



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE TRÊS LAGOAS
PROGRAMA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM GEOGRAFIA**

PEDRO PAULO BARRETTO CRISTOFORI

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO ARBÓREA DO
PANTANAL DA NHECOLÂNDIA APÓS INCÊNDIOS FLORESTAIS: UMA
ABORDAGEM UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

TRÊS LAGOAS/MS

2023

PEDRO PAULO BARRETTO CRISTOFORI

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO ARBÓREA DO
PANTANAL DA NHECOLÂNDIA APÓS INCÊNDIOS FLORESTAIS: UMA
ABORDAGEM UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia CPLT/UFMS. Área de Concentração: Análise Geoambiental e Produção do Território, linha de pesquisa: Dinâmica Ambiental e Planejamento, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia, sob orientação do Prof. Dr Ary Tavares Rezende Filho.

TRÊS LAGOAS/MS

2023

PEDRO PAULO BARRETTO CRISTOFORI

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE RESILIÊNCIA DA VEGETAÇÃO ARBÓREA DO
PANTANAL DA NHECOLÂNDIA APÓS INCÊNDIOS FLORESTAIS: UMA
ABORDAGEM UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO.**

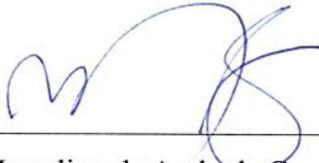
Resultado: Aprovado

Três Lagoas-MS, 05 de setembro de 2023

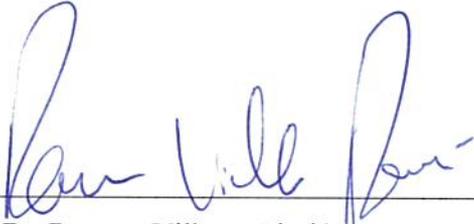
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr Ary Tavares Rezende Filho, FAENG/UFMS



Prof. Dr Marcelino de Andrade Gonçalves., FAENG/UFMS



Prof. Dr. Rennan Vilhena Pirajá, UNIDERP

Três Lagoas, 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração ao querido professor e orientador, Dr. Ary Tavares Rezende Filho, que ao longo da minha jornada acadêmica desde a graduação, se tornou um grande amigo. Sua paciência, orientação e empenho foram imprescindíveis para o desenvolvimento e entrega deste trabalho. A sua dedicação em me guiar durante todo o processo foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao amigo e colaborador, Dr. Rennan Vilhena Pirajá. Desde o esforço e apoio para minha entrada no programa até sua valiosa parceria e assistência, seu apoio foi de inestimável valor para a execução e finalização deste estudo. Sua presença e contribuição foram fundamentais para alcançarmos os resultados obtidos.

Estender toda minha gratidão ao professor Dr. Laurent Barbiero, pela amizade e por todos os ensinamentos ao longo de minha formação acadêmica.

Minha gratidão se estende à minha família, que mesmo de longe, sempre me proporcionou apoio e incentivo. Especialmente à minha esposa, Jessica Cristofori, e minha filha, Clarice Cristofori, cujo amor e suporte foram peças fundamentais para minha motivação e perseverança na conclusão deste mestrado. O apoio e compreensão que recebi de vocês foram essenciais para superar os desafios ao longo dessa jornada.

Também gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos os amigos que, de maneira indireta, participaram e ofereceram apoio ao longo desta trajetória acadêmica. As palavras de encorajamento e a companhia durante os momentos difíceis desempenharam um papel crucial em manter meu foco e determinação.

No ambiente de trabalho, sou profundamente grato aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, fornecendo auxílio e apoio inestimáveis. Nesse contexto, gostaria de estender meus agradecimentos especiais a duas pessoas notáveis e inspiradoras: Rafaela Nicola, Diretora da Wetlands International Brazil, e Áurea Garcia, Diretora da MUPAN. É um privilégio fazer parte dessa equipe e agradeço imensamente por todas as oportunidades e apoio que me concederam. Isso possibilitou que eu equilibrasse minhas responsabilidades acadêmicas e profissionais de maneira fluida e harmoniosa.

Além disso, quero expressar minha sincera gratidão ao inestimável Genivaldo de Oliveira Xavier, Gerente da Fazenda São Roque, e a dona Ana Cristina Vieira, por cuidarem

de todos os detalhes durante minhas visitas à fazenda. Sua dedicação e atenção permitiram que eu me concentrasse plenamente na pesquisa.

Finalmente, agradecer à FAPESP pelo apoio financeiro por meio do Projeto de Pesquisa nº 2016/14227-5, e ao coordenador do projeto professor Dr. Adolph José Melfi e professora Dra Celha Regina Montes por tornar possível a realização desta pesquisa de campo. Sem esse suporte fundamental, este estudo não teria sido viável.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, expresso meu mais profundo agradecimento por fazerem parte dessa jornada e por tornarem possível a concretização deste trabalho. Cada um de vocês desempenhou um papel significativo nessa conquista em minha vida acadêmica e profissional.

RESUMO

Os frequentes incêndios florestais no Pantanal, combinados com a escassez de água, têm causado danos substanciais ao bioma nas últimas décadas, alterando profundamente sua paisagem. Este estudo explorou o potencial das geotecnologias e do conhecimento científico ambiental com objetivo de analisar o potencial de resiliência da fitofisionomia da vegetação arbórea no Pantanal da Nhecolândia após dois eventos de incêndio florestal em 2019 e 2021, utilizando a fazenda São Roque como área de estudo. Para isso, empregamos técnicas avançadas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, incluindo a análise de dados de focos de calor da plataforma BDQueimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o uso de imagens dos satélites Sentinel 2A e 2B da plataforma Copernicus. Realizamos análise multitemporal abrangendo desde a classificação da cobertura da Terra até a avaliação do grau de severidade dos incêndios na vegetação arbórea por meio dos índices espectrais Normalized Burn Ratio (NBR) e Delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Além disso, monitoramos o comportamento da vegetação arbórea utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) antes e após os incêndios. Os resultados revelaram uma correlação inversa entre a intensidade do fogo, medida pelo FRP, e a amplitude entre as classes de severidade do dNBR. Isso significa que incêndios mais intensos resultaram em menor variação nas classes de severidade, indicando uma resposta uniforme do dNBR às áreas afetadas. Também evidenciou que as condições climáticas desempenharam um papel significativo, com variações mais acentuadas na biomassa durante a estação seca. Durante o acompanhamento da resposta da biomassa na série histórica foi individualizado um período de transição entre a estações úmida e seca, que marca o climax da vegetação, cuja resposta dos índices de NDVI (biomassa) não sofreram interferência das estações. Assim, para a análise da resiliência da vegetação arbórea utilizou-se este período de transição como ponto de referência, que foi utilizado para identificar que a parte norte retornou aos níveis da área não queimada (parte sul) após aproximadamente 20 meses. No entanto, um novo incêndio após 25 meses de intensidade alta na mesma área revelou o aumento na classe de Severidade Alta, em caso desse incêndio tivesse sido de intensidade média, o dossel ocultaria a vegetação de sub-bosque atingida por um efeito “guarda-chuva”. Além disso, a metodologia aplicada nesse estudo levantou a hipótese que poderá identificar eventos de incêndios florestais e compreender flutuações climáticas ao longo do tempo.

Palavras-chave: Pantanal; incêndios florestais; resiliência; biomassa; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The frequent forest fires in the Pantanal, combined with water scarcity, have caused substantial damage to the biome in recent decades, profoundly altering its landscape. This study explored the potential of geotechnologies and environmental scientific knowledge to analyze the potential resilience of the arboreal vegetation physiognomy in the Nhecolândia Pantanal after two forest fire events in 2019 and 2021, using São Roque Farm as the study area. For this purpose, we employed advanced remote sensing and geoprocessing techniques, including the analysis of hot spot data from the BDQueimadas platform of the National Institute for Space Research (INPE) and the use of images from the Sentinel 2A and 2B satellites of the Copernicus platform. We conducted a multi-temporal analysis, ranging from land cover classification to the assessment of the severity of fires in arboreal vegetation using the Normalized Burn Ratio (NBR) and Delta Normalized Burn Ratio (dNBR) spectral indices. Additionally, we monitored the behavior of arboreal vegetation using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) before and after the fires. The results revealed an inverse correlation between fire intensity, measured by FRP, and the range between the severity classes of dNBR. This means that more intense fires resulted in less variation in severity classes, indicating a uniform response of dNBR to the affected areas. It also highlighted the significant role of climatic conditions, with more pronounced variations in biomass during the dry season. During the monitoring of biomass response in the historical series, a transition period was individualized between the wet and dry seasons, marking the climax of vegetation, whose response of NDVI indices (biomass) was not interfered with by the seasons. Thus, for the analysis of arboreal vegetation resilience, this transition period was used as a reference point, which was used to identify that the northern part returned to the levels of the unburned area (southern part) after approximately 20 months. However, a new fire after 25 months of high intensity in the same area revealed an increase in the High Severity class; in the case of this fire had been of medium intensity, the canopy would have concealed the understory vegetation affected by an "umbrella effect." Furthermore, the methodology applied in this study raised the hypothesis that it could identify forest fire events and understand climate fluctuations over time.

Keywords: Pantanal; forest fires; resilience; biomass; remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1. Mapa da subdivisão do Pantanal Mato-grossense (SILVA e ABDON, 1998).....	30
Figura 2. Mapa de localização do Pantanal da Nhecolândia.....	31
Figura 3. Mapa de localização da fazenda São Roque no Pantanal da Nhecolândia.....	37
Figura 4 - Portal BDQueimadas INPE.....	39
Figura 5 - Portal BDQueimadas INPE, área de seleção de Focos de Calor.....	40
Figura 6 - Website Copernicus Open Access Hub da ESA, filtragem de dados.....	41
Figura 7 - Website Copernicus Open Access Hub da ESA, seleção de dados.....	42
Figura 8. Janela do SNAP, processo de reamostragem.....	45
Figura 9 - Janela do software <i>Agisoft PhotoScan Professional</i>	46
Figura 10 - Janela de visualização ‘Response design window’.....	47
Figura 11 - Resposta espectral de um pixel AVIRIS de vegetação verde e de área queimada.....	48
Figura 12 - Classes de severidade do fogo.....	49
Figura 13 - Trecho do relatório de atividades. Rouse et al., 1973.....	50
Figura 14 - Resposta espectral da vegetação conforme seu verdor.....	50
Figura 15 - Mapas de pontos de controle da classificação supervisionada, classes de severidade, NDVI pré-fogo e NDVI pós-fogo de 2021.....	52
Figura 16 - Tabulação dos danos no Excel.....	53
Figura 17 - Teste de Normalidade dos dados no Past.....	54
Figura 18 - <i>Site Water Balance App</i>	55
Figura 19 - Chaves de interpretação.....	56
Figura 20 - Mapa de Classificação supervisionada da área de estudo 2019 e 2021.....	57
Figura 21 - Validação da Classificação Supervisionada de 2019 via dados de campo (fotos pré-fogo de RPA).....	59
Figura 22 - Focos de calor do dia 15/09/2019.....	63
Figura 23 - Focos de calor do dia 16/09/2019.....	65
Figura 24 - Focos de calor do dia 19/09/2019.....	67
Figura 25 - Mapa da evolução dos focos de calor do evento de evento de incêndio florestal de setembro de 2019 da Fazenda São Roque.....	69
Figura 26 - Mapa de focos de calor do evento de incêndio florestal de setembro 2019.....	70
Figura 27 - Focos de calor do dia 15/10/21.....	72
Figura 28 - Focos de calor do dia 20/10/21.....	75
Figura 29 - Mapa da evolução dos focos de calor do evento de incêndio florestal de outubro de 2021 da Fazenda São Roque.....	77
Figura 30 - Mapa de focos de calor do evento de incêndio florestal de outubro de 2021.....	78
Figura 31 - Mapas de NBR e dNBR da parte Norte da fazenda São Roque 2019.....	80
Figura 32 - Mapas de NBR e dNBR da parte Sul da fazenda São Roque 2021.....	81
Figura 33 - Mapas de NBR e dNBR da parte Norte da fazenda São Roque 2021.....	83
Figura 34 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2019.....	86

Figura 35 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2020.....	87
Figura 36 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2021.....	92
Figura 37 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2022.....	93
Figura 38 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2021.....	97
Figura 39 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2022.....	98
Figura 40 - Pontos Analisados na missão de campo setembro de 2022 (fotos RPA)	101
Figura 41 – Intensidade dos eventos de incêndios Florestais (09/2019 e 10/2021) fazenda São Roque.....	106
Figura 42 – Validação de campo da evolução da resiliência em setembro de 2022.....	109

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Vista panorâmica das baías e lagoas.....	102
Foto 2 – Vista parcial de uma lagoa salina quase seca.....	102
Foto 3 – Vegetação Arbórea queimada e árvores queimadas ao fundo.....	102
Foto 4 – Palmeira Acuri (<i>Attalea phalerata</i>) mortos em primeiro plano e vivos em segundo plano.....	102
Fotos 5 – Vegetação de campo.....	103
Fotos 6 – Área de campo com recuo pós incêndio florestal e com solo exposto.....	103

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 1 - Categorias de Risco de Fogo.....	22
Tabela 2 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2019.....	42
Tabela 3 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2020.....	43
Tabela 4 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2021.....	43
Tabela 5 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2022.....	43
Tabela 6 - Classes da fitofisionomia da paisagem da fazenda São Roque	58
Tabela 7 - Matriz de confusão da classificação supervisionada de 2019.....	60
Tabela 8 - Matriz de confusão da classificação supervisionada de 2021.....	61
Tabela 9 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 15/09/19, na área de estudo, Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul.....	62
Tabela 10 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 16/09/2019.....	64
Tabela 11 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 17/09/19.....	66
Tabela 12 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> dos dias 18/09/19, 19/09/19 e 20/09/19.....	66
Tabela 13 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 22/09/19 e 23/09/19.....	68
Tabela 14 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 14/10/21.....	71
Tabela 15 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 15/10/21.....	73
Tabela 16 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 16/10/21, 17/10/21, 18/10/21.....	73
Tabela 17 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 19/10/21 e 20/10/21.....	74
Tabela 18 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e <i>Fire Radiative Power</i> do dia 21/10/21, 22/10/21 e 23/10/21.....	76
Tabela 19 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2019 parte Norte.....	80
Tabela 20 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2021 parte Sul.....	82
Tabela 21 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2021 parte Norte.....	83
Tabela 22 - Classes da fitofisionomia da paisagem da parte norte da fazenda São Roque....	85
Tabela 23 - Grau de severidade da classe da vegetação arbórea (dNBR) 09/2019 parte Norte.....	85
Tabela 24 - Classes da fitofisionomia da paisagem da parte sul da fazenda São Roque.....	90
Tabela 25 - Grau de Severidade da Classe da Vegetação Arbórea (dNBR) 10/2021 parte Sul.....	90
Tabela 26: Classes de Severidade da vegetação arbórea da parte norte (09/2019 e 10/2021) da fazenda São Roque.....	96

LISTA DE QUADROS

	Pg.
Quadro 1 - Equivalência entre o sistema fisionômico-ecológico (IBGE, 1992) e as denominações regionais.....	29

LISTA DE GRAFICOS

	Pg.
Gráfico 1 - Focos de calor contabilizados no evento de incêndio florestal de setembro de 2019.....	62
Gráfico 2 - Focos de calor contabilizados no evento de queimada de outubro de 2021.....	70
Gráfico 3 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2019 e 2020.....	87
Gráfico 4: Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2021 e 2022.....	93
Gráfico 5 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2021 e 2022.....	98
Gráfico 6 - Gráfico do acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte Norte) 2019 a 2022.....	111
Gráfico 7 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte Sul) 2019 a 2022.....	113

LISTA DE SIGLAS

AcATaMa – Accuracy Assessment of Thematic Maps
Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica
BAP – Bacia do Alto Paraguai
BDQ – Banco de Dados de Queimadas
BOA – Bottom of Atmosphere
CBI – Índice de Gravidade de Queimada
Ciman – Centro Integrado Multiagências de Coordenação Operacional Nacional
CO₂ – Dióxido de carbono
DAS – Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DGI – Divisão de Geração de Imagens
dNBR – Delta Normalized Burn Ratio
DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento
ECMWF – Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo
ESA – Agencia Espacial Europea (European Space Agency)
ESA – European Space Agency
FIOCRUZ – Fundação Oswaldo Cruz
FRP – Potência Radiativa do Fogo
GLDAS – Sistema Global de Assimilação de Dados Terrestres ()
GNSS – Global Navigation Satellite System
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
LASA – Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais
MDE – Modelo Digital de Elevação
MSI – MultiSpectral Instrument
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NBR – Normalized Burn Ratio
NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NIR – Infravermelho próximo
ONS – Operador Nacional Elétrico
OSM – Open Topo Map
PCBAP – Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai –
PDI – Processamento Digital de Imagens
PST – Point Sampling Tool
Qgis – Software de Sistema de Informação Geográfica
REDD+ – Reduções de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Aumento de Estoques de Carbono Florestal

RF – Risco de Fogo
RGB – Red, Green and Blue
RPA – Remotely Piloted Aircraft System
RTK – Real Time Kinematic
SCP – Semi-Automatic Classification Plugin
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
SNAP – SeNtinel Applications Platform
SWIR – Infravermelho de onda curta
TOA – Top of Atmosphere
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
USGS – United States Geological Survey
WWF – World Wildlife Fund

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO I - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
1.1 Monitoramento dos Incêndios Florestais nos Biomas Brasileiros.....	18
1.2 O Bioma Pantanal: Queimadas Naturais e Incêndios Florestais.....	26
1.2.1 A Planície do Pantanal Mato-grossense.....	26
1.2.2 Fitofisionomia do Pantanal Mato-grossense.....	28
1.2.3 Compartimentação do Pantanal Mato-grossense.....	29
1.2.4 A Subregião do Pantanal da Nhecolândia.....	31
1.2.5 Queimadas Naturais e Incêndios Florestais no Pantanal.....	32
1.3 Geotecnologias como apoio ao Monitoramento das Queimadas no Pantanal.....	34
CAPÍTULO II - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	
2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	37
2.1 Área de Estudo.....	37
2.2 Escopo Metodológico.....	38
2.2.1 Seleção dos dados de focos de calor.....	39
2.2.2 Aquisição de imagens Sentinel-2A e 2B.....	41
2.2.3 Tratamento e processamento das imagens.....	43
2.2.4 Classificação supervisionada pré-fogo.....	45
2.2.5 Validação de produtos com auxílio de levantamentos de campo.....	45
2.2.6 Validação da classificação.....	47
2.2.7 Cálculo do índice de queima normalizada NBR pré e pós-fogo.....	48
2.2.8 Cálculo do dNBR (<i>Differenced Normalized Burn Ratio</i>).....	48
2.2.9 Cálculo do Índice de Vegetação (NDVI).....	49
2.2.10 Geração de Pontos de controle e Tabulação dos Dados.....	53
2.2.11 Coleta de dados de pluviosidade.....	55
CAPÍTULO III - RESULTADOS E DISCUSSÃO	
3.1 RESULTADOS.....	56
3.1.1 Classificação Supervisionada da Área de Estudo.....	56
3.1.1.1 Comportamento da Fisionomia da Paisagem da fazenda São Roque.....	57
3.1.1.2 Validação da Classificação Supervisionada via Dados de Campo de 2018 na fazenda São Roque.....	58
3.1.1.3 Validação da Classificação Supervisionada pela Matriz de Confusão.....	59
3.1.1.3.1 Matriz de confusão dos dados de 2019.....	59

3.1.1.3.2 Matriz de confusão dos dados de 2021.....	60
3.1.2 Eventos de Incêndio Florestal.....	62
3.1.2.1 Monitoramento de Focos de Calor do Incêndio Florestal ocorrido em 2019.....	62
3.1.2.2 Monitoramento de Focos de Calor do Incêndio Florestal ocorrido em 2021.....	70
3.1.3 Severidade dos Incêndios Florestais na fazenda São Roque: Aplicações dos Índices Espectrais NBR e dNBR em 2019 e 2021.....	79
3.1.3.1 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Norte 2019.....	79
3.1.3.2 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Sul 2021.....	81
3.1.3.3 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Norte 2021.....	82
3.1.4 Acompanhamento do NDVI da Vegetação Arbórea pré e pós evento de Incêndio Florestal.....	84
3.1.4.1 Evento de Incêndio Florestal 2019 – Parte Norte.....	84
3.1.4.2 Evento de Incêndio Florestal 2021 – Parte Sul.....	90
3.1.4.3 Evento de Incêndio Florestal 2021 – Parte Norte.....	96
3.1.5 Evolução da Resiliência da Vegetação Arbórea Validada no Campo de 2022.....	101
3.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	104
3.2.1 A Classificação Supervisionada da área da fazenda São Roque.....	104
3.2.2 Monitoramento dos Focos de Calor nos Eventos de Incêndios Florestais 2019 e 2021.....	105
3.2.3 Grau das Classes de Severidade dos Eventos de Incêndios Florestais 2019 e 2021...	106
3.2.4 Validação de Campo da Evolução da Resiliência em setembro de 2022 na fazenda São Roque.....	108
3.2.5 Comportamento da Classe da Vegetação Arbórea nos Períodos pré-fogo e pós-fogo.....	109
CONCLUSÃO.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados por queimadas ou incêndios florestais podem ser caracterizados em diversas escalas e biomas no cenário brasileiro. Libonati et al. (2021) destacam que esses eventos têm consequências significativas para o meio ambiente, afetando a biodiversidade, a qualidade do ar e a saúde humana.

Segundo Miranda et al. (2004) o fogo é parte integrante e fundamental na manutenção do bioma Cerrado e também utilizado como técnica de manejos localizados em outros biomas, mas seu uso descontrolado e associado a práticas de desmatamento e atividades agrícolas tem prejudicado a integridade ecológica. Nesse aspecto, os autores alertam para os impactos negativos desse manejo inadequado, que compromete a biodiversidade e a sustentabilidade.

Tendo em vista que as queimadas e os incêndios florestais contribuem para a emissão de poluentes atmosféricos e podem resultar em efeitos diretos e indiretos à saúde humana e ao meio ambiente, a fumaça resultante desses eventos contém partículas finas e gases tóxicos que podem causar problemas respiratórios e agravar doenças cardiovasculares (BRASIL, 2020).

Conforme Marengo et al. (2010) as queimadas nos biomas brasileiros são responsáveis por grande parte das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. Os autores destacam a relevância desse dado, evidenciando uma outra contribuição desses eventos que é para o aquecimento global e as mudanças climáticas.

Neste contexto, Setzer e Ferreira (2021) enfatizam a necessidade de compreender e controlar o que eles chamam de distúrbios em florestas tropicais, como o desmatamento e o fogo, que têm recebido atenção especial no contexto das Políticas de Reduções de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Aumento de Estoques de Carbono Florestal (REDD+) visando à conservação desses ecossistemas estratégicos.

Tendo em vista que o aumento da pressão internacional para a redução das emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂) tem impulsionado políticas governamentais de controle do desmatamento, destacando a necessidade de ações que conciliem a redução do desmatamento com o desenvolvimento sustentável (ARTAXO, 2002).

Para Aragão et al. (2008) o conhecimento detalhado dos padrões de incêndios florestais no Brasil é fundamental para evitar impactos negativos nas populações e nos ecossistemas. Os autores ressaltam a importância da análise desses padrões para a implementação de estratégias efetivas de prevenção e manejo do fogo.

Diante disso os estudos realizados por Nasi et al. (2002), Medeiros e Miranda (2005) e Barlow e Peres (2008) demonstram que a recorrência de incêndios florestais está associada a diversos problemas ambientais. As queimadas repetidas resultam na formação de clareiras, e exposição intensificada à radiação solar, causando impactos negativos na biodiversidade e na estrutura das florestas, pois levam a uma redução na altura e no diâmetro da vegetação, assim como na influência da rebrota, afetando a resiliência das fitofisionomias.

A fitofisionomia refere-se às características estruturais e funcionais da vegetação em determinada região. Ela descreve os diferentes padrões e formas que a vegetação assume de acordo com as condições ambientais e as interações entre os componentes bióticos e abióticos do ecossistema. Segundo Coutinho (2006) foi Humboldt quem a empregou pela primeira vez para descrever a vegetação.

Autores que abordam o conceito de fitofisionomia incluem Ribeiro e Walter (1998), ao apresentarem em sua publicação intitulada as “Fitofisionomias do bioma Cerrado” e o “Manual Técnico da Vegetação Brasileira” (IBGE, 2012), contribuíram para o entendimento e classificação das fitofisionomias em diferentes biomas brasileiros, fornecendo uma base conceitual para o estudo da vegetação e sua relação com o ambiente.

Considerando que a maior planície alagável do mundo, o Pantanal, enfrentou eventos impactantes em sua geodiversidade, como secas severas e inúmeros incêndios nos últimos 4 anos. O uso de imagens de satélites orbitais é extremamente importante para a análise e mensuração das áreas de queimadas, subsidiando políticas públicas de monitoramento e fornecendo insights para melhor compreensão desses eventos.

Neste sentido, o monitoramento por sensoriamento remoto de queimadas e incêndios florestais e o cálculo de risco de fogo da vegetação são atividades essenciais em vários contextos no País, destacando-se: proteção de vidas e propriedades, gerenciamento dos recursos naturais, aumento da produtividade das empresas, vigilância ambiental e gestão da qualidade do meio ambiente do cidadão (SETZER e FERREIRA, 2021).

A pesquisa desta dissertação foi realizada na fazenda São Roque, localizada na sub-região da Nhecolândia no Pantanal, e justifica-se por apresentar metodologias que exploram o potencial dos satélites de escala média para análise e monitoramento da severidade das queimadas e mensuração dos danos em áreas selecionadas. Além disso, busca analisar o potencial de resiliência da fitofisionomia da vegetação arbórea que compõem o mosaico paisagístico do bioma pantaneiro.

De acordo com Oliveira e Aquino (2020), o discurso da resiliência tem ganhado destaque nas esferas acadêmica, política e ambiental. Na ciência geográfica, esse conceito tem sido aplicado tanto na Geografia Física associada aos conceitos de sustentabilidade, vulnerabilidade e capacidade de suporte dos ecossistemas, e ressaltam que a aplicação deste conceito é relevante para a gestão e planejamento ambiental.

Segundo Holling (1973), os ecossistemas não são caracterizados por um equilíbrio estático, mas por uma zona de estabilidade que permite a reorganização do sistema para persistir e funcionar mesmo diante de perturbações e mudanças e de acordo com Christofolletti (1999), a resiliência aplicada em sistemas ambientais está relacionada à capacidade desses sistemas de persistirem em suas relações internas, permitindo absorver mudanças e se recuperarem. Essa capacidade resulta em flutuações dentro de um estado de equilíbrio final em torno das condições iniciais.

Considerando que o fogo tem efeitos desfavoráveis sobre a vegetação, este estudo propôs investigar a resiliência da vegetação arbórea do Pantanal da Nhecolândia em relação aos incêndios florestais, com base na seguinte hipótese: A vegetação arbórea do Pantanal de Nhecolândia é resiliente ao fogo, ou seja, ela reestabelece sua biomassa e o seu vigor após passar por um evento de incêndio florestal.

O objetivo geral foi analisar o potencial de resiliência da fitofisionomia da vegetação arbórea no Pantanal da Nhecolândia após dois eventos de incêndios florestais, utilizando a fazenda São Roque como modelo.

Os objetivos específicos foram: classificar o grau de severidade do efeito do incêndio em sobre a vegetação arbórea; acompanhar o comportamento da vegetação arbórea por meio de uma série histórica; identificar mudanças, após o incêndio florestal, na reconfiguração da fitofisionomia da vegetação arbórea durante o processo de regeneração.

Este trabalho contribuirá para o entendimento da capacidade de recuperação dessa fitofisionomia diante de eventos de incêndios florestais, auxiliando na definição de estratégias de manejo e conservação mais eficazes.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Monitoramento dos Incêndios Florestais nos Biomas Brasileiros

No Brasil, assim como na América do Sul, a quase totalidade das queimadas é causada pelo Homem, por razões muito variadas: limpeza de pastos, preparo de plantios, desmatamentos, colheita manual de cana-de-açúcar, vandalismo, balões de São João, disputas fundiárias, protestos sociais, e etc. Com mais de 300.000 queimadas e nuvens de fumaça cobrindo milhões de km² detectadas anualmente através de satélites, o Brasil ocupa o 4º lugar entre os emissores de gases do efeito estufa (PASSARINHO, 2021), boa parte devido aos desmatamentos, que anualmente consomem em média cerca de 15 mil km²/ano de florestas naturais (INPE, 2020a).

Portanto, as queimadas no Brasil têm um histórico longo e problemático, com impactos significativos no meio ambiente, na saúde humana e na economia, tendo em vista que o país possui uma vasta extensão territorial com uma variedade de biomas, como a Amazônia, o Cerrado, a Mata Atlântica e o Pantanal, que são frequentemente afetados por incêndios (GONÇALVES et al, 2012).

No entanto, nas últimas décadas, as queimadas no Brasil assumiram uma nova dimensão e uma série de problemáticas surgiram. Parafraseando José Bonifácio de Andrada e Silva, o Patrono da Independência, em aproximadamente 1820, que resumiu as razões para as nossas queimadas e desmatamentos como: "ignorância, associada à má-fé". Nos dias de hoje, em que todos sabem dos efeitos negativos das queimadas, temos apenas de inverter a ordem dos motivos para: má-fé, associada ignorância (INPE, 2020a).

Neste contexto, uma das principais questões é o desmatamento ilegal, que muitas vezes é realizado por meio de queimadas deliberadas. As madeireiras clandestinas e as ocupações irregulares de terra têm contribuído para a destruição de áreas florestais, e o fogo é usado como uma ferramenta para encobrir essas atividades ilegais.

O monitoramento dos incêndios florestais nos biomas brasileiros desempenha um papel crucial na prevenção, controle e mitigação desses eventos que têm impactos significativos no meio ambiente e na sociedade. Com a vasta extensão territorial do Brasil e sua diversidade de biomas, é essencial monitorar de forma eficiente as ocorrências de incêndios para melhor compreender suas causas, magnitude e distribuição geográfica (PIRAJÁ et al, 2023).

Com auxílio das geotecnologias o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do Programa Queimadas, desempenha um papel fundamental no monitoramento dos

incêndios florestais no Brasil. Utilizando imagens de satélite, o Programa Queimadas registra e mapeia as queimadas e incêndios em diferentes biomas, fornecendo dados atualizados sobre sua distribuição espacial e temporal (INPE, 2020b).

Conforme o INPE (2020a) a definição de "Queimada" se refere à prática planejada e controlada de queimar a vegetação, enquanto "Incêndio Florestal" se refere à queima inesperada e descontrolada da vegetação. Quando as queimadas saem do controle, transformam-se em incêndios. Na linguagem cotidiana, a palavra "queimada" é mais comumente utilizada, enquanto "incêndio" é associado a situações de fogo em estruturas habitacionais, prédios, fábricas, indústrias, empresas ou instalações diversas. Essa distinção, embora sutil, é comumente adotada, por isso o "Programa Queimadas" do INPE utiliza o termo "queimadas" por ser mais amplamente difundido e compreendido em todo o país (INPE, 2020a).

O monitoramento dos incêndios florestais é conduzido por meio de diversas abordagens, que englobam o uso de tecnologias avançadas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e sistemas de detecção de focos de calor. Essas ferramentas desempenham um papel fundamental ao possibilitar a identificação precisa das áreas afetadas pelo fogo, o acompanhamento da evolução dos incêndios e a avaliação da extensão dos danos causados às paisagens naturais (FERREIRA et al, 2018).

As imagens de satélite fornecem uma visão abrangente das regiões atingidas pelos incêndios, permitindo uma análise espacial detalhada e uma compreensão mais precisa do cenário. Segundo Morelli et al, (2019) os sistemas de detecção de focos de calor são capazes de identificar em tempo real as áreas com atividade de fogo, auxiliando no direcionamento de recursos e no combate aos incêndios de forma mais eficiente. Essas abordagens tecnológicas contribuem significativamente para o monitoramento dos incêndios florestais e fornecem informações valiosas para a tomada de decisões e a implementação de medidas de prevenção e controle.

O Programa Queimadas tem como objetivo criar, desenvolver e implementar métodos, aplicativos e produtos para atender às necessidades científicas, técnicas e de gestão relacionadas à queima da vegetação no Brasil. Essa iniciativa utiliza tecnologias avançadas, como imagens de satélite, dados meteorológicos, previsões numéricas do tempo e aplicativos de geoprocessamento e bancos de dados, com divulgação online. Segundo Setzer et al, 2021 o programa possui quatro linhas de atuação principais:

- A primeira linha envolve a detecção em tempo quase real de focos de fogo na vegetação,

processando cerca de 200 imagens por dia de quinze satélites diferentes. Os resultados são apresentados em um aplicativo próprio chamado Banco de Dados de Queimadas (BDQ), que permite análises personalizadas, seleção de imagens e sobreposição de dados meteorológicos e cartográficos, além de geração de gráficos e download das informações em diferentes formatos.

- A segunda linha consiste na estimativa diária do risco de queima da vegetação, utilizando dados meteorológicos dos últimos 120 dias e previsões numéricas com até 15 dias de antecedência. Essas estimativas são acessadas pelos usuários para integração em seus sistemas de geoprocessamento, com análises automáticas que apresentam um alto índice de acerto.
- A terceira linha abrange estimativas de área queimada, com imagens de 1 km e 30 m de resolução espacial, derivadas das imagens dos satélites MODIS, VIIRS e OLI/Landsat-8. Esses dados estão disponíveis para os seis biomas brasileiros, sendo que, por enquanto, a resolução em média resolução está disponível apenas para o Cerrado.
- A quarta linha do programa oferece apoio a diversos usuários, como Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), Centro Integrado Multiagências de Coordenação Operacional Nacional (Ciman), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Saúde, Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), Operador Nacional Elétrico (ONS), órgãos ambientais, brigadas de incêndio, defesa civil e prefeituras, fornecendo produtos operacionais especiais de acordo com suas necessidades específicas.

O monitoramento dos incêndios florestais nos biomas brasileiros não se restringe apenas à detecção dos focos de calor, mas também inclui a análise dos dados coletados para compreender os padrões de ocorrência, as causas principais e os impactos ambientais desses eventos. Estudos científicos são realizados para avaliar a relação entre os incêndios florestais e as mudanças climáticas, bem como para identificar os fatores que contribuem para a propagação do fogo.

Conforme o INPE (2020b) ao todo são utilizados dez satélites que possuem sensores óticos operando na faixa termal-média de 4 micrômetros (μm). Estas imagens são processadas operacionalmente na Divisão de Geração de Imagens - DGI e na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DAS. Entre os satélites, são obtidas imagens dos satélites polares, as AVHRR/3 dos NOAA-18 e 19, METOP-B e C, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA e as VIIRS do

NPP-Suomi e NOAA-20 e, as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-16 e MSG-3.

Atualmente o satélite AQUA_M-T (sensor MODIS, tem sua passagem no início da tarde) e é o satélite de referência, cujos dados diários de focos detectados são usados para compor a série temporal ao longo dos anos e assim permitir a análise de tendências nos números de focos para mesmas regiões e entre regiões em períodos de interesse (INPE, 2020b).

Conforme o INPE (2020a), um foco de calor indica a presença de fogo em um elemento de resolução da imagem, variando de tamanho dependendo do satélite utilizado, podendo ir de 375 m x 375 m até 5 km x 4 km. Embora um único píxel possa abranger várias frentes de fogo ativas, apenas um único foco ou ponto é indicado. Em casos de eventos de fogo extensos, é possível que esses eventos sejam detectados em píxeis vizinhos, resultando em vários focos associados a um único evento de maior magnitude. Essa detecção múltipla em píxeis vizinhos desempenha um papel importante na identificação e extensão de incêndios de grande porte.

Para tanto, os dados relacionados aos focos de calor apresentam diversos atributos essenciais para a análise. Esses atributos incluem informações cruciais, como a localização espacial dos focos, o registro da data e hora pelo satélite e o número de dias sem chuva anterior ao evento, com um limite de até 120 dias. Em casos em que há ocorrência de precipitação, são atribuídos pesos com base na quantidade de chuva e no intervalo de tempo até a data do cálculo, o que possibilita obter o número hipotético de dias consecutivos sem chuva. Além dos dados diários de temperatura máxima acima de 30°C e umidade relativa mínima abaixo de 40%, outros parâmetros relevantes para essa análise são o tipo de vegetação, a elevação topográfica e a latitude, que juntos formam o atributo de classificação conhecido como Risco de Fogo (RF) (SETZER et al., 2019).

Esses dados detalhados de focos de calor são fundamentais para a identificação e análise de informações importantes, tais como a localização exata, o início, a propagação e a densidade dos focos de queima que embasam as pesquisas científicas, as ações de manejo do fogo, planejamento de políticas públicas e implementação de medidas preventivas.

O índice resultante do atributo RF (Risco de Fogo) é classificado em cinco categorias distintas (Tabela 1), com valores válidos variando de 0 a 1. Segundo o INPE (2020c), os focos de calor que apresentam RF com o número -999 indicam um valor inválido, geralmente associado a áreas urbanas ou corpos d'água, onde o cálculo do RF não faz sentido.

Tabela 1 - Categorias de Risco de Fogo

Risco	Valores do Risco de Fogo (RF)
Mínimo	$RF < 0,15$
Baixo	$0,15 < RF \leq 0,40$
Médio	$0,40 < RF \leq 0,70$
Alto	$0,70 < RF \leq 0,95$
Crítico	$RF > 0,95$

Fonte: Adaptado de Setzer et al. (2019).

Outro atributo que está inserido nos focos de calor e extremamente importante é o Potência Radiativa do Fogo, conhecido pela denominação em inglês de *Fire Radiative Power* ou pela sigla “FRP” entre os dados de detecção de incêndios gerados por sensores remotos, este é o parâmetro mais utilizado para estimar a biomassa das queimadas e está relacionado diretamente com a intensidade do fogo e é proporcional ao total de biomassa consumida por unidade de tempo (SILVA et al., 2019; WOOSTER et al., 2003).

Com base nas informações obtidas, é possível desenvolver estratégias de prevenção e controle mais eficazes, como a criação de brigadas de incêndio, a promoção de campanhas de conscientização e a capacitação de comunidades locais para atuar na prevenção e combate aos incêndios em diversos biomas brasileiros.

Tendo em vista que o Programa de Monitoramento de Incêndios Florestais do INPE disponibiliza de forma periódica em seu site oficial informações de monitoramento pro meio do BDQueimadas, do Ciman Virtual, do TerraMA2Q, Área Queimada, Risco de Fogo e o SISAM, com relatórios e registros de alcance local, regional e nacional, como o Boletim InfoQueima, Resumos Históricos e Publicações e Impactos, apresentando detalhes sobre a extensão e posicionamento das áreas afetadas por queimadas ao longo das últimas décadas, empregando uma variedade de tecnologias de observação por satélite.

Nesse contexto, Setzer e Ferreira (2021) realizarem uma análise espaço-temporal de áreas queimadas aplicando o produto AQM1km para estimar a extensão de áreas queimadas em escala regional, com uso de dados da coleção 6 do sensor MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA, demonstraram a distribuição espacial da recorrência anual de áreas queimadas no Brasil no período de 2003-2019, onde a grande maioria situa-se no bioma do Cerrado, contribuindo com 51% do total de áreas queimadas no País, seguido pelos biomas da Amazônia, com 26% e Caatinga, com 13%.

O Produto AQ1km foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Aplicações de

Satélites Ambientais - LASA, do Departamento de Meteorologia da UFRJ (Libonati et al., 2015a), de baixa resolução espacial (1 km), este produto encontra-se em fase de validação, em nível de maturidade provisório, contudo, está em constante atualização e validação, portanto podem ocorrer alterações de acordo com o lançamento de novas versões (INPE, 2020d).

No entanto, segundo o Monitor do Fogo do MapBiomas, cerca de meio milhão de hectares foram queimados no Brasil nos primeiros dois meses de 2023, representando uma diminuição de 28% em relação ao ano anterior. A Amazônia foi responsável por 90% desse total de áreas queimadas, o segundo bioma que mais queimou nos dois primeiros meses de 2023 foi o Cerrado, sendo 64% maior na comparação com o mesmo período de 2022 (MapBiomas, 2023).

Ainda de acordo com o MapBiomas, os biomas Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga e Pampa registraram a menor extensão queimada dos últimos cinco anos durante os meses de janeiro e fevereiro de 2023. Na Mata Atlântica, foram afetados aproximadamente 4.600 hectares, principalmente em áreas agrícolas. No Pantanal, a área queimada foi de 8,8 mil hectares, com maior incidência em formações campestres e um grande impacto no Parque Nacional do Pantanal Mato Grossense. Na Caatinga, a extensão queimada atingiu 6,7 mil hectares. Já no Pampa, foram queimados 4 mil hectares, sendo 70% deles em formações campestres. Essas informações têm como base imagens capturadas por satélite (MAPBIOMAS, 2023).

Segundo (Hardesty, Myers, & Fulks, 2005; Lapola et al., 2014; Pivello, 2011), ao longo de milhares de anos, o Cerrado brasileiro tem sido sujeito a ocorrências esporádicas de fogo de origem natural, devido às características climáticas regionais. Nesse contexto, os processos ecológicos evoluíram adaptados a esse regime de fogo natural. Entretanto, nas últimas décadas, a influência humana relacionada à agricultura e à pecuária impactou significativamente o regime de fogo neste bioma, resultando em alterações significativas devido a maior parte da vegetação original ser substituída por pastagens e áreas agrícolas.

Quanto a Amazônia, Schroeder et al. (2013) ao pesquisarem evidências do registro de carvão vegetal, identificaram que os incêndios nas florestas amazônicas eram eventos pouco frequentes como agente de perturbação florestal antes do século XX. No entanto, ao longo das últimas décadas, houve uma mudança dramática no espaço e na distribuição temporal desses incêndios. O fogo passou a desempenhar um papel fundamental nas transformações do uso e cobertura da terra na Amazônia, em decorrência da crescente intervenção humana na região,

juntamente com anomalias climáticas, que expôs a floresta tropical a um aumento sem precedentes no número de queimadas.

Abrangendo uma área de 844.500 km² (IBGE, 2019), a Caatinga é dos grandes biomas afetados por queimadas todos os anos, que segundo Setzer e Ferreira (2020c) estes eventos de queima estão associados a períodos de estiagem prolongados e também aos aspectos antrópicos do uso do fogo na agropecuária e nos desmatamentos.

Durante o período de 2000 a 2012, Setzer e Ferreira (2021) constataram, por meio de detecções por satélite, que o fogo na vegetação da Caatinga apresenta diferenças entre origem antrópica e natural. O fogo de origem antrópica, causado pelo homem durante longos períodos de estiagem, propaga-se facilmente na vegetação seca e ocorre anualmente, enquanto o fogo de origem natural, provocado por raios, ocorre em períodos chuvosos e de transição, afetando áreas limitadas e com intervalos de alguns anos. Os meses mais secos concentram o fogo de origem antrópica, o qual está em desacordo com o Código Florestal e causa danos significativos ao ecossistema.

De acordo com a pesquisa de Campanharo et al. (2021), que examinaram o padrão das queimadas nos biomas brasileiros, no período de 2003 a 2016, foi observada uma sazonalidade nas queimadas em todos os biomas, exceto no Pampa. A ocorrência desses incêndios florestais está relacionada a fatores climáticos e à presença de material combustível seco. Segundo os autores, a falta de sazonalidade no Pampa pode ser atribuída à menor cobertura florestal nesse bioma em comparação com os outros. Outra consideração, é a relação entre o clima, representado pela precipitação, e a extensão das áreas afetadas é inversamente exponencial, especialmente nos biomas com maior incidência de queimadas, como Cerrado, Amazônia e Caatinga.

Um outro sistema de monitoramento que ganhou destaque útimamente, principalmente quanto a divulgação de dados de desmatamento é o Projeto MapBiomas, que tem o propósito de revelar as transformações do território brasileiro por meio da ciência, com precisão, agilidade e qualidade, e tornar acessível o conhecimento sobre a cobertura e o uso da terra, para buscar a conservação e o manejo sustentável dos recursos naturais, como forma de combate às mudanças climáticas (MAPBIOMAS, 2023b).

A metodologia do MapBiomas baseia-se na análise de séries temporais de imagens de satélite, permitindo identificar mudanças na cobertura vegetal ao longo do tempo por meio de linguagem de programação, em parceria com o Google Earth Engine. A metodologia torna-se

bastante robusta na detecção de mudanças na cobertura da Terra, tendo em vista que utiliza técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial para classificar e interpretar as imagens, fornecendo informações detalhadas sobre os diferentes tipos de uso da terra, como áreas agrícolas, florestas, pastagens e áreas urbanas e cicatrizes de queimadas (MAPBIOMAS, 2023b).

A importância do projeto MapBiomass para a sociedade é significativa, pois promove a transparência e a democratização dos dados, disponibilizando informações acessíveis ao público em geral. Isso permite que pesquisadores, organizações não governamentais e a sociedade civil em geral possam utilizar esses dados para realizar estudos, monitorar ações e desenvolver iniciativas voltadas para a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais.

Diante deste contexto, as perspectivas futuras no mapeamento de áreas queimadas por satélites no Brasil são promissoras, graças aos avanços contínuos nas tecnologias de sensoriamento remoto e processamento de dados. Esses avanços permitirão um monitoramento mais eficiente e preciso das áreas afetadas pelo fogo, fornecendo informações em tempo quase real.

Pinto et al. (2020) destacaram que as perspectivas futuras no mapeamento de áreas queimadas por satélites no Brasil envolvem duas questões fundamentais. A primeira diz respeito ao avanço e lançamento de novos sensores orbitais, que possibilitam a obtenção de imagens de alta qualidade da superfície terrestre em tempo reduzido e com resoluções espaciais e espectrais mais refinadas. A segunda questão envolve o desenvolvimento de técnicas e algoritmos inovadores para o mapeamento de queimadas, com destaque para algoritmos híbridos e métodos de aprendizado de máquina que se mostram promissores na identificação de queimadas menores ou sem focos ativos.

Diante deste contexto Libonati et al. (2021) ressaltaram a importância da correta identificação e quantificação das áreas de vegetação queimada para caracterizar, compreender e mitigar o impacto climático, ecológico e humano das queimadas no Brasil. Sendo o sensoriamento remoto apontado como uma ferramenta indispensável, pela sua capacidade, que não é alcançada por nenhum outro método convencional de medição, de potencializar as observações em grandes áreas de forma uniforme e contínua ao longo do tempo, mesmo em regiões de difícil acesso.

1.2 O Bioma Pantanal: Queimadas Naturais e Incêndios Florestais

O Pantanal é um bioma único e diversificado que abrange uma extensa área no centro-oeste do Brasil, além de partes dos territórios da Bolívia e do Paraguai. Reconhecido como a maior área úmida contínua do planeta, o Pantanal apresenta uma rica biodiversidade e uma variedade de ecossistemas, já caracterizado por pesquisadores em meados do século XX sob diversas óticas, como: da geologia, como uma única grande bacia tectônica quaternária do território brasileiro (FREITAS, 1951), da geomorfologia, a maior planície de nível de base interna no interior do país (ALMEIDA, 1946), da geografia, a mais ampla e complexa planície de inundação existente na faixa de latitude (WILHELMY, 1958) e como um setor de contato e grandes desdobramentos terrestres e aquáticos (AB'SÁBER, 2006).

1.2.1 A Planície do Pantanal Mato-grossense

O Pantanal está localizado na Bacia do Alto Paraguai (BAP) delimitada pelas nascentes do Rio Paraguai ao norte, até a confluência com o rio Apa ao sul, entre as latitudes 14° a 22° S e longitude 53° a 61° W. Já a planície do Pantanal (16 a 20° S e 58 a 50° W), com uma superfície de aproximadamente de 138.000 km² em território brasileiro, nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, constitui a maior área úmida de água doce do planeta, com aproximadamente 84% de seu território preservado, é reconhecido como a maior área úmida remanescente de vegetação natural (CARVALHO, 1986; GODOI FILHO, 1986; POR, 1995 e LIBONATI et al., 2020).

O bioma Pantanal está inserido numa bacia sedimentar intracratônica quaternária, ainda tectônica ativa. A sua origem vincula-se à própria formação da Bacia do Alto Paraguai, que é ligada à orogênia Andina ocorrida no final do Terciário (FRANCO e PINHEIRO, 1982; SHIRAIWA, 1994; ASSINE, 2003; AB'SABER, 2006; PARIZOTTO, 2012).

A planície do Pantanal é preenchida por uma espessa camada de sedimentos, cuja espessura de aproximadamente de 550 metros de profundidades, inferidos por dados sísmicos e por perfurações feitas pela Petrobras, essa camada de sedimentos é composta principalmente por sedimentos siliciclásticos, sendo estratigráfico com areias quartzosas finas a médias e localmente grossas na parte superior e conglomerados e arenitos grossos na parte inferior. Essa camada de sedimentos recobre o embasamento geológico formado principalmente de rochas metamórficas de baixo-grau, do final do Pré-Cambriano e início do Paleozoico (DNOS 1966/72; USSAMI *et al*, 1999, ASSINE, 2003; REZENDE-FILHO, 2011; MARTINS, 2012; SANTOS, 2022).

A altimetrias da planície do Pantanal apresentam cotas topográficas de 80 metros nas margens do rio Paraguai e de 150 metros junto às depressões circundantes. Ela perfaz uma largura de 200 a 250 km no sentido Leste-Oeste, e de 450 a 500 km no sentido Norte-Sul, com isso, apresentando uma suave inclinação da ordem de 0,3 a 0,5 m/km, leste para oeste, de 0,03 a 0,15 m/km de norte para sul (FRANCO e PINHEIRO, 1982; ALVARENGA et al, 1984; CARVALHO, 1986).

As dimensões da planície do Pantanal combinadas à rede fluvial que nela se instalou têm favorecido o desenvolvimento de uma complexa morfologia fluvial, muitas vezes caracterizadas pela presença de leques aluviais que ainda constituem sistemas deposicionais ativos e dos quais, o mais notável é o do rio Taquari (REZENDE-FILHO, 2011).

Os solos do Pantanal são de origem sedimentar, recentes ou sub-recentes, ocorrendo em fases argilosas e arenosas, de forma alternada e descontínua. Dessa forma, o solo é quase totalmente recoberto por solos hidromórficos, que refletem a deficiência da drenagem responsável por sua inundação periódica e prolongada, e por isto podem apresentar diferentes classes. A principal diferença entre os solos que ocorre na planície é relacionada à textura, pois em suas porções norte e sul eles são mais argilosos, e em sua porção central é mais arenoso (REZENDE FILHO, 2006 e REZENDE-FILHO, 2011).

O ciclo das águas no Pantanal é influenciado pelas chuvas sazonais, pelos rios que o alimentam e pela topografia da região. De acordo com Assine (2010) o Pantanal imprime uma extensa e prolongada inundação sazonal que ocorre de janeiro a junho, mas com pico de inundação máxima em meses distintos em diferentes compartimentos geográficos da planície.

Esse ciclo tem início durante a estação chuvosa, que ocorre entre os meses de outubro a março. Nesse período, as chuvas intensas contribuem para o aumento do nível dos rios que drenam para o Pantanal, como o rio Paraguai, o rio Cuiabá, o rio Taquari e o rio Miranda. Essas águas transbordam para as áreas de planície, alagando vastas extensões do Pantanal (FERNANDES, 2000).

Com o transbordamento dos rios, forma-se uma imensa planície alagada, também conhecida como *wetland* (WWF, 2008), criando um ambiente conhecido como "vazante". Durante esse período, as águas espalham-se pelo Pantanal, inundando campos, matas e outras formações vegetais. Essas áreas alagadas são de vital importância para a fauna e a flora do Pantanal, proporcionando habitat para inúmeras espécies (ADÁMOLI, 1986).

Após a estação chuvosa, segue-se a estação seca, que ocorre entre os meses de abril a

setembro. Durante esse período, as chuvas diminuem consideravelmente, resultando em uma redução gradual dos níveis de água no Pantanal. Os rios recuam para seus leitos principais, e as áreas alagadas começam a secar (GABARINI, 2021).

A estação seca é caracterizada por uma alternância de períodos de seca mais intensa e pequenas chuvas, conhecidas como "veranicos". Durante essa fase, as áreas alagadas vão encolhendo e formam-se os chamados "corixos" e "baías", que são trechos de água remanescentes em meio ao terreno mais seco. Essas áreas concentram uma grande quantidade de vida, pois são fonte de alimento e abrigo para muitas espécies (REZENDE-FILHO, 2006).

1.2.2 Fitofisionomia do Pantanal Mato-grossense

O bioma Pantanal encontra-se inserido na Bacia do Alto Rio Paraguai (BAP), que abrange porções dos biomas Amazônia, Cerrado e enclaves de Mata Atlântica. Sendo o bioma Amazônia na porção norte da BAP, a oeste da Serra de Cáceres, o bioma Cerrado sobre as terras altas que circundam o Pantanal e os enclaves de Mata Atlântica nas cabeceiras dos rios Aquidaban, Rio Branco e Terere, na Serra da Bodoquena e nas proximidades da cidade de Corumbá - MS (REZENDE-FILHO, 2011).

A distribuição dessas diferentes vegetações, segundo Pott (2004) depende das características do terreno, do solo e do nível de alagamento em cada área. Neste contexto, o ciclo hidrológico, também conhecido por ciclo das águas, desempenha um papel fundamental na manutenção da biodiversidade e nos processos ecológicos do bioma.

O Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai - PCBAP (1997) descreve as diferentes coberturas vegetais encontradas na região. Nos Planaltos, temos Florestas Estacionais, Savanas e transições entre Savana e Floresta Estacional. Na Depressão do Rio Paraguai, encontramos Florestas Estacionais, Cerrados, Cerradões e Campos Sujos. Na Depressão Interplanáltica de Paranatinga, temos a vegetação de Savana Parque, enquanto na Depressão do Guaporé, encontramos Savanas Arbóreas Abertas e Cerradões. Já na Planície do Pantanal, o bioma Pantanal, que também apresenta cactos e epífitas, é composto por campos inundáveis, mata ciliar, cerrado, cerradão e floresta seca.

Silva et al. (2000) ao adaptarem e aplicarem um método de levantamento aéreo para mapear e quantificar as classes de vegetação no Pantanal Mato-grossense por sub-região, identificaram 16 classes com base nas características fitofisionômicas. As principais classes e, respectivamente, seus percentuais de áreas foram: campo (31,1%), cerradão (22,1%), cerrado (14,3%), brejos (7,4%), mata semidecídua (4,0%), mata de galeria (2,4%) e baceiro ou batume

(2,4%). Os autores também apresentam como resultados um paralelo para a classificação da vegetação entre o sistema fisionômico ecológico do IBGE (1992) e as denominações regionais utilizadas (Quadro 1).

Quadro 1 - Equivalência entre o sistema fisionômico-ecológico (IBGE, 1992) e as denominações regionais.

Sistema Fisionômico Ecológico	Denominação Regional
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	mata de galeria
Floresta Estacional Semidecidual Terras Baixas	mata semidecídua
Savana Florestada	cerradão, babaçual
Savana Arborizada	cerrado
Savana Parque	paratudal, canjiqueiral
Savana gramíneo-lenhosa	campo inundado, campo seco
Savana Estépica Florestada	chaco
Savana Estépica Parque	carandazal
Sistema Edáfico de Primeira Ocupação, Formações pioneiras – Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre	buritizal, cambarazal, pirizal; caetezal, baceiro ou batume, brejo

Fonte: Silva et al. (2000)

1.2.3 Compartimentação do Pantanal Mato-grossense

Quanto a compartimentação do Pantanal em sub-regiões, para Ab'sáber (2006):

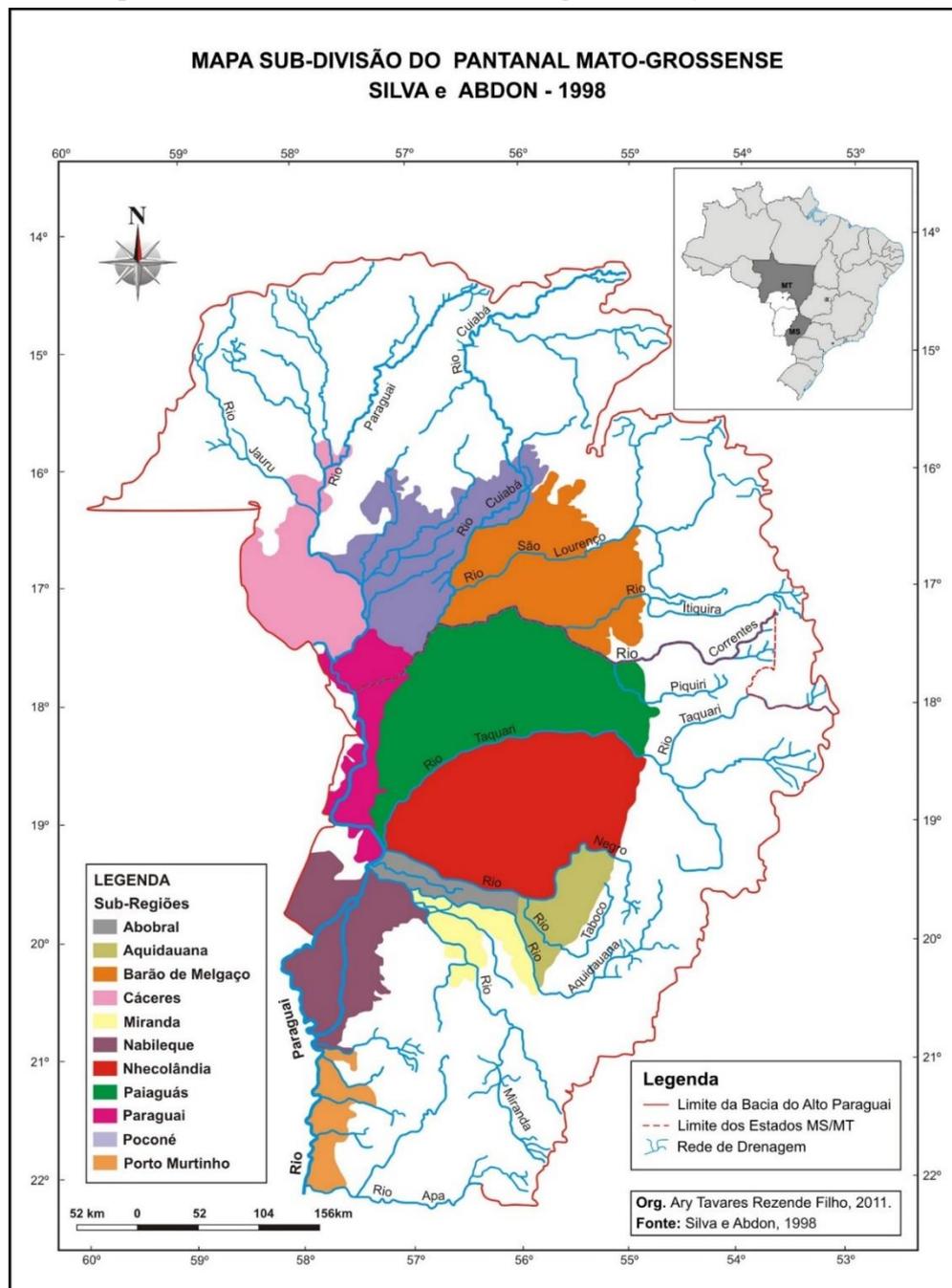
O Pantanal encontra-se na categoria de uma grande e relativamente complexa planície de coalescência detrítico-aluvial, o Pantanal Mato-Grossense inclui ecossistemas de domínio dos cerrados e ecossistemas do Chaco, além de componentes bióticos do Nordeste seco e da região periamazônica. Do ponto de vista fitogeográfico, trata-se de um velho “complexo” regional, que os mapeamentos de vegetação, elaborados a partir de documentos de imagens de sensoriamento remoto, transformaram em um mosaico perfeitamente compreensível da organização natural do espaço e, em nada, “complexo”, por isso era até então denominado Complexo do Pantanal (AB'SÁBER, 2006).

A planície do Pantanal por ser constituído por uma diversidade de aspectos dos tipos florísticos, fisionômicos e marcados pelos divisores de águas (morfologia fluvial) e ainda somados aos critérios analíticos baseados na interpretação de imagens de satélite com base nesses conjuntos de critérios, várias compartimentações do Pantanal foram propostas por diversos autores (MOURA, 1943; PEREIRA 1944; SANCHES, 1977; BRASIL, 1979; ADAMOLI, 1982; FRANCO e PINHEIRO, 1982; ALVARENGA et al., 1982; ALVARENGA et al., 1984; AMARAL FILHO, 1986; SIVA e ABDON, 1998; REZENDE-FILHO, 2011) dessa forma, as questões ligadas à compartimentação do Pantanal não são tão simples, deparamos com o problema da escala de abordagem além dos critérios a serem abordados.

Dada a grande diversidade das questões ligadas à compartimentação do Pantanal em sub-regiões, cada uma com características próprias, pode-se notar que as diferentes compartimentações propostas, apenas algumas baseia-se em critérios funcionais refletem compartimentações funcionais da paisagem (REZENDE-FILHO, 2011).

A partir desses estudos, Silva e Abdon (1998) propuseram, uma compartimentação essencialmente fundamentada em aspectos físicos e ambientais, onde incluíram uma dimensão política-administrativa que resultou em 11 sub-regiões (Figura 1).

Figura 1. Mapa da subdivisão do Pantanal Mato-grossense (SILVA e ABDON, 1998).



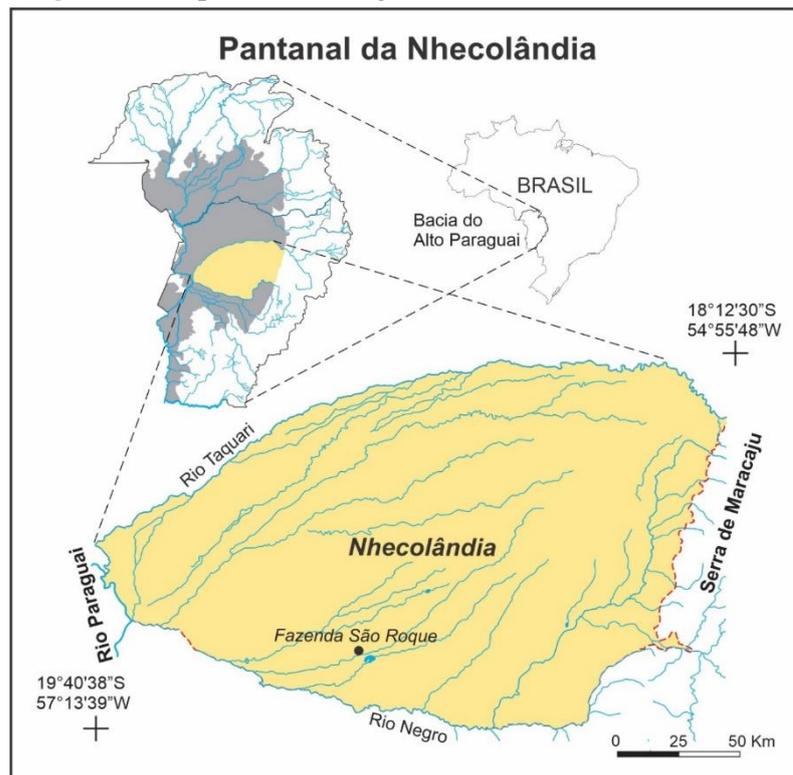
Fonte: Rezende-Filho, 2011.

1.2.4 A Subregião do Pantanal da Nhecolândia

A extensa rede hidrográfica que drena a planície do Pantanal, em suas águas são carregadas de sedimentos provenientes das terras altas adjacentes e quando chegam a planície do Pantanal formam diversos leques aluviais que caracterizam o bioma, estes leques variam de tamanho, tais como leque do rio Taboco, estudado por Pirajá (2018), e o grande leque aluvial do Taquari, que de acordo com Assine (2003) é a feição mais notável na geomorfologia do Pantanal, pois é um sistema imenso e pouco conhecido geologicamente. O leque aluvial do Taquari forma uma das feições mais conhecidas do Pantanal, a Nhecolândia.

A sub-região do Pantanal da Nhecolândia, uma das maiores sub-regiões do Pantanal (Figura 2), abrange toda a porção sul do leque aluvial do rio Taquari com área de aproximadamente de 24.000 km² (SILVA & ABDON, 1998), limita-se ao norte pelo rio Taquari e ao sul o rio Negro, a leste e a escarpa de Maracaju e a oeste o rio Paraguai.

Figura 2. Mapa de localização do Pantanal da Nhecolândia.



Fonte: Santos, 2022.

De acordo com Rezende-Filho (2006) a sub-região do Pantanal da Nhecolândia ocupa a parte sul do gigantesco leque aluvial do rio Taquari, configurando uma fisionomia bastante típica. Neste leque aluvial estão presentes três das principais unidades da paisagem local, que são as cordilheiras, vazantes e as depressões circulares e semicirculares, localmente chamadas de baías e salinas.

Segundo Adámoli (1982) a baixa declividade na planície do Pantanal dificulta o fluxo das águas, que associada a topografia, leva ao surgimento de ambientes distintos, como as denominadas "cordilheiras", que são antigos diques fluviais recobertos por vegetação arbórea mais densa. Segundo Franco & Pinheiro (1982) as cordilheiras são formas positivas de relevo, alongadas e estreitas, ligeiramente mais elevadas na paisagem geral da planície com cobertura vegetal de cerrados e cerradões.

As terminologias regionais que permeiam, caracterizam e distinguem as formações e associações das diferentes unidades da paisagem do bioma Pantanal, também incluem as "vazantes", que são superfícies ligeiramente côncavas e consistem extensas áreas temporariamente alagadas, com escoamento superficial muito lento, normalmente recoberto por gramíneas, os "corixos", que correspondem a cursos de águas alongados, de caráter perene, exceto durante as estiagens severas, e normalmente conectando "baías" contíguas durante as cheias, em geral, estes canais são mais estreitos e profundos do que as vazantes (FRANCO & PINHEIRO, 1982).

Entre as lagoas, encontram-se as "baías", que são formas negativas de relevo, as vezes apresentando concavidades suaves, normalmente com presença de água doce, com formato circular, semicircular ou irregular, variando de dezenas a centenas de metros com vegetação predominante de gramíneas (FRANCO & PINHEIRO, 1982) e as "salinas", que são pequenas depressões permanentes de águas alcalinas, circulares e/ou alongadas, sem vegetação no seu entorno. Ocasionalmente seca em períodos de seca extrema, cercada por cordilheiras, e geralmente não são alimentadas pelas águas superficiais das cheias. As salinas estão sempre em nível topográfico inferior as cordilheiras, baías e vazantes (SAKAMOTO et al., 1997).

1.2.5 Queimadas Naturais e Incêndios Florestais no Pantanal

O ciclo das águas no Pantanal é essencial para a manutenção da rica biodiversidade do bioma. Diante deste contexto, as enchentes periódicas permitem a renovação dos ecossistemas, transportando nutrientes e facilitando a reprodução de diversas espécies de peixes, aves migratórias e mamíferos aquáticos. Neste cenário, as áreas alagadas fornecem recursos alimentares abundantes, impulsionando a produtividade ecológica (SWARTS, 2000)

No entanto, a escassez das chuvas sazonais que desempenham um papel importante na regulação do ciclo hidrológico, influenciando a quantidade e a distribuição das áreas alagadas, tem afetado esse ciclo de forma significativa, levando a alterações nos padrões de chuva e períodos de seca mais prolongados. Essas condições climáticas associadas as pressões

antrópicas, como o desmatamento, cada vez mais aumentam o risco de ocorrência de queimadas no Pantanal, pois a biomassa seca favorece a queima (SILVA et al., 2020).

As mudanças climáticas têm reflexos impactantes em todo o mundo e alerta para a possibilidade de consequências ainda mais graves, caso não haja uma redução de 50% nas emissões de gases do efeito estufa até o final desta década, juntamente com a implementação imediata de medidas de adaptação. Os impactos das mudanças climáticas já estão sendo mais severos e abrangentes do que se previa inicialmente. Com o atual aquecimento de 1,1°C, o mundo já enfrenta perturbações generalizadas em diversas regiões (IPCC, 2022).

Neste contexto climático, o Pantanal vêm sendo constantemente ameaçado por atividades antropogênicas que alteram sua dinâmica sazonal complexa e dependente de regimes climáticos (FIOCRUZ, 2020). Associado a respostas políticas e iniciativas de conservação não compatíveis com a escala e permanência dos desafios impostos pelo regime do fogo, tendo em vista que, a ameaça teoricamente possa vir das queimadas, que são eventos climáticos naturais relacionados com raios e os incêndios são causados pelo fogo intencional ou descontrolado (DA SILVA et al, 2008). Independentemente da ignição, durante períodos de seca prolongada, o Pantanal enfrenta uma situação crítica, já que os incêndios florestais representam um elemento agravante significativo.

De acordo com este cenário, ao realizar uma análise bibliométrica acerca dos estudos realizados sobre o uso do fogo no Pantanal, Gonçalves (2021) observou que o estudo do fogo é considerado uma nova área da pesquisa no Pantanal, registrado com aproximadamente quatro décadas de estudos e um recente aumento na produção acadêmica no último ano.

Os temas levantados por Gonçalves (2021) referem-se principalmente a estudos relacionados a conservação ambiental, uma vez que o bioma não possui estrutura para sobreviver em curto prazo com as queimadas e eventos extremos de seca. Neste sentido a ecologia do fogo vem sendo abordada frequentemente nas ciências ambientais.

Em 2020, ocorreram incêndios florestais devastadores no Pantanal, resultado de uma combinação de condições climáticas desfavoráveis, práticas inadequadas de manejo do fogo e regulamentações ambientais deficientes. A pesquisa realizada por Correa et al. (2022), analisou os padrões recentes e as mudanças no comportamento do fogo no Pantanal com base nas imagens de satélite Landsat, revelando que nas últimas duas décadas, os incêndios ocorreram com maior frequência em áreas de pastagens do que em outros tipos de cobertura do solo. No entanto, os incêndios de 2020 atingiram principalmente regiões de floresta. Verificou-se

também que as grandes áreas de incêndio são mais comuns em florestas e pastagens, enquanto as áreas de cultivo apresentam incêndios menores.

Os resultados apresentados por Correa et al. (2022) indicam uma mudança no comportamento dos incêndios florestais no Pantanal em relação a períodos anteriores, afetando sua frequência, intensidade e os ecossistemas impactados e ressaltam a necessidade de uma abordagem mais abrangente e eficaz para a prevenção e o controle dos incêndios florestais.

De acordo com Abreu et al. (2022) ao analisaram as tendências de incêndios nos biomas Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica em escalas interanuais, intrasazonais e mensais. Observaram uma mudança nas tendências de uso e cobertura da terra ao longo dos anos, com uma forte correlação entre o fogo e as áreas agrícolas. A conversão dessas terras para atividades agrícolas tem resultado em um aumento anual nos incêndios, sendo o Pantanal o bioma com maior probabilidade de ocorrência de incêndios, seguido pelo Cerrado e Mata Atlântica.

Oliveira-Júnior et al. (2020) investigaram a variabilidade temporal dos focos de incêndio em diferentes biomas de Mato Grosso do Sul. Os autores analisaram dados de focos de incêndio e precipitação em escala anual em 15 municípios, sendo nove no Cerrado, quatro na Mata Atlântica e dois no Pantanal, utilizando o teste de Mann-Kendall, verificaram se havia tendências significativas nos dados de chuvas e focos de fogo nos biomas. Os resultados mostraram que o Pantanal apresentou maior ocorrência de focos de incêndio em comparação com o Cerrado e a Mata Atlântica. Essa maior incidência de incêndios no Pantanal está relacionada ao período prolongado de estiagem e às atividades humanas, especialmente a pecuária extensiva.

1.3 Geotecnologias como apoio ao Monitoramento das Queimadas no Pantanal

De acordo com Libonati et al. (2020), a frequência e gravidade dos incêndios estão aumentando devido ao aquecimento climático e aos impactos humanos. Desde 1980, houve um aumento médio de 2°C nas temperaturas e uma diminuição de 25% na umidade do ar, e o Pantanal enfrentou a pior seca dos últimos 60 anos, com 57% menos chuvas do que o normal. Essa combinação de condições quentes e secas elevou os riscos de incêndio para níveis sem precedentes desde 1980, conforme indicado pelo índice de classificação diária média de gravidade baseado em dados do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF).

A ciência do fogo abrange uma ampla gama de disciplinas, incluindo: climatologia, química, ecologia, economia, análise de risco e modelagem computacional. Portanto, é

fundamental que haja uma colaboração entre pesquisadores de diferentes áreas e técnicos especializados para abordar os desafios relacionados ao fogo, pois os impactos dos incêndios florestais são devastadores e se propagam rapidamente, afetando negativamente a resiliência das comunidades e da vegetação, resultando na substituição de florestas por paisagens mais abertas e com menos recursos disponíveis (LIBONATI et al., 2020).

Diante deste cenário, o uso das geotecnologias tornam-se imprescindíveis no monitoramento dos incêndios no Pantanal, como os de Pirajá et al. (2023) que ao avaliarem um sistema de geotecnologias com dados de aquisição diária dos focos de queimadas na plataforma do INPE, plotados sobre as imagens dos satélites Sentinel, para monitoramento de evento de queimadas na sub-região da Nhecolândia, demonstraram que o método permite respostas rápidas ao monitoramento e perícia do fogo, tendo em vista a disponibilidade de informações sobre os focos de calor atualizadas a cada 10 minutos e a fotointerpretação em imagens de média resolução espacial, sendo uma ferramenta adequada para evidenciar a localização e extensão do problema, em tempo quase real.

Assim como o emprego de metodologias com uso de índices espectrais tornam-se eficientes na avaliação dos danos causados pelos incêndios em regiões alagadas, permitindo a identificação e quantificação desses eventos, bem como direcionando ações de monitoramento e recuperação das áreas afetadas, como a análise realizada por Pirajá et al. (2023a) ao classificar a severidade das queimadas ocorridas em outubro de 2021 na Fazenda São Roque, localizada na Nhecolândia, utilizando os índices espectrais *Normalized Burn Ratio* (NBR) e *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR).

As imagens do satélite Sentinel 2, na composição RGB das bandas 12, 08 e 04, juntamente com o mapa de Grau de Severidade das Queimadas foram eficazes na identificação e análise dos danos causados pelo fogo na propriedade. Considerando que utilização desses índices permitiu diferenciar as áreas afetadas pelo incêndio com base na intensidade das cicatrizes, bem como quantificar sua extensão (PIRAJÁ et al., 2023).

De acordo com Nogueira et al. (2021), diferentes tipos de vegetação são afetados de maneiras distintas pela presença do fogo. No caso do Cerrado e outros ecossistemas, como o Pantanal, onde boa parte da vegetação compõem espécies do Cerrado, o fogo é uma parte natural e necessária do ciclo de vida das plantas. No entanto, formações florestais podem se tornar mais vulneráveis ao fogo devido à degradação ambiental, alterações no uso da terra e desmatamento.

Neste cenário, vários fatores, como topografia, localização geográfica, clima, atividades humanas e características da vegetação, como a presença predominante de gramíneas, umidade e quantidade de biomassa, influenciam a ocorrência e a regeneração pós-queima das plantas (GETIRANA et al., 2021)

Pois, eventos de seca impactam a vulnerabilidade da vegetação ao fogo, sendo comum o uso de índices multiespectrais que analisam o estado de umidade da vegetação, como o NDVI (ROUSE et al., 1973), para avaliar a suscetibilidade do combustível à queima e seus efeitos posteriores. Nogueira et al. (2021) ressaltam a importância desses índices na avaliação da regeneração pós-fogo, fornecendo exemplos de sua utilização na análise dos estágios iniciais de recuperação da vegetação nos principais biomas do Brasil.

Apesar da escassez de estudos no Brasil sobre a dinâmica de ecossistemas dependentes do fogo e a recuperação de áreas degradadas pelo fogo, as perspectivas do uso do sensoriamento remoto e de índices espectrais sobre a resposta da vegetação em relação ao fogo indicam grande potencial para sua aplicação nos biomas brasileiros, principalmente na avaliação de eventos relacionados ao fogo e da resiliência das fitofisionomias (NOGUEIRA et al., 2021).

CAPÍTULO II

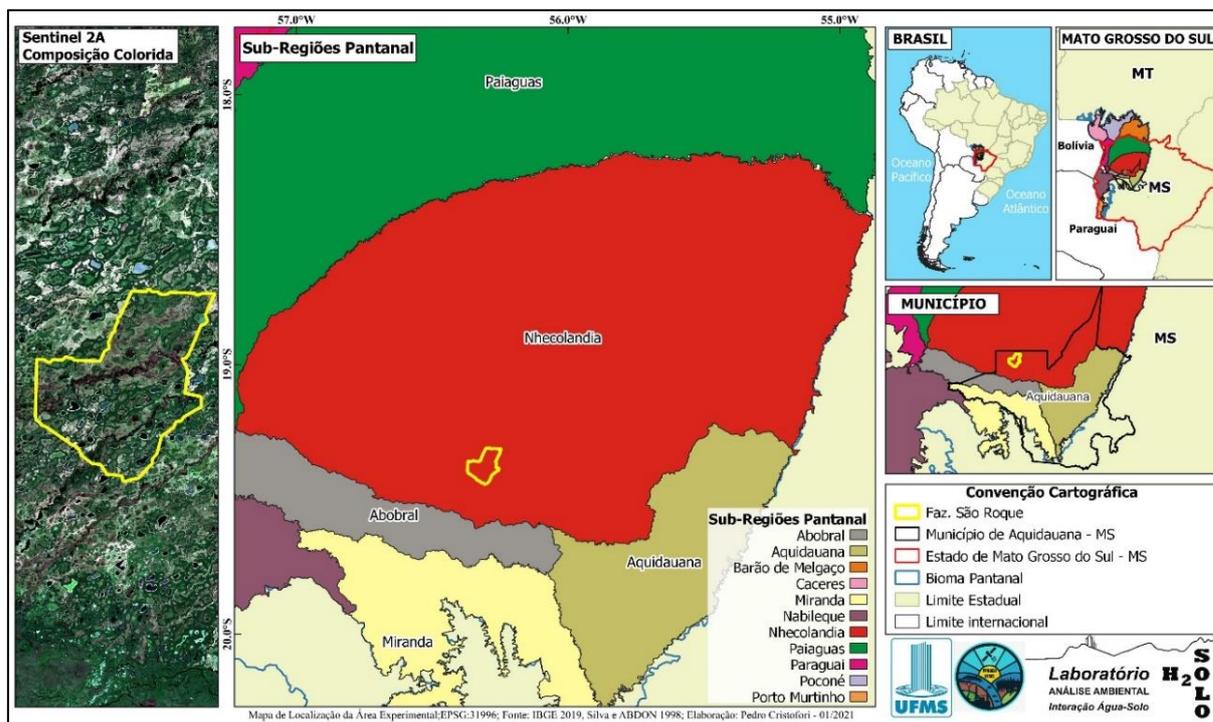
PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na fazenda São Roque, localizada no município de Aquidauana, Mato Grosso do Sul, no bioma Pantanal, na Sub-região do Pantanal da Nhecolândia (Figura 3) segundo a classificação proposta Silva & Abdon (1998).

Figura 3. Mapa de localização da fazenda São Roque no Pantanal da Nhecolândia



Fonte: Autor

A fazenda São Roque, possui 11.158,6233 hectares, dos quais 99,5% de vegetação nativa preservada do Pantanal, no passado recente, antes de 2012, era utilizada para fins de pecuária extensiva com manejo das pastagem de capim nativo, porém, atualmente a fazenda encontra-se num processo de mudança, saindo da atividade de pecuária (cria e recria de bovinos) e implantando a atividade voltada ao turismo sustentável e pesquisas.

Conforme Rezende-Filho (2011) a paisagem do Pantanal da Nhecolândia é formada por um mosaico de campos inundáveis, circundado por cordilheiras cobertas de cerrados e matas, drenagem anastomosada e intermitente de rios, corixos e vazantes e um sistema de lagoas permanentes e temporárias, denominadas localmente de “baías” e “salinas”.

Neste sentido, a fazenda São Roque, a área de estudo, expressa a fisionomia da paisagem do Pantanal da Nhecolândia, com áreas ocupadas pela vazante do mangabal com vegetação de gramíneas, e por inúmeras baías de água doce e salinas de águas alcalinas

(temporária e permanentes) com funcionamento biogeoquímicos diferenciados principalmente pela cor das águas: verdes, pretas e cristalinas, e por cordilheiras formadas por vegetação arbórea (cerrado e cerradões), áreas de campos sujos com gramíneas e árvores esparsas, e ainda as áreas de campo com formação homogênea de gramíneas, de fácil identificação e localização por meio de imagens de satélites.

2.2 Escopo Metodológico

A metodologia desta pesquisa foi conduzida por intermédio da análise por meio de sensores orbitais e da extração de dados resultantes dos produtos cartográficos, tais como a delimitação das áreas afetadas pelo fogo, a identificação dos graus de severidade e a avaliação da regeneração das fitofisionomias. Estes produtos foram elaborados por meio da obtenção de uma seleção de imagens dos satélites orbitais Sentinel 2A e 2B, abrangendo o período de 2019 a 2022.

Para alcançar os objetivos estabelecidos, a pesquisa foi dividida na seguinte sequência de obtenção dos produtos cartográficos:

1. Análises com mapas de espacialização dos dados de focos de incêndio;
2. Análises com mapas de uso e cobertura da terra por meio de classificação supervisionada;
3. Análises com mapas de cicatriz do fogo por meio de *Normalized Burn Ratio* (NBR);
4. Análises com mapas de grau de severidade por meio de *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR); e
5. Análises com mapas de vigor e biomassa por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Os mapas de vigor e biomassa (NDVI) foram gerados conforme a disponibilidade de imagens sem interferência atmosférica, assim, procurando manter um intervalo médio de um mês, com início em janeiro de 2019 e finalizando a série em dezembro de 2022. Os resultados também foram aferidos com dados de campo, como as chaves de interpretação (verdade terrestre), de acordo com as pesquisas de campo realizadas em setembro de 2018 (pré-fogo) e setembro de 2022 (pós-fogo). A data da pesquisa de campo (setembro de 2022) foi estabelecida de acordo com a programação para imageamento dos satélites Sentinel 2, no qual foram validadas as chaves-de interpretação, observando os períodos e as transições entre as estações

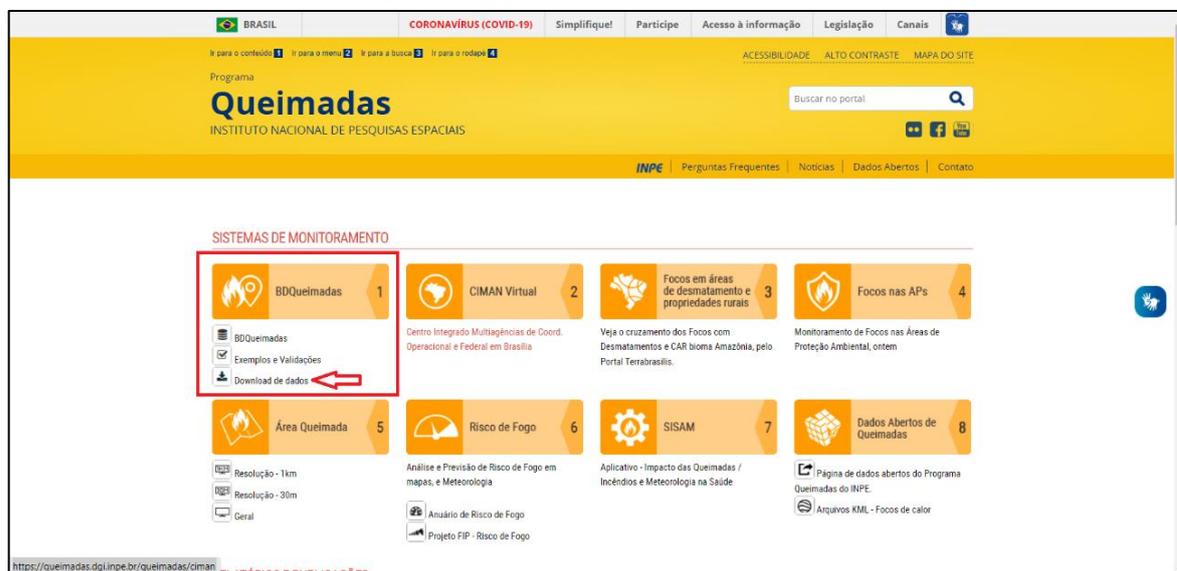
chuvosa e seca na região e, conseqüentemente, menor cobertura de nuvens.

2.2.1 Seleção dos dados de focos de calor

O sistema de monitoramento de queimadas utilizou a metodologia de identificação e coleta de dados de focos de calor por meio do Programa Queimadas do INPE (INPE, 2020), acessando o banco de dados BDqueimadas. A análise das queimadas envolveu o acompanhamento desde o surgimento até a extinção dos incêndios, usando informações de diferentes sensores orbitais e geostacionários.

No decorrer da pesquisa, dada a escala média de análise de 1:80.000 e a análise temporal dos eventos de queimadas ocorrerem em dias, contabilizados 8 dias no evento de incêndio florestal de 2019 e 10 dias no evento de incêndio florestal de 2021, foi considerado importante aplicar o filtro de dados para os 15 satélites geostacionários disponíveis na plataforma BDqueimadas do INPE (Figura 4), incluindo AQUA, TERRA MANHÃ, TERRA TARDE, GOES-16, NOAA-18 MANHÃ, NOAA-18 TARDE, MSG 03, METOP-B, METOP-C, NOAA-19 TARDE, NOAA-19 MANHÃ, NOAA-20, NPP-375 MANHÃ e NPP-375 TARDE, e não apenas para o satélite de referência.

Figura 4 - Portal BDQueimadas INPE



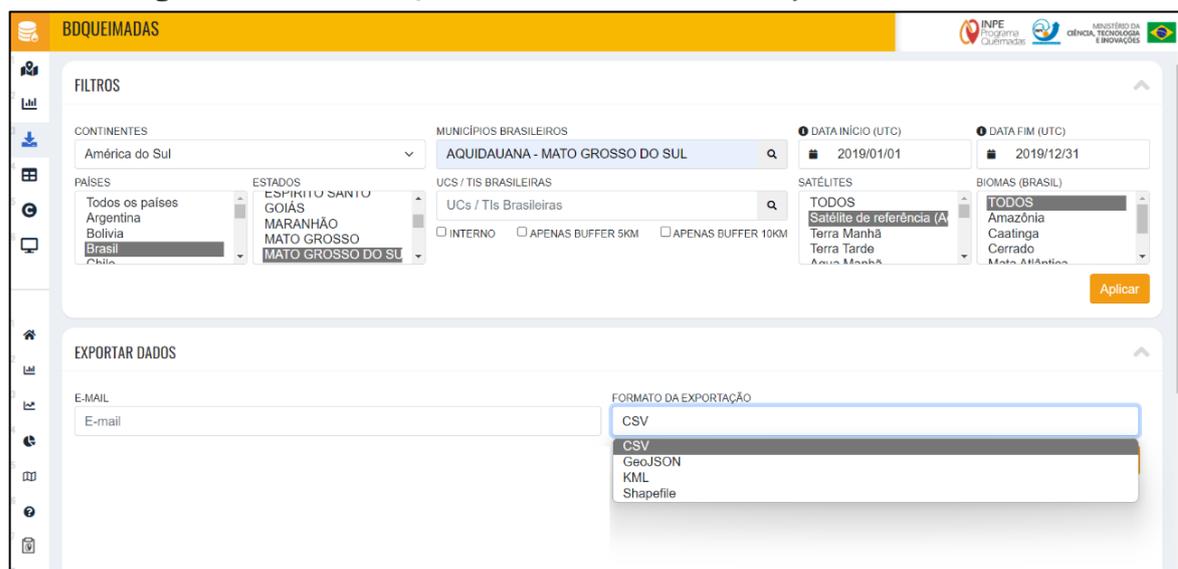
Fonte: Autor

Devido os dados disponíveis no banco de dados BDqueimadas representam os focos de calor e terem baixa resolução espacial, desta forma, utilizou-se as imagens do Sentinel 2A e 2B, de média resolução espacial, para a validação e espacialização dos focos de calor e conseqüentemente a visualização da evolução dos incêndios.

Por meio da análise das imagens, foram selecionados exclusivamente os focos de queimada dentro da área de interesse, na delimitação da fazenda São Roque, com informações coletadas diariamente desde o primeiro registro de incêndio e para cada dia seguinte até o final do evento, quando não havia mais focos detectados na propriedade.

O período de estudo começou para o primeiro evento de incêndio na fazenda São Roque em 09/09/2019, e para o segundo evento de incêndio iniciou-se em 08/10/2021, quando a área de interesse foi monitorada usando a imagem do satélite orbital Sentinel antes do surgimento dos primeiros focos de calor, para ambos os eventos. A partir destas datas iniciais, os dados de focos de calor obtidos por todos os 15 satélites geoestacionários do INPE foram verificados diariamente (Figura 5), sendo o primeiro foco de calor encontrado em 15/09/2019 e o primeiro foco de calor do segundo evento detectado em 14/10/2021, o primeiro foco de calor foi identificado, sendo monitorados, respectivamente para os dois eventos de incêndio, até a data final, 23/09/2019 e 25/10/2021, quando não foram mais detectados focos de calor.

Figura 5 - Portal BDQueimadas INPE, área de seleção de Focos de Calor



Fonte: Autor

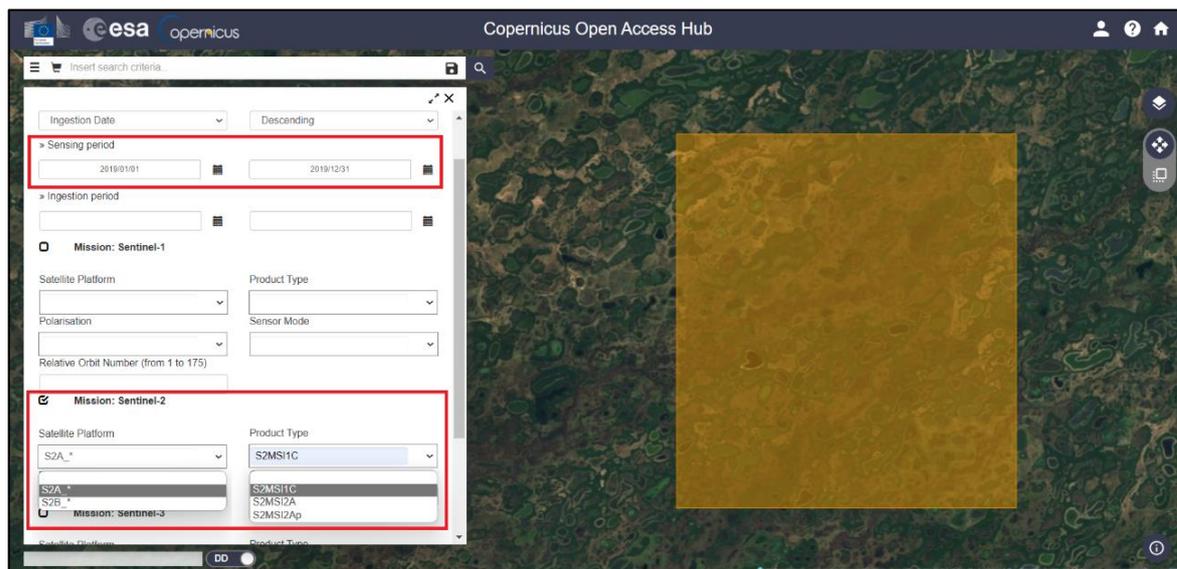
Os dados de focos de calor incluem informações, tais como: a localização espacial dos focos; data e hora do registro pelo satélite; número de dias sem chuva até 120 dias anteriores ao registro; e a ocorrência de precipitação, com atribuição de pesos baseados na quantidade de chuva e intervalo até o cálculo, para obter o número hipotético de dias consecutivos sem chuva. Esses dados são complementados por parâmetros como: temperatura máxima acima de 30°C; umidade relativa mínima abaixo de 40%; tipo de vegetação; elevação topográfica e latitude que compõem o atributo de classificação de Risco de Fogo (RF), que é dividido em cinco categorias com valores válidos variando de 0 a 1 (SETZER et al., 2019).

Entre os dados de detecção de incêndios por sensores remotos, a Potência Radiativa do Fogo (FRP) é amplamente utilizada para estimar a biomassa em queima (Silva et al., 2019). A FRP está relacionada diretamente com a intensidade do fogo e é proporcional ao total de biomassa consumida por unidade de tempo. O *Fire Radiative Power* é medido em Watts ou MegaWatts e é obtido multiplicando a radiância pela área do pixel, captada pelos sensores no comprimento de onda do infravermelho, de 0,75 a 1000 μm . A detecção da FRP também é influenciada por características superficiais, tais como: temperatura; emissividade; interferências de gases; e aerossóis na atmosfera. A quantidade de fótons detectada pelos sensores pode ser gerada por diferentes combinações de tamanho e temperatura da superfície em chamas, mesmo de fontes separadas dentro do mesmo pixel (INPE, 2020).

2.2.2 Aquisição de imagens Sentinel-2A e 2B

Todas as imagens utilizadas neste estudo são provenientes do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) da missão Copernicus Sentinel - 2, e foram obtidas através do catálogo do *Copernicus Access Open Hub* (2020) da plataforma online da *European Space Agency* (ESA, 2020), disponível em <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Figura 6), onde foi possível selecionar a área de interesse, a data do imageamento, a missão (Sentinel 2A ou 2B), o satélite e o produto (level-1C ou level-2A).

Figura 6 - Website Copernicus Open Access Hub da ESA, filtragem de dados

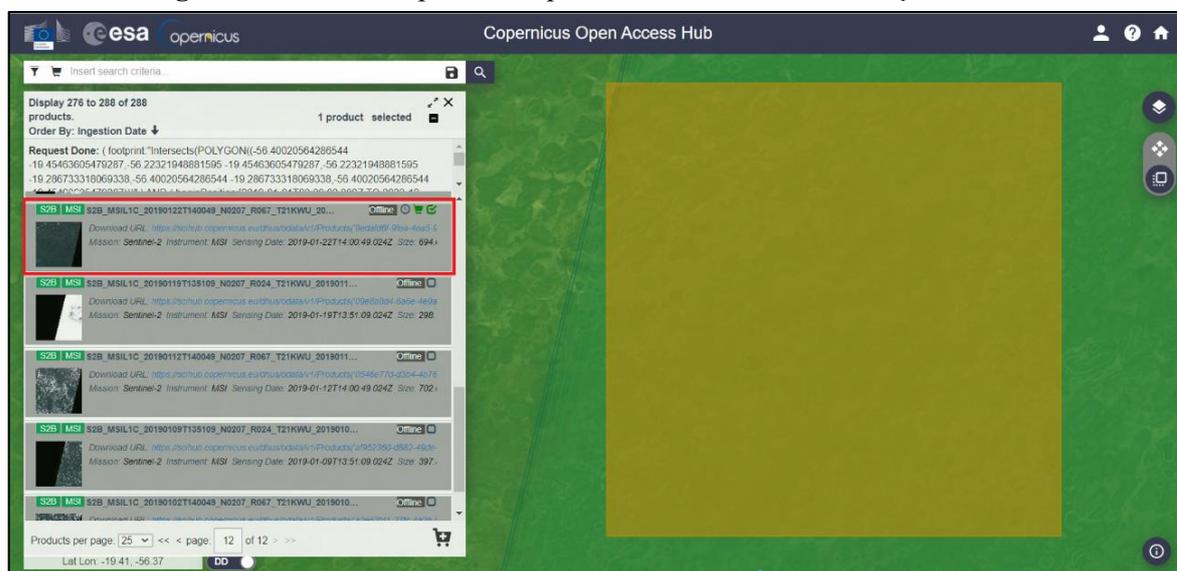


Fonte: Autor

A seleção dos dados foi baseada em intervalo temporal de janeiro de 2019 a dezembro de 2022 (Figura 7). Essa escolha se deve ao fato de que o primeiro incêndio florestal na área de estudo aconteceu em 2019. Já o segundo incêndio ocorreu no final de 2021, o que exigiu a

análise de um ano completo após esse evento, levando à conclusão da aquisição de imagens em dezembro de 2022, com o último período de pesquisa de campo na fazenda São Roque.

Figura 7 - Website Copernicus Open Access Hub da ESA, seleção de dados



Fonte: Autor

Além da aquisição das imagens de todos os meses do nosso recorte temporal, foi adquirido imagens de Pré-fogo e Pós-fogo dos meses que ocorreram o incêndio, ou seja, a primeira imagem sem nuvens antes e depois dos eventos de incêndios florestais (início de setembro de 2019 e início de outubro de 2021) detectado pelo monitoramento realizado por meio dos dados focos de calor. As imagens dos satélites utilizados, Sentinel 2A e 2B, e as datas das cenas, para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022 (Tabelas 2, 3, 4 e 5).

Tabela 2 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2019

Satélite Orbital	Datas de Aquisição das Imagens
S2B	22/01/2019
S2B	18/02/2019
S2B	23/03/2019
S2A	24/04/2019
S2B	29/05/2019
S2B	28/06/2019
S2A	23/07/2019
S2A	25/08/2019
S2B	09/09/2019
S2A	24/09/2019
S2B	29/10/2019
S2A	20/11/2019
S2B	28/12/2019

Fonte: Organizado pelo autor

Tabela 3 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2020

Satélite Orbital	Datas de Aquisição das Imagens
S2B	14/01/2020
S2A	18/02/2020
S2B	24/03/2020
S2A	28/04/2020
S2A	28/05/2020
S2A	20/06/2020
S2B	22/07/2020
S2A	29/08/2020
S2A	28/09/2020
S2A	08/10/2020
S2B	29/11/2020
S2B	09/12/2020

Fonte: Organizado pelo autor

Tabela 4 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2021

Satélite Orbital	Datas de Aquisição das Imagens
S2B	11/01/2021
S2B	27/02/2021
S2B	22/03/2021
S2B	28/04/2021
S2A	26/05/2021
S2A	25/06/2021
S2B	30/07/2021
S2A	24/08/2021
S2B	28/09/2021
S2B	08/10/2021
S2B	25/10/2021
S2A	09/11/2021
S2B	27/12/2021

Fonte: Organizado pelo autor

Tabela 5 - Satélite orbital e datas de aquisição das imagens de 2022

Satélite Orbital	Datas de Aquisição das Imagens
S2B	23/01/2022
S2A	17/02/2022
S2A	29/03/2022
S2A	28/04/2022
S2A	28/05/2022
S2A	27/06/2022
S2A	30/07/2022
S2A	26/08/2022
S2B	20/09/2022
S2A	25/10/2022
S2B	29/11/2022
S2B	22/12/2022

Fonte: organizado pelo autor

2.2.3 Tratamento e processamento das imagens

Todos os processamentos foram realizados em software livre, sendo um deles o Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS 3.26 e de acordo com o Guia de Usuários da

ESA, mais especificamente na seção 'Sentinel-2 MSI / Níveis de Processamento', os produtos de Nível 2A são gerados a partir de correções atmosféricas aplicadas aos produtos de ortorectificação de Nível 1C. No Nível 1C, as medições radiométricas são realizadas no topo da atmosfera (*Top of Atmosphere - TOA*), enquanto no Nível 2A, essas medições são ajustadas para representar o fundo da atmosfera (*Bottom of Atmosphere - BOA*).

Devido à necessidade de observar a variação temporal da reflectância pelos índices utilizados, ou seja, uma análise da série histórica (Jan/2019 a Dez/2022), onde o banco de dados conta com imagens de Nível 1C (TOA) e Nível 2A (BOA), desta forma, foi necessário realizar a normalização radiométrica (PONZONI; SHIMABUKURO e KUPLICH, 2012), essa normalização dos dados, é o tratamento de correção atmosférica das imagens de Nível 1C, para obter medições ajustadas para representar o fundo da atmosfera. Essa aplicação de correção atmosférica nas cenas é essencial para mitigar os efeitos das condições atmosféricas na interpretação e análise dos dados. Através desse processo, são removidos os efeitos da dispersão atmosférica, absorção de gases e outros fatores que podem distorcer as informações radiométricas obtidas pelos sensores do Sentinel-2.

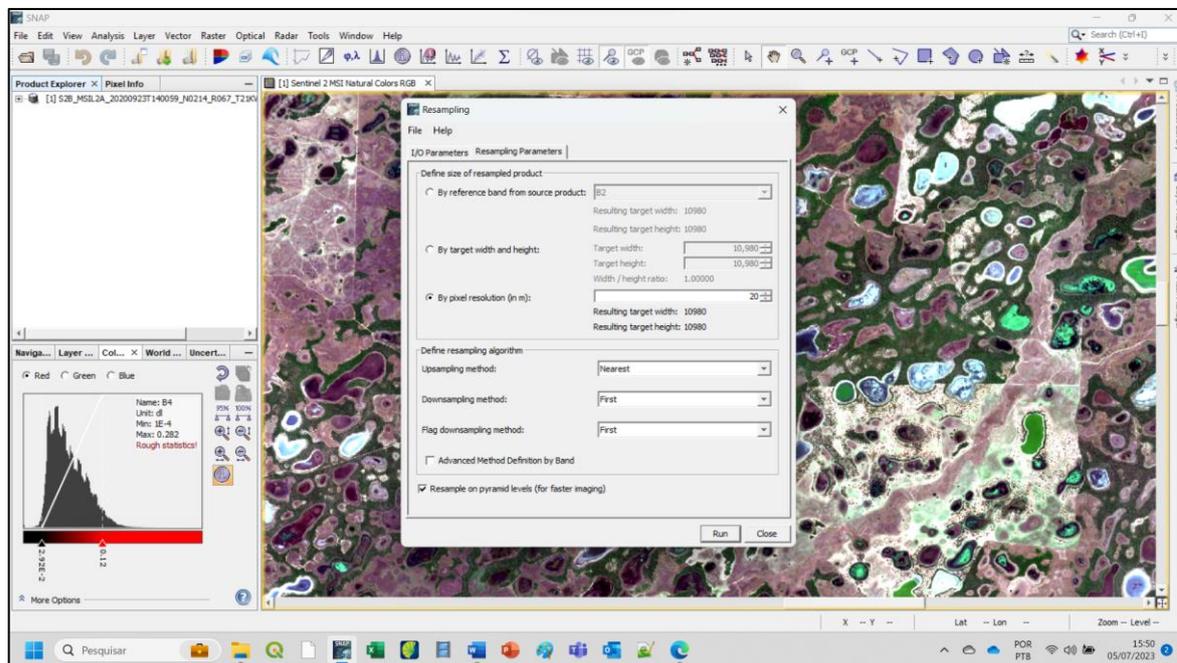
Dessa forma, a transformação dos dados de Nível 1C para Nível 2A permite que as medições reflitam com maior precisão as características e propriedades da superfície terrestre, desconsiderando os efeitos atmosféricos indesejados. Isso é fundamental para o monitoramento multitemporal da vegetação arbórea, onde a obtenção de dados corrigidos é confiáveis e essencial para uma análise precisa e consistente.

As correções de todas as bandas foram realizadas por meio do método proposto por Chavez (1988), denominado comumente de Correção Atmosférica pelo Pixel Escuro (ou *Dark Object Subtraction-DOS*), executada pelo complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) do QGIS.

Outro processo realizado foi o de reamostragem, como imagens Sentinel 2 possuem resoluções espaciais diferentes, a banda do infravermelho próximo – NIR (banda 8) com 10 metros de resolução e a infravermelho de onda curta – SWIR (banda 12) com 20 metros. Foi realizado a reamostragem por meio de processamento no *software* de Processamento Digital de Imagens (PDI) *SeNtinel Applications Platform - SNAP 8.0*, desenvolvido pela própria Agência Espacial Europeia (ESA) para processamento e modelagem de imagens do programa Sentinel (Figura 8). As imagens de 10 metros (banda 9) foram reamostradas para 20 metros a fim de evitar um esforço computacional desnecessário, visto que as imagens de menor resolução não

teriam melhoria espectral.

Figura 8. Janela do SNAP, processo de reamostragem



Fonte: Autor

2.2.4 Classificação supervisionada pré-fogo

A classificação supervisionada de objetos foi realizada no SIG QGIS 3.26, no complemento *semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*. Para este trabalho classificamos: vegetação arbórea, vegetação campestre, solo exposto/gramíneas e água, como chaves de interpretação da paisagem analisada na área de estudo. Após o treinamento com o algoritmo de classificação foi gerado o mapa temático de classificação supervisionada dos objetos de interesse.

No processo de classificação supervisionada, a imagem foi dividida estatisticamente em classes com base nas áreas de treinamento identificadas visualmente. Dessa forma, algoritmo *Maximun Likelihood* foi utilizado para classificar os pixels (com base em seus valores digitais), de acordo com sua semelhança com cada uma das classes definidas durante o processo. Para que o sistema fosse capaz de realizar a classificação, ele precisou ser ‘treinado’. Esse treinamento envolveu o fornecimento de amostras dos padrões que foram reconhecidas, com base nas chaves de interpretação (PARANHOS FILHO et al., 2016).

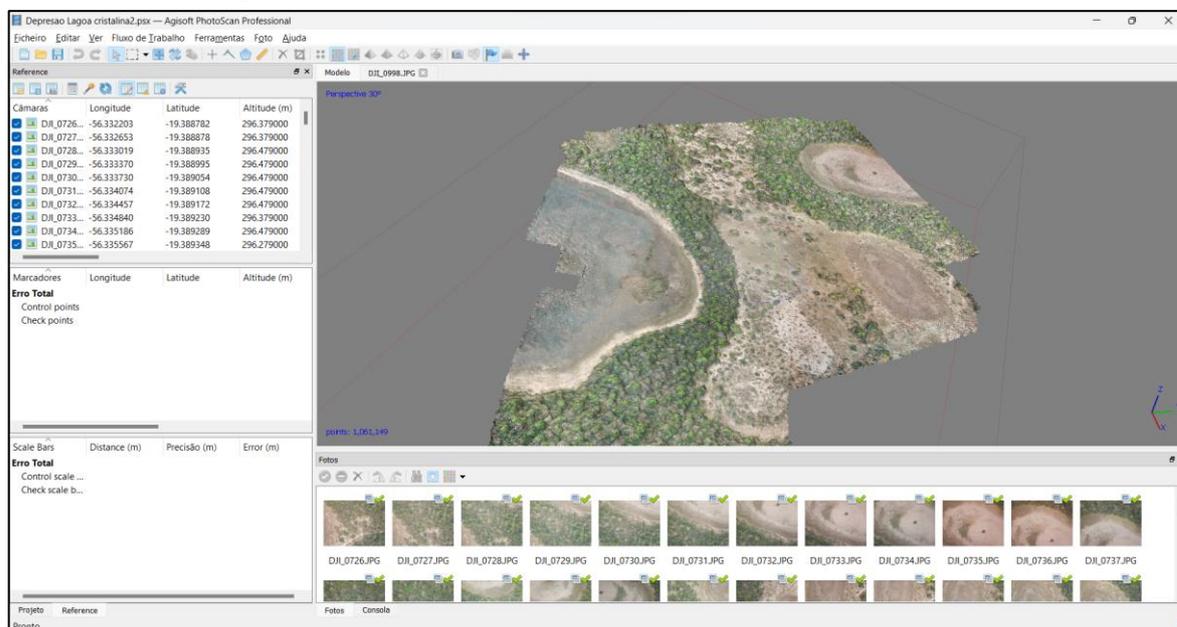
2.2.5 Validação de produtos com auxílio de levantamentos de campo

Para validação dos produtos gerados nesse estudo com a Classificação Supervisionada, foi necessário fazer missão de campo, onde foram estabelecidos pontos de controle *in loco* com

auxílio de equipamentos como GNSS (*Global Navigation Satellite System*) RTK (*Real Time Kinematic*) e por imagens aéreas de RPA- *Remotely Piloted Aircraft System* - sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (Mavic Pro – DJI). Nessa validação foi necessário dividir as ações em quatro etapas: **1)** Aquisição de pontos de controle utilizando GNSS cujo os dados de coordenadas obtidos possuem erro centimétrico nos três eixo (X,Y e Z); **2)** Planejamento dos vôos com base nos pontos de controles pré selecionados; **3)** Realização das coletas de imagens por meio de RPA e **4)** Processamento das imagens obtidas em campo juntamente com os pontos controle coletados pelo GNSS-RTK.

Os processamentos das imagens foram realizados no *software Agisoft PhotoScan Professional* (Figura 9), gerando dois tipos de produtos: Ortomosaico e o Modelo Digital de Elevação (MDE). O ortomosaico corresponde ao mosaico das ortofotos (MARCHETTI; GARCIA, 1989; TORRADO, 2016) e, o MDE, a imagem em que cada pixel possui um valor relativo à altitude da superfície modelada (SOPCHAKI, 2016), esses produtos permitiram classificar e quantificar a área da vegetação arbórea com maior precisão, levando em consideração os pontos de controle utilizados na fazenda São Roque (PRIMICERIO et al., 2012; BRAZ et al., 2015).

Figura 9 - Janela do software *Agisoft PhotoScan Professional*



Fonte: Autor

Segundo o Lasa/UFRJ (2020) podemos obter a validação em sensoriamento remoto de duas formas, a primeira realizando a pesquisa de campo e comprovando o parâmetro geofísico medido pelos sensores e a segunda por meio da comparação visual entre os mesmos dados coletados por satélites de maior resolução espacial, que detalhem melhor a superfície estudada.

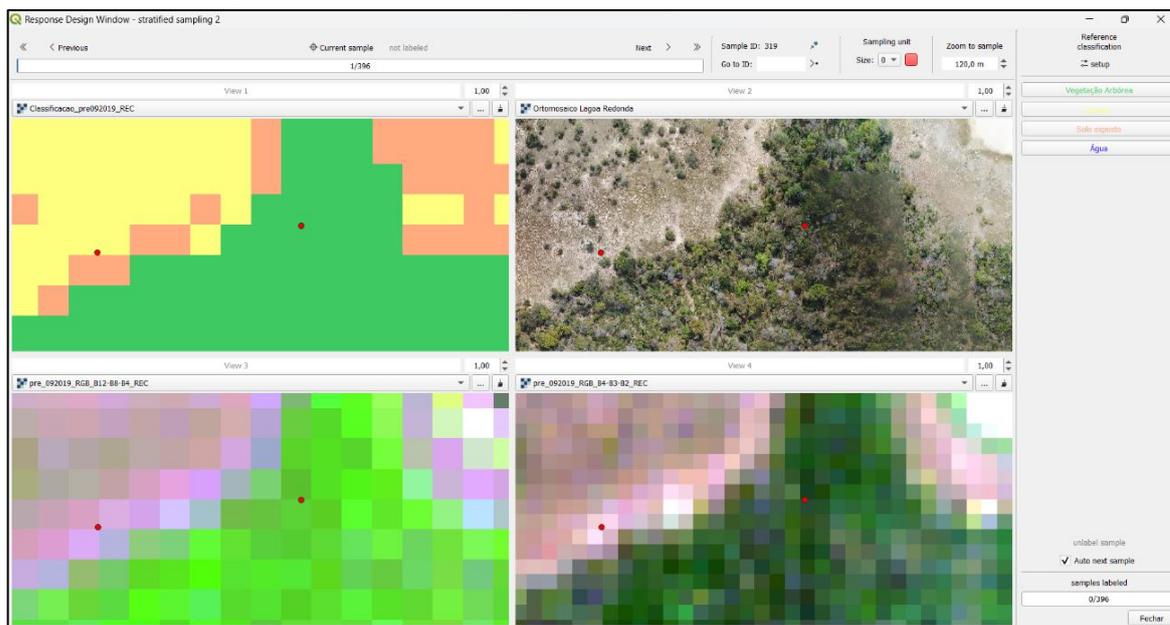
2.2.6 Validação da classificação

A validação da classificação foi realizada com o *Automatic Classification Plugin (SCP)*, que possui uma validação da classificação por meio de matriz de erro, porém nesse estudo foi necessário a aplicação do complemento, ou seja, a utilização do plugin o '*Accuracy Assessment of Thematic Maps – AcATaMa*' desenvolvido pelo grupo de Sistema de Monitoramento de Florestas e Carbono do instituto de hidrologia e meteorologia e estudos ambientais da Colômbia (SINCHI, 1999), cuja essa validação segue duas etapas:

A primeira etapa consiste em inserir o raster referente a ser classificado, em seguida configurar a validação das duas opções de avaliação da acurácia: a primeira, '*Fized values by category (manually)*', onde o usuário atribui a quantidade de amostra por tipo de classe; a segunda opção é a '*Area based proportion (using overall std erro)*' que faz uma avaliação a partir de área proporcional ao erro do desvio padrão (0,005), gerando o número de amostras (desvio padrão de 0,01) por classe de forma automática. Essa segunda opção foi utilizada na validação da acurácia dos dados da área de estudo.

A segunda etapa é validar as amostras através da aba '*Response design*', esse processo consnte em inserir os rasters necessários para a validação. Nessa etapa foi possível renomear as classes e a cor da classe da imagem da classificação, do ortomosaicos de drone, utilizando RGB composição falsa cor (12/8/4) e RGB cor verdadeira (4/3/2). Após o processo de verificação dos pontos, no AcATaMa, acessamos o resultado com a avaliação de acurácia (Figura 10).

Figura 10 - Janela de visualização '*Response design window*'



Fonte: Autor

2.2.7 Cálculo do índice de queima normalizada NBR pré e pós-fogo

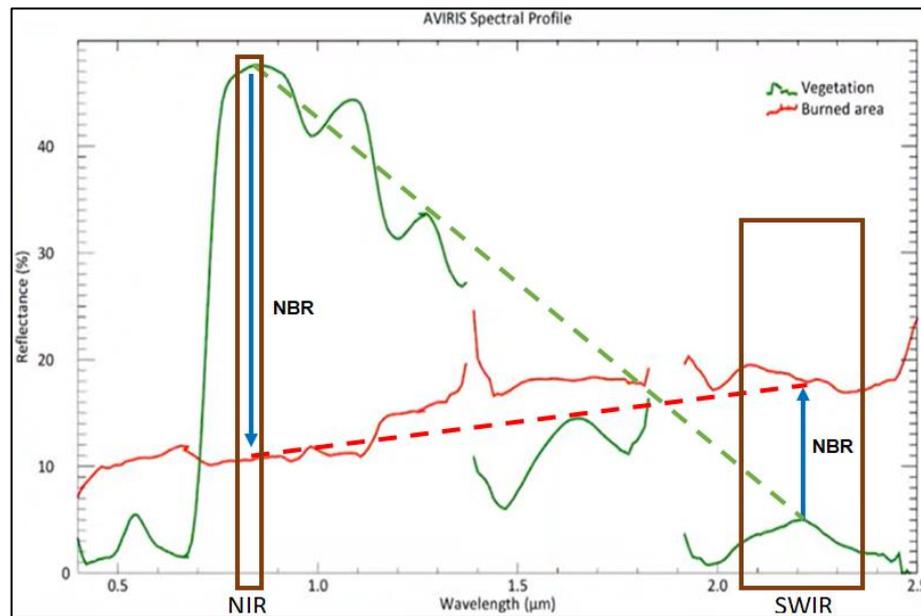
O índice de Queima Normalizada (*Normalized Burn Ratio*) NBR, desenvolvido por Key e Benson (1999), é um índice de normalização apropriado para visualização de cicatrizes de queimadas, onde são utilizados para o cálculo as bandas do infravermelho próximo – NIR (banda 8) e o infravermelho de onda curta – SWIR (banda 12), contraste existente entre as bandas infravermelho próximo e infravermelho de onda curta devido sua diferente resposta espectral entre áreas fotossinteticamente ativas e áreas carbonizadas (Figura 11).

O índice verifica a variação angular resposta espectral da vegetação comparado à resposta espectral da área queimada, ou seja, quando existe uma queima, há uma redução significativa de albedo no NIR e uma subida no SWIR.

O NBR foi obtido por meio da calculadora Raster do QGIS utilizando a seguinte fórmula:

$$NBR = \frac{NIR (banda 8) - SWIR (banda 12)}{NIR (banda 8) + SWIR (banda 12)} \quad (1)$$

Figura 11 - Resposta espectral de um pixel AVIRIS de vegetação verde e de área queimada



Fonte: Adaptado de Batista et al. (2017).

A normalização faz com que os valores do índice variem de -1 a +1 onde, valores mais próximos de +1 referem-se a área queimada e quanto mais próximo de -1 são referentes áreas não queimadas.

2.2.8 Cálculo do dNBR (*Differenced Normalized Burn Ratio*)

O índice de diferença de Queimada Normalizada (dNBR - *Differenced Normalized*

Burn Ratio) proposto por Roy, Boschetti e Trigg (2006) visa avaliar a extensão e a severidade da por meio da diferença do NBR pré-fogo e NBR pós-fogo. O dNBR é comumente utilizado em estudos de severidade, pois permite compreender o gradiente de severidade, assim como o NBR o dNBR foi obtido por meio da calculadora Raster do QGIS utilizando a seguinte fórmula:

$$dNBR = (NBR \text{ Pré} - \text{fogo}) - (NBR \text{ Pós} - \text{fogo}) \times 1000 \quad (2)$$

Segundo Miller e Thode (2007), o dNBR é usado para quantificar a gravidade dos incêndios em áreas de vegetação nativa e provou ser um método de detecção de mudanças que tem se mostrado eficiente na captura da complexidade espacial da gravidade dentro dos perímetros de incêndios.

O estudo apresentou uma análise detalhada do dNBR e do Índice de Gravidade de Queimada (CBI) em dois eventos de incêndios florestais em diferentes tipos de vegetação. Para o ano de 2019 foi utilizada como cena de pré-fogo, o NBR de 9 de setembro e, para a de pós-fogo, o de 24 de setembro. Já Para o ano de 2021 foi utilizada como cena de pré-fogo, o NBR de 10 de outubro e, para a de pós-fogo, o de 25 de outubro.

Após a obtenção do índice, a palheta de cores da legenda de classificação seguiu o padrão (Figura 12), conforme a metodologia indicada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*), com apenas uma adaptação, a unificação das classes (*Enhanced Regrowth, high (post-fire)*, *Enhanced Regrowth, low (post-fire)*, e *Unburned*) foram unificadas em uma classe “*Unburned*”.

Figura 12 - Classes de severidade do fogo

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 ³)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Fonte: Adaptado do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (2022)

A legenda utilizada na análise deste trabalho a partir da adaptação em tradução livre em que agrupou-se as classes: Alta rebrota pós-fogo, Baixa rebrota pós-fogo e Não Queimada em Não Queimada, Severidade Baixa, Severidade Moderada Baixa, Severidade Moderada Alta e Severidade Alta.

2.2.9 Cálculo do Índice de Vegetação (NDVI)

Para produzir o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973) (Figura 13), em que para se obter o Índice de Vegetação (R) assumido neste estudo como NDVI, deve-se calcular a diferença normalizada entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e a banda do Vermelho (RED).

Figura 13 - Trecho do relatório de atividades. Rouse et al., 1973

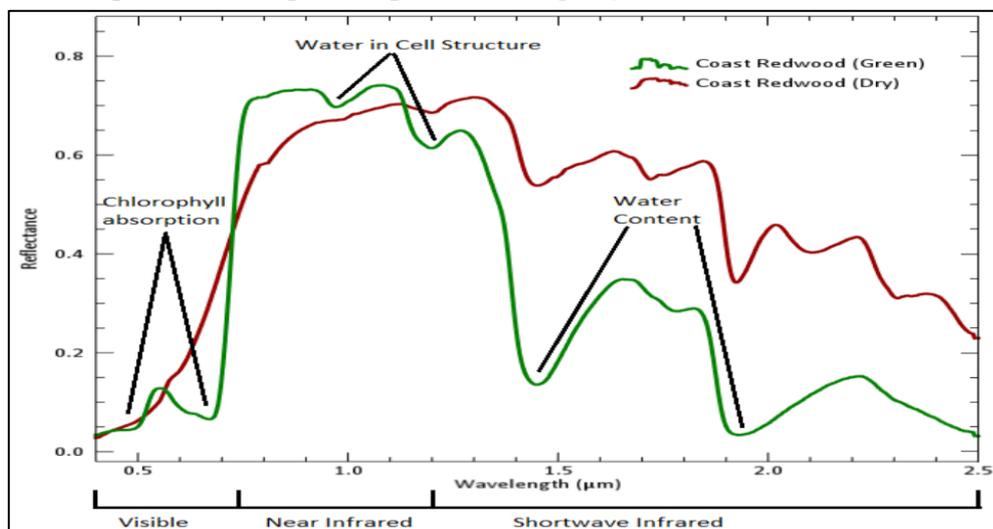
Although a simple ratio of Band 5/Band 7 reflectance could be used as a measure of relative greenness, location-to-location, cycle-to-cycle, and location-within-cycle deviations would likely occur as a large source of error. Thus, the difference in Band 7 and Band 5 reflectance values, normalized over the sum of these values, is used as an index value and is called the "vegetation index".

$$\text{Vegetation Index (R)} = \frac{\text{Band 7} - \text{Band 5}}{\text{Band 7} + \text{Band 5}}$$

Fonte: Rouse et al.(1973) pg 43.

Esse é um dos principais índices de vegetação, o NDVI é um índice baseado em declive, onde sua equação (diferença normalizada entre a banda do Infra vermelho próximo e a banda do vermelho) se concentra no contraste entre os padrões de resposta espectral da vegetação no Vermelho (RED) e porções do infravermelho próximo (NIR) do espectro eletromagnético, tornando possível medir o verdor ou o quão fotossinteticamente ativa a vegetação está (Figura 14), pois, a vegetação vigorosa apresenta alto contraste entre o NIR e RED.

Figura 14 - Resposta espectral da vegetação conforme seu verdor.



Fonte: Adaptado de Batista et al. (2017).

Devido reflectância das folhas no espectro visível é baixa por causa da absorção da

radiação solar pelos pigmentos fotossintéticos, enquanto no infravermelho próximo, a reflectância é alta devido ao espalhamento (reflectância e transmitância) da radiação dentro das folhas, em razão da sua estrutura celular. Portanto, a reflectância da radiação eletromagnética pelas folhas depende de sua composição química e estrutura interna. (PONZONI et al., 2012).

Foram utilizadas as imagens Sentinel-2, com as bandas dos sensores referentes ao vermelho (banda 04) e infravermelho próximo (banda 08). Os cálculos para obtenção do NDVI das imagens foram realizados na calculadora Rater no SIG QGIS 3.26.

O resultando é uma imagem índice que varia entre -1 a 1, sendo que quando mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal (biomassa verde). O zero (0) representa valor aproximado para superfícies não vegetadas. E os valores negativos estão associados com espelhos d'águas, nuvens e sombra.

2.2.10 Geração de pontos de controle e tabulação dos dados

As imagens Sentinel 2 utilizadas nesse estudo foram delimitadas (recortadas) pelo vetor da área de estudo, neste caso, o limite da fazenda São Roque. Para isso, utilizamos a ferramenta de recorte de raster no Qgis.

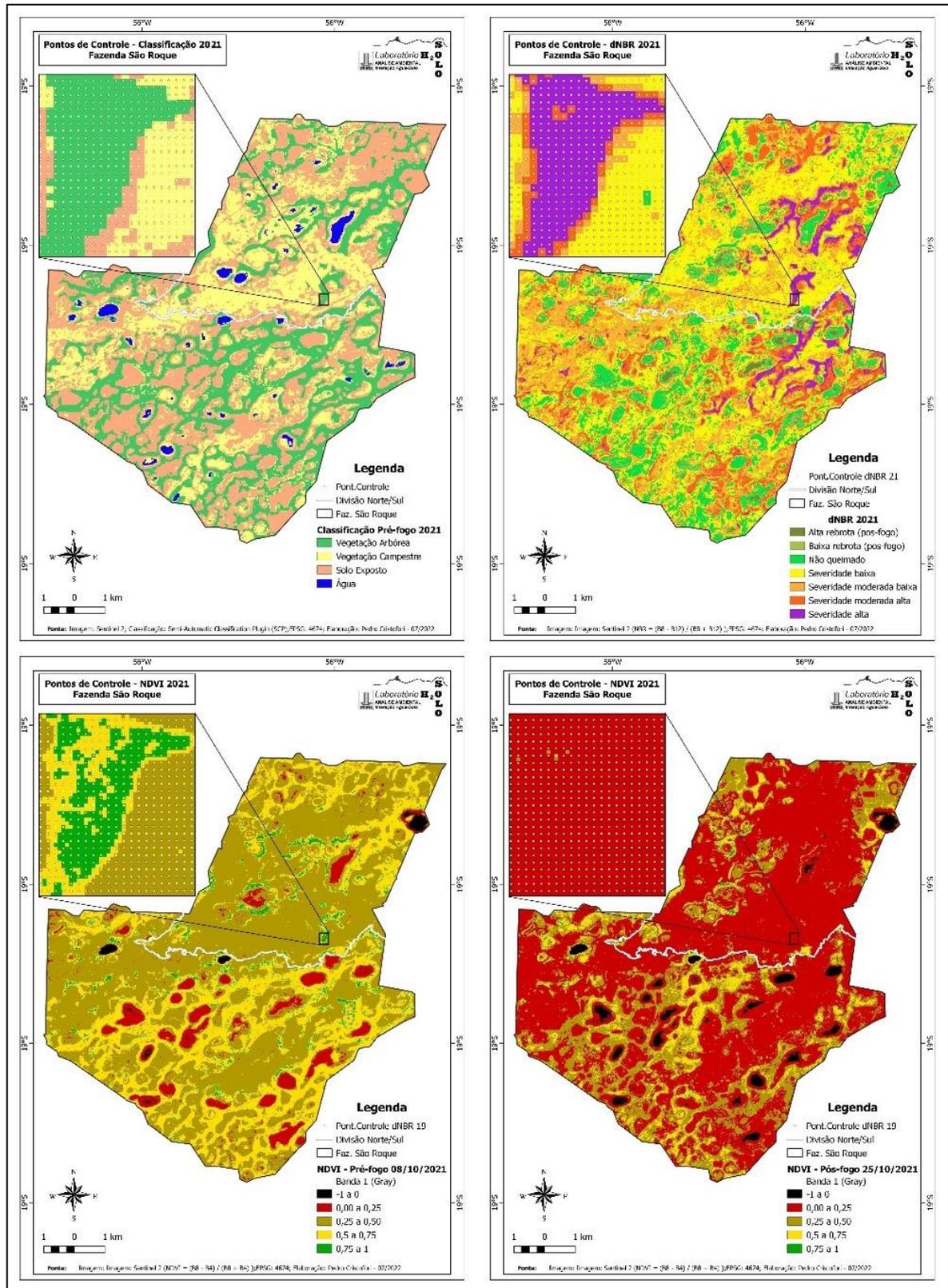
Após obter as imagens recortadas estabelecemos pontos de controle em cada pixel da imagem recortada com os limites da fazenda São Roque (área de estudo). Os pontos de controle são gerados para permitir a extração de informações dos pixels, possibilitando análises mais detalhadas, para isso foi utilizado a ferramenta pixel para pontos, a qual converte cada pixel em um ponto (vetor) de referência, vale ressaltar que os pontos gerados são no centro de cada pixel.

Para extrair as informações de cada pixel foi utilizado o complemento do QGis *Point Sampling Tool* (PST). Esse complemento é uma ferramenta utilizada para coletar dados em pontos de interesse específico, neste caso, as informações de todos os pixels das imagens de NDVI, dNBR e da Classificação (vegetação arbórea, vegetação campestre, solo exposto e água).

Os pontos de controle foram fundamentais para o entendimento do comportamento dentro do recorte da série temporal (uma imagem de cada mês de janeiro de 2019 a dezembro de 2022). Os pixels da imagem com os pontos de controle (centralizados no pixel), foram espacializados em todos os pixels da área de estudo da fazenda São Roque e sobrepostos para coletar os dados de dos produtos como: Classificação supervisionada (vegetação arbórea, vegetação campestre, solo exposto/gramíneas e água), classe de severidade (dNBR) e NDVI

(biomassa) (Figura 15).

Figura 15 - Mapas de pontos de controle da classificação supervisionada, classes de severidade, NDVI pré-fogo e NDVI pós-fogo de 2021



Fonte: Autor

Para esse trabalho optou-se por não utilizar a classificação por região e sim uma classificação pixel a ponto, dado as heterogeneidades entre os valores de NDVI, tento em vista que a classificação por região homogeniza a área e dificulta a identificação das diferentes classes de severidades, ou seja, os extratos da vegetação não são homogêneos, sendo assim, a utilização da classificação pixel a ponto foi a que apresentou melhor resultado.

Após a coleta dos dados, procedemos à sua organização utilizando o software Excel. Através dessa tabulação, isolamos os dados relacionados à vegetação arbórea, totalizando 88.999 pontos, juntamente com as medições de grau de severidade (dNBR) e biomassa (NDVI) (Figura 16).

Figura 16 - Tabulação dos danos no Excel.

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. The spreadsheet contains a table with the following columns: A (Pont), B (C), C (Classificacao_pre092019_REC), D (dNBR_2019_RT_resampled_REC), E (Severidade), F (1 ndv), G (2 ndv), H (3 ndv), I (4 ndv), J (5 ndv), K (6 ndv), L (7 ndv), M (8 ndv), N (9 ndv), O (10 ndv), P (11 ndv), Q (12 ndv), R (13 ndv, lms). The rows contain numerical data for each of these categories. The status bar at the bottom of the Excel window shows 'Pronto 88999 de 27881 registros encontrados'.

Fonte: Autor (2022).

Para apresentar um valor representativo de toda a série histórica dos índices de NDVI por classe de severidade, optou-se por escolher uma medida de tendência central. Essa escolha foi fundamentada após realizar o teste de normalidade dos dados, considerando que o NDVI é a variável principal deste estudo, usada para monitorar a vegetação em relação à sua biomassa.

A análise estatística foi conduzida com a ajuda do software Past v3.16 (Figura 17). Após os testes, ficou evidente que a distribuição dos dados de NDVI, relacionados à vegetação arbórea em cada mês do período de análise, não seguia uma distribuição paramétrica. Como mencionado por Sabino et al. (2014), a mediana é uma medida de tendência central que é resistente a valores extremos e não requer que os dados sigam uma distribuição normal. Isso é particularmente importante, uma vez que dados ambientais frequentemente apresentam valores

censurados, perdidos e/ou discrepantes (outliers) e não tendem a se ajustar a uma distribuição normal ou log-normal.

Figura 17 – Teste de normalidade dos dados no Past.

Tests for normal distribution	
	All
N	107
Shapiro-Wilk W	0,967
p(normal)	0,009128
Anderson-Darling A	1,299
p(normal)	0,002146
p(Monte Carlo)	0,0021
Lilliefors L	0,102
p(normal)	0,007894
p(Monte Carlo)	0,0082
Jarque-Bera JB	9,519
p(normal)	0,008568
p(Monte Carlo)	0,0175

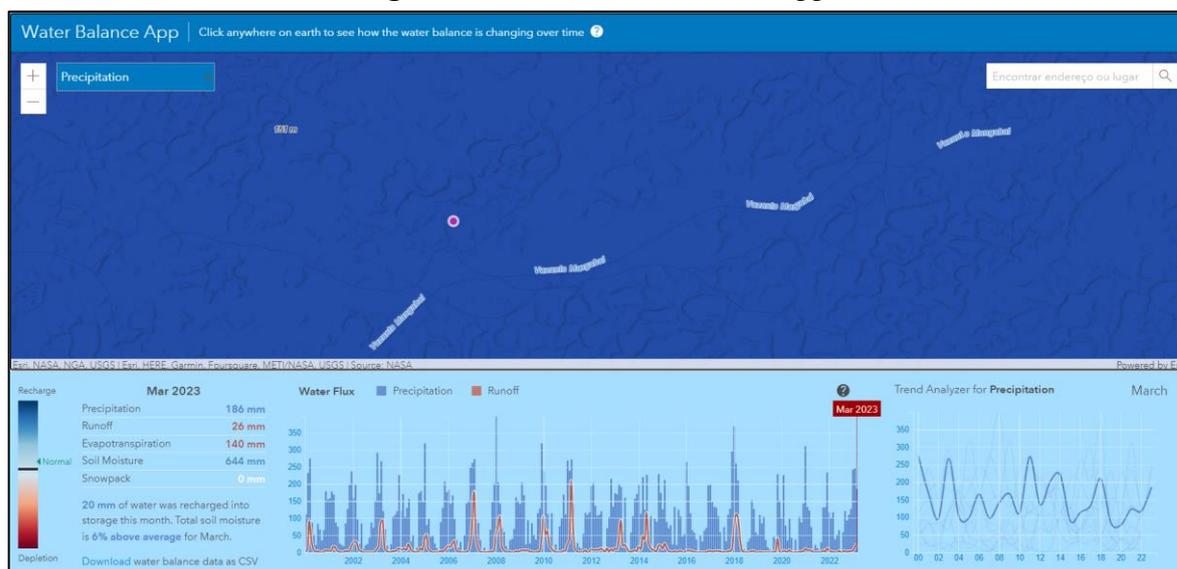
Fonte: Autor (2022).

Devido a essas características peculiares dos dados, optou-se por utilizar a mediana dos valores dos pixels coletados, pois ela melhor representa a tendência central dos dados, como sugerido pela literatura citada

2.2.11 Coleta de dados de pluviosidade

O aplicativo *Water Balance* utiliza dados provenientes do Sistema Global de Assimilação de Dados Terrestres da NASA (GLDAS-2.1) e emprega o modelo de superfície terrestre Noah para analisar o ciclo hidrológico. Esse sistema utiliza observações meteorológicas, tais como temperatura, umidade e precipitação, para estimar a distribuição da água na superfície terrestre. O modelo calcula a quantidade de precipitação que se torna escoamento superficial, a quantidade que evapora e a quantidade que infiltra no solo. Essas variáveis são calculadas a cada três horas e são agregadas em médias mensais desde janeiro de 2000 (Figura 18).

Figura 18 - Site *Water Balance App*.



Fonte: Autor

É de relevância notar que os dados apresentados possuem uma resolução espacial de 0,25 graus (aproximadamente 30 km), conferindo-lhes maior adequação para análises regionais. Em áreas específicas, como fazendas ou outras regiões de pequeno porte, podem existir condições hidrológicas distintas das observadas na região circundante.

No site *Water Balance App* é possível fazer o download dos dados no formato CSV, que possibilitou na tabulação para alinhar com outros dados adquiridos nessa pesquisa.

CAPÍTULO III

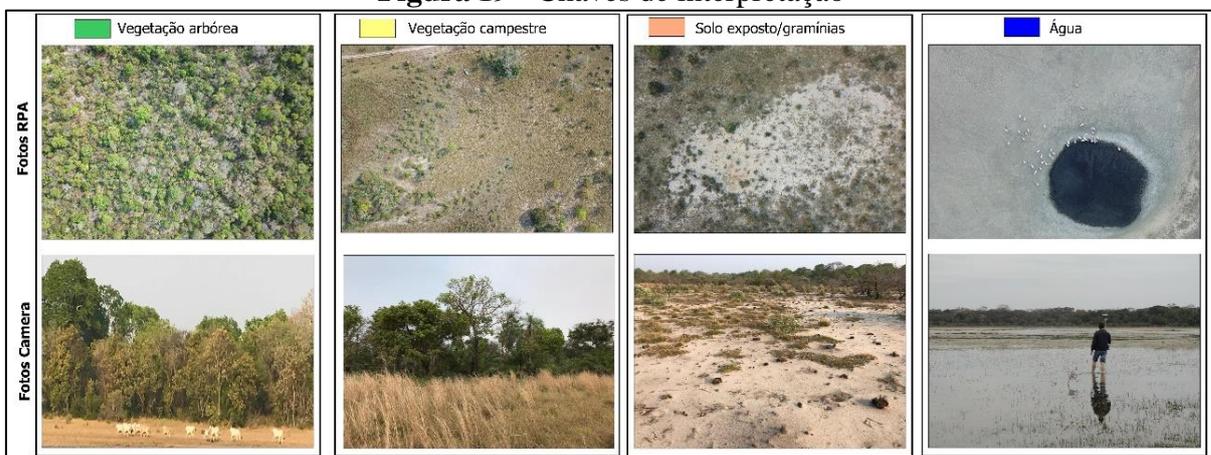
RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Classificação Supervisionada da Área de Estudo

A classificação supervisionada realizada por sensoriamento remoto e geoprocessamento, na fazenda São Roque, no Pantanal da Nhecolândia, a partir de imagens antes do início dos eventos de incêndio florestal (Pré-fogo), 09/09/2019 e 08/10/2021 foram validadas com auxílio de dados obtidos em missão de campo em 09/2018 e 09/2022 para a construção de chaves de interpretação e matriz de confusão gerando quatro classes distintas de cobertura da Terra: Vegetação Arbórea, Vegetação Campestre, Solo Exposto/Gramíneas e Água por meio das chaves de interpretação (Figura 19).

Figura 19 - Chaves de interpretação



Fonte: Autor

A Vegetação Arbórea é a classe representada por áreas com coberturas de vegetação arbórea densa, representadas por cerrado e cerradões, denominadas localmente como cordilheira, e fragmentos de vegetação com dossel, esta classe foi individualizada pela totalidade mais escura no espectro da imagem de sensoriamento remoto devido à presença das copas das árvores, o que possibilitou sua distinção de outras classes, sendo representada pela cor verde (Figura 20).

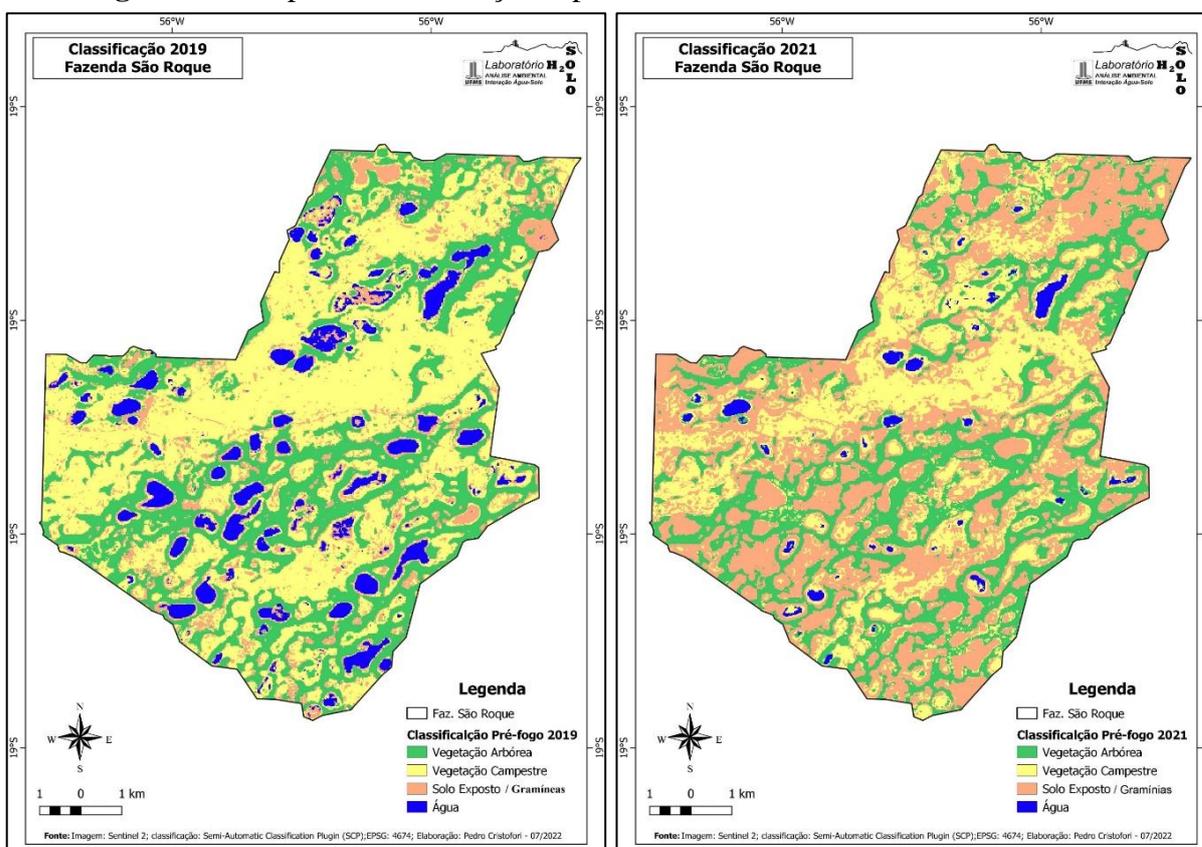
A classe Vegetação Campestre é a classe que abrange áreas com vegetação rasteira, gramíneas e/ou gramíneas com árvores esparsas (campo sujo), geralmente representada por cobertura vegetal mais baixa que a vegetação arbórea. Essas áreas apresentaram tons intermediários no espectro de imagens, refletindo uma menor densidade de vegetação em comparação com a classe de Vegetação Arbórea, diferenciados pela cor amarela (Figura 20).

A classe Solo Exposto/Gramíneas compreende áreas com solo exposto ou áreas cobertas parcialmente por gramíneas e outras plantas de menor porte, identificadas em áreas de campo

sob influência do período seco. Essas áreas apresentaram tons mais claros no espectro, diferenciando-as das demais classes de cobertura, apresentadas pela cor marron (Figura 20).

A classe Água representa os corpos hídricos, como as baías e as salinas. Essas áreas se destacam pelas características espectrais específicas associadas as características de resposta espectral da água, geralmente apresentando tons muito escuros ou ausentes nas imagens de sensoriamento remoto, devido a absorção do espectro de luz, representadas pela cor azul (Figura 20).

Figura 20 - Mapa de Classificação supervisionada da área de estudo 2019 e 2021



Fonte: Autor

Na classificação supervisionada da imagem de 09/09/2019, observou-se que a classe Vegetação Campestre foi mais expressiva em relação às demais classes de cobertura da Terra, enquanto na classificação supervisionada do 08/10/2021, notou-se uma redução na expressividade da classe vegetação Campestre e um aumento na representatividade da classe Solo Exposto/Gramíneas na área da fazenda São Roque.

3.1.1.1 Comportamento da Fisionomia da Paisagem da fazenda São Roque

A área da propriedade foi dividida em parte norte e parte sul em função dos dois eventos de incêndios florestais ocorridos em 2019 atingindo apenas a parte norte e 2021 ocorreu em

toda área da propriedade, desta forma, temos dois eventos específicos nas análises dos eventos de queimadas:

1. Parte Norte evento de incêndio florestal 2019;
2. Parte Sul evento de incêndio floresta 2021; e
3. Parte Norte evento de incendio florestal 2021 (reincidência do evento de incêndio).

A compartimentação da fitofisionomia da paisagem da fazenda São Roque (Tabela 6) segundo a classificação supervisionada e validado em campo 2019 e 2022, foram identificados conforme classificação das imagens de satélite (4 classes: vegetação arbórea (cordilheiras), vegetação campestre (campo e campo sujo); solo exposto/gramínea e água (corpos hídricos: baías e salinas).

Tabela 6 - Classes da fitofisionomia da paisagem da fazenda São Roque

Classes	Norte		Sul		Total	
	ha	%	ha	%	ha	%
Vegetação Arbórea	1.084,60	25,4	2.477,84	36,04	3.562,44	31,95
Vegetação Campestre	2.388,8	55,9	2.796,44	40,67	5.185,24	46,51
Solo Exposto / Gramínea	554,60	12,98	994,52	14,46	1.549,12	13,89
Água	245,24	5,74	606,92	8,83	852,16	7,64
TOTAL	4.273,24	100	6.875,70	100	11.148,96	100

Fonte: Autor

Na quantificação das classes via imagens de satélite o total da área foi de 11.148,96 hectares enquanto na matrícula a área da propriedade é de 11.158,62 hectares, apresentado um déficit de 9,66 ha, ou seja, um erro de 0,09% entre o resultado da classificação e a área real da propriedade.

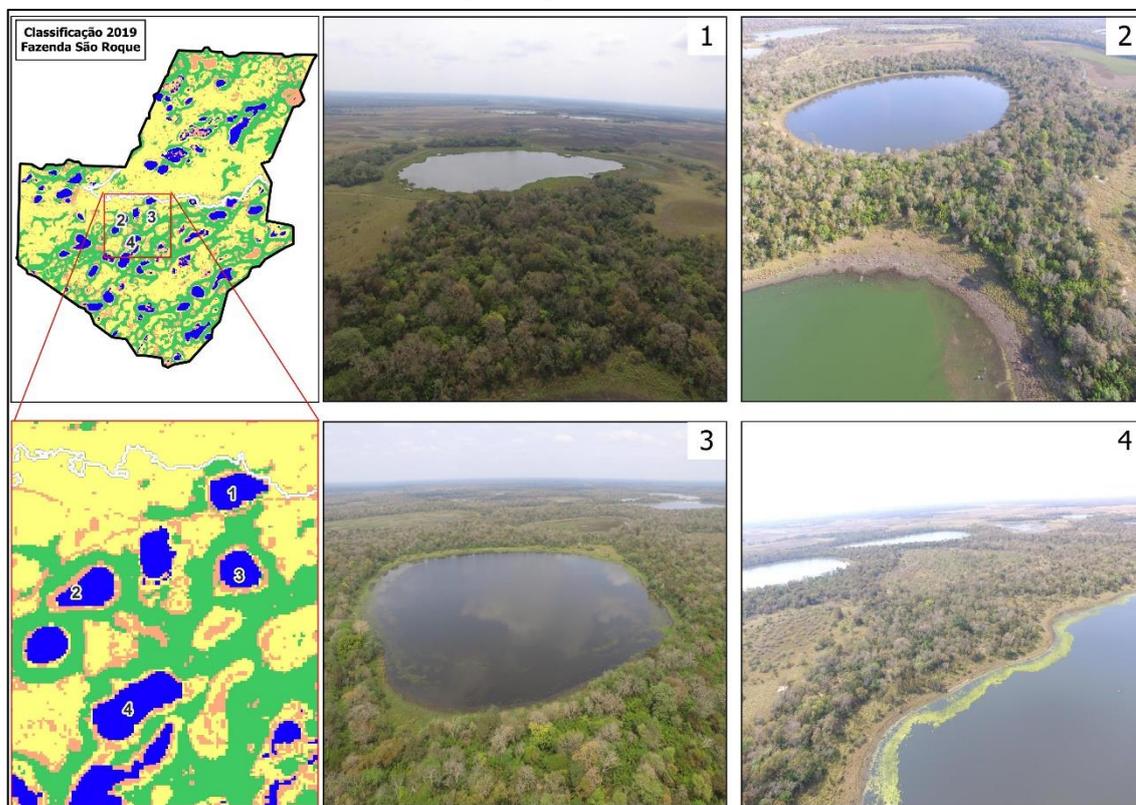
A área da parte norte que ocorreu o evento de incêndio florestal em setembro de 2019 e outubro de 2021 é de 4.273,24 hectares que corresponde a 38,3% da propriedade, enquanto a parte sul atingida somente pelo evento de incêndio florestal em outubro de 2021 com a área de 6.875,70 ha representa 61,7% da propriedade.

3.1.1.2 Validação da Classificação Supervisionada via Dados de Campo de 2018 na fazenda São Roque

O trabalho de campo realizado na fazenda São Roque ocorreu em setembro de 2018. Durante a missão de campo foram utilizados a câmera fotográfica do drone (RPA) para registro dos diferentes tipos de vegetação (fisionomia da paisagem), por meio das imagens aéreas facilitando a classificação e a separação das classes, vale ressaltar que todas as imagens tiveram sua locação adquiridas por meio de GNSS-RTK.

A sequência de fotografias georreferenciadas (imagem aérea de RPA) da área da fazenda São Roque obtidas via drone durante o campo de setembro de 2018 (Figura 21)

Figura 21 -Validação da Classificação Supervisionada de 2019 via dados de campo (fotos pré-fogo de RPA)



Fonte: Autor

Assim as fotografias possibilitaram a verificação dos diferentes tipos de fisionomia da paisagem e sua individualização e assim utilizá-las na composição das chaves de interpretação, na validação das classes (vegetação arbórea, vegetação campestre, solo exposto/gramíneas e água).

3.1.1.3 Validação da Classificação Supervisionada pela Matriz de Confusão

A estimativa de acurácia da classificação dos mapas temáticos de cobertura da Terra foi realizada por meio do plugin do Qgis AcATaMa, sendo uma etapa fundamental na análise dos dados gerados pelos produtos cartográficos resultantes das imagens de satélite, pois ela garantiu o nível de acerto nos mapas de 2019 e 2021 pelo algoritmo e pela fotointerpretação com o uso do sensoriamento remoto.

3.1.1.3.1 Matriz de confusão dos dados de 2019

Na matriz de confusão da classificação de 2019, gerada pelo plugin do Qgis AcATaMa, foram analisados 396 pontos nas diferentes classes da chave de interpretação e os dados

apresentaram uma acurácia geral de 91%. (Tabela 7). Na classe de vegetação arbórea foram analisados 125 pontos, dos quais, 124 pontos foram confirmados pertencentes a classe, porém, 1 ponto analisado representava a classe de solo exposto/gramínea, nenhum dos pontos analisados foi confundido com a classe de classe de vegetação campestre e água, com isso a classe de vegetação arbórea totalizou 99% de acurácia.

Enquanto, na classe de vegetação campestre, os pontos passaram para 198, cujo 175 pontos foram atribuídos a classe, enquanto apenas 3 pontos ficaram na classe de vegetação arbórea, e ainda, 20 pontos na classe solo exposto/gramínea e sem atribuição de ponto para classe de água. Dessa forma a classe de vegetação campestre apresentou um índice de 88% de acurácia.

Já a classe solo exposto/gramínea, foram 38 pontos analisados, dos quais, 32 pontos foram confirmados pertencentes a classe, mas 6 pontos representavam a classe de vegetação campestre, nenhum dos pontos foram atribuídas as classes de vegetação arbórea e água, desta maneira a acurácia da classe solo exposto/gramínea apresentou 84%.

Por fim, a classe água teve 35 pontos analisados, onde 30 pontos foram confirmados pertencentes a classe e 3 pontos foram classificados na classe de vegetação campestre e 2 pontos representavam a classe de solo exposto/gramínea, não tendo pontos atribuídos a classes de vegetação arbórea, com 88% de acurácia.

Tabela 7 - Matriz de confusão da classificação supervisionada de 2019

Classes	Vegetação Arbórea	Vegetação Campestre	Solo Exposto Gramíneas	Água	Total	Uses Accuracy
Vegetação Arbórea	124	3	0	0	127	0.9685
Vegetação Campestre	0	175	6	3	184	0.90217
Solo exp/gramínea	1	20	32	2	55	0.45455
Água	0	0	0	30	30	1.0
Total	125	198	38	35	396	
Producer accuracy	0.99197	0.88395	0.84204	0.85814		

Fonte: Autor

3.1.1.3.2 Matriz de confusão dos dados de 2021

O mesmo procedimento empregado para a elaboração da matriz de confusão na classificação referente ao ano de 2019 foi replicado para a avaliação da classificação correspondente ao evento de 2021. Um total de 395 pontos amostrais foram submetidos a verificação, abrangendo as diversas classes da chave de interpretação estabelecida e os dados apresentam acurácia geral de 0,85%. (Tabela 8). No que se refere à classe de vegetação arbórea,

foram examinados 129 pontos, destes, 109 pontos foram acertadamente categorizados como pertencentes a esta classe. No entanto, revelou-se que 10 pontos, originalmente classificados como vegetação arbórea, foram identificados como vegetação campestre, enquanto outros 10 pontos foram classificados na classe de solo exposto/ gramínea. Notavelmente, nenhum dos pontos analisados foi atribuído à classe de água. A classe de vegetação arbórea alcançou o patamar de 84% de acurácia.

Na categoria de vegetação campestre, foram gerados 118 pontos de amostra, sendo que deste conjunto, 90 pontos foram classificados na classe de vegetação campestre, enquanto apenas 2 pontos na classe de vegetação arbórea. Adicionalmente, 26 pontos foram classificados como solo exposto/gramínea. Conforme já observado anteriormente, nenhuma das amostras foi relacionada à classe de água. A avaliação resultou em um índice de acurácia para a classe de vegetação campestre atingindo 76%.

Considerando a classe de solo exposto/gramínea, 141 pontos foram analisados. Destes, 131 pontos foram identificados como pertencentes a esta classe. Porém, um ponto, originalmente destinado à classe de solo exposto/gramínea foi categorizado como vegetação arbórea, enquanto outros 9 pontos foram atribuídos à classe de vegetação campestre. Mais uma vez, a classe de água não registrou nenhum ponto incorretamente classificado. Desta maneira a acurácia da classe solo exposto/gramínea apresentou 92%.

Por fim, a classe de água foi submetida a uma avaliação de 7 pontos de amostra e deste conjunto, 6 pontos foram identificados como pertencentes à classe de água. No entanto, um ponto originalmente atribuído à classe de água foi classificado como vegetação campestre. Novamente, nenhuma das amostras foi relacionada às classes de vegetação arbórea ou solo exposto/gramínea. A avaliação culminou em um índice de acurácia para a classe de água atingindo 86%.

Tabela 8 - Matriz de confusão da classificação supervisionada de 2021

Classes	Vegetação Arbórea	Vegetação Campestre	Solo Exposto Gramíneas	Água	Total	Uses Accuracy
Vegetação Arbórea	109	2	1	0	112	0.97321
Vegetação Campestre	10	90	9	1	110	0.81818
Solo exp/gramínea	10	26	131	0	167	0.78443
Água	0	0	0	6	6	1.0
Total	129	118	141	7	395	
Producer accuracy	0.96078	0.86024	0.60963	0.88323		

Fonte: Autor

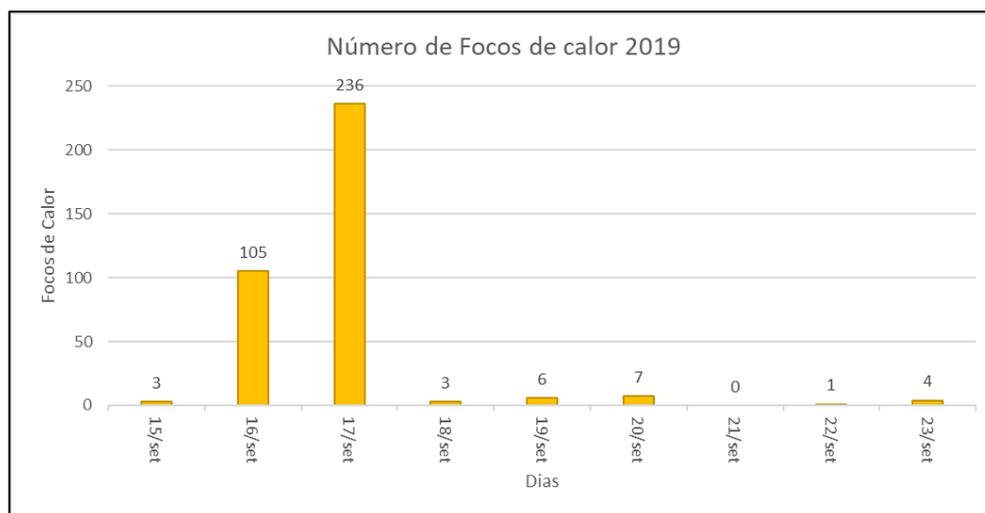
3.1.2 Eventos de Incêndio Florestal

Os eventos de incêndio florestal na fazenda São Roque ocorreram em dois períodos distintos: setembro de 2019 e outubro de 2021.

3.1.2.1 Monitoramento de Focos de Calor do Incêndio Florestal ocorrido em 2019

Os resultados contabilizaram 365 focos de calor para os 8 dias de incêndio ocorridos em setembro de 2019, entretanto, a análise para a reconstituição deste evento compreendeu o período de 09/09/19 a 25/09/19, devido a utilização e disponibilidade das imagens do satélite Sentinel 2. Os focos de calor, contabilizados diariamente, apontaram a progressão do incêndio florestal, identificando os focos iniciais e sua evolução até atingir o seu ápice (17/09/19, com 236 focos de calor), e a detecção dos últimos focos de calor deste evento, no dia 23/09/19 (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Focos de calor contabilizados no evento de incêndio florestal de setembro de 2019



Fonte: Autor

No primeiro dia do evento de incêndio florestal, dia 15/09/19, foram detectados 3 focos de calor pelo satélite NOAA-19, após 14 dias sem chuva, com Risco de Fogo (RF) igual a 1, considerado de grau Crítico para sua ocorrência, conforme a classificação do INPE e sem detecção para o *Fire Radiative Power* (FRP) (Tabela 9).

Tabela 9 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e Fire Radiative Power do dia 15/09/19, na área de estudo, Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul

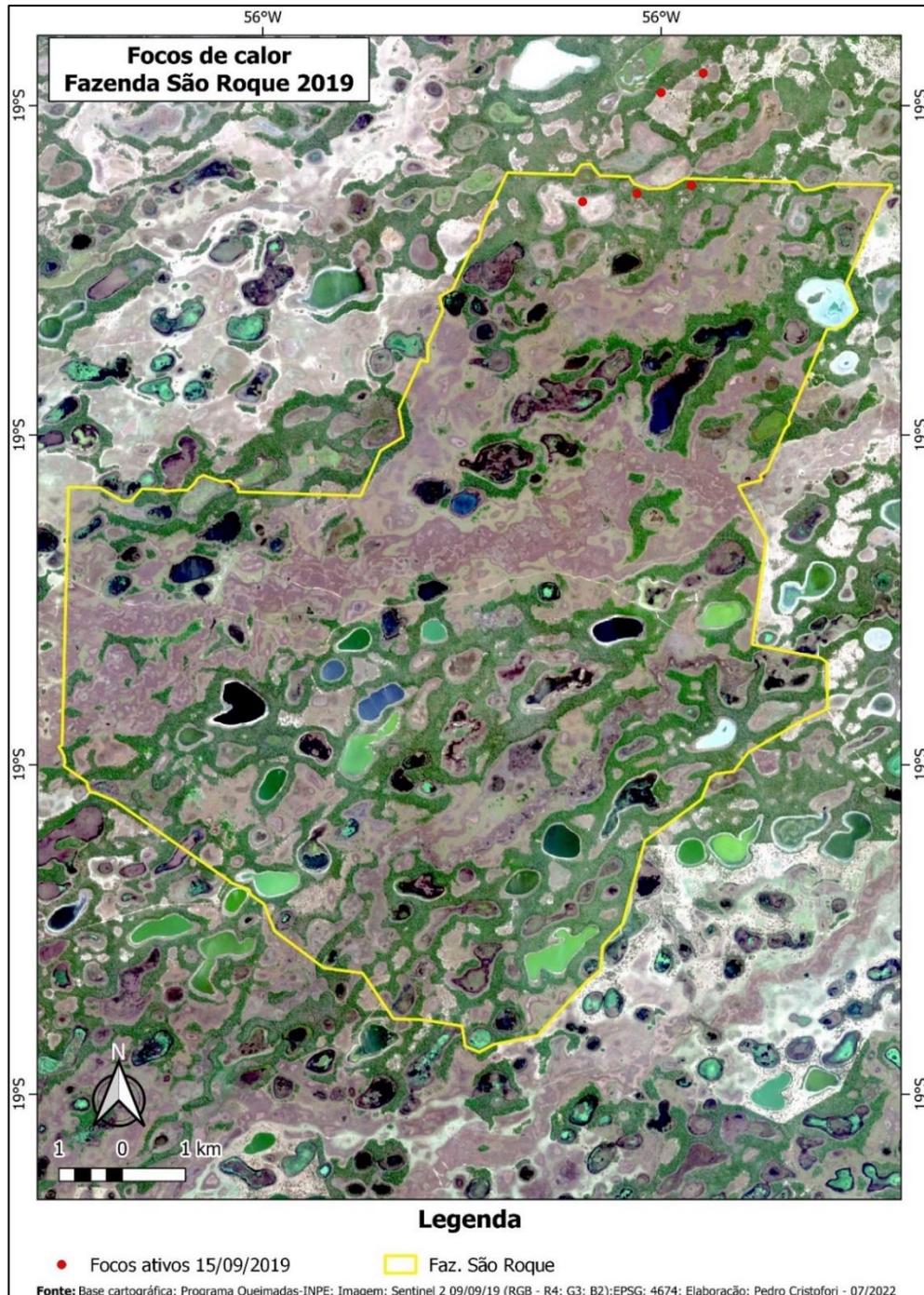
Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
15/09/19	NOAA-19	3	14	1	-

Fonte: Autor

A localização dos 3 focos de calor que deram origem a este evento de incêndio florestal na fazenda São Roque ocorreram na porção norte, provavelmente provenientes de um incêndio

existente na região, conforme podemos observar a propagação dos focos de calor detectados na porção externa da propriedade (Figura 22).

Figura 22 - Focos de calor do dia 15/09/2019



Fonte: Autor

Após o alastramento dos focos iniciais dentro da propriedade, observou-se no dia 16/09/2019 a propagação do incêndio florestal de forma intensa, aumentando progressivamente horas após o início, conforme detectados pelos satélites: NOAA-18D, GOES-16, NPP-375, AQUA_M-T, NOAA-20, GOES-16, NOAA-19, contabilizando ao todo 105 focos de calor,

com 15 dias sem incidência de chuva, Risco de Fogo Crítico e FRP variando de 15,3 a 111,3 e de 25,4 a 209,5 (Tabela 10).

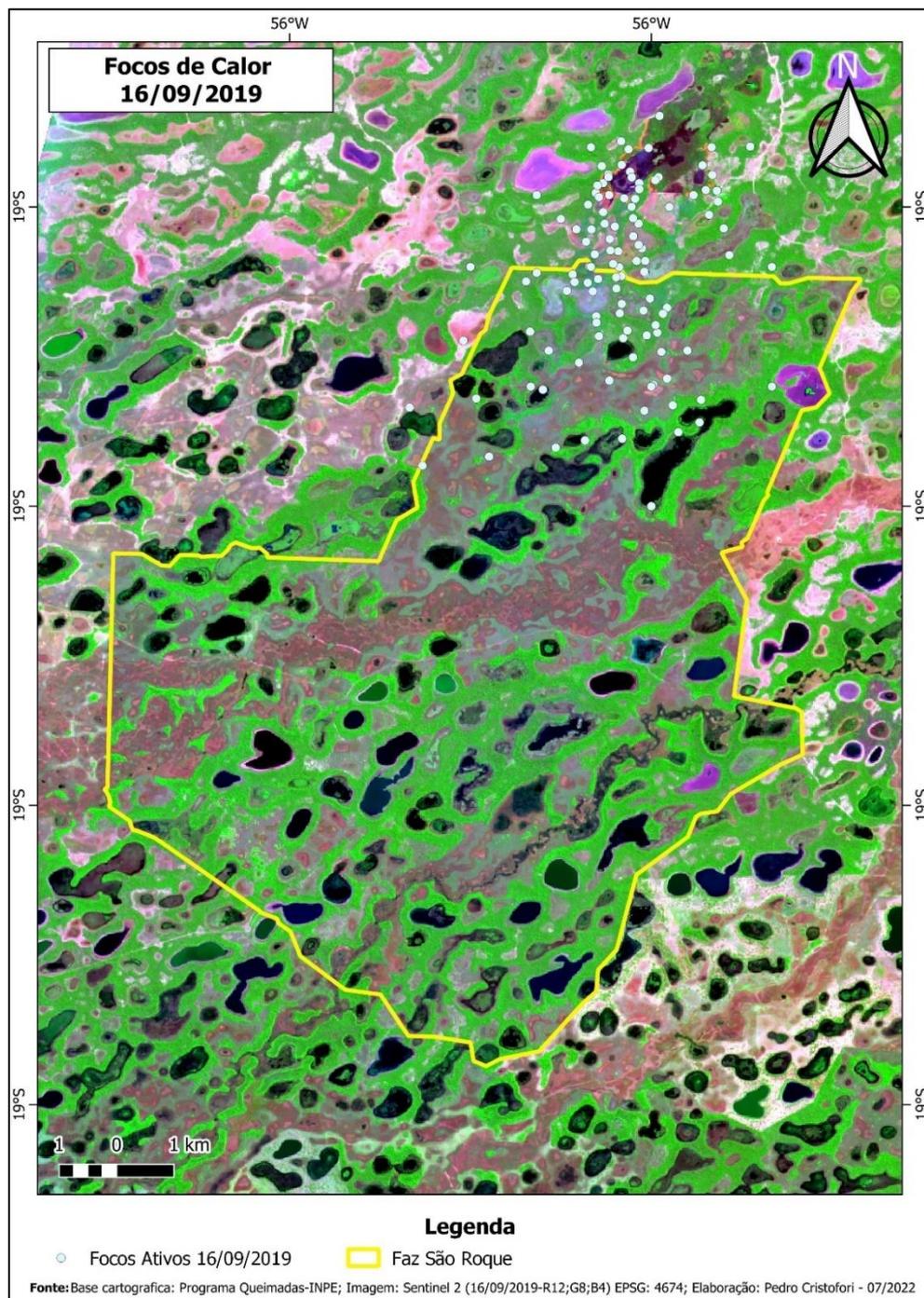
Tabela 10 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 16/09/2019

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
16/09/19	NOAA-18D	2	15	1	-
16/09/19	GOES-16	1	15	1	-
16/09/19	NPP-375	13	15	1	15,3 a 111,3
16/09/19	AQUA_M-T	8	15	1	25,4 a 209,5
16/09/19	NOAA-20	14	15	1	-
16/09/19	GOES-16	57	15	1	-
16/09/19	NOAA-19	10	15	1	-
Total		105			

Fonte: Autor

Apesar dos focos de calor terem adentrado no limite da fazenda São Roque, observou-se um alastramento intenso, com diversos focos de calor distribuídos na parte norte (Figura 23), porém a vegetação ainda se apresentava intacta, conforme demonstra a cena do dia 16/09/19, com sinais de consumo moderado de biomassa, sem sinais de cicatrizes de devastação. No entanto a propagação do fogo evoluiu de forma significativa, conforme constatado nos dias posteriores.

Figura 23 - Focos de calor do dia 16/09/2019



Fonte: Autor

No dia 17/09/2019, o alastramento na porção norte da propriedade atinge seu ápice, com as frentes de fogo se propagando em diversas direções, contabilizando um total de 236 focos de calor, 16 dias sem incidência de chuva, Risco de Fogo Crítico, máximas de FRP entre 14,2 e 256,6 (Tabela 11).

Tabela 11 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 17/09/19

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
17/09/19	AQUA_M-M	5	16	1	28,7 a 104,8
17/09/19	AQUA_M-T	10	16	1	24 a 115,6
17/09/19	GOES-16	60	16	1	-
17/09/19	MSG-03	1	16	1	-
17/09/19	NOAA-19D	7	16	1	-
17/09/19	NOAA-20	76	16	1	-
17/09/19	NPP-375	33	16	1	4 a 26,9
17/09/19	NPP-375D	33	16	1	1 a 14,2
17/09/19	TERRA_M-M	6	16	1	7,8 a 66,1
17/09/19	TERRA_M-T	5	16	1	55,6 a 256,6
Total		236			

Fonte: Autor

Todavia, durante o período da análise ocorreram interferências das condições climáticas, com presença de nuvens e fumaça, que influenciaram na detecção dos dias posteriores, contabilizando apenas 03 focos no dia 18/09/2019, pelos satélites NOAA-20 e TERRA_M-T, e com FRP de 10,2; 6 focos de calor no dia 19/09/2019, pelos satélites AQUA_M-T, NOAA-20, NPP-375, com FRP máximas de 10 e 11; 7 focos no dia 20/09/2019 pelos satélites METOP-B, GOES-16, NOAA-19, NPP-375, NPP-375D, com FRP máxima de 1 e 8, todos os focos detectados nestes dias apresentando Risco de Fogo Crítico e totalizando 19 dias sem incidência de chuvas (Tabela 12).

Tabela 12 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* dos dias 18/09/19, 19/09/19 e 20/09/19

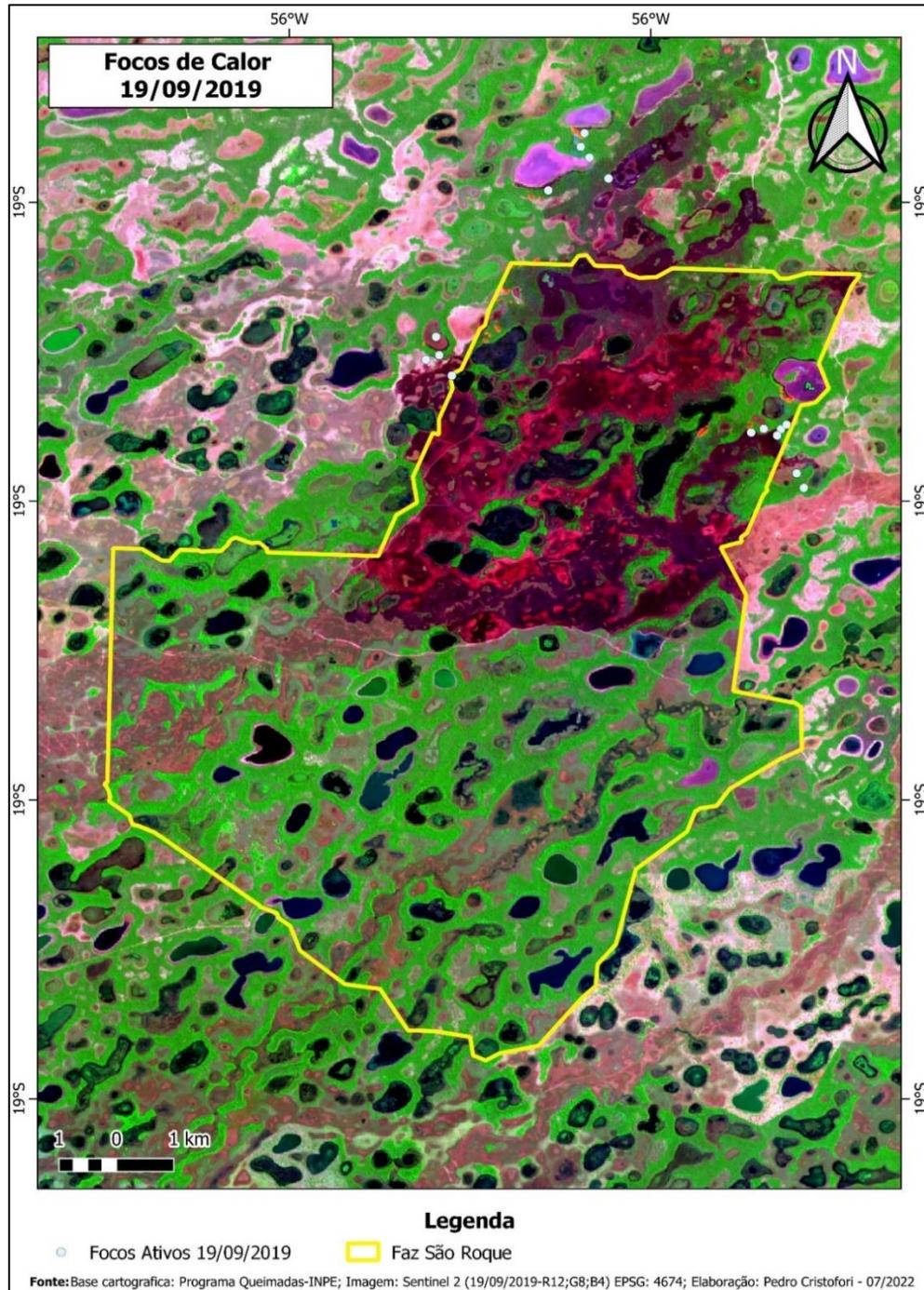
Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
18/09/19	NOAA-20	2	17	1	
18/09/19	TERRA_M-T	1	17	1	10,2
Total		3			
19/09/19	AQUA_M-T	2	18	1	6,3 a 10
19/09/19	NOAA-20	2	18	1	-
19/09/19	NPP-375	2	18	1	8,3 a 11
Total		6			
20/09/19	METOP-B	2	19	1	-
20/09/19	GOES-16	1	19	1	-
20/09/19	NOAA-19	1	19	1	-
20/09/19	NPP-375	1	19	1	8,2
20/09/19	NPP-375D	2	19	1	0,8 a 1
Total		7			

Fonte: Autor

A baixa detecção dos sensores remotos nestes dias está relacionada as condições

climáticas e fumaça produzida pelas queimadas, no entanto, na composição de bandas do SWIR, Red Edge e Red (12, 8, 4) do satélite Sentinel-2B, disponíveis para os dias 19 de setembro (Figura 24), mesmo apresentando 10% de cobertura de nuvens esparsas na cena, no entanto, pode-se observar os 6 focos de calor ativos e o estrago do incêndio na porção norte da fazenda São Roque.

Figura 23 - Focos de calor do dia 19/09/2019



Fonte: Autor

Para os dias posteriores, devido grande interferência atmosférica ou mesmo a natural extinção do fogo, anulando a detecção para o dia 21/09/2019 e contabilizando apenas 1 foco de calor no dia 22/09/2019 (satélite NOAA-19) e 4 registros no dia 23/09/2019, AQUA_M-T (satélite de referência), NOAA-20 e NPP-375, com FRP máxima de 4 e 24, todos classificados como Crítico Risco de Fogo. Nos dias 25/09/2019 em diante a detecção foi novamente nula, ou seja, não ocorreram mais nenhuma detecção de focos de incêndios, indicando a extinção do fogo (Tabela 13).

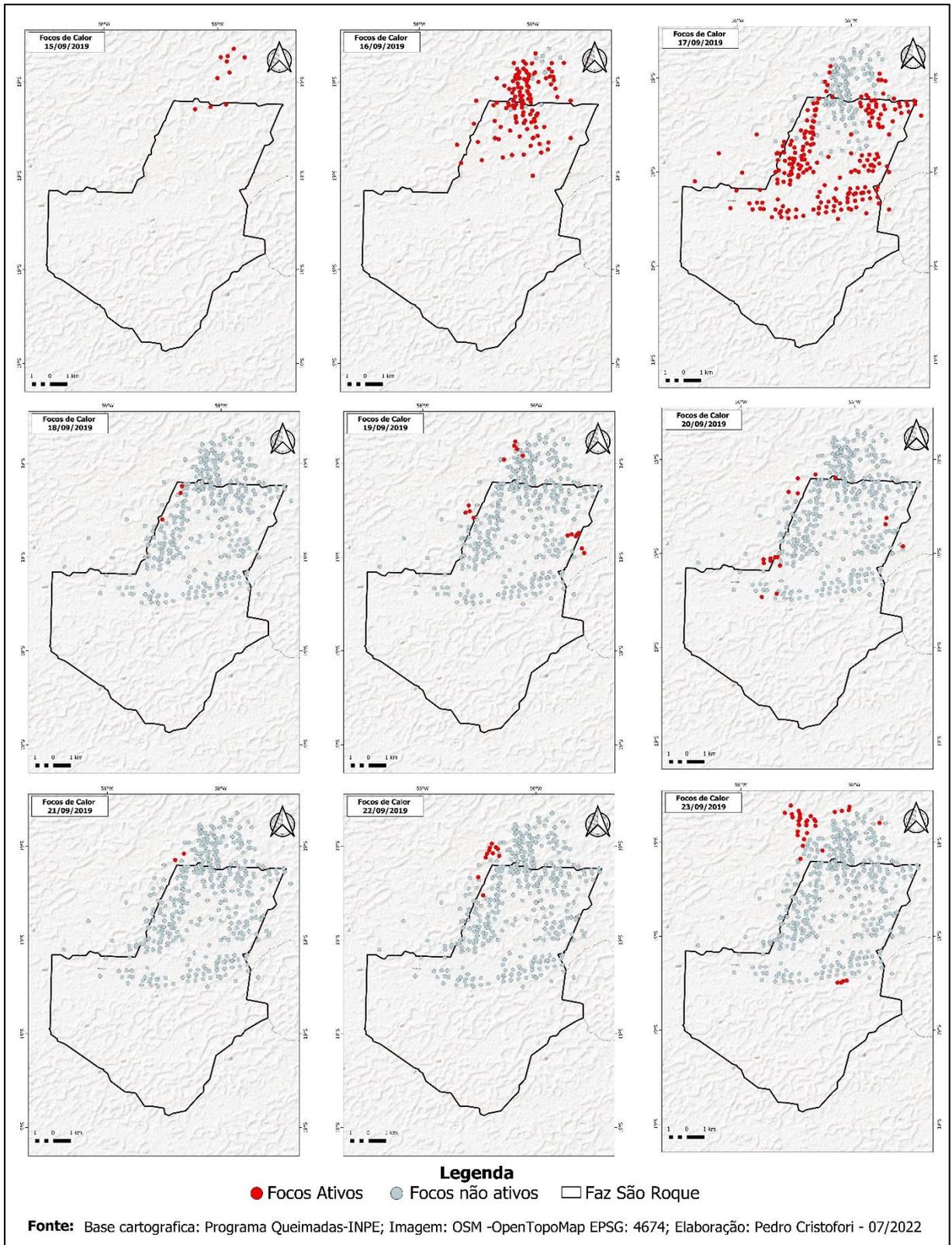
Tabela 13 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 22/09/19 e 23/09/19

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
22/09/19	NOAA-19	1	21	1	-
Total		1			
23/09/19	AQUA_M-T	1	23/09/19	AQUA_M-T	24
23/09/19	NOAA-20	1	23/09/19	NOAA-20	-
23/09/19	NPP-375	2	23/09/19	NPP-375	4
Total		4			

Fonte: Autor

A evolução do evento incêndio florestal (Figura 25) ocorrido na fazenda São Roque, por meio dos focos de calor do dia 15 a 23/09/2019, em que os pontos vermelhos são os focos ativos e em cinza-escuro são os focos do dia anterior, considerados inativos, todos estão plotados sobre uma composição de imagem cinza do OSM – *Open Topo Map*, para melhor compreensão do evento de queimada de setembro de 2019.

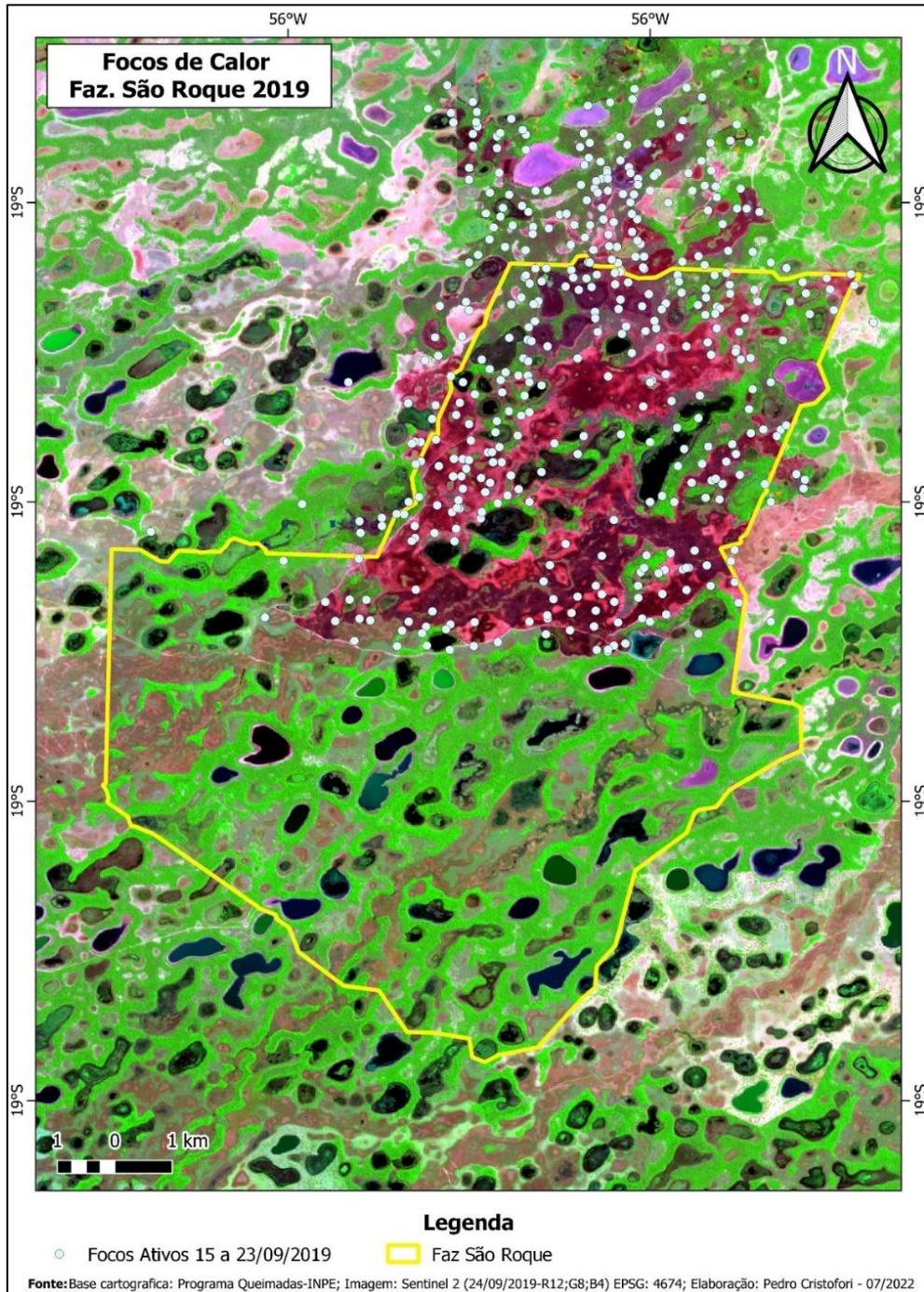
Figura 25 - Mapa da evolução dos focos de calor do evento de evento de incêndio florestal de setembro de 2019 da Fazenda São Roque



Fonte: Autor

A distribuição espacial de todos os focos de calor detectados durante o período mencionado do incêndio (Figura 26), sobreposta à imagem base do pós-fogo. A composição de bandas utilizada foi do SWIR, Red Edge e Red (12, 8, 4) do satélite Sentinel-2B. Os focos de calor se concentram na parte norte da fazenda São Roque até a metade, sendo interrompidos pela estrada que leva à sede da fazenda, a qual serviu, como uma barreira para conter o fogo.

Figura 26 - Mapa de focos de calor do evento de incêndio florestal de setembro 2019

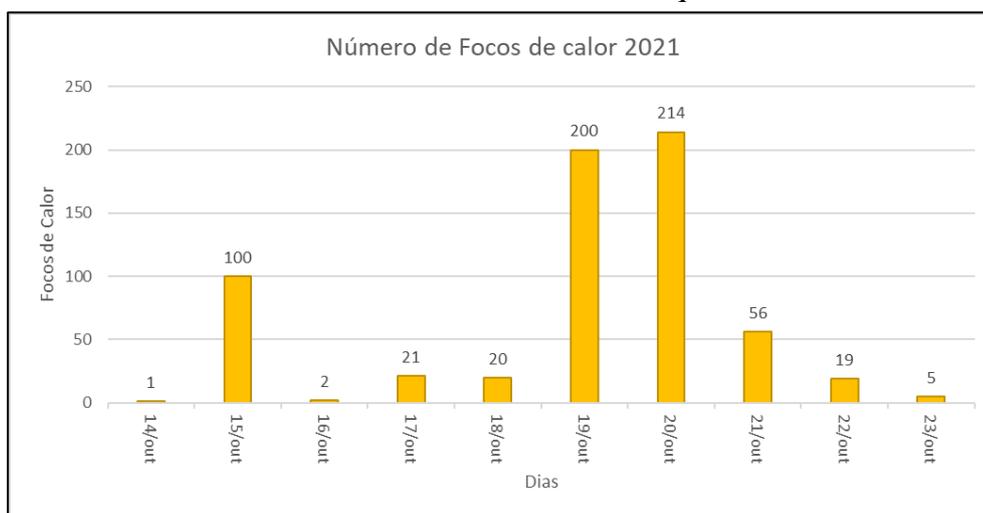


Fonte: Autor

3.1.2.2 Monitoramento de Focos de Calor do Incêndio Florestal ocorrido em 2021

Durante os 10 dias de incêndio ocorridos em outubro de 2021 foram contabilizados 638 focos de calor, entretanto, a análise para a reconstituição deste evento compreendeu o período de 08/10/21 a 25/10/21, devido a utilização e disponibilidade das imagens do satélite Sentinel. Os focos de calor, contabilizados diariamente, apontaram a progressão do incêndio florestal, identificando os focos iniciais e sua evolução até atingir o seu ápice no dia 20/10/21, com 214 focos de calor, e a detecção dos últimos de focos de calor deste evento, no dia 23/10/21 (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Focos de calor contabilizados no evento de queimada de outubro de 2021



Fonte: Autor

No primeiro dia do evento do incêndio florestal, dia 14/10/21, foi detectado 1 foco de calor pelo satélite NOAA-19, após 4 dias sem chuva, com Risco de Fogo (RF) igual a 0,6, classificado como de grau médio de Risco de Fogo, conforme a classificação do INPE e sua *Fire Radiative Power* (FRP) quantificada em 3 (Tabela 14).

Tabela 14. Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 14/10/21.

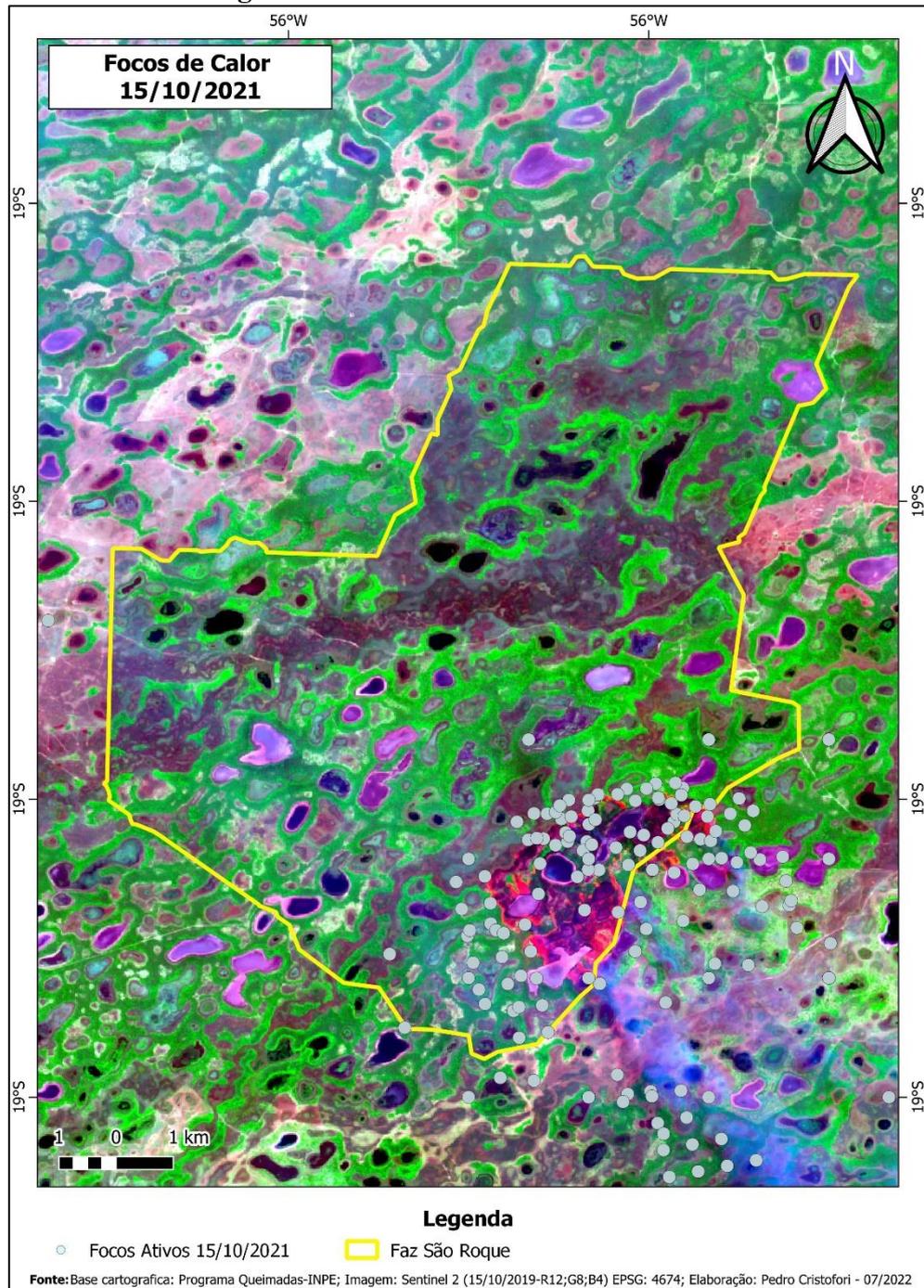
Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
14/10/21	NOAA-20	1	4	0,6	3

Fonte: Autor

A localização deste foco inicial de calor que deu origem ao evento de incêndio de 2021 na fazenda São Roque ocorreu na porção sudeste da propriedade, a margem de uma lagoa. Segundo Pirajá et al. (2023) mesmo havendo ocorrência de chuva ou condição de saturação de umidade, interpretada pelo satélite como incidência de chuva (condição climática propícia a ocorrência de raios), um raio pode ter favorecido a ignição (Figura 27).

Observou-se a propagação do incêndio florestal ainda de forma localizada no dia 15/10/21, porém bastante intensa, aumentando progressivamente horas após seu início. Conforme já analisado por Pirajá et al. (2023), o fogo com a maior distância em linha reta, entre a frente de fogo e o primeiro foco de calor detectado, sendo de 3,2 km. Já os focos de calor detectados encontram-se em sua maioria sobre o fogo, com uma parte dispersa sobre a pluma de fumaça que indica a direção do vento para sudeste, em um raio de 5 km, tomando o foco inicial como o centro.

Figura 27 - Focos de calor do dia 15/10/21



Fonte: Autor

Neste dia (15/10/21) foram detectados 100 focos de incêndios por 9 satélites, AQUA_M-T, GOES-16, METOP-C, NOAA-19D, NOAA-20, NPP-375, NPP-375D, TERRA_M-M, TERRA_M-T, com Risco de Fogo de 0,1, considerado baixo e a grandes amplitudes de FRP, apontando uma máxima de 347,2 (Tabela 15).

Tabela 15 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 15/10/21

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
15/10/21	AQUA_M-T	9	4	0,1	31,7 a 222,5
15/10/21	GOES-16	22	4	0,1	-
15/10/21	METOP-C	3	4	0,1	-
15/10/21	NOAA-19D	1	4	0,1	-
15/10/21	NOAA-20	14	4	0,1	1 a 40,3
15/10/21	NPP-375	29	4	0,1	5,8 a 31,4
15/10/21	NPP-375D	14	4	0,1	0,6 a 2,9
15/10/21	TERRA_M-M	4	4	0,1	8,6 a 33,8
15/10/21	TERRA_M-T	4	4	0,1	32,6 a 347,2
Total		100			

Fonte: Autor

No dia posterior, 16 de outubro de 2021, houve 2 registros com Baixo Risco de Fogo com 4 dias sem chuva, no dia 17/10/2021 foram registrados 21 focos de calor, com os dados já indicando chuva e no dia 18/10/2021 de outubro foram registrados apenas 20 focos de calor, classificados como Alto Risco de Fogo. Os dados indicam forte influência atmosférica, por isso a baixa detecção, corroborando com a única imagem do satélite Sentinel-2B disponível entre os dias 15 e 20 de outubro de 2021, com 78% de cobertura de nuvens densas na cena, inviabilizando a utilização da imagem (Tabela 16).

Tabela 16 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 16/10/21, 17/10/21, 18/10/21

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
16/10/21	NOAA-19	2	4	0,2	
Total		2			
17/10/21	AQUA_M-T	3	0	0,6	27,8 a 71,6
17/10/21	GOES-16	1	0	0,4	
17/10/21	NOAA-19	2	0	0,6	
17/10/21	NOAA-20	4	0	0,7	3,7 a 16
17/10/21	NPP-375	10	0	0,6	5,4 a 14,8
17/10/21	TERRA_M-M	1	0	0,5	3,9
Total		21			
18/10/21	AQUA_M-T	1	2	0,8	26
18/10/21	GOES-16	4	2	0,7	
18/10/21	NPP-375	15	2	0,9	4 a 15,7
Total		20			

Fonte: Autor

Após o alastramento dos focos no interior da propriedade, e apesar da baixa detecção nos dias anteriores, foram contabilizados 200 focos de calor no dia 19/10/2021 e 214 focos de calor no dia 20/10/2021, indicando o ápice do evento de incêndio florestal de forma intensa, conforme detectados pelos satélites: AQUA_M-M, GOES-16, MSG-03, NOAA-20, NPP-375, NPP-375D, TERRA_M-M, TERRA_M-T, com Alto e Crítico Risco de Fogo e FRP variando com máximas de 7,5 a 287,1 (Tabela 17).

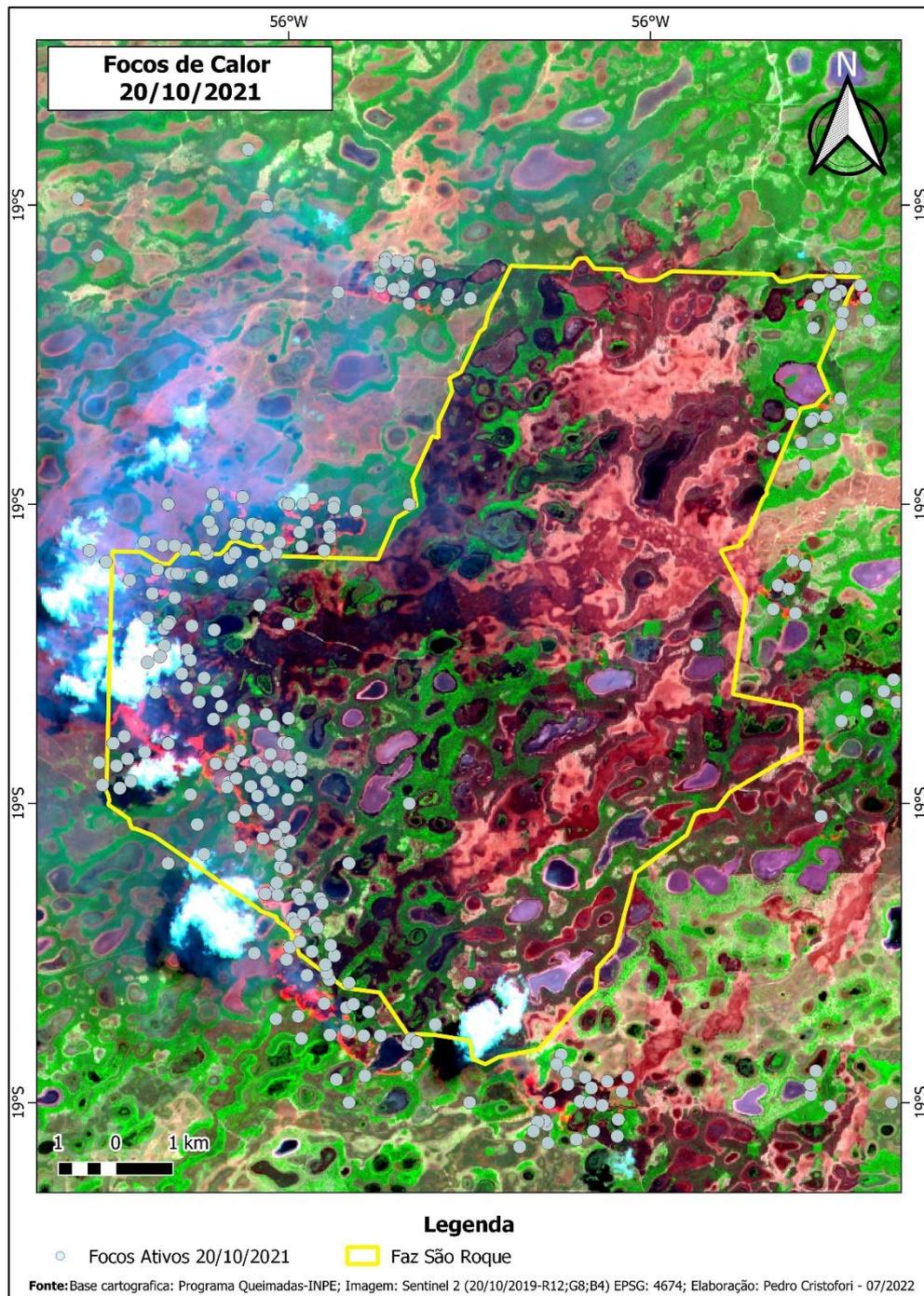
Tabela 17 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 19/10/21 e 20/10/21.

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
19/10/21	AQUA_M-T	12	3	1	13,8
19/10/21	GOES-16	63	3	1	-
19/10/21	NOAA-20	69	3	0,7	0,6 a 16,7
19/10/21	NPP-375	32	3	1	4,2 a 199,1
19/10/21	NPP-375D	11	3	1	0,7 a 3,6
19/10/21	TERRA_M-M	8	3	1	5,3 a 31,6
19/10/21	TERRA_M-T	5	3	1	69,4 a 388,1
Total		200			
20/10/21	AQUA_M-M	1	4	1	45,6
20/10/21	GOES-16	99	4	0,9	-
20/10/21	MSG-03	1	4	0,7	-
20/10/21	NOAA-20	61	4	1	0,8 a 36,4
20/10/21	NPP-375	6	4	0,7	13,9 a 66,1
20/10/21	NPP-375D	37	4	1	1 a 7,5
20/10/21	TERRA_M-M	2	4	1	28,2 e 96,4
20/10/21	TERRA_M-T	7	4	1	32,1 a 287,1
Total		214			

Fonte: Autor

A imagem capturada pelo satélite Sentinel-2A, em 20 de outubro de 2021 (Figura 28), espacializa a disseminação do evento de incêndio, que se espalhou em diversas direções ao redor da área de interesse, concentrando-se principalmente na parte oeste da fazenda São Roque, resultando na queima da vegetação presente. No interior da área analisada, onde o fogo se propagou, é possível observar a marca deixada pelo incêndio, evidenciada pela mudança de coloração na imagem. Apesar de apresentar 30% de cobertura de nuvens, a cena selecionada ainda possibilitou a localização geográfica dos focos de calor.

Figura 28 - Focos de calor do dia 20/10/21



Fonte: Autor

Os dias 21 e 22 de outubro de 2021 dão continuidade ao avanço do fogo, com os focos formando padrões agrupados, sendo contabilizados 56 e 19 focos de calor, respectivamente, também registrando Risco de Fogo médio, alto e crítico e altos valores para FRP, não havendo imagem Sentinel para estes dias. No dia 23 de outubro de 2021 foram detectados apenas 5 focos de calor na área de estudo, provavelmente tendo consumido a biomassa disponível e encerrado o evento de incêndio na propriedade (Tabela 18).

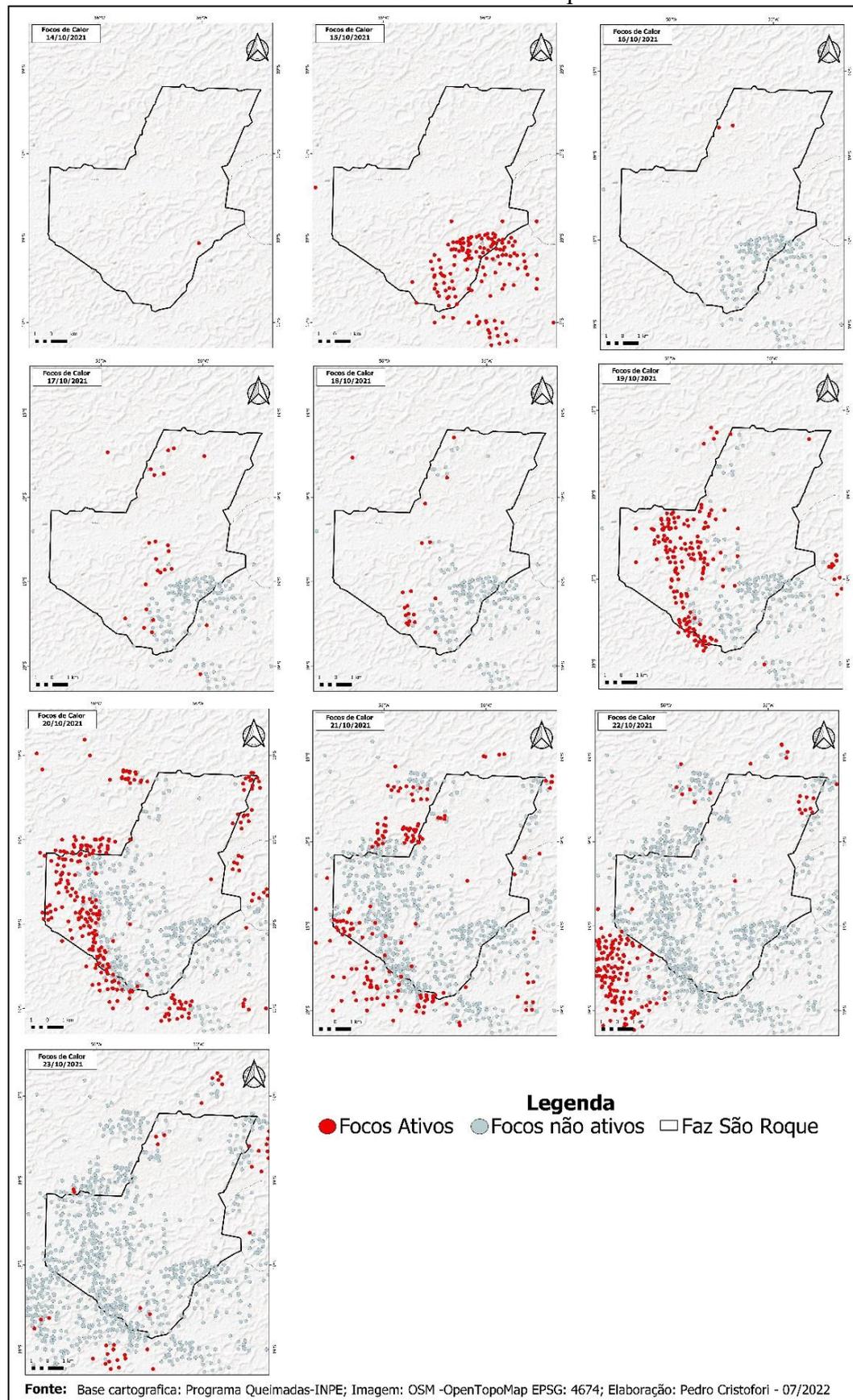
Tabela 18 - Satélites utilizados, Número de focos de calor, Precipitação e *Fire Radiative Power* do dia 21/10/21, 22/10/21 e 23/10/21

Dia	Satélites	Número de Focos	Dias sem chuva	Risco de Fogo - RF	<i>Fire Radiative Power</i> – FRP
21/10/21	AQUA_M-M	3	5	1	6,6 a 10,7
21/10/21	GOES-16	26	5	0,9	-
21/10/21	METOP-B	8	5	1	-
21/10/21	NOAA-18	4	5	1	-
21/10/21	NOAA-20	6	5	1	0,3 a 2,8
21/10/21	NPP-375D	8	5	1	1,3 a 4,6
21/10/21	TERRA_M-M	1	5	0,8	21,5
Total		56			
22/10/21	GOES-16	8	6	0,9	-
22/10/21	NOAA-20	4	6	0,7	3,8 a 5,9
22/10/21	NPP-375	1	6	0,7	9,7
22/10/21	NPP-375D	6	6	0,9	1 a 2,2
Total		19			-
23/10/21	NOAA-20	5	7	1	1,7 a 12,2
Total		5			

Fonte: Autor

A evolução do evento de incêndio florestal ocorrido na fazenda São Roque está representada pelos focos de calor em vermelho e os focos inativos encontram-se em cinza-escuro, sendo focos dos dias anteriores acumulados, considerados inativos, todos estão plotados sobre uma composição de imagem cinza do OSM – *Open Topo Map*, do dia 08 a 23/10/21, para melhor compreensão do evento de incêndio florestal de outubro de 2021 (Figura 29).

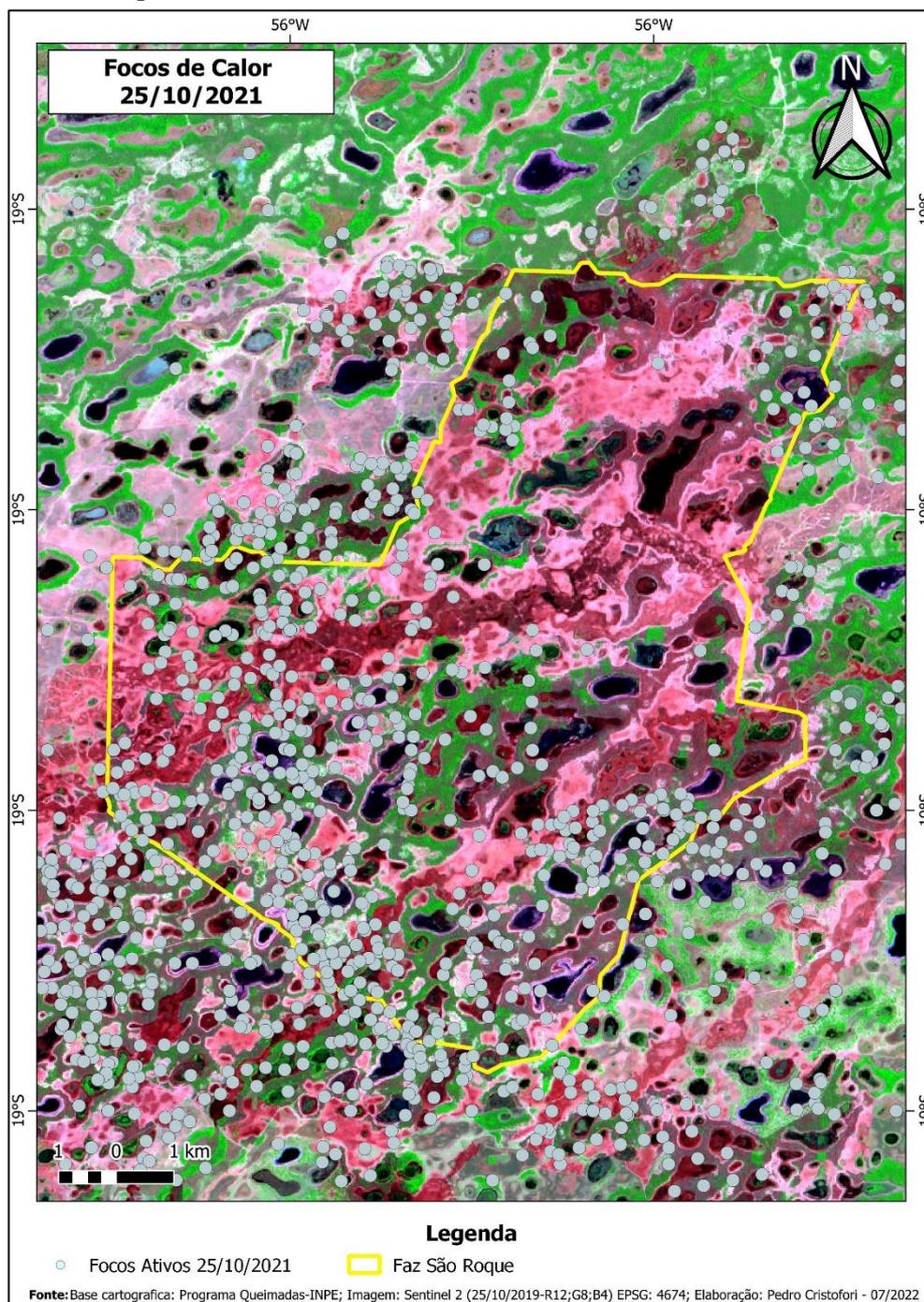
Figura 29 - Mapa da evolução dos focos de calor do evento de incêndio florestal de outubro de 2021 da Fazenda São Roque



Fonte: Autor

Durante o período do incêndio florestal de outubro de 2021, a distribuição espacial de todos os focos de calor detectados e sobreposto à imagem base do pós-fogo do satélite Sentinel-2B com composição de bandas SWIR, Red Edge e Red (12, 8, 4) de 25/10/2021 (Figura 30).

Figura 30 - Mapa de focos de calor do evento de incêndio florestal de outubro de 2021



Fonte: Autor

3.1.3 Severidade dos Incêndios Florestais na fazenda São Roque: Aplicações dos Índices Espectrais NBR e dNBR em 2019 e 2021.

Devido à ocorrência de dois eventos distintos de incêndios florestais na fazenda São Roque, tornou-se necessário realizar uma divisão na área de estudo para uma análise mais aprofundada. A região denominada “Norte” foi afetada pelo fogo em dois momentos distintos, nos anos de 2019 e 2021, enquanto a parte “Sul” enfrentou apenas um evento de incêndio no ano de 2021. Essa divisão permitiu uma análise diferenciada da frequência de incêndios em cada região.

Observou-se que a parte norte apresentou uma frequência de incêndio de aproximadamente 25 meses, equivalente a dois anos e um mês, destacando uma maior exposição dessa área aos eventos de fogo.

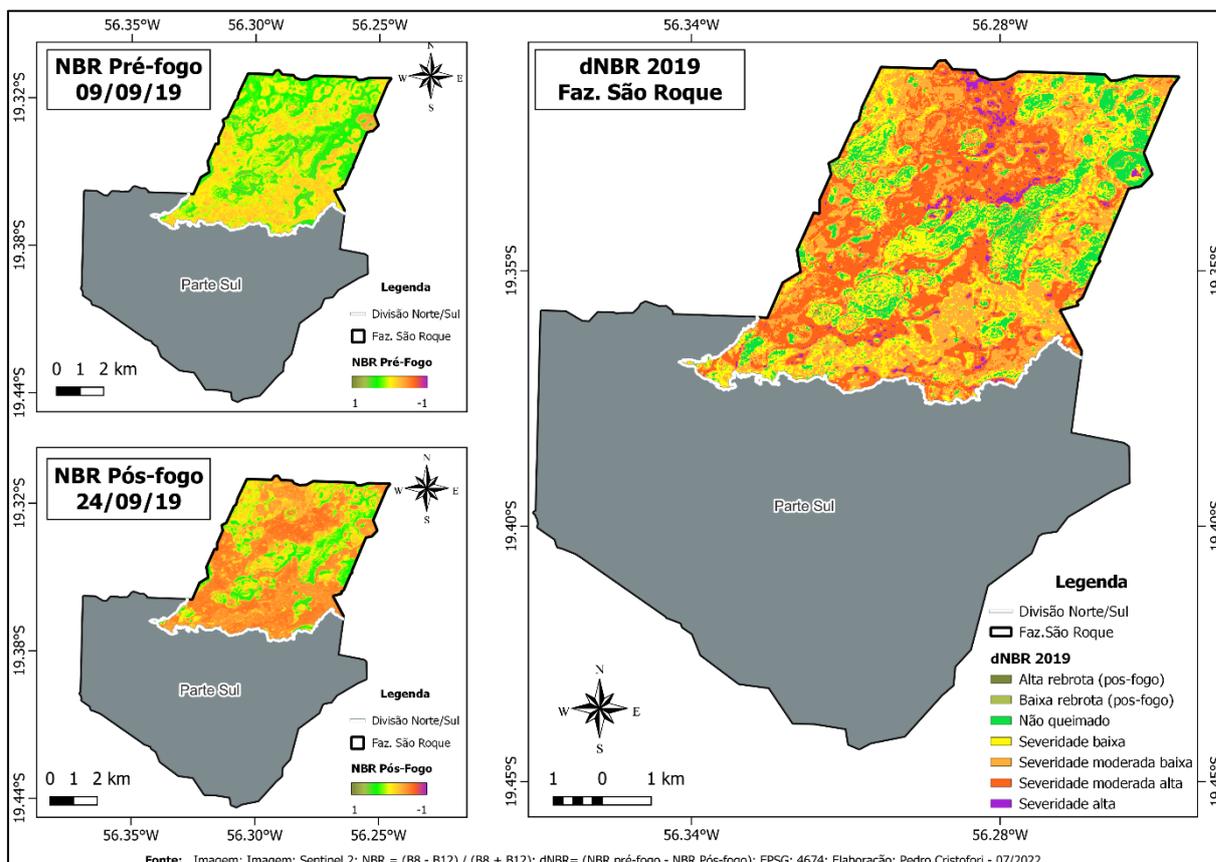
Para a avaliação do impacto dos incêndios na vegetação, utilizou-se o índice espectral *Normalized Burn Ratio* (NBR) em uma cena do satélite Sentinel antes e outra depois do incêndio florestal. Esse índice espectral possibilitou obter a classificação com o *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR), que é a diferença do NBR antes e depois do fogo.

Este produto cartográfico (dNBR) permitiu a identificação visual das áreas mais afetadas pelos incêndios. Também com base no dNBR foram realizados cálculos das classes de severidade, possibilitando uma análise quantitativa dos danos causados à vegetação.

3.1.3.1 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Norte 2019

Os mapas (Figura 31) de *Normalized Burn Ratio* (NBR) pré-fogo e pós-fogo do incêndio florestal ocorrido na parte Norte da fazenda São Roque durante o evento de incêndio florestal de setembro de 2019 e o mapa com a classificação obtida com o *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR) foram utilizados para avaliar o impacto dos incêndios na vegetação arbórea.

Figura 31 - Mapas de NBR e dNBR da parte Norte da fazenda São Roque 2019



Fonte: Autor

Observando os dados dos resultados do cálculo de área das classes de severidade (dNBR) na parte Norte da fazenda São Roque após o evento de incêndio floretal em setembro de 2019. Essa análise nos permitiu compreender a proporção das áreas afetadas em diferentes níveis de severidade de fogo, na propriedade em hectares e porcentagem para cada classe de severidade identificada (Tabela 19).

Tabela 19 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2019 parte Norte

Parte Norte - 2019 – 1º Evento		
Classes	Hectares	%
Não Queimada	577,28	13,51
Queimada	3.695,96	86,49
Total da Área Parte Norte	4.273,24	100
Classes de Severidade		
Severidade Baixa	1.065,40	28,83
Severidade Moderada Baixa	1.347,16	36,45
Severidade Moderada Alta	1.203,72	32,57
Severidade Alta	79,68	2,16
Total Classes de Severidade	3.695,96	100

Fonte: Organizado pelo autor

Os resultados mostraram que a classe de severidade com 3.695,96 hectares (86,49%), a maior área foi a severidade moderada baixa, abrangendo 1.347,16 hectares, o que representa

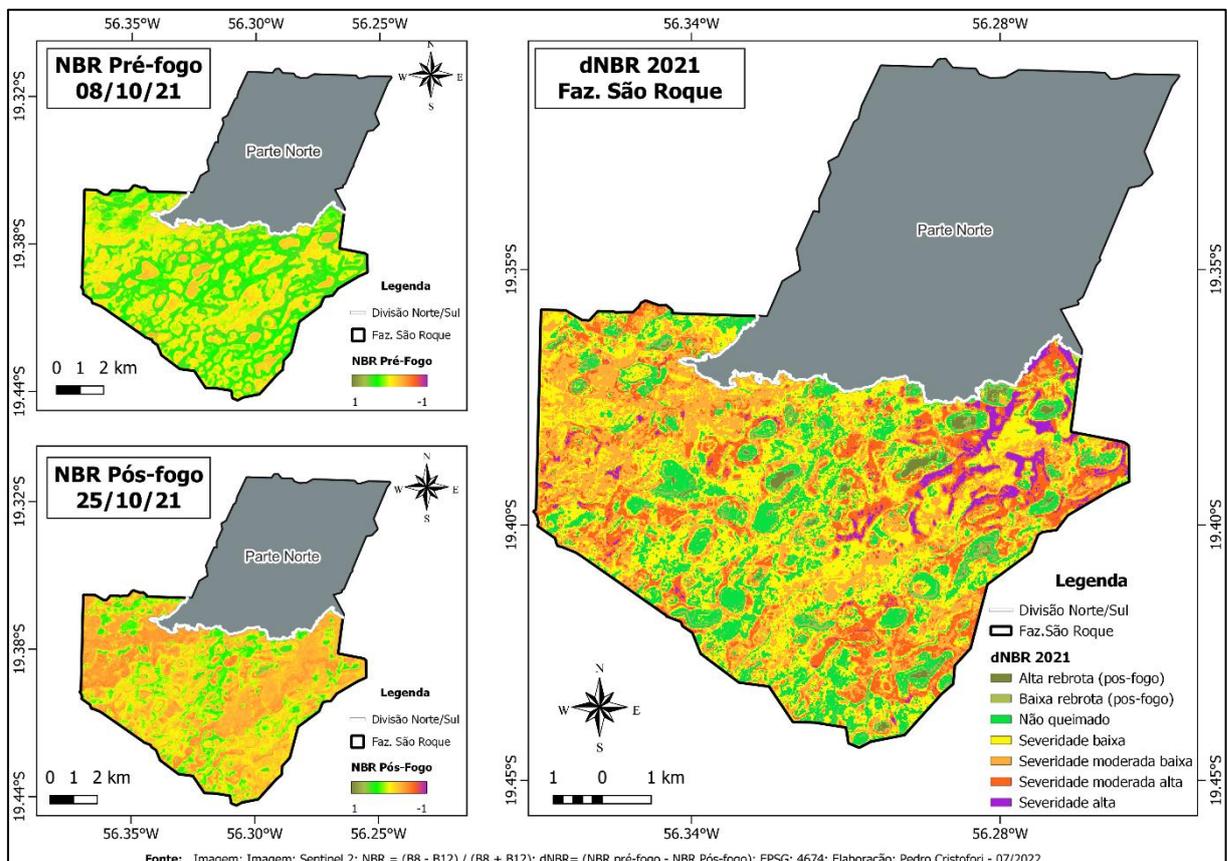
36,45% da área atingida pelo incêndio na parte norte. Em seguida, a classe de severidade moderada alta com 1.203,72 hectares (32,57%), e ainda, a classe de severidade baixa com 1.065,40 hectares (28,83%). Por outro lado, a classe com menor extensão de área é a de severidade alta com 79,68 hectares (2,16%).

Vale ressaltar que a classe de não queimada com área de 577,28 hectares, ou seja, indicando que 13,51%, parte norte não foi afetada pelo incêndio florestal em setembro de 2019.

3.1.3.2 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Sul 2021

Com a análise dos mapas (Figura 32) de *Normalized Burn Ratio* (NBR) pré-fogo e pós-fogo ocorrido na parte Sul da fazenda São Roque durante o evento incêndio florestal de outubro de 2021, e do mapa com a classificação de grau de severidade obtido por meio do *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR) foi possível identificar pelos índices NBR as mudanças na cobertura vegetal, permitindo identificar as áreas mais afetadas pelo incêndio. Já o mapa de classificação com base no dNBR proporcionou uma análise detalhada das diferentes classes de severidade.

Figura 32 - Mapas de NBR e dNBR da parte Sul da fazenda São Roque 2021



Fonte: Autor.

Os resultados do cálculo de área (hectares e porcentagem) das classes de severidade (dNBR) na parte Sul da fazenda São Roque após o evento de incêndio florestal em outubro de 2021, permitiu compreender a proporção das áreas afetadas em diferentes níveis de severidade de fogo (Tabela 20).

Tabela 20 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2021 parte Sul

Parte Sul - 2021 – 1º Evento		
Classes	Hectares	%
Não Queimada	1.524,54	22,17
Queimada	5.351,16	72,83
Total da Área Parte Sul	6.875,70	100
Classes de Severidade	Hectares	%
Severidade Baixa	2.169,50	40,54
Severidade Moderada Baixa	1.938,96	36,23
Severidade Moderada Alta	1.020,20	19,07
Severidade Alta	222,50	4,16
Total Classes de Severidade	5.351,16	100

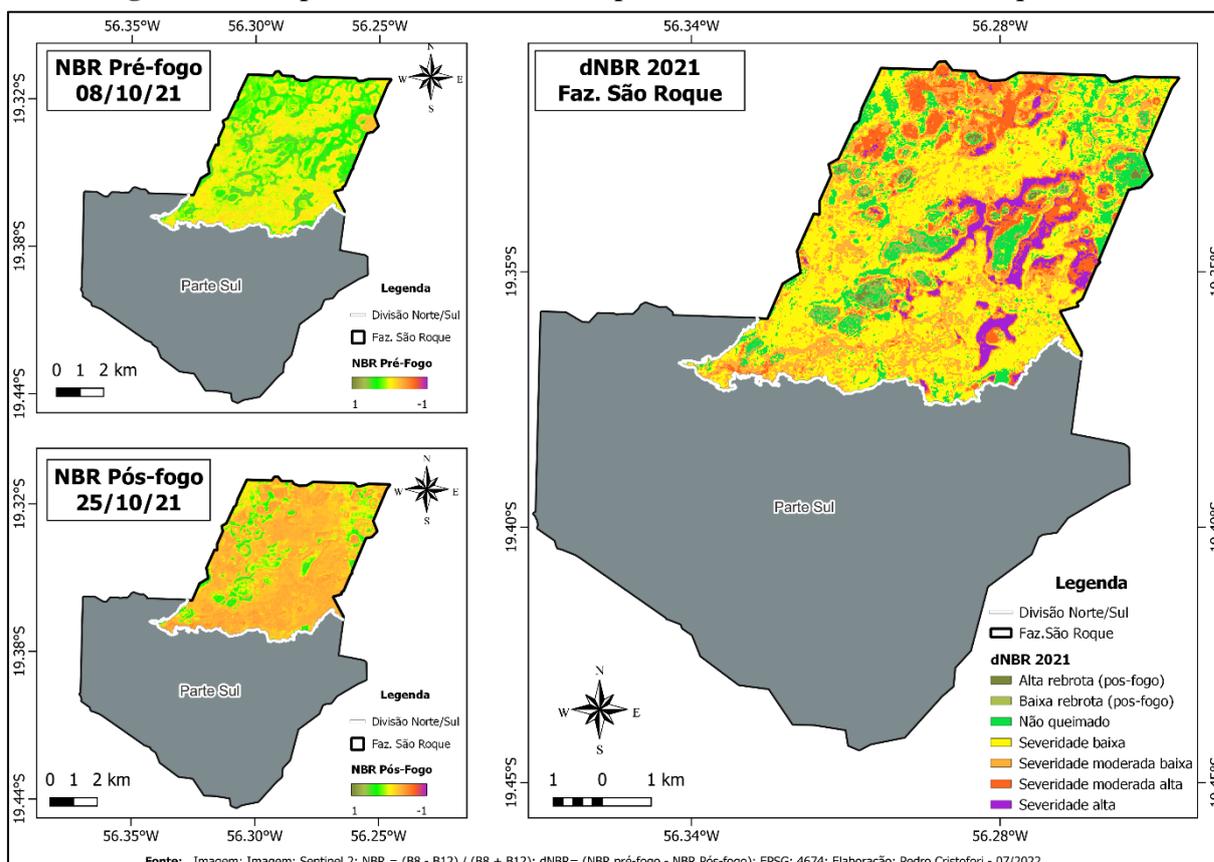
Fonte: Organizado pelo autor

Os resultados das classes de severidade, ou seja, atingiu 5.351.16 hectares (72,83%) a classe com maior é a de severidade baixa, abrangendo 2.169,50 hectares, o que representa 40,54% da área queimada na parte sul, em seguida, a classe de severidade moderada baixa com 1.938,96 hectares (36,23%), e ainda, a classe severidade moderada alta com 1.020,20 hectares (19,07%). No entanto, a classe com menor extensão de área é severidade alta com 222,50 hectares (4,16%). Já a classe de não queimada com 1.524,54 hectares (22,17%).

3.1.3.3 Índices Espectrais NBR e dNBR parte Norte 2021

Os mapas (Figura 33) de *Normalized Burn Ratio* (NBR) pré-fogo e pós-fogo do evento de incêndio florestal ocorrido em outubro de 2021 na parte norte da fazenda São Roque. Esses mapas indicaram os impactos dos dois eventos de incêndios florestal na parte norte da propriedade. O índice NBR possibilitou a detecção das mudanças na cobertura da Terra e permitiu identificar as áreas mais afetadas pelo incêndio. Com base no *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR), foi possível realizar a classificação das diferentes classes de severidade do fogo, proporcionando uma análise detalhada dos danos causados à vegetação após o evento de incêndio florestal recorrente na parte norte da São Roque.

Figura 33 - Mapas de NBR e dNBR da parte Norte da fazenda São Roque 2021



Fonte: Autor (2022).

A partir dos resultados do cálculo de área, em hectares e porcentagem, das classes de severidade (dNBR) na parte norte da fazenda São Roque após o evento de incêndio florestal em outubro de 2021. Essa região foi impactada pelo fogo duas vezes, em setembro de 2019 e outubro de 2021, o que torna essa análise ainda mais relevante para compreender a proporção das áreas afetadas em diferentes níveis de severidade de fogo na parte norte (Tabela 21).

Tabela 21 - Cálculo de área das classes de severidade (dNBR) 2021 parte Norte

Parte Norte - 2021 – 2º Evento		
Classes	Hectares	%
Não Queimada	641,22	15,01
Queimada	3.632,02	84,99
Total da Área Parte Norte	4.273,24	100
Classes de Severidade		
Severidade Baixa	1.940,00	53,41
Severidade Moderada Baixa	1.001,09	27,56
Severidade Moderada Alta	475,00	13,08
Severidade Alta	215,93	5,95
Total Classes de Severidade	3.632,02	100

Fonte: Organizado pelo autor

Os resultados da classe de severidade com 3.632,02 hectares (84,99%) na área da parte norte evidenciaram que a classe com a maior área atingida pelo incêndio foi a classe de

severidade baixa, com 1.940,00 hectares, o que representa 53,41% da área total. Em seguida, apareceu a classe de severidade moderada baixa com 1.001,09 hectares (27,56%), depois, e ainda a classe de severidade moderada alta com 475,00 hectares (13,08%). Novamente, a classe com menor extensão de área foi severidade alta com 215,93 hectares (5,95%). E por fim a classe de não queimada com 641,22 hectares (15,01%).

3.1.4 Acompanhamento do NDVI da Vegetação Arbórea pré e pós evento de Incêndio Florestal

A análise foi realizada com base índices de NDVI, um indicador que mede o vigor da vegetação e a biomassa, além disso, o NDVI é utilizado para avaliar o estresse hídrico presente nas áreas vegetadas. Após a tabulação dos dados, foi realizado o fatiamento da vegetação arbórea pela severidade do incêndio (dNBR), em seguida, foi realizado a separação da parte norte (atingida pelos eventos de 2019 e 2021) e parte sul (atingida pelo evento de 2021) foram separadas para análise para serem analisadas dentro do recorte temporal de 2019 a 2022 por meio do NDVI.

Os eventos de incêndio florestais ocorreram em dois períodos distintos, o primeiro evento de incêndio ocorreu no período de 15 a 23/09/2019 na parte norte da fazenda São Roque, enquanto o segundo incêndio do dia 14 a 23/10/2021 atingiu toda a propriedade, assim temos três situações na análise de resiliência da biomassa da vegetação arbórea a partir de índices de NDVI:

- 2019 – Norte: um evento de incêndio florestal com análise do período de 24 meses, sendo 9 meses pré-fogo e 15 meses pós-fogo.
- 2021 – Sul: um evento de incêndio florestal com análise do período de 24 meses, sendo 10 meses pré-fogo e 14 meses pós-fogo;
- 2021 – Norte: um evento de incêndio florestal com análise do período de 24 meses, sendo 10 meses pré-fogo e 14 meses pós-fogo, neste caso uma reincidência do evento de incêndio florestal na mesma área num intervalo de 2 anos (2019).

3.1.4.1 Evento de Incêndio Florestal 2019 – Parte Norte

A área atingida pelo evento de incêndio florestal em setembro de 2019 na fazenda São Roque corresponde a 38,3 % da área da propriedade, foi possível individualizar e quantificar as classes fitofisionômica da paisagem da área em questão (Tabela 22).

Tabela 22 - Classes da fitofisionomia da paisagem da parte norte da fazenda São Roque

Parte Norte		
Classes	ha	%
Vegetação Arbórea	1.084,60	25,40
Vegetação Campestre	2.388,80	55,90
Solo Exposto / Gramínea	554,60	12,98
Água	245,24	5,74
TOTAL	4.273,24	100

Fonte: autor

A classe selecionada para análise neste trabalho corresponde a vegetação arbórea, que formam as cordilheiras no pantanal da Nhecolândia, e por meio dos resultados obtidos a partir da aplicação dos processamentos nas imagens de satélite foi possível quantificar os índices de NDVI durante o período de janeiro de 2019 a dezembro de 2020, ou seja, da biomassa, e ainda identificar e quantificar as classes de severidade da vegetação arbórea ao longo do período, fato esse, que a referência das classes de severidade foram calculadas a partir dos dados da imagem de satélite pré-fogo (09/09/2019 e pós-fogo (24/09/2019) nas áreas de vegetação arbórea atingidas (Tabela 23).

Tabela 23 - Grau de severidade da classe da vegetação arbórea (dNBR) 09/2019 parte Norte

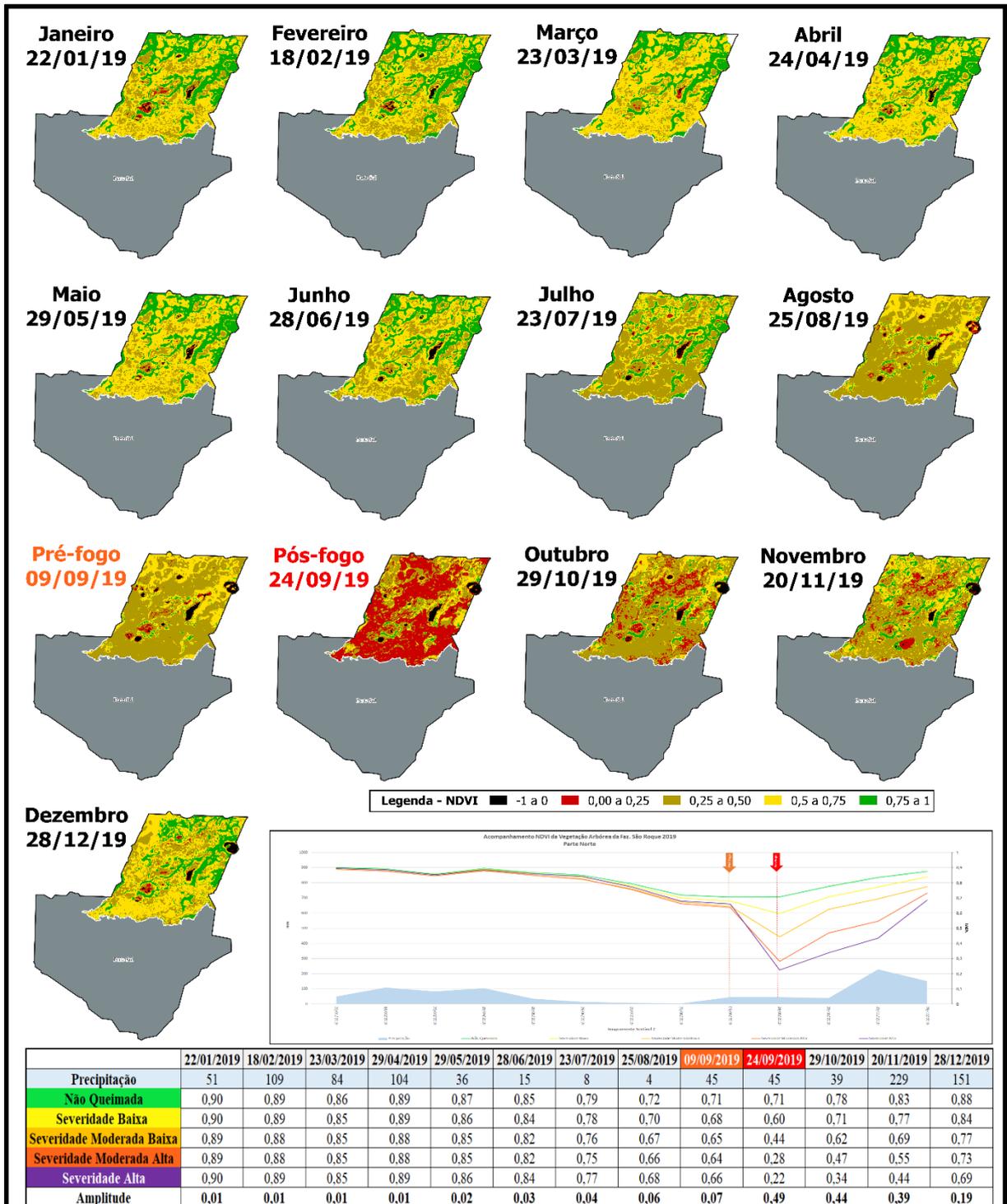
Parte Norte - 2019 – 1º Evento		
Classes	Hectares	%
Não Queimada	213,28	19,66
Queimada	871,32	80,34
Total da Área Parte Norte	1084,60	100
Classes de Severidade		
Severidade Baixa	336,92	38,67
Severidade Moderada Baixa	254,72	29,23
Severidade Moderada Alta	233,12	26,75
Severidade Alta	46,56	5,34
Total Classes de Severidade	871,32	100,00

Fonte: Organizado pelo autor

A partir dos dados (Tabela 23) podemos observar que as classes de severidade dominantes pós-fogo foram a de severidade baixa com 38,67% e de severidade moderada baixa 29,23% da área atingida pelo evento de incêndio florestal. Enquanto as classes de severidade moderada alta 26,75% e severidade alta de 5,34%, assim a área atingida por algum grau de severidade foi de 80,34%.

Ao analisar os dados NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2019 (Figura 34), a resposta da biomassa entre o período de janeiro a setembro de 2019 pré-fogo, os índices de NDVI variaram de 0,90 a 0,66, nos 5 primeiros meses do período úmido a amplitude entre as classes de severidade refletiu a diversidade da vegetação arbórea que ficou em 0,01. Já os meses subsequentes, no período seco oscilaram de 0,03 a 0,07.

Figura 34 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2019.

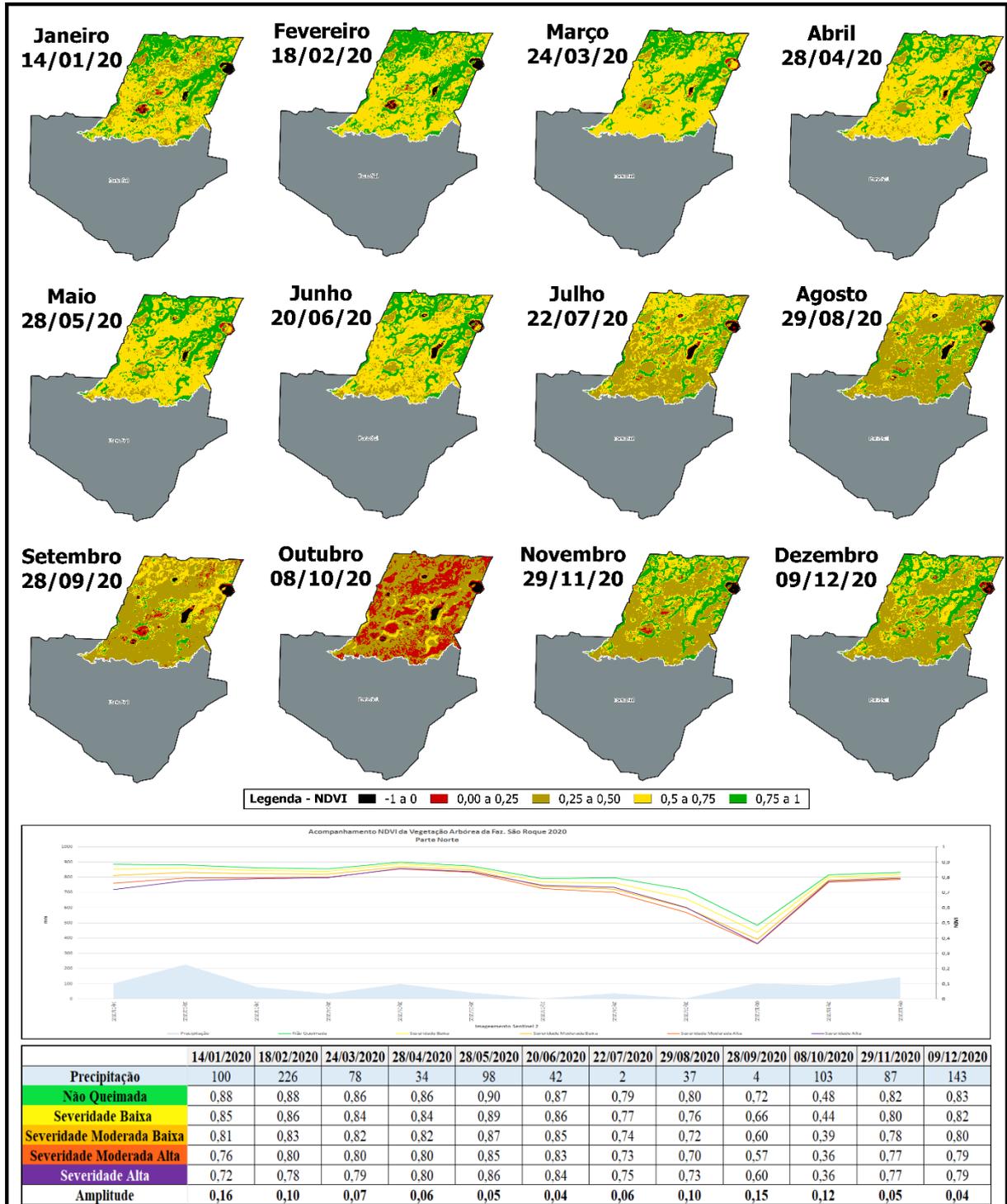


Fonte: Autor

Outro resultado é a variação dos índices NDVI nas classes de severidade na imagem pré-fogo (09/09/20219), que variaram de 0,71 a 0,64, com uma amplitude de 0,07, nas classes de severidade, refletindo o teor da biomassa. Da mesma forma, os índices de NDVI processados da imagem pós-fogo (24/09/2019) apresentaram uma queda brusca de biomassa com variação de 0,71 a 0,22, com amplitude de 0,49, nos índices de NDVI. Essa amplitude de 0,49

possibilitou a diferenciação das classes de severidade, sendo um resultado de referência para as análises (Figura 35).

Figura 35 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2020



Fonte: Autor

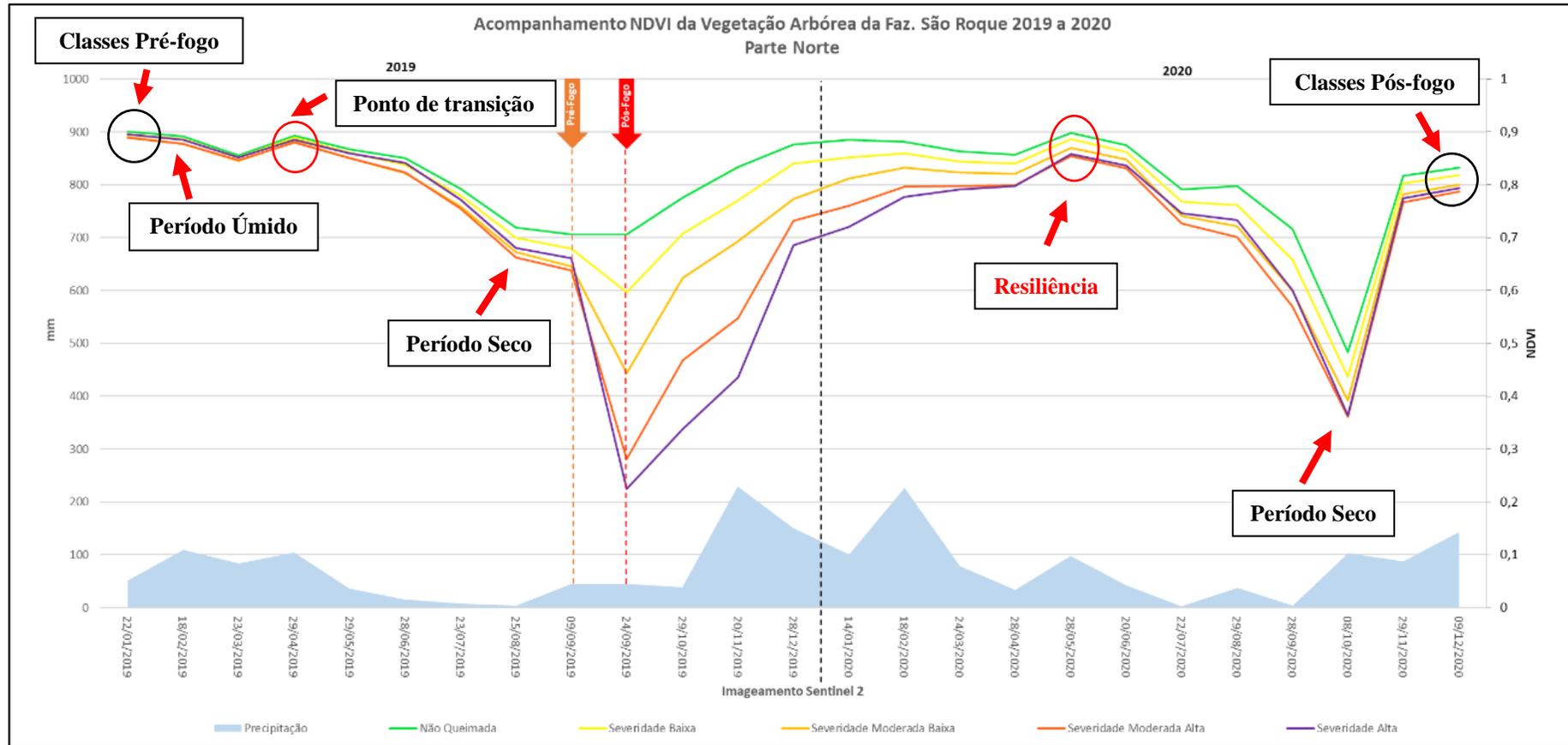
O conjunto de dados pós-fogo (Figura 36) apesentou a evolução da biomassa, que fica evidenciada nos meses 11 e 12/2019, atingindo o índice de 0,88 na classe de vegetação não queimada, já a classe de severidade alta atingiu o índice de 0,69 NDVI, mantendo ainda

amplitude elevada de 0,19 entre as classes, assim a resiliência nos 2 primeiros meses pós-fogo evidencia uma redução na amplitude das classes de 0,49 para 0,19.

Na sequência dos dados dos índices de NDVI da biomassa, a classe não queimada atingiu um patamar de estabilidade, ou seja, manteve os níveis da vegetação do período pré-fogo, apenas a classe de severidade alta não acompanhou os mesmos índices, assim, delimitou a amplitude entre as classes no patamar de 0,06.

No entanto a resiliência da vegetação identificadas nas classes de severidade, no evento de incêndio florestal 09/2019, atingiu o ápice de biomassa no mês 05/2020 com 0,05 de amplitude entre classes, que se assemelha com a amplitude do período pré-fogo do mesmo mês em 2019 que a amplitude era de 0,2 o índice NDVI. Ressalta-se ainda, que a resiliência apresentou a retomada da “normalidade” após 8 meses do pós-fogo, porém apresentou um incremento na amplitude entre as classes de severidade, passando de 0,02 para 0,05 o índice de NDVI (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2019 e 2020.



Fonte: Autor

3.1.4.2 Evento de Incêndio Florestal 2021 – Parte Sul

Em outubro de 2021 ocorreu outro evento de incêndio florestal na fazenda São Roque, no entanto desta vez atingiu toda a área da propriedade, devido a reincidência do evento de incêndio florestal na parte Norte foi necessário analisar os dados separadamente, ou seja, parte sul apenas um evento de incêndio florestal e a parte norte com dois eventos de incêndio florestal num intervalo de dois anos.

A parte sul da propriedade que sofreu apenas o evento de incêndio florestal em 10/2021 corresponde a 61,67% da área da fazenda São Roque, da mesma forma que na parte norte da propriedade foi individualizado e quantificado a fisionomia da paisagem da área em questão (Tabela 24).

Tabela 24 - Classes da fitofisionomia da paisagem da parte sul da fazenda São Roque

Parte Sul		
Classes	ha	%
Vegetação Arbórea	2.477,84	36,04
Vegetação Campestre	2.796,44	40,67
Solo Exposto / Gramínea	994,52	14,46
Água	606,92	8,83
TOTAL	6.875,70	100

Fonte: Autor

A partir das imagens de satélite selecionadas do período de janeiro de 2021 a dezembro de 2022, da parte sul da fazenda São Roque, foi possível extrair os dados de referência, dos índices de NDVI e das classes de severidade, a partir do evento de incêndio florestal utilizando as imagens de satélite pré-fogo (08/10/2021) e pós-fogo (25/10/2021) da classe de vegetação arbórea atingida pelo fogo (Tabela 25).

Tabela 25 - Grau de Severidade da Classe da Vegetação Arbórea (dNBR) 10/2021 parte Sul

Parte Sul - 2021 – 1º Evento		
Classes	Hectares	%
Não Queimada	351,84	14,20
Queimada	2.126,00	85,80
Total da Área Parte Sul	2.477,84	100
Classes de Severidade		
Severidade Baixa	708,28	33,32
Severidade Moderada Baixa	624,92	29,39
Severidade Moderada Alta	605,76	28,49
Severidade Alta	187,04	8,80
Total Classes de Severidade	2.126,00	100

Fonte: Organizado pelo autor

As classes de severidade (Tabela 25) individualizadas a partir do processamento das imagens de satélite da parte sul com apenas um evento de incêndio florestal somaram 2.126,00 hectares (85,80%), as classes severidade intermediárias (severidade baixa e severidade moderada baixa) atingiram 62,71% da área analisada, entretanto 37,29% da área atingiu o patamar das classes de maior severidade (severidade moderada alta com 28,49% e severidade alta com 8,80%) e apenas 14,20% da área não foi atingida pelo evento de incêndio florestal.

Os dados dos índices NDVI de 2021 da parte sul da fazenda São Roque resultante do processamento das imagens de satélite revelam o comportamento da biomassa da vegetação arbórea no período de 2021 e 2022 em função das condições climáticas (períodos secos e úmidos) e do evento de incêndio ocorrido.

O primeiro grupo de dados analisados foram do período pré-fogo de janeiro a outubro 2021, neste intervalo de tempo podemos notar que nos 5 primeiros meses (janeiro a maio) a amplitude dos índices de NDVI foi de 0,02, mostrando uma homogeneidade das classes de severidade indicando período úmido, refletido nos dados de precipitação regional que apresentou acúmulo no entorno de 648 mm, enquanto nos últimos 5 meses do período analisado houve um aumento gradual da amplitude entre as classes de severidade atingindo 0,08 que indica um “stress hídrico” da vegetação, ou seja, período seco, com 199 mm de precipitação regional acumulada no período. Dessa forma, observou-se um ponto de transição no acompanhamento dos índices de NDVI (biomassa) entre as estações úmida e seca, ou seja, quando as precipitações locais deixam de influenciar a vegetação na estação úmida e a vegetação ainda não sofreu a influência do estresse hídrico da estação seca, caracterizando o climax da vegetação onde é possível observar a resiliência (Figura 36).

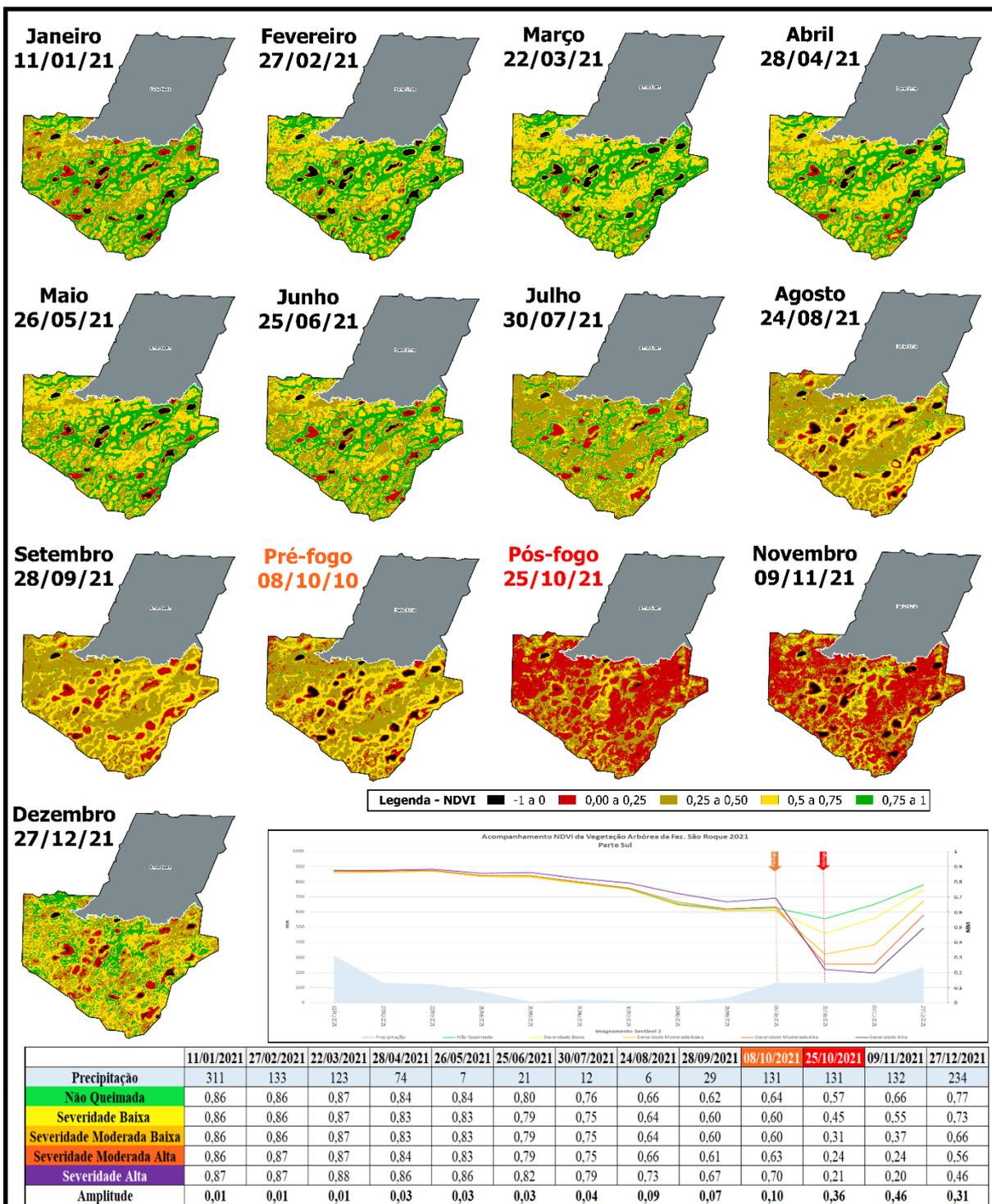
Os dados dos índices de NDVI relacionado diretamente ao evento de incêndio, ou seja, da imagem do pré-fogo com valores 0,69 a 0,61, com uma amplitude 0,08 entre as classes de severidade. Já na imagem pós-fogo os índices de NDVI encontrados foram 0,55 a 0,22, com amplitude entre as classes de 0,33 (Figura 36).

Fato a destacar ainda que a imagem analisada 15 dias após o evento de incêndio florestal, a vegetação arbórea continua a sofrer com o efeito da severidade do fogo, apesar do incremento no índice máximo do NDVI de 0,55 para 0,65, mas a amplitude entre as classes aumentou significativamente para o patamar de 0,33 para 0,45 e o índice mínimo da classe na ordem de 0,20 (Figura 36).

A retomada da biomassa aparece no período dos meses 12/2021 e 01/2022 com uma

evidência de ganho de biomassa abrupta refletida nos índices superiores de 0,78 e 0,79 e uma elevação do índice mínimo para os patamares 0,49 e 0,61 respectivamente, e conseqüentemente uma redução da amplitude dos índices de NDVI de 0,29 para 0,18, e ainda pode-se notar aumento da precipitação regional com média mensal de aproximadamente 183 mm de chuva (Figura 36 e 37).

Figura 36 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2021.

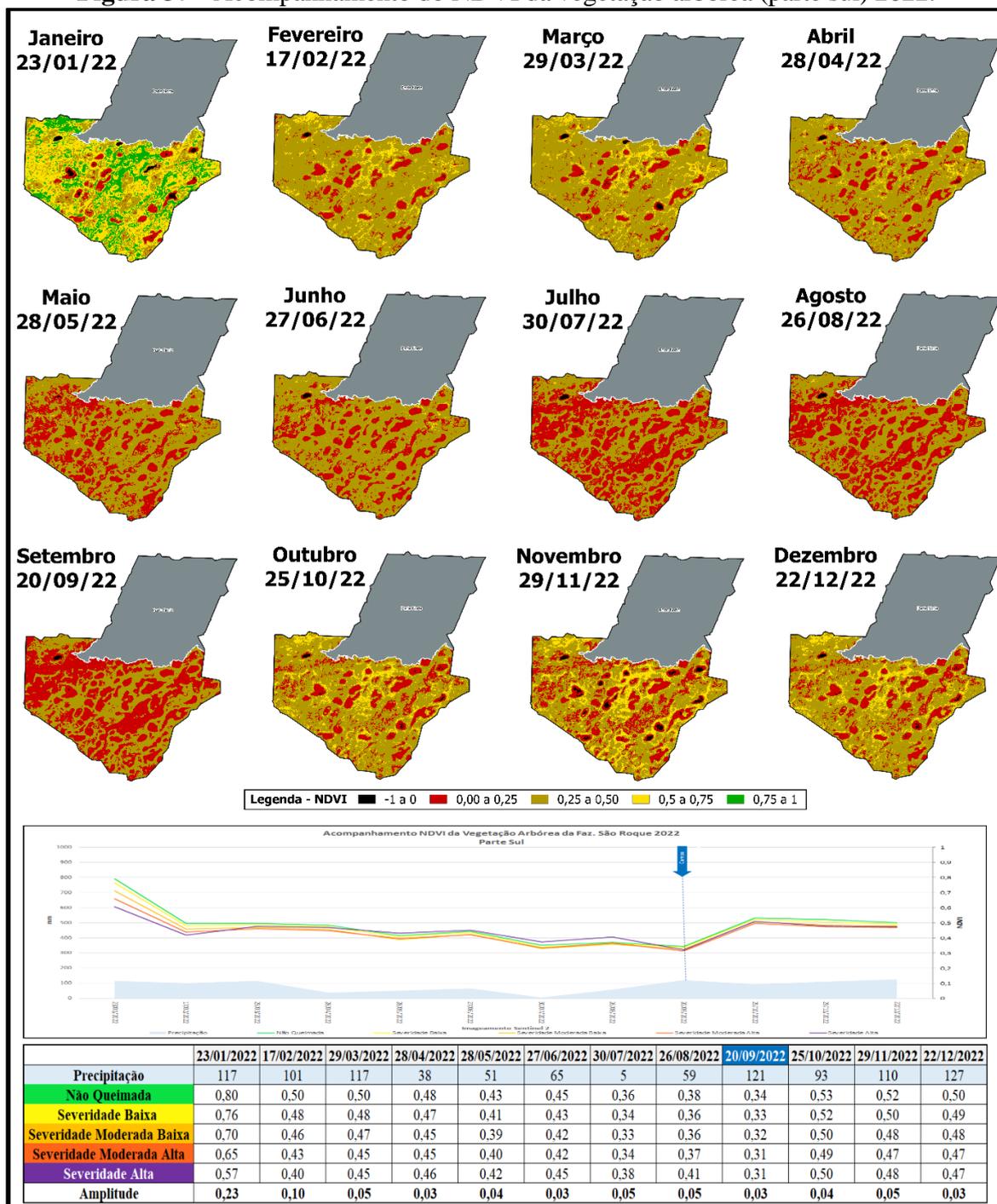


Fonte: Autor

A partir do mês 04/2022, ou seja, 6 meses após o evento de incêndio florestal a vegetação arbórea atingiu o ápice da resiliência com amplitude entre as classes estabilizada entorno de 0,03 e nos meses subsequentes até 12/2022 mantém entre 0,03 e 0,05 (Figura 37).

Outro dado importante e que o valor máximo do índice NDVI da biomassa a partir março de 2022 até o final do período analisado, dezembro de 2022, a série variou de 0,50 atingindo 0,34 em setembro de 2022 e retornando até o final da série com 0,50 (Figura 36).

Figura 37 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2022.



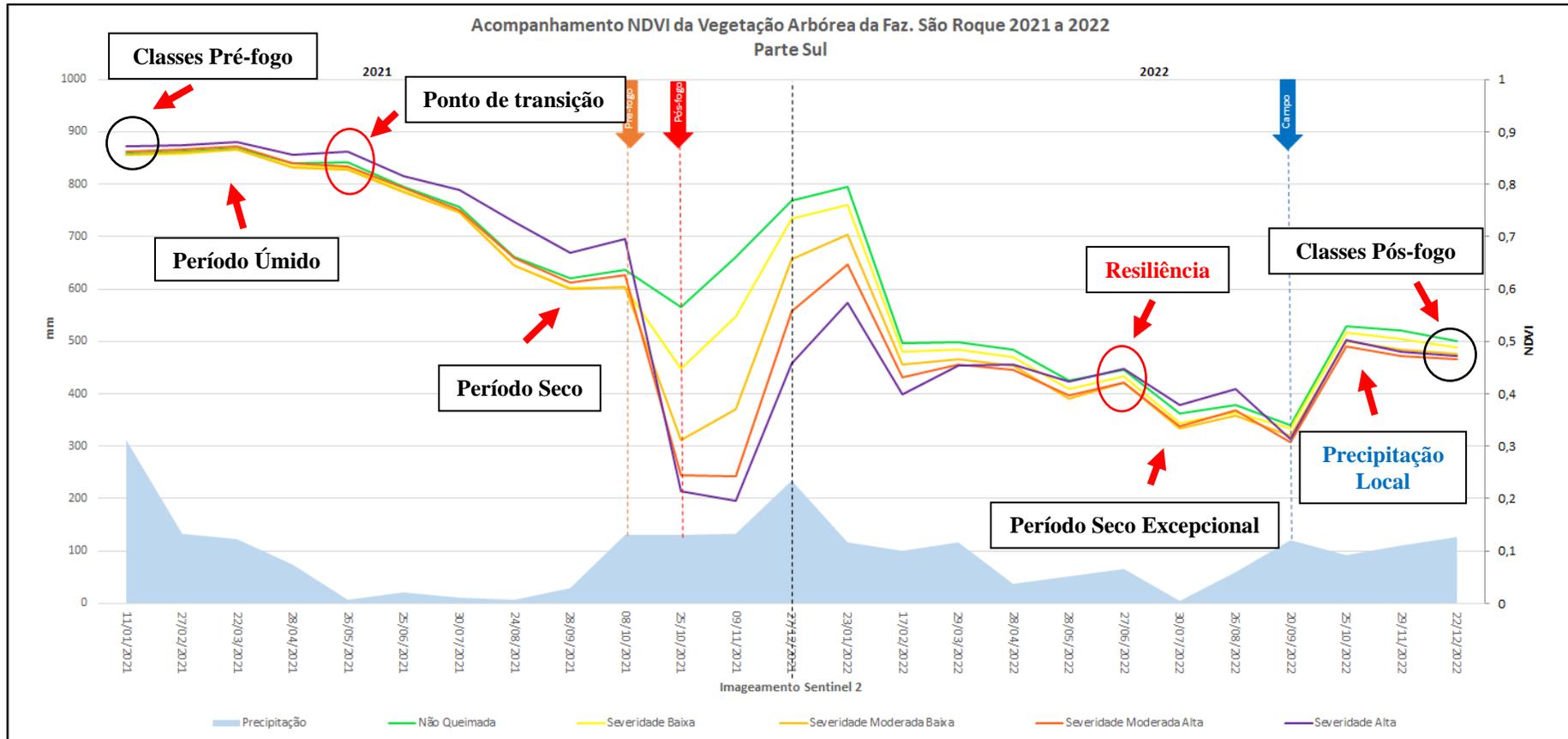
Fonte: Autor

Ao observarmos a classificação do NDVI (Gráfico 4) da biomassa, os dados ressaltam no período pré-fogo janeiro a outubro de 2021, a evolução da biomassa em relação as condições climáticas. Já o período pós-fogo apresentou uma fase crítica no mês de novembro/2021, e uma retomada nos índices nos dois próximo meses subsequentes (dezembro/2021 e Janeiro de 2022), fato que a vegetação perde biomassa a partir do mês de fevereiro a setembro de 2022, mantendo a amplitude das classes entre 0,03 e 0,05, provavelmente de seca excepcional, já no mês de outubro/2022 a uma retomada no índice máximo de NDVI, de 0,34 para 0,53 e da mesma forma acompanha o índice mínimo de NDVI 0,31 para 0,50, após evento de chuvas de 246 mm acumulado de chuvas na fazenda São Roque (SANTOS, 2022).

Vale ressaltar que o comportamento das classes identificadas pela classificação por NDVI, a amplitude fica no entorno 0,01, enquanto após resiliência da vegetação no período do pós-fogo a amplitude medias dos índices NDVI das classes ficam entorno de 0,04.

Outros dados importantes foram os índices de NDVI mais elevados no período pré-fogo (Gráfico 4) representado pela classe severidade alta (pós-fogo), ou seja, a classe com os maiores índices de NDVI pré-fogo, antes do evento de incêndio, sendo a classe que mais sofreu no pós-fogo com estabilização da biomassa após 8 meses, ou seja, no mês de 06/2022.

Gráfico 4: Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte sul) 2021 e 2022.



Fonte: Autor

3.1.4.3 Evento de Incêndio Florestal 2021 – Parte Norte

A análise na parte norte da fazenda São Roque a partir de 2021, onde a área propriedade sofreu o segundo evento de incêndio florestal em um intervalo de 2 anos (setembro de 2019 e outubro de 2021) ocorreu da mesma forma que a análise empregada na parte sul (outubro de 2021), sendo para a parte norte com o segundo evento de incêndio florestal (outubro de 2021) necessário também individualizar as classes de severidade da área com o auxílio das imagens de satélite pré-fogo (08/10/2021) e pós-fogo (25/10/2021) da classe de vegetação arbórea atingida pelo fogo (Tabela 26).

Tabela 26: Classes de Severidade da vegetação arbórea da parte norte (09/2019 e 10/2021) da fazenda São Roque.

Classes	Parte Norte			
	2019 – 1º Evento		2021 – 2º Evento	
	ha	%	ha	%
Não Queimada	213,28	19,66	180,72	16,66
Queimada	871,32	80,34	903,88	83,34
Total da Área Parte Norte	1084,60	100	1084,60	100
Classes de Severidade				
Severidade Baixa	336,92	38,67	273,72	30,28
Severidade Moderada Baixa	254,72	29,23	181,88	20,12
Severidade Moderada Alta	233,12	26,75	259,96	28,76
Severidade Alta	46,56	5,34	188,32	20,83
Total Classes de Severidade	871,32	100	903,88	100

Fonte: Organizado pelo autor

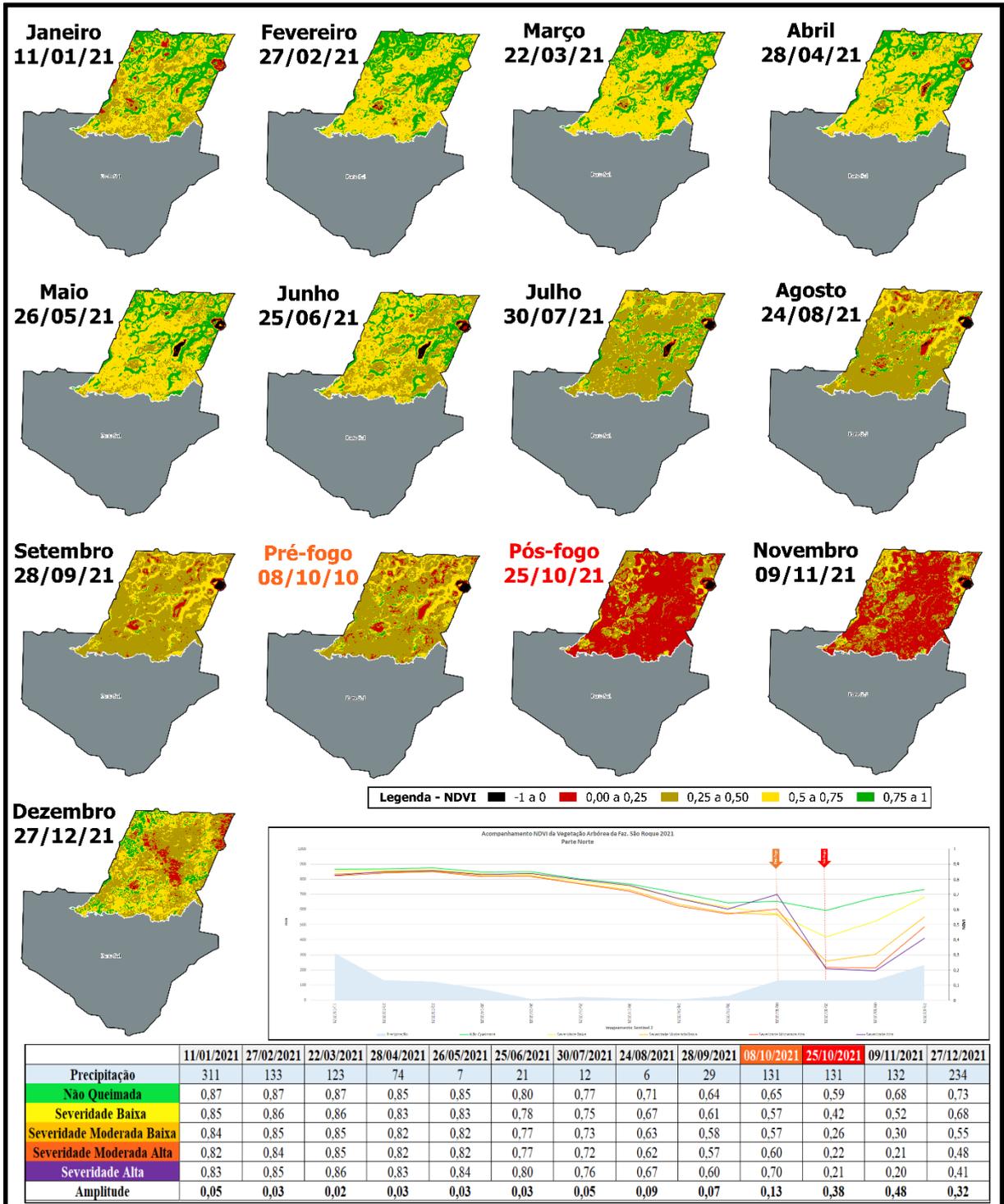
O segundo evento de incêndio florestal (10/2021) na parte norte da fazenda São Roque evidenciou uma ação de grande porte na vegetação arbórea só a classe de severidade alta atingiu 20,83% da vegetação enquanto as apenas 16,66% resistiu a ação do fogo, que está representada pela classe não queimada (Tabela 26). As classes de severidade baixa com 30,28% e de severidade moderada baixa 20,12%, perfazendo 50,40% da área afetada pelo incêndio, e ainda, a classes de severidade moderada alta 28,76%, severidade alta 20,83%, desta forma, aumentando substancialmente as áreas mais castigada pela incidência do segundo evento de incêndio florestal com 49,59%.

A comparação dos dados da parte norte nos eventos de incêndio florestal (09/2019 e 10/2021), apontam para uma queda nas classes de severidade (severidade baixa e severidade moderada baixa) de 17,50% no pós-fogo outubro de 2021, sendo transferida para as áreas das classes (severidade moderada alta e severidade alta) perfazendo 49,59% da vegetação arbórea mais atingida pelo incêndio (Tabela 26).

O comportamento dos índices de NDVI na parte norte (Figura 37) no período de

janeiro de 2021 a abril de 2021 (pré-fogo) revelou que a amplitude entre as classes de severidade estava entre 0,01 e 0,02, e enquanto a amplitude da mesma vegetação arbórea na parte sul no mesmo período, sem eventos de incendio florestal nos últimos anos, apresentou uma amplitude entre 0,03 e 0,04 entre as classes de severidade (Figura 36, pg 90).

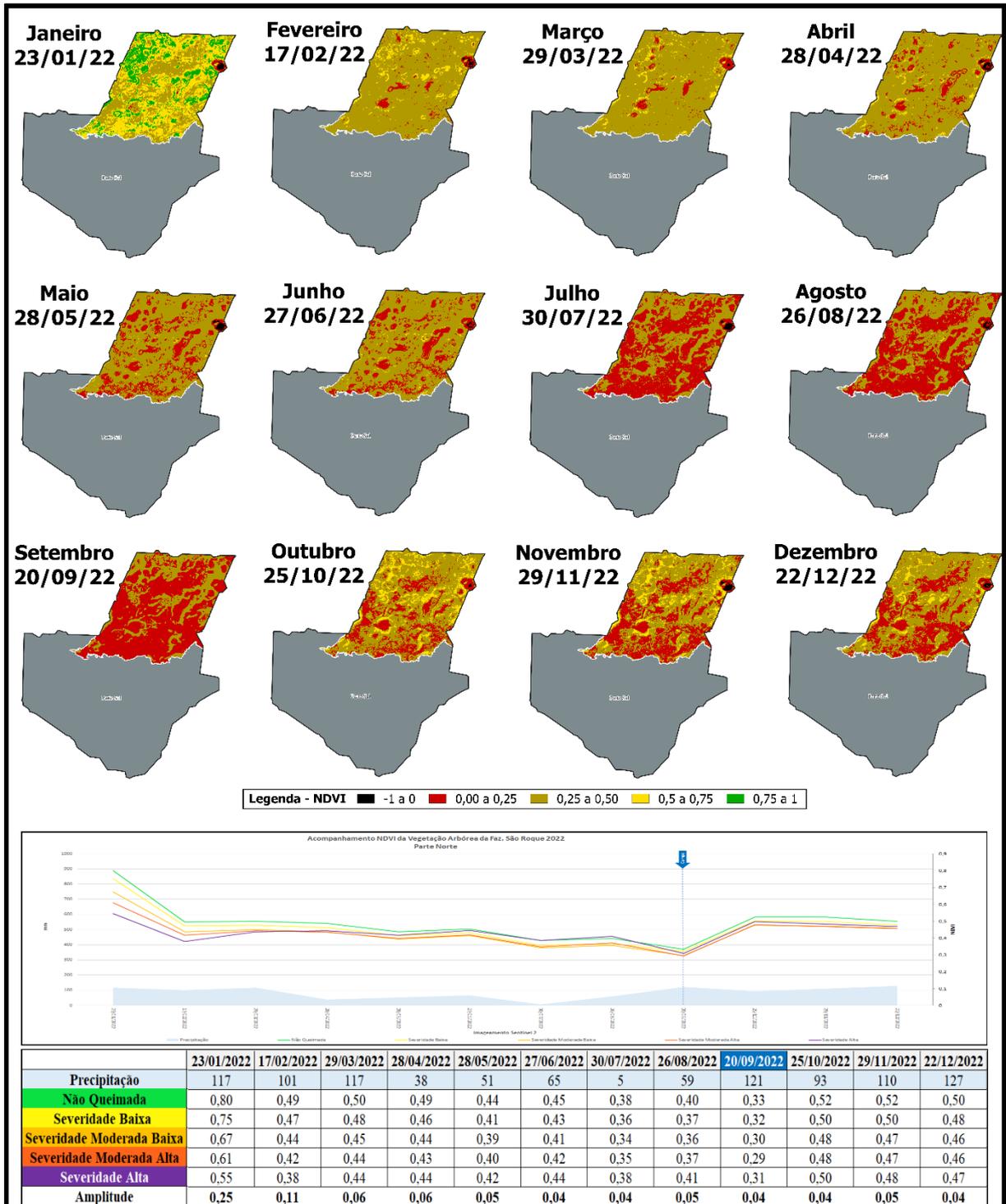
Figura 38 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2021.



Fonte: Autor

Já na imagem de 23/01/2022 os dados NDVI apresentaram índices máximo de 0,80 e mínimo de 0,55, mantendo ainda a amplitude entre os índices elevadas, na ordem de 0,25 entre as classes (Figura 39).

Figura 39 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2022.



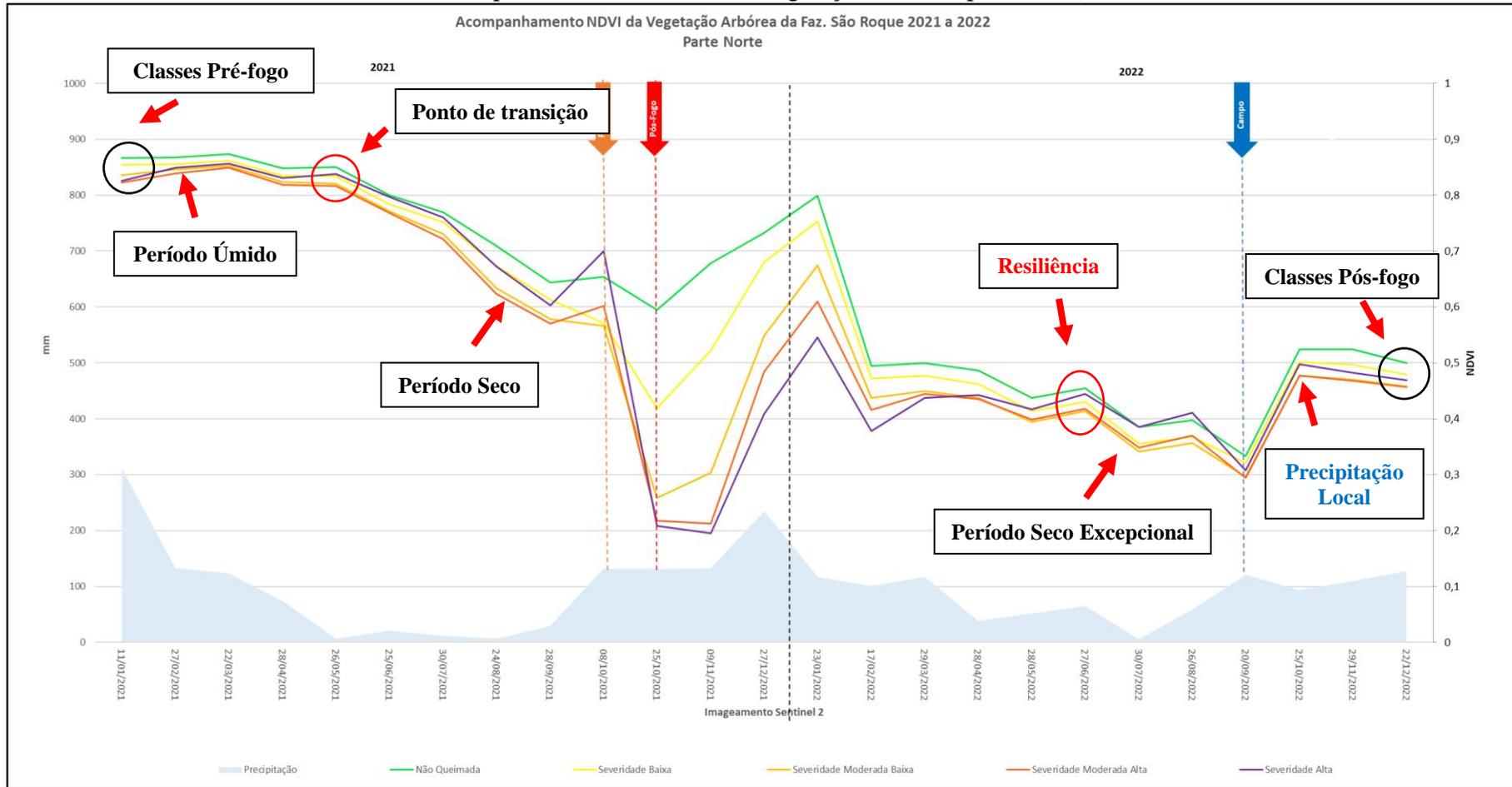
Fonte: Autor

No entanto, a partir do mês de fevereiro de 2022, observou-se uma forte redução nos índices de NDVI, ou seja, na biomassa da vegetação arbórea, de 0,80 em janeiro de 2022 para 0,49 no mês de fevereiro 2022, outro dado importante a ressaltar é a diminuição abrupta na amplitude entre classes de severidades de 0,25 para 0,11 (Figura 39).

Já no mês de junho de 2022, 8 meses após o evento de incêndio florestal a vegetação arbórea atinge a resiliência com a amplitude de 0,04 entre as classes, nos demais meses mantendo a amplitude 0,04 e 0,05 (Figura 39).

No ano de 2022, aparentemente, os dados mostram um ano extremamente seco, cuja queda dos índices máximo de biomassa de 0,80 em janeiro/2022 para 0,49, já em fevereiro/2022 acentua-se a partir do mês de julho 0,38, atingindo o menor índice 0,33 no mês de setembro/2022, configurando um período de seca excepcional. Já a partir de outubro/2022 a biomassa retorna ao nível de fevereiro de 2022, após acúmulo de chuvas locais na ordem de 246 mm na área atingida pelo evento de incêndio florestal, mesmo assim a amplitude entre as classes se mantiveram entre 0,04 e 0,06 (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte norte) 2021 e 2022.



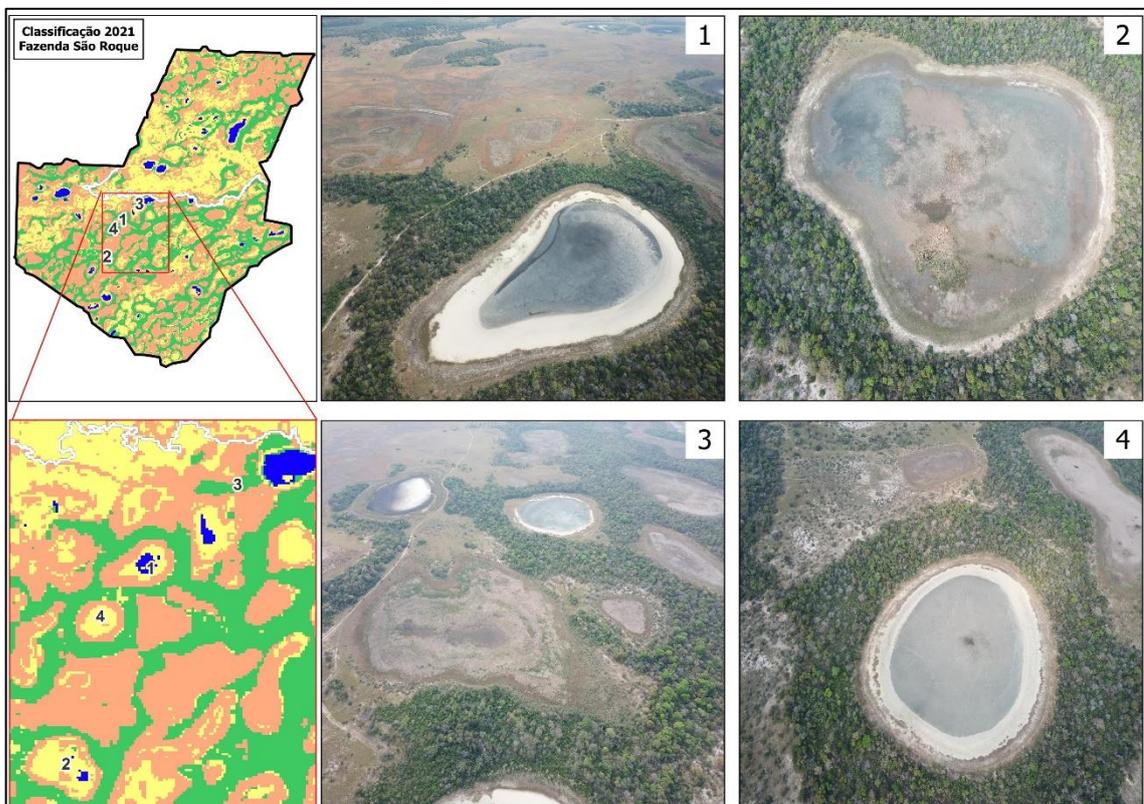
Fonte: Autor

3.1.5 Evolução da Resiliência da Vegetação Arbórea Validada no Campo de 2022

Para validar as análises do comportamento dos dados espectrais das imagens de satélites utilizadas neste estudo, efetuou-se uma missão de campo na fazenda São Roque, no mês de setembro de 2022, com o intuito de verificar *in loco* as respostas das classes das fisionomias da paisagem, bem como, a evolução da fitofisionomia, a cobertura vegetal, por meio de uma sequência de fotografias via drone (RPA), como propósito de auxiliar na produção final dos produtos cartográficos resultantes de técnicas de sensoriamento remoto, os índices NBR, dNBR e NDVI e a classificação supervisionada.

A execução desses procedimentos demandou a seleção estratégica de pontos amostrais em diferentes áreas representativas das classes, a partir das chaves de interpretação, localizadas em campo por intermédio do GNSS-RTK. É relevante destacar que a seleção da data para a realização da missão de campo foi planejada para coincidir com os registros de imageamento dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, e ainda, combinou com o período seco do Pantanal e também 1 (um) ano após o evento de incêndio florestal de 10/2021 (Figura 40).

Figura 40 - Pontos Analisados na missão de campo setembro de 2022 (fotos RPA).



Fonte: Autor

Os resultados obtidos no campo de setembro de 2022 evidenciaram uma paisagem com cenário de seca extrema, principalmente pela falta de disponibilidade de água superficial. A

classe de Água apresentou pontos de solo úmido e a ausência de água nas lagoas e baías (secas), ou seja, algumas lagoas e baías que ainda conservavam água, limitavam se a porções ínfimas, com uma lâmina d'água de aproximadamente entre 5 e 10 centímetros de altura (Fotos 1 e 2).

Fotos 1 e 2 – Foto (A) vista panorâmica das baías e lagoas e Foto (B) vista parcial de uma lagoa salina quase seca.



Fonte: Autor

O incêndio florestal de outubro de 2021 teve um impacto significativo na área de estudo, causando danos à vegetação arbórea e deixando marcas evidentes de queimada (carvão) nos troncos mesmo após a recuperação das folhas (Fotos 3 e 4).

Fotos 3 e 4 – Foto (A) vegetação Arbórea queimada e árvores queimadas ao fundo e a Foto (B) Palmeira Acuri (*Attalea phalerata*) mortos em primeiro plano e vivos em segundo plano.



Fonte: Autor

A pesar da resiliência da vegetação arbórea, verificou-se a escassez de folhagens nas árvores de características estacional semidecidual. Ademais, as árvores com alturas compreendidas entre 6 e 10 metros, tanto aquelas que margeiam as “cordilheiras” quanto as situadas em seu interior, exibiram sinais de marcas de carvão nos troncos e galhos provenientes da altura das chamas durante o evento de incêndio florestal atingindo as copas das árvores.

Além disso, as árvores de menor estatura apresentaram vestígios de terem sido completamente devastadas pelo fogo, embora algumas destas árvores tenham preservado algumas folhas no incidente de incêndio florestal.

A área da classe vegetação campestre próximas das áreas de “vazantes” por ter maior disponibilidade de água subsuperficial, restabelecem a biomassa de forma mais rápida, porém, devido ao período seco apresentam sua parte aérea seca protegendo a superfície do solo (Foto 5). Já as áreas campestres mais distantes das áreas com influência da umidade do lençol freático, próximas as vegetações arbóreas mais densas (cordilheiras) apresentaram regressão da vegetação rasteira, e conseqüentemente reduziram a sua densidade, e aumentando significativamente as áreas de solo exposto em regiões normalmente ocupada por gramíneas e vegetação herbáceas, tendo em vista que a recuperação da vegetação gramínea é mais rápida (Foto 6).

Fotos 5 e 6 – Fotos (A) vegetação de campo e Foto (B) área de campo com recuo pós incêndio florestal e com solo exposto.



Fonte: Autor

Essas mudanças nas proporções das classes de cobertura da Terra pode ser um reflexo das características climáticas mais secas do ano de 2022, que podem ter influenciado as condições da resiliência da vegetação. Essa informação corrobora principalmente quanto a disponibilidade de água, quase todas as lagoas e baías estavam secas, ou com pouca disponibilidade de água (Foto 1 e 2, pg 100).

3.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As análises dos dados detalhados e apresentados visa contextualizar os resultados obtidos no estudo da resiliência da vegetação arbórea na Fazenda São Roque, localizada no Pantanal da Nhecolândia, após a ocorrência de dois eventos de incêndio florestal.

O conhecimento da fisionomia que compõem a paisagem da fazenda São Roque por meio de investigação utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e também a classificação supervisionada permitiram a identificação, delimitação e quantificação das diferentes fisionomias da paisagem e sua relação com os eventos de fogo, assim como, a distribuição geográfica dos focos de calor na área, que por sua vez, forneceram a evolução dos eventos de incêndios florestais das áreas afetadas. Ademais, com a identificação e quantificação das classes da severidade do incêndio florestal foi possível obter o detalhamento do grau da severidade pela perda de biomassa ocorrida durante os eventos de incêndios florestais (setembro de 2019 e outubro de 2021), bem como a quantificação e acompanhamento da biomassa da vegetação arbórea por meio dos índices de NDVI dentro das diferentes classes de graus severidade, obtidas nas imagens de satélite pós-fogo de cada evento e também acompanhamento da evolução ao longo da série histórica (2019 a 2022).

3.2.1 A Classificação Supervisionada da área da fazenda São Roque

A classificação supervisionada da fisionomia da paisagem na fazenda São Roque evidenciou que a área é representativa da fisionomia e das características da sub-região do Pantanal da Nhecolândia. A supracitada classificação foi fato importante nesta análise, visto que o resultado diferenciou o comportamento dessa paisagem, marcado pela alternância de período úmido e do período seco prolongado. Tal fato foi verificado em 2019 quando a área estava sobre o domínio de ciclo úmido intermediários pós ciclo de inundação expressiva em 2018. Enquanto no ano de 2021 a área atravessou o ciclo de estiagem evidenciando um período de seca prolongada.

Essa constatação ficou evidente nos mapas de classificação supervisada das classes da fisionomia da paisagem (Figuras 20, pg 56), obtidas por meio da classificação supervisionada, com a aplicação das chaves de interpretação (vegetação arbórea, vegetação campestre, solo exposto/gramíneas e água), com a acurácia variando 61 a 99% nas classes, segundo a matriz de confusão.

Outro fato importante nessa parte dos resultados é que a fazenda São Roque por mais de 10 anos não exerce a atividade de pecuária, assim a vegetação com predomínio das

gramíneas prevaleceu “vedada” sem o pastoreio do gado, ou seja, com acúmulo de biomassa seca que representou um combustível para propagação de incêndio florestal, seja de forma natural, como uma ignição de um raio, ou mesmo uma queimada descontrolada.

A fazenda São Roque foi cenário de dois eventos de incêndios florestais em 2019 e 2021. Ambos aconteceram no ápice do período seco. A diferença entre os eventos foi marcada por algumas particularidades, por exemplo, o evento de incêndio florestal de setembro de 2019 atingiu somente a parte norte da propriedade, sendo controlado. Fato este que pode ser compreendido porque o incêndio ocorreu no ápice do período seco, mas o Pantanal da Nhecolândia estava num ciclo intermediário (entre cheia e seca), sendo assim acredita-se que os acúmulos da biomassa, principalmente das gramíneas, mantinham um certo grau de umidade e vigor.

Ressalta-se que o evento de incêndio florestal de outubro de 2021 atingiu toda a propriedade. Neste caso, o incêndio aconteceu de forma rápida, percorrendo toda a extensão da propriedade. Tal evento ocorreu no ápice do período seco, mas o cenário encontrado foi completamente diferente, por ser um período seco prolongado, desta forma, o acúmulo de biomassa era notável e de forma expressiva, assim alimentando as chamas do fogo de forma intensa.

3.2.2 Monitoramento dos Focos de Calor nos Eventos de Incêndios Florestais 2019 e 2021

A partir da análise dos focos de calor dos eventos de incêndios florestais de 2019 e 2021 na fazenda São Roque foi possível reconstruir a direção, evolução e a intensidade do incêndio. Em setembro de 2019 o evento de incêndio florestal atingiu a propriedade pela face norte em direção ao sul, assim, a origem dessa frente do incêndio foi oriunda de outras propriedades adjacentes.

O evento teve duração de 8 dias e uma intensidade média “moderada” registrada pelos dados dos focos de calor no ápice do evento no dia 17/09/2019 com valor de 256,6 FRP - *Fire Radiative Power* e com 236 focos de calor ativos registrados pelos satélites.

Enquanto, o evento de incêndio florestal de outubro de 2021, iniciou-se na porção sudeste da propriedade, a margem de uma lagoa, possivelmente por um raio (Pirajá et al. 2023).

Conforme a duração de 8 dias do evento de incêndio florestal de 2019, esse evento teve uma duração de 10 dias, mas com intensidade alta “forte” conforme os dados de focos de calor no seu ápice que durou dois dias, 19 e 20 de outubro de 2021, com índices com valores máximos

de 388,1 e 287,1 FRP - Fire Radiative Power respectivamente e com registros de 414 focos ativos atingindo toda a área da propriedade (Figura 28, pg 73).

No entanto, os resultados dos dois eventos de incêndios florestais ocorridos na fazenda São Roque em setembro de 2019 e outubro de 2021, apesar da duração em dias serem muito próximas, a partir do monitoramento dos focos de calor pelos satélites, 8 e 10 dias respectivamente, sendo que o incêndio de 2019 apesar de durar 8 dias, só atingiu a parte norte da propriedade, cerca de 38,3%, enquanto o incêndio de 2021 atingiu toda a propriedade em 10 dias, a duração dos dois eventos com períodos quase similares pode ser justificada pelos fatores climáticos da região em 2019, sendo ciclo intermediário (entre cheia e seca) em 2021, período seco prolongado e maior disponibilidade de biomassa seca.

Da mesma forma, foi evidenciado a intensidade dos focos de calor no evento de incêndio florestal de 2021, ou seja, a concentração do calor latente, atingindo índice de FRP de 131,8 a mais que o índice máximo FRP do evento de 2019 (Figura 41).

Figura 41 – Intensidade dos eventos de incêndios Florestais (09/2019 e 10/2021) fazenda São Roque



3.2.3 Grau das Classes de Severidade dos Eventos de Incêndios Florestais 2019 e 2021

A partir dos resultados dos processamentos das imagens pré e pós-fogo por meio dos índices espectrais NBR e a classificação dNBR possibilitaram a individualização e

quantificação dos danos causados na vegetação pelos eventos de incêndios florestais de 2019 e 2021.

Salientamos que os eventos de incêndios florestais ocorridos em períodos distintos (09/2019 parte norte e 10/2021 parte norte e parte sul), demonstraram comportamentos diferentes mesmo em se tratando de eventos isolados ao longo do tempo quando analisados sem distinção das classes de fisionomia da paisagem.

Após o evento de incêndio florestal de setembro de 2019 na parte norte da fazenda São Roque, apenas 13,51% da área não foi atingida diretamente pelo incêndio, enquanto as demais áreas 86,49% sofreram algum grau de severidade, e destacamos ainda que apenas 2,16% foram referentes a classe de severidade alta.

Já na parte sul da propriedade, o evento de incêndio florestal de outubro de 2021, não atingiu 22,17% da área, no entanto, as áreas atingidas diretamente pelo fogo foram de 72,83% destaca-se que desta área apenas 4,16% foram afetadas pelo impacto do incêndio com grau de severidade alta.

No segundo evento de incêndio florestal em 10/2021 na parte norte, com a reincidência num intervalo de aproximadamente 25 meses, 15,01% da área não foi atingida pelo fogo, enquanto 84,99% sofreram algum grau de severidade pós fogo, e área de severidade alta com 5,95%.

Contudo, os dados de 09/2019 parte norte (1 evento), tiveram 13,51% da área não queimada e 34,73% ficaram nas classes de severidade moderada alta e severidade alta, porém os dados de 10/2021 parte sul (1 evento) com 22,17% da área não queimada e 23,23% nas classes severidade moderada alta e severidade alta. Esses dados levantaram a hipótese da intensidade do fogo conforme demonstrados nos focos de calor pelos índices de FRP.

Na parte norte, em 2019, este evento de incêndio florestal teve uma duração de 8 dias com intensidade média do fogo, fato condizente com os fatores climáticos. Já na parte sul, em 2021, o evento de incêndio florestal teve a duração de 10 dias atingindo mais do que o dobro da área da parte norte, sendo assim, os dados de FRP demonstraram uma alta intensidade do fogo, justificada pelo acúmulo de biomassa seca referente ao longo do período de baixa pluviosidade, ou seja, a partir de 2020. Com isso os dados mostram uma varredura do consumo da biomassa seca, consumindo rapidamente a vegetação na parte sul, enquanto no incêndio 2019 na parte norte houve uma queima prolongada e lenta, devido a disponibilidade hídrica, fato esse que os dois eventos têm períodos similares mais com amplitudes FRP diferentes.

Da mesma forma analisando os dados da classe de vegetação arbórea, objeto desta análise em detalhe, foi observado que a área não queimada da parte norte, em 09/2019 foi de 19,96%, enquanto a mesma área atingida pela segunda vez, num intervalo de 25 meses aproximadamente, houve uma redução para 16,66%, da mesma forma que as áreas atingidas e classificadas como de severidade moderada alta e severidade alta, em 09/2019 apresentaram 32,09%, já em 10/2021 apresentou 49,59% e com isso um incremento de 17,5% nas áreas afetadas pela reincidência do incêndio florestal.

De acordo com os resultados obtidos sobre o comportamento do evento de incêndio na vegetação arbórea sem reincidência, em anos e áreas diferentes, porém no ápice da estação seca, em 09/2019 estação seca intermediária, período pós uma grande inundação. Já em 10/2021 no período de uma seca prolongada, os dados não apresentaram uma certa similaridade nas porcentagens das áreas não queimadas, em 09/2019 a parte norte com 19,66% e em 10/2021 a parte sul com 14,20%, enquanto as classes de maior grau de severidade (severidade moderada alta e severidade alta) com 32,09% e 37,29% respectivamente, essa diferença pode ser justificada devido ao fato do comportamento da vegetação aos fatores climáticos.

De acordo com os dados da área norte da fazenda São Roque no segundo evento de incêndio florestal em 10/2021, evidencia o impacto do fogo na vegetação com a redução da área não queimada de 3% e o aumento das áreas das classes de maior grau de severidade (severidade moderada alta e severidade alta) em 17,5% demonstrando o impacto do segundo evento de incêndio em um intervalo de 25 meses aproximadamente.

3.2.4 Validação de Campo da Evolução da Resiliência em setembro de 2022 na fazenda São Roque

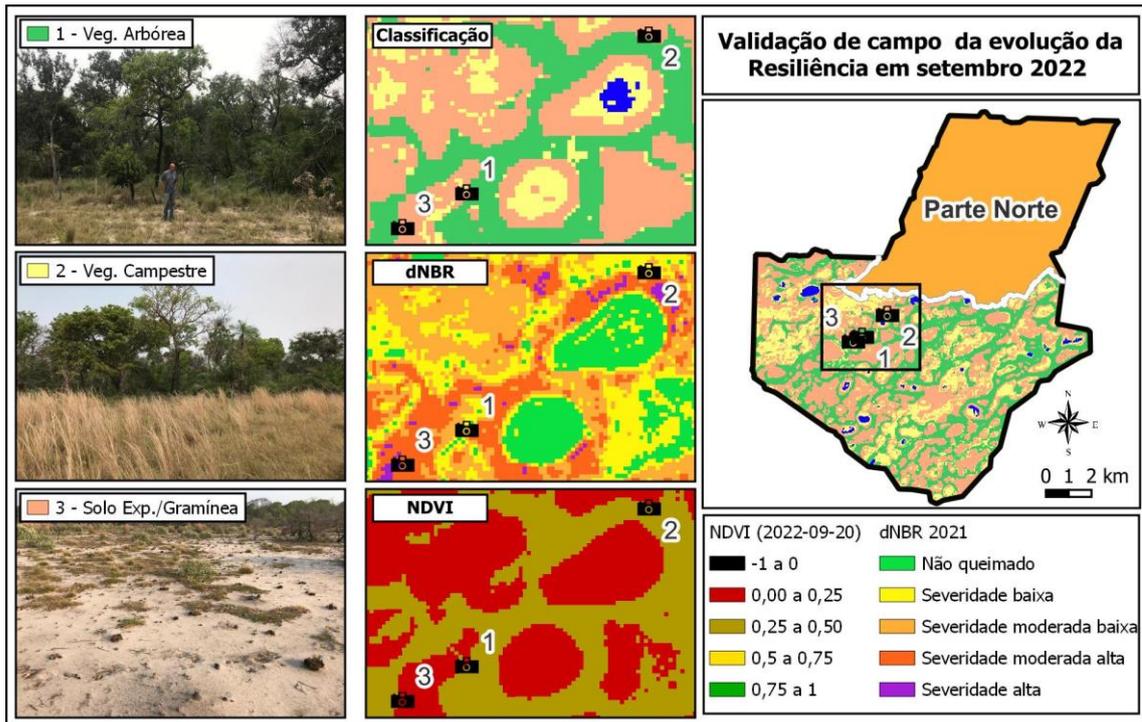
As informações obtidas *in loco* no campo em 09/2022 na área de estudo, um ano após o evento de incêndio florestal na fazenda São Roque, auxiliou na interpretação e validação dos resultados obtidos por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, dentre elas, a chave de interpretação, utilizada para identificar e individualizar as classes da fisionomia da paisagem da área de estudo, principalmente pela adaptação da classe Solo Exposto para Solo Exposto/Gramínea.

A paisagem encontrada no local, 09/2022, imprime três situações: 1) um período de seca extrema; 2) cicatrizes deixadas pelo evento incêndio florestal de 10/2021 na vegetação; e 3) retomada da biomassa da vegetação (resiliência) apesar do estresse hídrico.

As evidências observadas *in loco* e o cenário apresentado a partir dos produtos gerados

pelas técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, validaram as análises da fisionomia da paisagem por meio classificação supervisionada e pela adaptação da chave de interpretação para este estudo, bem como a resiliência da vegetação em face aos eventos de incêndios florestais a partir dos dados e das imagens de satélites analisadas, assim os resultados alcançados e a paisagem observada *in loco* estavam em consonância (Figura 42).

Figura 42 – Validação de campo da evolução da resiliência em setembro de 2022



Fonte: Autor

Por exemplo, os resultados apontaram para uma resiliência da vegetação arbórea, na área visitada, após 6 meses, fato justificado pela presença das folhas verdes nas copas das árvores de grande porte, entretanto verificou-se também a escassez de folhagens nas árvores de características estacional semidecidual, e efeito da estação de seca, e ainda apresentam cicatrizes no interior das “cordilheiras” com a destruição da vegetação de menor porte, sub-bosque, principalmente na espécie da palmeira Acuri (*Attalea phalerata*), e ainda, marcas de carvão nos troncos e galhos nas árvores de grande porte que formam o estrato superior que compõem o dossel da floresta.

Essas marcas de carvão são provenientes da altura das chamas durante o evento de incêndio florestal 10/2021, confirmando assim a intensidade do incêndio apontado pelos dados de monitoramento de focos de calor FRP.

3.2.5 Comportamento da Classe da Vegetação Arbórea nos Períodos pré-fogo e pós-fogo

Com base nos fundamentos do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

e das classes de severidade identificadas após cada evento de incêndio florestal (dNBR), concentrou-se na avaliação do comportamento da classe da vegetação arbórea nos períodos pré-fogo e pós-fogo.

As informações sobre a resiliência da vegetação foram avaliadas por meio de um quadro dinâmico das variações de índices de biomassa ao longo dos meses subsequentes aos incêndios florestais. Este conjunto de resultados forneceu o alicerce para a análise mais ampla das implicações ecológicas dos incêndios florestais na vegetação arbórea da área estudada.

Neste sentido, a comparação entre os eventos de incêndios florestais ocorridos na parte norte da Fazenda São Roque nos anos de 2019 e 2021, considerando a análise dos índices de NDVI e as classes de severidade, proporcionou uma visão abrangente da resiliência da vegetação arbórea frente às perturbações causadas pelo fogo.

No evento de incêndio florestal de 2019, a análise dos índices de NDVI revelou flutuações significativas na biomassa ao longo do período analisado. Antes do incêndio, os índices variaram de 0,90 a 0,66, com amplitude entre as classes de severidade de 0,02 e 0,07, respectivamente, representando a variação sazonal natural. Após o incêndio, houve uma queda abrupta nos índices de NDVI, refletindo a redução da biomassa devido à severidade do fogo.

Entretanto, o comportamento da vegetação arbórea pós-fogo atingiu a resiliência após 8 meses (28/05/2020), no entanto as amplitudes entre as classes de severidade não retornaram ao patamar da vegetação antes do incêndio, ou seja, mantendo um intervalo entre as classes de 0,04 (Figura 34, pg 85). Apesar de uma amplitude maior de NDVI entre as classes de severidade, isso sugeriu que, apesar da perturbação inicial, a vegetação começou a se recuperar, mas a diferença entre a vegetação afetada e classificada de acordo com os graus de severidade ainda é perceptível.

Esses dados são observados pela intensidade do fogo conforme demonstrados nos focos de calor pelos índices de FRP, tendo em vista que no primeiro evento (09/2019), a intensidade do incêndio explica a não queima das copas das árvores. A queima parcial das copas das árvores resulta em uma maior amplitude das classes, uma vez que os valores máximos de NDVI (representativo da biomassa) são referentes a classe “Não queimada”, em que se mantêm no patamar pré-incêndio, enquanto parte da vegetação atingiu a valores mínimos como a classe de “Severidade Alta”. Portanto, neste caso a amplitude maior confirma a menor intensidade do fogo, já apontada pelo FRP dos focos de calor.

No segundo evento de incêndio florestal de 2021, que ocorreu na mesma área (parte

norte da fazenda) após 25 meses, observou-se um comportamento diferente. As classes de severidade dominantes abrangeram maiores áreas após o incêndio, sendo a de severidade moderada alta (28,76%) e severidade alta (20,83%), refletindo uma redução mais expressiva na biomassa. A análise dos índices de NDVI mostrou que, após o incêndio, a biomassa da vegetação arbórea sofreu uma queda notável, com índices mínimos próximos aos índices do evento de 2019 mais com um aumento expressivo da área de severidade alta.

A resiliência pós-fogo estabeleceu-se após 8 meses do evento (27/06/2022), com um comportamento da biomassa da vegetação arbórea apresentando índices de NDVI abaixo dos níveis pré-fogo e inferindo um período de seca excepcional, entretanto, o comportamento entre as classes de severidade manteve-se a amplitude da resiliência do incêndio florestal de 2019.

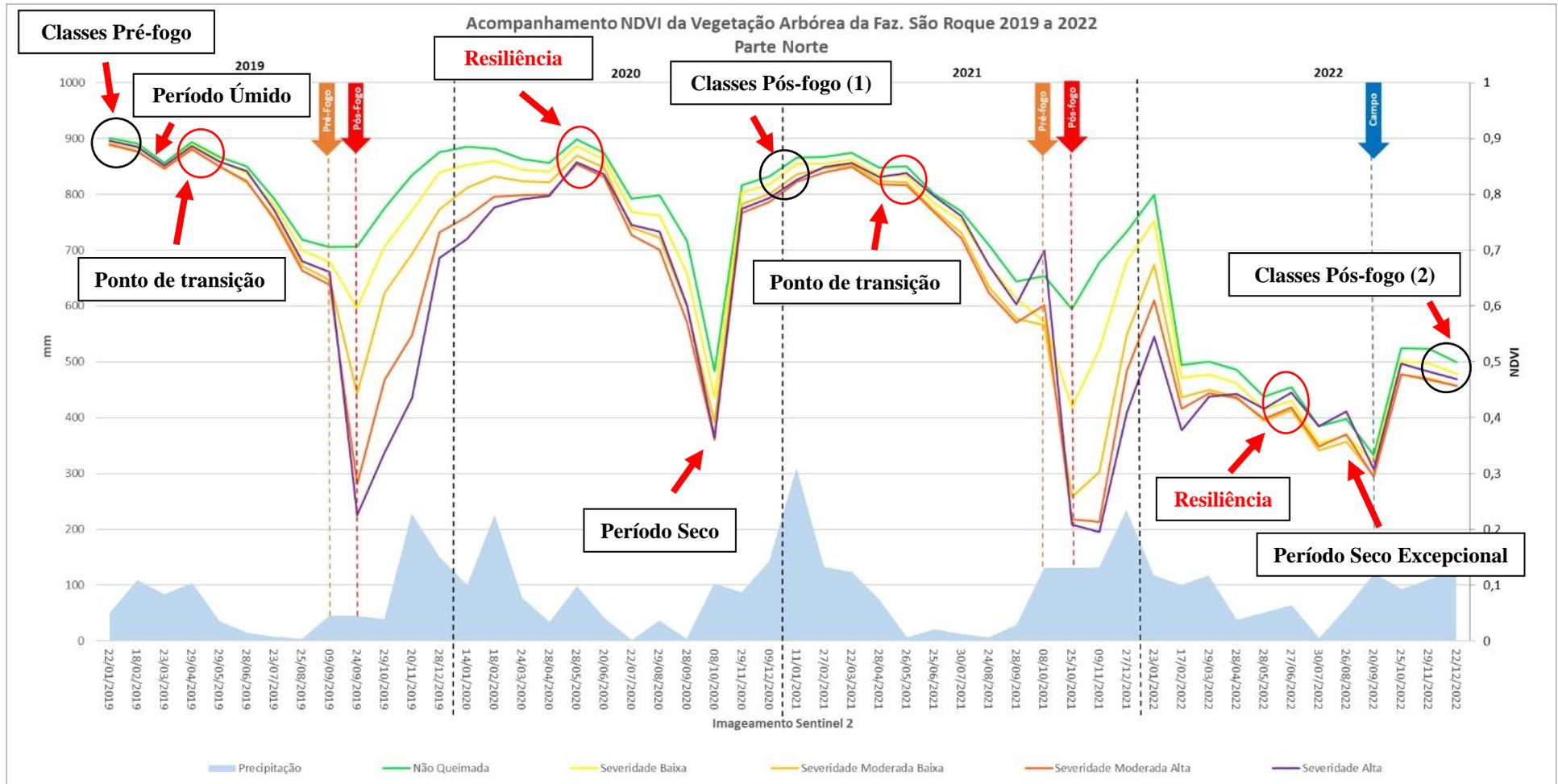
O comportamento da vegetação arbórea verificado em janeiro de 2019, 8 meses antes do primeiro evento de incêndio florestal e a amplitude entre as classes de severidade apresentada era de 0,01, todavia, após dois eventos de incêndio florestal (2019 e 2021) a amplitude após os dois ciclos de resiliência atingiu o patamar da amplitude entre classes de severidade na ordem de 0,04, fato esse que houve um incremento de 0,03 na amplitude devido a outras variáveis, por exemplo, perda de biodiversidade.

A análise comparativa entre os eventos de incêndio florestal ocorridos na parte norte da Fazenda São Roque nos anos de 2019 e 2021, juntamente com os resultados obtidos na parte sul da propriedade afetada pelo fogo em 2021, fornece padrões interpretativos sobre a resiliência da vegetação arbórea frente a perturbações recorrentes (Gráfico 6).

Os eventos de incêndio florestal na parte norte da fazenda em 2019 e 2021 resultaram em padrões similares de recuperação da biomassa vegetal, conforme indicado pelos índices de NDVI. No primeiro evento, após uma queda inicial acentuada nos índices de NDVI devido ao fogo, houve uma gradual retomada da vegetação à zona de resiliência da biomassa após um período de 8 meses, embora com amplitude maior entre as classes de severidade. No segundo evento, a parte norte sofreu um impacto mais severo na biomassa, com recuperação similar (8 meses) na amplitude entre classe e os índices de NDVI bem abaixo da normalidade para os períodos secos, indicando um período de seca extrema prolongada (atípico), ao longo desse período os índices de NDVI mantiveram o comportamento, mesmo com níveis máximos de NDVI abaixo de 0,60, apesar disto, a amplitude entre classes mantiveram a média de 0,4, essa amplitude se assemelha ao comportamento da biomassa na vegetação arbórea no período seco anteriores, confirmando a resiliência da vegetação arbórea em relação a biomassa.

O comportamento da vegetação arbórea após atingir a resiliência considerando os dois eventos, 2019 e 2021, se assemelha ao comportamento da vegetação antes dos eventos de fogo, porém a diferença está na amplitude entre classes de severidade, na vegetação arbórea no pré-fogo no período úmido era de 0,01 enquanto após os eventos de incêndio essa amplitude estabiliza-se em 0,04, este dado revela que a vegetação arbórea responde aos índices de biomassa, porém a diferenciação de classes levanta a hipótese de perda de biodiversidade.

Gráfico 6 - Gráfico do acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte Norte) 2019 a 2022.

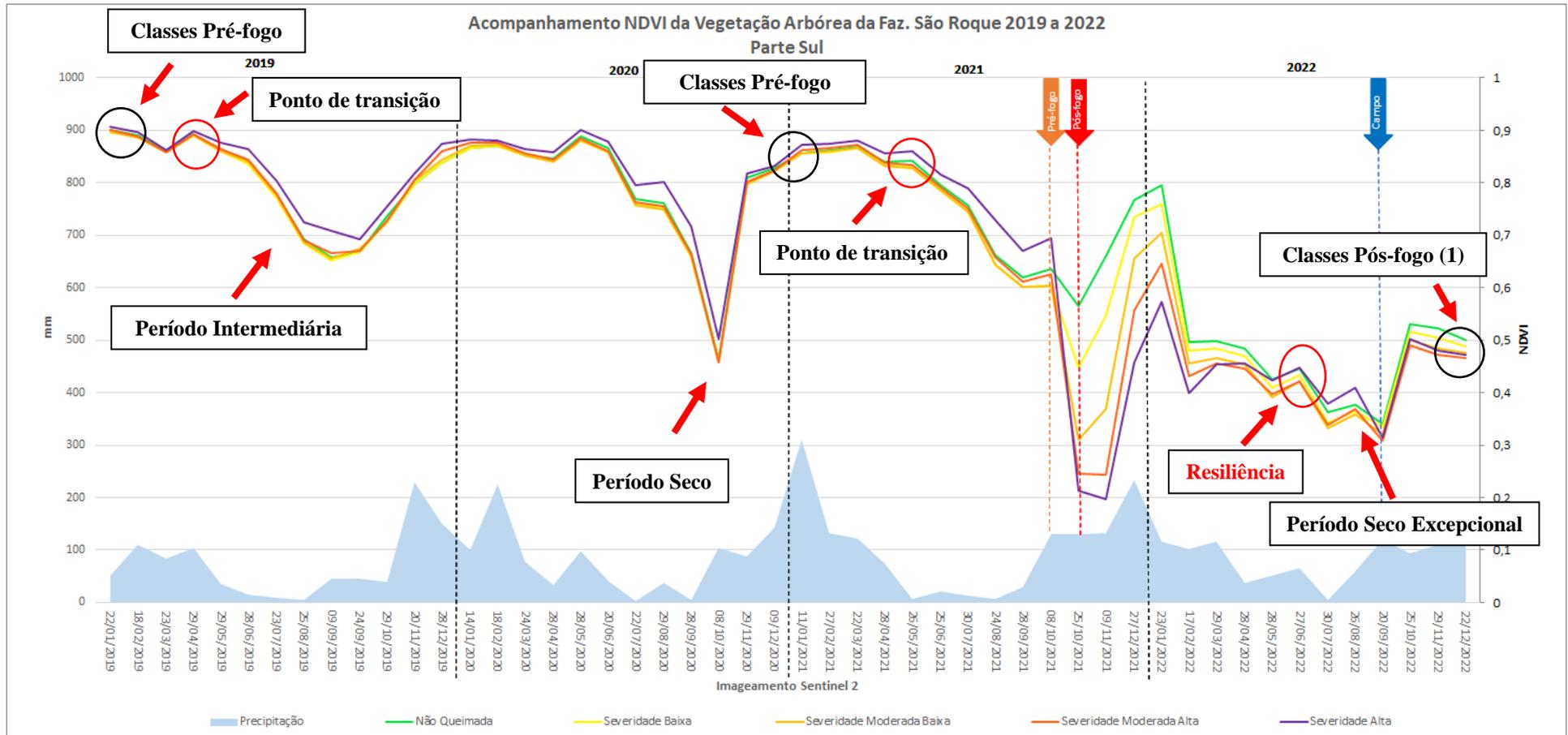


Fonte: Autor

Ao considerar a parte sul da fazenda, que foi atingida apenas pelo evento de incêndio florestal em 2021, observou-se um padrão semelhante de recuperação (resiliência). Após o incêndio, houve uma queda nos índices de NDVI, refletindo a redução da biomassa. A resiliência da vegetação na parte sul se manifestou aproximadamente 8 meses após o incêndio, com uma recuperação gradual da biomassa, embora os índices de NDVI tenham permanecido abaixo dos níveis pré-fogo, como já mencionado, provavelmente afetado pela escassez do regime hídrico (Gráfico 7).

Outra observação importante a ser destacada a partir da série é o comportamento da vegetação arbórea individualizada no pré e pós-fogo, de modo geral a classe observada antes do evento de incêndio florestal tem uma tendência de normalidade que acompanha os períodos úmidos e secos do Pantanal da Nhecolândia. Este comportamento é destacado na amplitude entre as classes de severidades ao longo dos meses úmidos, pois mantém amplitude de 0,01 entre classes de severidade e nos meses subsequentes que caracterizam o período seco essa amplitude entre as classes se elevam a 0,06, e concomitantemente uma queda nos índices máximos de NDVI, ainda podemos observar nos dados a individualização de duas situações no período seco, ou seja, o primeiro, de 2019, o comportamento revelou uma estação intermediária e o segundo, de 2021, o comportamento evidenciou uma estação seca.

Gráfico 7 - Acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea (parte Sul) 2019 a 2022



Fonte: Autor

Por fim, o acompanhamento do comportamento da vegetação arbórea no período de 2019 a 2022, fechando um ciclo de 4 anos de análises, os dados analisados a partir da identificação do grau de severidade, utilizando as técnicas de NBR e dNBR, individualizou as classes de severidade após eventos de incêndios florestais, com isso foi possível a quantificação da biomassa da vegetação por meio do índice NDVI nas classes de severidade, assim o comportamento da classe da vegetação arbórea pré e pós eventos de incêndios florestais apresentaram características e/ou padrões singulares.

Assim, o fato de que, no primeiro evento de incêndio ocorrido em setembro de 2019, a intensidade média do fogo se revelou como o fator determinante para a não queima das copas das árvores. Esta queima parcial das copas resulta em uma amplitude maior das classes de severidade (dNBR), uma vez que os valores máximos do NDVI, que representam a biomassa, permanecem no patamar pré-incêndio, enquanto parte da vegetação atingiu valores mínimos, caracterizando a classe de "Severidade Alta". Portanto, nesse contexto, a amplitude maior atestou a menor intensidade do incêndio, conforme previamente indicado pelos dados do FRP. Já no segundo evento, ocorrido em outubro de 2021, apresentou uma redução nos valores máximos de NDVI (biomassa) do pré-fogo, pelo fato de toda a vegetação ser atingida pelo incêndio, diretamente pelas chamas ou indiretamente pela intensidade do calor, desta forma houve uma diminuição da amplitude entre as classes de severidade, assim quanto menor a amplitude entre as classes de severidade (dNBR) maior a intensidade do evento de incêndio florestal, corroborando com os dados de FRP.

Outro resultado que corrobora com alta intensidade do fogo evidenciado pelo FRP do evento de incêndio florestal de 2021 é a análise da classe de Severidade Alta (dNBR – Pós-fogo), ao comparamos essa classe na série histórica 2019 a 2022 antes do evento do incêndio florestal ficou evidenciado que a classe identificada de Severidade Alta era formada pela vegetação arbórea de grande porte e com isso confirma os dados de alta intensidade do fogo (FRP).

Já a resiliência quanto a reflectância do NDVI da vegetação arbórea se restabelece após 20 (vinte) meses a partir do ponto de referência, neste caso constatado no período de transição entre estação seca/úmida. O período de transição ficou evidente no gráfico do acompanhamento do NDVI da vegetação arbórea, essa individualização aparentemente estabeleceu na vegetação sem a influência das estações, ou seja, na úmida sem influencia das precipitações, bem como na estação seca sem interferência do estresse hídrico provocado na vegetação.

No evento de incêndio florestal de 2021, a parte norte da fazenda São Roque sofreu com

a reincidência de incêndio, após um período de 25 (vinte e cinco) meses do incêndio anterior, enquanto a parte sul foi atingida somente por esse evento de incêndio. Observando os dados tanto da parte norte (2 eventos incêndios) quanto da parte sul (1 evento de incêndio) o comportamento da vegetação arbórea de ambas as áreas (norte e sul) responderam de forma equivalentes, demonstrando assim que os valores semelhantes dos índices de NDVI apresentados confirmam a resiliência após 25 (vinte e cinco) meses da vegetação arbórea da parte norte, assim a vegetação arbórea mesmo com a reincidência de incêndio manteve o mesmo comportamento dos índices de NDVI da parte sul que sofreu um evento de incêndio florestal.

Os índices de NDVI apontaram que a vegetação arbórea se reestabelecida (resiliência) quanto a sua biomassa e vigor após 20 (vinte) meses de um evento de incêndio, a reincidência de incêndio após 25 (vinte e cinco) meses apontou um crescimento na área de Severidade Alta. Assim a comparação entre as áreas classificada como Severidade Alta, evidencia que há um aumento do significativo no percentual, visto que no incêndio de 2019 a classe atingiu 5,34% enquanto em 2021 (reincidência) atingiu 20,83%, um aumento de quase quatro vezes o tamanho da área. Isso levantou a hipótese de perda de biodiversidade no sub-extrato da vegetação intermediária (sub-bosque), pois, mesmo constatando a resiliência da vegetação arbórea de grande porte após o evento de incêndio florestal, os dados de NDVI não possibilitaram a quantificação da biomassa do sub-bosque uma vez que na reincidência do incêndio apresentou um aumento substancial de quatro vezes a área das classes de Severidade Alta.

Ao realizar a comparação de um evento de incêndio florestal, ou seja, parte norte 2019 com a parte sul 2021, percebe-se que os tamanhos das áreas classificadas com Severidade Alta são próximos 5,34% e 8,80% respectivamente. Essa pequena diferença se dá a intensidade do fogo, conforme já demonstrado que em 2021 foi um incêndio de intensidade alta.

A análise dos dados obtidos por meio dos índices de NDVI quantificaram a biomassa referente ao dossel da vegetação arbórea, com isso não quantificou os dados de biomassa presentes no sub-bosque, levantando a hipótese de um efeito “guarda-chuva”. Tendo em vista que a queima de 2019 com menor intensidade atingiu a maior parte do sub-bosque, assim os dados de NDVI não refletiram essas áreas. Já na reincidência de 2021, com a alta intensidade do incêndio, toda a vegetação arbórea foi atingida, desta forma o sub-bosque atingido no primeiro evento (2019) não quantificado, contribuiu com o aumento da classe de Severidade Alta, demonstrando que as análises de biomassa são referentes principalmente do dossel da vegetação arbórea.

Ao ser analisados os índices de NDVI ao longo do período de 2019 a 2022, ficou evidente as diferenças do comportamento da biomassa da vegetação arbórea frente as flutuações climáticas regionais (estação úmida e estação seca), marcada pela amplitude entre as classes de severidade, enquanto o comportamento da mesma classe de vegetação arbórea frente ao evento de incêndio florestal apresentou uma mudança abrupta na amplitude entre classes de severidade marcada pela perda de biomassa a partir da incidência do fogo sobre a vegetação.

O que nos leva a perceber que a partir desses padrões de comportamento da resposta da biomassa por meio de um evento extremo, período seco e/ou evento de incêndio florestal, como referência para individualizar o grau de severidade da vegetação é possível compreender as flutuações climáticas e/ou identificar eventos de incêndios florestais ocorrido ao longo de uma série histórica, a partir de imagens de satélites.

CONCLUSÃO

O uso das geotecnologias associados ao conhecimento científico das variáveis ambientais proporcionou a análise do potencial de resiliência da fitofisionomia da vegetação arbórea no Pantanal da Nhecolândia após dois eventos de incêndios florestais, utilizando a fazenda São Roque como modelo.

Para tanto, utilizou-se da combinação de um conjunto de metodologias associado as técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento tais como: classificação supervisionada, espacialização dos focos de calor, NBR, dNBR e NDVI, cuja informações coletas diariamente pelos satélites subsidiaram as análises do comportamento da vegetação arbórea ao longo de um recorte temporal. Essas sobreposições das técnicas ressaltaram a alta eficiência na aplicação dos recursos das geotecnologias no monitoramento ambiental.

Ressalta-se que o estudo dos padrões e parâmetros da resiliência da vegetação ao longo do período analisado (2019 a 2022), só foi possível devido a disponibilidade dos dados diários pela plataforma BDQueimadas do INPE e pelas imagens dos satélites Sentinel 2A e 2 B da Plataforma Copérnicos.

Ao ser analisados os índices de NDVI ao longo do período de 2019 a 2022, ficou evidente as diferenças do comportamento da biomassa da vegetação arbórea frente as flutuações climáticas regionais (estação úmida e estação seca), marcada pela amplitude entre as classes de severidade, enquanto o comportamento da mesma classe de vegetação arbórea frente ao evento de incêndio florestal apresentou uma mudança abrupta na amplitude entre classes de severidade marcada pela perda de biomassa a partir da incidência do fogo sobre a vegetação.

Por meio do acompanhamento da biomassa (NDVI) pela individualização do grau de severidade (dNBR) em classes, observou-se que na intensidade do fogo, quantificada pelo FRP, a amplitude entre as classes de severidade apresenta uma correlação inversa, ou seja, à medida que a intensidade do fogo aumenta, a variação entre as classes de severidade diminui. Isso implica que incêndios florestais de maior magnitude, refletidos por valores mais elevados de FRP, tendem a gerar uma menor variação nas classes de severidade, sugerindo uma maior homogeneidade na resposta do dNBR às áreas afetadas. Essa descoberta tem implicações na avaliação e no monitoramento de incêndios florestais, proporcionando uma nova perspectiva sobre a intensidade do fogo e os indicadores de mudanças na vegetação arbórea.

Um aspecto importante a destacar é a influência das condições climáticas nos padrões

de biomassa e na resiliência. A análise dos índices de NDVI demonstrou que, nos períodos úmidos, os índices eram mais homogêneos, indicando condições favoráveis ao crescimento da vegetação. Por outro lado, em períodos de estresse hídrico (estação seca), os índices de NDVI mostraram variações mais acentuadas entre as classes de severidade, refletindo a redução da biomassa.

A partir dessa flutuação climática dos índices de NDVI foi possível individualizar um período de transição ligado ao comportamento da biomassa, cuja resposta do NDVI não sofriam a influência direta das estações úmida e seca. Desta forma, o comportamento da vegetação arbórea após o incêndio florestal atingiu a resiliência após 20 (vinte) meses verificado no período de transição, onde os índices de NDVI da parte norte apresentaram a mesmas respostas dos índices de NDVI da área não queimada (parte sul).

Apos 25 (vinte e cinco) meses um novo evento de incêndio atingiu toda a propriedade, sendo um evento na parte sul e reincidência na parte norte, assim o comportamento dos índices de NDVI (biomassa) pós incêndio em ambas as partes foram equivalentes, confirmando a resiliência da vegetação arbórea da parte norte em 20 (vinte) meses após o evento anterior (2019).

Entretanto, o aumento da área referente a classe de Severidade Alta na parte norte (reincidência) evidenciou que os índices de NDVI refletiram apenas o comportamento do dossel da vegetação arbórea, visto que o evento de incêndio florestal de 2021 foi de intensidade alta, revelando assim as áreas do sub-bosque impactadas pelo primeiro evento (2019), afetada devido a intensidade média do incêndio demonstrado pelo FRP.

Esses dados revelaram a necessidade do conhecimento quanto a intensidade do fogo, se este incêndio for de intensidade média ou moderada, o dossel da vegetação arbórea terá um comportamento de “guarda-chuva” na quantificação de biomassa, ou seja, ocultando os níveis de severidade atingidas na vegetação de sub-bosque pelo fogo. Devido o segundo evento de incêndio florestal (2021) ter sido de intensidade alta, atingindo todo o dossel da vegetação arbórea, e com isso revelando as áreas atingidas com Severidade Alta no sub-bosque no evento anterior (2019) não quantificada.

Se o incêndio florestal de 2021 fosse de intensidade média (o que não foi o caso) levantaria a hipótese de que esse aumento expressivo (quatro vezes) da área da classe de Severidade Alta, não poderia ser evidenciado e sobressaíam o comportamento do efeito

“guarda-chuva”, apenas a quantificação dos índices de NDVI referente ao dossel da vegetação arbórea.

Aparentemente mesmo que os dados nos revelem uma retomada da biomassa “resiliência da vegetação” em 20 (vinte) meses, a reincidência do evento após 25 (vinte e cinco) meses, revelou a preocupação que após um evento de incêndio florestal no Pantanal da Nhecolândia há a necessidade de um estudo referente a perda de espécies de vegetação e consequentemente uma intervenção para a recomposição da biodiversidade perdida/erradicada.

Essas constatações ressaltam a necessidade de medidas preventivas e de gestão adequadas para preservar a biodiversidade das áreas afetadas do Pantanal por evento de incêndio florestal. Nesse sentido, é fundamental considerar a prática de replantio de mudas nativas, visando recuperar as espécies que possam ter sido perdidas devido aos incêndios.

Porém, em outras perspectivas a metodologia utilizada neste trabalho levanta a hipótese de que a partir desses padrões de comportamento da resposta da biomassa por meio de um evento extremo, por exemplo, um evento de incêndio florestal e/ou período seco, como referência para individualizar o grau de severidade da vegetação, por meio dessa será possível identificar eventos de incêndios florestais e/ou compreender as flutuações climáticas ocorridos ao longo de uma série histórica, a partir de imagens de satélites e ainda a possibilidade de utilização de uma modelagem ambiental para evidenciar situações atípicas no bioma.

No entanto, o estudo apresentado nesta dissertação apresentou algumas direções possíveis para pesquisas futuras pesquisas sobre a resiliência da vegetação arbórea após incêndios florestais, como o monitoramento de longo prazo, que pode fornecer informações sobre a trajetória da recuperação da vegetação ao longo de décadas, permitindo a compreensão dos ciclos de resiliência, assim como as abordagens multidisciplinares, que podem agregar conhecimentos de diferentes disciplinas, como ecologia, geografia, química e climatologia, tendo em vista que a investigação sobre os incêndios florestais no Pantanal é contínua e fundamental para orientar práticas de manejo e conservação eficazes.

Em última análise, esses resultados têm implicações importantes para a conservação e gestão do Pantanal, destacando a necessidade de abordagens integradas que considerem não apenas a prevenção de incêndios, mas também a manutenção da biodiversidade e a resiliência do ecossistema em face das mudanças climáticas e eventos extremos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. N. 2006. **Brasil: Paisagens de Exceção: o litoral e o pantanal matogrossense**. São Paulo: Ateliê Editorial. 182 p.
- ABREU, M. C.; LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; SOUZA, A.; POBOČÍKOVÁ, I.; FRAGA, M. S.; ABREU, R. C. R. 2022. **Temporal and spatial patterns of fire activity in three biomes of Brazil**. Science of The Total Environment. Volume 844, 20 October 2022, 157138
- ADAMOLI, J. 1982. **O Pantanal e suas relações fitogeográficas com os cerrados**: discussão sobre o conceito "Complexo do Pantanal". In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 32, Teresina. **Anais...** Teresina: Sociedade Botânica do Brasil. 109-119 p.
- ADÁMOLI, J. 1986. **A dinâmica das inundações no Pantanal**. In: Anais do I Simpósio sobre recursos naturais e sócio-econômicos do Pantanal. BRASÍLIA-DF. DDT-EMBRAPA/CPAP-UFMS. Documentos 5: 51-61 p.
- ALMEIDA, F. F. M. 1946. **Origem dos minérios de ferro e manganês de Urucum: Corumbá, Estado de Mato Grosso**. Rio de Janeiro, s. ed., Boletim do DGM, 119: 51 p.
- ALVARENGA, S. M.; BRASIL, A. E.; PINHEIRO, R.; KUX, H. J. H. 1984. **Estudo geomorfológico aplicado à Bacia do Alto Paraguai e Pantanaís Mato-grossenses**. Salvador: Projeto RADAMBRASIL, **Boletim Técnico**; Série Geomorfológica, 89-183 p.
- ALVARENGA, S. M.; BRASIL, A. E.; DEL'ARCO, D. M. 1982. **Geomorfologia**. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL. **Folha SF.21 Campo Grande 1982**. (Levantamento de Recursos Naturais, 28). 125-184 p.
- AMARAL FILHO, Z. P. do. 1986. **Solos do Pantanal Mato-grossense**. In: Anais do I Simpósio sobre recursos naturais e sócio-econômicos do Pantanal. BRASÍLIA-DF. DDT-EMBRAPA/CPAP-UFMS. Documentos 5: 91-103 p.
- ARAGÃO, L. E. O.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. **Interactions Between Rainfall, Deforestation and Fires During Recent Years in the Brazilian Amazonia**. Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences, v. 363, n. 1498, p. 1779-1785, 2008.
- ARTAXO, P.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; PROCÓPIO, A. S.; PAULIQUEVIS, T. M.; ANDREAE, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L. V.; LEAL, A. M. C. 2002 **Physical and Chemical Properties of Aerosols in the Wet and Dry Seasons in Rondônia, Amazonia**. Journal of Geophysical Research, v. 107, p. 1-13, 2002.
- ASSINE, M. L. 2003. **Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. Rio Claro SP, Tese (Livre-Docência) - UNESP - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Sedimentar, Câmpus de Rio Claro 106 p.
- Assine, M. L. 2010. **Pantanal Mato-Grossense: uma paisagem de exceção**. In: Modenesi-Gauttieri, M. C.; Bartorelli, A.; Mantesso-Neto, V. Carneiro, C. D. R.; Lisboa, M. B. A. L. (eds.). A Obra de Aziz Nacib Ab'Saber. São Paulo, Beca-BALL edições, p. 464-489.
- BARLOW, J.; PERES, C. A. **Fire-Mediated Dieback and Compositional Cascade in an Amazonian Forest**. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 363, n. 1498, p. 1787-1794, 2008
- BAPTISTA, G.; BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A. 2017. **Monitoring Fuel Material, Area and Burn Severity: Their Relationship with a Carbon Cycle by Means of Remote Sensing Data**, Wildfire; Monitoring Fuel Material, Area and Burn Severity: Their Relationship

with a Carbon Cycle by Means of Remote Sensing Data chapter 7, p. 129-160.

BRASIL. MINISTERIO DO INTERIOR. 1979. **Estudo de desenvolvimento integrado da bacia do Alto Paraguai**: Relatório da 1a fase, descrição física e recursos naturais. Brasília: SUDECO/EDIBAP, t.2, 235 p.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 19 jul. 2000

BRAZ, A. M.; BORGES, J. P. dos S.; BERNARDES, D. C. da S.; TEREZAN, L. H. **Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, INPE, 1, Anais...2015

CAMPANHARO, W. A.; NEVES, A. K.; LOPES, A. P.; DUTRA, C. D.; SCALIONI, A. C. C.; PEREIRA, V. P. B.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L. E. O. C. 2021. **Padrões e impactos dos incêndios florestais nos biomas brasileiros**. In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital. São Paulo: Oficina de Textos, 2021c. p. 181-205.

CARVALHO, N. O. 1986. **Hidrologia da bacia do Alto Paraguai**. In: Anais do 1º Simpósio sobre Recursos Naturais de Sócio-Econômicos do Pantanal; 27 de novembro a 4 de dezembro de 1986; Corumbá, MS; 1986 43-49p.

CORREA, D. B.; ALCÂNTARA, E.; LIBONATI, R.; MASSI, K. G.; PARK, E. 2022. **Increased burned area in the Pantanal over the past two decades**. Science of The Total Environment. Volume 835, 20 de agosto de 2022, 155386.

COUTINHO, L. M. 2023. **O conceito de bioma**. Acta bot. bras. 20(1): 13-23. 2006. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/265188521_O_conceito_de_bioma/link/54816fe20cf22525dcb612b3/download>. Acesso em 18 de jul. de 2023.

DA SILVA, D. M.; BATALHA, M. A. **Soil-Vegetation Relationships in Cerrados under Different Fire Frequencies**. Plant Soil, v. 311, p. 87-96, 2008.

DNOS. 1974. **Estudos Hidrológicos da Bacia do Alto Paraguai**. Rio de Janeiro. (Brasil, Ministério do Interior. Depto. Nacional de Obras de Saneamento) - vols: 1. Relatório Técnico: 284p.; 2. Diversos: 230p.; 3. Alturas de Chuvas, 631p. e 4. Fluviometria: 664 p.

FERNANDES, E. 2000. **Caracterização dos Elementos do Meio Físico e a Dinâmica da Nhecolândia (Pantanal Sulmatogrossense)**, São Paulo SP: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. 130 p.

FIOCRUZ. 2023. **Incêndios Florestais no Pantanal 2020**: Nota Técnica 01. FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2020. Disponível em: https://agencia.fiocruz.br/sites/agencia.fiocruz.br/files/u34/nt_01_pantanal_final1.pdf. Acesso em: 27 jul. 2023.

FRANCO, M. S. M.; PINHEIRO, R. 1982. **Geomorfologia**. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL. **Folha SE.21 Corumbá e parte da Folha SE.20**. Rio de Janeiro. 1982 (Levantamento de Recursos Naturais, 27). 161-224 p.

FREITAS, R. O. de. 1951. **Ensaio sobre o relevo tectônico do Brasil**. In: Revista Brasileira de Geografia, Abril-Junho, XIII, No. 2.

GABARINI, A. 2023. **Gigante berçário de diversas espécies**. WWF, 2021. Disponível em <

https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/pantanal/diadopantanal/biodiversidade/>. Acesso em 17 de jul. 2023.

GODOI FILHO, J. D. de,. 1986. **Aspectos geológicos do Pantanal Mato-grossense e de sua área de influência**. In: **Anais do I Simpósio sobre recursos naturais e sócio-econômicos**. BRASÍLIA-DF. DDT-EMBRAPA/CPAP-UFMS: 1986, 63-76p.

GONCALVES, K. S.; CASTRO, H. A.; HACON, S. S. 2012 **As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório**. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1523-1532, jun. 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232012000600016&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 8 set. 2020.

GONÇALVES, W. L. 2021 **Fogo no Pantanal: uma análise conceitual sobre as contribuições bibliográficas**. *Biodiversidade - v.20, n.1, 2021 - pág. 160*.

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. 2021. **Brazil is in water crisis — it needs a drought plan To avoid crop failures and soaring power costs, Brazil needs to diversify sources, monitor soil moisture, model local hydroclimate dynamics and treat water as a national security priority**. (2021). Disponível em < <https://www.nature.com/articles/d41586-021-03625-w>>. Acesso em 08 ago 2023.

HARDESTY, J.; MYERS, R.; FULKS, W. Fire, **Ecosystems and People: A Preliminary Assessment of Fire as a Global Conservation Issue**. *Fire Manag.*, v. 22, p. 78-87, 2005

HOLLING, C.S. 1973. **Resilience and stability of ecological systems**. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4, 1–23, 1973. DOI:10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1992. **Manual técnico da vegetação brasileira**. IBGE, Rio de Janeiro, 92 p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, n.1).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012. **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 272 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=263011>>. Acesso em: 22 jan. 2022

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. **Biomass e sistema costeiro marinho do Brasil Compatível com a escala 1:250 000** (Série Relatórios Metodológicos).

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2020a **Área queimada – resolução 01 km**. Programa Queimadas. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/qa1km>. Acesso em: 21 dez. 2020

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2020b. **Programa Queimadas: Perguntas frequentes**. 2020a. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>. Acesso em: 16 jul. 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2020c. **Banco de Dados de queimadas**. 2020b. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>. Acesso em: 16 jul. 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2020d. **Programa Queimadas: Perguntas frequentes**. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>. Acesso em: 02 abr. 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. **Report The IPCC has finalized**

the second part of the Sixth Assessment Report, **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, the Working Group II contribution**. It was finalized on 27 February 2022 during the 12th Session of Working Group II and 55th Session of the IPCC. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em: 26 jul. 2023

LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. C. G. **Pervasive Transition of the Brazilian Land-Use System**. *Nat. Clim. Chang.*, v. 4, p. 27-35, 2014. DOI: 10.1038/Nclimate2056.

LASA/UFRJ. Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2020. **Área Queimada – Pantanal, 2020**. Disponível em: <https://lasa.ufrj.br/noticias/area-queimada-pantanal-2020/>. Acesso em: 04 de jan. 2021.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C. C.; PERES, L. F.; LINO A. CARVALHO, S.; GARCIA, L. C. **Rescue Brazil’s burning Pantanal Wetlands**. *Nature*. Vol 588. 10 December 2020.

LIBONATI, R.; PEREIRA, A. A. SANTOS, F. L. M.; RODRIGUES, J. A.; ROSA, A. S.; MELCHIORI, A. E.; MORELLI, F.; SETZER, A. W. 2021a. **Sensoriamento remoto de áreas queimadas no Brasil: progressos, incertezas, desafios e perspectivas futuras**. In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). *Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital*. São Paulo: Oficina de Textos, 2021a. p. 53-75.

MAPBIOMAS. 2023. **Amazônia concentrou 90% da área queimada no Brasil em janeiro e fevereiro**. Disponível em: [<https://mapbiomas.org/amazonia-concentrou-90-da-area-queimada-no-brasil--em-janeiro-e-fevereiro>]. Acesso em 16 de jul. de 2023.

MAPBIOMAS. 2023b. **Visão Geral da Metodologia**. Disponível em: . Acesso em: 10 jan. 2023b. MATHER, P.M.

MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G. S.; ALVES, L. M. 2015. **Cenários de Mudanças Climáticas no Pantanal**. In: Bergier I., Assine M. (eds) *Dinâmica do Pantanal na América do Sul. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 37. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2015_357, 2015.

MARTINS, E. R. C. 2012. **Tipologia de lagoas salinas no Pantanal da Nhecolândi(MS)** [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo. 2012. 188p.

MEDEIROS, M. B.; MIRANDA, H. S. **Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três queimadas prescritas anuais**. *Acta Botanica Brasilica*, v. 19, n. 3, p. 493-500, 2005.

MIRANDA, H. S., SATO, M. N., ANDRADE, S. M. D. A., HARIDASAN, M., & MORAIS, H. C. (2004). **Queimadas de Cerrado: caracterização e impactos**. *Cerrado: ecologia e caracterização*, 69.

MORELLI, F.; ROSA, W.; OLIVEIRA, L.; GARROT, I. 2019. **Plataforma de apoio a gestão de operações de combate a incêndios florestais: CIMAN Virtual**. *Biodiversidade Brasileira*, ano 9, n. 1, p. 234, 2019. Disponível em <<http://revistaeletronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/1238/885>>. Acesso em: 31 dez. 2020.

MOURA, P. 1943. **Bacia do Alto Paraguai**. In: *Revista Brasileira de Geografia*, Nº 1 ano V –

Janeiro – Março de 1943: 3-38 p.

NASI, R.; DENNIS, R.; MEIJAARD, E.; APPLGATE, G.; MOORE, P. **Forest Fire and Biological Diversity**. Unasylva – FAO, v. 53, 2002.

NOGUEIRA, J.; MACHADO-SILVA, F.; PEIXOTO, R. B.; LIBONATI, R. 2021a. **Respostas da vegetação ao fogo: perspectivas do uso de satélites ambientais no Brasil**. In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital. São Paulo: Oficina de Textos, 2021a. p. 213-227.

OLIVEIRA, L. N.; AQUINO, C. M. S. 2020. **Definições e aplicações da resiliência na ciência geográfica**. REVISTA DO DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA, Universidade de São Paulo www.revistas.usp.br/rdg - ISSN 2236-2878, Volume 39 (2020) DOI: 10.11606/rdg.v39i0.159581. 2020.

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; TEODORO, P. E.; SILVA JÚNIOR, C. A.; BAILO, F. H. R.; GAVA, R.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; GOIS, G.; FILHO, W. L. F. C.; LIMA, M.; SANTIAGO, B. B.; FREITAS, W. K.; SANTOS, P. J.; COSTA, M. S. 2020. **Focos de fogo relacionados a chuvas e biomas do estado de Mato Grosso do Sul, Brasil**. Meteorologia Agrícola e Florestal, Volumes 282–283, 15 de março de 2020, 107861. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107861>> Acesso em 18/02/2023.

PARANHOS FILHO, A.C.; LASTORIA, G.; TORRES, T.G. 2016. **Sensoriamento remoto ambiental aplicado: introdução às geotecnologias**. Campo Grande: Ed. UFMS. 198p. 2016.

PARIZOTTO, T. M. 2012. **Estudo morfológico e hidroquímico de pequenas depressões na Nhecolândia, Pantanal, MS**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 111p.

PASSARINHO, N. 2021. **Brasil é 4º no mundo em ranking de emissão de gases poluentes desde 1850**. (2021). Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-59065359>. Acesso em: 26 de jul. 2023.

PCBAP. 1997. **Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai – PCBAP/Projeto Pantanal**, Programa Nacional do Meio Ambiente. Brasília: PNMA, 1997. 3 vol. em 7 t., il., fig., mapas.

PEREIRA, J. V. C. 1944. **Pantanal**. In: Revista Brasileira de Geografia, Nº 2 ano VI – Abril – Junho de 1944: 281-284 p.

PINTO, M. M.; LIBONATI, R.; TRIGO, R. M.; TRIGO, I. F.; DACAMARA, C. C. 2020. **A Deep Learning Approach for Mapping and Dating Burned Areas Using Temporal Sequences of Satellite Images**. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., v. 160, p. 260-274, 2020. DOI: 10.1016/J.Isprsjprs.2019.12.014.

PIRAJÁ, V. P.; OLIVEIRA, A. K. M.; MATIAS, R.; REZENDE-FILHO, A. T. 2023. **Sistemas de geotecnologias para monitoramento de queimadas: viabilidade de utilização de sensores orbitais e geostacionários para identificar incêndios florestais em área modelo do Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul**. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 33, n. 72, p. 30-49, 2023a. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2023v33n.72> p.30

PIRAJÁ, V. P.; OLIVEIRA, A. K. M.; MATIAS, R.; REZENDE-FILHO, A. T. 2023^a. **O uso dos índices espectrais NBR e ΔNBR empregando dados Sentinel 2 para identificar e delimitar áreas queimadas, utilizando como modelo uma área do Pantanal de Nhecolândia, Mato Grosso do Sul**. ISSN eletrônico 2177-2738 RA’EGA, Curitiba, PR, V.56, p. 24–42, 04/2023a <https://revistas.ufpr.br/raega> DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.85434>

- PIRAJÁ, V. P.; MERCANTE, M. A.; PARANHOS FILHO, A.; SILVA, M. H. S. da; 2018. **Modelo digital de elevação aplicado à taxonomia do relevo: regiões geomorfológicas do Estado de Mato Grosso do Sul e delimitação da bacia hidrográfica do rio Taboco.** In: Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Jardim, MS, 20 a 24 de outubro 2018 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 142-151.
- PONZONI, F. J.; KUPLICH, T. M.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- POR, F. D. 1995. **The Pantanal of Mato Grosso (Brazil) World's Largest Wetlands.** Monographiae Biologicae volume 73. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht/ Boston/ London. Printed in the Netherlands. 123 p.
- PRIMICERIO, J.; DI GENNARO, S. F.; FIORILLO, E.; GENESIO, L.; LUGATO, E.; MATESE, A.; VACCARI, F. P. 2012. **A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture.** Precision Agriculture, v. 13, n. 4, p. 517–523, 2012.
- REZENDE FILHO, A. T., 2006. **ESTUDO DA VARIABILIDADE E ESPACIALIZAÇÃO DAS UNIDADES DA PAISAGEM: Banhado (baía/vazante), Lagoa Salina e Lagoa Salitrada no Pantanal da Nhecolândia, MS.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Aquidauana, Aquidauana, MS. 118 p.
- REZENDE FILHO, A. T. 2011. **Variabilidade química das águas na Bacia do Alto Paraguai: uma compartimentação do Pantanal Mato-grossense.** Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 152p.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. 1998. **Fitofisionomias do bioma cerrado.** In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de. Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados - CPAC, 1998. p. 89-166.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. 1973. **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, 1973.
- SABINO, C.V.S.; LAGE, L V.; ALMEIDA, K. C. B. 2014. **Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental;** Minas Gerais MG, Eng Sanit Ambient, Edição Especial,|2014 87-94; DOI: 10.1590/S1413-41522014019010000588.
- SAKAMOTO, Y. A. 1997. **Dinâmica hídrica em uma “Salina” e seu entorno e a ocupação, Fazenda São Miguel do Firme, MS.** São Paulo SP, 1997: 181p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
- SANCHEZ, R. O. 1977. **Estudo fluviomorfológico del Pantanal;** regionalización, sub-regionalización y sectorización geográfico de la depression de la alta cuenca del Rio Paraguai. [S.l.]: EDIBAP. 50 p.
- SANTOS, J. da C. V. 2022. **Caracterização de uma lagoa salina (alcalina) de água preta do Pantanal da Nhecolândia, Fazenda São Roque.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande – MS 2022. 44p.
- SCHROEDER, W.; ALENCAR, A.; ARIMA, E. Y.; SETZER, A. W. 2013. **The Spatial Distribution and Interannual Variability of Fire in Amazonia.** Amaz. Glob. Chang., v. 186,

p. 61-81, 2013. DOI: 10.1029/2008gm000724.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat Burned Area Product Guide. USA:** USGS, 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-burned-area?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 27 mar. 2020

SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. 2021. **O Programa Queimadas do INPE.** In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital. São Paulo: Oficina de Textos, 2021a. p. 23-52.

SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. 2021B=b. **Sensoriamento remoto de áreas queimadas no Brasil: progressos, incertezas, desafios e perspectivas futuras.** In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital. São Paulo: Oficina de Textos, 2021b. p. 53-75.

SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. 2021c. **Queima de vegetação em áreas protegidas na Caatinga (2000-2012).** In: SETZER, A. W.; FERREIRA, N. J. (Orgs.). Queimadas e incêndios florestais: mediante monitoramento orbital. São Paulo: Oficina de Textos, 2021c. p. 137-156.

SETZER, A. 2019. **O Programa Queimadas do INPE e a temporada de fogo de 2019.** Palestra proferida no 1º Fórum de Observação da Terra – Soluções e Aplicações, São Paulo, SP, 6 nov. 2019. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/~rqueimadas/documentos/20191106_MundoGeo_Queimadas2019_ASetzer.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020

SHIRAIWA, S. 1994. **Flexura da litosfera continental sob os Andes Centrais e a origem da Bacia do Pantanal.** Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 86 p.

SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. 1998. **Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões.** Pesquisa agropecuária Brasileira, 33 (Número Especial): 1703-1711 p.

SILVA, M. P.; MAURO, R. A.; MOURÃO, G.; COUTINHO, M. E. 2000. **Distribuição e quantificação de classes de vegetação do Pantanal através de levantamento aéreo.** Rev. Bra. Bot. 23(2): 143-152 p.

SILVA, P. S.; BASTOS, A.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; DACAMARA, C. C. 784 **Impacts of the 1.5° C Global Warming Target on Future Burned Area in the Brazilian** 785 **Cerrado.** Forest Ecology and Management, v. 446, p. 193-203, 2019

SILVA, J. 2020. **Avaliação multitemporal do NDVI em áreas queimadas para o estudo da resiliência de fitofisionomias do Cerrado no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, GO.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 6, p. 2345-2356, dez. 2020. Disponível em: <https://www.revistabrasileiradageografia.com.br/index.php/rbgfe/article/view/1234>. Acesso em: 08 ago. 2023.

NAKICENOVIC, Nebojsa; SWART, Rob. **Cenários de emissões – relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.** 2000.

USSAMI, N.; SHIRAIWA, S.; DOMINGUEZ, J. M. L. 1999. **Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: The Pantanal wetland, SW Brazil.** Tectonics, 18(1), p.25-39.

WILHELMY, H. (1958). **Klimamorphologie der Massengesteine.** Westermann. Braunschweig.

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. **Fire Radiative Energy for Quantitative Study of Biomass Burning: Derivation from the BIRD Experimental Satellite and Comparison to MODIS Fire Products**. Remote Sens. Environ., v. 86, p. 83-107, 2003

WWF. World Wide Fund for Nature. 2008. **Netherlands' Board visit the Pantanal Wetland in Brazil**. 2008. Disponível em < <https://www.wwf.org.br/?14280/>>. Acesso em 17 de jul. 2023.