

**RELAÇÕES ENTRE INCIDÊNCIA DE QUEIMADAS E A DINÂMICA DA VEGETAÇÃO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO - BRASIL: UMA ABORDAGEM A PARTIR DE MÉTRICAS FENOLÓGICAS DERIVADAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

**RELATIONSHIP BETWEEN FIRE AND VEGETATION DYNAMICS IN CHAPADA DAS MESAS NATIONAL PARK, MARANHÃO - BRAZIL: AN APPROACH FROM PHENOLOGICAL METRICS DERIVED FROM REMOTE SENSING**

**RELACIONES ENTRE INCIDENCIA DE INCENDIOS Y DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO - BRASIL: UNO ENFOQUE UTILIZANDO MÉTRICAS FENOLÓGICAS DERIVADAS DE LA TELEDETECCIÓN**

**Izadora S. De Carvalho**

Mestre em Agricultura e Ambiente, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís – MA, e-mail: izadorasccs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4117-5101>

**Klinsmann Augusto Lavra Barros**

Bacharel em Geografia, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís – MA, e-mail: kbb Barros54@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5244-8777>

**Daniel Borini Alves**

Doutor em Geografia, Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA), Sobral – CE, e-mail: daniel.borini@uvanet.br, <https://orcid.org/0000-0001-6658-7017>

**Tiago Massi Ferraz**

Doutor em Fisiologia Vegetal, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís – MA, e-mail: ferraztm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9840-3523>

**Swanni T. Alvarado**

Doutora em Science de la Vie, Universidad de Colombia (UNAL), Bogotá – Colômbia, e-mail: swanni\_ta@yahoo.es, <https://orcid.org/0000-0002-6416-0076>

**RESUMO:** O Cerrado é um dos principais biomas brasileiros, sendo considerado como um dos mais importantes hotspots de biodiversidade do planeta. Ainda que o fogo assuma um papel muito importante no funcionamento destes ecossistemas, as alterações antrópicas recentes nos regimes naturais de queima representam uma ameaça significativa para sua conservação. Este estudo busca determinar os efeitos das queimadas nas diferentes fitofisionomias do Cerrado, utilizando dados da série histórica do NDVI derivados do MODIS no período de 2000 e 2018, na região do Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM). Inicialmente foi gerada uma classificação das fitofisionomias vegetais da área por meio da análise de imagens de alta resolução espacial (Dove PlanetScope), utilizando o algoritmo random forest. O histórico de fogo (entre 2000-2018) da área foi obtido com base na série temporal de imagens Landsat. As imagens NDVI foram processadas no programa TIMESAT, gerando métricas relacionadas ao ciclo fenológico da vegetação (data de início, pico, final do período de crescimento, duração e máxima produtividade do ciclo). Identificou-se que as queimadas têm impacto nos ciclos fenológicos da vegetação, alterando as datas de início e fim do ciclo, níveis máximos de NDVI da vegetação. Os resultados ressaltam o potencial de uso de dados de sensores remotos para usar a fenologia vegetativa das plantas como um indicador para avaliar os efeitos do fogo na dinâmica da vegetação, gerando informações que podem contribuir para uma melhor gestão e monitoramento de queimadas do PNCM, sendo uma das riquezas do bioma cerrado existentes no Estado do Maranhão.

**Palavras-chave:** Cerrado; Fogo; NDVI; TIMESAT; Fenologia vegetativa.

**ABSTRACT:** The Cerrado is one of the main Brazilian biomes, considered as one of the most important biodiversity hotspots on the planet. Although fire plays a very important role in the functioning of this ecosystem, the recent state of strong anthropic changes in natural fire regimes are a significant threat to its conservation. In this context, this article aims to monitor the historical time series of the NDVI between the years 2000 and 2018 in the region of the Chapada das Mesas National Park (PNCM). Thus, first, a classification of the Cerrado plant physiognomies in the area was generated based on a mosaic of high spatial resolution images (Dove PlanetScope), using the random forest algorithm, while the fire history (between 2000-2018) of the area was obtained based on time series dataset of Landsat images. In a second time, smoothed NDVI time series images from MODIS sensor were processed with TIMESAT software, where metrics related to the phenological cycle of vegetation (beginning, peak and end of vegetation growth cycle, its duration and maximal productivity) were derived. We found that the increase or decrease in fire occurrence promotes a change in the phenological cycles of the vegetation, changing the beginning and end dates of the vegetation growing cycle, as well as the maximum levels of NDVI. Our results highlight the potential for using remote sensor data to use the vegetative phenology as an indicator to assess the effects of fire on vegetation dynamics, generating information that can contribute to a better management and monitoring of fires in the PNCM, since this is one of the greatest riches ecosystems of the cerrado biome in the State of Maranhão.

**Keywords:** Cerrado; Fire; NDVI; TIMESAT; Vegetative phenology.

**RESUMEN:** El Cerrado es uno de los principales biomas de Brasil, y es considerado uno de los hotspots de biodiversidad más importantes del planeta. Aunque el fuego desempeña un papel muy importante en el funcionamiento de este tipo de ecosistemas, las recientes alteraciones antropogénicas de los regímenes naturales de quema representan una amenaza significativa para su conservación. Este estudio busca determinar los efectos de los incendios sobre las diferentes fitofisiognomías del Cerrado, utilizando datos de series temporales de NDVI derivados de MODIS desde 2000 hasta 2018 en la región del Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM). Inicialmente, se generó una clasificación de las fitofisionomías vegetales de la región mediante el análisis de imágenes de alta resolución espacial (Dove PlanetScope), utilizando el algoritmo random forest. El histórico de incendios (entre 2000 y 2018) de la región se obtuvo a partir de un banco de datos de series temporales de imágenes Landsat. Las imágenes NDVI se procesaron en el programa TIMESAT, generando métricas relacionadas con el ciclo fenológico de la vegetación (fecha de inicio, pico, final del periodo de crecimiento, duración y productividad máxima del ciclo) Se ha constatado que los incendios influyen en los ciclos fenológicos de la vegetación, alterando las fechas de inicio y fin del ciclo y los niveles máximos de NDVI de la vegetación. Los resultados destacan el potencial del uso de datos de la fenología vegetativa derivados de datos de teledetección como indicadores para evaluar los efectos del fuego en la dinámica de la vegetación, generando informaciones que pueden contribuir a una mejor gestión y monitoreo de los incendios en el PNCM, una de las riquezas del bioma cerrado en el Estado de Maranhão.

**Palabras clave:** Cerrado; Fuego; NDVI; TIMESAT; Fenología vegetativa.

## 1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é um dos principais biomas brasileiros, tendo à sua frente apenas o Bioma amazônico e, atualmente, é considerado como um dos principais *hotspots* de biodiversidade mundial (MYERS et al., 2000). Isto se justifica por conta de sua grande diversidade de espécies animais e vegetais, além de possuir muitas espécies consideradas endêmicas a nível local e regional, as quais, muitas delas se encontram ameaçadas de extinção.

Sendo o segundo maior bioma brasileiro no que diz respeito à sua área, ocupando aproximadamente 25% do território do país, o Cerrado ainda não recebe a atenção necessária por parte dos programas governamentais que visam a conservação ambiental, possuindo apenas 7,5% do seu total coberto por áreas protegidas que contrasta com os 46% de áreas protegidas verificada no bioma amazônico (STRASSBURG et al., 2017). Neste contexto, o bioma se encontra constantemente afetado por inúmeras atividades que geram grandes alterações em sua fisionomia, destacando-se, em sua maioria, as práticas de agricultura e pecuária (KLINK; MOREIRA, 2002; ARAÚJO et al., 2019).

Neste processo histórico de alterações da cobertura vegetal natural do Cerrado, o fogo tem sido amplamente utilizado pelo homem como ferramenta agropastoril. No entanto, as ocorrências de fogo neste bioma também podem estar ligadas a causas naturais, como a ocorrência de raios (RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000). As alterações dos regimes naturais de fogo, associadas a fenômenos de mudanças climáticas recentes, tendem a aumentar a susceptibilidade local à ocorrência destes eventos. Isto se torna possível uma vez que estes fatores são capazes de ocasionar alterações nos níveis de umidade e distribuição da vegetação, o que facilita o início e o rápido processo de propagação do fogo (KLINK; MACHADO, 2005; DURIGAN; RATTER, 2016).

Neste sentido, o fenômeno das queimadas se caracteriza como o processo de combustão da vegetação através do fogo, seja ela de maneira natural ou antrópica, citando, como exemplo, a prática agropastoril, que por meio da aplicação de fogo de maneira controlada, busca facilitar os trabalhos de agricultura e renovação de pastagens (SILVA, 2019). Já os incêndios se caracterizam pela ocorrência de fogo sem controle que incidem sobre qualquer forma de vegetação, com possibilidades de serem causados por meio de fatores antrópicos (ação humana, seja ela intencional ou negligenciada), ou causas naturais, por exemplo, uma maior incidência de raios (SCHUMACHER; SETZER, 2021). A presença do fogo no Cerrado é um fator determinante para a estrutura das diferentes fisionomias da vegetação (RIBEIRO; WALTER, 2008). Além disso, o fogo é capaz de influenciar na composição da diversidade de vários ecossistemas, uma vez que este afeta a fenologia, densidade, abundância, morfologia vegetal e distribuição das populações de plantas de determinado ambiente (RIBEIRO; WALTER, 2008; DROBYSHEV et al., 2008).

Porém, embora o Cerrado e outras fisionomias campestres sejam ecossistemas que evoluíram com o fogo e respondam a esta perturbação com alta capacidade de resiliência e recuperação, a forte alteração deste regime, gerada por atividades humanas ou por causas naturais, pode causar perda do controle sobre estes eventos, se tornando umas das maiores causas de ocorrências de incêndios extremos ou mais frequentes e uma das ameaças mais significativas para o bioma (SILVA et al., 2021; DURIGAN; SIQUEIRA; FRANCO, 2007). Desta maneira é necessário o desenvolvimento de pesquisas que abordem o estudo da dinâmica da vegetação após a ocorrência de fogo, principalmente em fisionomias do Cerrado, desenvolvendo ferramentas para facilitar a gestão e preservação das comunidades que o compõem por meio dos órgãos gestores.

Com isso, o estudo da dinâmica dos regimes de fogo e da resposta das comunidades vegetais a esta dinâmica torna-se uma importante ferramenta para melhor auxiliar e propor métodos de gestão e avaliar estratégias de conservação e restauração em paisagens susceptíveis à ocorrência de fogo. Considerando este cenário, através de técnicas de geoprocessamento e do sensoriamento remoto, além de facilitar e acelerar o processamento de dados, é possível realizar

o refinamento de dados, análise e tomadas de decisão diante o objeto de estudo (DWYER et al., 2000; ALVES; ALVARADO, 2019). Em relação ao uso das técnicas de sensoriamento remoto na análise ambiental, o uso de geotecnologias estão se tornando um recurso eficaz e importante na identificação de ocorrência de queimadas. Além de identificar, estas técnicas possibilitam quantificar e realizar estudos de análises espaço-temporais das áreas onde o fogo ocorre a escala local ou regional (ALVARADO et al., 2017; MATAVELI et al., 2018).

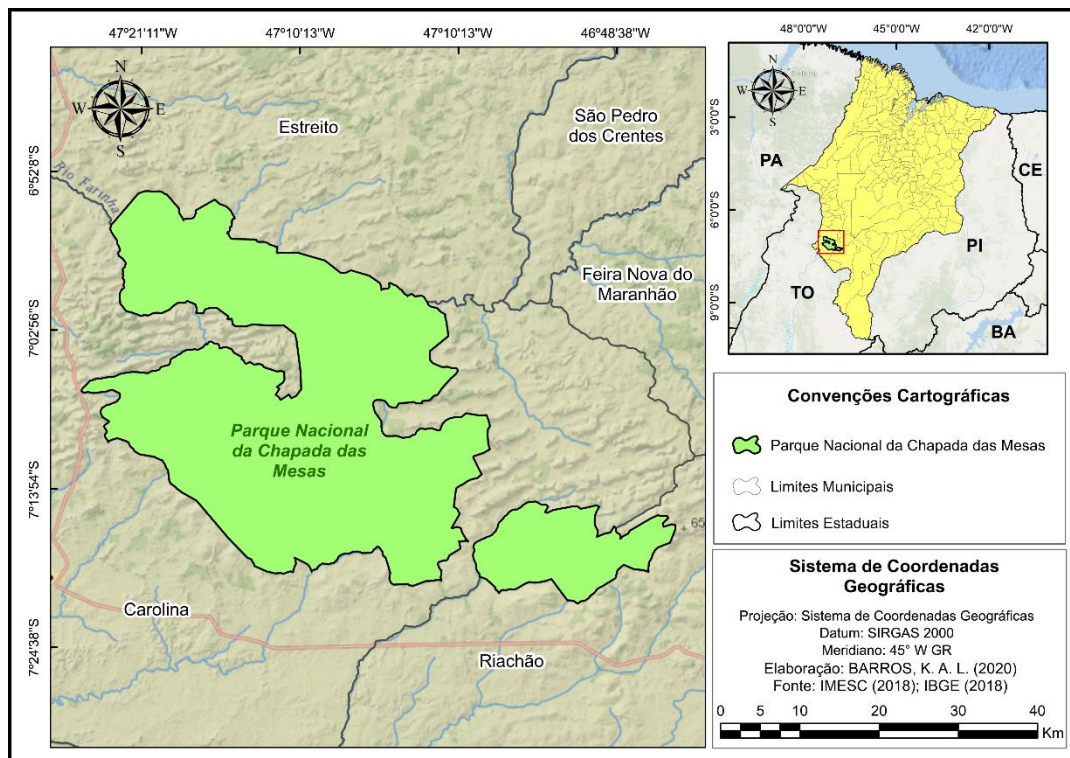
Portanto, busca-se proporcionar um embasamento metodológico e científico capaz de monitorar áreas com ocorrências de queimadas, além de auxiliar na detecção de áreas com risco de queimadas, que, se atingidas, podem afetar em curto ou longo prazo a resiliência e a recuperação da caracterização do ciclo fenológico dos seus componentes vegetais. O local de estudo foi o Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM), um reduto de conservação de fitofisionomias de Cerrado situado no setor meridional do Estado do Maranhão. O objetivo foi caracterizar a dinâmica da vegetação e suas relações com o histórico de ocorrência de fogo, mediante uma abordagem baseada em métricas fenológicas derivadas de dados de sensoriamento remoto.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

Criado no dia 12 de dezembro de 2005 por meio de decreto federal, o Parque Nacional Chapada das Mesas - PNCM (Figura 1), encontra-se localizado no Centro-sul do estado do Maranhão, entre os municípios de Carolina, Estreito e Riachão, possuindo área total de 160.046 hectares (ICMBio, 2019). A Unidade de Conservação (UC) e a região em geral estão compostas por um relevo de morros e chapadas, e estão inseridas na atual rota de expansão da fronteira agrícola brasileira, em área de predominância do bioma Cerrado, em transição para o bioma amazônico. Com isso, sua área passa por várias transformações trazidas principalmente pela implantação do agronegócio, que com a chegada dos meios de produção mais modernos, acaba gerando inúmeros impactos ao ambiente local, aumentando o desmatamento e as práticas de queimadas (MARQUES; AMORIM, 2014).

A Unidade foi criada com o intuito de promover a manutenção da biodiversidade da região, também por conta da intenção de empreendedores em construir hidrelétricas que ocupariam regiões próximas, o que causaria impactos graves ao ambiente local. O PNCM está sob gestão do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e pelo Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio). Estes órgãos efetuam ações com o objetivo de assegurar a conservação natural e conscientizar a população, por meio da promoção de diálogos que estimulem a participação de todos para conservação do parque (LIMA et al., 2007; ICMBio, 2019).



**Figura 1** – Localização do Parque Nacional da Chapada das Mesas no estado do Maranhão. Fonte: Elaborado pelos autores.

## 2.2. Contexto geoambiental

O Parque encontra-se inserido na bacia sedimentar do Parnaíba, se caracteriza como uma bacia intracratônica, com uma idade paleozóica, possuindo um substrato litológico com uma sequência de rochas sedimentares e vulcânicas (MARTINS; SALGADO; BARRETO, 2017). Além disso, a bacia do Parnaíba possui um substrato arenítico que corresponde às formações areníticas paleozóicas: Itapecuru, Corda, Grajaú, Sambaíba, Motuca e Pedra de Fogo, bem como basaltos detrito-lateríticos da Formação Mosquito, no entanto a unidade de conservação apresenta predominância de afloramentos relacionados à formação geológica Sambaíba (MARTINS; SALGADO; BARRETO, 2017).

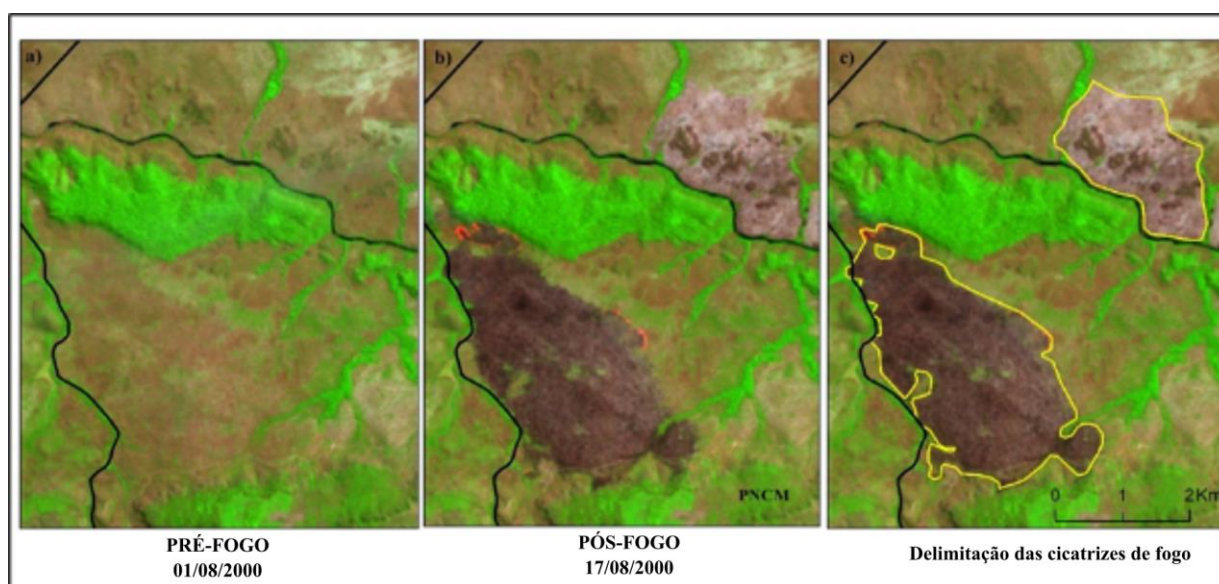
Quanto à geomorfologia local, percebe-se relevo de predominância plano ondulado, que possui alguns declives acentuados, dentre os quais a maior parte dessa área é composta por chapadas que possuem altitude basal de 250 metros (LIMA et al., 2007). Também é possível perceber a presença de morros que possuem a composição de arenitos nos quais a modelagem é gerada pela ação dos ventos e das chuvas ao longo dos anos (LIMA et al., 2007). Além disso, os topos dos morros são planos, possuindo, assim, a forma de mesetas, o que dá significado a nomenclatura “Chapada das Mesas” (LIMA et al., 2007). As altitudes na região podem variar de 250m nas áreas de vales, podendo chegar a 524m em regiões de chapadas (LIMA et al., 2007).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região do PNCM é caracterizado como Tropical Úmido, possui duas estações bem definidas: verão seco, com duração de maio a outubro e inverno chuvoso, com duração de novembro a abril (LIMA et al., 2007). Tem ocorrências de temperaturas médias anuais se aproximando de 26,1°C, as mínimas variam de 25,2°C em janeiro, chegando a 27,8°C no mês de setembro (LIMA et al., 2007). Já as temperaturas máximas giram em torno dos 36°C nos meses mais quentes (julho e agosto) (LIMA et al., 2007). Quanto aos totais pluviométricos anuais, estes se encontram entre 1.250 e 1.500 mm (LIMA et al., 2007).

### 2.3. Obtenção e organização do mapeamento do histórico de fogo

Obteve-se e processou-se informações contidas na base de dados de áreas queimadas provenientes do trabalho realizado por De Carvalho et al., (2023), que realizaram a reconstrução espacial e temporal da ocorrência de fogo no PNCM entre os anos de 1990 e 2017. Esse trabalho foi desenvolvido por meio da utilização de imagens da Coleção *Landsat 5 Thematic Mapper (TM)*, *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)* e *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)*, com 30 metros de resolução espacial. Esta base de dados está disponível em <https://zenodo.org/records/10289082> (DE CARVALHO; ALVARADO; FERRAZ, 2023). Em relação ao período selecionado no âmbito deste trabalho (2000-2017), contou-se com a análise de um total de 377 imagens.

Para a delimitação das cicatrizes de queimadas, se considerou a sequência temporal das imagens (comparação progressiva de imagens pré e pós fogo) (Figura 2), onde foi realizado o processo de composição de imagens em falsa-cor, utilizando as bandas do infravermelho médio (SWIR – *Short-wave infrared*), infravermelho próximo (NIR – *Near Infrared*) e do vermelho (Red) (bandas 6, 5 e 4 do sensor OLI e bandas 5, 4 e 3 dos sensores TM e ETM, respectivamente). A partir daí, todas as cicatrizes foram identificadas visualmente e mapeadas manualmente, em escala 1:25.000, para todo o período avaliado. A partir deste, foi produzido o mapa de frequência de fogo para o período entre os anos definidos com base na álgebra de mapas (DE CARVALHO et al., 2023).



**Figura 2** – Exemplificação do mapeamento de uma cicatriz de área queimada na área do Parque nacional Chapada das Mesas com o comparativo de imagens pré (01/08/2000) (a) e pós-fogo (17/08/2000) (b). Imagens Landsat 5 na composição falsa-cor (SWIR-NIR-Red/R-G-B). A linhas amarela apresenta a delimitação da cicatriz de fogo. Fonte: Elaborado pelos autores.

### 2.4. Classificação de uso e cobertura da terra

Para esta parte do processamento, descrita parcialmente por De Carvalho et al., (2019), foram utilizadas imagens de alta resolução espacial da constelação *Dove PlanetScope*, operada pela empresa Planet, adquiridas nas estações seca (2017-08-27) e final da estação chuvosa (2018-05-06) por apresentar ausência de nuvens, onde 29 cenas foram utilizadas para compor o mosaico

da estação seca, e 35 da estação chuvosa. O uso de imagens das duas estações tem o objetivo de considerar os efeitos da sazonalidade climática sob a vegetação, característica típica do bioma Cerrado (MATAVELI et al., 2018). Estas imagens são multiespectrais e já corrigidas para efeitos atmosféricos, com 4 bandas (*Blue, Red, Green* e *NIR*) e 3.5 metros de resolução espacial. Além das imagens *PlanetScope*, a composição de imagens utilizada para classificação da vegetação foi composta pelo modelo digital de elevação (MDE) *Alos World 3D (AW3D30)* com resolução de 30 metros (TADONO et al., 2016), reamostrada para a mesma resolução da imagem *PlanetScope*.

Como etapa prévia a classificação, De Carvalho et al., (2019) realizaram a segmentação da imagem com o algoritmo de *Shepherd* (SHEPHERD; BUNTING; DYMOND, 2019), implementado na biblioteca *RSGISLib* (BUNTING et al., 2014; CLEWLEY et al., 2014). Os parâmetros utilizados para executar o algoritmo foram: número de *clusters*  $k = 10$ , número mínimo de *pixels* por objeto = 600, e o limiar de distância (*distance threshold*) foi desabilitado, usando os valores padrões para os demais parâmetros. Para determinar os valores ideais dos parâmetros diversos testes foram realizados até obter os agrupamentos mais homogêneos. A imagem utilizada para a segmentação foi composta por 8 bandas (4 da estação seca e 4 da estação chuvosa) para agregar o máximo de variações espectrais para a região classificada. O produto dessa etapa foi uma imagem segmentada com estatísticas (mínimo, máximo, soma média e desvio padrão) de todas as bandas das imagens associadas aos segmentos.

No processo de classificação foram estabelecidas 5 classes de vegetação: cerradão, cerrado denso, cerrado aberto, cerrado rupestre, mata de galeria (RIBEIRO; WALTER, 2008), além das classes de agricultura, pastagem e água. Devido às características observadas em campo e nas imagens, a classe cerradão foi dividida em “cerradão terras baixas” e “cerradão terras altas”, diferenciados pelo MDE, conforme apresentado na Tabela 1.

As amostras de treinamento e validação utilizadas foram selecionadas por fotos e coordenadas de campo, coletadas com GPSMAP 76CSx da *Garmin*, e por interpretação da imagem *PlanetScope* (DE CARVALHO et al., 2019). Para cada classe obteve-se um arquivo de treinamento no formato vetorial (*shapefile*), gerando um total de 791 amostras, distribuídas da seguinte forma: Água (n=179); Agricultura (n=50); Pastagem (n=45); Cerradão Terras Baixas (n=70); Cerradão Terras Altas (n=94); Cerrado Denso (n=65); Cerrado Aberto (n=75); Cerrado Rupestre (n=65); Mata de Galeria (n=148). Essas amostras foram divididas aleatoriamente em amostras de treinamento e validação, na proporção de 70%–30%. A coleta das amostras foi realizada utilizando o *software* QGIS (Versão 2.18.19).



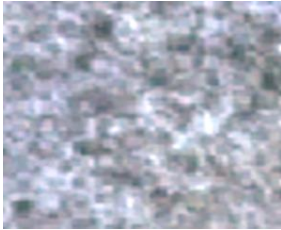


Na etapa de classificação da vegetação foi utilizado o algoritmo *Random Forest*, da biblioteca *Scikit-learn*, em conjunto com a biblioteca *RSGISLib* (CLEWLEY et al., 2014), ambos executados através de linguagem de programação em *Python* (DE CARVALHO et al., 2019). Todas as estatísticas das 8 bandas multiespectrais e do MDE foram utilizadas como variáveis de entrada para a classificação. Para obter os melhores parâmetros para o classificador foi executada uma otimização do tipo *GridSearch*, resultando no valor de 500 para o número de estimadores (árvores). O produto dessa etapa foi uma imagem classificada com as 9 classes das fitofisionomias do PNCM.

A validação da classificação foi realizada utilizando o R Versão 3.4.1 (R CORE TEAM, 2018) usando o pacote *rsacc – Accuracy Assessment for Remote Sensing Classification* (<https://github.com/EcoDyn/rsacc/>) versão 0.1.1. Antes de executar a validação no R, a imagem produto da classificação passou por filtragem (*Majority Filter*) no QGIS, para eliminar *pixels* isolados e classificados incorretamente (KIM et al., 1996).



Para avaliação da qualidade da classificação foram utilizados o índice *Kappa* e a precisão global, calculados a partir da matriz de confusão, além dos coeficientes de discordância quantitativa e de alocação propostos por Pontius Jr e Millones (2011). A matriz de confusão consiste na análise da acurácia da classificação a partir do cruzamento de amostras de cada classe mapeada (linhas) com a classe real (colunas) (DE CARVALHO et al., 2019). A precisão global é

a divisão do somatório dos *pixels* classificados corretamente pelo total de *pixels* da classe (CONGALTON, 1991), enquanto os coeficientes propostos por Pontius Jr e Millones (2011) levam em consideração a proporção das classes reais.

**Tabela 1** – Chave de identificação e descrição das classes de fitofisionomias mapeadas na área do PNCM para o ano de 2018.

<b>Fitofisionomias</b>	<b>Características</b>	<b>Imagem PlanetScope</b>	<b>Imagem de Campo</b>
Cerradão terras altas	Onde ocorre espécies tanto da mata quanto do Cerrado sensu stricto, apresentando cobertura arbórea de 50 a 90% e árvores com altura média variando de 8 a 15 m, localizada em topo de morros.		
Cerradão terras baixas	Onde ocorrem espécies tanto da mata quanto do Cerrado sensu stricto, caracterizado por apresentar cobertura arbórea de 50 a 90% e árvores com altura média variando de 8 a 15 m.		
Cerrado denso	Presença de vegetação arbustiva e subarbustiva aberta, predominate arbóreo-arbustiva, com dossel variando de 50 a 70%, altura média da vegetação de 5 a 8 m.		
Cerrado aberto	Presença de vegetação arbustiva e subarbustiva aberta, predominando herbácea-arbustiva, com dossel variando de 20 a 50%, altura média da vegetação de 3 a 6 m.		
Cerrado rupestre	Vegetação arbóreo-arbustiva, ocorrendo em ambientes rochosos, com cobertura arbórea variando entre 5% e 20% e altura média de 2 a 4 m.		



Mata de galeria	Apresenta vegetação associada a cursos d'água, perenifólia, com cobertura arbórea de 70 a 95% e árvores de altura média variando entre 20 a 30 m.		
-----------------	---	--	---

Fonte: De Carvalho (2019).

## 2.5. Geração e análise de métricas fenológicas

A fenologia abrange uma série de estudos voltados ao entendimento do ciclo de vida de plantas ou animais e sua dinâmica temporal durante um certo período (geralmente ao longo do ano), que no caso das plantas incluem os períodos reprodutivo (fenologia reprodutiva) e de crescimento vegetativo (fenologia vegetativa) (MORELLATO; CAMARGO; GRESSLER, 2013). Com estes estudos, torna-se possível uma melhor compreensão de seus comportamentos e, a partir destes, o fornecimento de melhor embasamento relacionado aos padrões reprodutivos e vegetativos de plantas, sendo este último processo parte do estudo desta pesquisa.

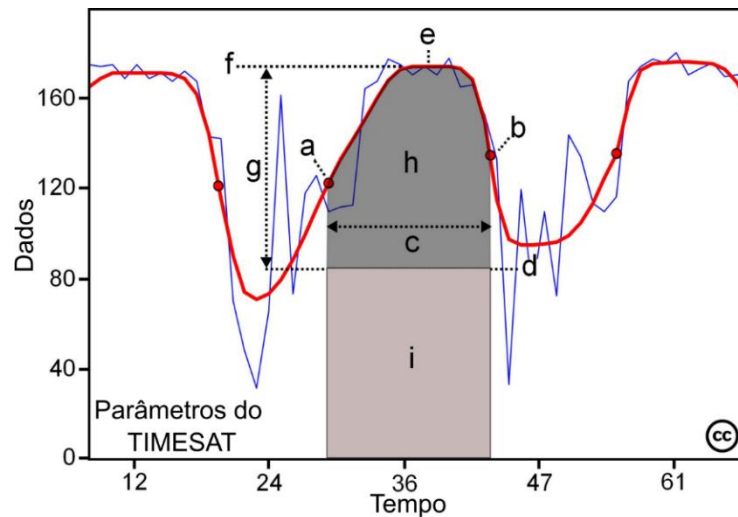
Como informações de entrada para a geração de métricas fenológicas da dinâmica vegetal, foram utilizados dados disponibilizados pelo *Institute of Surveying, Remote Sensing and Land Information (IVFL)*, que faz parte da *University of Natural Resources and Applied Life Sciences de Vienna – BOKU*, disponíveis gratuitamente no endereço: <https://ivfl-info.boku.ac.at/satellite-data-processing/dataprocess-global>. Foi realizado o download do produto do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, MOD13Q – do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, que possui uma resolução espacial de 250m, e resolução temporal de 7 dias.

No total, foram obtidas 954 imagens para um recorte compreendendo o PNCM, para o período de 2000 até 2018 (com uma média de 50 imagens por ano), totalizando um registro histórico de 19 anos. O pré-processamento das imagens para posterior análise foi realizado através do *software R* versão 3.4.1 (R CORE TEAM, 2018), possibilitando a conversão das imagens do formato *TIFF* para o formato “.*bsq*” e criação da lista de imagens em formato “.*txt*”. Essa transformação foi necessária para preparar os dados para processar no programa *TIMESAT* (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; TAN et al., 2011).

A análise das imagens foi realizada utilizando o programa *TIMESAT* versão 3.3, desenvolvido especificamente para a caracterização das dinâmicas fenológicas a partir de imagens derivadas de sensores remotos (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; TAN et al., 2011). Este processo ocorre baseado em parâmetros definidos pelo usuário, permitindo caracterizar o período inicial, final e duração de cada ciclo fenológico, também conhecido como ciclo de crescimento da vegetação. A partir da análise da série temporal de imagens do NDVI, é possível a identificação do momento de ocorrência do *green-up* (data de início da atividade fotossintética), o período de senescência (período em que a atividade fotossintética e a área foliar verde diminuem visivelmente), a duração definida como o tempo transcorrido entre o *green-up* e a senescência, a amplitude máxima referente a cada estação de crescimento da vegetação, o máximo valor de NDVI alcançado no pico de crescimento (indicador da produtividade da vegetação) e a taxa de aumento e decréscimo de crescimento e senescência, conforme ilustrado na Figura 3. Neste processo, foi necessário observar as métricas de vários pixels em diversas imagens ao longo da série histórica, para possibilitar o cálculo dos seus valores médios.

Diante do exposto, as métricas selecionadas foram: *Start* - que corresponde ao período médio de início de crescimento da vegetação local; *Middle* - que corresponde ao período de pico de crescimento da vegetação; *End* – que corresponde ao período médio de fim do ciclo de

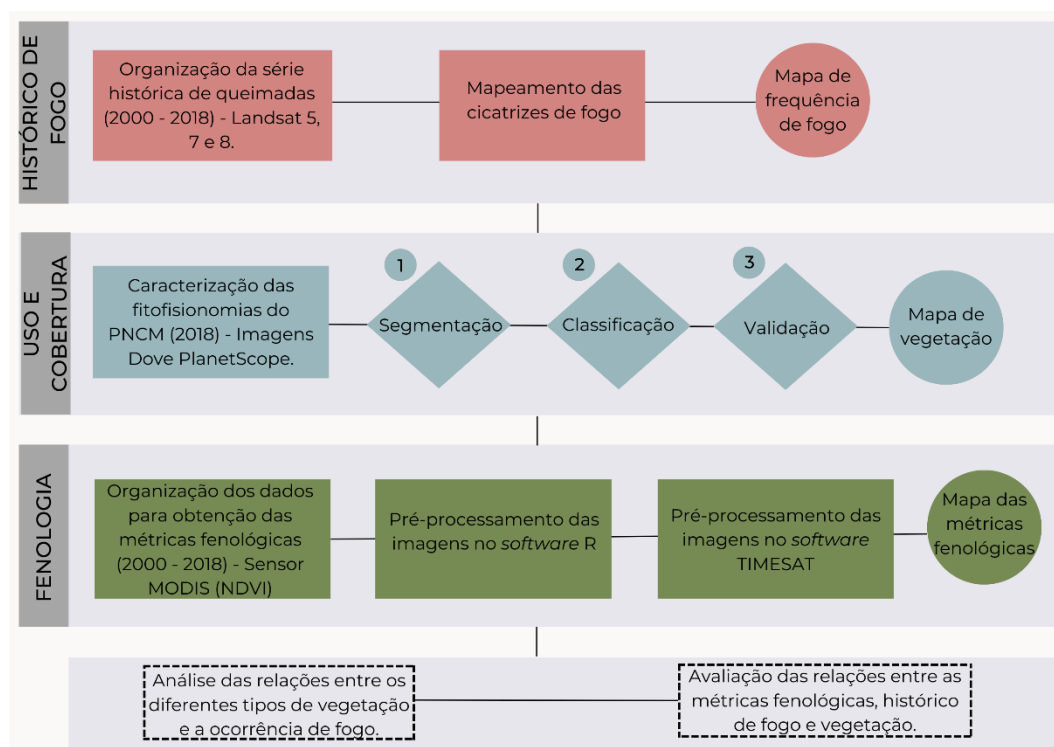
crescimento da vegetação; *Max* – que corresponde ao valor máximo de NDVI alcançado no dia do pico; e *Increase/Decrease* – que correspondem aos períodos relacionados com a taxa de crescimento e senescência da vegetação. As métricas (*Start*, *Middle* e *End*) são expressas em dias julianos.



**Figura 3** – Parâmetros de sazonalidade produzidos pelo programa TIMESAT, a partir de séries de dados NDVI. Transições entre tendências crescentes e decrescentes de NDVI são identificadas por uma mudança no sinal do coeficiente de inclinação. Onde: a = início da estação de crescimento; b = fim da estação de crescimento; c = duração da estação; d = valor da base; e = dia do pico de crescimento; f = valor máximo de NDVI alcançado; g = amplitude sazonal; h = integral da estação de crescimento a partir do nível basal; e i = integral da estação de crescimento a partir do nível zero. Sendo a linha azul a representação dos dados originais e a linha em vermelho os dados após aplicação do filtro de suavização. Fonte: Adaptado de EKLUNDH; JÖNSSON, 2016.

Após o processamento de imagens no TIMESAT, foram gerados 17 *rasters* (imagens no formato matricial) anuais para cada métrica fenológica em formato *GeoTIFF*. Na sequência, as métricas *Start*, *Middle* e *End* tiveram seus valores transformados para dias julianos, o que possibilitou a delimitação da data de início, fim e duração dos ciclos fenológicos. Onde o dia 1, correspondente ao mês 1 (janeiro) até o dia 365, que corresponde ao último dia do mês 12 (dezembro), para o cálculo referente aos períodos temporais de cada ciclo do mosaico de vegetação do PNCM (início, pico e fim do período de crescimento). O processo seguinte foi o cálculo realizado por meio da álgebra de mapas, mediante as operações *Mean* (média) e *Std* (desvio padrão) para cada pixel das imagens obtendo os valores médios e desvio padrão de dias de início, duração e fim dos ciclos nas diferentes áreas do PNCM.

Foram definidos 6 níveis de ocorrência de queimadas para este trabalho: Sem queima - SQ (Sem registro de queimadas); Muito baixo - MB (Até 1 ocorrência de queimada); Baixo - B (De 2 a 4 ocorrências); Médio - MED (De 5 a 7 ocorrências); Alto - A (De 8 a 10 ocorrências) e Muito alto - MA (Acima de 10 ocorrências). Com isto, a partir do *raster* de frequência de queimadas entre 2000-2018 e o *raster* de cobertura vegetal foram identificadas quais as fitofisionomias mais atingidas pela ocorrência do fogo. Posteriormente, foi gerada uma base aleatória de pontos (total de 1000), sobre os quais se extraíram e calcularam as métricas associadas a cada tipo de cobertura vegetal e histórico de fogo. Assim foi possível determinar como cada nível de frequência de fogo influencia nos períodos fenológicos dos diferentes tipos de fitofisionomia da vegetação do PNCM, e determinar as fitofisionomias mais resilientes, considerando a regeneração após fogo como medida.



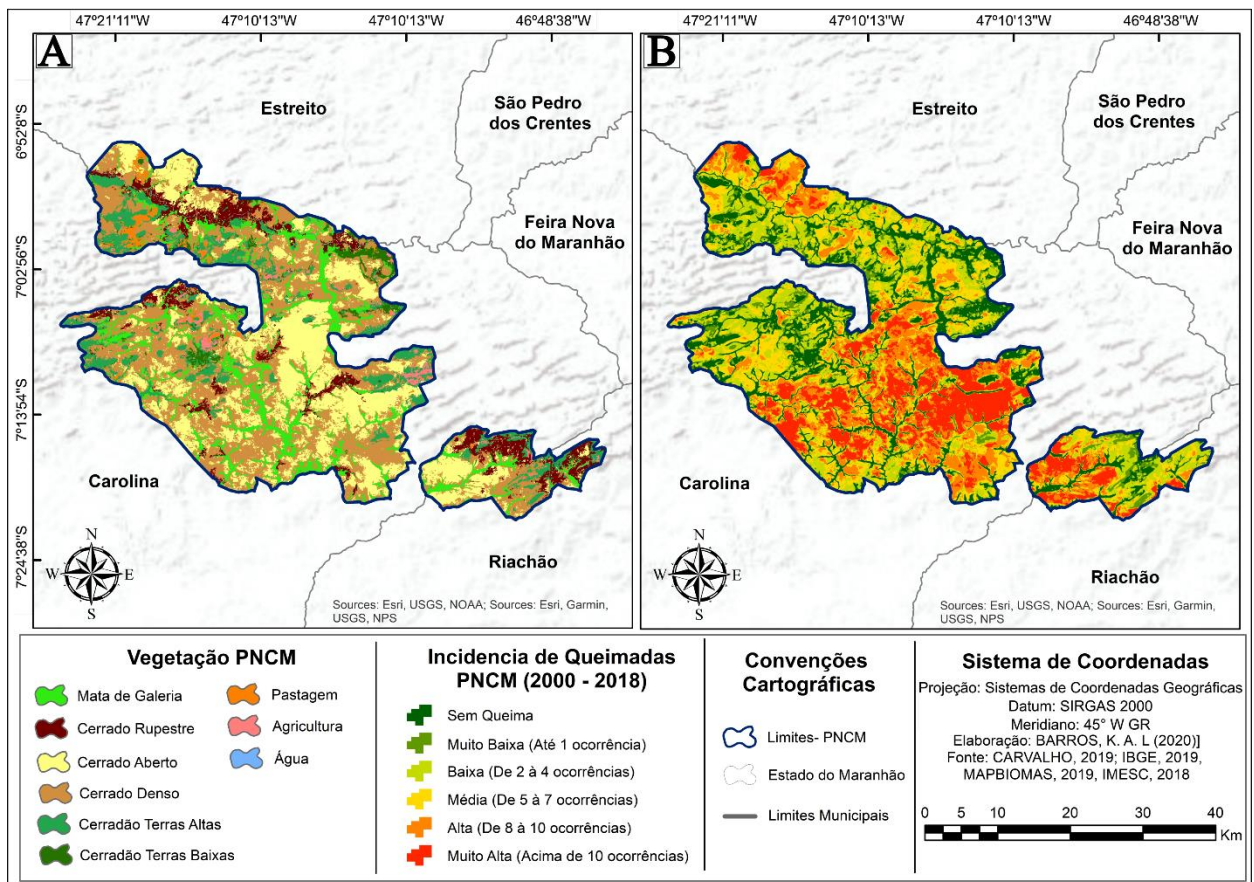
**Figura 4** – Fluxograma metodológico. Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Relações entre os tipos de fitofisionomias vegetais e ocorrência de fogo

O mapa de fitofisionomias vegetais do PNCM (Figura 5A) do ano de 2018 revela que a maioria das superfícies estão concentradas nas categorias de Cerrado Denso (37.19%, 595.15 km<sup>2</sup>), Cerrado Aberto (26.46%, 423.44 km<sup>2</sup>) e Mata de Galeria (12.53%, 200.58 km<sup>2</sup>). Em seguida temos Cerradão Terras Altas com 10.61% (169.83 km<sup>2</sup>), Cerrado Rupestre com 8,24% (137.88 km<sup>2</sup>), Cerradão Terras Baixas 2.28% (36.42 km<sup>2</sup>), Agricultura com 1.36% (21.69 km<sup>2</sup>), Pastagem com 1.23% (19.73 km<sup>2</sup>) e Água com 0.11% (1.75 km<sup>2</sup>).

O resultado da classificação demonstra o mosaico de vegetação que ocorre na região do parque, que possui características de vegetação típica do bioma Cerrado, dentre as quais se destacam a presença de fitofisionomias que possuem espécies de caráter savânico (campo aberto, campo denso, cerrado rupestre) e florestal (cerradão e matas de galeria). Espécies características dos biomas Caatinga e Amazônia também são notadas no contexto da Unidade de Conservação (LIMA et al., 2007; FERRAZ et al., 2020). Nas áreas de solo arenoso ocorrem fitofisionomias de cerrado e campo sujo. Nas regiões com presença de cursos d'água, predomina a existência de matas de galerias bem conservadas, as quais acompanham as margens dos rios (MARQUES; AMORIM, 2014).



**Figura 5** – Mapas de fitofisionomias de vegetação resultado da classificação das imagens *PlanetScope* da estação seca (2017-08-27), chuvosa (2018-05-06) e do MDE (A) e de histórico de fogo (2000-2018) (B) no PNCM de acordo com a base de dados de De Carvalho et al., (2019) e De Carvalho et al., (2023), disponível em <https://doi.org/10.5281/zenodo.10289082> (DE CARVALHO; ALVARADO; FERRAZ, 2023). Fonte: Elaborado pelos autores.

Já em localidades com características de solos mais ricos, são as áreas onde há o maior registro de vegetação florestal, além da presença de manchas de matas semidecíduas. O PNCM ainda apresenta espécies que possuem valor econômico como ipê, aroeira, jatobá, por esse motivo estas acabam se tornando alvo de práticas de desmatamento ilegal (LIMA et al., 2007). A classificação realizada confirma toda essa caracterização, destacando a espacialização das matas de galeria por toda a extensão do parque, o que retrata o seu grande potencial hídrico (Figura 4A). Além disso, na região centro-sul e oeste, tem-se a presença concentrada de cerrado aberto, enquanto áreas de cerrado rupestres se apresentam próximos de cursos d'água e em áreas de grande elevação (morros e chapadas) que não são cobertas por vegetação do tipo cerradão terras altas, sendo a maior parte do parque ocupada por vegetação cerrado denso.

A matriz derivada do mapa é apresentada na Tabela 2, demonstra elevados níveis de acerto dos resultados obtidos, associados a valores de precisão global e índice Kappa de 71,49% e 65,99%, respectivamente. Os coeficientes de discordância de quantidade e o de alocação foram de 16,59% e de 11,92%, respectivamente. Os valores de precisão global e índice *Kappa* foram considerados bons de acordo com classificação proposta por Landis e Koch (1977), levando em consideração o número de classes e a resolução espacial das imagens utilizadas.

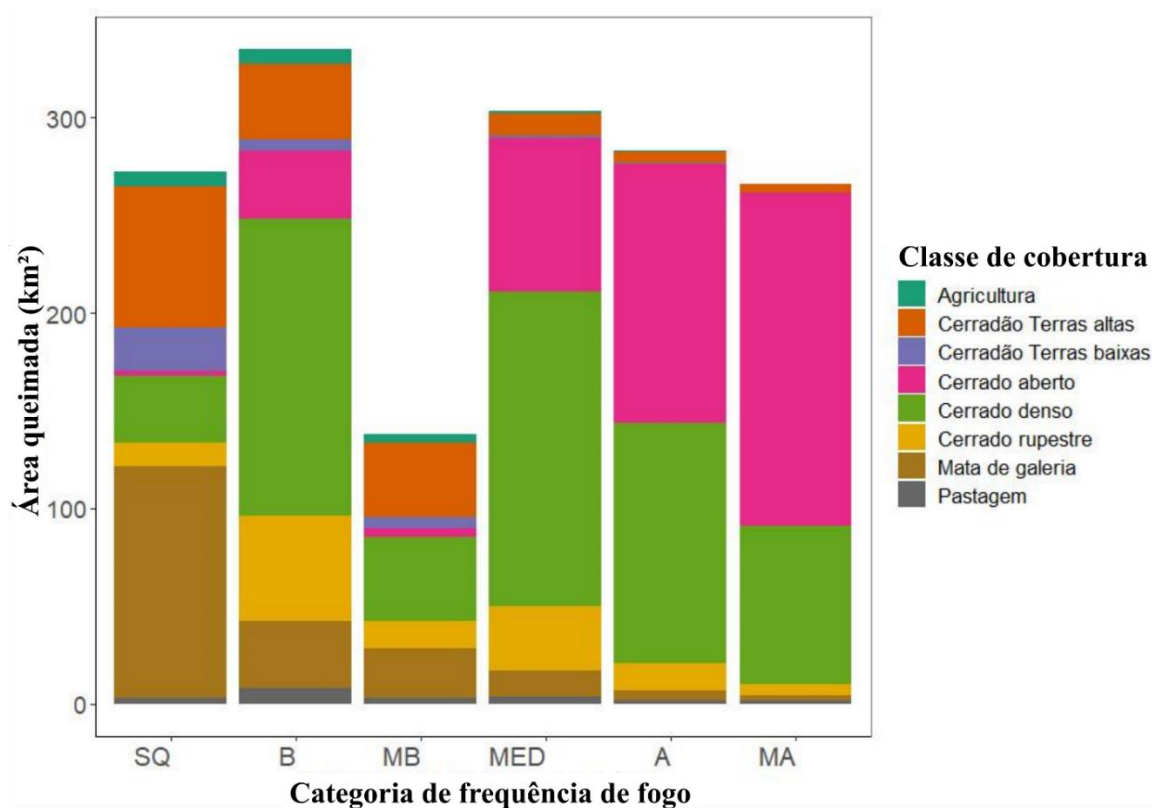
**Tabela 2** – Matriz de confusão resultante do processo de validação da classificação. (Classes: Água = Ág.; Agricultura = Agr.; Pastagem = Past.; Cerradão terras baixas = C. t. baixas; Cerradão terras altas = C. t. altas; Cerrado Denso = C. denso; Cerrado aberto = C. aberto; Cerrado Rupestre = C. rup.; Mata de Galeria = Mata de g.).

Classes	Ág.	Agr.	Past.	C. t. baixas	C. t. altas	C. denso	C. aberto	C. rup.	Mata de g.
<b>Ág.</b>	<b>18</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Agr.</b>	0	<b>7918</b>	5087	7002	8027	0	0	0	0
<b>Past.</b>	0	1154	<b>5091</b>	0	0	0	0	0	0
<b>C. t. baixas</b>	0	2181	981	<b>4414</b>	1378	0	0	0	218
<b>C. t. altas</b>	0	1361	174	9015	<b>36844</b>	0	0	0	5059
<b>C. denso</b>	0	800	1387	0	187	<b>44172</b>	6873	3288	154
<b>C. aberto</b>	0	0	0	0	0	4561	<b>62251</b>	2222	281
<b>C. rup.</b>	1417	739	0	0	3	0	0	<b>13027</b>	479
<b>Mata de g.</b>	0	102	268	8972	7577	0	1130	3271	<b>44282</b>

Fonte: De Carvalho et al., (2019).

Devido a heterogeneidade da área do PNCM, a classificação a partir de imagem apresentou dificuldades, o que é comum no Cerrado (SANO et al., 2010). Muitos estudos de classificação em regiões do Cerrado indicam dificuldades em mensurar classes como mata de galeria, cerrado denso, aberto e áreas antropizadas (agricultura e pastagem) (SANO et al., 2010; GIROLAMO NETO et al., 2017), muitas vezes devido à resolução espacial das imagens trabalhadas e métodos de classificação utilizados. Por isso, destaca-se a importância do uso de outros dados auxiliares para a classificação como: NDVIs, máscara de hidrografia e MNDWI, que foram utilizados em estudos em regiões de fitofisionomias do Cerrado e demonstraram outras possibilidades para agregar informações adicionais e melhorar os resultados das classificações (NUNES; ROING, 2015). A partir da análise da matriz de confusão, observou-se a boa identificação da classe Cerrado de terras altas, destacando assim o importante uso da banda de elevação – MDE (CLEWLEY et al., 2014).

No PNCM, as ocorrências médias de queimadas nos anos abordados por este trabalho (2000 a 2018) foram definidas em cinco níveis: Sem queimadas (SQ), Incidência muito baixa (MB), Baixa incidência de queimadas (B), Incidência média de queimadas (MED), Alta incidência de queimadas (A) e Incidência muito alta de queimadas (MA). Quando as informações de histórico de fogo são contrastadas (Figura 5B) e estratificadas em relação aos dados de fitofisionomias vegetais (Figura 6), é possível verificar que as áreas de baixa frequência ou onde não se registraram queimadas predominam fitofisionomias dominadas por maior densidade de lenhosas. O que se observa é que em regiões de Mata de galeria por exemplo, é notado um contexto em que não há ocorrência de fogo, quanto maior a frequência de queima, menos ocorrências se veem nestas áreas, estabelecendo uma relação inversamente proporcional ao fogo. Em contraposição, áreas com maior ocorrência de fogo predominam categorias de formações vegetais campestres e savânicas de menor densidade de lenhosas. As classes de queima de baixa a muito alta ocorrem em maior quantidade sobre ambientes com presença de Cerrado aberto e Cerrado denso, demonstrando ser as mais afetadas por queimadas por conta de suas características naturais, principalmente dominância do estrato herbáceo (biomassa combustível), que as tornam mais propensas ao fogo (FIDELIS; PIVELLO, 2011; ALMEIDA, 2015).



**Figura 6** – Estratificação da área queimada (km<sup>2</sup>) por classe de cobertura da terra no Parque Nacional Chapada das Mesas. Onde: SQ = Sem queima; MB = Muito baixo (1 ocorrência de queimada); B = Baixo (de 2 a 4 ocorrências); MED = Médio (de 5 a 7 ocorrências); A = Alto (de 8 a 10 ocorrências); e MA = Muito alto (acima de 10 ocorrências). Fonte: Elaborado pelos autores.

Normalmente, nas regiões do Cerrado, a ocorrência do fogo é vista como necessária e de grande relevância para o processo de desenvolvimento das espécies de plantas do bioma e melhor ocorrência de processos ecológicos (germinação, floração, reprodução) (PIVELLO, 2011; DURIGAN, 2020). No entanto, a ocorrência de queimadas de forma não supervisionada ou negligenciada pode provocar incêndios de grandes proporções, alterações da frequência, intensidade e severidade do fogo sobre a biota local, o que impacta diretamente no ciclo fenológico da vegetação e em toda a dinâmica ambiental local (SCHMIDT et al., 2018; DURIGAN, 2020).

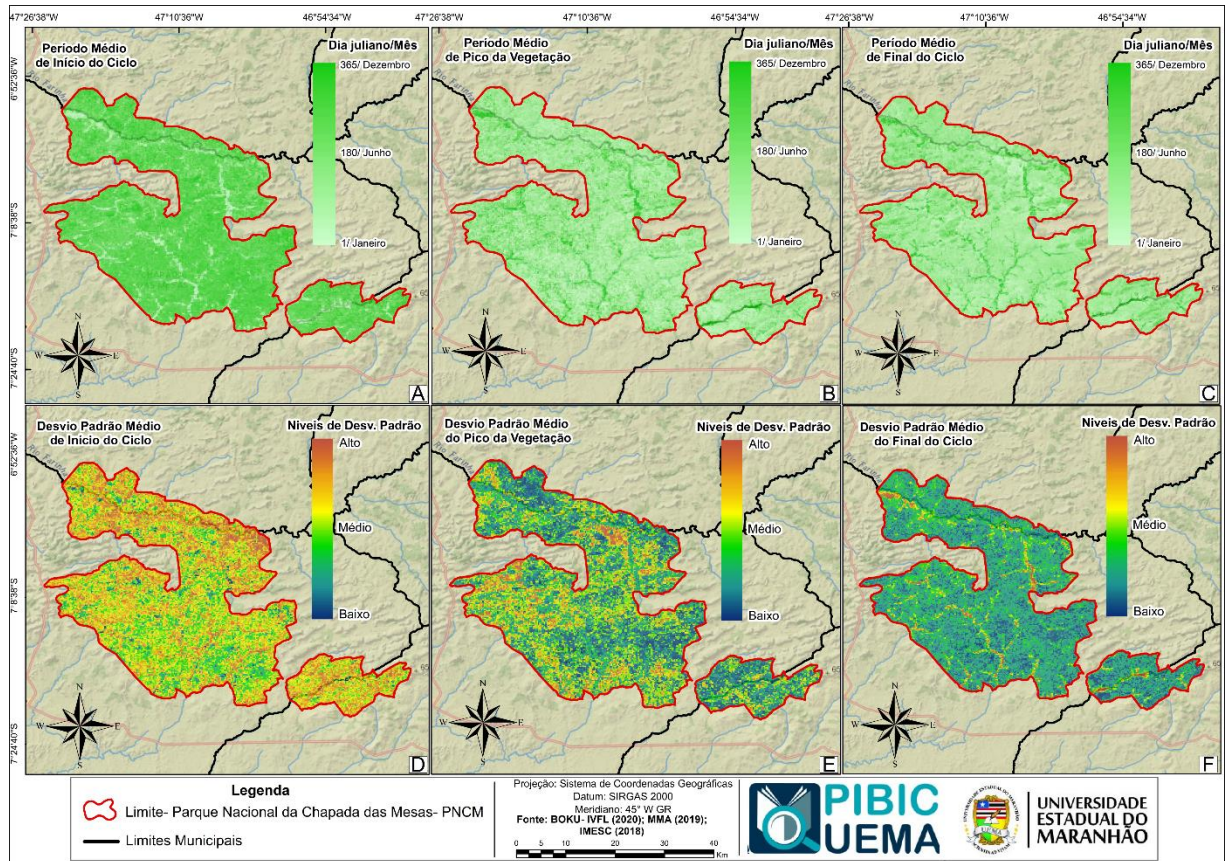
As queimadas não controladas são comumente causadas em áreas de usos agropastoris. Segundo Moraes e Lima (2007), em áreas antrópicas é comum a ocorrência de queimadas de pequeno porte, voltadas principalmente para atividades agrícolas (roças de toco) em que há o processo de eliminação da vegetação local para que assim seja possível realizar a limpeza solo, para que práticas de cultivos voltadas à subsistência dos habitantes sejam realizadas. Outra problemática existente são as queimas de rebrota, consideradas um fator de alto risco para o alastramento sem controle do fogo em UCs, afetando de diversas formas a vegetação local (MORAES; LIMA, 2007; FIDELIS et al., 2018). Esse tipo de queima ocorre principalmente no início do período chuvoso e final da estação seca (MORAES; LIMA, 2007; FIDELIS; PIVELLO, 2011).

Além das ocorrências de queimadas oriundas de atividades antrópicas, outros fatores estão relacionados na dinâmica de queimadas no bioma cerrado, como a variação do ciclo hidrológico e a variação da temperatura local, o que faz com que algumas espécies presentes no bioma se tornem altamente inflamáveis durante as épocas de clima mais quente e seco, pelo baixo quantitativo de umidade nelas presentes (RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000). Assim como as

ocorrências de precipitação podem aumentar os níveis de umidade do material combustível, reduzindo as chances de queimadas (UHL; KAUFFMAN, 1990; ALVARADO et al., 2017). Enquanto isso, a falta de chuva durante um longo período de seca diminui a umidade no material combustível, acelerando a queda das folhas em consequência do estresse hídrico acrescentando maior quantidade de material combustível seca presente na vegetação, o que a torna mais propensa a ocorrência de fogo (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999). Com isso, a dinâmica da ocorrência de queimadas acaba fortemente alterada em períodos com baixa umidade do ar, podendo assim, aumentar ou diminuir sua incidência (MACHADO; SILVA; BIUDES, 2014).

### **3.2. Avaliação de métricas fenológicas associadas ao histórico de fogo e a tipologia de fitofisionomias vegetais**

Após a espacialização e análise dos dados (Figura 7A-C), foi observado que os períodos de início do ciclo de crescimento da vegetação do parque para a maioria das fitofisionomias se iniciam historicamente próximo ao dia 300, que corresponde ao mês de outubro (em torno do dia 27 de outubro), se aproximando dos dias finais do ano (dia 360 até 365, do 26-31 de dezembro). Porém, nas áreas de matas de galeria, o período já se inicia geralmente após, nos primeiros meses do ano, apresentando um atraso em relação às outras fitofisionomias. Esta condição pode estar relacionada a diferença na estrutura e composição podendo influenciar no ciclo fenológico da vegetação assim como a sazonalidade da pluviosidade, e o regime de fogo. As áreas de floresta como as matas de galeria e cerrado possuem uma estrutura vegetal maior em comparação as áreas de cerrado (aberto, denso), e as espécies de plantas (principalmente gramíneas e herbáceas), que ocorrem de forma contínua nas formações savânicas tem um ciclo de crescimento mais rápido que espécies arbustivas e arbóreas, que ocorrem de forma mais abundante nas formações florestais do Cerrado (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002; RIBEIRO; WALTER, 2008).



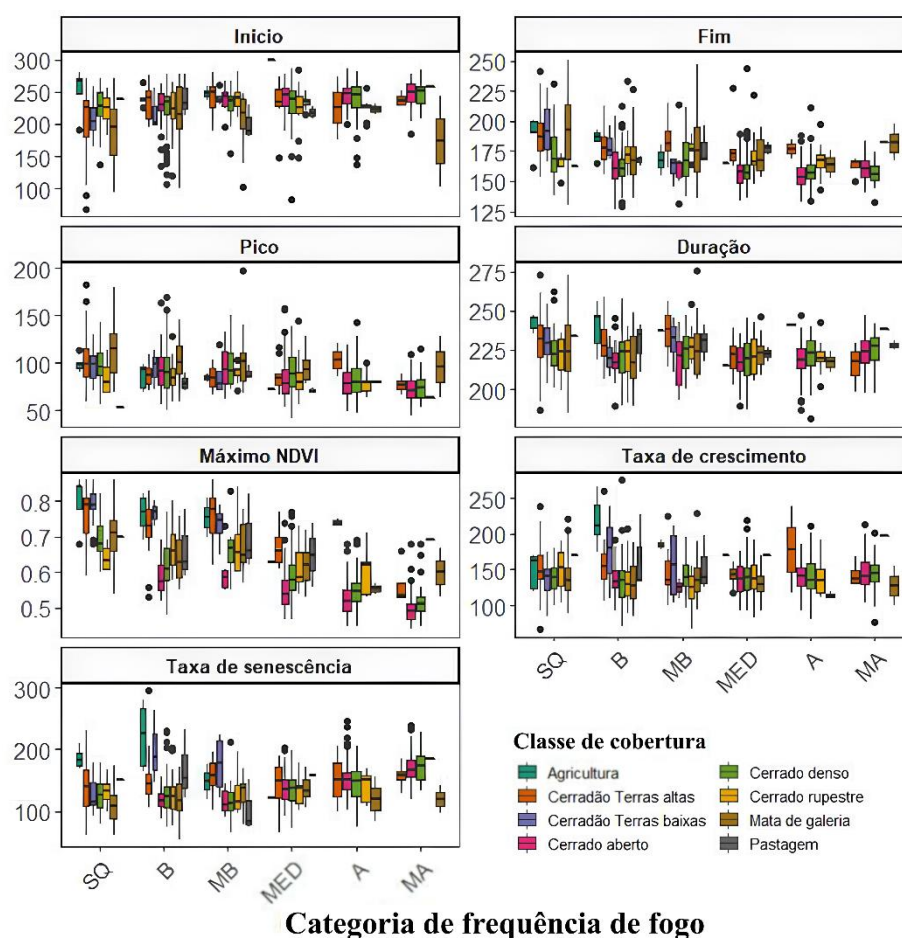
**Figura 7** – Espacialização dos valores médios dos períodos de início, pico e fim do ciclo fenológico verificados no PNMC (A - C), e seus respectivos valores de desvio padrão (D - F). Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores de desvio padrão dos períodos retratados, indicam o quanto há variabilidade das métricas entre os anos, sua análise mostra que as regiões onde há a ocorrência de um alto desvio padrão, há uma grande variabilidade interanual entre os períodos de cada ciclo, e a data de início muda de forma mais intensa (Figura 7D-F). Já as áreas com menor desvio indicam uma menor variabilidade interanual ocorrendo de maneira mais homogênea. Com isso foi observado que os períodos relacionados ao início do ciclo fenológico da vegetação do PNMC são espacializados de maneira mais heterogênea, tendo maior variação interanual e os valores de desvios padrão altos, o que indica uma alteração interanual referente aos dias de início do crescimento vegetal.

O que se pode entender é que principalmente nas áreas do PNMC em que há a maior ocorrência de fogo no final do período seco, essa ocorrência corresponde ao início da época de crescimento, o qual vem tendo sua data de início alterada, caracterizando-se por desvios padrões mais elevados (Figura 7D-F). Enquanto isso, as métricas de pico máximo no crescimento da vegetação e períodos de final do ciclo possuem desvios padrões baixos, o que demonstra que nestas áreas e nas épocas do ciclo a dinâmica interanual é homogênea e, assim, menos afetada pela ocorrência do fogo.

A dinâmica da vegetação nas diferentes fitofisionomias do PNMC, em sua maioria, apresenta, em geral, a data média do dia de pico do ciclo de crescimento da vegetação nos meses de março e abril, quando as frequências de queimadas se mostram baixas. Nesse período ocorre uma baixa frequência de fogo (baixo – B ou muito baixo – MB) (Figura 8). O período médio do final do ciclo de crescimento se inicia após o momento em que a vegetação atinge o seu pico, entorno dos dias 166 e 180 (correspondentes a segunda metade de junho e início de julho) (Figura 8).



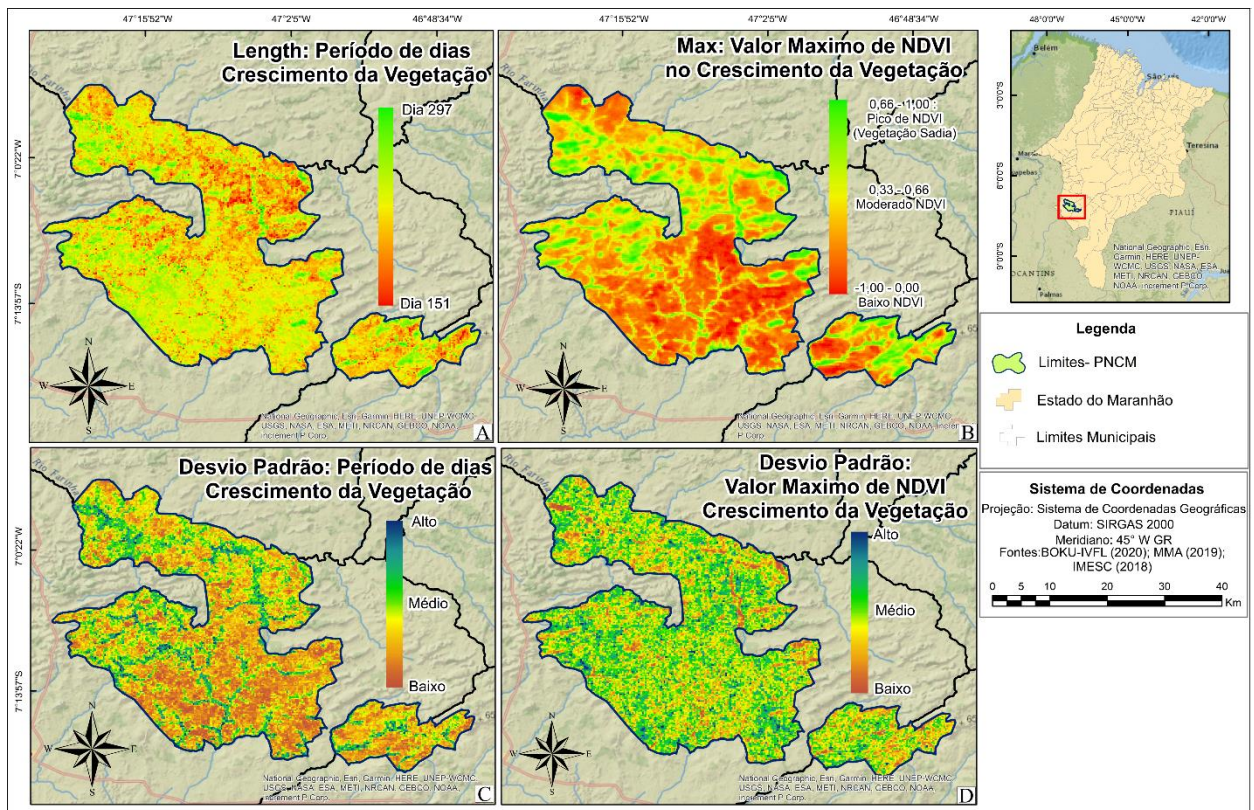


**Figura 8** – Diagrama de caixas (boxplot) das métricas fenológicas estratificadas por tipo de categoria de frequência de fogo e classe de cobertura vegetal, baseada nos dados da extração de 1000 pontos aleatórios sobre a área de estudo. Fonte: Elaborado pelos autores.

As próximas métricas avaliadas foram correspondentes a duração do período de dias de crescimento da vegetação, ou seja, número de dias que a vegetação passa pelo ciclo de crescimento (*Length* ou duração) e *Max*, que diz respeito ao valor máximo de NDVI alcançado no dia do pico de crescimento da vegetação (Figura 9).

A espacialização das médias de dias de duração do ciclo de crescimento da vegetação do PNCM demonstra que, em sua maioria, as diferentes fitofisionomias apresentam uma duração de dias moderada a longa no crescimento da vegetação, que pode ser de 151-297 dias (de 5 a 10 meses) (Figura 9A). Na região mais ao norte, encontram-se as áreas que apresentam os valores mais baixos na duração do período de crescimento e são nestas áreas em que se notam os níveis de desvio padrão mais elevados (Figura 9C) entre o início e o final deste ciclo, implicando uma maior variação interanual.

Nesta porção do parque, tem-se a presença de fitofisionomias de Cerrado rupestre, com predominância de Cerrado mais denso e algumas áreas com presença de fitofisionomias de mata de galeria. Com este evento, os valores de NDVI (Figura 9B) da vegetação acabam fortemente alterados pela ocorrência ou não de fogo na região (Figura 5B). Estes valores de NDVI irão determinar os níveis relacionados à abundância e à situação da vegetação local (saudável ou não) por meio de valores pré-definidos, sendo obtidos pelo cálculo da razão entre a diferença das reflectâncias das bandas do infravermelho próximo (NIR) e banda do vermelho (RED) pela soma das mesmas bandas (ROUSE et al., 1974).



**Figura 9** – Espacialização dos valores médios (A - B) e desvios padrão (C - D) durante o período de 2000-2018 da duração do período de crescimento (A e C) e níveis máximos de NDVI da vegetação (B e D) no Parque Nacional Chapada das Mesas. Fonte: Elaborado pelos autores.

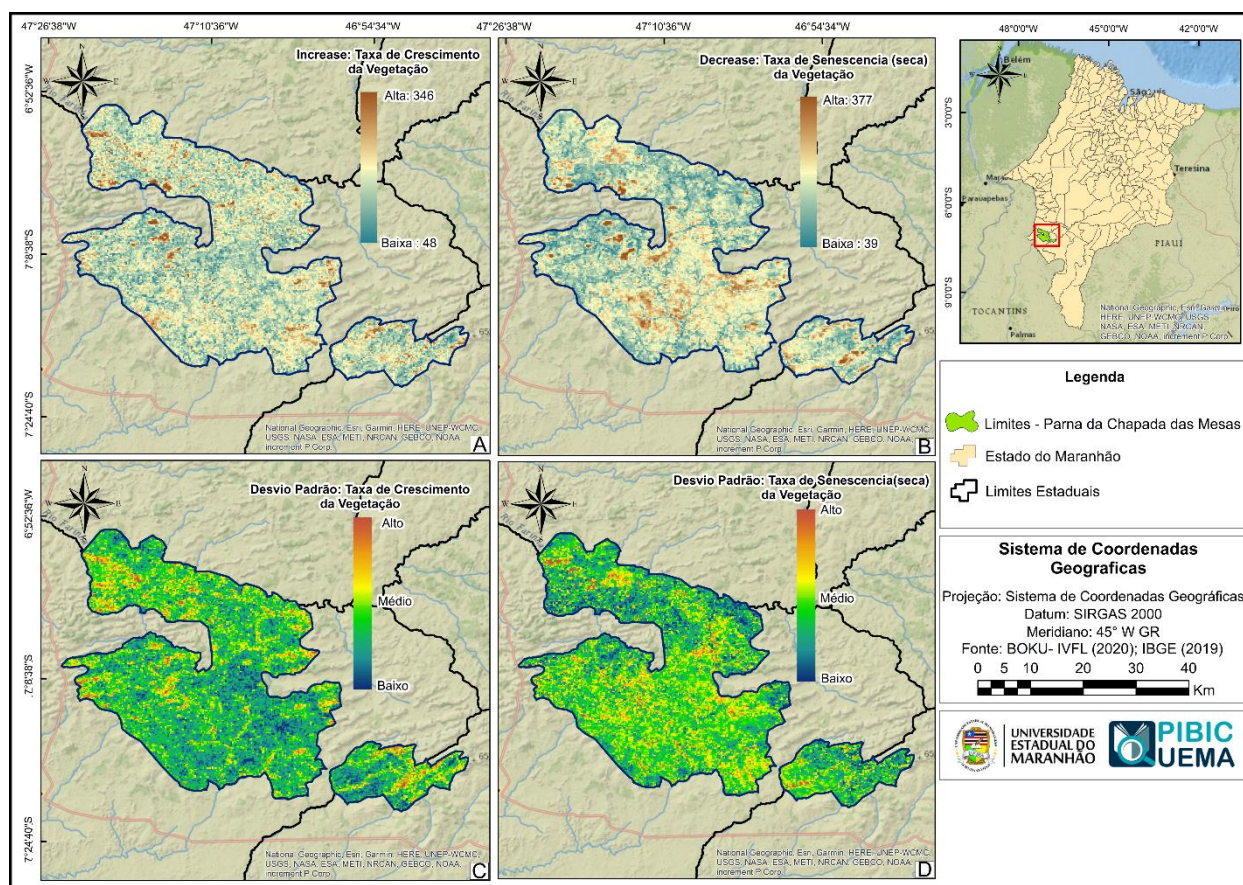
O parque apresenta valores de NDVI baixos na maioria da sua área, principalmente na região central do PNCM, onde predomina a fitofisionomia de Cerrado aberto, que está dominada por uma cobertura de vegetação herbácea caracterizada por ter um baixo NDVI. Esse comportamento deve-se a maior sensibilidade desse tipo de fitofisionomia em relação à sazonalidade climática, onde a vegetação diminui a sua capacidade fotossintética (SANO et al., 2019). Comportamento que difere das fitofisionomias de mata de galeria e cerradão. Além disso, se destaca ao longo dos anos como a porção do parque com mais eventos de queimadas. Ao observar a espacialização do desvio padrão relacionado a esta métrica, encontra-se valores elevados de desvio padrão, representando alterações trazidas pela maior ocorrência de fogo.

Foi observado que, conforme o aumento da frequência do fogo na região do Parque, a vegetação local teve uma redução dos valores máximos de NDVI (Figura 9B), principalmente nas áreas que tem uma frequência alta (A) ou muito alta (MA). Isto pode ser observado em áreas de Cerrado Rupestre e Cerrado Aberto, as quais ao longo dos anos apresentam ocorrências constantes de queimadas. O contrário já ocorre nas regiões com presença de Mata de galeria, sendo identificados valores máximos de NDVI mais elevados comparado com as outras fitofisionomias e com valores menores quando a frequência de queimadas aumentou, indicando que essa vegetação tende a alcançar níveis maiores de NDVI em menor espaço de tempo após queima.

As últimas métricas analisadas por este trabalho fazem referência às taxas de crescimento e senescência da vegetação do PNCM entre os anos de 2000 e 2018 (Figura 10A e B). Foi possível observar que o parque apresenta um contexto em que a taxa do crescimento da vegetação em áreas em que há uma maior ocorrência de fogo se mostra mais lenta, no entanto os processos relacionados ao fogo fazem com que a taxa relacionada à senescência, ou seja, ao dessecamento da vegetação, se mostrem acentuados, quase 9 vezes mais rápido que as outras regiões do PNCM.

Essas características podem ser analisadas pois o NDVI permite extrair dados biofísicos da vegetação, como conteúdo de clorofila, biomassa verde, estresse hídrico das folhas (SANO et al., 2019).

Outra característica observada em relação ao desvio padrão de ambos os períodos (crescimento e senescência) (Figura 10C e D). Enquanto a taxa de crescimento (*increase*) da vegetação é um processo que demanda mais tempo, seus níveis de desvio padrão se mostram em níveis baixos de variabilidade, o que retrata uma realidade da velocidade em que este processo ocorre ser mais homogênea entre os anos analisados. Já as métricas relacionadas ao processo de senescência da vegetação (*decrease*), muito relacionado aos altos índices de ocorrência de queimadas, principalmente nas regiões central e sul do parque com fitofisionomias mais susceptíveis ao fogo, tem um desvio padrão com valores que vão de médio a alto, indicando uma grande variação no período de ocorrência de fogo (Figura 10C e D).



**Figura 10** – Espacialização dos valores médios (A - B) e desvios padrão (C - D) durante o período de 2000-2018 das taxas de crescimento (A e C) e senescência da vegetação (B e D) no Parque Nacional Chapada das Mesas. Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente estudo foi possível concluir que: 1) A área de estudo, que compreende os limites do Parque Nacional da Chapada das Mesas, possui uma variedade de ambientes de diferentes tipos de vegetação que apresentam um comportamento fenológico diferenciado a cada regime de fogo ao longo dos anos abordados pela pesquisa; e 2) Conforme a recorrência do fogo, aumento ou redução na ocorrência de queimadas, geram-se mudanças nos ciclos fenológicos da vegetação, alterando as datas de início e fim do ciclo, os níveis máximos de NDVI da vegetação

(indicador da produtividade), entre outros, onde as regiões com maiores ocorrências históricas de fogo apresentam a velocidade de crescimento mais lento em relação às áreas com menores incidências.

Todos estes fatores e as mudanças nos padrões naturais do regime de fogo no Cerrado trazem à tona a importância desta pesquisa, possibilitando a tomada de decisão e o direcionamento de atividades de manejo e prevenção de ocorrências de fogo, que venham afetar as fitofisionomias do Cerrado menos resilientes em resposta ao fogo, no PNCM. A abordagem metodológica pode ser replicada a outras áreas protegidas, contribuindo para a caracterização da dinâmica da vegetação e para o monitoramento de queimadas.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (CAPES/FAPEMA n° 29/2017; FAPEMA BD-01136/20; PDPG-FAP n°. 18/2020), ao Programa PIBIC-UEMA, ao PPG em Agricultura e Ambiente (UEMA/Balsas), PPG em Geografia, Natureza e Dinâmica do espaço (UEMA/São Luís) e ao PPG em Agroecologia (UEMA/São Luís). Agradecemos à *Planet Labs* por disponibilizarem as imagens *PlanetScope* através do *Planet's Education and Research Program*.

## REFERÊNCIAS

- ALVARADO, S. T.; FORNAZARI, T.; CÓSTOLA, A.; MORELLATO, L. P. C.; SILVA, T. S. F. Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing. **Ecological Indicators**, v.78, p.270–281, 2017. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.02.037.
- ALVES, D. B.; ALVARADO, S. T. Variação espaço-temporal da ocorrência do fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 44, n. 2, p. 321-345, 2019. DOI: 10.5016/geografia.v44i2.15119.
- ALMEIDA, C. **Relatório de Atividades Projeto Cerrado Jalapão no Parque Nacional da Chapada das Mesas em 2014**. Carolina, 2015. p.
- ARAÚJO, M.L.S.D.; SANO, E.E.; BOLFE, É.L.; SANTOS, J.R.N.; DOS SANTOS, J.S.; SILVA, F.B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v.80, p.57–67, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.09.040.
- BUNTING, P.; CLEWLEY, D.; LUCAS, R. M.; GILLINGHAM, S. The remote sensing and GIS software library (Rsgislib). **Computers & Geosciences**, v. 62, p. 216–226, jan. 2014. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.08.007.
- CLEWLEY, D.; BUNTING, P.; SHEPHERD, J.; GILLINGHAM, S.; FLOOD, N.; DYMOND, J.; LUCAS, R.; ARMSTON, J.; MOGHADDAM, M. A Python-Based Open Source System for Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) Utilizing Raster Attribute Tables. **Remote Sensing**, v.6, p.6111–6135, 2014. DOI: 10.3390/rs6076111.
- CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, p.35–46, 1991. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90048-B.
- DE CARVALHO, I.S. **Análise espaço-temporal do regime de queimadas no Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão**. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

DE CARVALHO, I. S.; ALVARADO, S. T.; FERRAZ, T. M. Burned Area Chapada das Mesas National Park. (Versão 01) [Data set]. **Zenodo**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10289082>.

DE CARVALHO, I.S.; ALVARADO, S.T.; SILVA, T.S.F.; CORDEIRO, C. L. O.; FIDELIS, A.; SARAIVA, R.V.C.; FIGUEIREDO, F.A.M.M.A.; SOUSA, J.R.P.; FERRAZ, T.M. How does the fire regime change after creating a protected area in the Brazilian Cerrado? **Journal for Nature Conservation**, v.71, p.126318, 2023. DOI: [10.1016/j.jnc.2022.126318](https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126318).

DE CARVALHO, I.S.; FERRAZ, T.M.; SILVA, T.S.F.; ALVARADO, S.T. Classificação da vegetação do Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão, usando OBIA, Machine Learning e softwares livres. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19. (SBSR), 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2019. p. 2984-2987.

DROBYSHEV, I.; GOEBEL, P.C.; HIX, D.M.; CORACE, R.G.; SEMKO-DUNCAN, M.E. Interactions among forest composition, structure, fuel loadings and fire history: A case study of red pine-dominated forests of Seney National Wildlife Refuge, Upper Michigan. **Forest Ecology and Management**, v.256, p.1723–1733, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.05.017>.

DURIGAN, G. Zero-fire: Not possible nor desirable in the Cerrado of Brazil. **Flora**, v.268, p.151612, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151612>.

DURIGAN, G.; RATTER, J. A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. **Journal of Applied Ecology**, v.53, p.11–15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>.

DURIGAN, G.; SIQUEIRA, M. F. D.; FRANCO, G. A. D. C. Threats to the Cerrado remnants of the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, v.64, p.355–363, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000400006>.

DWYER, E.; PINNOCK, S.; GREGOIRE, J. M.; PEREIRA, J. M. C. Global spatial and temporal distribution of vegetation fire as determined from satellite observations. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, p.1289–1302, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311600210182>.

EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. TIMESAT for processing time-series data from satellite sensors for land surface monitoring. In: **Multitemporal Remote Sensing**; Springer: Berlin, Heidelberg, Germany, p. 177–194. 2016.

FERRAZ, T. M.; SARAIVA, R. V. C.; LEONEL, L. V.; REIS, F. F. D.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; REIS, F. D. O.; SOUSA, J. R. P. D.; MUNIZ, F. H. Cerrado physiognomies in Chapada das Mesas National Park (Maranhão, Brazil) revealed by patterns of floristic similarity and relationships in a transition zone. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.92, p.e20181109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181109>.

FIDELIS, A.; ALVARADO, S.; BARRADAS, A.; PIVELLO, V. R. The Year 2017: Megafires and Management in the Cerrado. **Fire**, v.1, p.49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire1030049>.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos?. **Biodiversidade Brasileira**, v.1, n.2, p.12-25, 2011. DOI: <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v1i2.102>.

GIROLAMO NETO, C. D.; FONSECA, L. M. G.; VALERIANO, D. M.; NEVES, A. K.; KORTING, T. S. Desafios na classificação automática de fitofisionomias do Cerrado brasileiro com base em mapas de referência na escala 1:250.000. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18. (SBSR), 2017, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p. 6647-6654. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP6W34M/3PSMDAS>.

ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de manejo do Parque Nacional da Chapada das Mesas**. 36p, 2019.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v.30, p.833–845, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>.

KIM, K.E. Adaptive majority filtering for contextual classification of remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.1083–1087, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608949070>.

- KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v.19, p.707–713, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>.
- KLINK, C.A.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation, and land use. In: **The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. Columbia University Press, 2002. p. 69-88.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v.33, p.159, 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- LIMA, L.P., TCHAICKA, L., AVELAR, J.J.C., CUNHA, A.N.C. **Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais do Parque Nacional da Chapada das Mesas**. Ministério do Meio Ambiente-MMA. 18p. 2007.
- MACHADO, N. G.; SILVA, F. C. P. da; BIUDES, M. S. Efeito das condições meteorológicas sobre o risco de incêndio e o número de queimadas urbanas e focos de calor em Cuiabá-MT, Brasil. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 459–469, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X11892>.
- MARQUES, A.R.; AMORIM, M.C.C. Saberes geográficos integrados aos estudos territoriais sob a ótica da implantação do Parque Nacional da Chapada das Mesas, sertão de Carolina/MA. **Geografia em questão**, v. 7, n. 2, p. 100-117, 2014.
- MARTINS, F.P.; SALGADO, A.A.R.; BARRETO, H.N. Morfogênese da Chapada das Mesas (Maranhão-Tocantins): paisagem cárstica e poligenética. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1180>.
- MATAVELI, G.A.V.; SILVA, M.E.S.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. DA S.; KAWAKUBO, F. S.; BERTANI, G.; COSTA, J.C.; RAMOS, R. DE C.; DA SILVA, V. V. Satellite observations for describing fire patterns and climate-related fire drivers in the Brazilian savannas. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.18, p.125–144, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-125-2018>.
- MORAES, R.C.; LIMA, L.P. Utilização de SIG como ferramenta na gestão do Parque Nacional Chapada das Mesas (Carolina / MA). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR)., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4057-4064. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.19.37.58>.
- MORELLATO, L.P.C.; CAMARGO, M.G.G.; GRESSLER, E. **A Review of Plant Phenology in South and Central America**. In: SCHWARTZ, M.D. (Ed.). *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p.91–113. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_6).
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; DA FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v.403, p.853–858, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1038/35002501>.
- NEPSTAD, D.C.; MOREIRA, A.G.; ALENCAR, A.A. Flames in the Rainforest: origins, impacts and alternatives to amazonian fire. In: **Pilot Program for the Conservation of the Brazilian Rainforest**, The World Bank, Brasília, 1999.
- NUNES, J.F.; ROIG, H.L. Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa, **Revista Árvore**, v.39, n.1, pp.25-36, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000100003>.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T., RATTER, J.A. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado Biome. In: **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**, OLIVEIRA PS, MARQUIS RJ (ORG.). Columbia University Press, New York, p. 91–120, 2002. DOI: <https://doi.org/10.7312/oliv12042-005>.
- PIVELLO, V.R. The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present. **Fire Ecology**, v.7, p.24–39, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701024>.
- PONTIUS JR, R.G.; MILLONES, M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v.32, p.4407–4429, 2011. DOI:

<https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>.

RAMOS-NETO, M.B.; PIVELLO, V.R. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. **Environmental Management**, v.26, p.675–684, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002670010124>.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. **As principais fitofisionomias do bioma Cerrado**. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S. P. De; RIBEIRO, J. F.; EMBRAPA CERRADOS (Org.), Cerrado: ecologia e flora. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

R CORE TEAM, R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <http://www.R-project.org>, 2018.

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, Proceedings, NASA SP-351**, NASA, Washington, DC, v. 1, p. 309-317, 1974.

SANO, E.E.; PONZONI, F.J.; MENESES, P.R.; BAPTISTA, G.M. De M.; TONIOL, A.C.; GALVÃO, L.S.; ROCHA, W.J.S.F. **Reflectância da vegetação**. In: MENESES, P.R., ALMEIDA, T. De, BAPTISTA, G.M. De M., (Org.), Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. Oficina de Textos, São Paulo – SP, 2019.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA, L.G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.166, p.113–124, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0988-4>.

SCHMIDT, I.B.; MOURA, L.C.; FERREIRA, M.C.; ELOY, L.; SAMPAIO, A.B.; DIAS, P.A.; BERLINCK, C.N. Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. **Journal of Applied Ecology**, v.55, p.2094–2101, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13118>.

SCHUMACHER, V.; SETZER, A. **Relação entre queimadas e relâmpagos no Parque Nacional das Emas**. In: SETZER, A.W., FERREIRA, N.J., (Org.), Queimadas e Incêndios Florestais: mediante monitoramento orbital. Oficina de Textos, São Paulo, 2021.

SHEPHERD, J.; BUNTING, P.; DYMOND, J. Operational Large-Scale Segmentation of Imagery Based on Iterative Elimination. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 658, 18 mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11060658>.

SILVA, J.A. DA. **Direito ambiental constitucional**. 11ªEd., São Paulo, SP: Malheiros Editores, 2019. 374p.

SILVA, P.S.; NOGUEIRA, J.; RODRIGUES, J.A.; SANTOS, F.L.M.; PEREIRA, J.M.C.; DACAMARA, C.C.; DALDEGAN, G.A.; PEREIRA, A.A.; PERES, L.F.; SCHMIDT, I.B.; LIBONATI, R. Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. **Journal of Environmental Management**, v.296, p.113098, 2021. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113098](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113098).

STRASSBURG, B.B.N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A.E.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B.; SCARAMUZZA, C.A.D.M.; SCARANO, F.R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v.1, p.0099, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>.

TADONO, T.; NAGAI, H.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K. E IWAMOTO, H. Generation of the 30 m mesh Global Digital Surface Model by ALOS PRISM. In: **The Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sciences**, v. XLI-B4, p.157-162, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016>.

TAN, B.; MORISETTE, J.T.; WOLFE, R.E.; GAO, F.; EDERER, G.A.; NIGHTINGALE, J.; PEDELTY, J.A. An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.4, p.361–371, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2075916>.

UHL, C.; KAUFFMAN, J.B. Deforestation, Fire Susceptibility, and Potential Tree Responses to Fire in the Eastern Amazon. **Ecology**, v.71, p.437–449, 1990. DOI: <https://doi.org/10.2307/1940299>.