimados no Cerrado do Maranhão, sendo que deste total cerca de 67% dos focos de calor ocorreram durante a estação seca (maio a setembro) e 33% durante a estação chuvosa (outubro a abril), enquanto 93% da área queimada se concentrou na estação seca e 7% na estação chuvosa. A precipitação média na estação seca foi de 38,8 mm; já na estação chuvosa a precipitação média foi de 169,2 mm. De acordo com Coutinho (1990) e Lombardi (2005), no Cerrado as queimadas geralmente se iniciam no mês de maio, com o início do período seco, quando a vegetação está mais vulnerável ao fogo devido a fatores como baixa umidade e ausência de chuvas, atingindo seu ápice em setembro; durante o período chuvoso a ocorrência de queimadas é menor e concentrada no início da estação chuvosa (outubro), quando o estresse hídrico da vegetação devido aos seguidos meses de seca ainda é elevado, assim como a ocorrência de raios. Além disso, as características da vegetação a

tornam suscetível ao fogo até mesmo durante a estação chuvosa. De Araújo et al. (2012) analisaram a ocorrência de focos de calor e da área queimada nos biomas brasileiros com o uso de dados do MODIS no período 2002-2010 e encontraram a maior concentração de focos de calor no bioma Amazônia, seguido pelo Cerrado; no entanto, ao analisarem a área queimada cerca de 73% da área queimada estimada pelo produto MCD45A1 ocorreu no bioma Cerrado, mesmo sendo a área do Cerrado correspondente à metade da área do bioma Amazônia. Apesar de ser o bioma brasileiro mais adaptado às queimadas, no qual parte das espécies endêmicas e a reciclagem do solo dependem do fogo, o intenso uso do fogo para a abertura de áreas agrícolas e em atividades agropecuárias no Cerrado leva a sérios problemas ambientais como a perda de espécies da fauna e da flora, perda de nutrientes do solo, compactação do solo e erosão (CERTINI et al., 2005).

A análise da Figura 3 ainda demonstra a relação inversa que existe entre as queimadas e a precipitação, uma vez que os meses e anos que apresentaram valores elevados de focos de calor e área queimada apresentaram baixa precipitação. Os totais anuais de focos de calor variam entre 13.514 (2009) e 45.863 (2007), enquanto a área queimada anual variou entre 2.301 km^2 (2009) e 22.999 km^2 (2007) e a precipitação total anual média entre 965 mm (2015) e 1823 mm (2009). Em 2007 foram encontrados os maiores totais anuais de focos de calor e área queimada, enquanto a precipitação total anual média foi de 1.140 mm (cerca de 18% menor que a precipitação anual média no período 2002-2015). De acordo com Coelho et al. (2015), o período 2002-2015 está inserido em um período maior de redução da precipitação nas regiões Central e Sudeste do Brasil, e tem sido considerado como um período seco em estudos de larga escala.

Em relação ao uso da terra, a Figura 4 apresenta o mapa de uso e cobertura da terra realizado pelo projeto TerraClass Cerrado para a área de estudo reclassificado em 4 classes: Natural, Agricultura, Pastagem e Outros.

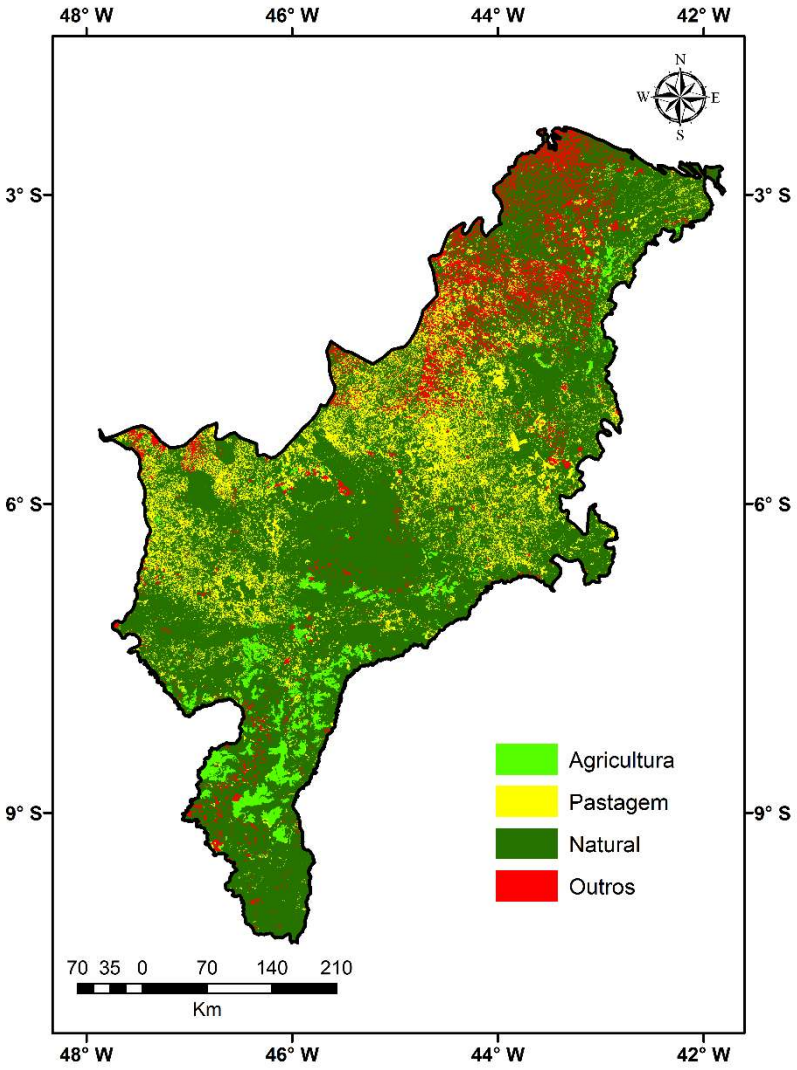

Figura 4: Uso e cobertura da terra no Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão.
Fonte: INPE (2015).

Desde 2002 a fronteira agrícola no Cerrado se expandiu da região Central do bioma em direção ao Norte; como a ocupação na região Sul do bioma é mais antiga o processo de conversão de áreas naturais em outros usos é praticamente inexistente nos dias atuais. O Norte é a atual área de expansão da fronteira agrícola no Cerrado, especialmente na região Leste dos Estados do Maranhão, Piauí e Tocantins, na região Oeste do Estado da Bahia e na região do MATOPIBA (divisa entre os Estados citados anteriormente). De acordo com o INPE (2015), os Estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia ainda apresentam, respectivamente, 67%, 72%, 72% e 83% da sua área de Cerrado coberta por vegetação natural. O Maranhão foi em termos de área total a Unidade da Federação em que ocorreu a maior perda de remanescentes naturais do Cerrado entre 2002 e 2013, que eram 89% da sua área total em 2002 e em 2013 foram estimados em 72% (MMA, 2002;

INPE, 2015). No período de 2002-2015 cerca de 72% dos focos de calor detectados pelos sensores MODIS na área de estudo ocorreram em áreas naturais, como apresentado na Figura 5.

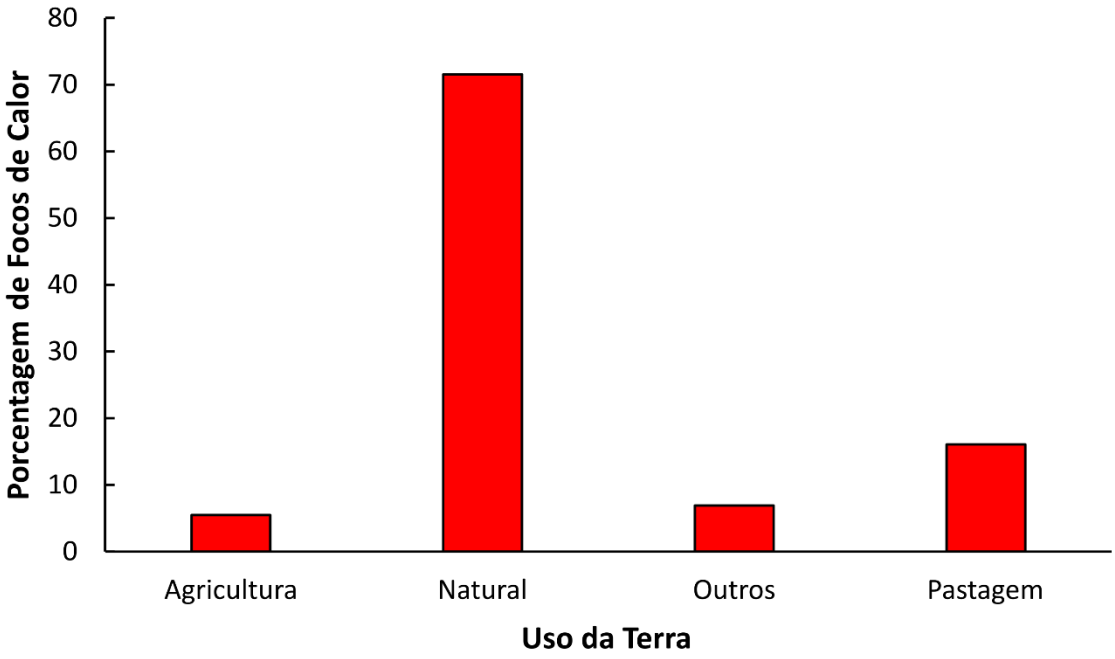

Figura 5: Porcentagem da ocorrência dos focos de calor nos diferentes usos da terra na área de estudo.

Seguido dos 72% dos focos de calor em áreas naturais, 16% dos focos ocorreram em áreas de pastagem, 8% em outros usos e 4% em áreas de agricultura. Nascimento et al. (2010) encontraram resultados similares ao analisarem a ocorrência dos focos de calor nos diferentes usos da terra de todo o bioma Cerrado entre maio de 2008 e maio de 2009. De acordo com os autores, 75,6% dos focos de calor ocorreram em áreas naturais, 13,2% em pastagem, 11% em agricultura e 0,02% em outros usos. A diferença na ocorrência de focos de calor para o Cerrado do Maranhão e para todo o bioma Cerrado pode ser explicada pelo fato de o Cerrado do Maranhão ser constituído por 4% de áreas consideradas como agricultura, enquanto todo o bioma Cerrado apresenta 11% de sua área classificada como agricultura (INPE, 2015).

Espacialmente, nota-se que a as maiores médias anuais de focos de calor e de área queimada se concentraram na porção Central e Sudeste da área de estudo, onde se localizam as menores estimativas da precipitação total anual média (1.020 mm), como apresenta a Figura 6.

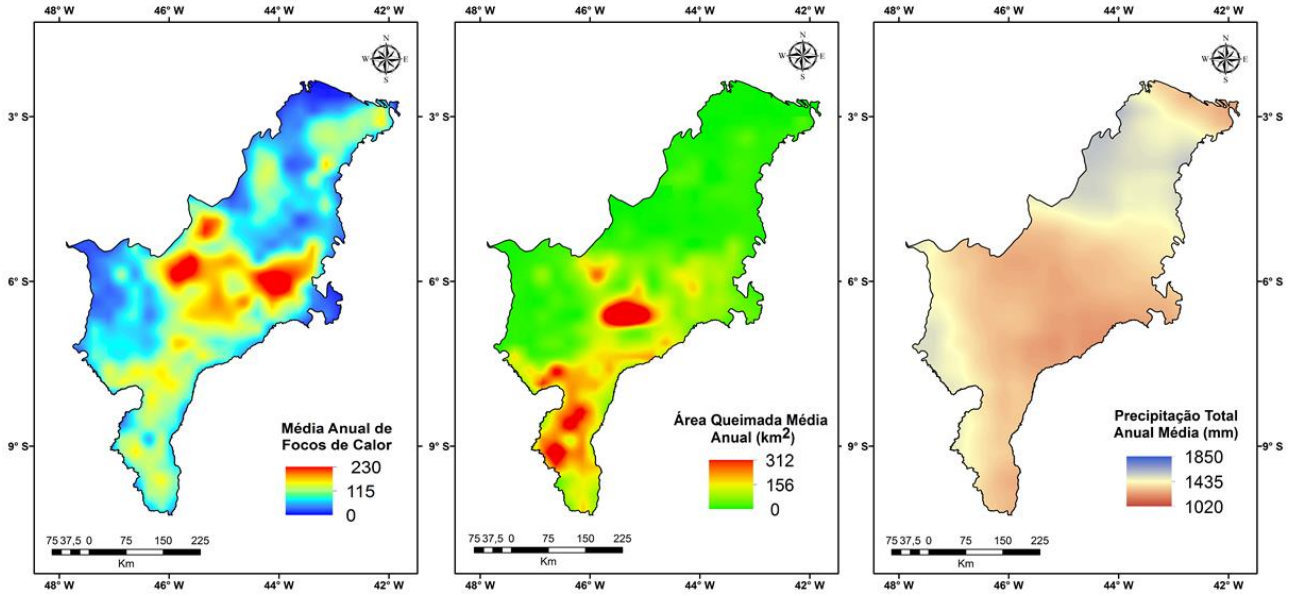

Figura 6: (a) Média anual de focos de calor, (b) Média anual de área queimada e (c) Precipitação total anual média no Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão durante o período 2002-2015.

Os maiores valores anuais médios encontrados para as variáveis focos de calor, área queimada e precipitação considerando uma grade regular com a mesma resolução espacial do TRMM foram, respectivamente, 230 focos, 312 km^2 e 1.850 mm. A análise estatística da correlação entre o total mensal de focos de calor e a área queimada mensal, o total mensal de focos de calor e a precipitação média mensal e entre a área queimada mensal e a precipitação média mensal apresentou, respectivamente r de -0,884, -0,567, e -0,414, como mostra a Figura 7. Todas as correlações descritas da Figura 7 foram consideradas significativas de acordo com teste t-Student a 5%.

Os produtos de focos de calor e área queimada do MODIS são fortemente correlacionados na área de estudo, e apresentaram o valor de r próximo do valor encontrado por De Araújo e Ferreira (2015) para todo o bioma Cerrado (0,94). O desempenho do MCD45A1 foi testado pelos autores para o bioma Cerrado a partir da comparação com o mapeamento da área queimada estimada a partir de imagens Landsat e apresentou resultado excelente (r=0,96), ao contrário do desempenho do MCD45A1 em áreas de vegetação densa, como a Amazônia, em que o produto apresenta muitos erros de omissão (CARDOZO et al. 2012).

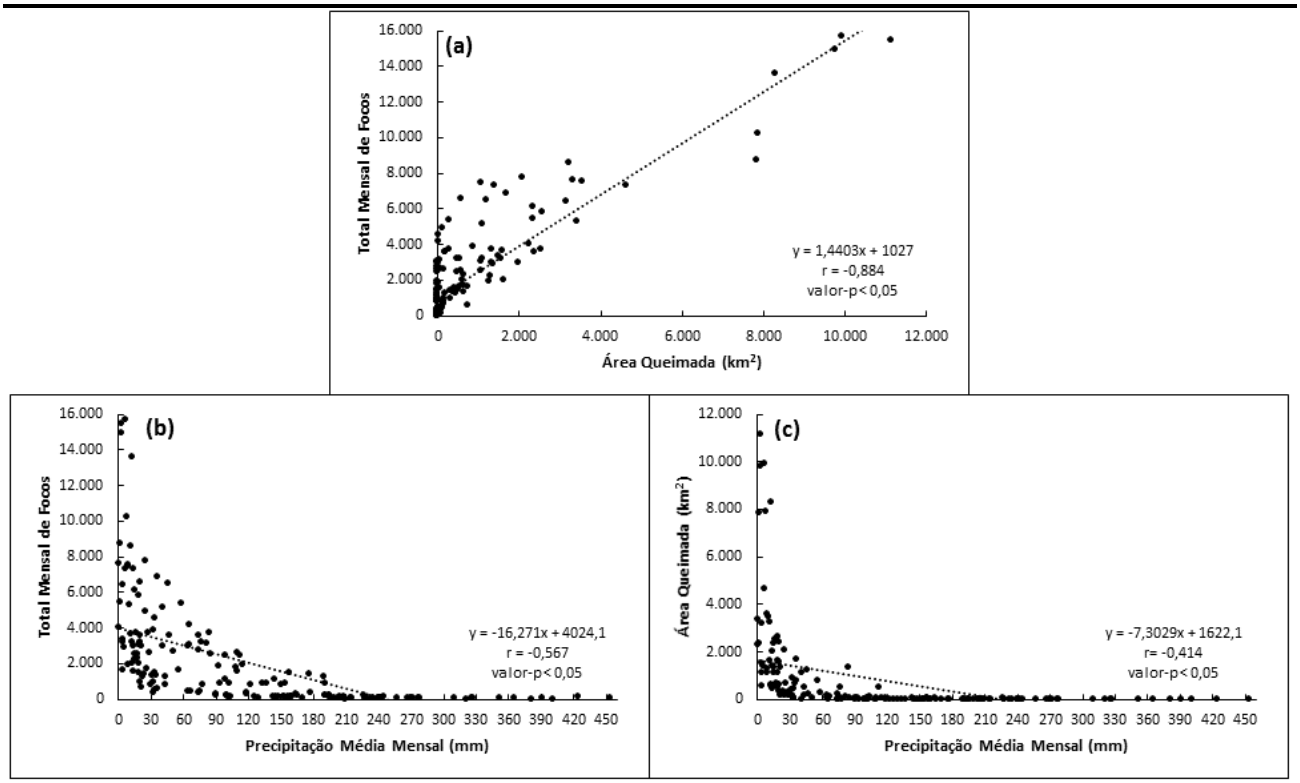

Figura 7: Correlação entre (a) total mensal de focos de calor e área queimada, (b) total mensal de focos de calor e precipitação média mensal e (c) área queimada e precipitação média mensal no Cerrado pertencente ao Estado do Maranhão entre 2002 e 2015.

A correlação entre o total mensal de focos de calor e a precipitação média mensal e entre a área queimada e a precipitação média mensal foram moderadas, o que pode ser explicado por dois fatores: a resolução espacial do TRMM é mais grosseria do que a resolução espacial dos produtos MODIS utilizados e a área de estudo é grande, portanto, um valor médio de precipitação pode não ser representativo da dinâmica de toda a área de estudo, como poder ser visto na Figura 6(c), que mostra que a precipitação total anual média apresentou variação de 830 mm. Ainda, somente a precipitação não explica a ocorrência das queimadas.

Chéret e Denux (2007) analisaram o risco de fogo no sul da França com o uso do índice *Vegetation Condition Index* (VCI) estimado a partir do índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) gerado por imagens adquiridas pelo sensor VEGETATION abordo do satélite *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) e apontam a condição da vegetação como um fator determinante para a ocorrência das queimadas, sendo que a mesma pode ser determinada por tais índices. Ichoku et al. (2016) analisaram a correlação entre a queima de biomassa, o uso da terra e o ciclo hidrológico no Norte da África subsaariana, onde também predominam as savanas, e também encontraram correlação negativa entre os indicadores do ciclo hidrológico, como a precipitação e os índices de vegetação, e as queimadas. Ainda, deve-se destacar o papel de outras variáveis

climáticas na ocorrência das queimadas, como a temperatura da superfície (AKTHER e HASSAN, 2011) e a umidade do solo (BARTSCH et al. 2009). Também, a importância dessas variáveis para a ocorrência das queimadas é diferente de acordo com o tipo de vegetação, pois as queimadas variam muito em termos de tamanho, intensidade, processo de ignição, taxa de propagação, duração, sazonalidade, recorrência e características de emissão de acordo com o tipo de ecossistema, a localização, o clima predominante e as características do combustível (ICHOKU et al., 2012).

Além disso, Van der Werf et al. (2008) apontam, no caso das savanas, o manejo da terra como um fator determinante na ocorrência das queimadas. De acordo com os autores, as queimadas antrópicas nas savanas podem se concentrar mais ao fim da estação seca, a fim de aumentar a eficácia da remoção da vegetação, ou no início da estação chuvosa para limitar a erosão e a perda de nutrientes. Nesse contexto, Price et al. (2012) analisaram o uso de queimadas controladas no início da estação seca em áreas de savana na Austrália e concluíram que tal técnica de manejo pode reduzir substancialmente a área e a severidade do fogo em relação a queimadas ocorridas no final da estação seca, quando as condições da vegetação são mais propícias para o espalhamento do fogo.

Conclusões

O uso de dados derivados dos sensores MODIS e do TRMM se mostrou eficiente para analisar e caracterizar as queimadas e a precipitação na área de estudo. Os focos de calor e a área queimada se concentraram durante a estação seca (maio a setembro), apesar de também ocorrerem na estação de chuvosa e a maioria dos focos de calor se localizarem em áreas naturais.

Ainda, os maiores totais anuais de focos de calor e área queimada ocorreram em 2007, enquanto a menor precipitação total anual média foi registrada em 2015. As maiores médias anuais de focos de calor, área queimada e precipitação total anual média considerando uma grade regular com a mesma resolução espacial do TRMM foram, respectivamente, de 230 focos de calor, 312 km^2 e 1.850 mm.

O total mensal de focos de calor e a área queimada mensal foram fortemente correlacionados, enquanto a correlação entre o total mensal de focos de calor e a precipitação média mensal e entre a área queimada mensal e entre a precipitação média mensal foram moderadas. A diferente resolução espacial entre os produtos utilizados e o uso de valores médios para a precipitação

podem ter contribuído para esse resultado, e sugere-se futuramente avaliar a correlação entre essas variáveis espacialmente.

Por fim, sugere-se a análise de outras variáveis climáticas além da precipitação para explicar a ocorrência das queimadas na área de estudo, como as condições da vegetação, e, em especial, o manejo da terra, visto que essa variável é um dos principais fatores que explica a ocorrência das queimadas em áreas de savana de acordo com resultados encontrados em literatura para outras áreas de estudo.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos (Processo 162898/2015-0), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG, Processo APQ-01698-14) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Processo 6123/2015-05).

Referências Bibliográficas

AKHTER, M. S.; HASSAN, Q. K. Remote sensing-based assessment of fire danger conditions over boreal forest. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, New York, v. 4, n. 4, p. 992-999, 2011.

ANDELA, N.; VAN DER WERF, G. R.; KAISER, J. W.; VAN LEEUWEN, T. T.; WOOSTER, M. J.; LEHMANN, C. E. R. Biomass burning fuel consumption dynamics in the (sub)tropics assessed from satellite. Biogeosciences Discussions, Gottingen, v. 13, p. 3717-3734, 2016.

BARTSCH, A.; BALZTER, H.; GEORGE, C. The influence of regional surface soil moisture anomalies on forest fires in Siberia observed from satellites. Environmental Research Letters, Bristol, v. 7, p. 1-9, 2009.

BEUCHLÉ, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E. E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. Applied Geography, Amsterdam, v. 58, p. 116-127, 2015.

BICKEL, U.; DROS, J. M. The impacts of soybean cultivation on Brazilian ecosystems: Three case studies. Report commissioned by the WWF Forest Conversion Initiative, 2003, Washington, United States of America, p. 33.

BOWMAN, D. M.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P., et al. Fire in the earth system. Science, New York, v. 324, p. 481-484, 2009.

CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Validation of MODIS MCD45A1 product to identify burned areas in acre state - amazon forest. Anais. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anais..., Munique: IEEE, 2012. p. 6741-6744.

CHÉRET, V.; DENUX, J. P. Mapping wildfire danger at regional scale with an index model integrating coarse spatial resolution remote sensing data. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, New Jersey, v. 112, n. G2, p. 1-11, 2007.

CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. Oecology, New York, v. 143, n.1, p. 1-10, 2005.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, M. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. P. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. Climate Dynamics, New York, v. 46, n. 11, p. 3737-3752, 2015.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. Fire in the tropical biota. New York: Springer-Velarg, 1990, p. 82-105.

DALDEGAN, G.; DE CARVALHO, O.; GUIMARÃES, R.; GOMES, R.; RIBEIRO, F.; MCMANUS, C. Spatial patterns of fire recurrence using remote sensing and GIS in the Brazilian savanna: Serra do Tombador nature reserve, Brazil. Remote Sensing, Basel, v. 6, n.10, p. 9873-9894, 2014.

DE ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: An analysis based on satellite data for the 2002–2010 period. Remote Sensing, Basel, v. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

DE ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G. Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Amsterdam, v. 36, p. 94-102, 2015.

DURIGAN, G.; RATTER, J. A.; JAMES, J. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. Journal of Applied Ecology, London, v. 53, n. 1, p.11-15, 2016.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. Environmental Conservation, Cambridge, v. 28, p. 23-28, 2000.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, Amsterdam, v. 178, p. 31-41, 2016.

HANTSON, S.; PADILLA, M.; CORTI, D.; CHUVIECO, E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. Remote Sensing of Environment, Amsterdam, v.131, n.1, p. 152-159, 2013.

HUANG, S.; LIU, H.; DAHAL, D.; JIN, S.; LI, S.; LIU, S. Spatial variations in immediate greenhouse gases and aerosol emissions and resulting radiative forcing from wildfires in interior Alaska. Theoretical and Applied Climatology, New York, v. 123, p. 581-592, 2015.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. Journal of Hydrometeorology, Boston, v. 8, p. 38-55, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Biomas Brasileiros. Disponível em: < http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 28 set. 2016.

ICHOKU, C.; KAHN, R.; CHIN, M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling. Atmospheric Research, Amsterdam, v. 111, p. 1-28, 2012.

ICHOKU, C.; ELLISON, L.T.; WILLMOT, K.E.; MATSUI, T.; DEZFULI, A.K.; GATEBE, C.K.; WANG, J.; WILCOX, E.M.; LEE, J.; ADEGOKE, J.; OKONKWO, C.; BOLTEN, J.; POLICELLI, F.S.; HABIB, S. Biomass burning, land-cover change, and the hydrological cycle in Northern sub-Saharan Africa. Environmental Research Letters, Bristol, v. 11, n. 9, p. 1-13, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Projeto TerraClass Cerrado: Mapeamento do uso e cobertura da terra no Cerrado. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/>. Acesso em: 02 out. 2016.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D. The MODIS fire products. Remote Sensing of Environment, Amsterdam, v. 83, n. 2, p. 244−262, 2002.

KAISER, J. W.; HEIL, A.; ANDREAE, M. O.; BENEDETTI, A.; CHUBAROVA, N.; JONES, L.; MORCRETTE. J. J.; RAZINGER, M.; SCHULTZ, M. G.; SUTTIE, M.; VAN DER WERF, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. Biogeosciences, Gottingen, v.9, n.1, p. 527-554, 2012.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. Journal of Applied Meteorology, Boston, v. 39, p. 1965-1982, 2000.

LAUK, C.; ERB, K. H. Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes. Ecological Economics, Amsterdam, v.69, n.2, p. 301-309, 2009.

LOMBARDI, R. J. R. Estudo da recorrência de queimadas e permanências de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)–Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros. Disponível em: < http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm?/cerrado/dados/shape_file/mosaicos/index.html>. Acesso em: 03 out. 2016.

MODIS FIRE PRODUCTS ALGORITHM THEORETICAL BASIS DOCUMENT (MODIS ATBD). Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf>. Acesso em: 29 set. 2016.

NASCIMENTO, D. T. F.; DE ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G. Análise dos padrões de distribuição espacial e temporal dos focos de calor no bioma Cerrado. Revista Brasileira de Cartografia, Brasília, v. 63, n.4, p. 461-475, 2010.

PETERSON, D.; WANG, J.; ICHOKU, C.; REMER, L.A. Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the north american boreal forest: Implications for fire weather forecasting. Atmospheric Chemistry and Physics, Gottingen, v. 10, n. 14, p. 6873-6888, 2010.

PEREIRA, G.; SIQUEIRA, R.; ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. L.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; KAISER, J. W.; WOOSTER, M. J. Assessment of fire emissions inventories during the South American biomass burning analysis (SAMBBA) experiment. Atmospheric Chemistry and Physics, Gottingen, v. 16, p. 6961-6975, 2016.

PRICE, O. F.; RUSSELL-SMITH, J.; WATT, F. The influence of prescribed fire on the extent of wildfire in savanna landscapes of western Arnhem Land, Australia. International Journal of Wildland Fire, Clayton, v. 21, n. 3, p. 297-305, 2012.

RAMOS NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna national park: Rethinking management strategies. Environmental Management, New York, v. 26, p. 675-684, 2000.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v. 42, n. 2. p. 370-376, 2008.

SHI, Y.; MATSUNAGA, T.; SAITO, M.; YAMAGUCHI, Y.; CHEN, X. Comparison of global inventories of CO_2 emissions from biomass burning during 2002-2011 derived from multiple satellite products. Environmental Pollution, Amsterdam, v. 206, p. 479-487, 2015.

SHVETSOV, E. G.; PONOMAREV, E. I. Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery. Contemporany Problems of Ecology, New York, v. 8, p. 337-343, 2015.

SHIMABUKIRO, 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: ALCARAZ-SEGURA, D.; DI BELLA, C. M.; STRASCHNOY, J. V. Earth observation of ecosystem services. Boca Raton: CRC Press, 2013, p. 125-148.

VADREVU, K. P.; LASKO, K.; GIGLIO, L.; JUSTICE, C. Analysis of southeast asian pollution episode during june 2013 using satellite remote sensing datasets. Environmental Pollution, Amsterdam, v. 195, p. 245-256, 2014.

VAN DER WERF, G.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; GOBRON, N.; DOLMAN, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. Global Biogeochemical Cycles, New Jersey, v. 22, n. 3, p. 1-13, 2008.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO L.; COLLAT, G. J.; MU, M.; KASIBHATLA, P. S.; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; JIN, Y.; LEEUWEN, T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). Atmospheric Chemistry and Physics, Gottingen, v. 10, p. 11707-11735, 2010.

VERAVERBEKE, S.; STAVROS, 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, Amsterdam, v. 154, p. 153-163, 2014.

YANG, S.; OLSON, W. S.; WANG, J. J.; BELL, T. L.; SMITH, E. A.; KUMMEROW, C. D. Precipitation and latent heating distributions from satellite passive microwave radiometry. Part II: Evaluation of estimates using independent data. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Boston, v. 45, p. 721-739, 2006.

YILMAZ, K. K.; ADLER, R. F.; TIAN, Y.; HONG, Y.; PIERCE, H. F. Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system. International Journal of Remote Sensing, Oxfordshire, v. 31, n. 14, p. 3763-3782, 2007.