



Avaliação Temporal da Dinâmica de Regeneração da Vegetação em Áreas Queimadas no Pantanal

Temporal Assessment of Vegetation Regeneration Dynamics on Burned Areas in the Pantanal

Felipe Cardoso Maia¹, Tati Almeida², Paula Lopes Germano de Oliveira³, Djane Victoria Pessoa Ferreira⁴, Julia Curto Má⁵ e Rejane Ennes Cicerelli⁶

1 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Brasília, DF, Brasil. felipe.cmaia@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8389-2048>

2 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Brasília, DF, Brasil.
tati_almeida@unb.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6387-8254>

3 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Brasília, DF, Brasil. paula.germano@aluno.unb.br

4 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Brasília, DF, Brasil. djane.ferreira@aluno.unb.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6559-1954>

5 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Brasília, DF, Brasil.

juliacurto@unb.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8120-0324>

6 Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Brasília, DF, Brasil.

rejaneig@unb.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8199-5163>

Recebido: 08.2022 | Aceito: 03.2023

Resumo: O Pantanal, um dos biomas mais conservados do Brasil, vem sofrendo com alterações do ciclo hidrológico, queimadas e expansão do agronegócio. Os incêndios constantes e contínuos nesse bioma ocasionam danos ambientais imensuráveis pela sua característica de longos períodos de estiagem com baixa umidade e elevada temperatura. Nesse sentido, o presente estudo analisou a dinâmica de regeneração da vegetação pós-queima e produção de biomassa no bioma Pantanal por meio de derivadas dos perfis temporais (sazonais) do índice de vegetação NDVI (*Normalized Vegetation Index*) e do índice de queimadas NBR (*Normalized Burn Ratio Index*). Para o mapeamento e identificação das áreas queimadas, utilizou-se um algoritmo implementado no *Google Earth Engine*, e produtos de fogo ativo MOD14A2, derivados a partir de imagens do sensor MODIS. Foram selecionadas 7 áreas queimadas em setembro/2016 e para cálculo dos índices utilizou-se a coleção de dados Landsat8 *Surface Reflectance Tier1* entre abril de 2013 a setembro de 2020. Segundo as análises, duas áreas não foram capazes de se recuperar após o evento de fogo. No entanto, em todas as áreas os índices retornaram para valores semelhantes aos encontrados no ano anterior à queimada. Além disso, a pluviosidade do local foi determinante para definir o efeito da queimada e da produção de biomassa, sendo que as áreas em locais com maior pluviosidade as menos afetadas pelo efeito das queimadas. Com base nos resultados deste estudo, os índices utilizados se mostraram eficientes na identificação das áreas queimadas e na classificação do potencial de regeneração destas áreas.

Palavras-chave: Incêndios Florestais. Índices de vegetação. Pluviosidade.

Abstract: The Pantanal, one of the most conserved biomes in Brazil, has been suffering from alterations in the hydrological cycle, fires, and the expansion of agribusiness. The constant and continuous fires in this biome cause immeasurable environmental damage due to its characteristic long dry periods with low humidity and high temperature. In this sense, the present study analyzed the dynamics of post-burn vegetation regeneration and biomass production in the Pantanal biome by means of derivatives of temporal (seasonal) profiles of the NDVI (Normalized Vegetation Index) vegetation index and the NBR (Normalized Burn Ratio Index) burn index. For mapping and identification of burned areas, an algorithm implemented in Google Earth Engine was used, and MOD14A2 active fire products derived from MODIS sensor images. Seven burned areas were selected in September/2016 and the Landsat8 Surface Reflectance Tier1 data collection from April 2013 to September 2020 was used to calculate the indices. According to the analyses, two areas were not able to recover after the fire event. However, in all areas the indices returned to values similar to those found in the year before the fire. In addition, the rainfall of the location was a determining factor in defining the effect of the burn and biomass production, with areas in locations with higher rainfall being the least affected by the effect of the burns. Based on the results of this study, the indices used proved to be efficient in identifying burned areas and in classifying the regeneration potential of these areas.

Keywords: Forest Fire. Vegetation Index. Rainfall.

1 INTRODUÇÃO

O bioma Pantanal, localizado na região central da América do Sul, possui a maior planície inundável do planeta. A dinâmica de inundação desse bioma, cuja intensidade, extensão e permanência das cheias são variáveis de ano para ano, é um fator determinante para os processos bióticos e abióticos, visto que ocasionam mudanças em todas as unidades da paisagem (MORAES et al., 2017, ANTUNES; LAMPARELLI; RODRIGUES, 2015). Embora seja um dos biomas mais conservados do Brasil, o Pantanal vem sofrendo constantemente com a escassez de chuva, alterações dos ciclos de cheia e seca, desmatamento, queimadas e expansão do agronegócio (ANTUNES; LAMPARELLI; RODRIGUES, 2015).

Os incêndios trazem grandes prejuízos ao Pantanal por sua característica de longos períodos de estiagem com baixa umidade e elevada temperatura, somado a alguns tipos de fitofisionomias que favorecem a disseminação do fogo (SORIANO; NARCISO, 2020). As superfícies afetadas por incêndios, além da perda da cobertura vegetal, escurecem devido aos resíduos produzidos pela combustão. Este escurecimento provoca a diminuição da evapotranspiração, tornando estas zonas mais quentes e secas devido à baixa capacidade de retenção de água (GUIMARÃES, 2009). A combustão da matéria orgânica leva ao enriquecimento temporário do solo em nutrientes sob a forma mineral, os quais podem ser facilmente absorvidos pelas plantas. No entanto, o balanço global em médio/longo prazo é negativo, pois enquanto não houver a reposição de uma parte significativa de matéria orgânica, não há possibilidade de restituição dos nutrientes no solo (GUIMARÃES, 2009). A velocidade de propagação das chamas e as temperaturas do ar e do solo são fatores determinantes na regeneração da vegetação. Além disso, a regeneração das plantas também tem relação direta com a capacidade intrínseca de reação que cada espécie tem para suportar o calor do fogo, determinando sua resistência, regeneração ou sobrevivência (SEGER et al., 2016).

Mudanças no funcionamento do ecossistema induzidas pela ação do fogo foram relatadas a partir de estudos baseados em imagens de satélite e sensoriamento remoto (TORRES et al., 2018). Os dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) transportado pelos satélites Terra e Aqua vêm mostrando boas alternativas para análises temporais da vegetação, delimitação de áreas alagadas, áreas queimadas e fogo ativo no bioma Pantanal desde 2000 (MORAES et al., 2017). A série Landsat também impressiona devido a sua média resolução espacial e longo período temporal de aquisição. São inúmeras as aplicações para incêndios florestais, principalmente utilizando índices espectrais (EMADIZADEH et al., 2020, GARCÍA-LLAMAS, 2019, KEY; BENSON 1999). Emadizadeh et al. (2020) alcançou uma acurácia maior que 74% no uso do índice Δ NBR (*Delta Normalized Burn Ratio Index* - Severidade da Queimada) para obtenção de severidade da queimada.

O grande potencial desses dados aliados a ferramentas de processamento em nuvens permite análises automatizadas complexas, que são incomuns para usuários tradicionais (BAR et al., 2020). O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma baseada em nuvem que suporta análises em escala global de grandes catálogos de dados de observação da terra (GORELICK et al., 2017). O GEE pode ser uma opção atraente não só pelo fato de as rotinas de processamento serem realizadas em nuvem, mas também pela disponibilidade e atualização crescente de muitos conjuntos de dados geoespaciais globais que podem ser explorados para diversas finalidades (SAFANELLI et al., 2020, CROWLEY et al., 2019).

A plataforma permite ainda uma análise dinâmica do ambiente a partir de séries temporais e índices de vegetação (IVs), como o *Normalized Vegetation Index* (NDVI) (CUEVAS-GONZÁLEZ et al., 2009, PETTORELLI et al., 2005) e o *Normalized Burn Ratio Index* (NBR) (LI et al., 2020). Estes índices se relacionam com parâmetros fisiológicos das plantas, como índice de área foliar (IAF), produção de biomassa e disponibilidade hídrica do solo (LE PAGE; ZRIBI, 2019). O acompanhamento da variabilidade temporal dos IVs permite determinar a taxa de crescimento das culturas, o efeito dos manejos agrônômicos e climáticos (seca, calor, queimada, geada) e, por fim, estimar o potencial produtivo das culturas. Portanto, os IVs, como resultado da interação entre fatores ambientais e de manejo da cultura (ROSSI et al., 2018), podem ser ferramentas eficazes na discriminação e análise qualitativa de áreas queimadas.

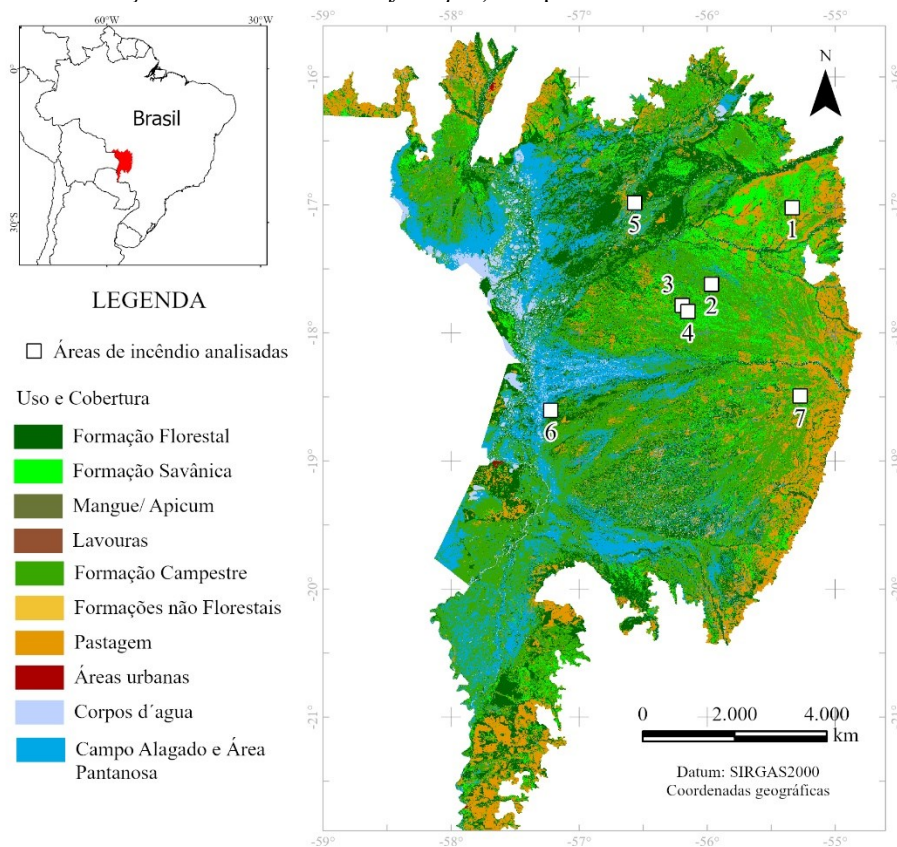
Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi analisar a dinâmica de regeneração da vegetação pós-queima no bioma Pantanal por meio da análise temporal dos índices de vegetação NDVI e do índice de queimadas NBR.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende o bioma Pantanal brasileiro (Figura 1) que possui uma importante riqueza de diversidade biológica terrestre e aquática, e os ecossistemas que o bioma abriga são extremamente frágeis, sob a ameaça das novas tendências de desenvolvimento econômico e de construção de infraestrutura (MARENGO et al., 2021). Esse bioma é composto por diferentes fitofisionomias que se cruzam, como formações florestais, savânicas e campestres. Algumas dessas áreas estão sujeitas a transbordamentos sazonais de rios, formando um complexo de campos alagados e áreas pantanosas (VIANA; ALVALÁ, 2011, MARENGO et al., 2021) (Figura 1).

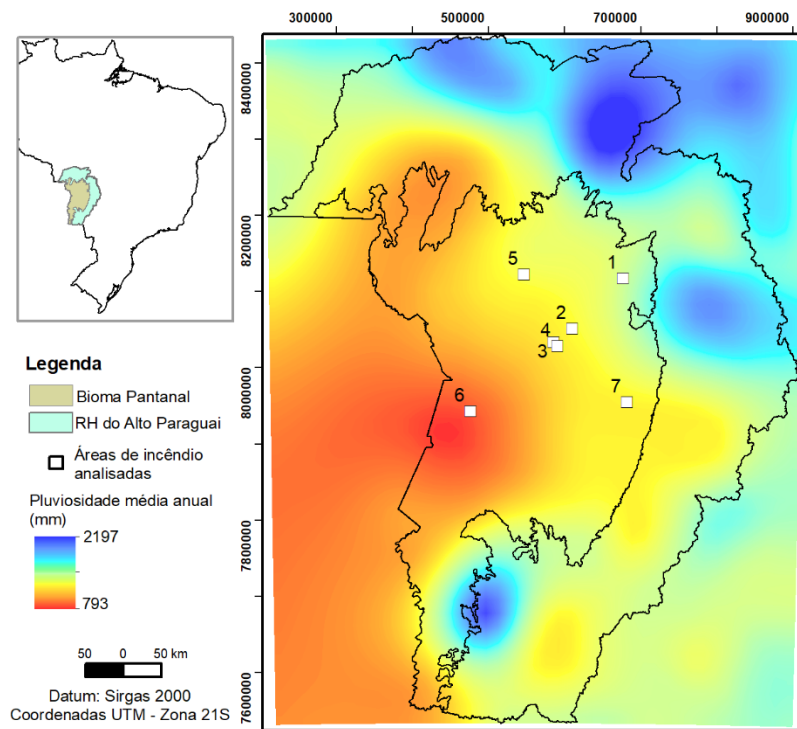
O clima característico da região é predominantemente tropical, com temperatura média anual em torno de 25°C, com máximos e mínimos médios anuais de 34 °C e 15 °C, respectivamente (MORAES et al., 2017). Este bioma alterna os períodos prolongados de precipitação (outubro a março) com períodos muito secos (abril a setembro), os quais proporcionam alto risco de incêndio em sua vegetação (MORAES et al., 2017). A precipitação média anual no bioma Pantanal, entre os anos 1977 e 2006 está demonstrada na Figura 2, que mostra uma tendência de menor ocorrência de chuvas em sua porção centro-oeste.

Figura 1 –Localização das áreas de estudo (*fire spot*) compreendidas no bioma Pantanal brasileiro.



Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

Figura 2 - Precipitação média anual na região hidrográfica do Alto Paraguai, extraídos a partir da base de dados do projeto Atlas Pluviométrico do Brasil, do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, para os anos entre 1977 e 2006.



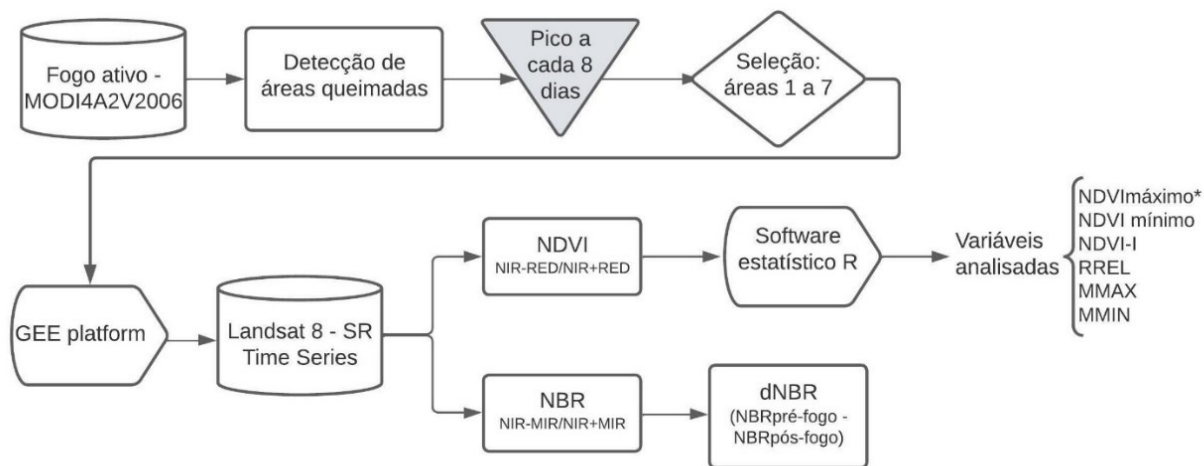
Fonte: Os autores (2022).

Para o mapeamento e identificação das áreas queimadas foi utilizado o produto de fogo ativo MOD14A2v006, derivados a partir de imagens do sensor MODIS, com resolução espacial de 1 km e composição de máscara de fogo de 8 dias, ou seja, as imagens contêm o valor máximo das classes individuais de pixels de incêndio detectadas durante os oito dias de aquisição. Este produto foi utilizado exclusivamente para fazer uma pré-seleção das áreas queimadas e tornar possível a realização de análise temporal dos índices de vegetação e queimadas, tanto antes do incêndio quanto depois.

Após a identificação das áreas queimadas pelo produto MOD14A2v006, foram selecionadas 7 áreas atingidas pelo fogo entre o período de 21/09/2016 e 29/09/2016 (Figura 1), das quais foram derivadas as séries temporais que foram fonte para a construção dos índices espectrais. As áreas selecionadas também tiveram eventos de queimadas subsequentes ocorridos em setembro de 2016 e setembro de 2019 ou 2020. Nesse sentido, foi definido os pontos de amostragem da pesquisa utilizando a área abrangida pelo pixel do MODIS (1km). Além disso, as áreas foram selecionadas de forma a garantir que o uso e cobertura do solo fossem em distintas fitofisionomias naturais, anteriormente as mudanças ocorridas, seja pelo evento do fogo ou por eventos antrópicos. As áreas 1, 2, 3, 4 e 7 encontram-se entre Formação Savânica e Formação Campestre. A área 6 está localizada em área de Formação Campestre e campo alagado (ou pantanoso), enquanto a área 5, no extremo nordeste do bioma, encontra-se entre formação florestal e campestre. Formação Savânica e Formação Campestre foram as mais afetadas por queimadas no bioma Pantanal, correspondendo 75% das áreas queimadas nos últimos 36 anos (NOVAIS et al., 2022).

Utilizamos o GEE para realizar os cálculos do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para a extração de variáveis temporais associados aos eventos de queimadas, onde foi utilizada a coleção de dados Landsat 8 *Surface Reflectance Tier 1*. Esses dados são corrigidos atmosféricamente usando o algoritmo LaSRC (USGS, 2020) e incluem uma máscara de nuvem, sombra, água e neve aplicadas por meio do algoritmo CFMASK (www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/cfmask-algorithm), bem como uma máscara de saturação por pixel. O NDVI pode ser descrito como a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas no infravermelho próximo e no vermelho e pela soma dessas mesmas reflectâncias (ROUSE et al., 1973). É um indicador sensível da quantidade e condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1, no qual, quanto mais próximo de 1, maior a presença de vegetação fotossinteticamente ativa, ou seja, plantas verdes e saudáveis, com alta concentração de clorofila. A Figura 3 apresenta um fluxograma detalhado dos procedimentos metodológicos:

Figura 3 - Fluxograma metodológico.



*NDVI máximo e NDVI mínimo (valores máximo e mínimo de NDVI); NDVI-I (média anual); RREL (Intervalo relativo anual = NDVI máximo - NDVI mínimo); MMAX e MMIN (meses de valores máximo e mínimo)

Fonte: Os autores (2023).

O NDVI foi calculado e o mapeamento das áreas queimadas foi realizado a partir do índice *Normalized Burn Ratio* – NBR (KEY; BENSON, 2006). O mapeamento das áreas queimadas por meio do NBR foi desenvolvido a partir do cálculo da razão entre a diferença das reflectâncias das bandas no infravermelho-próximo e no infravermelho-médio a soma dessas mesmas reflectâncias.

Para a composição da série temporal dos índices NDVI e NBR foram utilizadas imagens adquiridas entre abril de 2013 e março de 2021. Foram retiradas as imagens que possuíam nuvens ou algum outro problema. A severidade da queimada (dNBR) foi analisada por meio da diferença entre o NBR antes e após a queimada, o qual permite compreender o gradiente de severidade, bem como a verificação do processo de regeneração ou degradação da biomassa e a classificação da severidade foi realizada segundo os valores propostos por Key e Benson (1999) (Tabela 1). A seleção das imagens para o cálculo do dNBR foi definida a partir da ocorrência do evento e seleção das imagens mais próximas, adquiridas antes e após o evento de queimada.

Para descrever os padrões da vegetação antes e após o evento de queimada, e entender como o fogo afeta a dinâmica de crescimento e produção de biomassa da vegetação, as variáveis dos perfis temporais (sazonais) de NDVI foram calculadas utilizando o software estatístico R: (i) média anual (NDVI-I), (ii) Intervalo relativo anual (RREL = NDVI máximo - NDVI mínimo / NDVI-I); (iii) valores máximo (MAX) e mínimo (MIN) de NDVI e (iv) meses de valores máximo (MMAX) e meses de valores mínimo (MMIN).

Tabela 1 – Classe de severidade das queimadas.

Área (Imagens analisadas)	NBR	Severidade (dNDBR)	Classe de severidade
A1 (98 imagens)	0,12 a -0,32	440	Moderada Alta
A2 (182 imagens)	0,071 a -0,312	383	Moderada Baixa
A3 (100 imagens)	-0,045 a -0,465	4203	Moderada Baixa
A4 (94 imagens)	-0,066 a -0,368	302	Moderada Baixa
A5 (86 imagens)	-0,064 a -0,556	492	Moderada Alta
A6 (87 imagens)	-0,069 a 0,428	359	Moderada Alta
A7 (90 imagens)	-0,109 a -0,369	260	Baixa

Fonte: Adaptado de Key e Benson (1999).

Esses indicadores descrevem de forma direta à altura e forma do perfil sazonal do índice de vegetação e capturam características importantes do funcionamento do ecossistema (PETTORELLI et al., 2005). O NDVI-I foi utilizado para estimar a produção primária líquida, servindo como indicador da variabilidade da produção anual de biomassa da vegetação; o RREL (amplitude anual normalizada pela média anual) forneceu um indicador da sazonalidade da atividade fotossintética, ou seja, foi um descritor de como é diferente a absorção de carbono entre diferentes épocas. As variáveis MAX e MIN forneceram uma descrição adicional

da fenologia da vegetação, indicando períodos com atividade fotossintética máxima e mínima (LLOYD, 1990). Todas as variáveis foram analisadas para os 7 locais no intuito de observar relações entre fitofisionomias, variações meteorológicas e nível de severidade das queimadas.

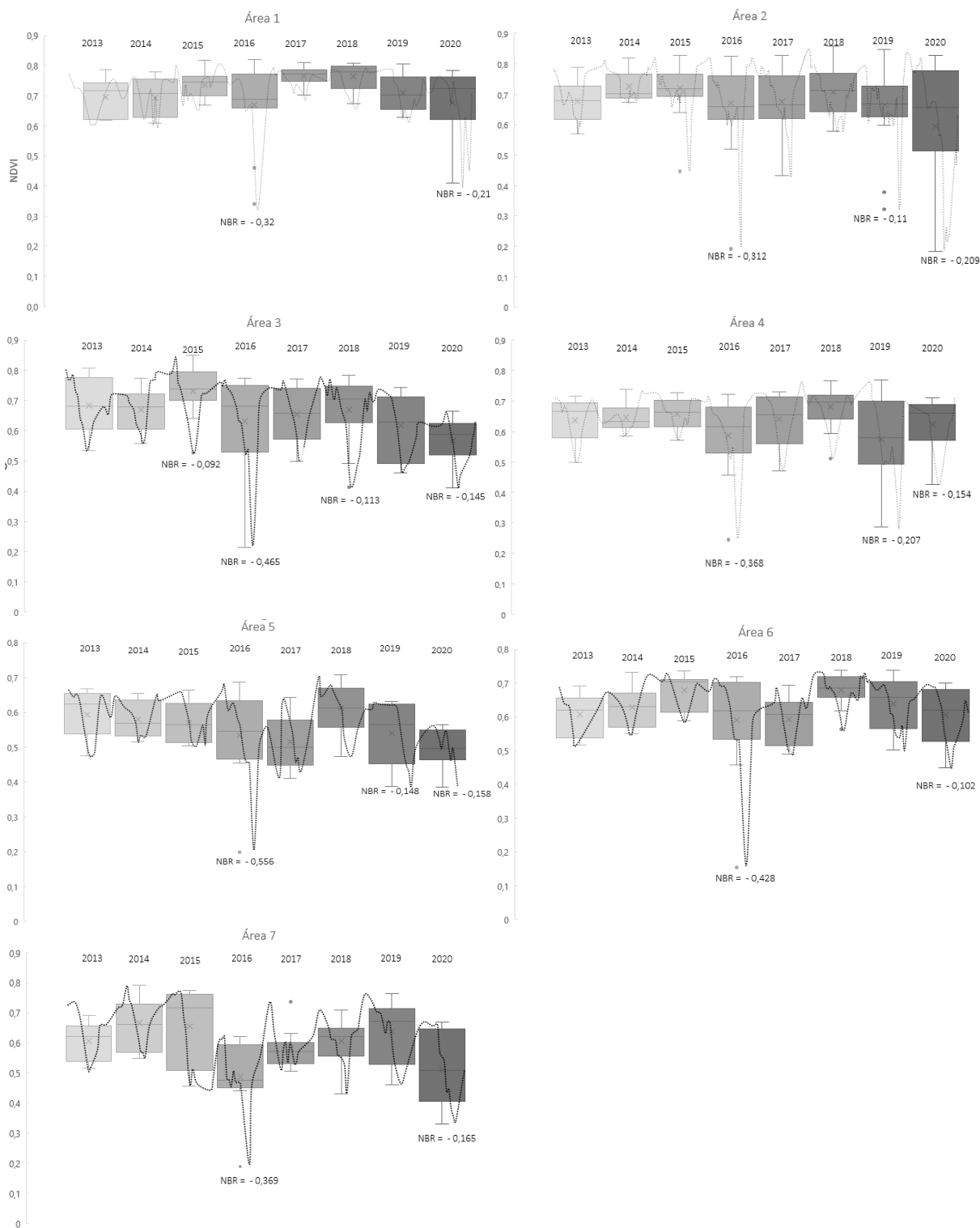
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de vegetação, por possuírem relação direta com a produção de biomassa, mudam ao longo do tempo influenciados pela fenologia e desenvolvimento da cultura (ANTUNES; LAMPARELLI; RODRIGUES, 2015), disponibilidade hídrica e nutricional do solo, além das condições climáticas (MONDAL, 2011). A série temporal de NDVI entre os anos de 2013 e 2020 das áreas analisadas nessa pesquisa estão apresentadas na Figura 4 para as 7 áreas analisadas, representativas do bioma pantanal.

Nessa figura, os gráficos *boxplot* demonstram a média anual pelo *boxplot* (média, desvio padrão e outliers), além da variação temporal do NDVI entre os anos de 2013 e 2020. Em grande parte dos perfis observa-se o aumento dos valores de NDVI no início do período chuvoso (outubro a março), que corresponde ao início do crescimento da vegetação. O NDVI atinge então o pico (alta produção de biomassa), estabelece um platô (que corresponde ao período de alta atividade fotossintética) e, finalmente, diminui com a chegada da estação seca (abril a setembro), em que a vegetação entra em estado de senescência, como também foi verificado por Pettorelli et al. (2005).

No período em que ocorreram as queimadas mais severas, isto é, em setembro de 2016 e setembro de 2020 (19/20), o NDVI em todas as áreas atingiu seu valor mínimo (Figura 4), devido ao decréscimo ou extinção da vegetação. Nessa figura destaca-se também o valor de NBR nos eventos de queimadas para as áreas analisadas. No entanto, no período posterior a queima, todas retornaram para valores de NDVI máximo semelhantes aos encontrados no ano anterior a queimada. Importante destacar que para as áreas 2, 3, 4 e 5, mais de um evento de queimada foi registrado para os anos de 2019/2020, conforme exemplifica os valores de NBR destacados na figura. Segundo Moraes et al. (2017), cerca de 60% das queimadas no bioma pantanal ocorrem nos meses de agosto e setembro, semelhante ao que ocorre no cerrado brasileiro.

Figura 4 – Média anual (boxplot) e variação (2013 a 2020) dos valores de NDVI (Eixo Y) para as áreas analisadas.



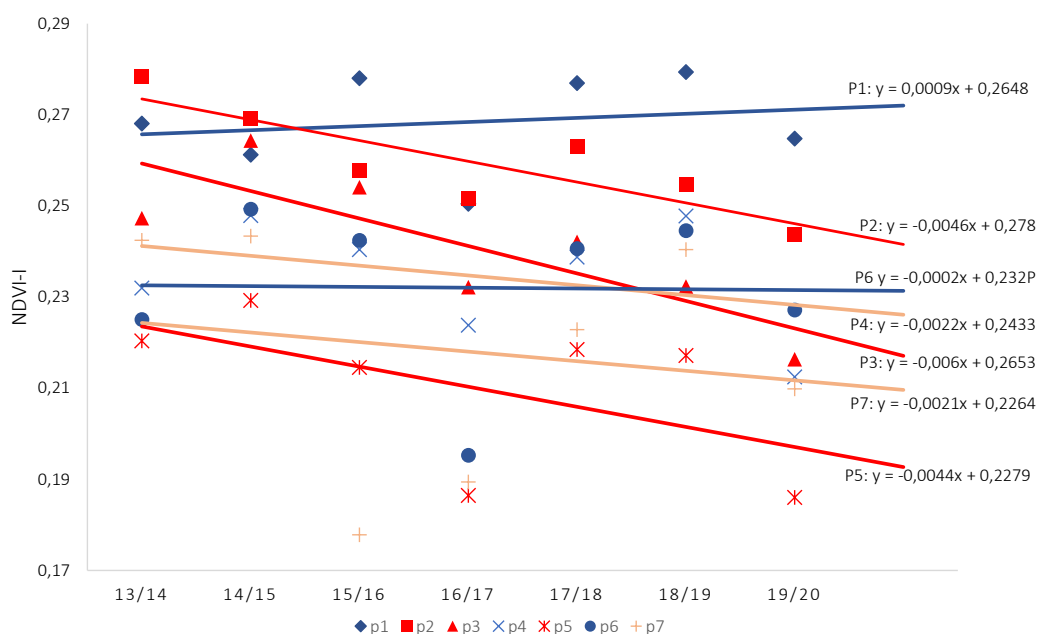
Fonte: Os autores (2022).

Os eventos de queimadas apresentam-se em grande maioria como outliers. Observando os valores do NBR dessas áreas, nota-se que as áreas 4, 6 e 7 possuem menores valores de NBR, ou seja, maior supressão da vegetação pela ação do fogo. Estas áreas estão em locais com menores índices pluviométricos, o que contribui com valores mais baixos de biomassa nas épocas secas do ano, uma vez que estas áreas apresentam um déficit hídrico mais elevado e, conseqüentemente, levam a vegetação a um estresse fisiológico severo. Por meio dos resultados do processamento dos dados, foi possível determinar a severidade da queimada (dNBR) (Tabela 1) segundo os valores propostos por Key e Benson (1999). As áreas que apresentaram maior severidade após a queima foram as 1, 5 e 6. Observa-se que, embora a área 1 esteja em uma condição com maior índice pluviométrico e maior quantidade de biomassa, o grau de severidade foi relativamente maior (severidade

moderada alta), o que pode ser explicado pela maior quantidade de matéria seca para combustão em virtude da maior produção de biomassa desta vegetação. Segundo Teodoro e Amaral (2019) também existem vários outros fatores além da vegetação, como agentes causadores das queimadas, podendo se destacar a topografia, fragmentação da paisagem e atividades de manejo do fogo.

O NDVI-I é um parâmetro utilizado para estimativa da produção primária líquida da vegetação, servindo também como um indicador da variabilidade da produção anual de biomassa e como indicadores importantes do funcionamento dos ecossistemas (ALCARAZ; PARUELO; CABELLO, 2006). Sendo assim, de acordo com a Figura 5, os valores mínimos para NDVI-I foram entre os anos de 2016 e 2017. No entanto, recebe destaque também o intervalo anual de 2019/2020 onde também ocorreu uma representativa diminuição da produção anual de biomassa da vegetação como consequência da queimada. De acordo com os dados apresentados, com exceção das áreas 1 e 6, é possível verificar uma tendência de diminuição da produção primária líquida da vegetação (NDVI-I) para todas as outras áreas analisadas.

Figura 5 – Média anual de produção primária líquida da vegetação (NDVI-I) (Eixo Y) ao longo dos anos de 2013 a 2020. Os pontos representam os valores absolutos de NDVI-I.

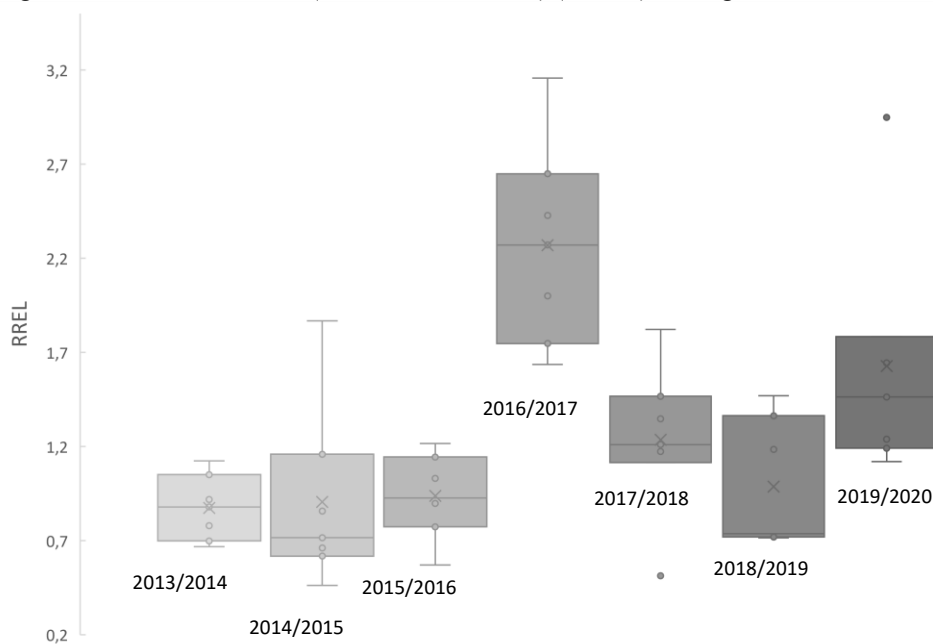


Fonte: Os autores (2022).

Observa-se também na Figura 5 forte tendência de diminuição para as áreas 2, 3 e 5 e discreta para as áreas 4 e 7, corroborados pelo valor de β_0 negativos na equação de regressão (Figura 5), sendo β_0 = intercepto; isto é, valor de Y quando X é zero. Esse fato, que é interpretado como uma perda de produção de biomassa, provavelmente está relacionado a localização dessas regiões com maior déficit hídrico, o que acaba tornando a regeneração da vegetação natural mais demorada. Percebe-se também que nestas áreas, onde a chuva é mais escassa, a produção de biomassa ao longo do ano tende a ser menor. Essa queda na produção primária líquida também pode ser atribuída à recorrentes eventos de queimada, o que acarreta uma depauperação da vegetação nativa e dificulta sua regeneração. Ainda é preciso destacar que os pontos 2, 3, 4 e 5 são expressivos para regiões que sofreram com queimadas subsequentes, o que pode retardar o efeito de regeneração das fitofisionomias. Segundo da Silva et al. (2023), o manejo inadequado de áreas que sofreram severidade alta de queimada, pode provocar impactos negativos no local, o que pode retardar a regeneração da área. Contudo, para confirmação das tendências observadas nos gráficos dessa figura, testes estatísticos de significância devem ser realizados em estudos complementares.

O RREL mede as diferenças de crescimento da vegetação ao longo do ano. Observa-se na Figura 6 que os anos em que houve as maiores amplitudes (2016/2017 e 2019/2020) entre os valores de NDVI máximo e mínimo (épocas de queimada), foi onde se observou os maiores valores de RREL (Max - Min / NDVI-I).

Figura 6 – Valores de RREL (Máx - Mín / NDVI-I) (Eixo Y) ao longo dos anos de 2013 a 2020.



Fonte: Os autores (2022).

Os valores de RREL demonstram claramente o efeito da sazonalidade do evento de seca e queimada nos anos 16/17 e 19/20, períodos em que a diferença entre os valores de NDVI máximo e NDVI mínimo foram mais acentuados, ou seja, anos com grande variação no estoque de biomassa dessas áreas.

Apesar dos resultados mostrarem uma tendência de recuperação das fitofisionomias no Pantanal é importante que o estudo seja ampliado considerando outras questões importantes. Mallinis et al. (2018) descreve que o Sentinel 2A apresentou melhor resultados na avaliação da severidade de queimadas para o mapeamento de pinheiros mediterrâneos em função da disponibilidade de informações espectrais na região da borda do vermelho. Ainda, há estudos que relatam sobre o poder de regeneração florestal de cada bioma. Assim é importante considerar em estudos futuros ocorrências frequentes de queimadas com análise de tendência na recuperação. Collins et al. (2020) utilizou ferramentas por técnicas de aprendizagem de máquina para mapear focos de queimadas e avaliar a severidade. Em ambos os casos o aumento da potencialidade na automatização ainda depende de novos estudos e desenvolvimento de modelos consistentes.

Escuin et al. (2008) também aponta que os resultados correspondentes aos pixels afetados pelo incêndio mostram que o NBR é muito mais sensível que o NDVI às mudanças espectrais produzidas, portanto, recomenda-se que além o NBR também seja utilizado para o cálculo das séries temporais na tentativa de observar tendências de mudanças do estágio vegetativo no processo de recuperação das queimadas.

4 CONCLUSÕES

Como os IVs se correlacionam diretamente com a produtividade da vegetação, a partir deste estudo foi possível analisar o efeito da queimada sobre a dinâmica de crescimento da vegetação. Com relação a dinâmica de regeneração da vegetação pós-queimada, nas 7 áreas escolhidas para análise temporal, o valor mínimo de NDVI foi atingido no período em que ocorreram as queimadas, em setembro de 2016 e setembro de 2020 (19/20). No entanto, em todas as áreas, a vegetação se recompôs de modo que os valores de NDVI retornaram a valores semelhantes aos encontrados no ano anterior à queima. Contudo, é importante ressaltar que análises adicionais precisam ser realizadas para corroborar os resultados alcançados nessa pesquisa, tais como identificar áreas com maior ocorrência de queimadas, haja vista que o trabalho se pautou em áreas queimadas em dois eventos, no máximo três eventos subsequentes. Ainda também orienta-se obter dados em diferentes fitofisionomias ou com padrões de cobertura diferenciados. Ainda, trabalhos de campo são necessários no intuito de avaliar, questões relacionadas a manutenção da biodiversidade local.

A relação do índice NBR antes da queimada e após o evento, permite compreender o grau de

severidade das queimadas, assim como verificar o processo de rebrota. As áreas que apresentaram maior severidade após a queima (Severidade Moderada Alta) foram as 1, 5 e 6, que mostraram relação com déficit hídrico ou presença de formação campestre e savânica, ou seja, vegetal campestre com estrato arbóreo descontínuo.

A pluviosidade do local foi determinante para definir o efeito da queimada e da produção de biomassa, sendo que as áreas em locais com maior pluviosidade representaram as regiões com maiores valores de NDVI após o evento de queimada.

No que diz respeito à produção primária líquida da vegetação (NDVI-I), com exceção da área 1, verificou-se uma tendência de diminuição do NDVI-I para todas as outras áreas estudadas. Observou-se uma forte tendência de diminuição para as áreas 2, 3 e 5 e uma discreta tendência de decréscimo para as áreas 4, 6 e 7. Com relação ao RREL, os resultados demonstraram e reforçaram o maior efeito dos eventos de seca e queimada nos anos 16/17 e 19/20, no qual nota-se as maiores amplitudes entre os valores de NDVI máximo e mínimo e, conseqüentemente, maiores valores de RREL. Dessa forma, os índices utilizados se mostraram eficientes na identificação das áreas queimadas e na classificação do potencial de regeneração destas áreas. Ainda, recomenda-se estudos complementares com a utilização de imagens Sentinel 2A, pelo fato de estudos apontarem resultados relevantes na avaliação da severidade em função da disponibilidade de informações espectrais na região da borda do vermelho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do Instituto de Geociências pelo apoio e contribuição no desenvolvimento dessa pesquisa.

Contribuição dos Autores

As contribuições dos autores no desenvolvimento deste trabalho são: conceptualização, análise formal, supervisão, redação - revisão e edição, T. A. e R. E. C.; curadoria dos dados, investigação, redação – minuta inicial, F. C. M., D. V. P. F. e P. L. G. de O.; visualização e redação – revisão e edição, J. C. M.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

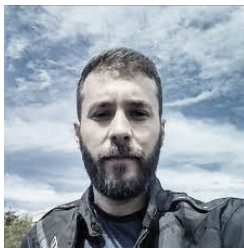
Referências

- ALCARAZ, D.; PARUELO, J.; CABELLO, J. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. **Global Ecology and Biogeography**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 200–212, 2006. DOI: 10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x.
- ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Assessing of the sugarcane cultivation dynamics in São Paulo state by MODIS data temporal profiles. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1127–1136, 2015.
- BAR, S.; PARIDA, B. R.; PANDEY, A.C. Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S. l.], v. 18, p. 100324, 2020.
- COLLINS, L.; MCCARTHY, G.; MELLOR, A.; NEWELL, G.; SMITH, L. Training data requirements for fire severity mapping using Landsat imagery and random forest. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 245, p. 111839, 2020.
- CROWLEY, M. A.; CARDILLE, J. A.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A. Multi-sensor, multi-scale, Bayesian data synthesis for mapping within-year wildfire progression. **Remote sensing letters**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 302–311, 2019.

- CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; GERARD, F.; BALZTER, H.; RIAÑO, D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 561–577, 2009. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x.
- DA SILVA, A. B. N.; BELTRÃO, N. E. S.; SANTOS, L. B. Utilizando imagens Sentinel-2 e índices espectrais para análise de severidade em áreas queimadas de origem antrópica: um estudo no sudeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 01, p. 489-504, 2023.
- EMADIZADEH, A.; AZIZI, Z. Detection and Diagnosis of Fire Areas in Golestan Forests Using Landsat Satellite Images. **Journal of Radar and Optical Remote Sensing**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 7–20, 2020.
- ESCUIN, S. NAVARRO, S.; FERNÁNDEZ P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images, **International Journal of Remote Sensing**, 29:4, 1053-1073, 2008. DOI: 10.1080/01431160701281072
- GARCÍA-LLAMAS, P.; SUÁREZ-SEOANE, S.; FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J. M.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C.; TABOADA, A.; MARCOS, E; CALVO, L. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 80, 137-144, 2019.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 202, p. 18–27, 2017.
- GUIMARÃES, A. M. B. M. **Estudo da dinâmica da vegetação após incêndio. O caso do Parque Natural de Sintra-Cascais após grande incêndio de agosto de 2000**. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. Poster abstract/Eds. LF Neuenschwander, KC Ryan. In: PROC. JOINT FIRE SCIENCE CONF. AND WORKSHOP. V. II. BOISE, 15-17 JUNE 1999, **Anais...** [s.l: s.n.] p. 284.
- LE PAGE, M.; ZRIBI, M. Analysis and predictability of drought in Northwest Africa using optical and microwave satellite remote sensing products. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1466, 2019.
- LI, X.; SONG, K.; LIU, G. Wetland Fire Scar Monitoring and Its Response to Changes of the Pantanal Wetland. **Sensors**, [S. l.], v. 20, n. 15, p. 4268, 2020. DOI: 10.3390/s20154268.
- LLOYD, D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 11, n. 12, p. 2269–2279, 1990. DOI: 10.1080/01431169008955174.
- MALLINIS, G.; MITSOPOULOS, I.; CHRYSAFI, I. Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. **GIScience & Remote Sensing**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 1–18, 2018.
- MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., CUARTAS, L. A., LEAL, K. R. D., BROEDEL, E., SELUCHI, M. E., MICHELIN, M.; BAIÃO, C. F. P.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCKZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, 3, v. 3, p. 13, 2021.
- MONDAL, P. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 918–924, 2011.
- MORAES, E. C.; MATAVELI, G. A.; SANTOS, P. R.; OLIVEIRA, B. S. Estudo da dinâmica de queimada no bioma Pantanal no período de 2002 a 2015. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto. Santos (SP). **Anais...**, [S. l.], v. 18, 2017, p. 3423–3430, 2017.
- NOVAIS, M. DA S., LATORRACA, E. D. B., DE CAMPOS, A. C. B. R., DA CRUZ TEIXEIRA, N., DE ALMEIDA, G. A. G.; MARCILIO, N. D. S. A. DA SILVA NOVAIS, Mariane et al. Análise de severidade de áreas queimadas no município de Poconé–MT. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e6311527882-e6311527882, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27882>

- PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J. M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology & Evolution**, [S. l.], v. 20, n. 9, p. 503–510, 2005. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In*: Third ERTS Symposium, Washington, DC, **Proceedings...**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1973.
- SEGER, C. D.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; GIONGO ALVES, M. V.; SOARES, R. V.; BIONDI, D. Incremento da biomassa aérea da vegetação dos campos naturais do Pparaná em período pós-queima. **FLORESTA**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 93, 2016. DOI: 10.5380/rf.v46i1.43381.
- SORIANO, B. M. A.; NARCISO, M. G. Sistema de alerta de risco de incêndio para o Pantanal. **Embrapa Pantanal-Capítulo em livro científico (ALICE)**, [S. l.], 2020.
- TEODORO, A.; AMARAL, A. A statistical and spatial analysis of Portuguese forest fires in summer 2016 considering Landsat 8 and Sentinel 2A data. **Environments**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 36, 2019.
- TORRES, J.; GONÇALVES, J.; BRUNO, M.; JOÃO, H. Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 89, p. 199–212, 2018.
- USGS. **Landsat 8 Collection 1 Land Surface Reflectance Code Product Guide**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-collection-1-land-surface-reflectance-code-product-guide>. Acesso em: 2020.
- VIANA, D. R.; ALVALÁ, R. C dos S. Vegetation index performance for the pantanal region during both dry and rainy seasons. **Geografia**, v. 36, p. 143-158, 2011.

Biografia do autor principal



Felipe Cardoso de Oliveira Maia é formado em Agronomia pela Universidade de Brasília (2016) e possui mestrado no programa de pós-graduação em Agronomia da Universidade de Brasília (2019). Desenvolve pesquisa com ênfase em irrigação, relação água-solo-planta e geoprocessamento aplicados à cana-de-açúcar.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.