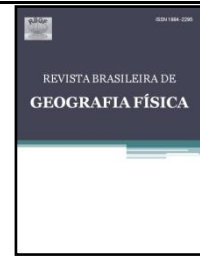




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Índices Espectrais e Temperatura de Superfície em Áreas Queimadas no Parque Estadual do Araguaia em Mato Grosso

Juliana Barbosa da Silva Lotufo¹, Nadja Gomes Machado², Luciene de Mello Taques¹, Dalila Morgana de Souza Mützenberg¹, Névio Lotufo Neto³, Marcelo Sacardi Biudes⁴

¹Doutorandas no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, n.º2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. (65)3313-7306. E-mail: julianabds@gmail.com (autor correspondente), luciene.mellot@gmail.com, dalilamutzenberg@gmail.com.

²Professora do Instituto Federal de Mato Grosso, Campus Cuiabá Bela Vista, Av. Juliano Costa Marques, SN, Bela Vista, 78.050-560, Cuiabá-MT, Brasil. E-mail: nadja.machado@blv.ifmt.edu.br.

³Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. (65)3313-7306. E-mail: neviolotufo@gmail.com.

⁴Professor do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, n.º2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. (65)3313-7306. E-mail: marcelo@fisica.ufmt.br.

Artigo recebido em 16/03/2020 e aceito em 16/04/2020

RESUMO

As queimadas impactam negativamente a biodiversidade dos ecossistemas naturais, alterando os atributos físicos e biológicos e influenciando os fluxos de energia e biogeoquímicos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi analisar através do sensoriamento remoto o efeito de áreas queimadas sobre os índices espectrais NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NBR (Índice de Queimada Normalizada) e na temperatura de superfície no Parque Estadual do Araguaia (PEA) em Mato Grosso, Brasil. Imagens do satélite de Landsat 8 OLI foram utilizadas para analisar a superfície no período pré-queimada (15/06/2015) e pós-queimada (21/10/2015) no Parque Estadual. Os resultados demonstraram que o NDVI apresentou maiores valores nas áreas com vegetação densa e menores valores em solo exposto, associados à vegetação seca, carbonização ou com completa ausência de vegetação. O NBR apresentou valores negativos nas áreas queimadas, devido ao aumento da refletância após passagem do fogo devido à deposição de cinzas brancas. A temperatura da superfície foi maior no pós-queimada relacionada a uma maior capacidade de absorção da superfície (cor preta das cinzas). Estes resultados são atribuídos aos efeitos combinados de maior exposição do solo, aumento da absorção da radiação pela vegetação carbonizada e redução da evapotranspiração relativa à vegetação verde existente no período pré-queimada.

Palavras-chaves: Fogo; Área Protegida; Sensoriamento Remoto.

Spectral Indexes and Surface Temperature on Burnt Areas at Araguaia State Park in Mato Grosso

ABSTRACT

Fires harm the biodiversity of natural ecosystems, changing physical and biological attributes and influencing energy and biogeochemical flows. Therefore, the objective of this work was to analyze through remote sensing the effect of burnt areas on the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NBR (Normalized Burn Index) spectral indexes and on the surface temperature in Araguaia State Park (PEA) in Mato Grosso, Brazil. Satellite images of Landsat 8 OLI were used to analyze the surface in the pre-burned (06/15/2015) and post-burned (10/21/2015) period in the State Park. The results showed that NDVI showed higher values in areas with dense vegetation and lower values in exposed soil, associated with dry vegetation, carbonization or with a complete absence of vegetation. The NBR showed negative values in the burnt areas, due to the increase in reflectance after the passage of the fire due to the deposition of white ash. The surface temperature was higher in the post-firing period due to a greater absorption capacity of the surface (black color of the ashes). These results are attributed to the combined effects of greater soil exposure, increased absorption of radiation by carbonized vegetation and reduced evapotranspiration relative to green vegetation in the pre-burned period.

Keywords: Fire; Protected Area; Remote Sensing.

Introdução

Por milhares de anos, o fogo tem sido um importante integrante dos processos biogeoquímicos, influenciando nas interações terra-atmosfera, estando presente em forma de instrumento de manejo em mais de 50% dos ecossistemas terrestres (Liu et al., 2016; Dintwe et al., 2017). Ele pode ser de origem natural, provocado por combustão espontânea ou incidência de raios e impulsionado por fatores como a umidade do ar, precipitação e velocidade do vento, bem como de origem antrópica, podendo gerar grandes incêndios florestais quando ocorre de forma acidental ou até mesmo criminosa (Clemente et al., 2017; Forkel et al., 2017). Nas últimas décadas, os incêndios florestais têm ocorrido com frequência em diversas regiões do planeta (Ba et al., 2019). No Brasil, a queima de biomassa vegetal está fortemente relacionada às atividades de desmatamento, onde primeiramente ocorre a remoção da vegetação de grande porte e posteriormente queimasse tudo que está no solo para dar lugar principalmente à pecuária extensiva e cultivo agrícola, como por exemplo a cana de açúcar (Daldegan et al., 2019; Gonino et al., 2019).

Em todos os ecossistemas, o fogo atua como um dos principais agentes modificadores da biodiversidade local, gerando impactos diretos sobre a fauna e flora, afetando os padrões da paisagem, a composição das espécies, podendo até mudar toda a estrutura da comunidade, influenciando o fluxo de energia e os ciclos biogeoquímicos (Thomaz, 2017). No solo, o fogo potencializa os processos erosivos por meio de uma combinação de oxidação, volatilização, transporte de cinzas e lixiviação (Clemente et al., 2017; Chiang e Ulloa, 2019). Em ecossistemas mais propensos às queimadas, como florestas e savanas, o fogo desempenha um papel importante na definição da composição e estrutura da vegetação (Belmok et al., 2019), tendo em vista que algumas espécies têm adaptações que conferem resistência aos eventos de queimada, onde a floração, dispersão ou germinação de sementes são favorecidas após a passagem do fogo (Wang et al., 2017; Torres, 2019).

Grandes incêndios florestais geralmente degradam a qualidade do ar em grandes escalas espaciais, gerando impactos ecológicos e à saúde das pessoas através da liberação de gases traços e partículas para a atmosfera (Kukavskaya, et al., 2017). Entre outros poluentes, são liberados os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que submetidos à processos fotoquímicos de oxidação formam aerossol orgânico secundário e o ozônio,

um dos responsáveis pela intensificação do efeito estufa (Wentworth, et al., 2018). Devido à relação entre o regime de queimadas e o clima, o Sistema Global de Observação Climática (GCOS) considera a perturbação gerada pelo fogo como uma variável climática essencial (ECV), podendo ser esta uma variável física, química, biológica ou um grupo de variáveis vinculadas que contribuem de maneira crítica para a caracterização do sistema climático, sendo chave para estudar e prever sua evolução (Belenguer-Plomer et al., 2019).

As áreas queimadas deixam cicatrizes que podem permanecer por longos períodos na superfície (Fornacca et al., 2018), permitindo a sua identificação por imagens de satélite, através das bandas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio do espectro eletromagnético, obtidas antes e depois da passagem do fogo (Engelbrecht et al., 2017; Kumar e Roy, 2018). Apesar de interferências naturais como a intensificação dos ventos, chuvas ou a rápida rebrota da vegetação, fazerem com que essas cicatrizes desapareçam facilmente, ainda são amplamente utilizadas para investigar os padrões espaço-temporais dos impactos das queimadas sobre os ecossistemas (Fornacca et al., 2018).

Após a passagem do fogo, as cinzas e os carvões depositados reduzem o albedo da superfície, especialmente em comprimentos de onda do infravermelho (Dintwe et al., 2017; Mota, et al., 2019). A mudança do albedo induzida pelo fogo e o forçamento radiativo associados, modificam de forma direta o balanço de energia ao ocasionar maior absorção da radiação solar, aumento da temperatura da superfície e alteração dos fluxos de calor latente e sensível, impulsionando funções do clima e do ecossistema (Dintwe et al., 2017; Quintano et al., 2019).

O sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado em vários países na detecção da frequência e distribuição espacial de grandes incêndios florestais (Yuan et al., 2017; Addison e Oommen, 2018). Os algoritmos de detecção de incêndio registram as anomalias térmicas produzidas pelas altas temperaturas gerando uma base sistemática de dados a longo prazo para monitorar as mudanças na superfície da terra que influenciam ou são influenciadas pelo clima (Lin et al., 2016; Hawbaker et al., 2017). Apesar da ampla utilização, existem alguns fatores que limitam o mapeamento de áreas queimadas através do sensoriamento remoto. Esses fatores estão relacionados a características do sensor e a cena observada. O tipo de sensor (passivo ou ativo) e a região do espectro eletromagnético no qual as imagens são adquiridas. Entre as características da

cena que influenciam a precisão da detecção, estão o tamanho e a forma das cicatrizes do fogo, tipo de cobertura do solo, alterações não relacionadas ao fogo (por exemplo, fenologia, inundações, colheita, insetos) e a presença de nuvens (Belenguer-Plomer et al., 2019).

Índices espectrais como o Índice de Queimada Normalizada (NBR – *Normalized Burn Ratio*) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) são indicadores sensíveis da quantidade e qualidade da vegetação, além de serem simples, seguros e com uma capacidade de resposta rápida (Ba et al., 2019). Esses índices permitem extrair com precisão o comportamento espaço-temporal da vegetação, medindo a densidade e o vigor vegetativo no pré e pós-fogo (Chen et al., 2016; Lazaj, 2016). Geralmente combinam informações do visível, infravermelho próximo, e porções de infravermelho médio do espectro eletromagnético, sendo sensíveis a variações na cor do solo (visível e infravermelho médio), composição do solo (infravermelho médio), umidade do solo e clorofila da vegetação (perto do infravermelho), que são todas as propriedades da terra e da vegetação que podem ser significativamente afetadas pelo fogo (Tran et al., 2018).

Há registros recorrentes anuais de grandes incêndios nas unidades de conservação no Brasil (Alvarado et al., 2018). O Parque Estadual do Araguaia (PEA) é uma Unidade de Proteção Integral localizada no Leste do Estado do Mato Grosso e os incêndios nessa região ao longo dos anos são frequentes (Neves et al., 2018). Neste contexto, merecem destaque os eventos ocorridos em 2015 onde foram detectados aglomerados de focos de calor no PEA (INPE, 2015).

Assim, o objetivo deste estudo foi comparar os índices NDVI, NBR e a temperatura da superfície pré e pós-queimada no PEA, assim como, verificar a correlação entre as variáveis. A hipótese desse estudo é que a queimada altera as respostas espectrais da superfície. Ao comparar as imagens pré e pós-queimada das variáveis NDVI, NBR e temperatura de superfície espera-se identificar diferença significativa entre as imagens e obter a correlação entre as variáveis.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado no Parque Estadual do Araguaia (PEA), localizado no município de Novo Santo Antônio, estado de Mato Grosso, na borda sul da Amazônia, Brasil. O PEA está situado

na porção leste do estado do Mato Grosso (Figuras 1 e 2), entre o rio das Mortes e a margem esquerda do Rio Araguaia (50°46'45,344"W e 12°19'10,266"S), cuja área é de aproximadamente 223.169,5 hectares, inserido na planície do Araguaia na zona de transição entre os biomas Cerrado e Floresta Amazônica, em uma extensa planície sazonalmente inundada pelo Rio das Mortes e pelo Rio Araguaia. Administrado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Mato Grosso (SEMA/MT) o PEA foi criado em 28 de setembro de 2001, pela Lei Estadual nº 7.517, está inserido na categoria de Unidade de Conservação de Proteção Integral, cujo objetivo é a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas, de recreação e de turismo ecológico que atendam às diretrizes do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Neves et al., 2018).

Aquisição e tratamento de dados

As imagens utilizadas neste estudo foram de 15/06/2015 a 21/10/2015 do satélite Landsat 8 (Tabela 1). Elas foram escolhidas por estarem em períodos pré e pós à ocorrência de aglomerados de focos de calor no PEA, bem como devido à ausência de nuvens nas imagens de satélite. Os índices NDVI e NBR utilizados para a análise da cobertura da superfície do PEA foram obtidos da plataforma ESPA do Serviço Geológico dos Estados Unidos disponível em [<https://espa.cr.usgs.gov>]. A temperatura da superfície foi obtida a partir de imagens termais do sensor TIRS (banda 10) do satélite Landsat 8, disponibilizadas pela ESPA.

Tabela 1 – Imagens do satélite Landsat 8 do período anterior (junho) e posterior (outubro) ao aglomerado de focos de calor para o Parque Estadual do Araguaia, Mato Grosso, em 2015.

Órbita-ponto	Dia Juliano	Data da cena	Queimada
223-068	166	15/06/15	Pré-queimada
223-069	166	15/06/15	queimada
223-068	294	21/10/15	Pós-queimada
223-069	294	21/10/15	queimada

Os focos de calor do período de 01/01/2015 a 31/12/2015 foram obtidos do banco de dados de queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir dos satélites GOES-16, NPP-375 e Terra, disponibilizados em [<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>]. Dados de área queimada mensal com resolução de 30 m também foram obtidos para área de estudo.

Os polígonos de área queimada foram obtidos do INPE e estão disponíveis em [<http://www.inpe.br/queimadas/aq30m/#>].

A classificação não supervisionada da cobertura do solo foi feita por meio da combinação das bandas espectrais com composição 5R4G3B. Cinco classes de cobertura do solo foram definidas para área de estudo: (i) corpos d'água, (ii) savana arborizada, (iii) florestas inundáveis, (iv) floresta aluvial (mata ciliar) e (v) savana gramíneo-lenhosa. Trinta pontos aleatórios foram selecionados nas áreas queimadas da imagem de 21/10/2015, figura 2. Esses pontos foram utilizados para extrair os

valores de NDVI, NBR e temperatura da superfície.

Os dados de precipitação para 2015 foram obtidos do produto 3B42RT (versão 7) do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Esses dados de precipitação correspondem a séries temporais de dados médios mensais de chuva (mm/mês), com resolução espacial de aproximadamente 25 km². Eles são fornecidos pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e estão disponíveis em [<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>].

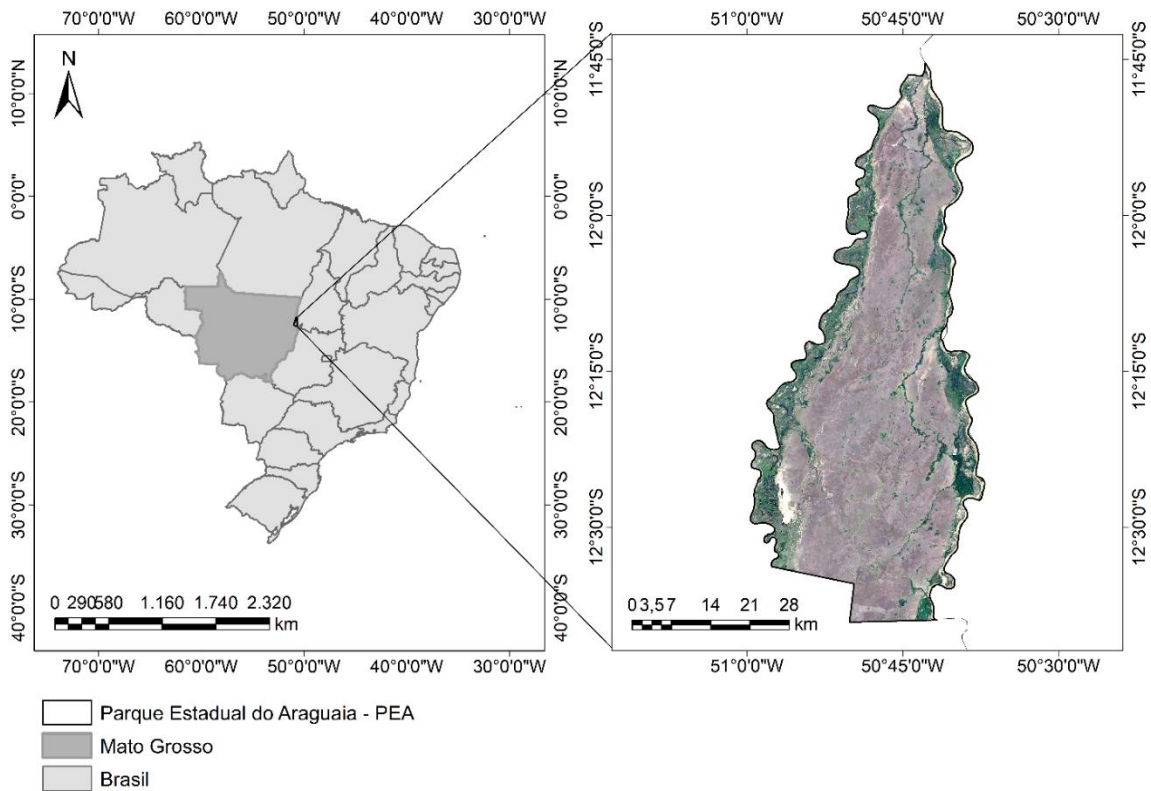


Figura 1– Localização do Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT.

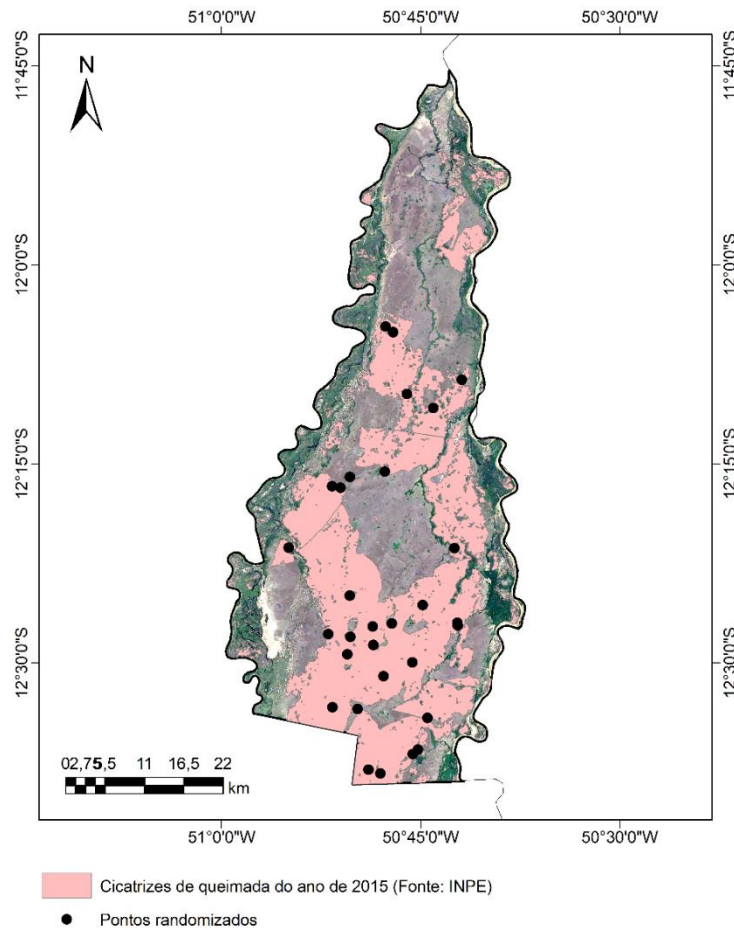


Figura 2 – Parque Estadual do Araguaia com 30 pontos aleatórios selecionados nas cicatrizes dos focos de calor em 2015.

Índices espectrais

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) permite estimar a atividade fotossintética da vegetação por meio do comprimento de onda da região do infravermelho próximo, e do vermelho (Eq. 1). Seus valores variam de -1 a 1, em que os valores próximos a 1 indicam um maior vigor vegetativo, enquanto os mais próximos a 0 (zero) representam uma superfície não vegetada ou com baixo vigor vegetativo (Fernandes et al., 2016).

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (1)$$

em que, ρ_4 é a refletância no vermelho (0,63-0,69 μm) e ρ_5 a refletância no infravermelho próximo (0,78-0,90 μm).

O Índice de Queimada Normalizada (NBR – *Normalized Burn Ratio*) é um dos mais utilizados na avaliação da severidade das queimadas. Ele utiliza as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho médio (SWIR) (Eq. 2). Os

valores de NBR variam de -1 a +1, em que os valores mais próximos de -1 correspondem às áreas queimadas.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

em que, NIR é a refletância no infravermelho próximo e SWIR a refletância no infravermelho médio.

Análises estatísticas

O intervalo de classe dos índices NDVI, NBR e para temperatura de superfície foi definido pela regra de Sturges:

$$K = 1 + 3,322 \log (n) \quad (3)$$

em que, K é a quantidade de classes e n é a quantidade de dados.

O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar a normalidade dos dados. Após verificação de normalidade dos dados, o teste t de Student pareado foi aplicado para comparar as médias das variáveis pré e pós-queimada.

O coeficiente de correlação de Spearman foi utilizado para verificar a correlação entre as variáveis NDVI, NBR e temperatura de superfície, optou-se por esse método não-paramétrico, pois não houve normalidade nos dados globais. As análises estatísticas foram realizadas no Programa R (R Core Team, 2014).

Resultados e discussão

Precipitação

Do total precipitado em 2015, 86,12% ocorreu na estação chuvosa e 13,87% na estação seca. A duração do período seco foi de 6 meses em 2015, ocorrendo de maio a outubro cuja precipitação mensal foi menor do que 100 mm (Figura 3). Março registrou o maior valor acumulado de precipitação (392,12 mm) e junho não registrou eventos de chuva. A partir do mês de abril nota-se um decréscimo dos índices pluviométricos, caracterizado pelo enfraquecimento da atuação da massa de ar Equatorial Continental e maior atuação da massa de ar Polar, período de transição da estação chuvosa para a seca.

A variação sazonal da precipitação na região do PEA é caracterizada por duas estações

bem definidas, estação chuvosa que abrange setembro a maio e uma estação menos chuvosa (estação seca) que corresponde geralmente ao período de junho a agosto.

A precipitação na região Centro-Oeste do Brasil é influenciada por sistemas atmosféricos que são tanto de origem tropical quanto extratropical de modo que, a região ao norte sofre influência de sistemas que atuam na Amazônia como, por exemplo, o Complexo Convectivo de Mesoescala Tropical, caracterizado por um conjunto de nuvens de grande desenvolvimento vertical, que se estendem por centenas de quilômetros com duração aproximada de seis horas, apresentam forma circular com alta refletância devido ao gelo no topo das nuvens (Oliveira et al., 2016).

A estimativa de precipitação diária, mensal e anual é fundamental para a compreensão da intensidade das áreas queimadas uma vez que durante a seca, o déficit de umidade local influencia no material combustível disponível para queimada (Massia et al., 2017). Deste modo, secas mais intensas ou mais prolongadas podem ser ameaças às florestas tropicais, porque a vegetação fica cada vez mais vulnerável ao fogo (Neves et al., 2018).

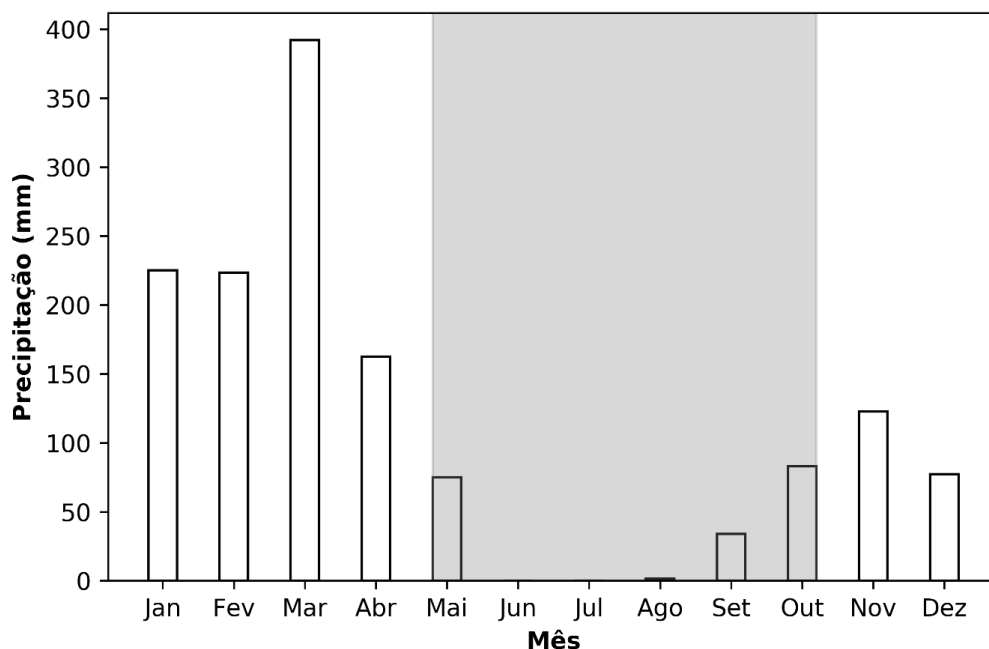


Figura 3 – Precipitação acumulada mensal no Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT, em 2015.

Queimadas

Um total de 1782 focos de calor foram registrados no Parque Estadual do Araguaia em

2015. A espacialização dos focos permite identificar a dinâmica das queimadas. Os focos começaram na região Centro-Norte do PEA e depois na região Centro-Sul (Figura 4). Não houve

registro de focos de calor nos meses de março e abril, mas os meses de agosto a outubro registraram 93,5% dos focos em 2015. Apenas o mês de setembro registrou 53,9% do total de focos no PEA. Neves et al. (2018) analisando a dinâmica de fogo no PEA constataram crescimento exponencial de incêndios quando a precipitação mensal foi abaixo de 150 mm, tendo aumento nos meses de agosto e setembro, o que corrobora com os resultados encontrados no presente estudo.

Do total da área do PEA, 78% correspondeu à classe de vegetação savana gramíneo-lenhosa, 10,55% floresta aluvial (mata ciliar), 5,03% florestas inundáveis, 3,59% savana arborizada e 2,80% corpos d'água (Figura 5A). A região é classificada como formação savânica devido a presença de árvores agrupadas em pequenas elevações do terreno que são conhecidas

como murundus ou monchões. As cicatrizes dos focos de calor corresponderam a 41,7% da área do total do PEA (Figura 5B). Sendo que, 96,05% da área queimada incidiu em vegetação savana gramíneo-lenhosa, 2,18% floresta aluvial, 1,24% savana arborizada e 0,49% em florestas inundáveis, logo, a vegetação savana gramíneo-lenhosa foi mais susceptível às queimadas.

A susceptibilidade das fitofisionomias em relação ao fogo depende do índice de biomassa de cada vegetação. Áreas de savana gramíneo-lenhosa e savana arborizada, compostas por vegetação rasteira e mais seca são mais vulneráveis às queimadas em relação à vegetação de floresta aluvial e savana florestada, caracterizadas por árvores de grande porte e ambiente úmido, fatores que dificultam o começo e o alastramento do fogo (Miranda et al., 2018).

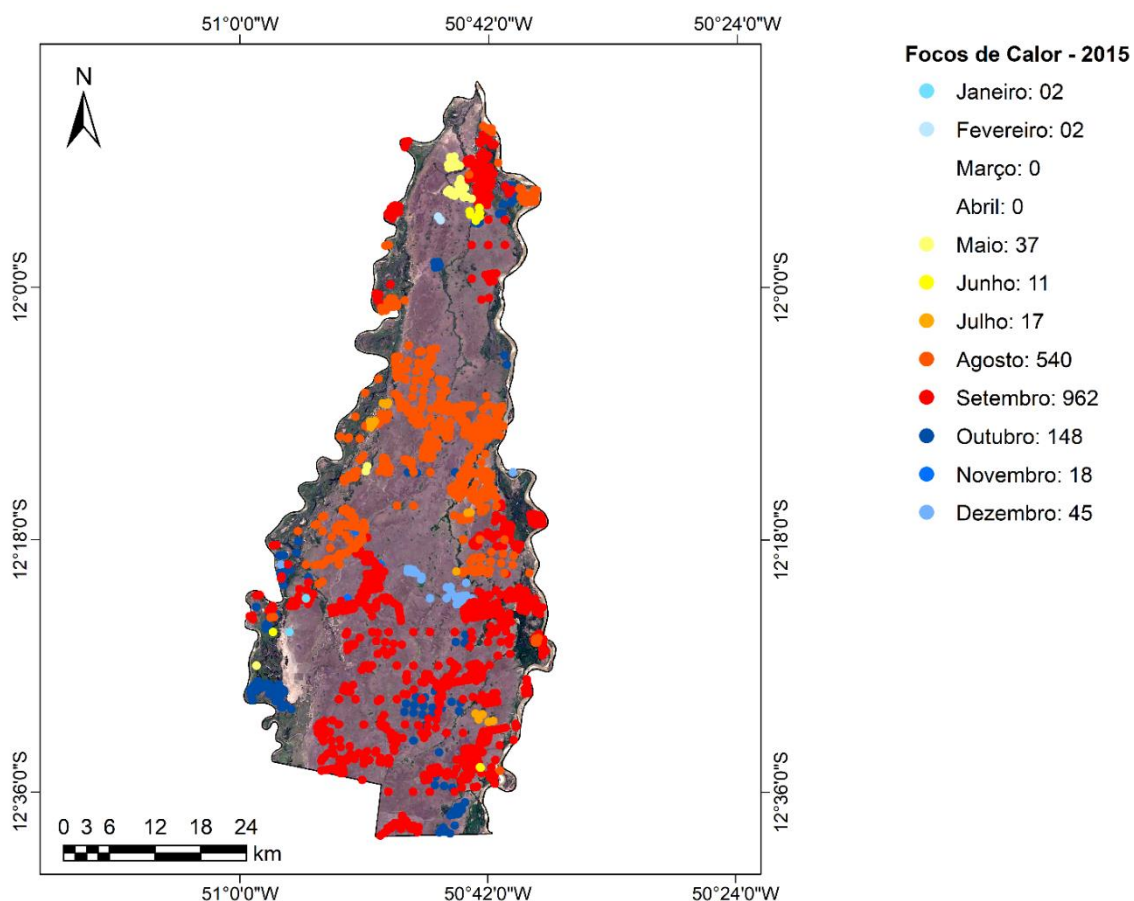


Figura 4 – Focos de calor detectados pelo INPE no Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT, em 2015.

Em geral, as árvores maiores do Cerrado possuem casca mais espessa, que isola seus tecidos e confere maior resistência ao fogo, no entanto, a espessura da casca varia muito de acordo com a espécie vegetal, conseqüentemente, a vulnerabilidade ao fogo depende predominantemente do tamanho das árvores e da

composição da comunidade, que mudam de acordo com a vegetação da área (Pellegrini et al., 2016).

No Cerrado o fogo está presente a mais de 10 milhões de anos, sendo associado às fisionomias de gramíneas e herbáceas que são mais propensas às queimadas anuais e possuem maior capacidade de rebrota, sendo essa uma estratégia ecológica

mais comum entre as espécies savânicas (Massia et al., 2017).

A temperatura de superfície apresenta uma variabilidade menor no período pré-queimada em relação ao pós-queimada (Figura 6). Os índices NDVI e o NBR apresentaram aspecto simétrico e variabilidade semelhantes para ambos os períodos analisados. A média de valores do NBR pré-queimada foi de 0,267, para a imagem pós-queimada foi de -0,129. Comparando as médias de temperatura para os dois períodos observa-se média de 27,67°C para imagem pré-queimada e de 40,23°C para pós-queimada. Os maiores valores de temperatura da superfície ocorrem na área queimada. A partir dessas análises, é possível perceber que a queimada modificou o ambiente favorecendo para que tenha uma maior temperatura de superfície, menor NDVI e menor NBR.

Após a verificação da suposição de normalidade das variáveis NDVI, NBR e da temperatura de superfície para ambos os períodos, o teste t de Student pareado foi aplicado, de modo a comparar as médias entre os períodos pré e pós queimada. Na comparação do NDVI pré-queimada e pós-queimada, o t calculado foi 18,862 e o valor $p = 2.2 \times 10^{-16}$. Na comparação do NBR pré-queimada e pós-queimada, o t calculado foi 19,614

e o valor $p = 2.2 \times 10^{-16}$. Na comparação pré-queimada e pós-queimada da temperatura de superfície, o t calculado foi -43,335 e valor $p = 2.2 \times 10^{-16}$. Logo, para todas as comparações existem diferenças altamente significativas.

Houve correlação positiva entre as variáveis NDVI e NBR ($r = 0,95$). A temperatura da superfície foi negativamente correlacionada com NDVI ($r = -0,94$) e NBR ($r = -0,96$), figura 7.

Nas imagens do NDVI pré-queimada e pós-queimada (Figuras 8A e 8B) ocorreram valores negativos (cor amarela), os quais, correspondem a cursos d'água, já os maiores valores (0,89 a 0,98) foram estimados para área de mata ciliar, vegetação densa (cor verde escuro) (Pavão et al., 2016). Os menores valores do NDVI na imagem pré-queimada caracterizam-se por vegetação seca ou pouca vegetação (cor verde-claro). Em solos menos vegetados a refletância na faixa do vermelho do espectro eletromagnético é mais alta, o que justifica os menores valores de NDVI (Fernández-Manso et al., 2016). Na imagem pós-queimada (Figura 8B do NDVI) verifica-se que os valores mínimos (0,12 a 0,20) estão relacionados com as atividades de queima na área, pois incidem no perímetro das cicatrizes de queimada no PEA.

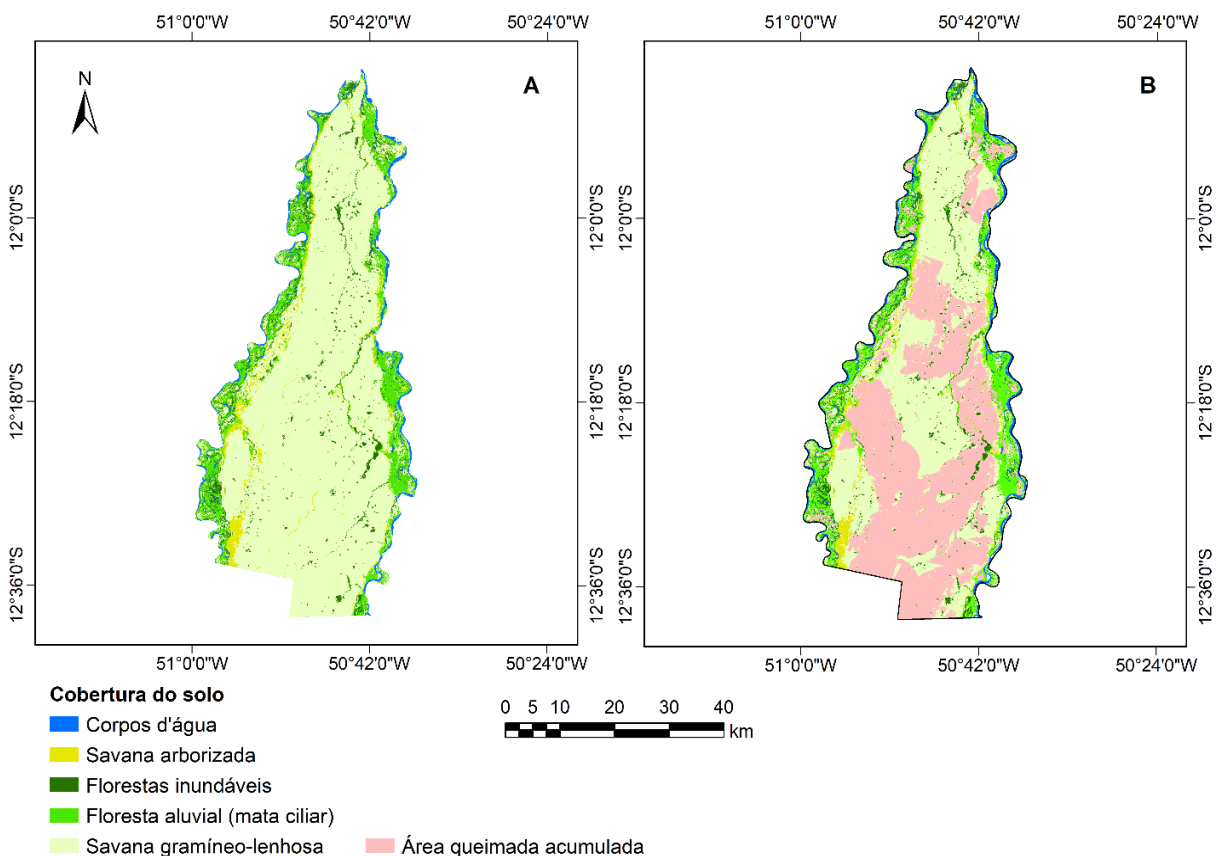


Figura 5 – Classificação supervisionada da cobertura do solo (A) e as cicatrizes de queimada (B) no Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT, em 2015.

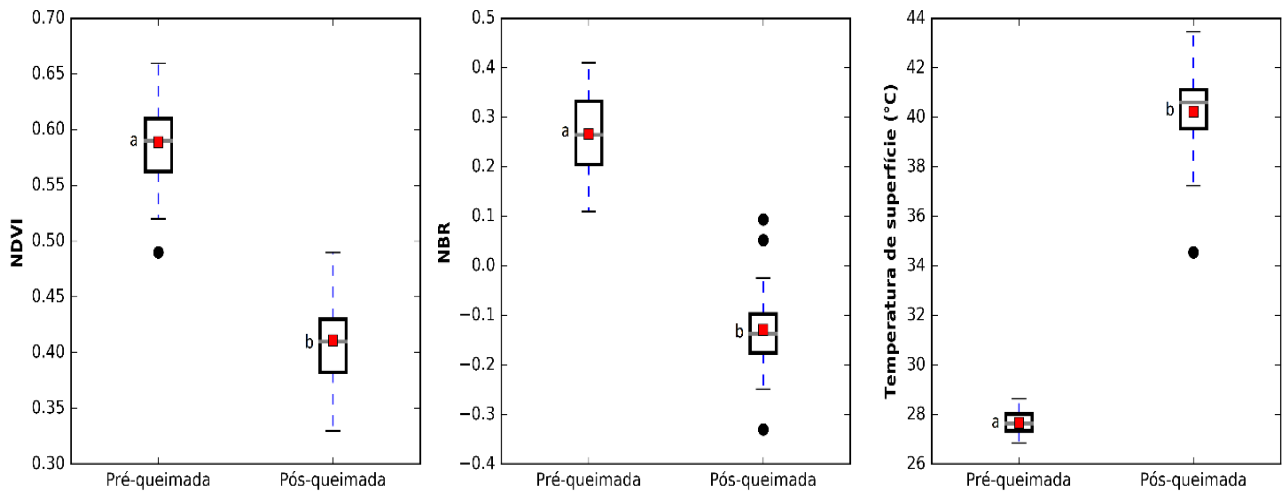


Figura 6 – Boxplot do NDVI, NBR e temperatura de superfície dos trinta pontos aleatórios das imagens do período pré-queimada (15/06/2015) e pós-queimada (21/10/2015) do Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT, em 2015.

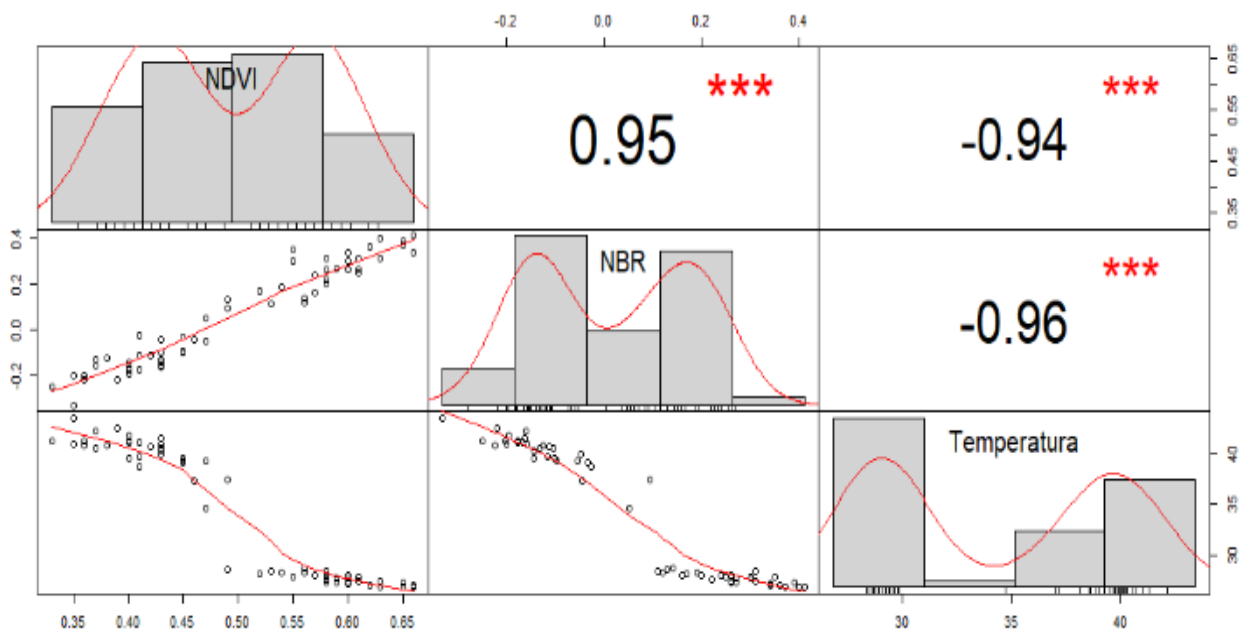


Figura 7 – Correlação de Spearman entre as variáveis NDVI, NBR e temperatura da superfície no Parque Estadual do Araguaia em Novo Santo Antônio/MT, em 2015. *** = valor-p > 0,001; ** = valor-p < 0,01; * = valor-p < 0,05.

É característica do Cerrado ter uma redução da disponibilidade hídrica na estação seca e perda das folhas para reduzir a perda de água, e, portanto, maior disponibilidade de matéria seca para combustão favorecendo a queimada natural ou antrópica (Rios et al., 2018). Na estação seca, registrou-se seis meses com precipitação abaixo de 100 mm/mensal. No mês de dezembro também estimou baixa precipitação, com 77,30 mm/mensal (Figura 3). Deste modo, o impacto do estresse hídrico anterior, devido às limitações hídricas, provocou uma perda de fitomassa foliar mais acentuada tornando o ambiente mais suscetível a

queimadas (Souza e Vale, 2019). Normalmente, com o início das primeiras chuvas a vegetação responde mais rapidamente, o que reflete no aumento do NDVI, porém, a queimada ocorreu no início da estação chuvosa e influenciou nos menores valores de NDVI (Souza et al., 2016).

Após a ação do fogo, a biomassa vegetal acima e abaixo do solo pode ser queimada, liberando gases de efeito estufa como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, resultando também em alterações na ciclagem de nutrientes principalmente devido a redução da formação de serapilheira, mudanças na temperatura devido a

lacunas na vegetação da camada herbácea e conseqüentemente, mudanças no teor de umidade do solo (Belmok et al., 2019). Em sistemas influenciados por fogo severo são esperadas alterações críticas nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (Thomaz, 2017).

A perturbação do fogo nos ecossistemas reduz a vegetação e a cobertura do solo, interrompendo as contribuições de cada componente do balanço hídrico, gerando grandes mudanças principalmente entre o fluxo terrestre e a evapotranspiração (Poon e Kinoshita, 2018). A perda de matéria orgânica abaixo do solo está ligada à menor condutividade hidrológica (Moody et al., 2016) e ao aumento do escoamento superficial acima de uma intensidade mínima de precipitação, a remoção deste material altamente

poroso e a perda da proteção da superfície do solo pela matéria orgânica causa selagem de poros por respingos de chuva e partículas de cinzas resultando em taxas inferiores de infiltração, podendo reduzir a umidade do solo e a recarga local das águas subterrâneas (Atchley et al., 2018).

Segundo Neves et al. (2018), após um incêndio é necessário o intervalo de pelo menos um ano para que ocorra a recuperação de 80% da biomassa em savanas abertas e de 2 anos para recuperação do estrato herbáceo. A ocorrência de queimadas em áreas de cerrado resulta em vestígios (cicatrices de queimada), conforme referem-se Silva et al. (2019). O índice NBR possibilitou a identificação da matéria orgânica queimada, assim para área do PEA.

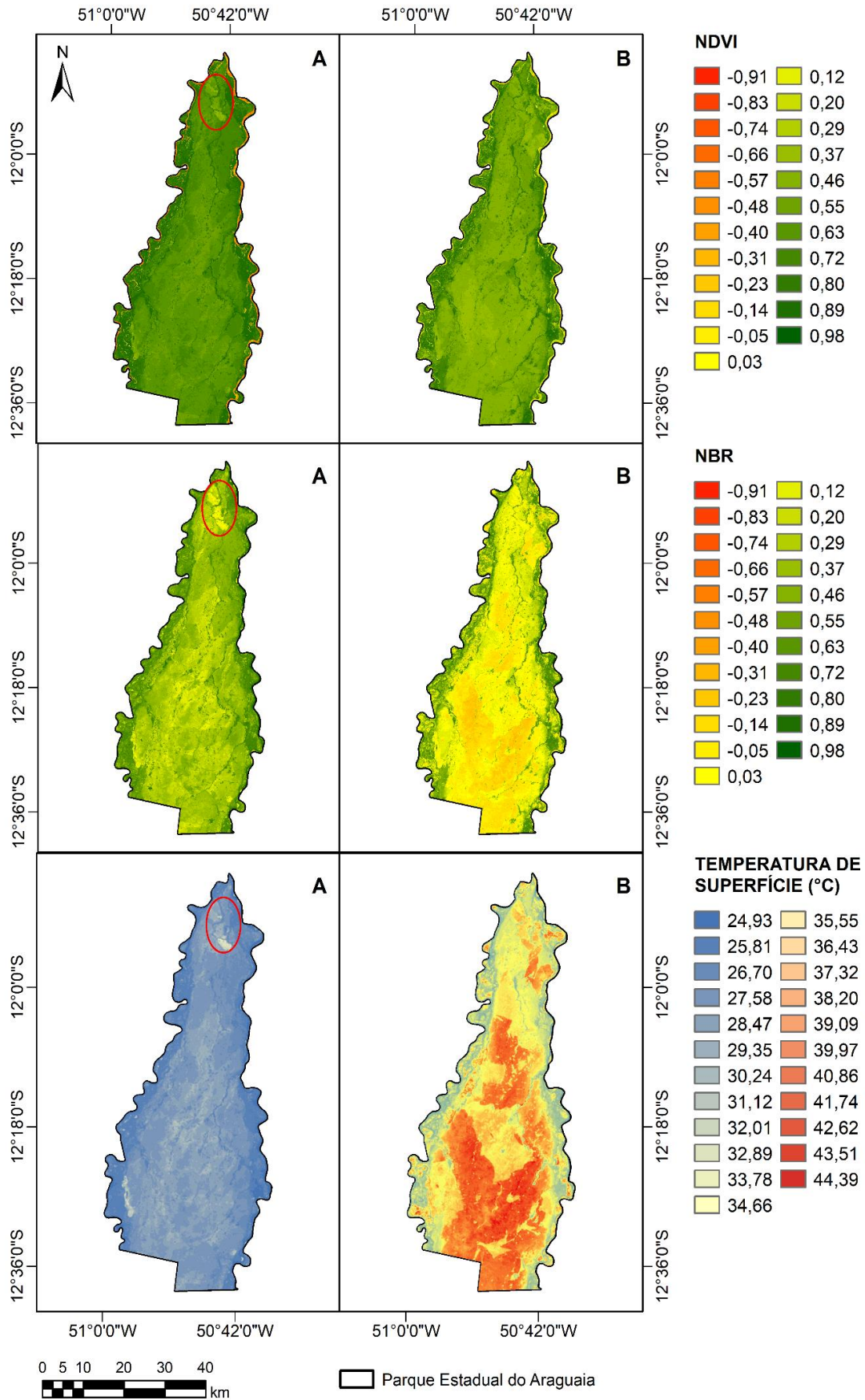


Figura 8 – Distribuição espacial do NDVI, NBR e da temperatura de superfície para o Parque Estadual do Araguaia em 15/06/2015 (A) e 21/10/2015 (B).

O NBR no período de pré-queimada (Figura 8A) apresentou valores mais elevados (cor verde) indicando a presença de uma vegetação fotossinteticamente mais ativa, com destaque para a mata ciliar, onde a umidade presente no solo proporciona um maior vigor vegetativo. Em uma pequena área ao norte do Parque, Figura 8A (destaque vermelho), é possível observar valores de NBR estimados entre -0,14 a -0,05 (cor amarela), caracterizando uma possível queimada de pequena proporção. Na região central do Parque, os valores de NBR, de uma maneira geral, foram menores, caracterizando área de vegetação menos densa.

Apesar do mês de outubro apresentar maior precipitação que os meses anteriores (Figura 3), este período ainda é caracterizado como de seca na região do Parque, o que viabiliza o processo de combustão da superfície vegetada, devido a fatores como baixa umidade do ar e do solo, altas temperaturas e maior velocidade do vento (Neves et al., 2018). A imagem pós-queimada do NBR (Figura 8B) é caracterizada por várias áreas queimadas com valores que variam de -0,12 a -0,35 (tons amarelos).

A perda de biomassa verde (clorofila) reduz a atividade fotossintética e a absorção de luz, aumentando a refletividade das bandas do espectro visível deteriorando a estrutura celular, provoca uma redução no sinal no infravermelho próximo e infravermelho médio, em resposta a perda de umidade (Arenas et al., 2016). De modo geral, a assinatura espectral da superfície afetada pelo fogo é alterada, mudança essa associada principalmente ao teor de umidade e clorofila da vegetação, a refletância do vermelho e infravermelho próximo (NIR) diminui e no infravermelho de ondas curtas (SWIR) a refletância aumenta, influenciando no valor do índice NBR (Franco et al., 2020).

Em relação à temperatura de superfície, as menores temperaturas incidiram em vegetação de mata ciliar, tanto no período pré-queimada quanto no pós-queimada. Em área de mata ciliar a vegetação de porte florestal, que margeia o curso d'água, propicia a existência de um microclima com um maior controle da radiação solar, vento e umidade do ar, influenciando de maneira positiva na temperatura de superfície (Zhong et al., 2016; Quintano et al., 2017).

Na imagem pós-queimada houve uma elevação da temperatura principalmente nas áreas onde ocorreu maior incidência de focos de calor, ou seja, áreas queimadas, apresentando temperaturas entre 43,51°C a 44,39°C (Figura 8B de temperatura de superfície). Os valores mais elevados de temperatura de superfície em áreas queimadas se

dão à alta absorção de radiação pelas cinzas geradas após queima da biomassa (Fernandes et al., 2016; Fornacca et al., 2018).

Os parâmetros físicos da superfície estão interligados entre si, uma variável, isoladamente, não explica o comportamento do fogo, o qual depende da atuação conjunta de todas as variáveis, logo, as modificações provocadas pelas queimadas em apenas uma delas podem influenciar os demais (Torres et al., 2019).

Com a redução do albedo da superfície, o balanço de radiação de ondas curtas é alterado devido ao aumento da absorção da radiação incidente, sob condições de céu claro, gerando um maior aquecimento e conseqüente elevação da temperatura de superfície (Tang et al., 2019). Neste sentido, o aumento da temperatura da superfície também provoca alterações na temperatura do ar, perturbando o orçamento da energia da superfície e o processo de interação terra-atmosfera (Quintano et al., 2019).

Existe uma relação entre intensidade do fogo e época do ano, sendo essa intensidade maior na estação seca (Costa et al., 2018). Durante esse período, o clima seco e a baixa umidade do solo e da vegetação, favorecem a ocorrência de queimadas, principalmente de origem antrópica devido ao uso do fogo para a limpeza de pastagens. Fatores como o tipo de biomassa e sua umidade, temperatura e a umidade do ar e velocidade dos ventos, influenciam de forma direta a origem e durabilidade das queimadas (Souza e Vale, 2019).

A variação da umidade do ar influencia na resposta da umidade do material combustível, quanto menor seu valor, maior a umidade relativa do ar, dando condições para o ar transferir umidade ao combustível, por outro lado, uma maior temperatura significa menor umidade relativa do ar, fazendo com que o combustível seque, ou seja, transfira umidade para o ar (Torres et al., 2019).

Conclusão

A partir do uso dos índices espectrais NDVI, NBR e de temperatura de superfície foi possível demonstrar as modificações da superfície após ocorrência de queimada no PEA. Os resultados deste estudo corroboram com a hipótese de que a ocorrência de queimada altera as respostas espectrais da superfície. Comparando as médias pelo teste t de Student pareado, das imagens pré e pós-queimada das variáveis NDVI, NBR e temperatura de superfície conclui-se que existe diferença altamente significativa (valor- $p = 2.2 \times 10^{-16}$). As variáveis mencionadas possuem correlação, no entanto, o NDVI e o NBR apresentam uma relação de aumento proporcional

e o NDVI e NBR versus temperatura de superfície apresentam uma relação inversamente proporcional.

As diversas literaturas sobre o desempenho dos índices espectrais Landsat para a detecção de áreas queimadas sugere que não há um modelo único que supere os demais em qualquer circunstâncias espaço-temporais. Os resultados aqui descritos ressaltam também a necessidade de estudos mais precisos sobre o padrão espacial, frequência, sazonalidade e gravidade das queimadas nos ecossistemas brasileiros, particularmente naqueles mais sensíveis às mudanças induzidas pelo fogo nas condições da superfície principalmente vegetação e solo. Apesar do fogo ser um elemento de perturbação natural, parte essencial para o funcionamento de biomas como o Cerrado (a savana brasileira), nas últimas décadas, no entanto, as queimadas principalmente de origem antrópica, tem gerado um desequilíbrio entre os episódios de fogo e a recuperação do ecossistema, resultando em uma fragmentação e degradação da biodiversidade local.

Modelos gerais de circulação, elaborados por organizações científicas como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, mostram que os ecossistemas mais propensos ao fogo, como é o caso do cerrado brasileiro, estão se aquecendo rapidamente como resultado das mudanças climáticas. Uma das hipóteses é que os incêndios florestais respondam às mudanças climáticas por serem regulados pela precipitação e temperatura, sendo provável que uma redução na precipitação aumente o potencial, a frequência, a intensidade e a duração da queimada. Portanto, a interação e a resposta entre as queimadas e as mudanças provocadas em locais como o cerrado são de grande importância, tendo em vista que ecossistemas mais propensos ao fogo são extensos, cobrem mais de 40% da superfície terrestre da Terra e são responsáveis por mais de 85% dos incêndios globais.

Estudos como esse, com dados ainda mais precisos e completos sobre áreas queimadas nos biomas brasileiros são necessários para uma série de aplicações, incluindo quantificar tendências e padrões de ocorrência de queimadas passadas e realizar projeções futuras, bem como avaliar os impactos dos incêndios florestais seja de origem natural ou antrópica em uma variedade de aspectos naturais e sociais. Muitas dessas aplicações requerem uma série de dados consistentes, coletados por longos períodos para determinar se as mudanças na ocorrência e nos impactos do fogo estão relacionadas a mudanças no clima, no uso e

ocupação do solo, em políticas públicas e gestão dos recursos naturais ou a outros fatores.

Agradecimentos

A pesquisa foi apoiada pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA/IF/UFMT), Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos nº 310879/2017-5 e 305761/2018-8; Edital Universal 01/2016, processo nº 407463/2016-0) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT – PRONEM 2014, processo nº 561397/2014).

Referências

- Addison, P.; Oommen, T. 2018. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 73, 292–299. DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.002.
- Alvarado, S. T.; Silva, T. S. F.; Archibald, S. 2018. Management impacts on fire occurrence: A comparison of fire regimes of African and South American tropical savannas in different protected areas. *Journal of Environmental Management*, 218, 79-87. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.004.
- Arenas, G. N.; Masot, A. N.; Marcos, G. M. 2016. Análisis de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y Teledetección. Estudio de caso en sierra de Gata (2015). In: *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario*. Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial, 247-268.
- Atchley, A.L.; Kinoshita, A.M.; Lopez, S.R.; Trader, L.; Middleton, R. 2018. Simulating surface and subsurface water balance changes due to burn severity. *Vadose Zone Journal* 17, DOI: 10.2136/vzj2018.05.0099.
- Ba, R.; Song, W.; Li, X.; Xie, Z.; Lo, S. 2019. Integration of Multiple Spectral Indices and a Neural Network for Burned Area Mapping

- Based on MODIS Data. *Remote Sensing* 11, 326. DOI: 10.3390/rs11030326.
- Belenguer-Plomer, M.A.; Tanasea, M.A.; Fernandez-Carrillo, A.; Chuvieco, E. 2019. Burned area detection and mapping using Sentinel-1 backscatter coefficient and thermal anomalies. *Remote Sensing of Environment* 233. DOI: 10.1016/j.rse.2019.11134.
- Belmok, A.; Rodrigues-Oliveira, T.; Lopes, F.; Miranda, H.; Krüger, R.; Kyaw, C. 2019. Long-Term Effects of Periodical Fires on Archaeal Communities from Brazilian Cerrado Soils. *Archea* 2019, DOI:10.1155/2019/6957210.
- Chen, W.; Moriya, K.; Sakai, T.; Koyama, L.; Cao, C. X. 2016. Mapping a burned forest area from Landsat TM data by multiple methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7, 384-402. DOI:10.1080/19475705.2014.925982.
- Chiang, S.; Ulloa, N.I. 2019. Mapping and Tracking Forest Burnt Areas in the Indio Maiz Biological Reserve Using Sentinel-3 SLSTR and VIIRS-DNB Imagery, *Sensors* 19, DOI: 10.3390/s19245423.
- Clemente, S. S.; Oliveira Júnior, J. F.; Louzada, M. A. P. 2017. Focos de calor na Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32, 669-677. DOI:10.1590/0102-7786324014.
- Costa, Y. T.; Barcelos, A. C.; Rodrigues, S. C. 2018. Fire effects on soil and vegetation in a degraded brazilian savanna, *Mercator, Fortaleza*, 17. DOI:10.4215/rm2018.e17016.
- Daldegan, G.; Roberts, D.; de Figueiredo R.F. 2019. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone. *Remote Sensing of Environment* 232, 1. DOI:10.1016/j.rse.2019.111340.
- Engelbrecht, J.; Theron, A.; Vhengani, L.; Kemp, J. A. 2017. Simple Normalized Difference Approach to Burnt Area Mapping Using Multi-Polarisation C-Band SAR. *Remote Sensing* 9, 764. DOI:10.3390/rs9080764.
- Fernandes, A. C.; Coutinho, M. A.; Santos, V. G.; Nascimento, C. R. 2016. Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas. *Caderno de Ciências Agrárias* 8, 30-40.
- Fernández-Manso, A.; Fernández-Manso, O.; Quintano, C. 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 50, 170-175. DOI: 10.1016/j.jag.2016.03.005.
- Forkel, M.; Dorigo, W.; Lasslop, G.; Teubner, I.; Chuvieco, E.; Thonicke, K. 2017. A data-driven approach to identify controls on global fire activity from satellite and climate observations (SOFIA V1). *Geoscientific Model Development* 10, 4443-4476. DOI: 10.5194/gmd-10-4443-2017.
- Fornacca, D.; Ren, G.; Xiao, W. 2018. Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing* 10, 1196. DOI:10.3390/rs10081196.
- Franco, M.G.; Mundo, I.A.; Veblen, T.T. 2020. Field-Validated Burn-Severity Mapping in North Patagonian Forests. *Remote Sensing* 12, DOI:10.3390/rs12020214
- Gonino, G.M.R; Figueiredo, B. R.S; Manetta, G.I; Zaia Alves, G.H; Benedito, E. 2019. Fire increases the productivity of sugarcane, but it also generates ashes that negatively affect native fish species in aquatic systems. *Science of the Total Environment* 664,215-221. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.02.022.
- Hawbaker, T.J.; Vanderhoof, M.K.; Beal, Y.J.; Takacs, J.D.; Schmidt, G. L.; Falgout, J. T.; Williams, B; Fairaux, N. M.; Caldwell, M. K.; Picotte, J. J.; Howard, S. M.; Stitt, S.; Dwyer, J. L. 2017. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 198, 504-522. DOI:10.1016/j.rse.2017.06.027.
- INPE. Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais – Queimadas - Monitoramento de Focos, 2015. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas>. Acesso: 15 de dez. 2016.
- Dintwe, K.; Okin, G.S.; Xue, Y. 2017. Fire-induced albedo change and surface radiative forcing in sub-Saharan Africa savanna ecosystems: Implications for the energy

- balance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122, 6186-6201. DOI:10.1002/2016JD026318.
- Kukavskaya, E. A.; Buryak, L. V.; Kalenskaya, O. P.; Zarubin, D. S. 2017. Transformation of the Ground Cover after Surface Fires and Estimation of Pyrogenic Carbon Emissions in the Dark-Coniferous Forests of Central Siberia. *Contemporary Problems of Ecology* 10, 62–70. DOI: 10.1134/S1995425517010073.
- Kumar, S.S; Roy, D.P. 2018. Global operational land imager Landsat-8 reflectance-based active fire detection algorithm. *International Journal of Digital Earth* 11, 154-178. DOI:10.1080/17538947.2017.1391341.
- Lazaj, L. 2016. Burnt areas detection and mapping using vegetation indices. *Remote Sensing* DOI: 10.13140/RG.2.2.11125.78560.
- Lin, L.; Meng, Y.; Yue, A.; Yuan, Y.; Liu, X.; Chen, J.; Zhang, M.; Chen, J. A. 2016. Spatio-Temporal Model for Forest Fire Detection Using HJ-IRS Satellite Data. *Remote Sensing* 8. DOI: 10.3390/rs8050403.
- Liu, W.; Wang, L.; Zhou, Y.; Wang, S.; Zhu, J.; Wang, F. 2016. A comparison of forest fire burned area indices based on HJ satellite data. *Nat. Hazards* 81, 971–980. DOI: 10.1007/s11069-015-2115-x.
- Massia, K.G.; Eugênio, C.U.O.; Franco A.C. 2017. Post-fire reproduction of herbs at a savanna-gallery forest boundary in Distrito Federal, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 77, 876-886. DOI:10.1590/1519-6984.06416.
- Miranda, M.R.S.; Neves, L.F.S.; Kreitlow, J.P.; Neves, S. M. A. S.; Neves, R. J. 2018. Distribuição de queimadas e mudanças na cobertura vegetal e uso da terra no bioma Pantanal, Cáceres-Brasil. *Caminhos de Geografia. Uberlândia – MG.* v. 19, n. 65, p. 91–108. DOI:10.14393/RCG196508.
- Moody, J.A.; Ebel, B.A.; Nyman, P.; Martin, D.A.; Stoof, C.; McKinley, R. 2016. Relations between soil hydraulic properties and burn severity. *International Journal of Wildland Fire* 25, 279–293. DOI:10.1071/WF14062.
- Mota, B.; Gobron, N.; Cappucci, F.; Morgan, O. 2019. Burned area and surface albedo products: Assessment of change consistency at global scale. *Remote Sensing of Environment* 225, 249-266. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.001.
- Neves, L. F. S.; Marimon, B. S.; Anderson, L. O.; Neves, S.M.A.S. 2018. Dinâmica de fogo no Parque Estadual do Araguaia, zona de transição Amazônia-Cerrado. *RAEGA* 44, 85 -103. DOI: 10.5380/raega
- Oliveira, G.B.; Alcântara, C. R.; Souza, E. P. 2016. Caracterização de perfis de vento no ambiente de formação das linhas de instabilidade amazônicas. *Ciência e Natura*, Santa Maria 38, 393 – 403. DOI:10.5902/2179-460X18337.
- Pavão, V.M.; Querino, C.A.S.; Beneditti, C.A.; Pavão, L.L.; Da Silva Querino, J.K.A.; Machado, N.G.; Biudes, M.S. 2016. Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do sul do Amazonas, Brasil. *Raega- O Espaço Geográfico em Análise* 37, 333-352. DOI: 10.5380/raega.v37i0.42469.
- Pellegrini, A.F.A.; Franco, A.C.; Hoffmann, W. A. 2016. Shifts in functional traits elevate risk of fire-driven tree dieback in tropical savanna and forest biomes. *Global Change Biology* 22, 1235. DOI: 10.1111/gcb.13110.
- Poon, P.K.; Kinoshita, A.M. 2018. Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid landscapes. *Journal of hydrology* 559, 71–83. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.02.023.
- Quintano, C.; Fernandez-Manso, A.; Roberts, Dar A. 2017. Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and Land Surface Temperature. *Remote Sensing of Environment* 190, 83-95; DOI:10.1016/j.rse.2016.12.009.
- Quintano, C.; Fernandez-Manso, A.; Marcos, E.; Calvo, L. 2019. Burn Severity and Post-Fire Land Surface Albedo Relationship in Mediterranean Forest Ecosystems. *Remote Sensing* 11, 2309. DOI:10.3390/rs11192309
- Rios, M.N.S.; Silva, J.C.S.; Malaquias, J.V. 2018. Mudanças pós-fogo na florística e estrutura da vegetação arbóreo arbustiva de um cerrado sentido restrito em planaltina – DF. *Ciência Florestal* 28, 469-482. DOI:10.5902/1980509832028.
- Silva, F. S.; Pestana, A. L. M.; Martins, L. S. 2019. Sensoriamento remoto para detecção de queimadas no Cerrado Maranhense: uma

- aplicação no Parque Estadual do Mirador. *Revista de Geografia Acadêmica* 13, 90-105.
- Souza, G. M.; Da Costa Gurgel, H.; Ciamp, P. M. 2016. Seasonal Analysis of Cerrado Vegetation by Means of Modis data in the Distrito Federal (Brazil) | Análise Sazonal da Vegetação do Cerrado por Meio de Dados do Sensor Modis no Distrito Federal (Brasil). *Boletim Goiano de Geografia* 36, 502-520.
- Souza, M.A.; Vale, A.T. 2019. Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de Cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas. *Ciência Florestal* 29, 181-192. DOI:10.5902/1980509822416.
- Tang, R.; Huang, X.; Zhou, D.; Ding, A. 2019. Biomass burning induced surface darkening and its impact on regional meteorology in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. DOI:10.5194/acp-2019-957
- Thomaz, E.L. 2017. High fire temperature changes soil aggregate stability in slash-and-burn agricultural systems. *Scientia Agricola* 74, 157-162. DOI: 10.1590/1678-992x-2015-0495.
- Torres, F.T.; Silva Junior, M.R.; Lima, G.S. 2019. Influência dos Elementos Meteorológicos Sobre o Comportamento do Fogo. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 33-41. DOI:10.1590/0102-7786334014.
- Tran, B.N.; Tanase, M.A.; Bennett, L.T.; Aponte, C. 2018. Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. *Remote Sensing* 10, 1680; DOI:10.3390/rs10111680.
- Zhong, Z.; Zeng, Y.; Li, S.; Huang, W. 2016. A new burn severity index based on land surface temperature and enhanced vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 45, 84-94; DOI:10.1016/j.jag.2015.11.002.
- Wang, X.; Xu, J.; Xu, L. 2017. Effects of prescribed fire on germination and plant community of *Carex cinerascens* and *Artemisia selengensis* in Poyang Lake, China. *South African Journal of Botany* 113, 111-118. DOI: 10.1016/j.sajb.2017.07.014.
- Wentworth, G.R.; Aklilu, Y.A.; Landis, M.S.; Hsu, Y.M. 2018. Impacts of a large boreal wildfire on ground level atmospheric concentrations of PAHs, VOCs and ozone. *Atmospheric Environment* 178, 19-30. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.013.
- Yuan, C.; Liu, Z.; Zhang, Y. 2017. Aerial Images-Based Forest Fire Detection for Firefighting Using Optical Remote Sensing Techniques and Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* volume 88, 635-654. DOI:10.1007/s10846-016-0464-7.