

Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Geografia
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Flávia Monize Ferreira dos Santos

**FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS NA OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS NO
PANTANAL: UMA ABORDAGEM PREDITIVA**

Uberlândia
2025

Flávia Monize Ferreira dos Santos

**FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS NA OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS
NO PANTANAL: UMA ABORDAGEM PREDITIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geografia.

Área de concentração: Dinâmicas Territoriais e Estudos Ambientais
Linha de pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Resende Corrêa

Uberlândia

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S237f Santos, Flávia Monize Ferreira dos, 1998-
2025 Fatores naturais e antrópicos na ocorrência de queimadas no pantanal
[recurso eletrônico]: uma abordagem preditiva / Flávia Monize Ferreira
dos Santos. - 2025.

Orientador: Guilherme Resende Corrêa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa Pós-graduação em Geografia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5543>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Geografia. 2. Pantanal Mato-grossense (MT e MS). 3. Queimada -
Aspectos ambientais. 4. Incêndios florestais. I. Corrêa, Guilherme
Resende, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-graduação em Geografia. III. Título.

CDU: 910.1

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H35 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4381/3291-6304 - www.ppgeo.ig.ufu.br - posgeo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico; Número 570, PPGEO				
Data:	31 de março de 2025	Hora de início:	14h:00min	Hora de encerramento:	17h:30min
Matrícula do Discente:	12312GEO003				
Nome do Discente:	FLÁVIA MONIZE FERREIRA DOS SANTOS				
Título do Trabalho:	FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS NA OCORRÊNCIA DE QUEIMADAS NO PANTANAL: UMA ABORDAGEM PREDITIVA				
Área de concentração:	DINÂMICAS TERRITORIAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS				
Linha de pesquisa:	ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOTECNOLOGIAS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	DIAGNÓSTICO GEOAMBIENTAL E DELIMITAÇÃO ESPACIAL DO PANTANAL DO SALOBRA, MATO GROSSO DO SUL				

Reuniu-se na Sala [On-line - www.conferenciaweb.rnp.br], no Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em **GEOGRAFIA**, assim composta: Professores Doutores: **Rafael Gomes Siqueira - UFV-MG; Gustavo Vieira Veloso - UFV-MG, Hugo Galvão Cândido - UFV-MG e Guilherme Resende Corrêa - IGESC/UFU** orientador(a) do(a) candidato(a). A Defesa aconteceu de forma remota.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). **Guilherme Resende Corrêa - IGESC/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Mestre**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalho. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Resende Correa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/04/2025, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo Galvão Cândido, Usuário Externo**, em 03/04/2025, às 15:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Gomes Siqueira, Usuário Externo**, em 06/04/2025, às 20:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Vieira Veloso, Usuário Externo**, em 08/04/2025, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6146430** e o código CRC **82C32D39**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela bolsa concedida, bem como pelo apoio e pela infraestrutura que viabilizaram a realização desta pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, Guilherme Resende Corrêa, por todos os ensinamentos, pelas oportunidades e pelo direcionamento ao longo de todo esse percurso.

Agradeço aos meus pais, Cleide e Martins, por todo o apoio e amor incondicional, e por tornarem possível minha dedicação aos estudos.

Agradeço a todos os membros do Laboratório de Pedologia e Estudos da Paisagem (LAPEP). Stefany, Jonas, Pedro e ao agregado Pablo, por toda a troca de conhecimentos e pela ajuda nas tarefas diárias.

Agradeço ao Laboratório de Pedometria e Geoprocessamento (LabGeo), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por todo o apoio durante a pesquisa, especialmente ao Gustavo Veloso, pela colaboração essencial para a disponibilização de uma infraestrutura viável à realização deste trabalho.

Minha gratidão a todos os colegas, professores, técnicos e a todos que de alguma maneira fizeram parte dessa jornada.

RESUMO

O Pantanal é considerado Patrimônio Nacional pela Constituição brasileira e abriga sítios de relevância internacional pela Convenção de Áreas Úmidas. Este bioma está perdendo rapidamente seu status de fronteira natural devido a mudanças em sua cobertura vegetal, sendo as queimadas um dos seus principais problemas ambientais. Muitos impactos significativos, como a perda de habitats da fauna e da flora, a redução da biodiversidade, a emissão de gases de efeito estufa, além de riscos diretos à vida humana são causados pelo fogo. Em 2020, o INPE registrou recordes históricos de áreas queimadas no bioma. Esta pesquisa teve como objetivos: (1) predizer áreas de queimadas usando algoritmos de aprendizado de máquina; (2) determinar covariáveis naturais e antrópicas importantes para a predição; e (3) mapear áreas de maior ocorrência nos últimos 30 anos. A metodologia dividiu-se em três fases: criação do banco de dados, modelagem de tendências e treinamento/espacialização. Foram utilizados os algoritmos Random Forest (RF), Weighted k-Nearest Neighbor Classifier (KKNN) e Neural Networks Using Model Averaging (avNNet). Os resultados mostraram melhor desempenho do RF, embora todos os modelos tenham superestimado as áreas queimadas. As previsões concentraram-se no Sul do bioma, região com maior frequência histórica de queimadas. A umidade da vegetação foi a variável mais importante no RF, enquanto fatores antrópicos como, proximidade de estradas, centros urbanos, edificações e hidrografia mostraram significância em todos os modelos. A distribuição espacial da frequência de queimadas destaca a vulnerabilidade da região Sul do bioma, sobretudo nas áreas de fronteira.

Palavras-chave: Pantanal; Queimadas; Áreas úmidas; Incêndios; Modelagem.

ABSTRACT

The Pantanal is recognized as a National Heritage by the Brazilian Constitution and hosts internationally significant sites under the Ramsar Convention on Wetlands. This biome is rapidly losing its status as a natural frontier due to changes in its vegetation cover, with fires being one of its main environmental problems. Many significant impacts, such as the loss of fauna and flora habitats, the reduction of biodiversity, the emission of greenhouse gases, and direct risks to human life are caused by fires. In 2020, INPE recorded historical records of burned areas in the biome. This research aimed to: (1) predict areas of fires using machine learning algorithms; (2) determine important natural and anthropogenic covariates for prediction; and (3) map areas of greatest occurrence in the last 30 years. The methodology was divided into three phases: creation of the database, trend modeling, and training/spatialization. The Random Forest (RF), Weighted k-Nearest Neighbor Classifier (KKNN) and Neural Networks Using Model Averaging (avNNet) algorithms were used. The results showed better performance of RF, although all models overestimated the burned areas. The predictions were concentrated in the south of the biome, a region with the highest historical frequency of fires. Vegetation moisture was the most important variable in RF, while anthropogenic factors such as proximity to roads, urban centers, buildings and waterways showed significance in all models. The spatial distribution of the frequency of fires highlights the vulnerability of the southern region of the biome, especially in the border areas.

Keywords: Pantanal; Burnings; Wetlands; Fires; Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa hipsométrico da Bacia do Alto Paraguai	10
Figura 2. Mapa de solos do Pantanal	11
Figura 3. Mapa hidrográfico da Bacia do Alto Paraguai	13
Figura 4. Mapa de vegetação do bioma Pantanal	14
Figura 5. Fluxograma metodológico	16
Figura 6. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de máxima, 2020	24
Figura 7. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de mínima, 2014	25
Figura 8. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de mediana, 2009	26
Figura 9. Gráfico de área queimada por ano no bioma Pantanal (ha).	28
Figura 10. Mapa de frequência de queimada no bioma Pantanal (1993-2022)	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

avNNet - *Neural Networks Using Model Averaging*

BAP - Bacia do Alto Paraguai

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

KKNN - *Weighted k-Nearest Neighbor Classifier*

PDP- *Partial Dependence Plot*

RF- *Random Forest*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAIS E MÉTODOS	9
2.1. Área de estudo	9
2.2. Métodos	15
2.2.1. Criação do banco de dados	17
2.2.2. Modelagem e tendência de queimadas	19
2.2.3. Treinamento, espacialização da tendência	20
3. RESULTADOS	23
4. DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÕES	35
6. REFERÊNCIAS	36
7. ANEXOS	41

1. INTRODUÇÃO

O Pantanal, também conhecido como “terra das águas” e considerado Patrimônio Nacional pela Constituição brasileira de 1988 e Reserva da Biosfera pela UNESCO (MMA, 2022), abriga sítios de relevância internacional pela Convenção de Áreas Úmidas – RAMSAR (Hariis et al. 2006). O bioma compreende um mosaico de paisagens com aspectos pedológicos, geomorfológicos e hidrológicos distintos, atuando como um grande reservatório de água (Rezende Filho et al. 2012). Esse imenso reservatório de água doce tem papel primordial na estabilização do clima brasileiro, contribuindo para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Essa contribuição é especialmente relevante devido à características das áreas úmidas, que atuam como sumidouros de carbono ao acumular matéria orgânica em seus solos alagados (Marengo et al. 2016). Esse bioma está perdendo rapidamente seu status de uma das últimas fronteiras naturais do planeta, em decorrência da crescente mudança na sua cobertura vegetal (Rezende Filho et al. 2012).

O Pantanal armazena a água dos planaltos ao seu redor durante o período chuvoso, que é depositada de forma gradual nas regiões mais baixas do Rio Paraguai. Esse processo adia os fluxos máximos do Rio Paraná diminuindo inundações a jusante, ao passo que durante as secas o Pantanal libera água continuamente para essa região (Marengo e Oliveira, 2016). As estações do ano, a distribuição de precipitação e a forma de drenagem da Bacia do Alto Paraguai - BAP influenciam nos padrões de cheia no Pantanal. As alterações do uso e cobertura da terra provocam alterações nesse ciclo hidrológico que podem resultar em mudanças sobre a duração, intensidade e frequência das precipitações e inundações sobre o bioma (Ramos, et al., 2020).

A BAP, a partir da década de 1970, passou por profundas modificações na sua paisagem, causadas pela ocupação humana, especialmente pela substituição da cobertura vegetal original por pastagens e cultivos agrícolas (Coutinho et al. 2016). A agricultura mecanizada para produção de grãos e o avanço das cidades resultaram em graves problemas de erosão nos planaltos e assoreamento de rios na planície, como o caso do rio Taquari, sendo considerado um dos mais graves problemas ambientais e socioeconômico do Pantanal (Zumak, et. al., 2021; Fiori, el al.,2001). Além do assoreamento dos rios, outro problema que tem causado grande impacto sobre os ambientes do Pantanal são as queimadas.

A morte de estratos arbóreos, causados pela ocorrência de queimadas, tem simplificado a diversidade da vegetação. A perda da biomassa lenhosa no bioma aumenta a biomassa de gramíneas que são mais combustíveis, principalmente as gramíneas exóticas utilizadas nas pastagens (Garcia et al., 2021). Apesar de uma vegetação muito resiliente aos ciclos de secas e cheias, a sua maior homogeneização para um sistema predominantemente seco pode resultar no desequilíbrio e mudança permanente da paisagem (Pott e Silva, 2015; Silva et al., 2010). Ademais, as queimadas acarretam uma série de impactos significativos, tais como a perda de habitats da fauna e da flora, a redução da biodiversidade, a emissão de gases de efeito estufa, a poluição atmosférica, a degradação da camada orgânica do solo e a alteração de suas propriedades físicas e químicas. Além disso, representam riscos diretos à vida humana, como o aumento de problemas respiratórios e a ocorrência de acidentes durante o combate ao fogo (Viganó et al., 2017; Rodrigues et al., 2002).

Grande parte dos incêndios vêm de causas antrópicas, tendo em vista que os maiores incêndios ocorrem durante as estações secas, ao passo que os incêndios naturais se dão na transição da estação chuvosa para a seca com a incidência de raios (Garcia, 2021). Essas queimadas ocorrem pelo Pantanal há muitos anos, mas somadas às mudanças climáticas e a diminuição de áreas úmidas, a intensidade e a frequência dos incêndios aumentam causando mudanças ambientais negativas significativas (Garcia, 2021).

A queima controlada, prática comum no Pantanal, constitui uma técnica empregada no manejo de sistemas agrossilvopastoris, e pode ser aplicada como um método preventivo de grandes incêndios, à medida que ela diminui a biomassa seca acumulada (Antunes e Esquerdo, 2009). A fiscalização e normatização da queima controlada pode oferecer um manejo para minimizar os impactos do fogo, se realizado criteriosamente segundo as condições ambientais dos locais. Ao passo que a falta de fiscalização por número insuficiente de agentes ambientais e a não instrução dos trabalhadores das fazendas na condução da queima controlada, reduzem a segurança da prática (Rodrigues et al., 2002). Sem a devida fiscalização os incêndios podem sair de controle e alcançar enormes proporções.

No ano de 2020 as queimadas no Pantanal bateram recorde, com as maiores áreas queimadas em todos os registros históricos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE, que contabilizou mais de 22 mil focos de incêndio (Jucá e Bronze,

2021). Uma seca severa atingiu a BAP em 2019 e 2020, resultado de mudanças na circulação atmosférica próxima a superfície e a redução do fluxo de umidade vinda da Amazônia. A seca, junto às altas temperaturas favoreceram a propagação de incêndios que avançaram sobre o Pantanal e o sul da Amazônia, causando enormes impactos ambientais, sociais e econômicos (Marengo et al., 2021). Com as mudanças climáticas, o aumento de eventos extremos de seca será mais frequente e favorável à propagação do fogo no bioma, ameaçando sua fauna e flora (Marengo, 2016).

Conservar os recursos naturais do Pantanal é fundamental para a segurança hídrica, manutenção da biodiversidade e estabilidade das paisagens. Frente às tendências climáticas e as pressões antrópicas, o Pantanal, como suas características bióticas e abióticas, deixará de existir caso nada seja feito (Marengo et al., 2021). Libonati (2020) apresenta a necessidade de estudos que analisem os ciclos de fogo e os fatores naturais e antrópicos que contribuem para a ocorrência de queimadas de grandes dimensões. Desse modo, a modelagem preditiva dos fatores ambientais e antrópicos que contribuem para os focos de incêndios e queimadas no Pantanal, é uma ferramenta que pode contribuir para construção de estratégias para a gestão/mitigação de queimadas a partir de respostas adquiridas pelos modelos.

Dado o contexto acima, a pesquisa foi realizada com a finalidade de: i) predizer áreas de queimadas no Pantanal por meio de algoritmos de aprendizado de máquina e avaliar a performance dos modelos de predição; ii) determinar e avaliar quais covariáveis naturais e antrópicos foram importantes para predição de queimadas no Pantanal; iii) mapear as áreas de maiores ocorrências de queimadas e analisar a dinâmica espaço temporal dessas áreas no Pantanal utilizando dados dos últimos 30 anos.

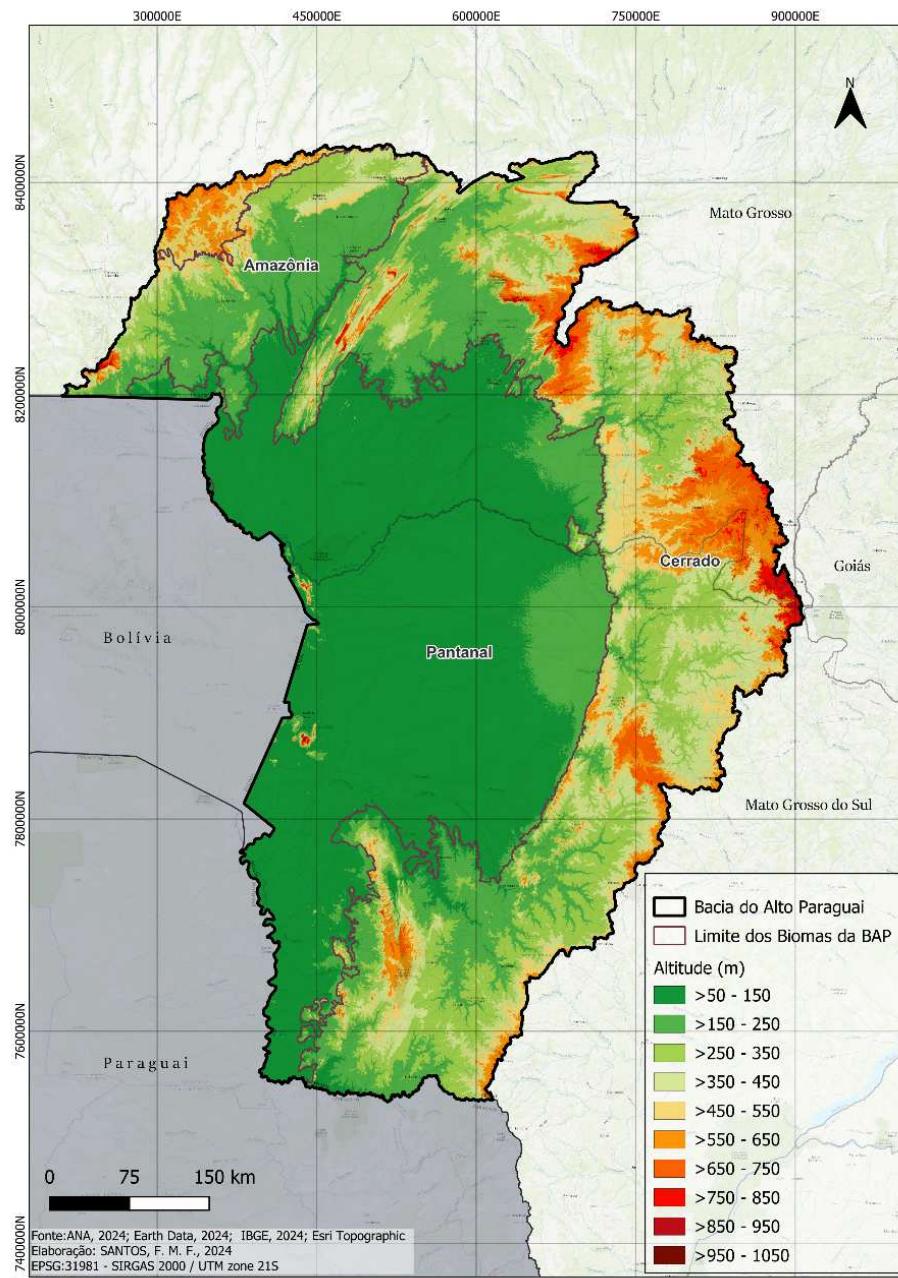
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O trabalho será desenvolvido no bioma Pantanal localizado no centro da América do Sul na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai (Embrapa, 2024). O bioma ocorre em uma área de aproximadamente 138.183 km² e se distribui entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Com aspectos de solo, vegetação, modo de inundação e relevo distintos, o bioma é caracterizado por 11 sub-regiões: Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Paraguai, Paiaguás, Nhecolândia, Abobral, Aquidauana, Miranda, Nabileque e Porto Murtinho (Silva e Abdon, 1998).

Na planície pantaneira, devido à baixa declividade, os rios extravasam e inundam grandes áreas nas épocas chuvosas, formando uma diversidade de ecossistemas (Rodrigues et al., 2002). O Pantanal apresenta altitudes menores que 150 m, exceto na Morraria do Urucum e na Serra do Amolar, ao passo que os planaltos ao seu redor, ocupados pela vegetação do Cerrado e da Amazônia, possuem altitude superior a 250 m (Figura 1).

Figura 1. Mapa hipsométrico da Bacia do Alto Paraguai.

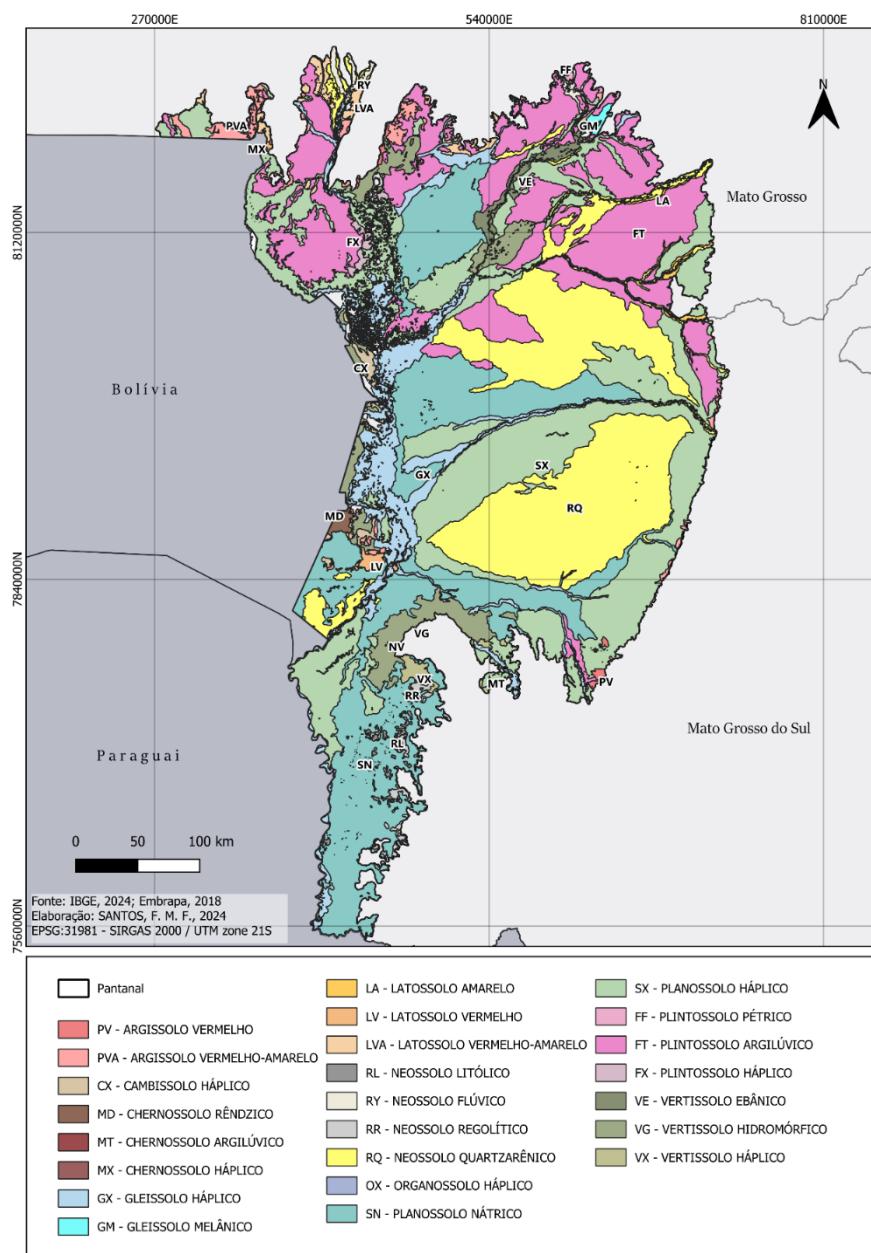


Fonte: ANA, 2024; Earth Data, 2024.

As principais classes de solos que ocorrem na área de estudo são: Neossolos Quartzarênicos, Planossolos Nátricos e Háplicos, e Plintossolos Argilúvicos. Os Neossolos Quartzarênicos ocorrem em áreas expressivas, principalmente nas áreas centrais do bioma (Figura 2). São solos quartzosos que não possuem horizonte B e apresentam textura de areia ou areia franca (Santos et al., 2018). Os Planossolos Nátricos e Háplicos aparecem especialmente no Sul do Pantanal e ao redor dos planaltos, são solos sujeitos a hidromorfismo que apresentam um horizonte B plânico,

abaixo de A ou E, mais argiloso e com saturação por sódio e de caráter alcalino quando nátricos (Resende et al., 2014; Santos et al., 2018). Outro solo que ocorre com mais frequência na planície é o Plintossolo Argilúvico, especialmente no Norte do bioma, no estado do Mato Grosso (Figura 2). Estes são solos relacionados a ambientes de encharcamento, apresentando horizonte plíntico, mosqueados vermelhos ou vermelhos-amarelos, com horizonte B textural ou caráter argilúvico (Resende et al., 2014; Santos et al., 2018).

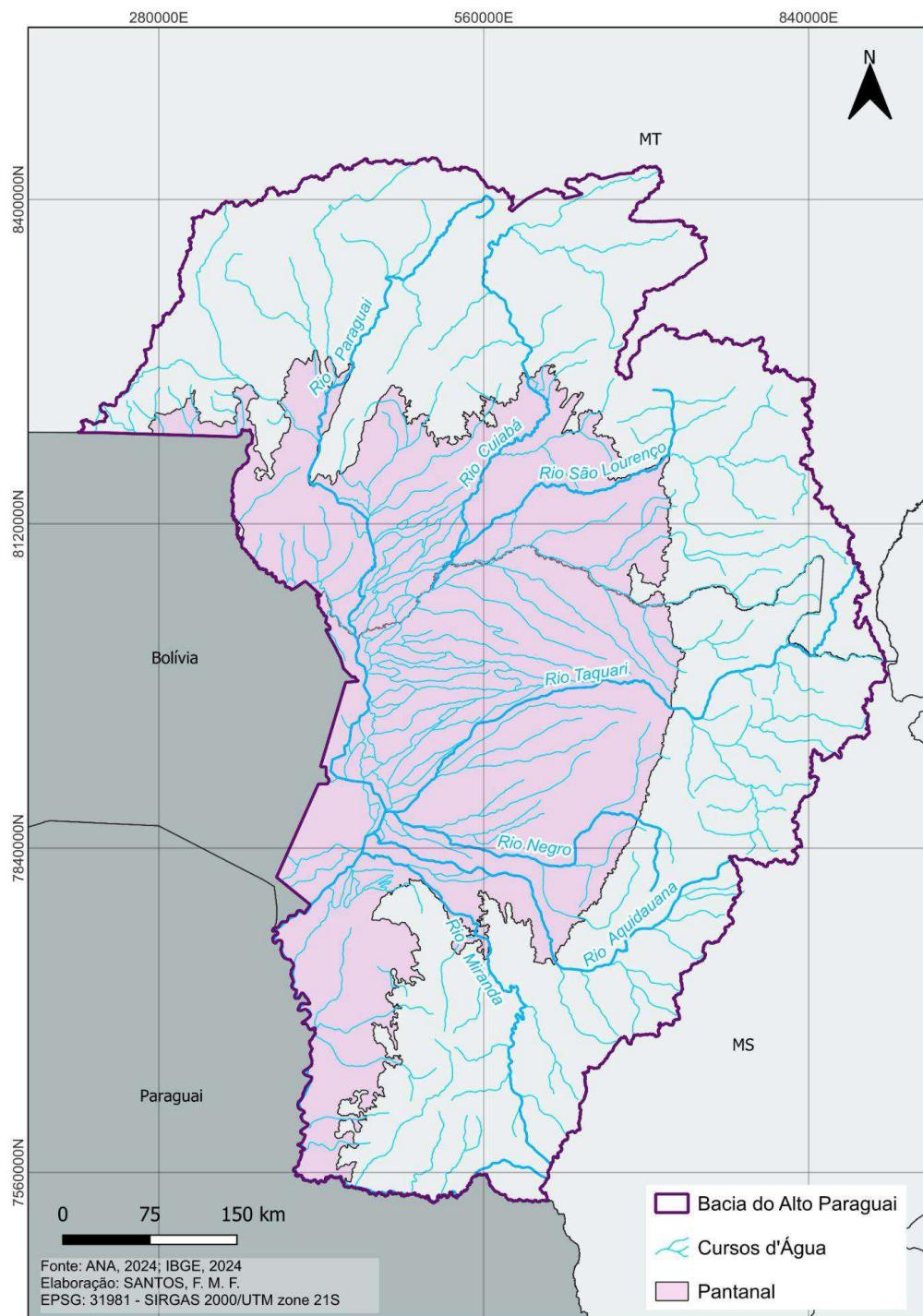
Figura 2. Mapa de solos do Pantanal.



Fonte: IBGE, 2024; Embrapa, 2018.

O bioma se insere na Bacia do Alto Paraguai – BAP, que é formada por 175 rios e apresenta como principal curso o rio Paraguai, que nasce em território brasileiro e se estende em direção a bacia do Prata (Coutinho et al. 2016). O clima é Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com verões quentes e chuvosos de novembro a março e invernos secos de abril a outubro, com média de temperatura de 24°C e precipitação média anual de 1100 mm (Resende et al., 2012). Durante a época chuvosa, o transbordamento dos rios tributários sobre a planície forma lagos extensos, enquanto na seca as águas recuam, criando-se um complexo mosaico de paisagens com lagos, corredores fluviais, pântanos e lagos perenes (Barbiero et al., 2007). O megaleque do Taquari, um dos maiores leques aluviais do mundo, forma a parte oriental do Pantanal (Figura 3) (Barbiero et al., 2008).

Figura 3. Mapa hidrográfico da Bacia do Alto Paraguai

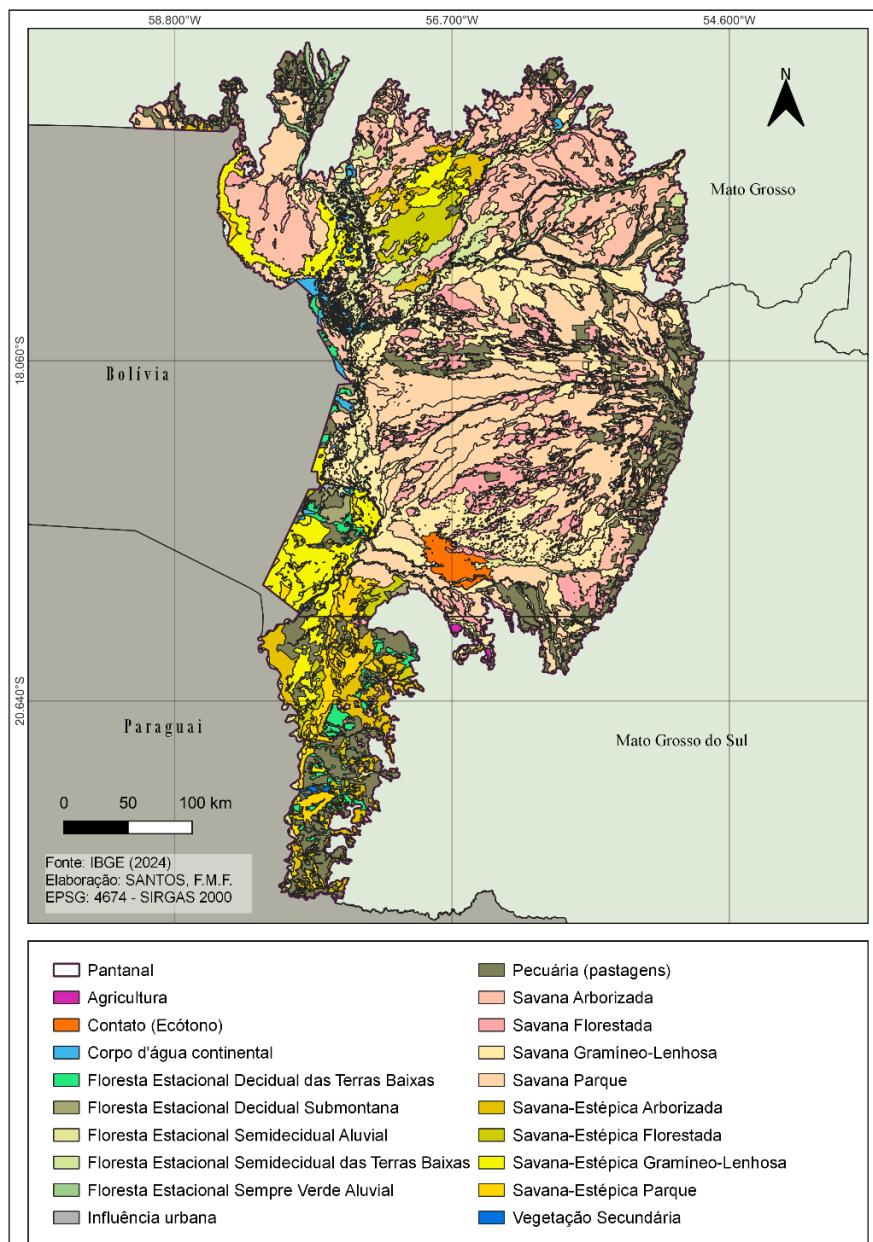


Fonte: ANA, 2024; IBGE, 2024.

As características hidrológicas e edáficas do bioma contribuem para a formação de um mosaico da vegetação. Campos de vegetação herbácea e cordilheiras com vegetação arbórea mais densa compõem diferentes fisionomias vegetais. O sistema fisionômico-ecológico do bioma inclui Florestas semideciduais aluviais e de terras

baixas, Savanas florestadas e arborizadas, além de Savanas parques, gramíneo-lenhosas e estépicas. Também estão presentes vegetações com influências lacustres, como buritizais, cambarazais e brejos (Silva et al., 2000; Silva et al., 1998; IBGE, 2012). No leste do bioma, a influência do Cerrado resulta na predominância de fisionomias de Savana. Por outro lado, nas regiões oeste e sudoeste, sob influência do Chaco, predominam formações vegetais do tipo Savana-Estépica (Figura 4) (Silva et al., 2000).

Figura 4. Mapa de vegetação do bioma Pantanal.

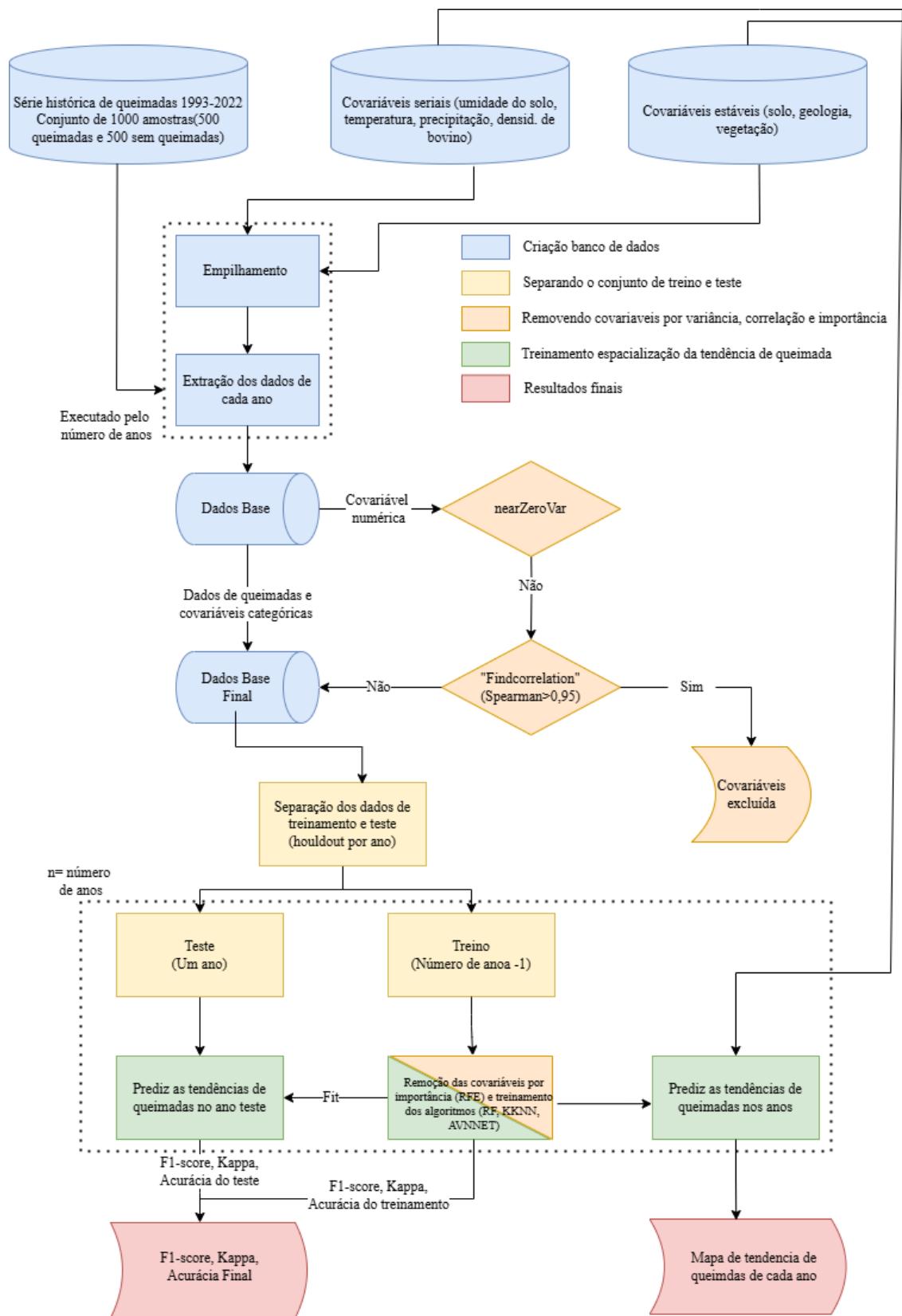


Fonte: IBGE, 2024

2.2. Métodos

Os processos metodológicos utilizados no trabalho estão ilustrados no fluxograma (Figura 5). A metodologia pode ser dividida em 3 fases: Criação do banco de dados, Modelagem da tendência de queimadas, espacialização da tendência.

Figura 5. Fluxograma metodológico.



Fonte: A autora, 2024.

2.2.1. Criação do banco de dados

As informações de queimadas e uso e cobertura do solo foram obtidas da Coleção 7.1 do conjunto de dados do MapBiomas que inclui dados de uso e cobertura da terra de 1985 até o presente (MapBiomas Project, 2023). Foram extraídos os dados anuais de áreas queimadas sobre o bioma entre os anos de 1993 a 2022. Os dados de queimadas e uso do solo do projeto MapBiomas são produzidos a partir de imagens Landsat com resolução de 30 metros (Mapbiomas, 2024). A coleta foi realizada de forma balanceada entre locais com ocorrência de queimadas e aqueles sem ocorrência, sendo 500 amostras coletadas para cada um dos dois grupos analisados em cada ano (regiões queimadas e não queimadas).

Os dados de precipitação anual utilizados foram coletados no *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data – CHIRPS*, que possui dados de precipitação global de 1981 até o presente com resolução espacial de 0,05° (Funk et. al., 2015). Os dados de umidade do solo foram obtidos no conjunto de dados do modelo *ERA5-Land hourly data from 1950 to present* pela volumetria de água no solo, com camada 1 de 0-7 cm e camada 2 de 7 – 28 cm. Os dados de temperatura também foram obtidos pelo ERA5 que possui dados de 1940 até o presente, por dados climáticos globais fornecidos pelo *Climate Change Service* da Copernicus (Hersbach et al., 2023). Os dados de umidade do solo e temperatura do ar são coletados a cada hora, sendo sintetizados em uma informação média de cada ano no período de tempo entre 1993 e 2022. Os dados foram reamostrados para 30 metros, sendo o padrão das outras variáveis.

Classe de solos e vegetação

Os dados de solo foram adquiridos no Banco de Dados e Informações Ambientais do IBGE (2024), e selecionadas as classes do segundo nível categórico (subordens). Dados relacionados à vegetação também foram obtidos no Banco de Dados e Informações Ambientais do IBGE, selecionados pela Denominação da Cobertura Vegetal predominante. Ambos foram adquiridos em formato *shapefile* e transformados em *raster* na resolução de 30 m.

Umidade da vegetação

Para avaliar o efeito da umidade da vegetação no controle das queimadas no pantanal, foi calculado o Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI – *Normalized Difference Water Index*) (EQ 1) descrito por Gao et al. (1996). Esse índice foi calculado usando dados dos satélites Landsat 5, 7 e 8 para os anos avaliados. Os dados anuais foram calculados desconsiderando nuvens e tirando média das passagens do satélite na área de trabalho durante cada ano.

$$NDWI = \frac{\rho_{0.86 \mu m} - \rho_{1.24 \mu m}}{\rho_{0.86 \mu m} + \rho_{1.24 \mu m}} \quad (1)$$

Áreas urbanas, edificações e hidrografia

Os dados de áreas urbanas também foram obtidos também pelo IBGE (2024). Para a obtenção dos dados de rodovias foram utilizados os dados abertos do *OpenStreetMap* (GEOFABRIK, 2024). Os dados de edificações foram obtidos do banco de dados do *Google Open Buildings*, desenvolvido pelo *Google Research* a partir de técnicas de inteligência artificial, que fornece informações sobre a localização de edificações (Google Research, 2024). Os dados hidrológicos dos principais cursos d’água do bioma foram coletados no catálogo de metadados da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2018). Sobre essas informações foram aplicadas a distância euclidiana utilizando a resolução de 30 metros, utilizando a área de trabalho como limite. Para o cálculo das distâncias euclidianas foi utilizado o pacote *Grass* (GRASS-PROJECT, 2013) no software QGIS (2024).

Densidade de bovinos

Os dados relacionados à quantidade de bovinos foram obtidos do Efetivo dos rebanhos bovinos da Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2024). Os dados anuais foram utilizados no cálculo da densidade bovina em cada município contido dentro do bioma Pantanal. Para avaliação da densidade bovina também foi calculado a área total em cada município utilizada para pecuária, obtida do conjunto de dados Mapbiomas. A densidade anual ponderada foi agrupada aos outros dados obtidos anualmente

As covariáveis foram agrupadas em covariáveis seriais e estáveis. As seriais são as covariáveis que variam ano a ano, como temperatura e precipitação, densidade de bovinos, e as estáveis são as que se mantêm na escala de tempo do estudo, como solos e distância euclidiana a áreas urbanas. Todas as covariáveis foram transformadas para o formato *raster* e empilhadas para a extração dos dados dos grupos de queimadas e não queimadas para cada ano.

2.2.2. Modelagem da tendência de queimadas

O processo de modelagem da tendência de queimadas segue o fluxograma (Figura 5). O processo de modelagem pode ser separado em três partes principais: remoção de covariáveis, treinamento e teste, e espacialização da tendência de queimadas. Todos os processos da modelagem foram realizados no software R (R Core Team, 2023), seguindo os princípios descritos em Fernandes-Filho et al. (2024).

A remoção de covariáveis tem como princípio o aumento da parcimônia do modelo final e a redução do esforço computacional durante seu treinamento, além de melhorar a interpretabilidade, eliminar redundâncias e diminuir a possibilidade de ocorrência de *overfitting* (Fernandes-Filho et al., 2024; Gomes et al., 2019; Castro Paes et al., 2023). A remoção de covariáveis é subdividida em três fases: (1) remoção por variância próxima de zero, (2) remoção por correlação e (3) remoção pela importância para o algoritmo.

A primeira fase (remoção por variância próxima a zero) é realizada para eliminar covariáveis que contribuem pouco para o modelo e aumentam o custo computacional (Castro Paes et al., 2023; Mello et al., 2023). Esse processo foi conduzido utilizando a função *nearZeroVar* do pacote Caret (Kuhn et al., 2020). A remoção ocorreu exclusivamente no conjunto de covariáveis, e aquelas que apresentaram variância consideravelmente superior à 0 foram posteriormente avaliadas na segunda fase do processo de remoção.

A segunda fase (remoção por covariância) tem como objetivo eliminar covariáveis com correlações elevadas, uma vez que alguns algoritmos são penalizados ao lidar com conjuntos de covariáveis altamente correlacionadas. O processo foi conduzido utilizando a correlação de Spearman, com um limiar de 95%. As covariáveis que apresentaram correlação superior nesse limite (em pares) foram avaliadas com base no somatório da covariância com todas as outras covariáveis numéricas, sendo

removida aquela com a maior covariância. Esse procedimento foi realizado por meio da função *findCorrelation* do pacote *Caret* (Kuhn et al., 2020).

Após a seleção final das covariáveis, estas foram integradas às amostras, dando início à terceira fase de remoção, na qual os dados foram divididos em grupos de treinamento e teste. O processo de separação dos grupos de treinamento e teste foi realizado de forma a reproduzir a situação mais próxima daquela em que o modelo final seria utilizado. Para isso, uma modificação do método “*nested*” *leave-one-out* foi empregada, na qual o grupo de treinamento de um ano foi removido. Esse grupo foi utilizado para avaliar a performance do modelo treinado. O processo de separação dos grupos, assim como os passos subsequentes da modelagem, foi repetido um número de vezes equivalente ao total de anos avaliados (29 anos). Os dados do ano de 1999 foram retirados das análises pois apresentaram erro sobre os dados de áreas queimadas produzidos pelo MapBiomas.

A remoção pela importância (fase 3) foi realizada pela função *Recursive Feature Elimination* (RFE) que elimina interativa e gradualmente variáveis menos importante para o algoritmo avaliado. Essa função diminui a dimensionalidade dos dados, melhorando o desempenho do modelo com menor gasto computacional (Kuhn, 2013). O RFE foi realizado usando o método da validação cruzada com uma repetição, 5 pareamentos internos de cada algoritmo avaliados e o índice Kappa sendo o parâmetro de performance de escolha (EQ 2). Os algoritmos utilizados foram o *Random Forest* (RF), *Weighted k-Nearest Neighbor Classifier* (KKNN) e *Neural Networks Using Model Averaging (avNNet)*. Os hiperparâmetros internos são valores internos dos algoritmos que quando ajustados causam melhorias significativas na performance do modelo final. Os hiperparâmetros de cada algoritmo são descritos no manual do pacote *Caret* no capítulo 6, (“Modelos descritos” disponível em <https://topepo.github.io/caret/train-models-by-tag.html>). As covariáveis selecionadas nesta fase foram utilizadas no treinamento do modelo final de cada algoritmo.

2.2.3. Treinamento e espacialização da tendência.

O treinamento foi realizado utilizando o conjunto de covariáveis selecionado para cada algoritmo. A otimização do modelo final de cada algoritmo foi conduzida por meio de validação cruzada repetida (*repeatedcv*), com três repetições, cinco parâmetros

internos ajustados para cada algoritmo e o coeficiente Kappa como métrica de performance para otimização. Os modelos finais gerados para cada ano foram utilizados para prever a estimativa de área queimada no ano que havia sido excluído do conjunto de treinamento.

Os resultados foram avaliados utilizando os índices de performance Kappa (EQ 2), Acurácia (EQ 3), F1-score (EQ 4), sensibilidade (EQ 5) e especificidade (EQ 6).

O índice Kappa oferece uma medida numérica que quantifica o nível de concordância entre os resultados da previsão e um valor de referência. Ele é derivado da matriz de confusão (Morales et al., 2018) (EQ. 2)), e o valor de kappa varia de 0 (indicando nenhuma concordância) a 1 (representando concordância quase perfeita) (Landis e Koch, 1977).

$$Kappa = \frac{n \sum_{i=1}^c n_{ii} - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c n_i + n_{+i}} \quad (2)$$

Onde:

K = Kappa estimado;

n_{ii} = valor da linha i e coluna i (valor observado);

n_{i+} = soma da linha i , e $n + i$ e a soma da coluna i da matriz de confusão (produto das marginais, sendo a concordância esperada);

n = número total de amostras;

C = número total categorias na classificação

A métrica de acurácia reflete o desempenho geral do modelo de previsão final ao avaliar o número de previsões corretas feitas pelos modelos. Ela indica a probabilidade de que as classes classificadas correspondam aos dados reais, com valores variando de 0 a 1.

$$Acurácia = \frac{\sum xi}{n} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

x_i = soma de todos os elementos diagonais da matriz de confusão

n = número total de amostras.

O teste F1-score é um parâmetro de desempenho usado para avaliar o desempenho de modelos de classificação em machine learning. Ele calcula a média harmônica de precisão e recall, sendo indicado para avaliar conjuntos de dados com amostras de classes desbalanceadas (Sasaki, 2007). Este parâmetro é útil para avaliar sistemas de classificação binária que contêm apenas valores 'positivos' ou 'negativos'. Ao considerar falsos positivos e falsos negativos, o F1-score fornece uma avaliação abrangente do desempenho da execução do modelo.

$$F - 1 \text{ Score} = \frac{2 * (\text{Precisão} . \text{Recall})}{(\text{Precisão} + \text{Recall})} \quad (4)$$

$$F - 1 \text{ Score} = \frac{(T.P)}{[(T.P)]} + \frac{1}{2} (F.P + F.N) \quad (4)$$

Onde:

T.P = Verdadeiro positivo

F.P = Falso positivo

F.N = Falso negativo

A sensibilidade média mede a capacidade dos modelos de identificar corretamente os casos positivos de uma classe, ou seja, aqueles que realmente pertencem a ela, sendo útil para avaliar os erros de omissão. Já a especificidade média avalia a capacidade dos modelos de identificar corretamente os casos negativos, ou seja, aqueles que não pertencem à classe, permitindo a análise dos erros de comissão.

$$\text{Sensibilidade} = \frac{\sum_{1}^n \left(\frac{T.P}{T.P + F.N} \right)}{n} \quad (5)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{\sum_{1}^n \left(\frac{T.N}{T.N + F.P} \right)}{n} \quad (6)$$

Onde:

TP = número de verdadeiros positivos

FP = falsos positivos

TP = falsos negativos

n = número de classes existentes.

Para a criação do mapa de frequência das queimadas observadas foi utilizado a calculadora de *raster*, disponível no software QGIS (2025), somando os *rasters* dos anos observados gerando um produto que determina quantas vezes o evento de queimada ocorreu em um determinado pixel.

3. RESULTADOS

Performance dos Modelos

Os modelos selecionados apresentaram acurácia superior a 0,6 e coeficiente Kappa acima de 0,3, indicando uma força de concordância moderada (Tabela 1). O modelo que obteve o melhor desempenho nas métricas avaliadas foi o RF, apresentando apenas especificidade inferior à dos demais modelos. Isso indica que o RF tende a classificar mais áreas não queimadas como queimadas, falsos positivos. No entanto, seu F1-score mais elevado sugere um melhor equilíbrio na detecção de positivos e negativos (queimadas e não queimadas). As métricas dos modelos KKNN e AVENNET foram semelhantes, porém ligeiramente superiores para o primeiro. Os valores de F1-score destes modelos indicam desempenhos moderados na predição, além da menor sensibilidade em relação ao RF, indicando problemas em predizer casos positivos.

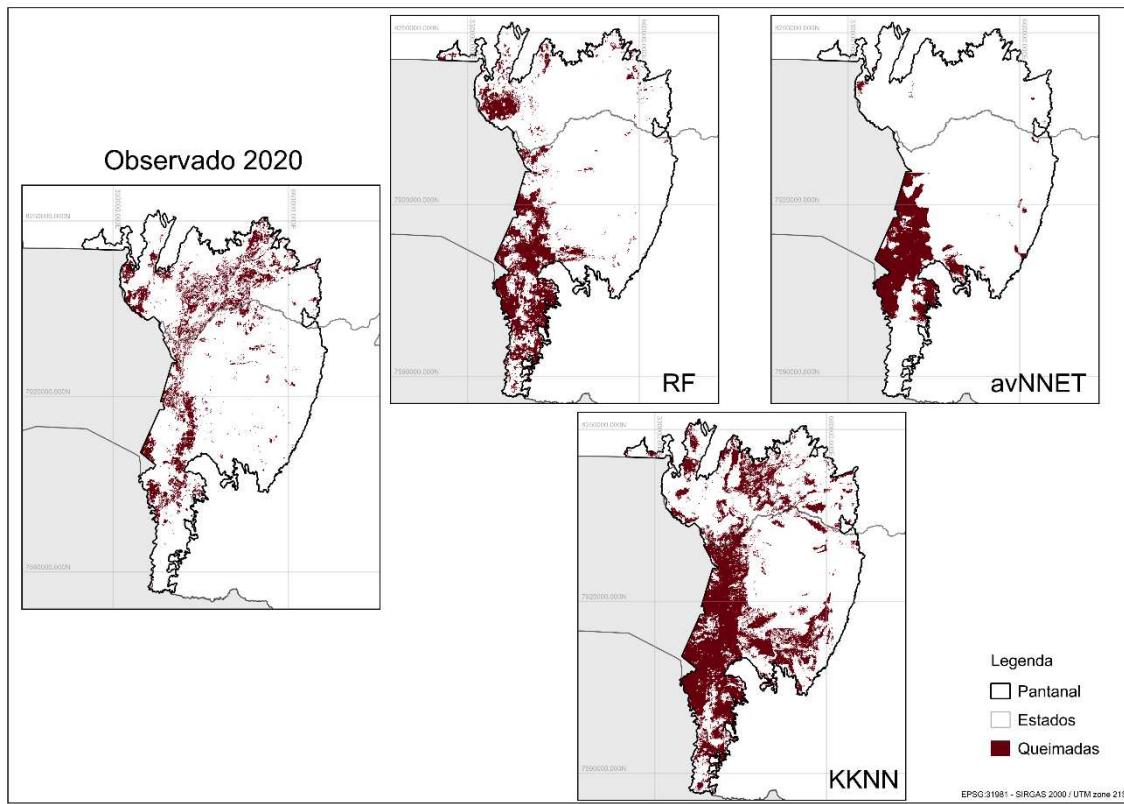
Tabela 1. Performance dos modelos na predição das queimadas no Pantanal 1993-2022.

Modelo	Acurácia	F1- score	Kappa	Sensibilidade	Especificidade
RF	0.6843	0.7148	0.3701	0.7980	0.5728
KKNN	0.6726	0.6786	0.3455	0.6972	0.6484
AVENNET	0.6676	0.6718	0.3354	0.6932	0.6422

A análise dos mapas gerados pelos modelos para os anos de maior, menor e mediana ocorrência de queimadas (2020, 2014 e 2009) mostra que, em todos os casos, as áreas queimadas estimadas foram superiores às ocorrências observadas. Os índices de Kappa (Tabela 1) indicam que a concordância dos modelos com os valores reais foi moderada, entretanto, a complexidade dos eventos de queimadas pode ser melhor

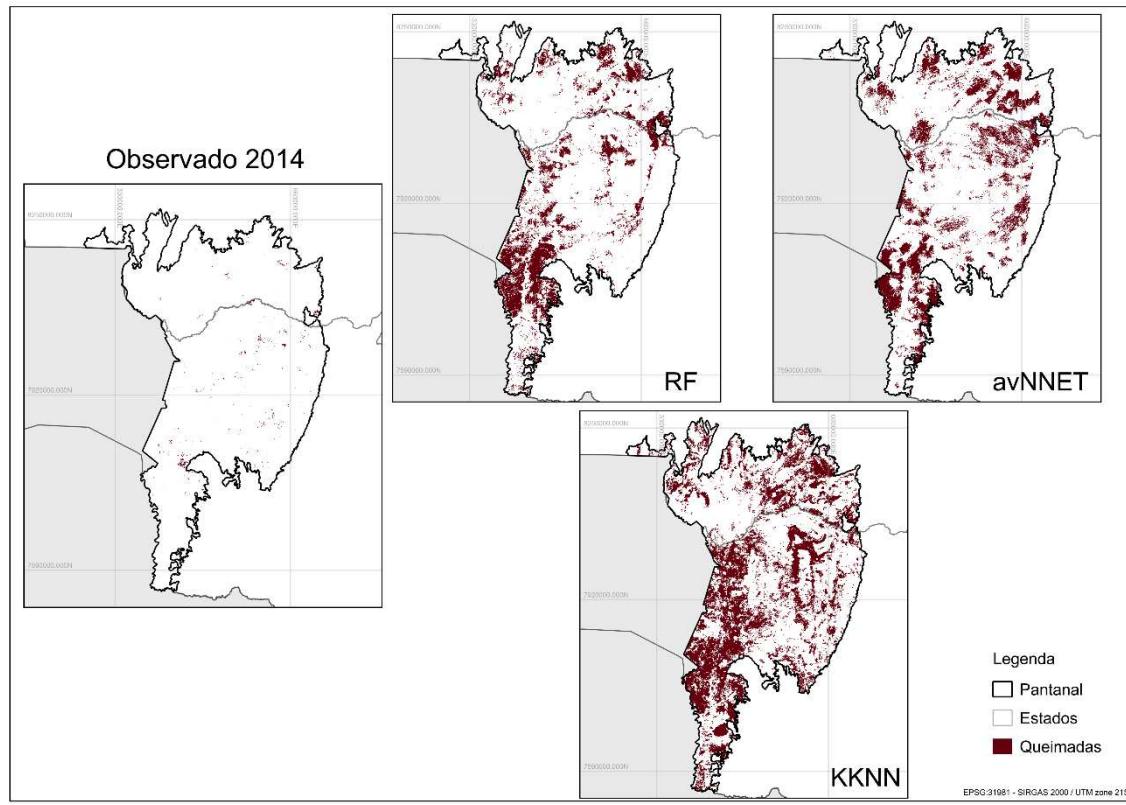
explicada observando as métricas de F1-score, Sensibilidade e especificidade nos modelos. A região sul do bioma, próxima às fronteiras do país, concentra grande parte das áreas estimadas pelos modelos nos anos analisados, sugerindo que os modelos conseguem identificar e representar as tendências gerais das áreas queimadas ao longo do tempo, mas têm dificuldades em prever com precisão os valores exatos das áreas queimadas em cada ano específico.

Figura 6. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de máxima, 2020.



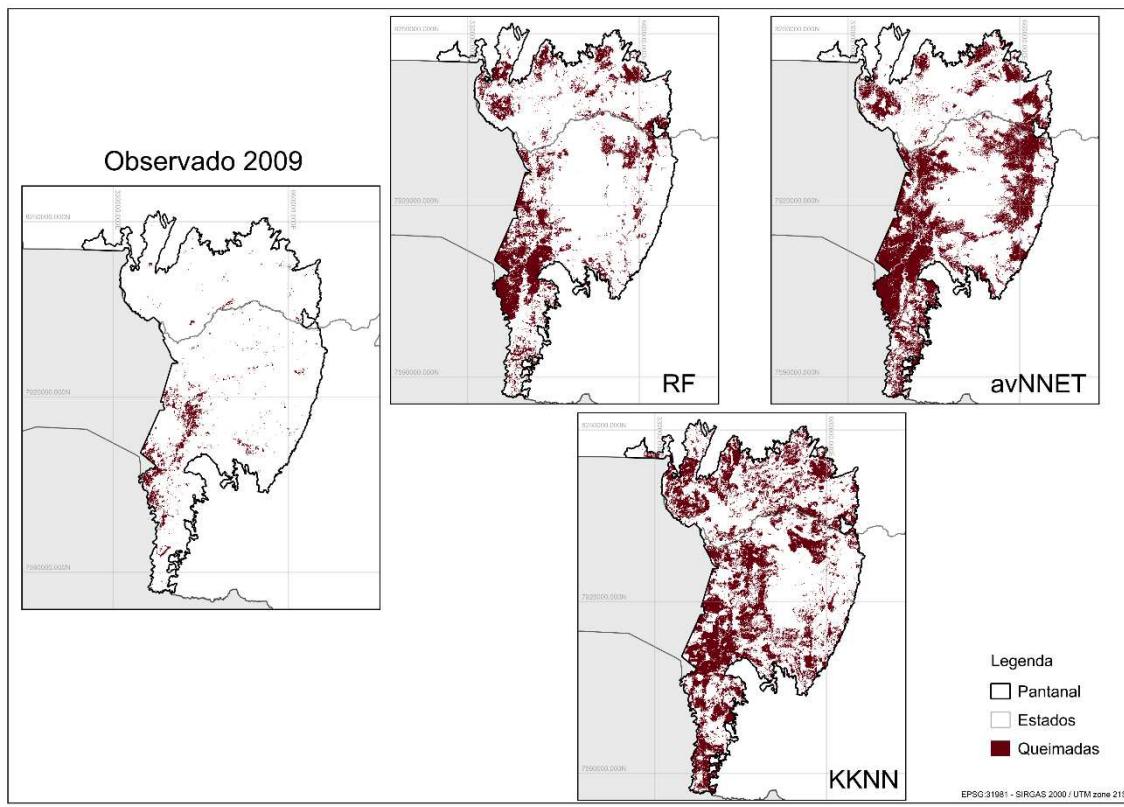
Fonte: A autora, 2024.

Figura 7. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de mínima, 2014.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 8. Queimadas no bioma Pantanal predita pelos modelos para o ano de mediana, 2009.



Fonte: A autora, 2024.

Análise das covariáveis

Os resultados apresentados por meio da importância relativa normalizada das variáveis permitem identificar quais fatores têm maior impacto nas previsões de cada modelo (Anexo 1).

No modelo RF, a umidade da vegetação apresentou a maior importância para a previsão da ocorrência de queimadas. Além disso, outras covariáveis relevantes foram a distância de cidades, a precipitação, a distância de estradas e a temperatura. Nesse modelo, as variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, tiveram um peso significativo, sugerindo que fatores ambientais desempenharam um papel considerável na previsão.

Por outro lado, nos modelos KKNN e AVNNET, a variável de maior importância foi a distância de estradas, seguida pela umidade da vegetação e pela distância de cidades. Nesses modelos, as variáveis ambientais, como temperatura e precipitação,

apresentaram menor influência na previsão, com contribuições inferiores a 50% e 25%, respectivamente.

A análise do *Partial Dependence Plot* (PDP) permite compreender como as covariáveis influenciam a predição de queimadas no modelo, mantendo as demais variáveis constantes (Anexo 2). Os resultados do modelo RF indicam que a umidade da vegetação, representada pelo índice NDWI, valores mais baixos do índice, que indicam vegetação seca, estão associados ao aumento da predição de incêndios. No entanto, essa tendência se inverte a partir do valor do índice de -0,3, correspondente a ambientes mais úmidos, onde a probabilidade de queimadas diminui.

Na distância das cidades, a ocorrência de queimadas aumenta com o crescimento da distância, atingindo um pico em aproximadamente 110 km. Em relação à precipitação, valores entre 1000 e 1500 mm apresentaram maior associação com a predição de queimadas, enquanto valores menores demonstraram influência negativa. Para a covariável distância de estradas, observou-se que as queimadas ocorrem principalmente em áreas situadas a menos de 5 km das rodovias, reduzindo-se progressivamente à medida que essa distância aumenta.

A temperatura apresentou uma relação positiva com a predição de queimadas. Valores inferiores a 298 °K ($\approx 25^{\circ}\text{C}$) estão associados a uma menor incidência de incêndios, enquanto temperaturas superiores a 300 °K ($\approx 27^{\circ}\text{C}$) favorecem a ocorrência desses eventos. A umidade do solo apresentou um comportamento não linear, com baixos e altos índices associados à predição de queimadas, com valores com baixa associação à queimadas de 0,2 e 0,3 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A densidade de bovinos em áreas de pastagem demonstrou que regiões com baixas densidades estão associadas a uma maior predição de queimadas, enquanto áreas com maior densidade bovina apresentaram menor incidência desses eventos. A distância de edificações revelou que a predição de queimadas é maior em áreas situadas a menos de 5 km dessas estruturas. A proximidade de hidrografia seguiu um padrão semelhante, onde o risco de queimadas é mais elevado em distâncias inferiores a 5 km e volta a crescer em áreas situadas a mais de 30 km das hidrografias.

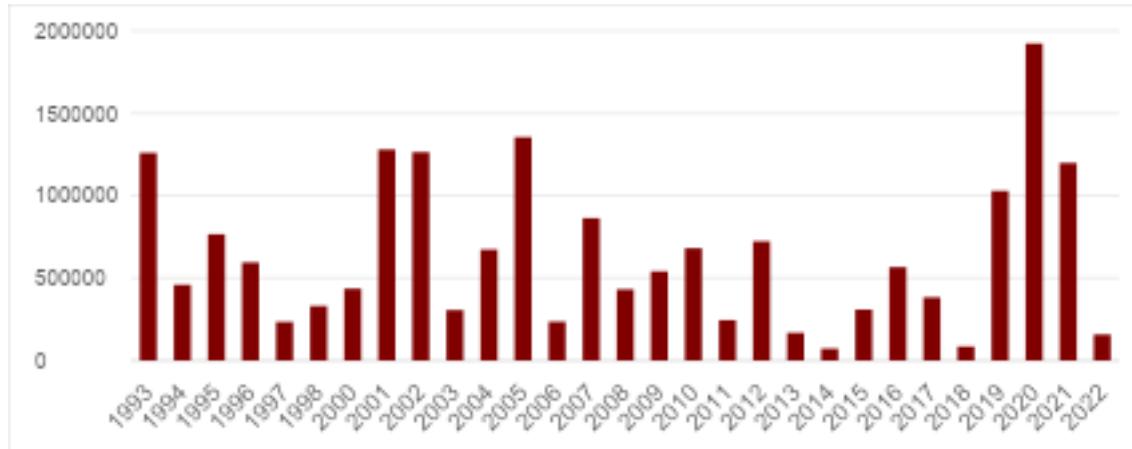
A partir desses resultados, percebe-se que a distância de edificações, estradas e hidrografias (presença de humanos pelo transporte hidroviário) indica um fator humano na ocorrência de queimadas. Além disso, altas temperaturas e baixa umidade da

vegetação favorecem eventos de incêndio, enquanto a precipitação moderada a alta também se relaciona com a predição desses eventos, o que pode estar relacionado com o aumento da biomassa com a incidência de maiores precipitações anuais. No caso da umidade do solo, a ausência de um padrão linear sugere uma relação mais complexa entre essa variável e a ocorrência de queimadas, sendo necessário um aprofundamento da análise de solo e suas propriedades químicas e físicas para melhor compreensão dessa dinâmica.

Análise da distribuição espaço-temporal

A análise da distribuição temporal das queimadas no bioma Pantanal revelou a extensão das áreas queimadas ao longo dos últimos 30 anos (Figura 9). O ano de 2020 apresentou o maior número de áreas afetadas pelo fogo, com quase 2 milhões de hectares queimados. Além disso, os anos de 1993, 2001, 2002, 2005, 2019 e 2021 também registraram queimadas de grande magnitude, com áreas superiores a 1 milhão de hectares queimados. Por outro lado, os anos de 2013, 2014, 2018 e 2022 foram marcados pelos menores índices de queimadas, com áreas queimadas inferiores a 200 mil hectares.

Figura 9. Gráfico de área queimada por ano no bioma Pantanal (ha).



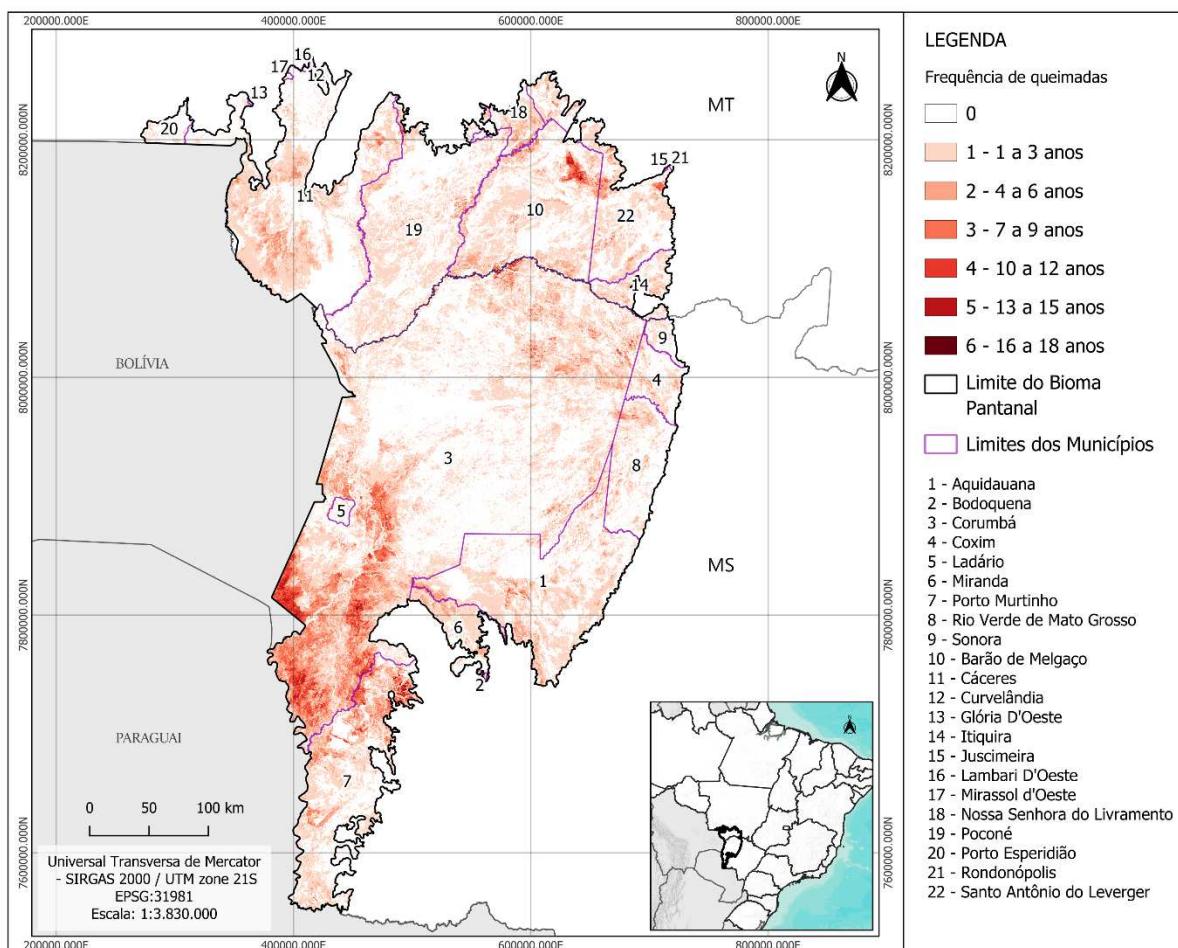
Fonte: A autora (2024)

No que se refere à distribuição espacial, o mapa que representa a frequência de queimadas no bioma Pantanal (Figura 10) foi categorizado em seis classes: Classe 1, ocorrência de queimadas entre 1 e 3 anos; Classe 2, ocorrência de queimadas entre 4 e 6 anos; Classe 3, ocorrência de queimadas entre 7 e 9 anos; Classe 4, ocorrência de

queimadas entre 10 e 12 anos; Classe 5, ocorrência de queimadas entre 13 e 15 anos; Classe 6, ocorrência de queimadas entre 16 e 18 anos.

Os resultados demonstraram que o estado de Mato Grosso do Sul concentra as maiores áreas queimadas ao longo do período analisado, além de apresentar as áreas com maior frequência de queimadas, pertencentes às classes 4, 5 e 6. Destacam-se os municípios de Corumbá (MS), Porto Murtinho (MS) e Barão de Melgaço (MT) como os que possuem maior ocorrência nas classes de alta frequência de queimadas.

Figura 10. Mapa de frequência de queimada no bioma Pantanal (1993-2022).



Fonte: A autora (2024)

4. DISCUSSÃO

Em estudos de modelagem e classificação de variáveis ambientais e ocorrência e severidade de fogo, o modelo Random Forest (RF) também demonstrou desempenho superior em relação aos demais modelos, conforme observado nos resultados deste trabalho (Gomes et al., 2019; Ma et al., 2020; Eslami et al., 2021; Chicas, 2022). Todos os modelos superestimaram as áreas queimadas em relação às áreas observadas. O modelo RF, em particular, concentrou suas previsões na porção Sul do bioma, onde também se registraram as maiores frequências de queimadas nos 30 anos analisados. Isso indica que o modelo conseguiu capturar os padrões gerais das queimadas no Pantanal. Apesar das dificuldades em prever com exatidão eventos em regiões atípicas, os valores de F1 mostram que o RF apresentou um desempenho superior na classificação das áreas queimadas em todos os anos analisados, quando comparado aos demais modelos.

Magalhães Neto e Evangelista (2022) identificaram que, em 2020, houve uma anomalia na distribuição das queimadas, concentrando-se no Centro-Oeste e Norte do bioma — regiões historicamente de baixa ocorrência de incêndios. O modelo RF não conseguiu prever essa anomalia, simulando queimadas predominantemente no Sul do Pantanal, onde a frequência de incêndios é naturalmente mais alta. Embora as condições climáticas extremas tenham favorecido a propagação do fogo, as atividades humanas foram, segundo os estudos, o fator fundamental para o início dos incêndios (Libonati, 2020). Como essas ações podem mudar abruptamente, o modelo não dispõe de dados suficientes para antecipar cenários anômalos, como o ocorrido em 2020.

A umidade da vegetação foi a covariável de maior importância para o modelo RF e a segunda mais relevante para os demais modelos, associando índices de vegetação mais seca à previsão de incêndios. Ambientes com vegetação seca e altas temperaturas no bioma tornam-se propícios para a propagação de queimadas (Garcia et al., 2021). Essa relação foi evidenciada pelos resultados da análise da umidade da vegetação e da temperatura.

Estudos recentes apontam que secas prolongadas, resultantes da redução da precipitação, impactam os níveis hidrográficos e o padrão de inundação, sendo fatores determinantes para a ocorrência de queimadas no Pantanal (Marengo, 2021). Entretanto, embora se esperasse que os incêndios estivessem diretamente relacionados a menores

índices de precipitação, o resultado do PDP indicou um aumento na predição de queimadas em áreas com precipitação entre 1000 e 1500 mm. Esse fato pode ser explicado ao se analisar a média de precipitação para a Bacia hidrográfica onde o bioma está inserido, BAP (Anexo 4), dos 30 anos analisados poucos anos registraram valores inferiores a 1200 mm, o que pode ter influenciado o modelo a não associar queimadas diretamente a períodos de baixa precipitação. Além disso, observa-se uma redução progressiva na média de precipitação a partir de 2018, tendência que se manteve até 2022. Esse fator foi crucial para eventos de mega incêndios, como o de 2020 (Marengo, 2021), mas, quando analisado isoladamente em bases anuais, não foi devidamente capturado pelo modelo.

Os cenários projetados de mudanças climáticas indicam um aumento nos extremos climáticos, com mais dias e noites quentes, períodos secos prolongados e chuvas intensas concentradas em períodos menores, fatores que ampliam o risco de incêndios florestais em áreas úmidas do Pantanal (Medeiros et al., 2022). Essas condições sugerem que longos períodos de seca, seguidos por eventos curtos de precipitação intensa, podem reduzir a disponibilidade de água no solo e alterar o pulso de inundação da região (Marengo, 2016). A análise da relação entre umidade do solo e a predição de queimadas revelou padrões não lineares, sugerindo uma dinâmica mais complexa. O fato de umidades mais altas estarem associadas à predição de incêndios pode ser explicado pela metodologia de obtenção dos dados de umidade do solo, que se baseia na textura e na classificação dos solos. Além disso, a maior frequência de queimadas (Figura 10) foi observada em áreas dominadas por Planossolos e Vertissolos (Figura 2), solos que apresentam maior retenção de água (Resende et al., 2014.), o que pode influenciar essa associação.

Como os raios são a principal fonte natural de incêndios, torna-se evidente que as atividades humanas representam a principal causa de ignição das queimadas no Pantanal, ao passo que os meses de maiores índices de queimadas são meses de baixa incidência de raios (Garcia, 2021). Análises espaço-temporais também revelaram uma baixa correlação entre a incidência de raios e a ocorrência de incêndios no bioma (Menezes et al., 2022). As variáveis relacionadas a fatores antrópicos indicadas pela presença de humanos, como a distância de estradas, cidades, edificações e hidrografia (hidrovias), tiveram grande importância em todos os modelos, indicando que os incêndios no Pantanal estão diretamente associados às atividades humanas e são

intensificados por condições climáticas mais secas. Essa relação também foi evidenciada em estudos sobre as queimadas de 2020 no bioma, que mostraram que a maioria dos focos de incêndio ocorreu a menos de 5 km de estradas e hidrovias, corroborando os resultados deste trabalho (Magalhães Neto e Evangelista, 2022).

Em contrapartida, os dados sobre a densidade de bovinos indicaram que áreas com menor densidade apresentaram maior associação com incêndios no bioma. Isso pode estar relacionado ao fato de que a presença do gado reduz a quantidade de material vegetal disponível, diminuindo a carga de combustível para queimadas em períodos propícios ao fogo. Esse fenômeno é conhecido na região como “boi bombeiro”, conceito desenvolvido há 40 anos em estudos da Embrapa (Abreu et al., 2024). Pesquisas recentes também identificaram uma relação entre a redução do efetivo bovino em determinado ano e o aumento do número de focos de calor no ano seguinte no município de Corumbá (Oliveira et al., 2021). Tanto o pastejo quanto o uso do fogo controlado podem atuar como ferramentas para a conservação de ecossistemas campestres, mas seu manejo deve seguir critérios científicos bem definidos para garantir benefícios à biodiversidade (Gonzaga, 2022; Tomas et al., 2024). Esse aspecto torna-se ainda mais relevante ao considerar que, nos últimos 20 anos, as áreas de pastagem têm sido as mais afetadas por queimadas no Pantanal, evidenciando a complexa relação entre a pecuária, o regime de fogo e a conservação do bioma (Correa, 2022, Tomas et al., 2024).

Apesar da dificuldade em determinar as regiões de ocorrência de incêndios pela instabilidade do fator humano, a distribuição espacial dos incêndios ao longo dos 30 anos analisados não se apresenta de forma completamente aleatória. Diversos fatores de práticas de manejo, gestão do território e características da região favorecem a ocorrência de queimadas (Matos, et. al, 2015). A distribuição da frequência de queimadas evidencia uma vulnerabilidade na porção Sul do bioma, especialmente nas regiões de fronteira (Figura 10). Tal suscetibilidade pode, também, ser atribuída ao difícil acesso a essas áreas pelas equipes de combate a incêndios, bem como às limitações no controle de incêndios em territórios de países vizinhos (Moreira, 2021). Isso demonstra que a falta de uma gestão integrada na proteção do bioma e nas articulações de prevenção e combate a incêndios contribui para que determinadas regiões sejam queimadas sucessivamente.

Um dos grandes impasses para a gestão dos incêndios no Pantanal é a falta de uma legislação ambiental própria para todo o bioma, essa condição faz com que cada estado estabeleça suas legislações de proteção. A divergência entre os dois estados fica evidente com a fragilidade das leis do Mato Grosso do Sul que não estabelecem restrições a atividades de grande impacto ambiental, como instalações de Pequena Central Hidrelétrica, carvoaria, mineração, pecuária intensiva e projetos agrícolas. Além de menores exigências de proteção da vegetação nativa em autorizações de supressão da vegetação e estabelecimento de áreas de preservação permanente, reserva legal e regiões de formações típicas como cordilheiras, capões e campos de murunduns (S.O.S Pantanal, 2023).

Em determinações sobre o fogo o Decreto nº 15.654, de 15 de abril de 2021, institui o Plano Estadual de Manejo Integrado do Fogo (PEMIF) para o estado de Mato Grosso do Sul. No inciso VI do artigo 38, capítulo IX, o decreto propõe a substituição da pastagem nativa pelo pastejo misto e pelo pastejo rotacionado como alternativas às práticas tradicionais de manejo do fogo (Mato Grosso do Sul, 2021). No entanto, além de não impedir a ocorrência de incêndios, essa alternativa pode favorecer o aumento de populações de espécies exóticas invasoras, impactando negativamente a biodiversidade do Pantanal (Tomas et al., 2024). Já no estado de Mato Grosso, o Projeto de Lei nº 728/2020 instituiu o Programa Estadual de Controle do Fogo (Mato Grosso, 2020). Essa legislação se baseia e se assemelha à Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024, que estabelece a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF). A PNMIF define diretrizes para o manejo do fogo por meio de práticas de queimas prescritas, regulamentadas e autorizadas pelos órgãos competentes, mas que sem as devidas fiscalizações podem afetar negativamente a integridade do bioma (Brasil, 2024; Tomas et al., 2024).

Reducir o estresse nas áreas úmidas, especialmente a ocorrência de incêndios, é uma medida essencial para minimizar os efeitos das mudanças climáticas sobre o bioma do Pantanal (Marengo, 2016). As tendências indicam um aumento na frequência de eventos climáticos extremos, tornando o ambiente ainda mais propenso a incêndios severos, que se estabelecem em cenários ambientais, sociais e econômicos complexos (Medeiros et al., 2022; Pivello, 2021). Diante desse cenário, é fundamental que diferentes setores da sociedade atuem para mitigar os impactos das queimadas no Pantanal.

O uso de tecnologias de sensoriamento remoto para identificar áreas com baixos índices de umidade da vegetação e pontos de calor é um recurso estratégico para a prevenção e combate ao fogo no bioma (Higa et al., 2022). Além disso, a intensificação da fiscalização em regiões mais suscetíveis a incêndios, especialmente aquelas próximas a áreas de maior atividade humana, pode reduzir a incidência de queimadas criminosas ou accidentais (Magalhães Neto e Evangelista, 2022).

O estabelecimento de brigadas treinadas em locais estratégicos, aliado ao treinamento de comunidades locais, é essencial para garantir uma resposta rápida e eficiente ao fogo (Berlinck, 2022; Pivello, 2021; Magalhães Neto e Evangelista, 2022). Paralelamente, o fortalecimento da aplicação da legislação ambiental, incluindo multas para infrações relacionadas ao uso inadequado do fogo, é uma ferramenta fundamental para coibir práticas que favorecem a propagação de incêndios (Berlinck, 2022; Libonati et al., 2021). A implementação dessas ações, aliada a políticas públicas eficazes e baseadas em ciência, é essencial para proteger o Pantanal.

5. CONCLUSÕES

O modelo RF apresentou um desempenho superior em comparação com os demais modelos analisados. Todos os modelos tendem a superestimar as áreas queimadas em relação aos registros observados. No caso específico do modelo RF, suas previsões se concentraram na região Sul do bioma, onde também foram registradas as maiores frequências de queimadas ao longo dos 30 anos estudados. Esse resultado sugere que o modelo conseguiu captar os padrões gerais das queimadas no Pantanal, mas possuem limitações na previsão exata de ocorrências anuais.

No modelo RF, a umidade da vegetação foi a variável de maior importância na previsão da ocorrência de queimadas. Já os fatores antrópicos, representados por variáveis como a proximidade de estradas, centros urbanos, edificações e hidrografia(hidrovias), tiveram importâncias significativas em todos os modelos, evidenciando que os incêndios no Pantanal estão fortemente associados às atividades humanas e são agravados por períodos mais secos.

A distribuição espacial da frequência de queimadas destaca a vulnerabilidade da região Sul do bioma, sobretudo nas áreas de fronteira. As diferenças entre os dois estados da região tornam-se evidentes, com maior fragilidade nas legislações de Mato Grosso do Sul. As tendências apontam para um crescimento na frequência de eventos climáticos extremos, o que aumenta a propensão a incêndios severos no bioma. Diante desse contexto, torna-se essencial que diversos setores da sociedade atuem de forma conjunta para minimizar os impactos das queimadas no Pantanal.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, U. G. P. de; FEIJÓ, G. L. D.; MALAFAIA, G. C.; OLIVEIRA, L. O. F. de; BISCOLA, P. H. N.; MEDEIROS, S. R. de; LAMPERT, V. do N.; POTT, A. Boi bombeiro: uma resposta essencial às queimadas no Pantanal. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraguai. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <https://metadados.snh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/bdc7c120-39c0-439a-86c6-4599c29643f0>. Acesso em: out 2024
- ANTUNES, João Francisco Gonçalves; ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora. Mapeamento do risco de incêndio na bacia do Alto Paraguai utilizando dados AVHRR-NOAA. 2009.
- BARBIERO, Laurent et al. Natural arsenic in groundwater and alkaline lakes at the upper Paraguay basin, Pantanal, Brazil. Trace Metals and other Contaminants in the Environment, v. 9, p. 101-126, 2007.
- BARBIERO, Laurent et al. Soil morphological control on saline and freshwater lake hydrogeochemistry in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. Geoderma, v. 148, n. 1, p. 91-106, 2008.
- BERLINCK, C. N.; LIMA, L. H. A.; PEREIRA, A. M. M.; CARVALHO JUNIOR, E. A. R.; PAULA, R. C.; TOMAS, W. M.; MORATO, R. G. The Pantanal is on fire and only a sustainable agenda can save the largest wetland in the world. *Brazilian Journal of Biology*, v. 82, e244200, 2022.
- BRASIL. Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo – PNMIF. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14944-31-julho-2024-796016-publicacaooriginal-172511-pl.html>>. Acesso em: nov. 2024.
- CASTRO PAES, Ésio et al. Use of modeling to map potentially toxic elements and assess the risk to human health in soils affected by mining activity. *Catena*, v. 220, p. 106662, 2023.
- CORREA, Danielle Blazys et al. Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. *Science of the Total Environment*, v. 835, p. 155386, 2022.
- COUTINHO, Alexandre Camargo et al. Dinâmica da agricultura na Bacia do Alto Paraguai. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIA NO PANTANAL, 2016, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá: s.n., 2016. p. 623-632.
- COUTINHO, Alexandre Camargo et al. Dinâmica da agricultura na Bacia do Alto Paraguai. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIA NO PANTANAL, 2016, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá: s.n., 2016. p. 623-632.
- EMBRAPA. O Pantanal. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/pantanal/apresentacao/o-pantanal>. Acesso em: jan, 2024.
- ESLAMI, R. et al. GIS-based forest fire susceptibility assessment by random forest, artificial neural network and logistic regression methods. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 33, n. 2, p. 173-184, 2021.

FERNANDES-FILHO, Elpídio Inácio et al. Methods and challenges in digital soil mapping: applied modelling with R examples. In: **Pedometrics in Brazil**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 263-283.

FIORI, Alberto Pio et al. O processo erosivo na Bacia do Alto Paraguai. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, v. 49, p. 1-22, 2001.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

GAO, Bo-Cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GARCIA, Letícia Couto et al. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. *Journal of Environmental Management*, v. 293, p. 112870, 2021.

GOMES, Lucas Carvalho et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, v. 340, p. 337-350, 2019.

GONZAGA, C. A. C.; ROQUETTE, J. G.; SILVA, N. M. da; BARBOSA, D. S.; PESSI, D. D.; PARANHOS FILHO, A. C.; MIOTO, C. L. Government actions for the mitigation and prevention of environmental damage in the Pantanal Mato-grossense after the great fire of 2020. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 11, n. 7, p. e48111730413, 2022.

HARRIS, Mônica B. et al. Estimativa da perda de cobertura vegetal original na Bacia do Alto Paraguai e Pantanal brasileiro: ameaças e perspectivas. *Natureza & Conservação*, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 50-66, 2006.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; BIAVATI, G.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; ROZUM, I.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; DEE, D.; THÉPAUT, J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47. Acesso em: abr, 2024

HIGA, Leandro et al. Mapeamento de fogo ativo no Pantanal brasileiro com base em aprendizado profundo e imagens CBERS 04A. *Sensoriamento Remoto*, v. 14, n. 3, p. 688, 2022.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico: inventário das formações florestais e campestres: técnicas e manejo de coleções botânicas: procedimentos para mapeamentos. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. Malhas territoriais. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: abr, 2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção da Pecuária Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecaaria/9107-producao-da-pecaaria-municipal.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: abr, 2024

JUCÁ, Julyanne; BRONZE, Giovanna. Com dados consolidados, 2020 é o ano com mais queimadas no Pantanal, aponta Inpe. CNN Brasil, 01/01/2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/com-dados-consolidados-2020-e-o-ano-com-mais-queimadas-no-pantanal/#:~:text=O%20balan%C3%A7o%20anual%20de%20queimadas,%C3%B3rg%C3%A3o%20que%20come%C3%A7ou%20em%201998>. Acesso em: 03 out. 2023.

LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, p. 363-374, 1977.

LIBONATI, Renata et al. Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. *Nature*, v. 588, n. 7837, p. 217-219, 2020.

MAGALHÃES NETO, Newton; EVANGELISTA, Heitor. Human activity behind the unprecedented 2020 wildfire in Brazilian wetlands (Pantanal). *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 888578, 2022.

MAPBIOMAS. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): Fogo Coleção 3.1. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/06/ATBD-MapBiomass-Fogo-Colecao-3-1.pdf>. Acesso em: jun, 2024

MAPBIOMAS. Pantanal Appendix: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Coleção 9. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_9/downloads/pantanal_appendix_atbd_col9.pdf. Acesso em: jun, 2024

MARENGO, Jose A. et al. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, p. 639204, 2021.

MARENGO, Jose A.; OLIVEIRA, Gilvan S.; ALVES, Lincoln M. Climate change scenarios in the Pantanal. In: ALHO, C. J. R.; LOVERDE-OLIVEIRA, S. M.; LACERDA, L. D. (Ed.). *Dynamics of the Pantanal wetland in South America*. p. 227-238, 2016.

MATO GROSSO (Estado). Assembleia Legislativa do Estado de Mato Grosso. Projeto de Lei nº 728, de 2020. Institui o Programa Estadual de Controle do Fogo e dá outras providências. Disponível em: <https://www.al.mt.gov.br/midia/texto/387/deputado/almt-aprova-em-1a-votacao-projeto-que-cria-programa-estadual-de-prevencao-a-incendios-florestais/visualizar>. Acesso em: out, 2024.

MATO GROSSO DO SUL. (Estado). Decreto nº 15.654, de 15 de abril de 2021. Institui o Plano Estadual de Manejo Integrado do Fogo, e dá outras providências. Diário Oficial Eletrônico [do] Governo do Estado de Mato Grosso do Sul, 19 abr. 2021, p.2-13. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/ms/decreto-n-15654-2021-mato-grosso-do-sul-institui-o-plano-estadual-de-manejo-integrado-do-fogo-e-da-outras-providencias>. Acesso em: out, 2024.

MATOS, Nickolas Mendes de; LEAL, Fabricio Assis; MATRICARDI, Eraldo Aparecido Trondoli. Análise do padrão de distribuição espacial de queimadas no Bioma Pantanal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 17., 2015, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: INPE, 2015.

MEDEIROS, Felipe Jeferson; DE OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo; AVILA-DIAZ, Alvaro. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather and Climate Extremes*, v. 38, p. 100511, 2022.

MELLO, Danilo César et al. Chemical weathering detection in the periglacial landscapes of Maritime Antarctica: New approach using geophysical sensors, topographic variables and machine learning algorithms. *Geoderma*, v. 438, p. 116615, 2023.

MENEZES, Lucas S. et al. Lightning patterns in the Pantanal: Untangling natural and anthropogenic-induced wildfires. *Science of the total environment*, v. 820, p. 153021, 2022.

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Pantanal. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/pantanal>. Acesso em: 19 jul. 2023.

MOREIRA, Aline Paiva et al. Incêndios Florestais no Bioma Pantanal: Abordagem Jurídica-Ambiental-Internacional. Elisaide Trevisan; Rafaela de Deus Lima.(Org.). Tutela jurídica do Pantanal. 1ed. Campo Grande: Editora UFMS, v. 1, p. 70-95, 2021.

OLIVEIRA, L. O. F. de; ABREU, U. G. P. de. Por que os bovinos protegem o Pantanal de incêndios: o 'boi bombeiro' realmente funciona? Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2021. 40 p.

PIVELLO, Vânia R. et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 19, n. 3, p. 233-255, 2021.

POTT, A.; SILVA, J. S. V. Terrestrial and Aquatic Vegetation Diversity of the Pantanal Wetland. In: ALHO, C. J. R.; LOVERDE-OLIVEIRA, S. M.; LACERDA, L. D. (Ed.). Dynamics of the Pantanal wetland in South America. 2015. p. 111-131. doi:10.1007/978_2015_352.

R CORE TEAM et al. R: The R project for statistical computing, 2023.

RAMOS, Raquel; PEREIRA, Gabriel; CARDOZO, Francielle. Comportamento do ciclo hidrológico da Bacia do Alto Paraguai e suas relações com as inundações do bioma Pantanal no período de 2000 a 2016. *Revista da ANPEGE*, v. 16, n. 29, p. 109-132, 2020.

RESENDE, Mauro et al. Pedologia: base para distinção de ambientes. 6. ed. Lavras: Editora UFLA, 2014.

REZENDE FILHO, Ary Tavares et al. Hydrochemical variability at the Upper Paraguay Basin and Pantanal wetland. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 8, p. 2723-2737, 2012.

REZENDE FILHO, Ary Tavares et al. Hydrochemical variability at the Upper Paraguay Basin and Pantanal wetland. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 8, p. 2723-2737, 2012.

RODRIGUES, Cristina Aparecida Gonçalves; CRISPIM, Sandra Mara Araújo; COMASTRI FILHO, José Aníbal. Queima controlada no Pantanal. 2002.

SANTOS, Humberto Gonçalves, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SASAKI, Yutaka et al. The truth of the F-measure. **Teach tutor mater**, v. 1, n. 5, p. 1-5, 2007.

SILVA, J.; ABDON, M. de M.; MORAES, Juliano Aquino. Desmatamento na bacia do Alto Paraguai no Brasil. 2010.

SILVA, João dos Santos Vila; ABDON, Myrian. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. Pesquisa agropecuária brasileira, v. 33, n. 13, p. 1703-1711, 1998.

SILVA, Marta Pereira da et al. Distribuição e quantificação de classes de vegetação do Pantanal através de levantamento aéreo. Brazilian Journal of Botany, v. 23, p. 143-152, 2000.

SOS PANTANAL. As diferenças entre leis ambientais do Pantanal de MT e MS que desfavorecem a parte sul do bioma. Disponível em: <https://www.sospantan.org.br/as-diferencias-entre-leis-ambientais-do-pantanale-de-mt-e-ms-que-desfavorecem-a-partes-sul-do-bioma/>. Acesso em: nov. 2024.

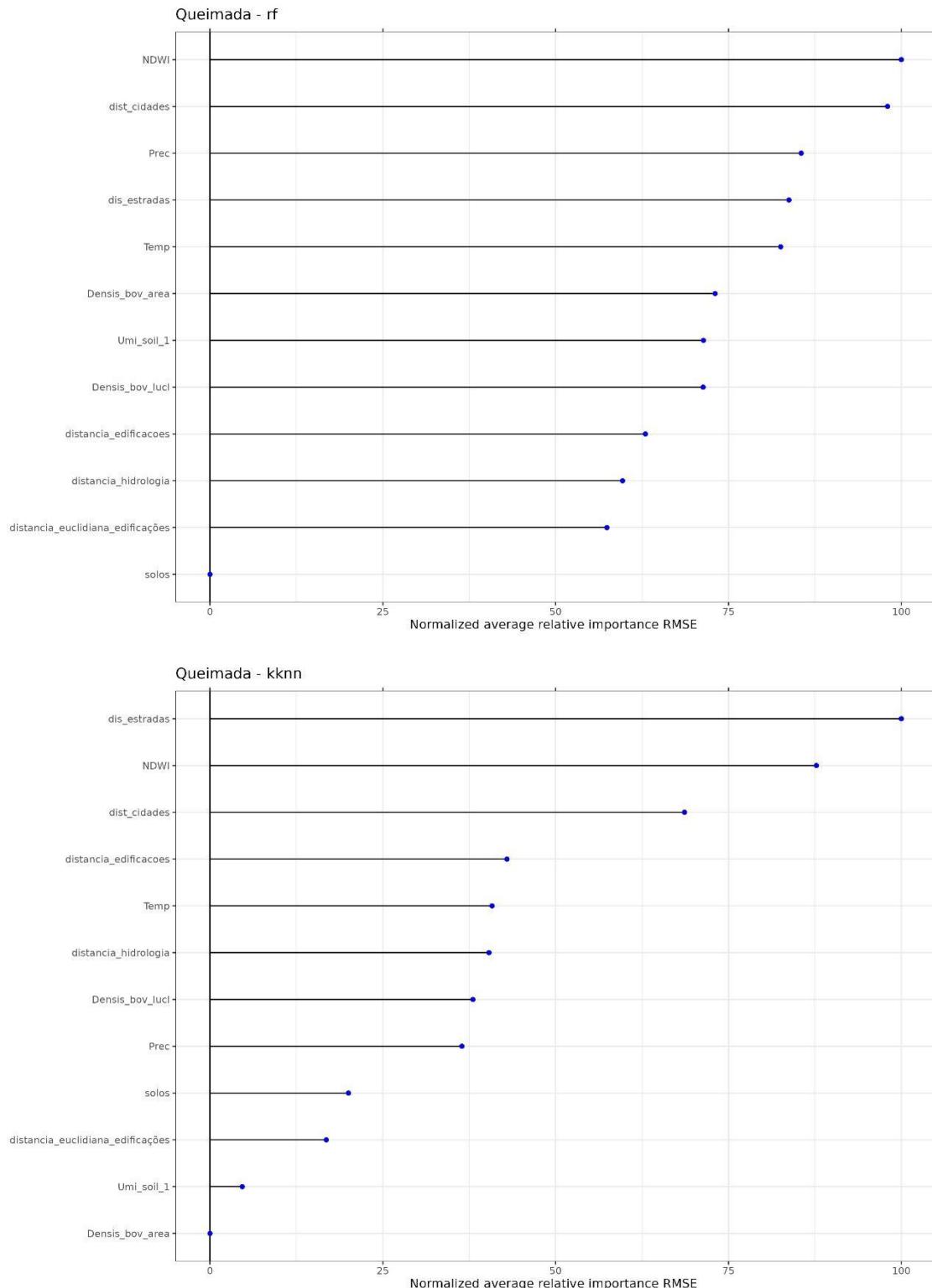
TOMAS, W. M. et al. Desafios na conservação e no manejo de áreas de reserva legal em ecossistemas campestres e savânicos brasileiros frente às mudanças climáticas globais. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 59, e03491, 2024.

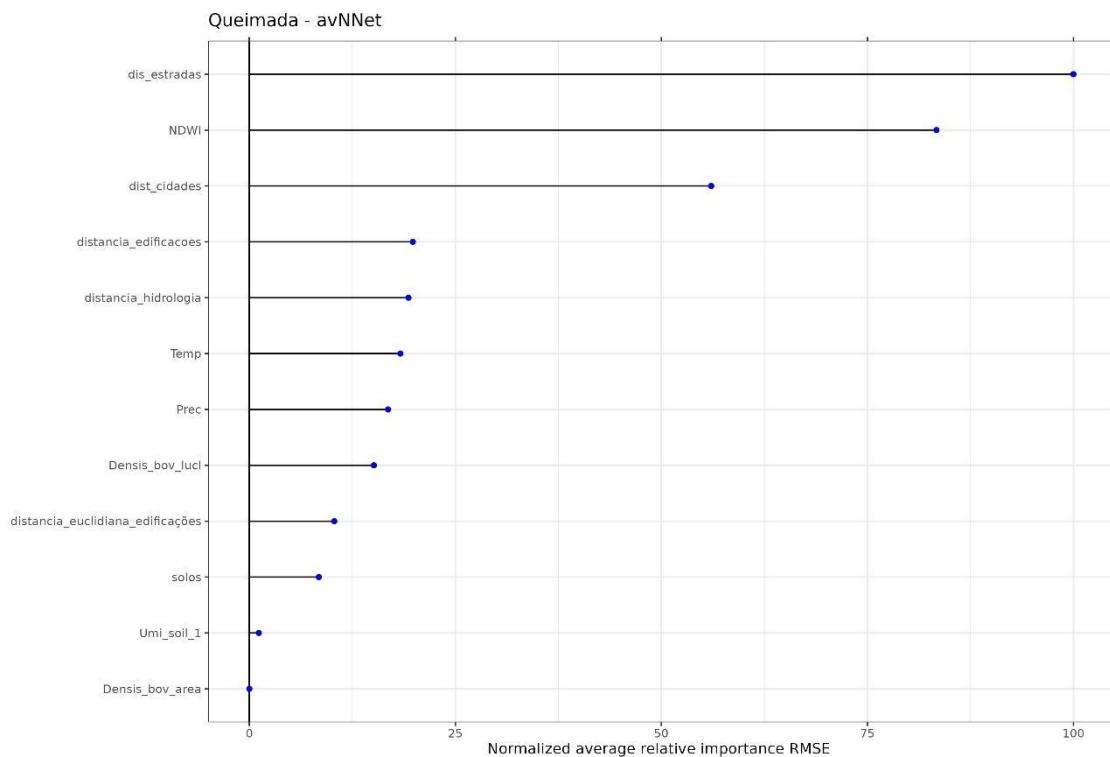
VIGANÓ, Hevelyne Henn da Gama; SOUZA, Celso Correia de; CRISTALDO, Marcia Ferreira; JESUS, Leandro de. Redes Neurais Artificiais na Previsão de Queimadas e Incêndios no Pantanal (Artificial Neural Networks in Prediction of Forest Fires and Burns in the Pantanal). Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 10, n. 5, p. 1355–1367, 2017. DOI: 10.26848/rbgf.v.10.p1355-1367. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/234109>. Acesso em: 10 out. 2024.

ZUMAK, A.; TOLONE, W.; LARCHER, L. Caracterização geográfica da BAP e do bioma Pantanal. In: RABELO, A. P. C.; SOUZA, M. G. de (Org.). Bacia do Alto Paraguai: uma viagem no tempo. Brasília, DF: Ibict, 2021. p. 24-53.

7. ANEXOS

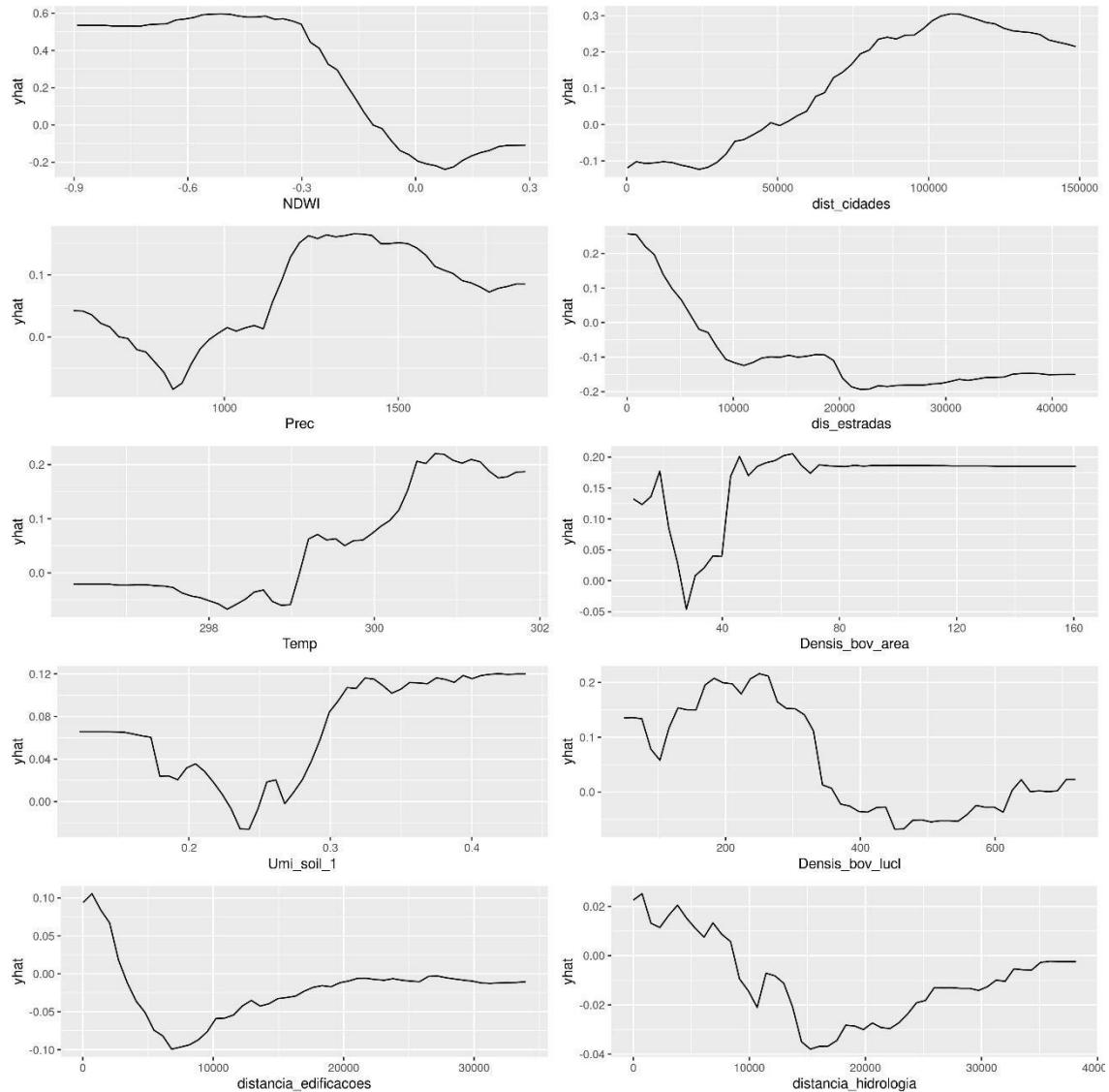
Anexo1. Gráfico de a importância relativa normalizada das variáveis.



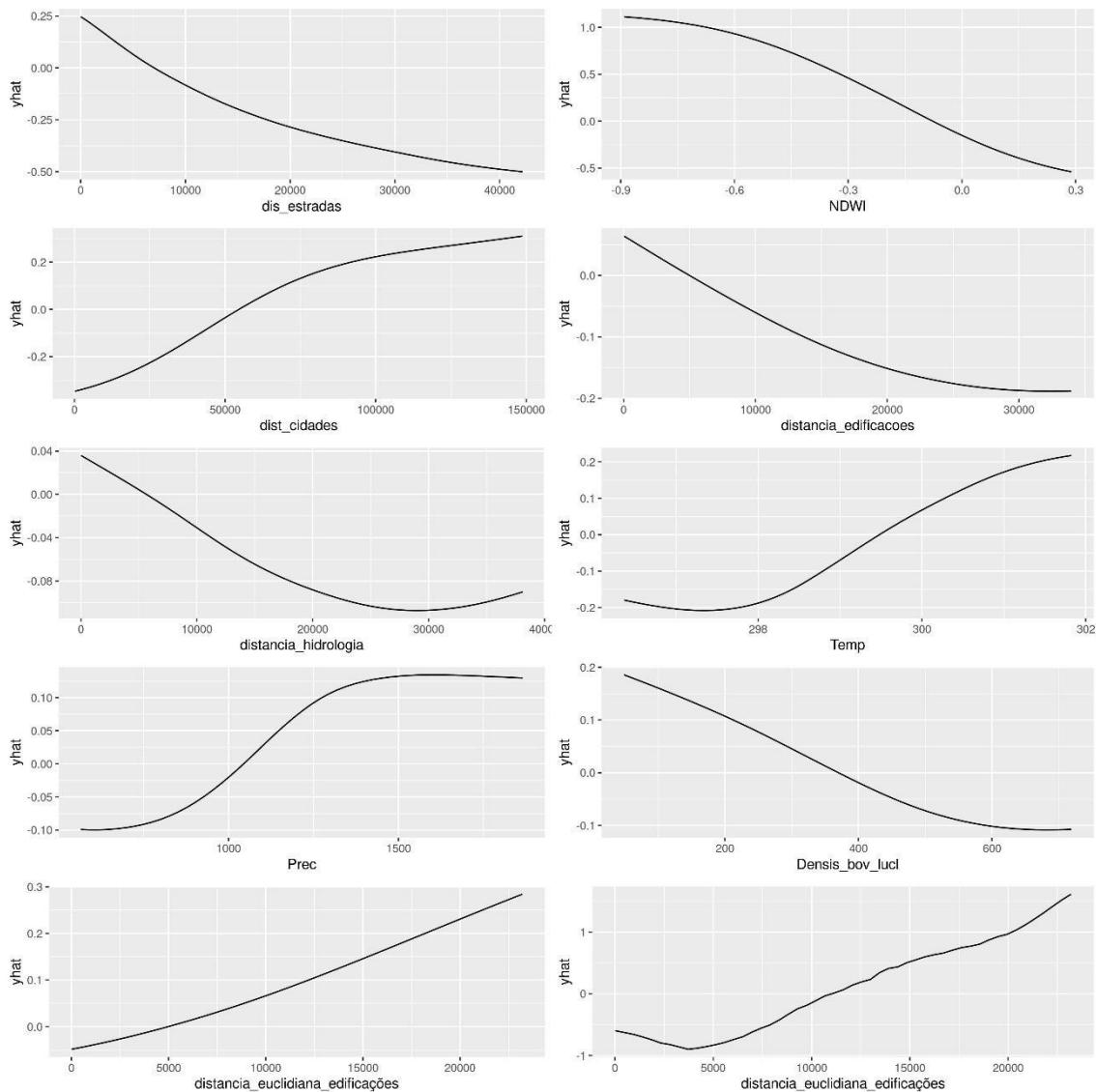


Anexo 2. Gráfico de Partial Dependence Plot (PDP)

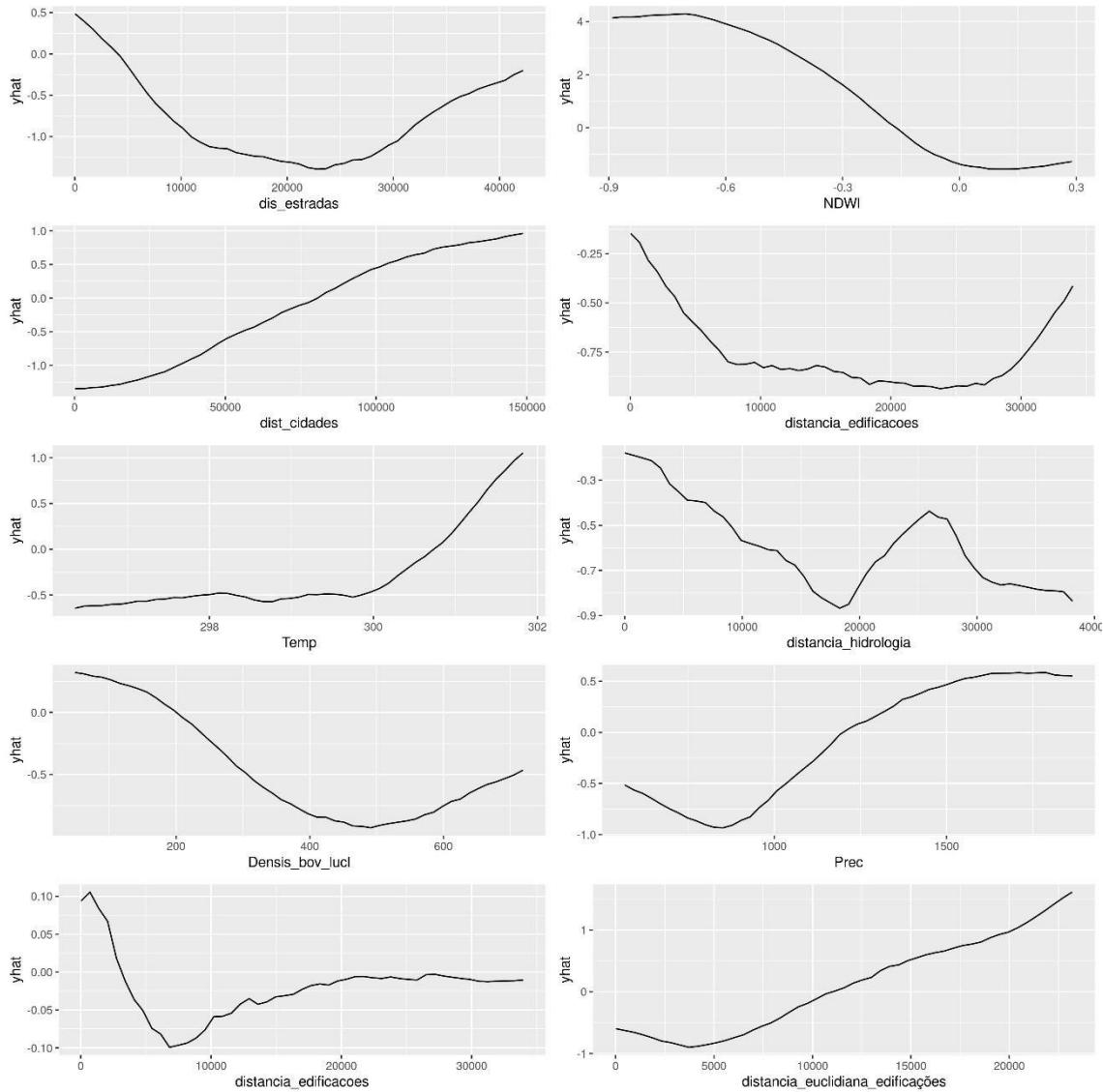
RF



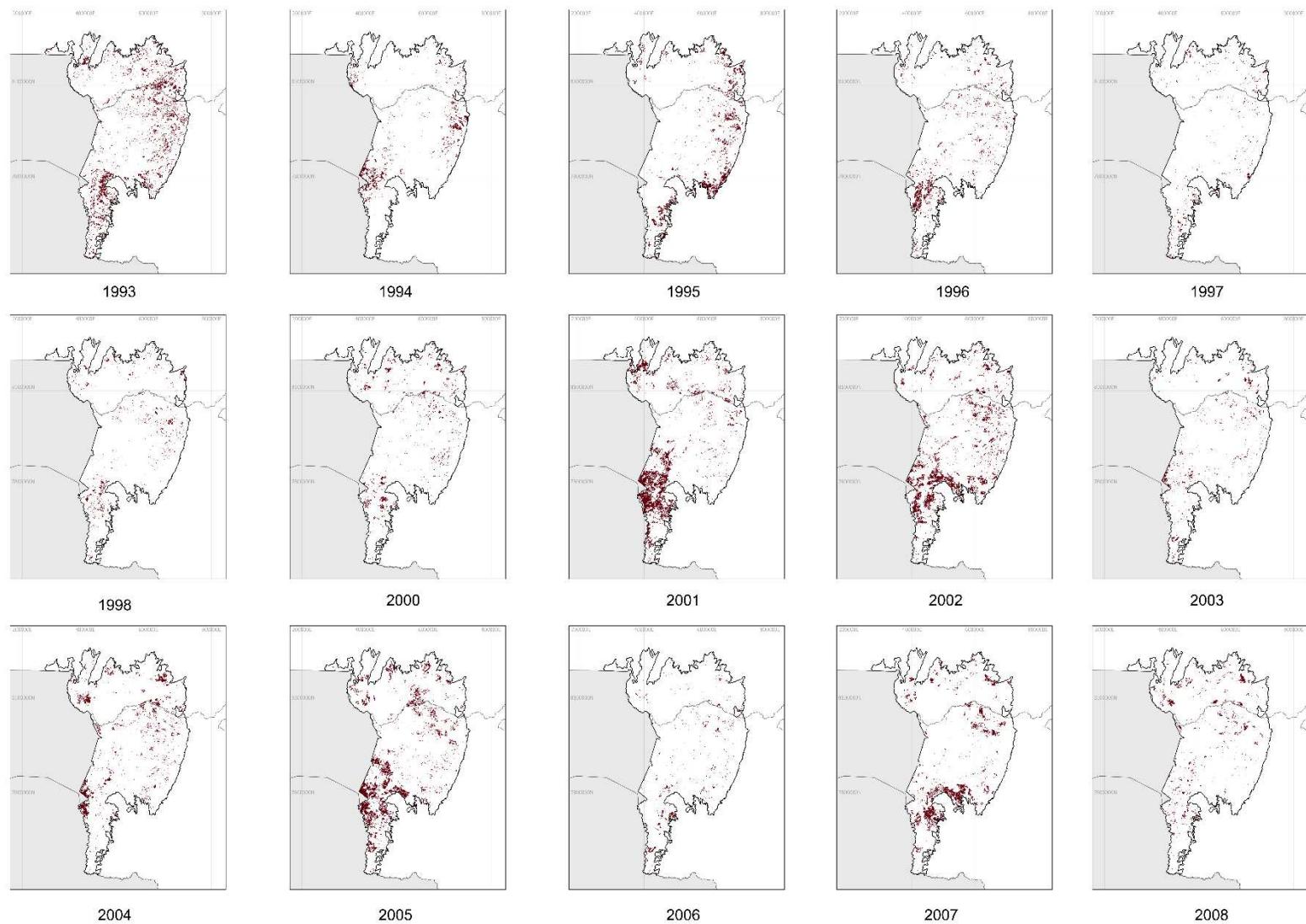
avNNET

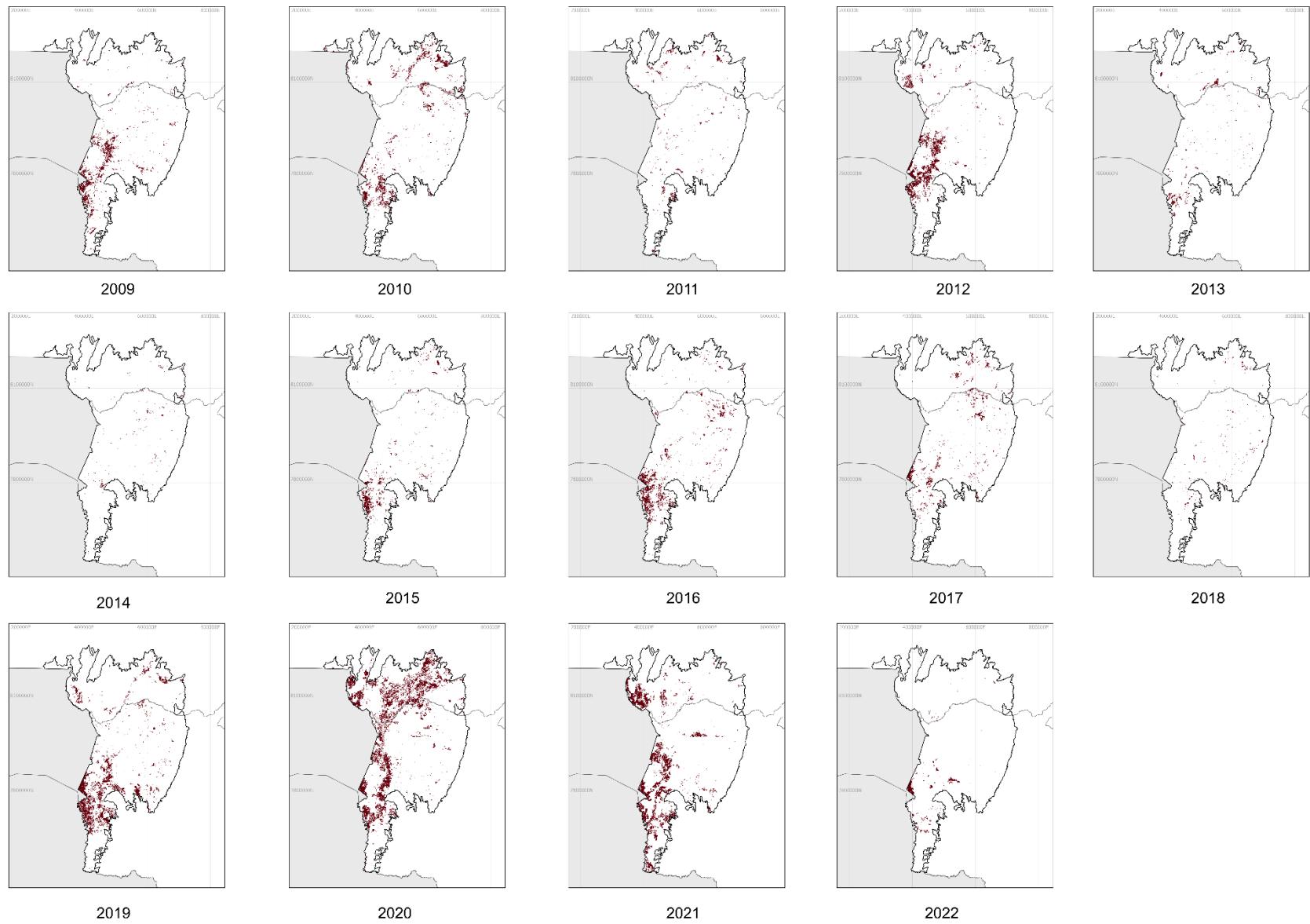


KKNN

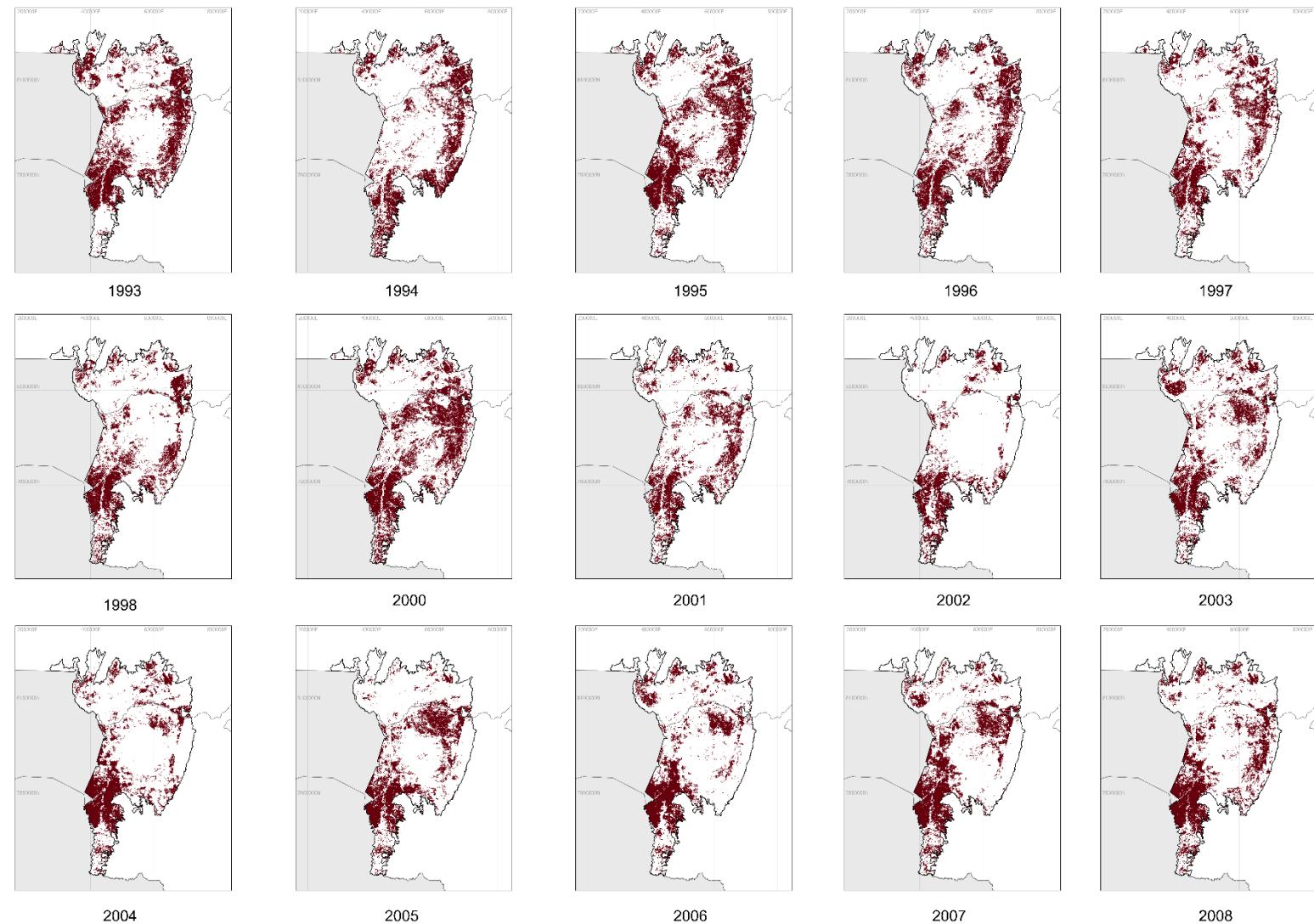


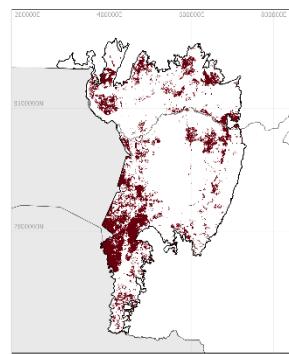
Anexo 3.
Mapas de queimadas observadas.



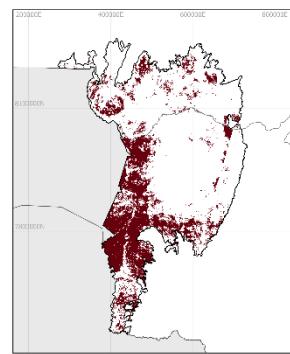


Anexo 3.1. Mapas de
queimadas simuladas RF

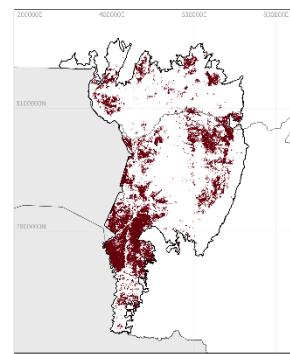




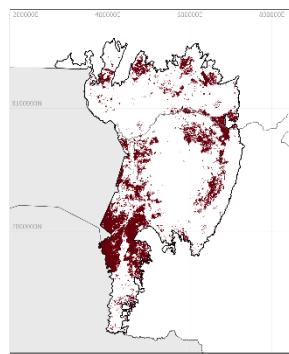
2009



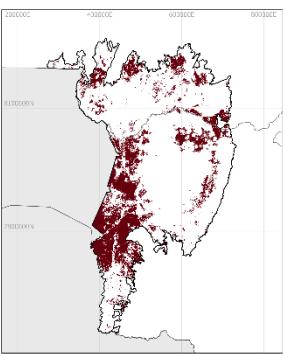
2010



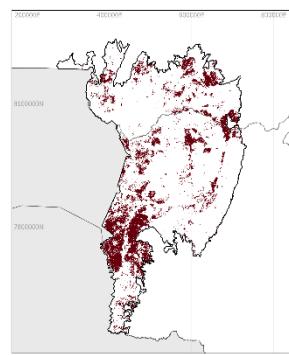
2011



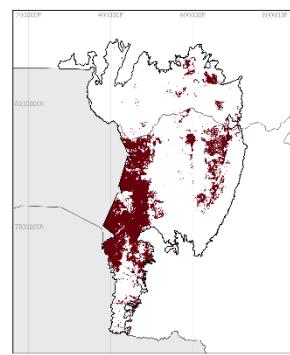
2012



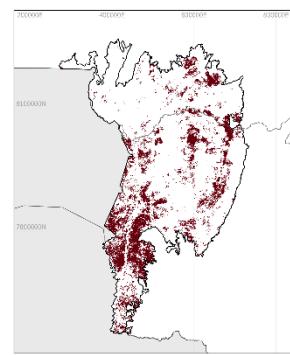
2013



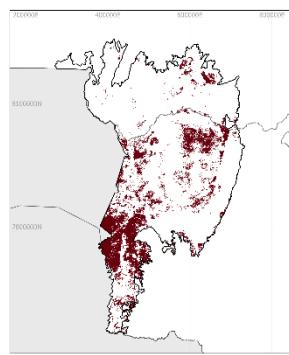
2014



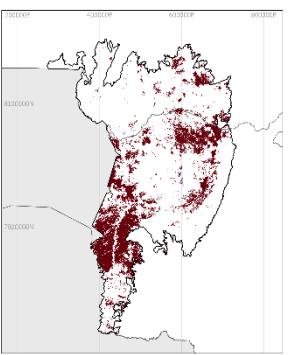
2015



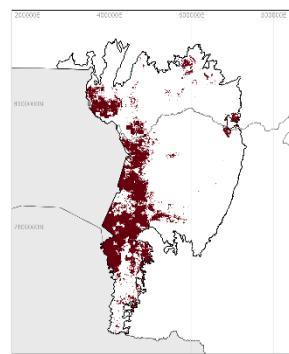
2016



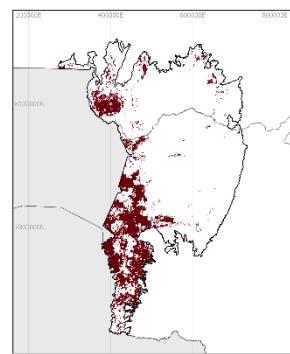
2017



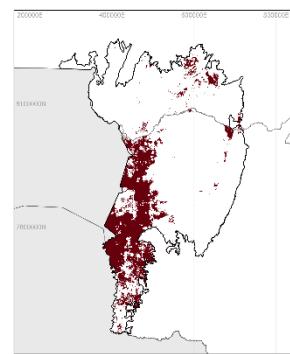
2018



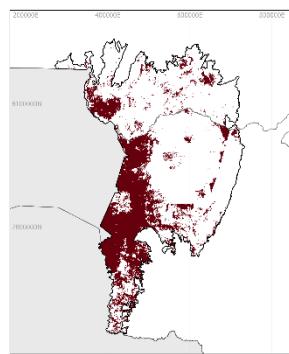
2019



2020

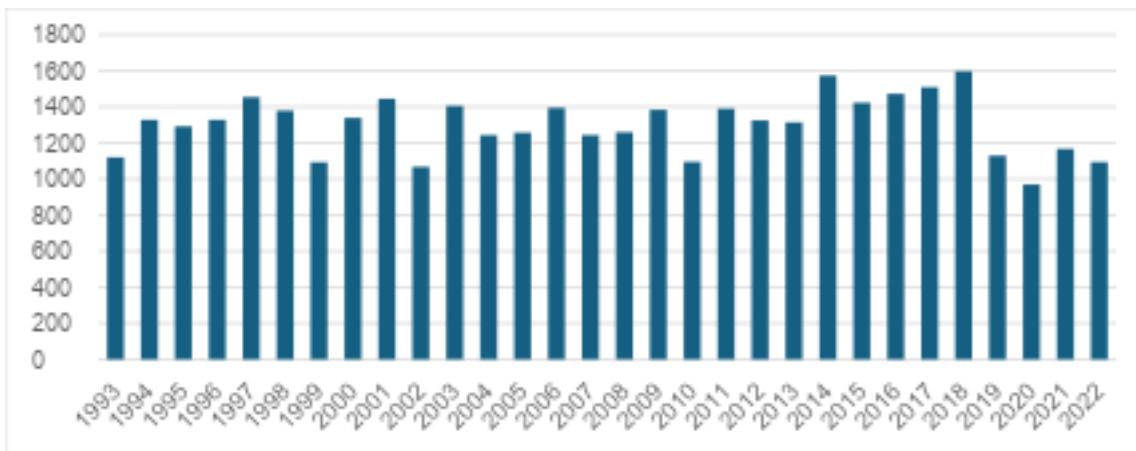


2021



2022

Anexo 4. Gráfico de precipitação média para a Bacia do Alto Paraguai.



Fonte: *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data – CHIRPS*