



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA**

LUCAS INÁCIO DA SILVA

**PROPOSTA DE UM ÍNDICE ESPECTRAL DE POTENCIAL COMBUSTÍVEL (IPC)
PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS
NO PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA, DF, UTILIZANDO A PLATAFORMA
GOOGLE EARTH ENGINE.**

Dissertação de Mestrado n°: 203

Brasília – DF
2022

LUCAS INÁCIO DA SILVA

**PROPOSTA DE UM ÍNDICE ESPECTRAL DE POTENCIAL COMBUSTÍVEL (IPC)
PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS
NO PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA, DF, UTILIZANDO A PLATAFORMA
GOOGLE EARTH ENGINE.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, na área de concentração Geoprocessamento e Análise Ambiental.

Orientador: Professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Brasília – DF
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Inácio da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Proposta de um índice espectral de potencial combustível (IPC) para identificação de áreas críticas à ocorrência de incêndios no Parque Nacional de Brasília, DF, utilizando a plataforma Google Earth Engine. 2022. 122 p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Lucas Inácio da Silva

silva.lucasinacio.11@gmail.com

LUCAS INÁCIO DA SILVA

**AVALIAÇÃO MULTITEMPORAL DE ÍNDICES ESPECTRAIS PARA ESTUDOS DE
VULNERABILIDADE A INCÊNDIOS NO PARQUE NACIONAL DE BRASÍLIA.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, área de concentração Geoprocessamento e Análise Ambiental.

31 de outubro de 2022

Professor Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (Orientador - UnB)

Edson Eyji Sano (Examinador Interno - UnB)

Marcos Reis Rosa (Examinador Externo)

Dedico esse trabalho à minha família, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir que tudo fosse possível e que eu tivesse disposição, tempo e competência para realizar mais essa importante etapa da vida.

Agradeço aos meus familiares por todo apoio, cuidado e carinho e por todas as frases e momentos motivadores, que sempre fizeram parte da minha inspiração.

Agradeço a minha namorada, companheira e fiel companhia por toda a motivação e apoio nesse e em outros momentos.

Agradeço aos amigos do peito que sempre mostraram apoio e suporte.

Agradeço também ao meu Orientador, por toda paciência e compreensão.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Science is organized knowledge.
Wisdom is organized life.”*
Immanuel Kant

RESUMO

O Cerrado brasileiro é um dos maiores biomas do país e rico em biodiversidade. Infelizmente a pressão antrópica vem agravando os processos de degradação do bioma. Além da forte pressão antrópica, o bioma também sofre com fortes períodos de estiagem, tornando-o propício para ocorrência de eventos de fogo. Sistemas de monitoramento, principalmente os que envolvem a seara do geoprocessamento, para tais eventos devem ser pensados, antepondo-se ao fenômeno, mitigando assim os efeitos catastróficos que uma queimada pode ocasionar. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo propor um índice de potencial combustível por meio da determinação de valores limites que definem a criticidade da ocorrência de incêndios, porém em escala multitemporal, avaliando as condições de verdor, umidade e senescência da vegetação, por meio de índices espectrais, sob a ótica de um sistema de monitoramento. Para isso, objetivou-se criar, no *Google Earth Engine*, uma plataforma de análise de imagens *Sentinel-2*; identificar os períodos a serem estudados; tratar as cenas com a remoção de materiais que causam problemas para análise estatística, por meio da aplicação de índices já conhecidos que segmentam os materiais de nuvem, solo exposto e água; calcular os índices espectrais PSRI, NDVI e NDII juntamente com o ΔNBR ; e extrair os valores dos índices PSRI, NDVI e NDII nas regiões queimadas, no período pré-fogo. Utilizou-se o “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C” como acervo de dados, visto que já apresenta a correta análise de telemetria e a calibrações radiométricas e geométricas bem como o Sensor *Invariant Atmospheric Correction* para correção atmosférica. Foi possível identificar 6 períodos de análise, numerados de Eventos de 1 ao 6, cuja data de eventos de fogo inicia-se em 2016 e termina em 2022. Foi possível criar a plataforma no *Google Earth Engine*, que serviu para o manejo das imagens, bem como o cálculo de remoção dos materiais contaminantes e o cálculo dos índices espectrais, gerando as máscaras para cada evento selecionado. Foi possível também calcular os índices espectrais da vegetação e delimitar os polígonos das áreas queimadas, cuja extração na cena pré-fogo resultou em tabelas com os valores extraídos de cada índice, permitindo o cálculo estatístico. A análise dos dados extraídos das tabelas permitiu estabelecer uma condição mediana de valores, que representam o estado anterior da vegetação com potencial combustível. Esse valor mediano que determina o limite situou-se em 0,1 para o PSRI, 0,58 para o NDVI e 0,01 para o NDII. Por meio da determinação da criticidade a incêndios, foi proposto o Índice Potencial Combustível.

Palavras-chave: Análise; Bioma; Google Earth Engine; Incêndio; Monitoramento.

ABSTRACT

The Brazilian Savannah is one of the largest biomes in the country and rich in biodiversity. Unfortunately, anthropic pressure has been aggravating the degradation processes of the biome. In addition to the strong anthropic pressure, the biome also suffers from strong periods of drought, making it conducive to the occurrence of fire events. Monitoring systems, especially those that involve the knowledge of geoprocessing, for such events must be thought of, putting ahead of the phenomenon, thus mitigating the catastrophic effects that a fire can cause. Therefore, the present work aims to propose a fuel potential index through the determination of threshold values that define the criticality of fire occurrence, however on a multitemporal scale, evaluating the conditions of greenness, humidity and senescence of the vegetation, through of spectral indices, from the perspective of a monitoring system. For this, the objective was to create, in Google Earth Engine, a Sentinel-2 image analysis platform; identify the periods to be studied; treat the scenes with the removal of materials that cause problems for statistical analysis, through the application of already known indices that segment the materials of cloud, exposed soil and water; calculate the PSRI, NDVI and NDII spectral indices together with the ΔNBR ; and extract the values of the PSRI, NDVI and NDII indices in the burned regions, in the pre-fire period. The "Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C" was used as a data collection, since it already presents the correct telemetry analysis and radiometric and geometric calibrations as well as the Invariant Atmospheric Correction Sensor for atmospheric correction. It was possible to identify 6 analysis periods, numbered from Events 1 to 6, whose fire events date starts in 2016 and ends in 2022. It was possible to create the platform in Google Earth Engine, which served to manage the images, as well as the calculation of removal of contaminating materials and the calculation of spectral indices, generating the masks for each selected event. It was also possible to calculate the spectral indices of the vegetation and delimit the polygons of the burned areas, whose extraction in the pre-fire scene resulted in tables with the values extracted from each index, allowing the statistical calculation. The analysis of the data extracted from the tables allowed us to establish a median condition of values, which represent the previous state of the vegetation with fuel potential. This median value that determines the limit was 0.1 for the PSRI, 0.58 for the NDVI and 0.01 for the NDII. Through the determination of fire criticality, the Fuel Potential Index was proposed.

Keywords: Analysis; Biome; Google Earth Engine; Fire; Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição do bioma Cerrado	19
Figura 2 – Interface do Code Editor do GEE com aplicações de índices espectrais utilizando uma coleção inteira de imagens anuais.....	26
Figura 3 – Delimitação das regiões queimadas e comparação com as áreas do INPE.....	28
Figura 4 – (a) Classificação do mangue em diversas localidades ao longo da costa chinesa; (b) Aproximação da península de Guangdong; (c) Aproximação da costa de Guangxi; (c) Aproximação da ilha de Hainan	29
Figura 5 – Demonstração da dinâmica de cobertura vegetal de Pequim.....	30
Figura 6 – Mapa de Localização do PARNA Brasília.....	31
Figura 7 – Mapa de Cobertura e Uso do Solo do PARNA Brasília	33
Figura 8 – Lapso temporal de identificação do evento.....	36
Figura 9 – Identificação situações problemáticas.....	37
Figura 10 – Regiões de transição dos materiais contaminantes	40
Figura 11 – Composição da máscara geral do evento	41
Figura 12 – Cena contendo o cálculo do ΔNBR com as severidades atribuídas a uma máscara de queimada.....	45
Figura 13 – Fluxograma da Metodologia	46
Figura 14 – Identificação de formações densas de nuvem por meio da banda “QA60” do Sentinel-2 MSI, na cena de 13/05/2019.....	47
Figura 15 – Diferentes métodos de identificação de material contaminante, na cena de 13/05/2019.....	48
Figura 16 – Identificação de sombra de nuvem por meio da técnica descrita em Magno et al. (2021) , na cena de 13/05/2019	49
Figura 17 – Identificação, em verde, de formações de nuvem por meio do <i>Sentinel Cloud Probability</i> (limiar de 50%), na cena de 13/05/2019.....	49
Figura 18 – Índice NDWI com discretização, em azul, de corpos hídricos no limiar de 0.1, na cena de 13/05/2019.....	50
Figura 19 – Índice SWM com discretização, em vermelho, de corpos hídricos, na cena de 13/05/2019.....	51
Figura 20 – Demonstração da cena pré- (13/05/2019) e pós-fogo (12/07/2019)	51
Figura 21 – Máscara geral dos elementos contaminantes, sem o processo de <i>buffer</i> , na cena de 13/05/2019.....	52

Figura 22 – Máscara geral do evento com o amortecimento de 120 metros, na cena de 13/05/2019.....	52
Figura 23 – Problema na máscara geral do evento, na cena de 13/05/2019.....	53
Figura 24 – Cena contendo o cálculo do PSRI.....	54
Figura 25 – Cenas de PSRI nas regiões queimadas.....	55
Figura 26 – Cena contendo o cálculo do NDVI	56
Figura 27 – Cenas de NDVI nas regiões queimadas	57
Figura 28 – Cena contendo o cálculo do NDII.....	58
Figura 29 – Cenas de NDII nas regiões queimadas.....	59
Figura 30 – Cena contendo o cálculo do NBR	60
Figura 31 – Cena contendo os pontos de extração sobre a máscara do Δ NBR.....	61
Figura 32 – Mancha de queimada ao sul do lago	63
Figura 33 – Mancha de queimada ao norte do parque.....	63
Figura 34 – Mancha de queimada ao sul do parque	64
Figura 35 – Mancha de queimada ao sudoeste do parque	66
Figura 36 – Mancha de queimada na região próxima à rodovia	66
Figura 37 – Mancha de queimada na região próxima à rodovia e do reservatório.....	68
Figura 38 – Mancha de queimada ao sul do reservatório	69
Figura 39 – Mancha de queimada ao norte do reservatório	70
Figura 40 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 3.....	73
Figura 41 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 4.....	74
Figura 42 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 5.....	74
Figura 43 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 6.....	75
Figura 44 – Cena o IPC	78
Figura 45 – Cena o com detalhes no IPC	79
Figura 46 – IPC	80
Figura 47 – Aplicativo construído no GEE	81
Figura 48 – Plataforma do GEE com dados carregados.....	82
Figura 49 – Identificação de cena do satélite Sentinel-2 MSI na plataforma do GEE.....	82

Figura 50 – Cálculo do NBR para a cena supracitada.....	83
Figura 51 – Confronto de cenas sem e com correção atmosférica, respectivamente	84
Figura 52 – Aplicação da metodologia empregada com o resultado das zonas críticas.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do sensor MSI	34
Tabela 2 – Quantificação da severidade da queimada (multiplicado por 1000)	44
Tabela 3 – Exemplo com 5 pontos de extração de valores em uma máscara Δ NBR	61
Tabela 4 – Distribuição estatística das análises de 2017	62
Tabela 5 – Distribuição estatística das análises de 2018	64
Tabela 6 – Distribuição estatística das análises de 2019	65
Tabela 7 – Distribuição estatística das análises de 2020	67
Tabela 8 – Distribuição estatística das análises de 2021	68
Tabela 9 – Distribuição estatística das análises de 2022	70
Tabela 10 – Compilado dos valores extraídos	71
Tabela 11 – Estatística dos valores compilados	72
Tabela 11 – Análise quantitativa dos períodos com maiores pontos extraídos	76
Tabela 11 – Intervalos observados	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ¹ – **DF**: Distrito Federal
- ² – **ESA**: *European Spatial Agency* (Agência Espacial Europeia)
- ³ – **ESPC**: Elementos Sem Potencial Combustível
- ⁴ – **GEE** – *Google Earth Engine*
- ⁵ – **IBAMA**: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- ⁶ – **INPE**: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ⁷ – **IPC**: Índice de Potencial Combustível
- ⁸ – **MSI**: *MultiSpectral Instrument*
- ⁹ – **NBR**: *Normalized Burn Ratio*
- ¹⁰ – **NDII**: *Normalized Difference Infrared Index*
- ¹¹ – **NDVI**: *Normalized Difference Vegetation Index*
- ¹² – **NDWI**: *Normalized Difference Water Index*
- ¹³ – **PARNA Brasília**: Parque Nacional de Brasília
- ¹⁴ – **PDGS**: *Payload Data Ground Segment*
- ¹⁵ – **PSRI**: *Plant Senescence Reflectance Index*
- ¹⁶ – **SIAC**: *Invariant Atmospheric Correction*
- ¹⁷ – **SWM**: *Sentinel Water Mask*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
OBJETIVO GERAL	20
OBJETIVO ESPECÍFICO	20
PROBLEMATIZAÇÃO DO TEMA.....	21
HIPÓTESE.....	21
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
SENSORIAMENTO REMOTO E EVENTOS DE FOGO.....	22
GOOGLE EARTH ENGINE.....	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
ÁREA DE ESTUDO	31
ACERVO DE DADOS	33
FILTRAGEM DE DATAS.....	36
FILTRAGEM ESPACIAL DAS CENAS.....	37
Máscara geral de nuvens	38
Máscara geral de corpos hídricos.....	39
Máscara geral do evento.....	40
ÍNDICES ESPECTRAIS.....	41
Índice PSRI	41
Índice NDVI.....	42
Índice NDII	43
Índice NBR	43
EXTRAÇÃO DE VALORES	45
FLUXOGRAMA	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
FILTRAGEM DE DATAS.....	47
FILTRAGEM ESPACIAL DAS CENAS.....	47
Máscara geral de nuvens	47
Máscara geral de corpos hídricos.....	50
Máscara geral do evento.....	51
ÍNDICES ESPECTRAIS.....	54
Índice PSRI	54
Índice NDVI.....	56

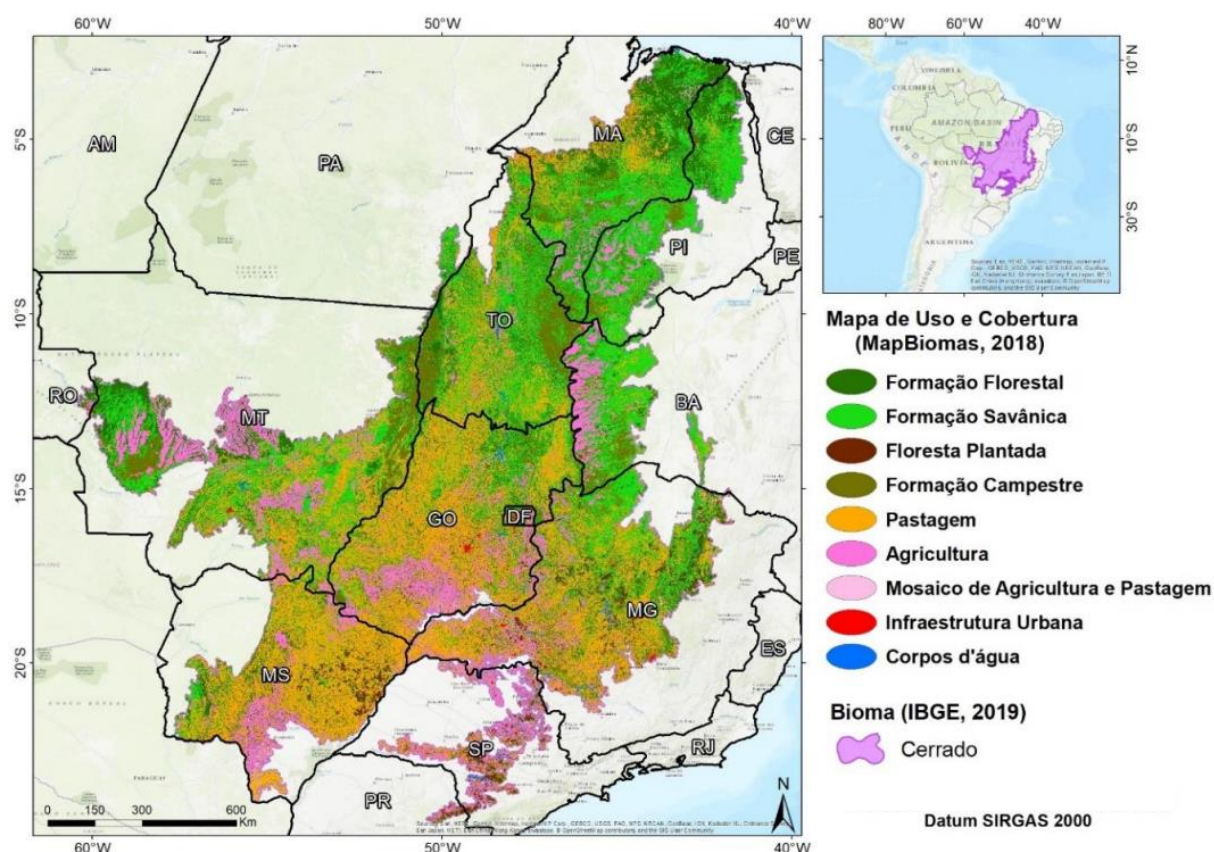
Índice NDII	57
Índice NBR	59
EXTRAÇÃO DE VALORES	60
LIMIAR CRÍTICO	61
Evento 1 – 2017.....	62
Evento 2 – 2018.....	64
Evento 3 – 2019.....	65
Evento 4 – 2020.....	67
Evento 5 – 2021.....	68
Evento 6 – 2022.....	69
Estabelecendo limites críticos.....	70
Proposição do Índice de Potencial Combustível	76
PLATAFORMA DO GEE.....	80
Calibração Atmosférica	83
Resultado final na plataforma.....	84
5. CONCLUSÃO.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	98
LINK PARA O APLICATIVO NO GEE	98
ANEXO I – Evento 1	99
ANEXO II – Cena PSRI para o Evento 1.....	100
ANEXO III – Cena NDVI para o Evento 1	101
ANEXO IV – Cena NDII para o Evento 1	102
ANEXO V – Evento 2.....	103
ANEXO VI – Cena PSRI para o Evento 2	104
ANEXO VII – Cena NDVI para o Evento 2.....	105
ANEXO VIII – Cena NDII para o Evento 2	106
ANEXO IX – Evento 3	107
ANEXO X – Cena PSRI para o Evento 3.....	108
ANEXO XI – Cena NDVI para o Evento 3	109

ANEXO XII – Cena NDII para o Evento 3.....	110
ANEXO XIII – Evento 4	111
ANEXO XIV – Cena PSRI para o Evento 4	112
ANEXO XV – Cena NDVI para o Evento 4.....	113
ANEXO XVI – Cena NDII para o Evento 4.....	114
ANEXO XVII – Evento 5.....	115
ANEXO XVIII – Cena PSRI para o Evento 5	116
ANEXO XIX – Cena NDVI para o Evento 5	117
ANEXO XX – Cena NDII para o Evento 5	118
ANEXO XXI – Evento 6	119
ANEXO XXII – Cena PSRI para o Evento 6.....	120
ANEXO XXIII – Cena NDVI para o Evento 6	121
ANEXO XXIV – Cena NDII para o Evento 6.....	122
ANEXO XXV – Cena IPC	123

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é um dos maiores biomas existentes no território brasileiro possuindo extensão de aproximadamente 2 milhões de quilômetros quadrados (COLLI¹⁶ et al., 2020, PEREIRA⁶⁷ et al., 2011). Conforme a Figura 1, o Cerrado se encontra na porção central do território brasileiro, servindo como divisor natural, ou uma barreira biogeográfica, de outros três grandes biomas: Amazônia ao norte, Mata Atlântica ao sudeste e Caatinga ao noroeste.

Figura 1 – Distribuição do bioma Cerrado



Fonte: Oliveira⁶⁴ et al., 2020

O bioma é rico em biodiversidade, o que envolve a existência de várias espécies de fauna e flora, porém, infelizmente, o bioma sofre grande pressão antrópica, desde atividades agropecuárias à expansão extrativista (HOFMANN³⁴ et al., 2021, FERREIRA²⁴ et al., 2007). Dentre outras formas de supressão, os eventos de fogo se destacam, pois servem como início das atividades de expansão agrícola. Os eventos de fogo também exercem grande impacto nos mecanismos de equilíbrio geral da região, ocorrendo de forma natural ou por ação humana.

As temporadas de seca fornecem o ambiente propício para ocorrência de eventos de evento de fogo, o que levanta uma questão fundamental acerca de ferramentas de prevenção e

combate ao fogo (HOFMANN³⁴ et al., 2021; VERNOOIJ⁹² et al., 2021). Embora os eventos de fogo também funcionem como manutenção dos ecossistemas, o manejo e monitoramento é fundamental a fim de manter os impactos sob controle, evitando o espalhamento das chamas e o perigo à biodiversidade (RIBEIRO⁷¹ et al., 2019).

Os sistemas de monitoramento de fogo são pensados para se antever ao evento e fornecer subsídios para tomadas de decisões (GAIKWAD²⁶ et al., 2016). Nos últimos anos, as áreas com coberturas nativas vêm sofrendo grande pressão, e conseqüentemente, vários desastres. Objetivando de reduzir os impactos causados por esses eventos, um bom sistema de monitoramento visa subsidiar esforços padronizados e customizados a cada situação enfrentada (BARMPOUTIS⁸ et al., 2020).

Considerando que monitoramento territorial envolve grandes dimensões de análise, o sensoriamento remoto surge como poderosa ciência e ferramenta (BARMPOUTIS⁸ et al., 2020). O uso do sensoriamento remoto permite a criação de mecanismos de grande potencial na análise de massa de dados. Os eventos de fogo demonstram a fragilidade dos ecossistemas, em especial, os de vegetação nativa.

Sendo assim, o presente trabalho vai servir como continuação dos estudos de Baptista⁵ et al. (2018) sob escala multitemporal e vai procurar expandir os horizontes de pesquisa deixando novas sugestões de linhas a serem seguidas em futuras pesquisas.

OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral a proposição de um índice de potencial combustível por meio da avaliação multitemporal de índices espectrais, diagnosticando as condições de verdor, de umidade e de senescência propícias a incêndios das diversas fitofisionomias de Cerrado no Parque Nacional de Brasília¹³ – PARNA Brasília, determinando quais as condições que melhor explicam a criticidade para incêndios.

OBJETIVO ESPECÍFICO

Tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar, a partir de incêndios florestais, as condições de verdor, umidade, senescência pré-fogo em cada fitofisionomia do PARNA Brasília em eventos passados estabelecendo um limiar de criticidade que condicione a região a ser um potencial combustível para um evento de fogo, como forma de desenvolvimento de um sistema de alerta;

- Desenvolver uma plataforma em sistema de informações geográficas que auxilie as análises nas questões de manejo e monitoramento de incêndios florestais no Cerrado.

PROBLEMATIZAÇÃO DO TEMA

A ocorrência de incêndios, sejam de causas antrópicas ou não, representam um perigo em potencial para fauna, flora e vidas humanas, conforme pôde ser observado nos eventos de Portugal, durante o ano de 2017 (BAPTISTA⁵ et al., 2018).

A adoção de ferramentas e políticas de prevenção e predição de incêndios de forma sólida e eficiente torna-se necessária para o correto direcionamento de medidas de intervenção a fim de minimizar o impacto gerado pela erupção de um incêndio (MEDEIROS⁵³ e FIEDLER, 2003).

As estratégias de manejo geralmente são feitas de forma pontual e a adoção do uso de dados espaciais pode ampliar as ações relacionadas ao manejo integrado de fogo.

HIPÓTESE

É possível avaliar os eventos de incêndios que ocorreram no PARNA Brasília, a partir de 2015 e estipular limites críticos de verdor, umidade e senescência dessas áreas, bem como criar um sistema de monitoramento e direcionador de áreas que necessitam ser manejadas com o fogo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

SENSORIAMENTO REMOTO E EVENTOS DE FOGO

O cenário relacionado a incêndios é marcado por polêmicas e discussões sobre a fragilidade ambiental nos ecossistemas. Eventos naturais ou de deflagrações antrópicas podem culminar em acontecimentos negativos de escalas locais ou até mesmo de proporções continentais. Eventos como incêndios florestais colocaram o Brasil em destaque no cenário local e mundial no que tange políticas públicas de gestão e monitoramento de recursos naturais (PENG⁶⁶ et al., 2020; RAFTOPOULOS⁶⁹ e MORLEY, 2020).

É importante elucidar a diferença entre incêndio e queimada, pois a queimada é uma técnica tradicional agropastoril, objetivando realizar a limpeza da área para destinação de rodízio de culturas agrícolas, sendo autorizada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis⁵ – IBAMA sob certas condições tais como a presença de aceiros, que são regiões de ausência de material combustível que impede a propagação descontrolada das chamas, enquanto o incêndio é ação descontrolada do fogo com avanço sistemático e fulminante (PEREIRA⁶⁸ e GUIOMAR, 2019; TUBELIS⁹¹, 2019; FALLEIRO²¹ et al., 2016).

Os incêndios florestais evidenciam a necessidade de estudos para desenvolvimento de ferramentas que possibilitem o mapeamento e a determinação do comportamento desses fenômenos, possibilitando sua predição com alto grau de precisão (NUNES⁶² et al., 2006). Embora o modelo físico real de ignição e propagação de incêndios seja bem complexo, existem ferramentas que permitem a modelagem de cenários de forma simplificada e objetiva resultando em respostas que irão auxiliar a tomada de decisões (TORRES⁸⁹ e RIBEIRO, 2008).

É necessário conhecer as estatísticas referentes aos incêndios, ou seja, conhecer os fatores de quando, onde e o porquê ocorrerá, afinal, o mapeamento desse perfil permite descartar cenários extremos em políticas de intervenção como gastos altos ou danos altos (SOARES⁸⁰ e SANTOS, 2002).

A região de ocorrência dos incêndios é importante para direcionar programas de prevenção e controle plausíveis para essas localidades (SANTOS⁷⁷ et al.; 2006). O período de ocorrência também é importante, pois permite a criação de um plano de alocação de recursos humanos, econômicos e logísticos para pautar soluções viáveis e com tempo. Já a causa dos eventos permite ações direcionadas visando a prevenção (RODRÍGUEZ⁷² et al., 2013).

Tratando-se de incêndios florestais, é necessário abordar questões a respeito do monitoramento e levantamento de dados seguros e consistentes, os quais servirão de insumos para metodologias de prevenção e intervenção (BATISTA⁷, 2004).

O sensoriamento remoto é uma poderosa ferramenta para diagnóstico e análises espaciais o que permite uma geração gigantesca de insumos através de manipulação de imagens obtidas por sensores orbitais, essas manipulações se baseiam em técnicas computacionais operadas nos insumos básicos gerando produtos auxiliares fornecendo indicadores que refletem um diagnóstico da cobertura do momento da captura da imagem.

O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, o IBAMA e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais⁶ – INPE possuem como principal ferramenta para o monitoramento de incêndios a detecção de focos de calor por sensoriamento remoto, a exemplo do Prevenção e Controle de Incêndios Florestais na Amazônia (TOMZHINSKI⁸⁸ et al., 2011; BATISTA⁷, 2004).

A identificação e espacialização dos pontos de calor, feita por meio de imagens orbitais obtidas de constelações de satélites que orbitam a Terra registrando imagens da superfície, permite registrar as áreas que sofrerem com algum tipo de anomalia térmica compondo assim um registro referente a dinâmica desses eventos (GRANEMANN²⁹ e CARNEIRO, 2009).

Uma característica importante dessas imagens é que suas informações são dispostas em várias camadas de dados, ou seja, existem informações registradas em diversos comprimentos do espectro que podem variar da região espectral do azul, que é a partir de 0,4 μm , até o comprimento do infravermelho de ondas curtas, que é por volta de 2,2 μm (TEZA⁸⁷, 2016).

Além da identificação dos pontos de calor, o sensoriamento remoto permite ainda nas análises de imagens de satélite a geração de índices espectrais que ressaltam características de alvos capturados nas imagens. A exemplo podem-se citar os seguintes índices de vegetação, tais como o *Plant Senescence Reflectance Index*¹⁵ – PSRI, *Normalized Difference Vegetation Index*¹¹ – NDVI, *Normalized Difference Infrared Index*¹⁰ – NDII e *Normalized Burn Ratio*⁹ – NBR.

Índices espectrais, tais como o NBR, como o comportamento espectral é influenciado a partir de uma perturbação, como a queima de uma vegetação. Pesquisas como a de Delcourt¹⁷ et al. (2021), Santos⁷⁶ et al. (2020), Ribeiro⁷⁰ e Baptista (2015), Silva⁷⁹ e Baptista (2015), Teobaldo⁸⁵ e Baptista (2013) e Teobaldo⁸⁶ e Baptista (2013) mostram essa potencialidade em relação aos estudos de severidade de eventos de fogo.

Estudar a severidade desses eventos é importante para verificação das consequências ecológicas, econômicas e físicas da região afetada, tanto no momento do evento quanto para o pós-evento, bem como coordenar as estratégias de mitigação plausíveis para cada caso (FASSNACHT²² et al., 2021; FERNÁNDEZ-MANSO²³ e QUINTANO, 2020; VLASSOVA⁹³ et al., 2014).

Conforme observado por Santos⁷⁶ et al. (2020), o estudo da severidade pelo índice de fogo não se limita apenas a quantificar a severidade do evento, mas também expande os horizontes no que diz respeito a ferramentas de monitoramentos de incêndios, bem como a novas formas de análise da dinâmica de fogo, conforme observado em Baptista⁵ et al. (2018).

Baptista⁵ et al. (2018) demonstra que é possível combinar a atuação de índices, tais como os citados anteriormente, para produzir resultados estatísticos referentes a condições impostas pela ocorrência de fogo.

Por meio da composição de índices é possível espacializar um modelo capaz de demonstrar zonas que demonstram qualitativamente o potencial combustível da vegetação correlacionando com o grau de risco de incêndio. Modelos, como o descrito, podem ser insumo suficiente para direcionamento de esforços capazes de minimizar os impactos que poderiam ocorrer caso um evento grave ocorresse (BAPTISTA⁵ et al., 2018).

Autores como Freitas²⁵ (2021), Alves² e Alvarado (2019) e Gois²⁷ et al. (2019) demonstram a eficiência de sistemas de monitoramento voltados à observação de fogo. Graças a automação de processos no geoprocessamento é possível observar fenômenos do sensoriamento remoto com velocidades jamais vistas antes, conforme é possível observar em Gois²⁷ et al. (2019) com os resultados do projeto MapBiomas, que também utiliza o *Google Earth Engine*⁴ – GEE para obtenção de importantes produtos.

Alves² e Alvarado (2019) afirmam ainda que o fogo é um fenômeno desencadeador da dinâmica das paisagens brasileiras, e como um fenômeno natural ou antrópico, o seu desencadeamento pode estar condicionado a condições controladas ou não, por isso é necessário sistemas de monitoramento a fim de mapear o comportamento, prever cenários e fomentar políticas de uso consciente.

Sistemas de monitoramento e predição, como o BDQueimadas, implementado pelo INPE em 1997, auxiliam a gestão no controle, estudo, levantamento de dados, predição e fomento a medidas de controle no quesito gestão de risco de fogo (GOIS²⁷ et al., 2019). O BDQueimadas, assim como o MapBiomas Fogo, utiliza sistemas de predição com base em dados históricos, provenientes do sensoriamento remoto. A metodologia do BDQueimadas se

baseia na observação dos históricos de precipitação, temperatura média do ar, umidade relativa, tipo de vegetação e a ocorrência prévia de fogo na região.

A existência de sistemas de monitoramento não impede a criação de outros, pois existem diversas metodologias de predição de eventos de fogo. Baptista⁵ et al., (2018) sugere a criação de sistemas baseados na observação de índices espectrais, conforme já mencionado no modelo descrito anteriormente. Esse sistema, todavia, apresenta-se com maior proximidade do usuário final, visto que a análise está diretamente relacionada com a observação de produtos multiespectrais do sensoriamento remoto que podem ser adquiridos de forma gratuita.

GOOGLE EARTH ENGINE

O GEE é uma plataforma online de processamento, visualização e manipulação de dados geográficos (GORELICK²⁸ et al., 2017). O GEE tem a capacidade de armazenamento da ordem da escala de petabytes, ou seja, muito superior ao usualmente adotado por usuários de computadores pessoais e até mesmo pequenas e médias empresas (MUTANGA⁵⁹ e KUMAR, 2019; PATEL⁶⁵ et al., 2014).

Os pesquisadores Mutanga⁵⁹ e Kumar (2019) e Kumar⁴³ e Mutanga (2018) definem o processo de uso da plataforma como um serviço de computação paralela de alta performance. É possível a análise de diversas fontes de dados e em grandes quantidades, sem precisar preocupar-se com problemas da área da tecnologia da informação, como potentes hardwares para análises geográficas (CASU¹³ et al., 2017; GORELICK²⁸ et al., 2017). O acesso à plataforma é simples, bastando o usuário com credenciais da Google solicitar o acesso por meio do menu de cadastro do site do GEE.

A grande disponibilidade de acervo do sensoriamento remoto vem atraindo a atenção da comunidade das geociências, bem como de entusiastas também, conforme compreendido em Casu¹³ et al. (2017). Casu¹³ et al. (2017) também afirma que o volume de dados é grande graças à imensa quantidade de satélites que estão orbitando na Terra atualmente e um novo conceito de administração de dados se mostra adequado para definir a manipulação sobre esses dados: Big Data.

Sobre o conceito de *Big Data*, é correto afirmar que as pessoas não possuem a capacidade de analisar grande quantidade de dados sem ferramentas de automação. O GEE surge como promissora ferramenta de análise espacial, já incluída no conceito *Big Data*.

Os pesquisadores Kumar⁴³ e Mutanga (2018) pontuam o exemplo de Hansen³⁰ (2013) em que foram analisadas imagens do intervalo de anos de 2000 a 2012, o que somam 654.178

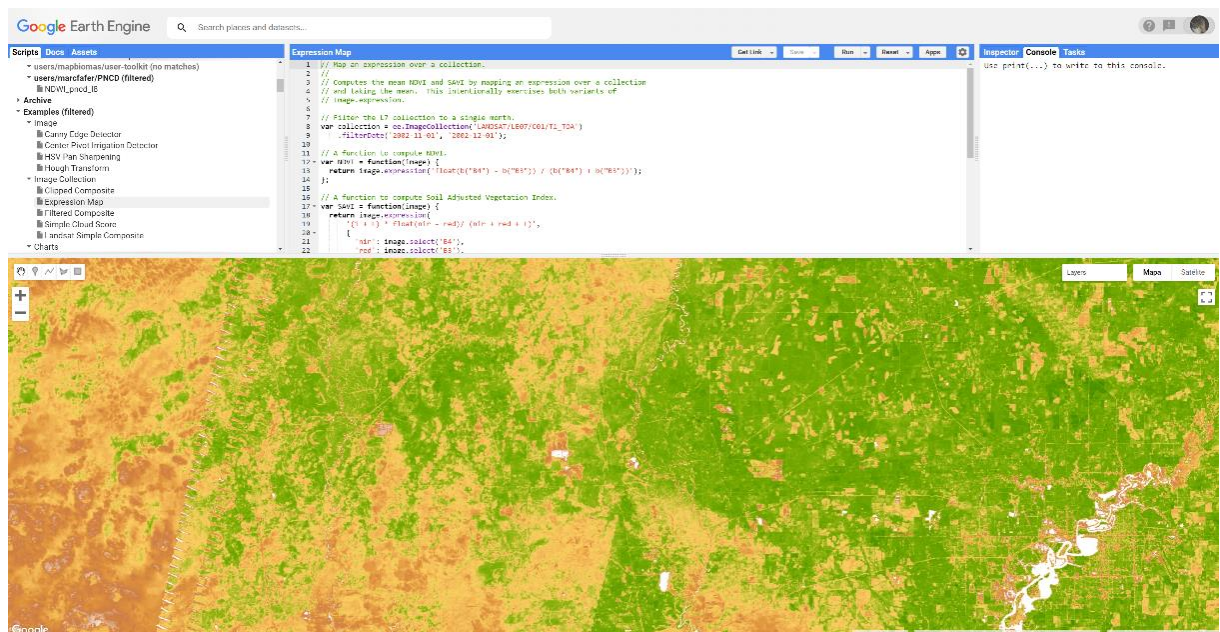
imagens do *Landsat 7*, totalizando 707 terabytes de informação. O processamento levou cerca de 100 horas do GEE e os pesquisadores afirmam que seriam necessárias mais de 1.000.000 de horas em um computador padrão. Sendo assim, salienta-se o ganho na capacidade computacional e de processamento que o GEE trouxe para a seara das análises geoespaciais.

Antes do surgimento do primeiro embrião do GEE, por volta do ano de 2010, diversas entidades oficiais estatais, como a *European Spatial Agency*² – ESA, já tinham plataformas de distribuição de dados de forma gratuita (GORELICK²⁸ et al. 2017; NEMANI⁶⁰, 2011; WOODCOCK⁹⁵ et al., 2008).

Há de salientar, segundo pontua Zhu¹⁰⁰ et al. (2019), que existem diversos benefícios da disponibilização gratuita de acervo de dados espaciais. A abertura estimula o uso, o que justifica o custo empregado na aquisição de dados, bem como estimula novas oportunidades e consolida a ciência que estuda os elementos do sensoriamento remoto, retornando resultados promissores para o uso na sociedade.

A interface da aplicação web, que abarca as ferramentas do GEE, é amigável e provém um amistoso ambiente de manipulação, pesquisa e interação com as ferramentas, conforme observado na Figura 2, porém, para conseguir o total potencial de uso da ferramenta é necessário um aprofundado conhecimento na área de programação e noções básicas de tecnologia da informação (MUTANGA⁵⁹ e KUMAR, 2019; GORELICK²⁸ et al., 2017).

Figura 2 – Interface do Code Editor do GEE com aplicações de índices espectrais utilizando uma coleção inteira de imagens anuais



Fonte: *Google Earth Engine*

A interface de programação, ou *Code Editor* do GEE, é o ponto de comunicação do usuário com a máquina, conforme a política de uso, é o autor e responsável pela produção intelectual gerada no GEE. Após compilado, o script é enviado aos servidores da Google e é processado, retornando os resultados imediatos de visualização e processando em segundo plano as análises solicitadas pelo usuário.

É possível realizar a importação de qualquer acervo disponível para análise desde que sejam respeitadas as políticas de uso, como ocorre a outros acervos, a exemplo do *EarthExplorer do United States Geological Survey*.

O GEE vem se popularizando com o passar do tempo e Kumar⁴³ e Mutanga (2018) pesquisaram e descobriram, até o ano de 2017, importantes pesquisas de potencial, tendências e usos na plataforma.

Os pesquisadores Kumar⁴³ e Mutanga (2018) ranquearam também as regiões que foram mais estudadas e identificaram estatísticas interessantes: aproximadamente 25 das publicações abrangiam o mundo inteiro, enquanto outros 28 estudos estavam na seara continental e aproximadamente 20 estudos estavam utilizando dados de fora da Terra (imagens da Lua, a exemplo).

Foram identificadas também, segundo Kumar⁴³ e Mutanga (2018), maiores tendências de uso para temáticas de: floresta e vegetação, cobertura e uso do solo, ecossistema e sustentabilidade, agricultura, mapeamento, detecção de mudanças, estudos urbanos, desastres, dentre outros.

Após as pesquisas de potencial, tendências e usos, os mesmos pesquisadores, agora em Mutanga⁵⁹ e Kumar (2019), avaliaram os principais usos da plataforma, estratificado em diferentes temáticas: mapeamento e monitoramento de vegetação, mapeamento de cobertura e uso do solo, agricultura e desastres.

O mapeamento e monitoramento da vegetação inclui estudos relacionados às temáticas de biodiversidade, atividades fotossintéticas, queimadas, dentre outras.

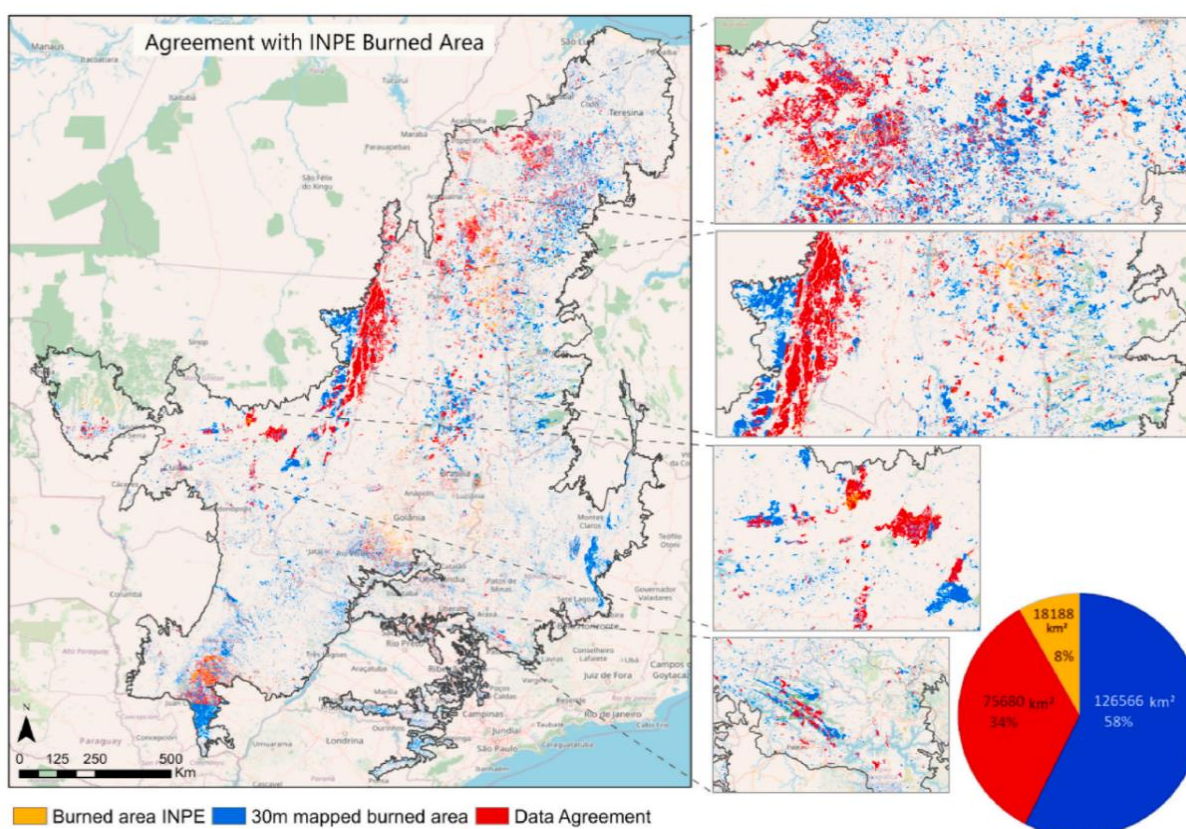
Arruda³ et al. (2021) pontua que o GEE pode ser agregado com os conhecimentos de aprendizado de máquina, potencializando ainda mais os resultados. Esses resultados, conforme objetivam Arruda e colaboradores, podem incluir o mapeamento das cicatrizes de queimada por meio de treinamento de amostras de áreas queimadas e não queimadas, estabelecendo assim a cicatriz de queimada para um bioma inteiro.

A Figura 3 demonstra o sucesso em delimitar as áreas queimadas pela metodologia de Arruda³ et al. (2021), sendo as áreas laranjas as áreas identificadas pelo INPE, as azuis,

identificadas pela metodologia e a vermelha, as áreas correspondentes entre as duas metodologias.

Sob seara do aprendizado de máquina, Chen¹⁵ et al. (2017) propôs, no GEE, uma análise multitemporal para verificação da perda de cobertura de mangues. A pesquisa envolveu uma série de análises sobre índices espectrais, como NDVI, em diversas imagens de diferentes sensores (tais como *Landsat* e *Sentinel*), mostrando grande eficiência no mapeamento e identificação de mangues, conforme indicado na Figura 4. A pesquisa reforça ainda mais um dos grandes pontos do GEE: integração de dados e rapidez de processamento.

Figura 3 – Delimitação das regiões queimadas e comparação com as áreas do INPE



Fonte: Arruda³ et al. (2021)

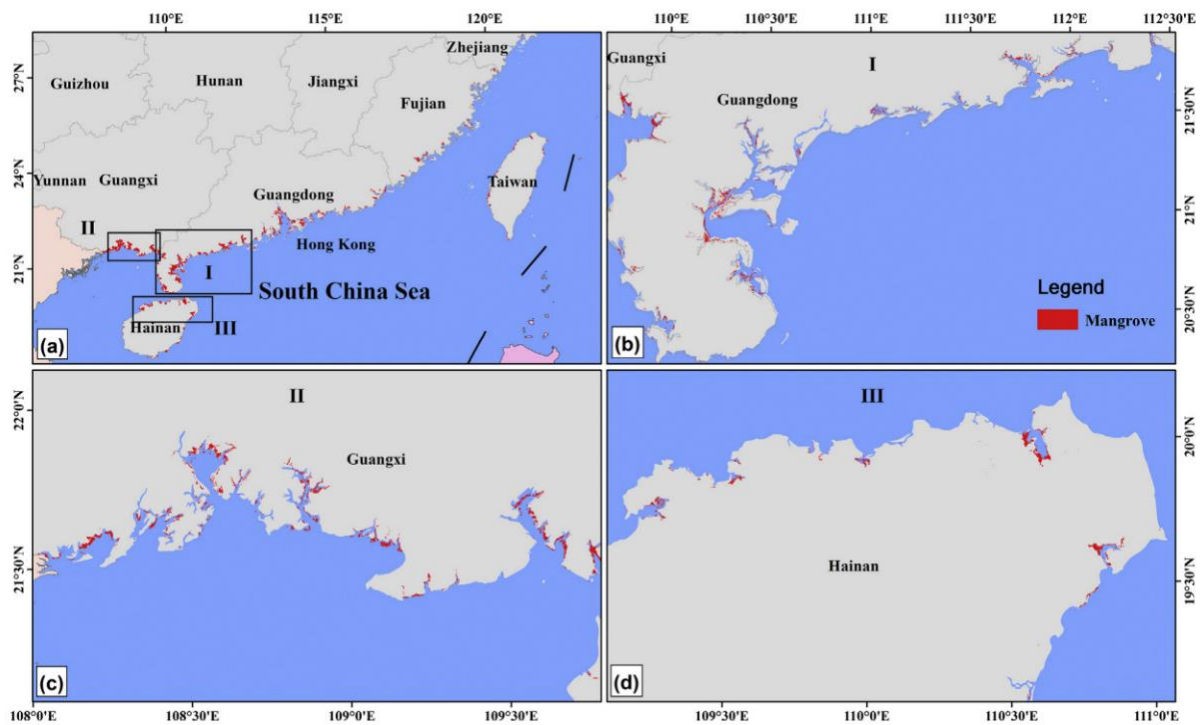
Similar a Chen¹⁵ et al. (2017), Brovelli¹¹ et al. (2020) propôs o monitoramento de mudanças, sob contexto multitemporal, da Floresta Amazônica. Brovelli¹¹ et al. (2020) demonstrou que é possível aliar a questão multitemporal e aprendizado de máquina no GEE, trazendo resultados promissores na questão do monitoramento da cobertura e uso do solo.

Aguilar¹ et al. (2018) utilizou a grande capacidade do GEE para realizar uma pesquisa para fomentar incentivos à resolução de problemas relacionados à agricultura. A pesquisa demonstrou a importância do mapeamento de diferentes tipos de plantações para

direcionamento de esforços e evidenciou os benefícios trazidos pela computação em nuvem agregada à alta capacidade de processamento e à grande quantidade de dados, sem os quais a pesquisa se tornaria inviável.

Tratando-se de análise urbana, Huang³⁵ et al. (2017) demonstram a importância da capacidade produtiva da computação em nuvem. A pesquisa utilizou todas as imagens *Landsat* e uma série de procedimentos de filtragem envolvendo índices espectrais para determinar a perda ou ganho de cobertura vegetal da cidade de Pequim, China. O estudo revelou o potencial de monitoramento multitemporal e procedimentos de filtragem que o GEE oferece, principalmente para detecção de perda e ganho de cobertura vegetal, conforme identificado na Figura 5.

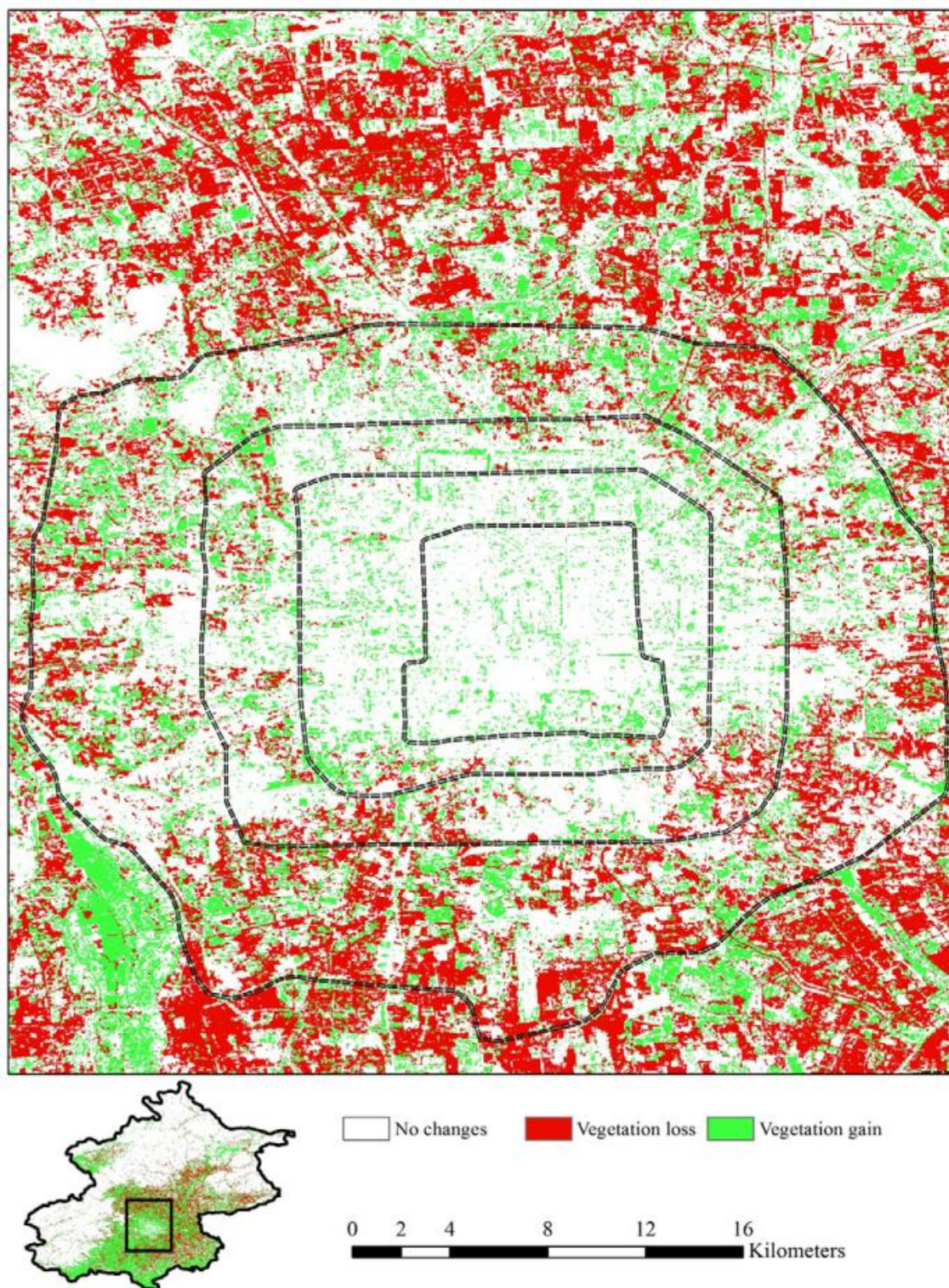
Figura 4 – (a) Classificação do mangue em diversas localidades ao longo da costa chinesa; (b) Aproximação da península de Guangdong; (c) Aproximação da costa de Guangxi; (c) Aproximação da ilha de Hainan



Fonte: Chen¹⁵ et al. (2017)

É possível observar a crescente demanda pelos serviços em nuvem da Google, pois estão surgindo diversos trabalhos, em diferentes áreas, que objetivam explorar as capacidades da plataforma e entregar resultados, que, antes da capacidade produtiva do GEE, seriam inviáveis do ponto de vista logístico, humano e computacional.

Figura 5 – Demonstração da dinâmica de cobertura vegetal de Pequim



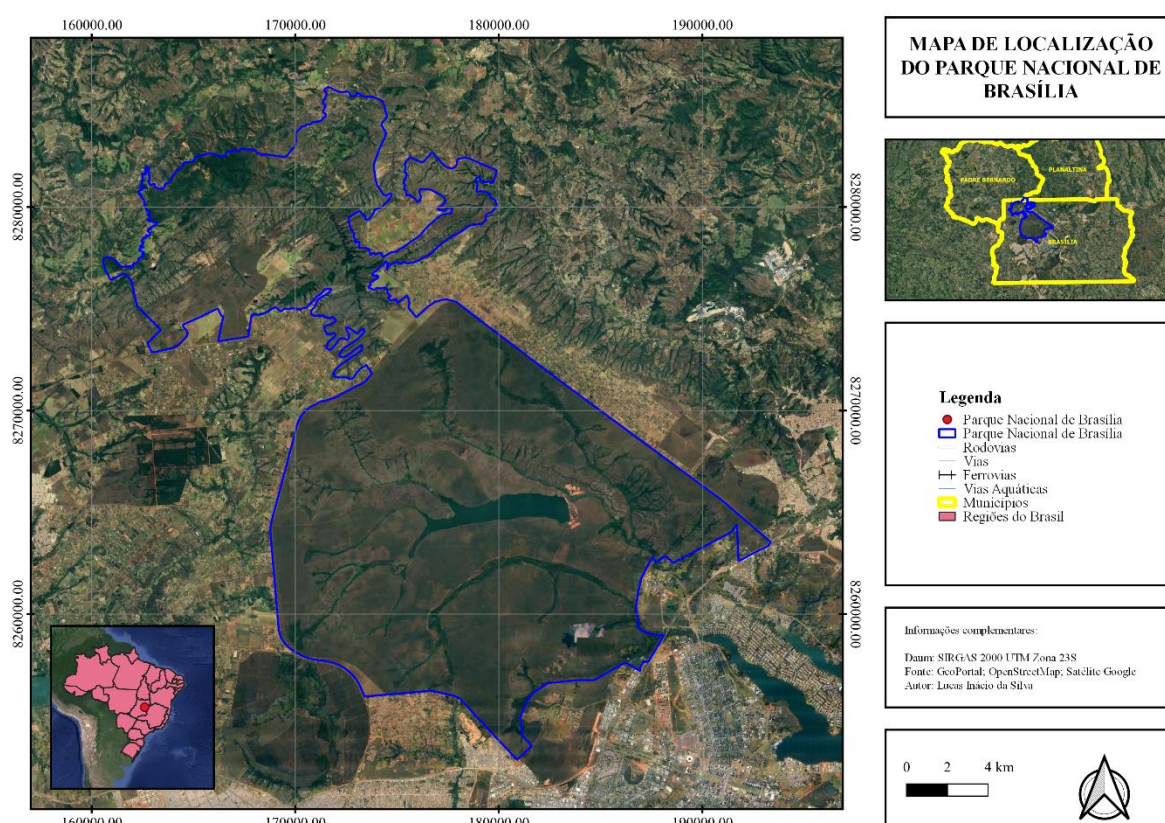
Fonte: Huang³⁵ et al. (2017)

3. MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é o PARNA Brasília situado na porção noroeste do Distrito Federal, conforme demonstrado pela Figura 6, e tem como objetivo a constante preservação de ecossistemas naturais de grande importância ecológica possibilitando o desenvolvimento de atividades de educação ambiental, recreação e o realização de atividades científicas (NETO⁶¹ et al., 2016).

Figura 6 – Mapa de Localização do PARNA Brasília



Fonte: Autor

O Parque é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, ou seja, o uso direto do solo é proibido e quaisquer propriedades que se encontrem no limite territorial devem ser desapropriadas. As políticas de visitação e uso indireto do solo devem ser definidas nos planos de manejo da unidade de conservação (LIMA⁴⁵ et al., 2005; CAMARGOS¹², 2001).

Cabe ressaltar que o plano de manejo, segundo Medeiros⁵² e Pereira (2010) é o documento técnico, cuja inexistência inutilizaria a criação da unidade de conservação, pois é

por meio deste que se estabelece o zoneamento, as diretrizes e a logística para a estrutura de gestão da unidade de conservação.

O PARNA Brasília foi criado em 29 de novembro de 1961 sob o Decreto Nº 241 e possui uma área de aproximadamente 42.389,01 hectares com extensões nas regiões administrativas de Brasília, Sobradinho, Brazlândia e uma porção do município goiano de Padre Bernardo (SABBATINI⁷⁵ et al., 2005; BRASIL¹⁰, 2006).

O PARNA Brasília não possui instrumentos de coleta meteorológico e as estações oficiais mais próximas, segundo seu plano de manejo, são as do Instituto Nacional de Meteorologia e o Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. A região propicia duas estações bem definidas: o período seco e o período chuvoso (IBAMA³⁷).

Conforme citado em seu plano de manejo a precipitação e temperatura média anual da região estão na ordem de 1.600mm e 21°C respectivamente com umidade relativa do ar oscilando extremamente durante o dia (IBAMA³⁷).

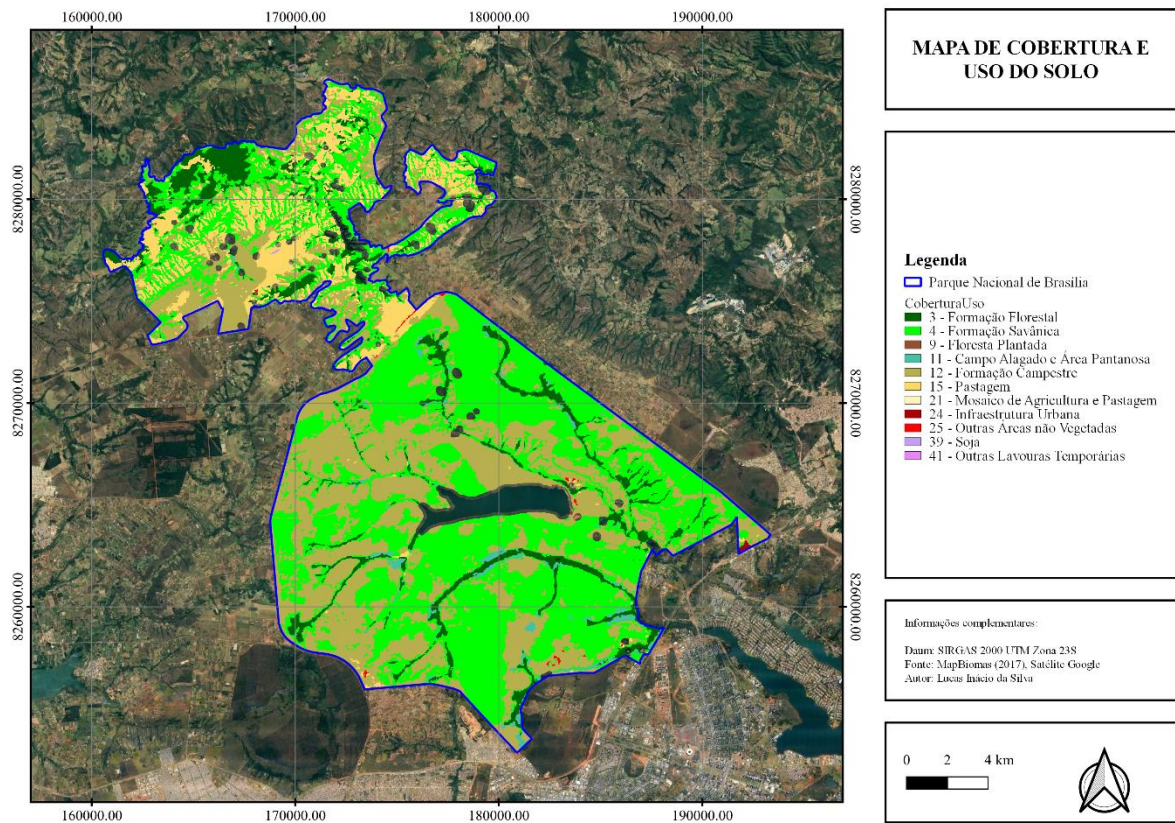
Quanto à caracterização ambiental, é possível observar as formações de bacias hidrográficas, as geológicas, as geomorfológicas, e as pedológicas. Nota-se que o limite do PARNA Brasília abrange duas grandes regiões hidrográficas do Brasil, as pertencentes ao Rio Paraná e ao Rio Tocantins. A presença da barragem de Santa Maria comporta águas puras proveniente de nascentes protegidas pelo parque. Além de servir como forma segura indireta para consumo, funciona como reserva técnica para períodos de estiagem no Distrito Federal¹ – DF.

Na estrutura dos solos, há a presença quase que absoluta de latossolos e cambissolos com uma pequena parcela de gleissolos localizada ao sudeste do PARNA Brasília e uma ínfima parcela de argissolo localizada ao norte.

Na Figura 7, é possível compreender a dinâmica de cobertura e uso do solo determinada pelo projeto MapBiomas que visa rodar um algoritmo de inteligência artificial para analisar anualmente os produtos da série *Landsat*.

O produto de cobertura e uso do MapBiomas é disponível gratuitamente em seu portal e compreende a série histórica de 35 anos, até a data desta dissertação (SOUZA⁸¹ et al., 2020).

Figura 7 – Mapa de Cobertura e Uso do Solo do PARNA Brasília



Fonte: Autor

ACERVO DE DADOS

Foi utilizado, dentro do GEE, o acervo de imagens multiespectrais do programa *Copernicus* obtidas pelo satélite *Sentinel-2*. A coleção de dados retorna todas as cenas capturadas pelo sensor desde o momento de seu lançamento, organizada em coleções com diferentes níveis de pré-processamento (como por exemplo correções atmosféricas).

A Tabela 1 exibe as informações sobre o *MultiSpectral Instrument*⁸ – MSI bem como suas respectivas resoluções espaciais e características de comprimento de ondas.

As imagens da biblioteca foram obtidas pelo programa Copernicus da ESA por meio da missão *Sentinel-2*, que consiste em uma constelação de 2 satélites que monitoram a superfície terrestre.

A constelação de satélites da missão possui a resolução temporal de 5 dias e embarcado nos aparelhos estão os sensores MSI, que registram 13 bandas de informações com resolução radiométrica de 12-bit, ou seja, são 4096 níveis de cinza possíveis.

O acervo utilizado foi o “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C”. As imagens desse segmento, segundo a ESA, já foram sistematicamente processadas pelas estações de controle terrestre, que no caso para as imagens do Sentinel-2 é o *Payload Data Ground Segment*¹⁴ – PDGS. Essa coleção realoca os valores dos pixels das imagens obtidas após 25 de janeiro de 2022, para que respeite o intervalo de valores dos dados antigos.

Tabela 1 – Características do sensor MSI

Resolução espacial [metros]	Banda	Nome	S2A – Comprimento de onda central [μm]	S2B – Comprimento de onda central [μm]
10	2	<i>Blue</i>	0,4924	0,4921
	3	<i>Green</i>	0,5598	0,5590
	4	<i>Red</i>	0,6646	0,6649
	8	<i>Near Infrared</i>	0,8328	0,8329
20	5	<i>Red Edge 1</i>	0,7041	0,7038
	6	<i>Red Edge 2</i>	0,7405	0,7391
	7	<i>Red Edge 3</i>	0,7828	0,7797
	8a	<i>Red Edge 4</i>	0,8647	0,8640
	11	<i>SWIR 1</i>	1,6137	1,6104
	12	<i>SWIR 1</i>	2,2024	2,1857
60	1	<i>Aerosols</i>	0,4427	0,4422
	9	<i>Water Vapor</i>	0,9451	0,9432
	10	<i>Cirrus</i>	1,3755	1,3769

Fonte: ESA (adaptado pelo autor)

Os produtos do “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C” já são enviados do PDGS com a telemetria analisada, descomprimidos, com as devidas correções e calibrações radiométricas e geométricas e com valores reamostrados para dados de reflectância.

Embora o produto não apresente solução para calibração atmosférica, e o foco será desenvolver a pesquisa dentro da plataforma que será feita no GEE, a devida calibração foi com plugins e soluções internas, conforme será explicitado a seguir.

Não foi utilizado a o acervo “Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C”, pois, segundo a ESA, imagens coletadas a partir de 25 de janeiro de 2022 apresentam um deslocamento no valor digital do pixel em escala de 1000, já corrigidos na coleção harmonized, e esse deslocamento poderá interferir em processos automáticos de visualização e composição no editor de mapas do GEE.

Tampouco foi utilizado o “Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A”, ainda essa coleção traga a o processamento Sen2Cor, o base da atmosfera (*bottom of atmosphere*), corrigindo a atmosfera, terreno e *cirrus* dos dados de (*top of atmosphere*) do Level-1C, ela não contempla todo o período de aquisição de imagens, logo, as análises em períodos mais antigos podem ser prejudicadas pela falta de imagens corrigindo.

Correção Atmosférica

A análise de dados no sensoriamento remoto é balizada por alguns elementos norteadores, dentre eles o processo de calibração radiométrica e de correção atmosférica. Mitigar os efeitos atmosféricos nos dados de satélite é um dos primeiros objetivos quando se faz análises temporais. Os dados obtidos pelos satélites constam informações de topo de atmosfera (*top of atmospheric*), ou topo de atmosfera. O processamento com as mitigações necessárias sugere a correção desses dados para os patamares da base de atmosfera, ou reflectância de superfície.

O processamento das informações geralmente se dá em softwares específicos cujo código fonte possui algoritmos de correção, a exemplo do Sen2Cor. A presente pesquisa visa a construção de uma ferramenta automatizada no GEE, logo, é de grande importância mitigar processamentos fora da plataforma, evitando downloads e uploads de grandes massas de dados. Para isso, foi utilizado, como metodologia de correção atmosférica, a aplicação do *Sensor Invariant Atmospheric Correction*¹⁶ – SIAC, utilizado e validado por MarcYin⁴⁹ (2019), MarcYin⁵⁰ (2019) e Yin⁹⁷ et al. (2022). O algoritmo SIAC foi incorporado ao processo metodológico da pesquisa visando realizar as devidas correções atmosféricas das cenas.

O presente algoritmo foi incorporado como pacote de plugin dentro do GEE, e já foi utilizado em pesquisas, como de Nursaputra⁶³ et al. (2021) e Carella²⁰ et al. (2022).

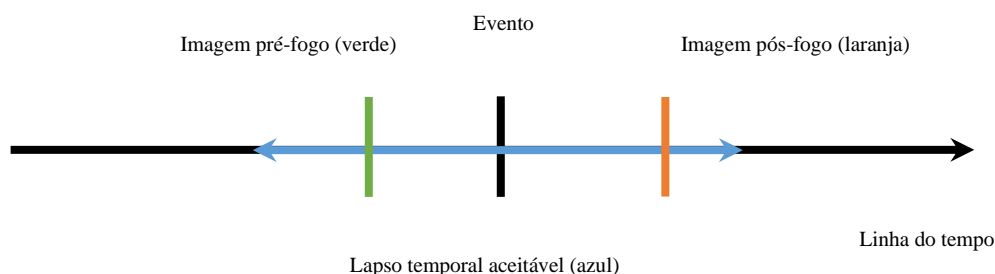
FILTRAGEM DE DATAS

Para criação do modelo foi necessário, por meio de dados oficiais, identificar um período, identificado como “evento”, em que houve anomalias climáticas no PARNA Brasília. Essa identificação vai servir como elemento norteador para escolha de um período no qual seja possível escolher o marco de ocorrência do evento, estabelecendo o período pré- e pós-fogo.

Essa análise é essencial para verificação da existência de imagens de boa qualidade para a análise e também imagens que respeitem o marco temporal do evento. A identificação do período de análise permitiu a verificação do acervo de imagens disponíveis bem como a análise de qualidade da imagem no que tange a: disponibilidade de imagens, interferência de nuvens e interferência da própria fumaça. Os períodos de queimadas foram identificados com auxílio dos sistemas de identificações meteorológicas do INPE.

O evento foi identificado por meio de uma data específica, que está contida no sistema de banco de dados, e analisado imagens pré-fogo, que identificam as condições do local no momento anterior ao evento, e pós-fogo, que identificam o impacto causado pela queimada, conforme ilustrado no esquema da Figura 8.

Figura 8 – Lapso temporal de identificação do evento



Fonte: Autor

A escolha da imagem baseou-se no critério da “imagem perfeita”: cena sem presença aparente de nuvem, fumaça ou sombras acentuadas. Alguns períodos apresentaram problemas insolúveis, como presença de nuvens na região em imagens com lapso temporal aceitável.

O lapso temporal do evento precisa ser respeitado para que a análise das condições físicas representadas nos índices sejam as mais próximas o possível da realidade em que o evento ocorreu. Não foram utilizadas imagens em um lapso temporal maior do que 90 dias da data, embora a maioria das imagens selecionadas para a construção do modelo não foram escolhidas utilizando os extremos do lapso.

FILTRAGEM ESPACIAL DAS CENAS

Alguns índices espectrais, como o NDVI por exemplo, apresentam sensibilidade quando submetido a pixels de determinados materiais ou condições, tais como nuvens e sombras a respectivos exemplos, conforme identificado na Figura 9, o que pode contaminar a área adjacente ao pixel.

Figura 9 – Identificação situações problemáticas



Fonte: Autor

A fim de minimizar o problema de contaminação foi incluído na metodologia do trabalho um processo de filtragem de imagem que se baseou na identificação de elementos contaminantes nas imagens.

A identificação dos elementos contaminantes possibilitou a criação de uma máscara de filtragem, designada para remover a influência desses materiais na composição da imagem. Foi criada uma máscara para cada tema contaminante analisado, que, a princípio, se restringiu em nuvens, corpos d'água e sombras densas.

Como metodologia de identificação, foi utilizado as informações de qualidade disponíveis no próprio dado, bem como a composição de índices espectrais já validados que discriminam os materiais citados com o menor grau de confusão o possível.

É possível observar que existem métodos que respondem melhor a identificação do material do que outros, porém há de se salientar que o mesmo pixel pode ser observado por um método e por outro não, por isso a combinação de métodos maximiza a captura do pixel, e por consequência, segurança na identificação do material. Além disso, conforme observado na

Figura 15, os limiares que serão estabelecidos podem não abarcar todo o material, a exemplo dos extremos dispersos da nuvem, sendo assim, técnicas de buffers serão utilizadas para mitigar o que os índices não conseguirem localizar, ou não puderem sem gerar ruídos na imagem.

Há de salientar que não se utilizou valores abusivos nos limiares, justamente para evitar identificações errôneas das zonas de transição de materiais, a exemplo de regiões queimadas que possuem o mesmo comportamento de solo nos índices NDVI e NBR

Máscara geral de nuvens

Por meio de processos de filtragem de bits, foi possível identificar a presença de nuvens. A filtragem da banda “QA60” do satélite *Sentinel-2* permite a identificação de formações densas de nuvens com um elevado grau de precisão da identificação, pois trabalha com informações obtidas pelo próprio segmento de controle do satélite, que processa e controla a aquisição de informações do programa.

Por mais que a identificação de nuvens seja considerada adequada pela banda QA60, ainda podem existir remanescentes mais esparsos de colunas de nuvens que por sua vez podem não ser identificados pelo processamento da banda.

Magno⁴⁷ et al. (2021), em sua ferramenta de detecção de nuvens para agricultura, indicou a reflectância transformada da Banda 12 do sensor MSI do satélite *Sentinel-2*, conforme identificada na equação 1.

$$CSI = \frac{(1 - \rho_{2,2})^2}{2 \times \rho_{2,2}} \quad \text{equação 1}$$

Os entendimentos de Magno⁴⁷ et al. (2021) vão além da equação citada, porém, em virtude da complexidade das técnicas de integração proposto em seu modelo, apenas o produto descrito na equação, quando filtrado nos limiares estudados, é necessário para discretizar as regiões sombreadas, em especial pelas nuvens, em virtude do comportamento específico da banda SWIR2,2.

O produto *Sentinel Cloud Probability* é uma solução provida pelo *Sentinel Hub* sob as premissas do aprendizado de máquina bem como suas ferramentas. O produto foi desenvolvido sobre o algoritmo *Sentinel2-Cloud-Detector*, em conjunto com a biblioteca *LightGBM*, que é um framework de alta performance baseado em árvore de decisões, ou seja, perfeito para classificação e diversas outras demandas de *Machine Learning*.

O algoritmo *Sentinel2-Cloud-Detector* foi desenvolvido para analisar as informações das bandas do satélite *Sentinel-2* (mais precisamente as bandas B01, B02, B04, B05, B08, B8A,

B09, B10, B11 e B12) bem como suas inter relações, modeladas pelos valores brutos dos pixels, as diferenças entre elas e as suas diferenças normalizadas.

De acordo com o Sentinel-2 Hub, essas relações de entrada do dado são analisadas sob a ótica da modelagem computacional envolvendo aprendizagem de máquina. O processamento consiste basicamente em uma classificação baseada em pixel, cujo valor determina a probabilidade daquele pixel representar uma cobertura de nuvem.

Segundo o time de desenvolvedores do Sentinel-2 Hub, o algoritmo mostrou resultados satisfatórios e promissores quando comparados com algoritmos de identificação de nuvem já conhecidos do Sentinel-2, tais como Fmask e Sen2Cor.

O produto final é reamostrado para 10 metros, compondo assim a cena padrão obtida pelo Sentinel-2. Os valores contidos nos pixels representam um intervalo de 0 a 100, o que indica a probabilidade daquele pixel ser classificado como nuvem.

Para dar consistência e redundância no processo de filtragem, foi combinado o resultado da máscara da banda QA60 com o índice espectral de identificação de nuvens para o *Sentinel-2* o *Cloud Shadow Index* bem como o produto *Sentinel Cloud Probability*.

Máscara geral de corpos hídricos

Para a identificação de corpos hídricos, foi utilizado o índice *Normalized Difference Water Index*¹² – NDWI em conjunto com o *Sentinel Water Mask*¹⁷ – SWM.

Proposto por McFeeters⁵¹ (1996), o NDWI é um índice que objetiva maximizar a reflectância da banda verde e minimizar a reflectância da banda NIR dos corpos de água. O limite de identificação proposto pelo autor é o valor 0, porém o índice foi desenvolvido para o sistema de satélites *Landsat*.

O NDWI possui grande precisão na discretização de corpos hídricos, visto o comportamento espectral singular da água nas bandas verde e vermelho. A detecção de corpos hídricos é possível tanto em ambientes urbanos quanto em corpos maciços de água de tamanho considerável, quando se utiliza resoluções espaciais médias (YANG⁹⁶ et al., 2017; DU¹⁸ et al., 2016). Conforme a equação 2, é possível observar a aritmética de bandas referentes ao NDWI.

$$NDWI = \frac{\rho_{0,55} - \rho_{0,65}}{\rho_{0,55} + \rho_{0,65}} \quad \text{equação 2}$$

Milczarek⁵⁷ et al. (2017), em sua pesquisa, objetivaram criar um novo índice de detecção de corpos d'água. Após a análise minuciosa das amostras espectrais do alvo perceberam a alta reflectância nas bandas B2 e B3, enquanto as bandas B8 e B11 representaram o menor comportamento de reflectância.

Sendo assim o índice SMW foi desenvolvido objetivando discretizar os copos d'água, mostrando acurácia geral de 96% na detecção de corpos hídricos (MILCZAREK⁵⁷ et al., 2017). A aritmética de bandas pode ser conferida conforme a equação 3.

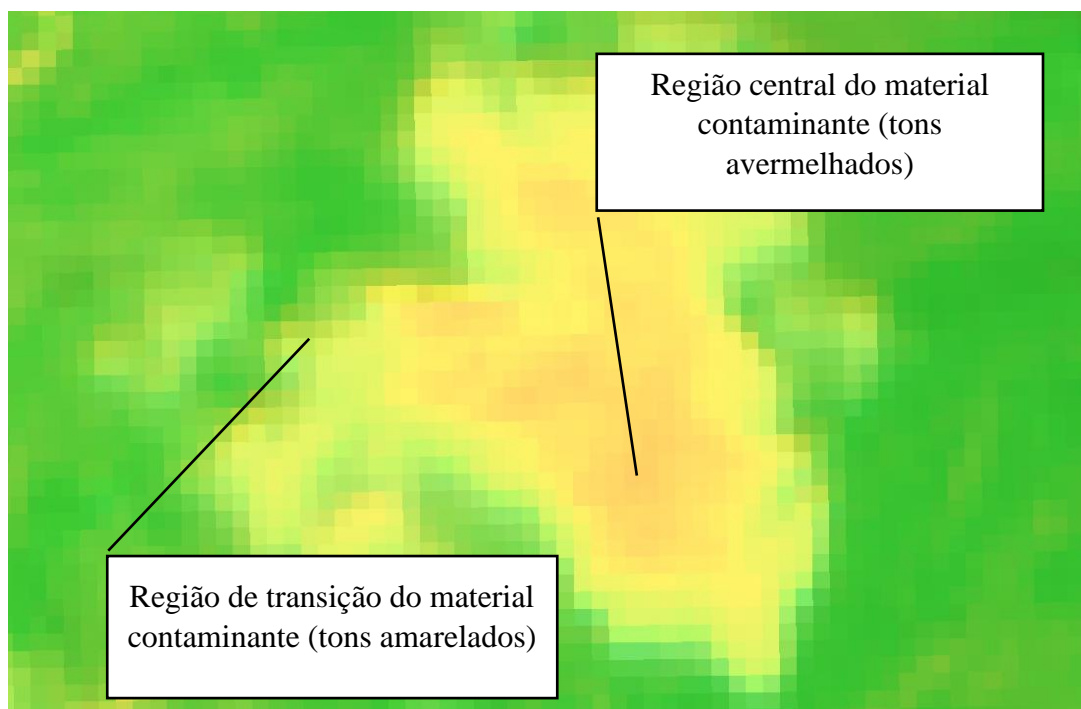
$$SWM = \frac{\rho_{0,45} + \rho_{0,55}}{\rho_{0,85} + \rho_{1,60}} \quad \text{equação 3}$$

Máscara geral do evento

A máscara final de cada cena do evento foi produzida pela combinação das máscaras respectivas de cada tema (máscara de nuvem e sombra de nuvem junto com a máscara de corpos hídricos). Essa combinação refere-se a sobrepor cada tema discriminado para produzir uma máscara homogênea, para facilitar o processamento na plataforma.

A eficiência da aplicação de índices espectrais e da análise de qualidade do dado foi aperfeiçoada por meio de processo de buffers, ou amortecimento, nas regiões mascaradas. Os buffers gerados serviram para reduzir a região de transição, que às vezes pode não ser identificada com os processos de filtragem. Esse processo ajudou a minimizar as variações gradativas que ocorrem nas transições liberando, das regiões de interesse, o erro da análise visual dos valores quando submetidos a uma paleta de cores ou até mesmo uma inspeção no valor.

Figura 10 – Regiões de transição dos materiais contaminantes



Fonte: Autor

Por meio de processos de observação, será utilizado um valor de 12 pixels do *Sentinel-2* como *buffer*, o que se aproxima a 120 metros. A escolha da distância baseou-se em observações empíricas já realizadas em processos semelhantes. Com a aplicação do *buffer* nas máscaras, será possível gerar a máscara final da cena, uma para a cena pré-fogo e uma para a cena pós-fogo.

A fim de homogeneizar a análise espacial do dado, no decorrer no mesmo evento, foi criada a “máscara geral do evento”. A máscara geral do evento é um produto que contém a máscara da cena pré-fogo combinada com a cena pós-fogo, conforme a Figura 16,

Figura 11 – Composição da máscara geral do evento



Fonte: Autor

A combinação das cenas, que gera a máscara geral do evento, serviu para eliminar de ambas as cenas as regiões que apresentaram problemas na análise espacial, seja por ocorrência de nuvem, corpos d’água, sombras ou até mesmo fumaça. A eliminação, em ambas as cenas, permitiu uma interpretação geral do evento, eliminando a interferência de materiais das cenas.

ÍNDICES ESPECTRAIS

A combinação e análise dos índices espectrais é a proposta central da modelagem, e será balizada na máscara do evento, cujo objetivo é remover os materiais contaminantes e deixar a cena homogênea.

Índice PSRI

O PRSI mede a senescência e saúde da vegetação por meio da dinâmica de pigmentação influenciada pela química da planta a qual produz diferentes respostas espectrais (MERZLYAK⁵⁵ et al., 1999). O PRSI foi pensado para maximizar a sensibilidade em relação aos carotenoides e clorofila da planta sendo que essa relação possibilita identificar o grau de estresse da planta (ZHANG97 et al., 2018)

Para o cálculo do PSRI (MERZLYAK et al., 1999) foi necessário construir uma função com base na equação 4.

$$PSRI = \frac{\rho_{0,65} - \rho_{0,45}}{\rho_{0,75}} \quad \text{equação 4}$$

Valores altos indicam um estresse vegetativo no sentido de envelhecimento da vegetação destacando a alta do pigmento carotenoide, responsável pela cor amarelada na vegetação senescente (ZAGAJEWSKI⁹⁸ et al., 2017; MERZLYAK⁵⁶ e SOLOVCHENKO, 2002).

Assim como os outros índices, este também apresenta intervalos de análise. Para Merzlyak⁵⁵ et al. (1999), o índice demonstra a sensibilidade da clorofila em relação aos carotenoides e, distribuído no intervalo de números, os valores negativos representam a malha vegetal verde com alta composição de clorofila, o intervalo de -0,1 a 0,2 indica o início do estágio de envelhecimento e os intervalos finais indicam o estágio final de senescência do dossel, logo, é uma análise contrária da escala numérica, se comparado aos outros índices.

Índice NDVI

O NDVI evidencia o verdor da vegetação baseando-se absorção do vermelho e do infravermelho próximo através de uma simples matemática de banda entre as camadas do vermelho (0,65 µm) e infravermelho próximo (0,85 µm) a qual pretende criar uma representatividade entre os alvos de maior emissão de vermelho e infravermelho (SZABÓ⁸⁴ et al., 2016; MASCARENHAS⁴⁸ et al., 2009 BAPTISTA⁶, 2004; ROUSE⁷³ et al., 1974).

Para o cálculo do NDVI (ROUSE⁷³ et al, 1974) foi necessário construir uma função com base na equação 5 utilizando as bandas vermelho e infravermelho próximo, a qual deverá seguir:

$$NDVI = \frac{\rho_{0,85} + \rho_{0,65}}{\rho_{0,85} + \rho_{0,65}} \quad \text{equação 5}$$

O índice varia de -1 a 1 onde valores abaixo de 0,2 evidenciam ausência de atividade fotossintética, ou seja, o índice evidencia o grau de verdor da vegetação por meio do ganho da banda do vermelho sobre a do infravermelho próximo destacando a vegetação com aspecto mais verde (DUAN¹⁹ et al., 2017), e os valores do intervalo de 0,2 até 1 representam, de forma gradativa, o nível de verdor da vegetação segundo seus padrões saúde.

O NDVI indica o verdor da vegetação e reforça o entendimento da submissão da vegetação a estresses físicos que podem alterar a composição da sua estrutura celular

interferindo nos processos metabólicos básicos da planta (LEAL⁴⁴ et al., 2019; LOBATO⁴⁶ et al., 2010).

Segundo os entendimentos de Hashim³² et al. (2019), Silva⁷⁸ e Baptista (2015) e Townshend⁹⁰ et al. (1994), a variação de -1 a 1 indica o intervalo de compreensão dos dados do índice, sendo que valores abaixo de 0,2 têm a maior probabilidade de serem alvos não vegetados ou densas regiões de nuvens adjacentes à área do pixel.

Índice NDII

O NDII explica a umidade do dossel das árvores por meio de uma matemática de bandas similar ao NDVI, porém, nesse caso se utilizem as camadas de informação do NIR em conjunto com o SWIR de 1,60 µm (SRIWONGSITANON⁸³ et al., 2015; HARDISKY³¹ et al., 1983). A interação da vegetação com a radiação, especialmente nessa faixa do espectro, depende do volume de água na estrutura celular da folha (CECCATO¹⁴ et al., 2001; HUNT³⁶ e ROCK, 1989).

Para o cálculo do NDII (HARDISKY³¹ et al., 1983) foi necessário construir uma função com base na equação 6 a qual utiliza as bandas vermelho e infravermelho próximo, a qual deverá seguir:

$$NDII = \frac{\rho_{0,85} - \rho_{1,60}}{\rho_{0,85} + \rho_{1,60}} \quad \text{equação 6}$$

O índice varia de -1 a 1, cujo valores abaixo de 0 indicam que a refletância do NIR é maior que a refletância do SWIR o que pode evidenciar um estresse hídrico da vegetação (SRIWONGSITANON⁸³ et al., 2015).

Para Sriwongsitanon⁸² et al. (2016), Sriwongsitanon⁸³ et al. (2015) e Hardisky³¹ et al. (1983), a seção relacionada ao NIR é sensível a presença de água estrutura do tecido vegetal, corroborado por processos metabólicos de fotossíntese da planta e a seção relacionada ao SWIR também tem sensibilidade à presença de água no conteúdo vegetal, e conforme os autores observaram, o maior diferença, em relação ao teor de água, ocorre na região no SWIR o que potencializa o uso do índice para explicação do teor de umidade da estrutura analisada.

Índice NBR

O NBR realça as áreas queimadas (KEY⁴² e BENSON, 1999), por meio de uma matemática de bandas similar aos índices anteriores e pode ainda servir de base para outro cálculo que é o da diferença normalizada para os períodos pré e pós fogo avaliando com mais

precisão a severidade do evento (BABU⁴ et al., 2018; SILVA⁷⁹ e BAPTISTA, 2015; KEELEY³⁹, 2009; KEY⁴⁰ e BENSON, 2006; KEY⁴¹ e BENSON, 2006).

Para o cálculo do NBR e Δ NBR foi necessário construir uma função com base, respectivamente, na equação 7 e equação 8, utilizando as bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas (KEY⁴² e BENSON, 1999).

$$NBR = \frac{\rho_{0,85} - \rho_{2,20}}{\rho_{0,85} + \rho_{2,20}} \quad \text{equação 7}$$







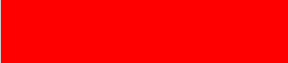
$$\Delta NBR = NBR_{Pré-fogo} - NBR_{Pós-fogo} \quad \text{equação 8}$$

É possível relativizar o NBR por meio da equação 8, que segundo os entendimentos de Miller⁵⁸ e Thode (2007) e Roy⁷⁴ et al. (2006), detalha e discretiza os graus de severidade.

A criação do índice Δ NBR permite uma série de observações acerca do evento de fogo, dentre elas: analisar a severidade da queimada e criar a máscara de extração de valores. O Δ NBR é criado pela simples aritmética de bandas compostas pelos índices NBR pré-fogo e pós-fogo.

Miller⁵⁸ e Thode (2006) indicam os intervalos de severidade representados pelo evento. A gradação de escala representa o escalonamento da severidade da queimada na medida em que o índice vai ganhando maior magnitude no valor do pixel, conforme identificada da Tabela 4.

Tabela 2 – Quantificação da severidade da queimada (multiplicado por 1000)

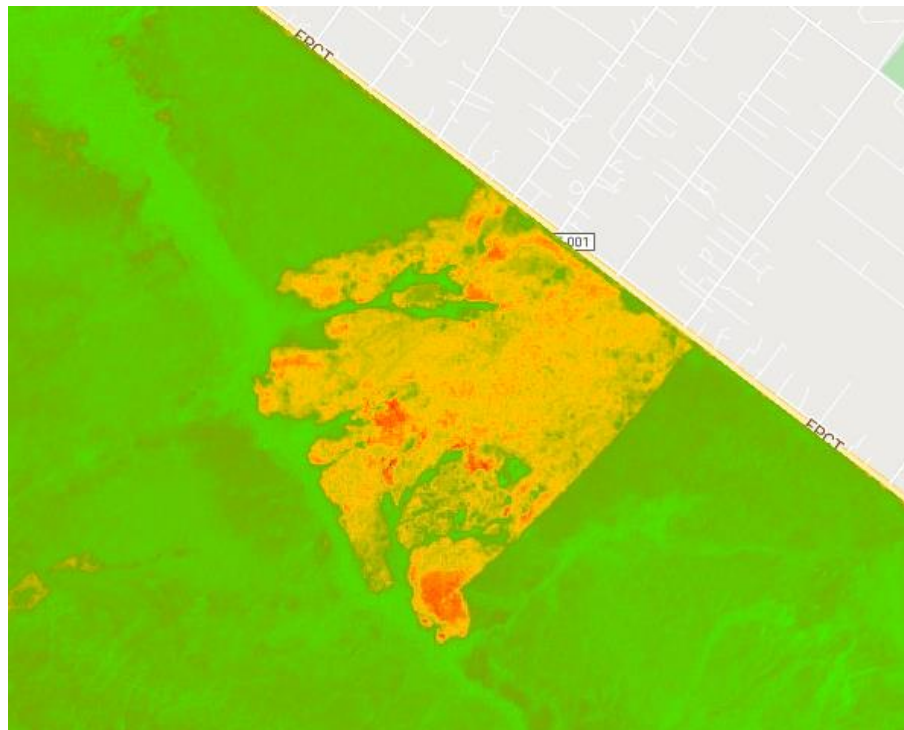
Nível de severidade	Intervalo	Cor
Alta rebrota	-500 a -250	
Baixa rebrota	-250 a -100	
Não queimada	-100 a 100	
Baixa severidade	100 a 270	
Severidade moderada baixa	270 a 440	
Severidade moderada alta	440 a 600	
Alta severidade	660 a 1.300	

Fonte: Miller⁵⁸ e Thode (2006) (adaptado pelo autor)

A seleção das áreas de determinada classe de severidade torna-se fácil quando se tem os intervalos de severidade. A geração das máscaras de extração de valores deu-se pela delimitação

das regiões consideradas queimadas, identificadas no Δ NBR. A Figura 12 ilustra o visual do Δ NBR com a devida classificação de severidade.

Figura 12 – Cena contendo o cálculo do Δ NBR com as severidades atribuídas a uma máscara de queimada



Fonte: Autor

EXTRAÇÃO DE VALORES

A partir da máscara de severidade de queimada, obtida pelo cálculo do Δ NBR, foi possível identificar e segregar as regiões de interesse para a extração de valores. Para cada centroide do pixel serão extraídos os valores de: PSRI, NDVI, NDII, Severidade da queimada e Cobertura e Uso. Os valores de PSRI, NDVI, NDII e Severidade da queimada são obtidos pelos cálculos dos índices espectrais da metodologia.

Os dados extraídos foram obtidos na máscara de valores considerados “queimados” na imagem pós-fogo e serão confrontados na imagem pré-fogo, visando extrair da imagem pré-fogo os valores referentes às condições anteriores ao fogo.

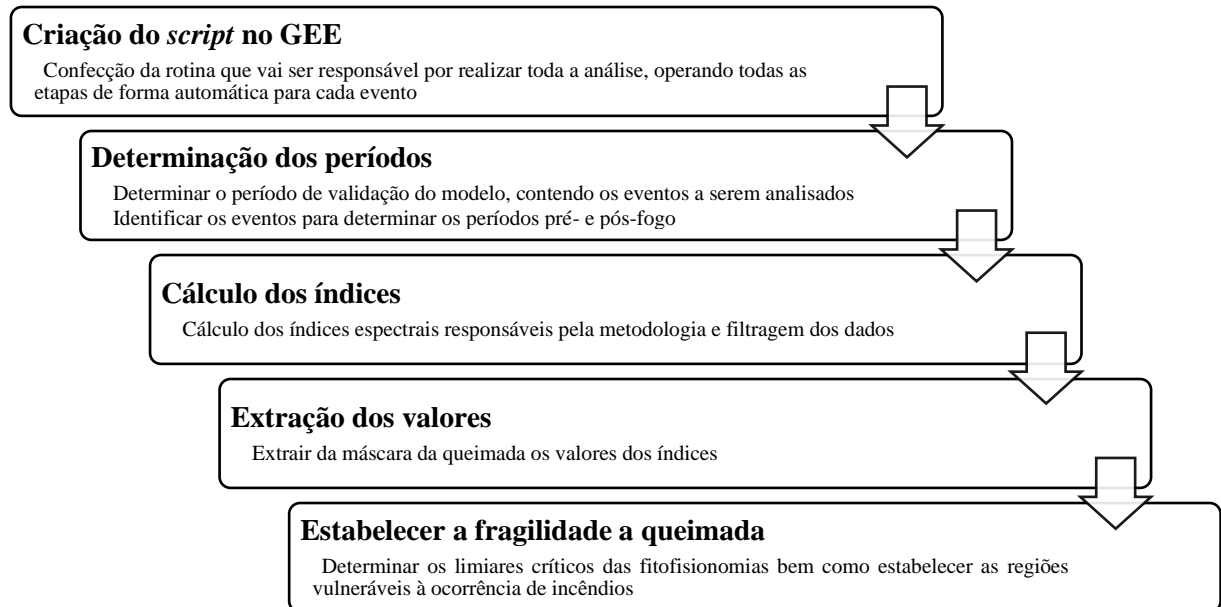
Para definição dos limites críticos de cada índice, foi feita uma análise estatística dos quatro períodos selecionados no primeiro passo da metodologia. Será analisada a massa de dados contendo os valores extraídos, bem como valores médios e extremos, para determinação do limiar. Será utilizado o valor médio observado nos dados extraídos, observando sempre o limite desfavorável do índice: no caso do PSRI serão os valores do sentido positivos, pois os

valores indicam uma maior senescência e no NDVI e NDII serão os valores do sentido negativos, pois indicam as condições desfavoráveis dos índices.

FLUXOGRAMA

Como forma de elucidar o caminho a ser seguido é possível observar na Figura 13 o fluxograma de análise da metodologia proposta.

Figura 13 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

FILTRAGEM DE DATAS

Após pesquisa no acervo indicativo de prováveis datas de incêndios florestais no PARNA Brasília, constatou-se as seguintes datas nos produtos Sentinel-2:

- Evento 1: 11/08/2017 e 15/09/2017;
- Evento 2: 26/08/2018 e 10/09/2018;
- Evento 3: 13/05/2019 e 12/07/2019;
- Evento 4: 02/04/2020 e 12/05/2020;
- Evento 5: 05/08/2021 e 09/09/2021;
- Evento 6: 02/04/2022 e 02/05/2022.

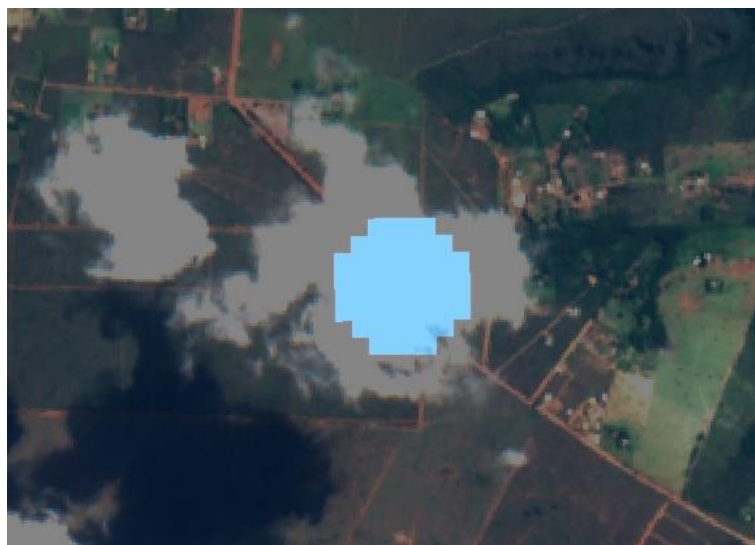
FILTRAGEM ESPACIAL DAS CENAS

Nessa etapa serão demonstrados e discutidos os resultados da metodologia de detecção de materiais nas cenas.

Máscara geral de nuvens

A máscara da banda “QA60” mostrou-se satisfatória na maioria dos casos, porém se usada de forma isolada pode não apresentar resultados desejados em virtude da dificuldade em identificar colunas esparsas de nuvens. Ainda é possível utilizar como forma de redundância para análise conjunto com outros índices, conforme observado na Figura 14.

Figura 14 – Identificação de formações densas de nuvem por meio da banda “QA60” do Sentinel-2 MSI, na cena de 13/05/2019

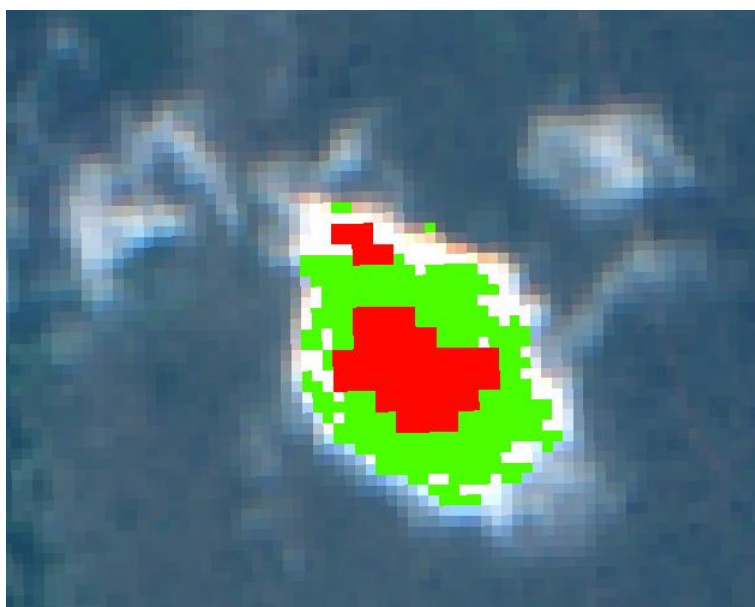


Fonte: Autor

Por mais que a identificação de nuvens seja considerada adequada pela banda QA60, ainda podem existir remanescentes mais esparsos de colunas de nuvens que por sua vez podem não ser identificados pelo processamento da banda.

Alguns materiais analisados podem ser identificados por mais de um índice válido, conforme observado na Figura 15, logo, foi utilizado a combinação dos índices (observado a detecção por um índice em verde e por outro em vermelho) a fim de sobrescrever o pixel e reduzir ainda mais o ruído causado pelo processo de identificação, por conseguinte, o da contaminação.

Figura 15 – Diferentes métodos de identificação de material contaminante, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

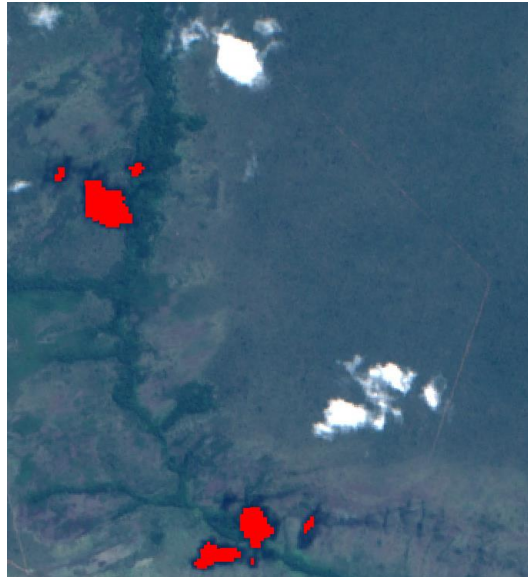
Para dar consistência e redundância no processo de filtragem, foi combinado o resultado da máscara da banda QA60 com o índice espectral de identificação de nuvens para o Sentinel-2 o *Cloud Shadow Index* bem como o produto *Sentinel Cloud Probability*.

O produto desenvolvido com os conhecimentos de Magno⁴⁷ et al. (2021) proporciona, dentro do limiar de interesse, excelente precisão na seleção de regiões sombreadas, conforme identificada na Figura 16. Em conjunto das máscaras de seleção de coluna de nuvens é possível realizar a filtragem do conjunto nuvem-sombra da imagem.

Conforme encontrado em Magno⁴⁷ et al. (2021), as regiões sombreadas puderam ser identificadas, registrando o comportamento espectral do limiar seco e molhado por meio da equação exponencial citada (ver equação 1).

O produto *Sentinel Cloud Probability* mostrou, conforme observado Figura 17, excelente grau de identificação de nuvens, ainda que utilizando o limiar de 50% (recomendado para uma seleção mais homogênea do produto).

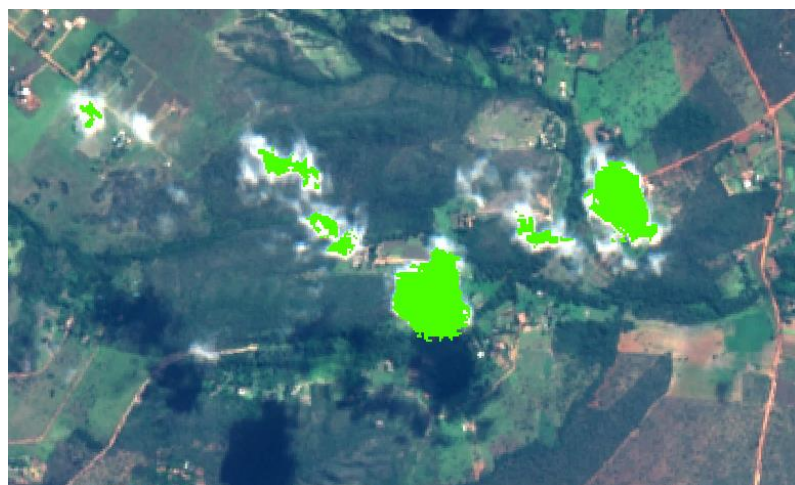
Figura 16 – Identificação de sombra de nuvem por meio da técnica descrita em Magno et al. (2021) , na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

A máscara geral de nuvens foi obtida pela combinação de todos os produtos relacionados a nuvem e sombra de nuvem, contemplando as nuvens e suas respectivas sombras. Posteriormente, foi combinada com a máscara geral de corpos hídricos para gerar a máscara geral do evento

Figura 17 – Identificação, em verde, de formações de nuvem por meio do *Sentinel Cloud Probability* (limiar de 50%), na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

Máscara geral de corpos hídricos

A combinação dos índices NDWI e SWM mostrou grande eficiência para identificação de corpos maciços de água. A Figura 18 demonstra a aplicação do NDWI para discretização de massas de água, que ocorreu de forma satisfatória, nas imagens estudadas, com os limiares estabelecidos. A literatura de Kaplan³⁸ e Advan (2017) recomenda, para o Sentinel-2, o valor de 0.1, o qual foi utilizado no processamento.

Foi possível observar, assim como em Kaplan³⁸ e Advan (2017), que regiões montanhosas que produziram extensões foram identificadas erroneamente, indicando regiões sombreadas ou de material escuro.

O SWM, demonstrado na Figura 19, seguiu a mesma lógica do NDWI, dentro dos valores de referência, conseguiu discretizar de forma satisfatória as massas de água. Corroborando com as ideias de Milczarek⁵⁷ et al. (2017), foi possível discretizar e especializar a superfície de água com alto grau de precisão, permitindo também a identificação de pequenos corpos d'água e rios de pequeno comprimento de borda.

A máscara geral de corpos hídricos foi obtida com a combinação das máscaras NDWI e SWM, e logo após, fundida a máscara geral de nuvens criando a máscara geral do evento analisado.

Foi observado que os índices de água possuem dificuldades para diferenciar corpos d'água submetidos a processos de eutrofização, devido a presença de material biológico na estrutura na água, bem como a dinâmica da superfície d'água pode gerar uma propensão a fenômenos especulares, que é a reflexão acentuada da incidência de raios solares, prejudicando o reconhecimento da superfície d'água como sendo corpo hídrico.

Figura 18 – Índice NDWI com discretização, em azul, de corpos hídricos no limiar de 0.1, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

Figura 19 – Índice SWM com discretização, em vermelho, de corpos hídricos, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

Máscara geral do evento

Ao utilizar processos de aritmética com as máscaras previamente calculadas, foi possível relacionar os índices de cada período. Essa operação de bandas produziu a máscara para cada período do evento, conforme observado na Figura 20.

Figura 20 – Demonstração da cena pré- (13/05/2019) e pós-fogo (12/07/2019)



Fonte: Autor

Ao obter a máscara geral para cada período, foi possível realizar a máscara geral do evento, que engloba as duas máscaras (pré- e pós-fogo), conforme observado na Figura 21. A imagem contém os pixels representantes de cada elemento que será filtrado na imagem, porém sem o processo de *buffer*.

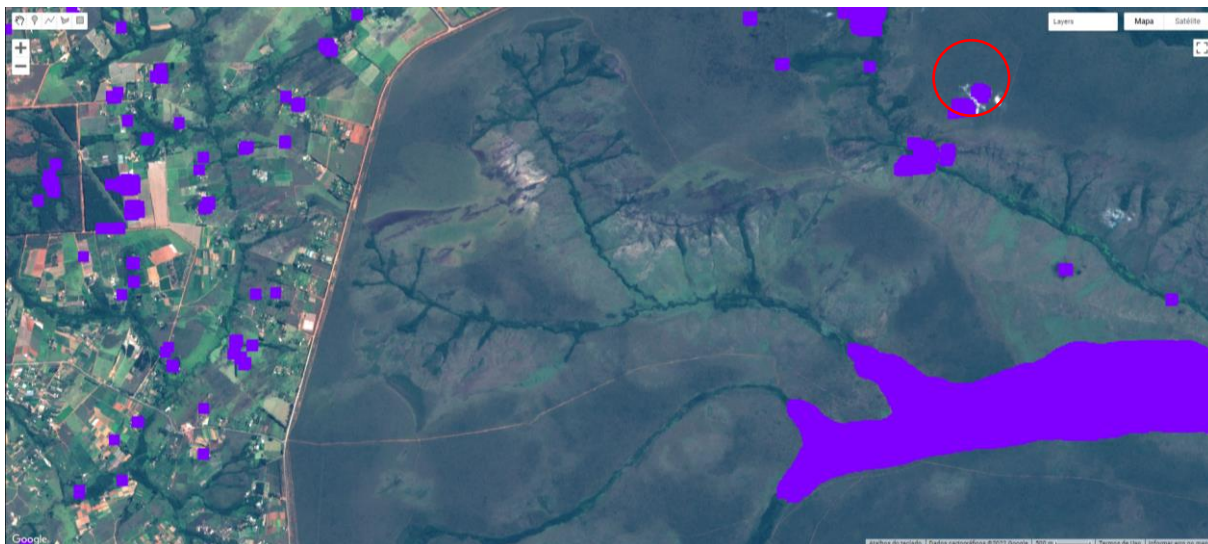
Figura 21 – Máscara geral dos elementos contaminantes, sem o processo de *buffer*, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

A Figura 22 representa o resultado proposto na metodologia de criação da máscara geral do evento, que é referente à soma das imagens pré- e pós-fogo de cada evento selecionado. Para cada evento analisado (dentre os 6), obteve-se as máscaras dos dois períodos analisados e sua combinação: a máscara geral do evento.

Figura 22 – Máscara geral do evento com o amortecimento de 120 metros, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

A Figura 20 demonstra as imagens pré- e pós-fogo, que quando sobrepostas geram a máscara final do evento analisado, conforme na Figura 22.

O processo de criação de máscaras, em conjunto com os processos de *buffers*, conseguiu eliminar pela maior parte a presença de materiais contaminantes das imagens e mostrou-se bastante satisfatório, visto que demonstrou ser possível homogeneizar as imagens pré- e pós-

fogo auxiliando a metodologia de extração de pontos proposta, pois poderia existir regiões presente em uma imagem e na outra não. Foi observado que alguns materiais que não foram identificados dos limiares estabelecidos nos índices por suas respectivas literaturas acabaram por ser filtrados no processo de *buffer*, conforme é possível observar nos detalhes circulares vermelhos nas Figura 21 e Figura 22, cuja representação dá-se na máscara sem o *buffer* e com o *buffer*, respectivamente.

Há de salientar também que: por mais calibrado que sejam os índices dentro de seus limiares, algumas vezes, conforme observado na Figura 23, alguns elementos podem não ser registrados, como ficou observado nos reflexos especulares de corpos hídricos, colunas esparsas de nuvens, bancos vegetais nas superfícies d'água e sombras tênues.

Ressalta-se que os problemas são pontuais e não influenciaram de modo geral a funcionalidade do procedimento de filtragem. Estudos mais aprofundados sobre os limiares, levanto em consideração a região a ser trabalhada, pode ajudar a restringir melhor os dados, pois se houver problemas nos limiares as máscaras podem ou subestimar ou superestimar os materiais contaminantes.

Figura 23 – Problema na máscara geral do evento, na cena de 13/05/2019



Fonte: Autor

Importante também citar a eficiência da plataforma construída em apresentar rapidez na produção de resultados, pois foi possível escolher os períodos e imagens a serem trabalhados e para par de imagem identificado nos períodos, a plataforma realizou todo o cálculo de máscaras

e aplicou-as aos índices, reforçando mais uma vez o potencial da computação em nuvem aplicada a geociências.

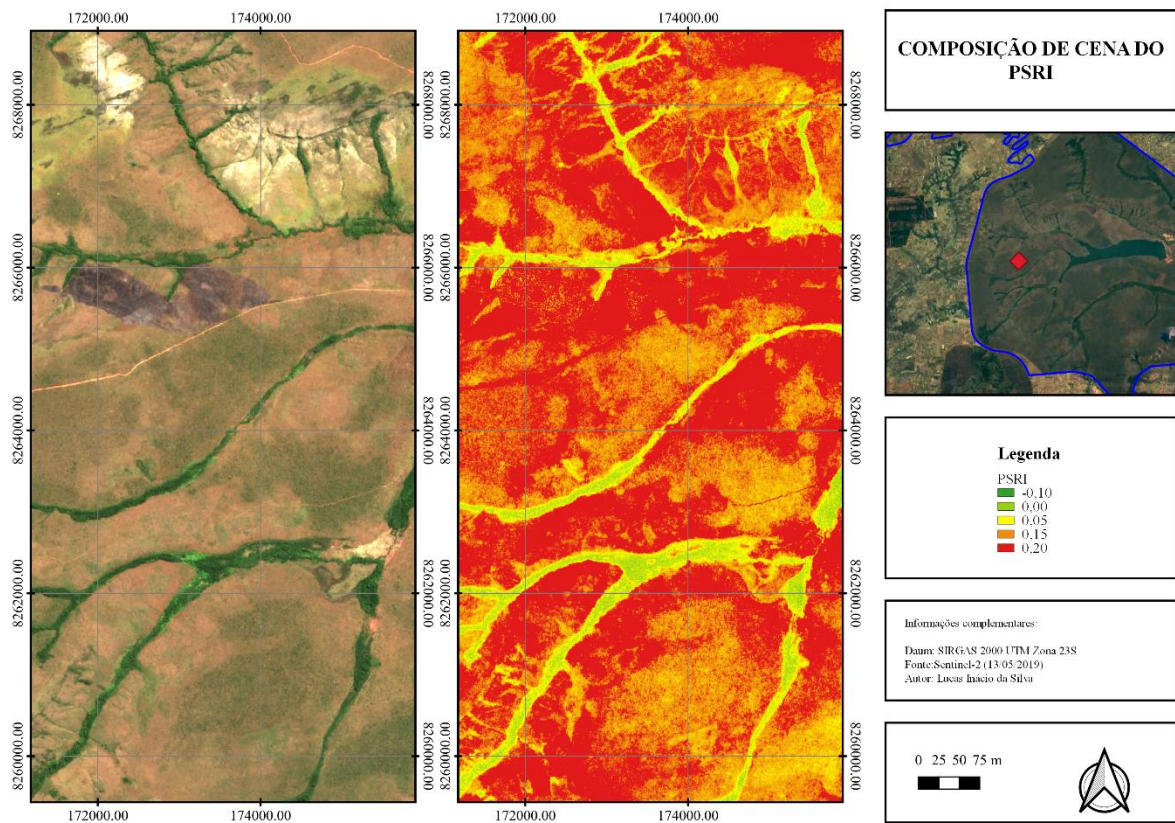
ÍNDICES ESPECTRAIS

Serão apresentados os resultados obtidos com os índices espectrais explicitados em Material e Métodos.

Índice PSRI

É possível observar o índice PSRI calculado na Figura 24.

Figura 24 – Cena contendo o cálculo do PSRI



Fonte: Autor

O índice observado apresentou comportamento padrão nos anos de chuvas com padrões normais, porém nos anos de evento analisados em que houveram períodos de estiagem acentuados, o índice superestimou as regiões de maior senescência, criando grandes regiões com vegetação envelhecida.

Foram observados resultados dentro do esperado, quanto ao aspecto de valores dos índices nas regiões queimadas. Observou-se uma tendência de média elevada dos valores relacionados ao PSRI nas regiões que queimaram, indicando, segundo Zagajewski⁹⁸ et al.

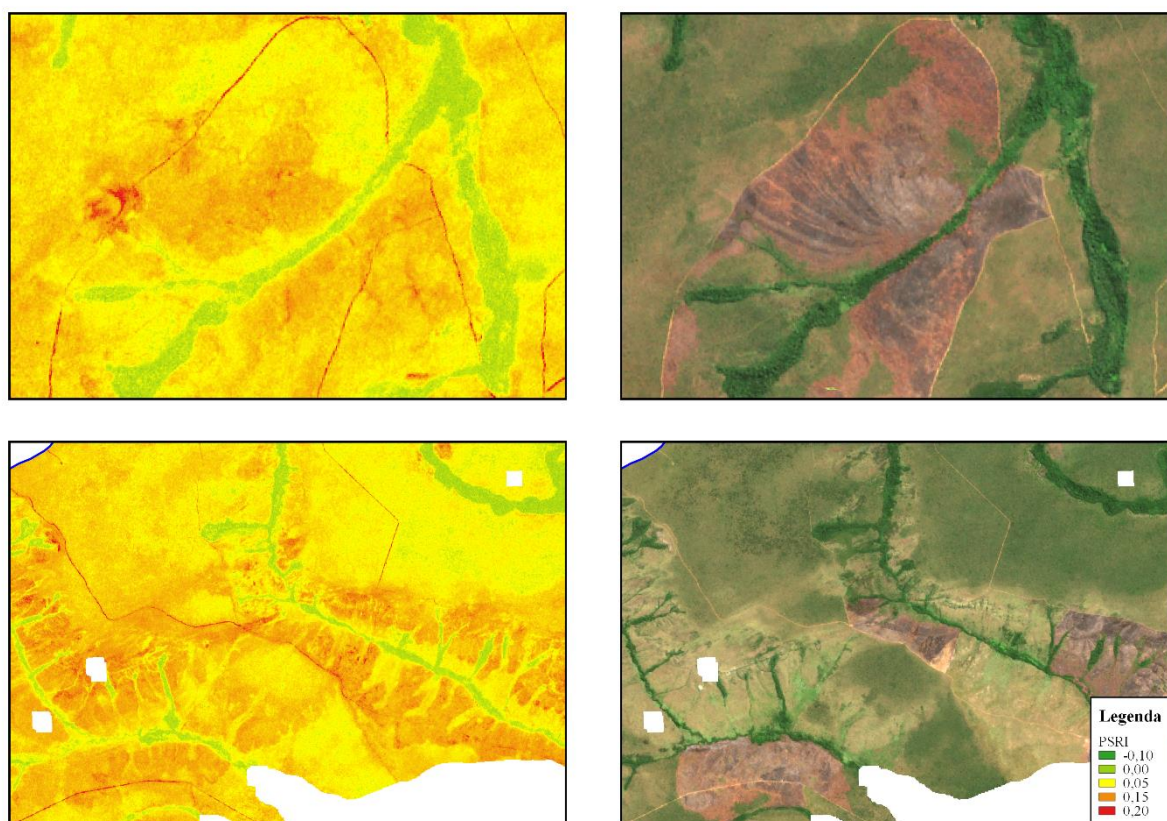
(2014) e Merzlyak⁵⁶ e Solovchenko (2002), que essas regiões apresentavam certo grau de senescência.

Visualmente, essas regiões se apresentam com diferente coloração, quando comparadas as demais, indicando um processo de senescência, corroborado pelos valores calculados nos índices. Essa mudança de coloração, segundo Merzlyak⁵⁶ e Solovchenko (2002), indica a dinâmica de pigmentação, ocasionada pelos processos de estresse na planta. É possível observar essas regiões com maior senescência na Figura 25.

A linha de imagens a cima representa os períodos pré- e pós-fogo do Evento 5, e a linha de baixo, do Evento 6. Baptista⁵ et al. (2018) e Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019) encontraram valores de média 0,26 nas regiões queimadas analisadas em sua pesquisa. Esse valor encontra-se dentro da região considerada de vegetação senescente.

Os valores extraídos na presente pesquisa encontraram porções médias próximos ao intervalo de início de estágio de senescência, o que abarca os valores de 0,1 até 0,2.

Figura 25 – Cenas de PSRI nas regiões queimadas



Fonte: Autor

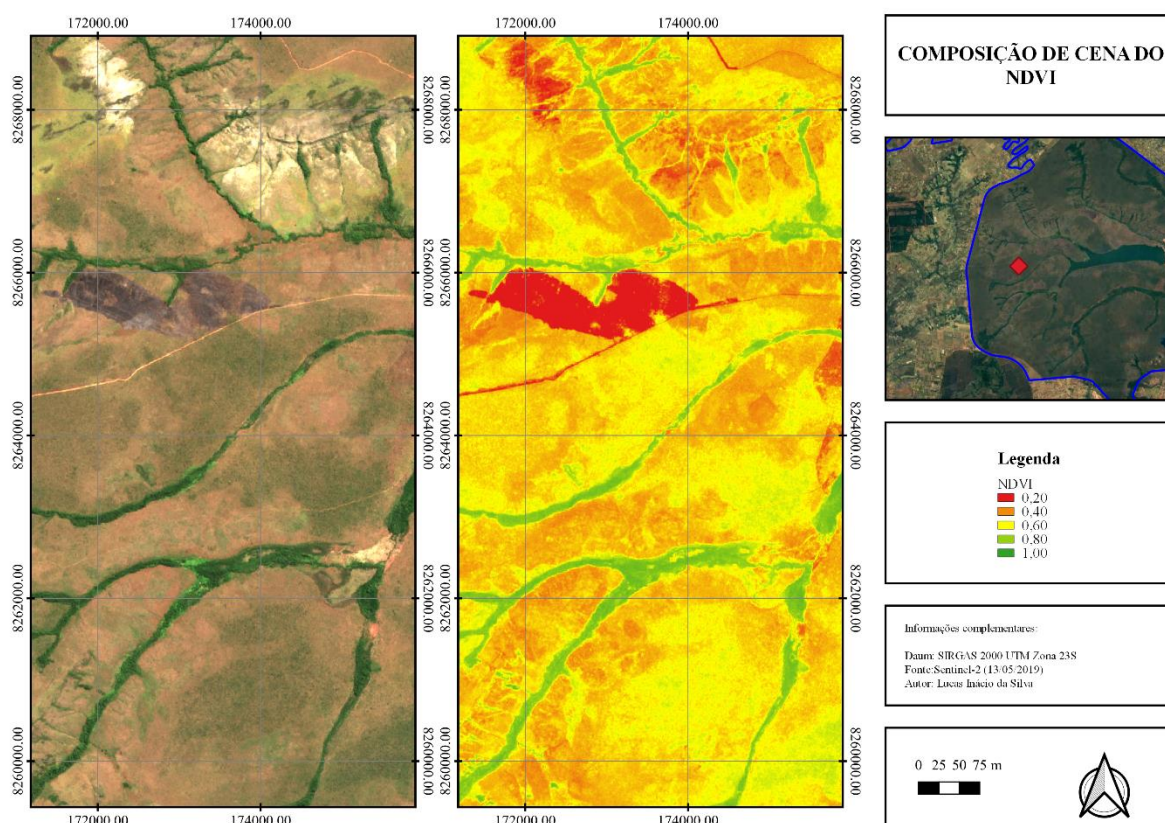
Índice NDVI

O índice NDVI, conforme evidenciado na Figura 26, foi calculado para os períodos relacionados.

Assim como o PSRI, índice NDVI apresentou problemas nos períodos de estiagem, a condição de fracas chuvas gerou aspectos de grande estresse na vegetação, o que prejudicou a análise homogênea dos valores, pois houve uma superestimação dos valores das regiões analisadas.

É possível observar na Figura 27 regiões com o cálculo do índice e seu respectivo evento pós-fogo. Nesse caso, trata-se, respectivamente, dos Eventos 3 e 4. É possível observar que as regiões queimadas apresentam uma gama de comportamentos de verdor, indicando uma certa amplitude de valores dos índices, nas regiões queimadas.

Figura 26 – Cena contendo o cálculo do NDVI



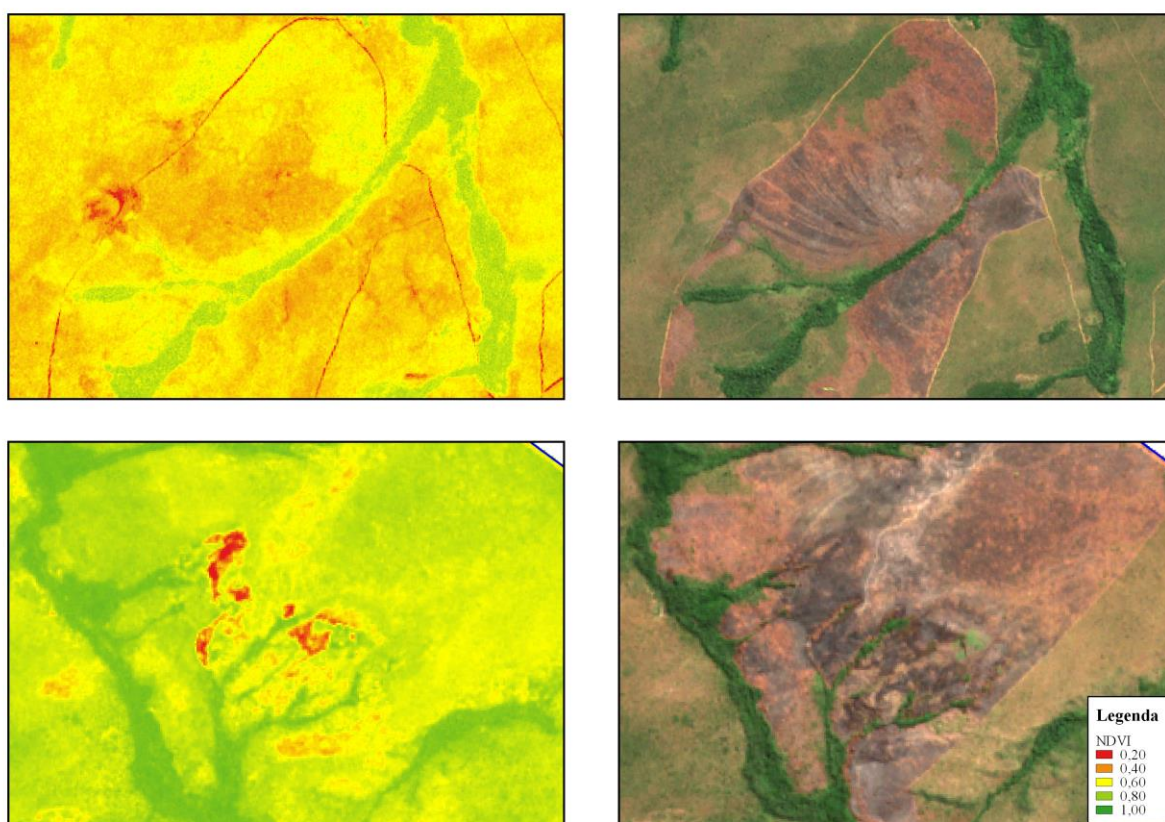
Fonte: Autor

Baptista⁵ et al. (2018) e Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019) encontraram valores de média 0.889. Esse valor é considerado muito alto em se tratando de verdor, e por si só não condiciona a região a suscetibilidade a incêndios. A presente pesquisa relatou valores próximos à 0.582,

indicando um verdor com um certo grau de estresse, visto que o limiar aceitável para o índice é de 0.2 até 1.

Com base nos resultados obtidos por Baptista⁵ et al. (2018), Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019) e os desta dissertação, observou-se que o NDVI, se analisado de forma isolada, não possui alto grau de confiabilidade para explicar a criticidade a incêndios, visto a maior amplitude de valores. Essa maior amplitude de valores indica que há um certo grau de diferença de verdor na vegetação queimada, podendo conter vegetação com alto teor de verdor queimada, quanto ter vegetação com baixo teor de verdor também sendo queimada

Figura 27 – Cenas de NDVI nas regiões queimadas



Fonte: Autor

Índice NDII

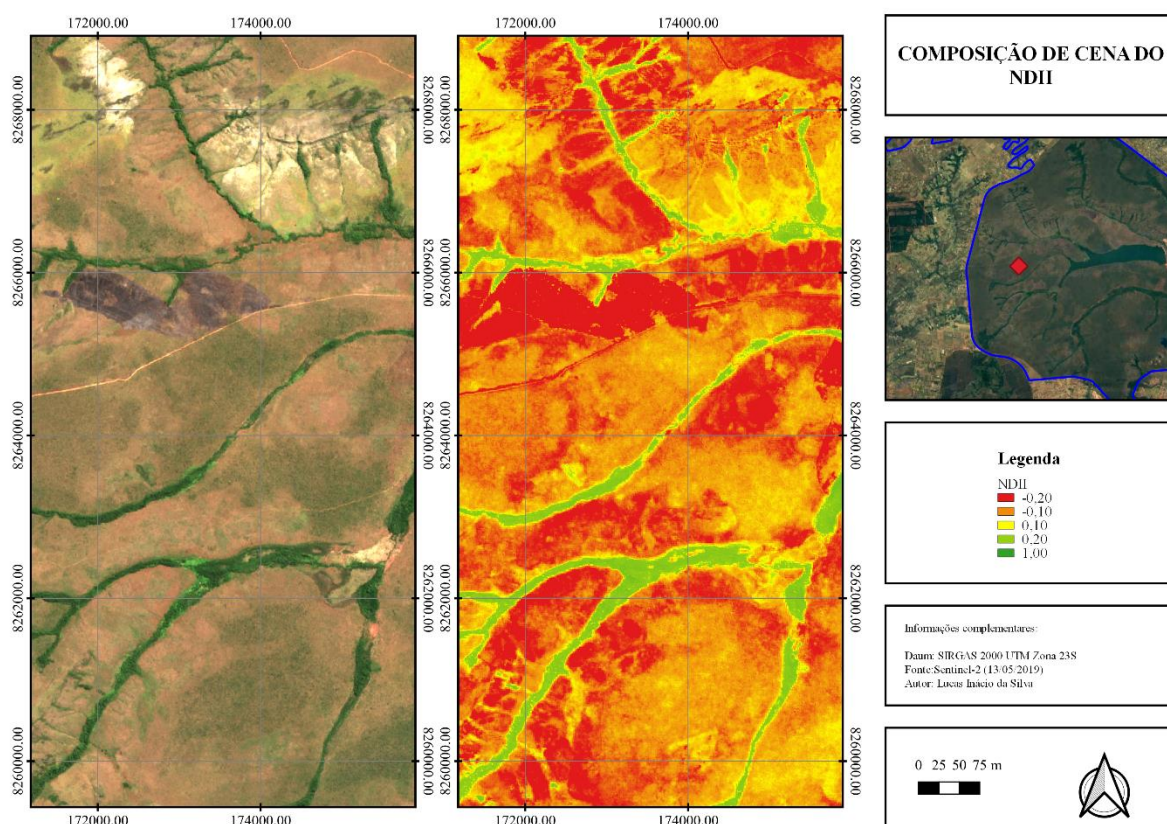
O índice NDII foi calculado, identificando as zonas de estresse hídrico da vegetação, conforme a Figura 28.

O índice NDII apresentou maior suscetibilidade aos períodos de estiagem, pois é um índice que mede justamente a água na estrutura celular. Essa maior sensibilidade traduziu-se na superestimação da vegetação, principalmente a de baixo e médio porte, nos limiares propostos.

É possível observar na Figura 29 regiões com o cálculo do índice e seu respectivo evento pós-fogo. Nesse caso, trata-se, respectivamente, dos Eventos 4 e 5. Nota-se que a regiões queimadas apresenta certo grau de estresse hídrico.

Baptista⁵ et al. (2018) e Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019) encontraram, para Portugal, os valores médios de 0.35, enquanto que para o PARNA Brasília a presente dissertação encontrou valores na média de 0.014. O valor encontrado indica que há um valor de média próximo ao limiar do estresse hídrico da vegetação, segundo Sriwongsitanon⁸³ et al., 2015.

Figura 28 – Cena contendo o cálculo do NDII

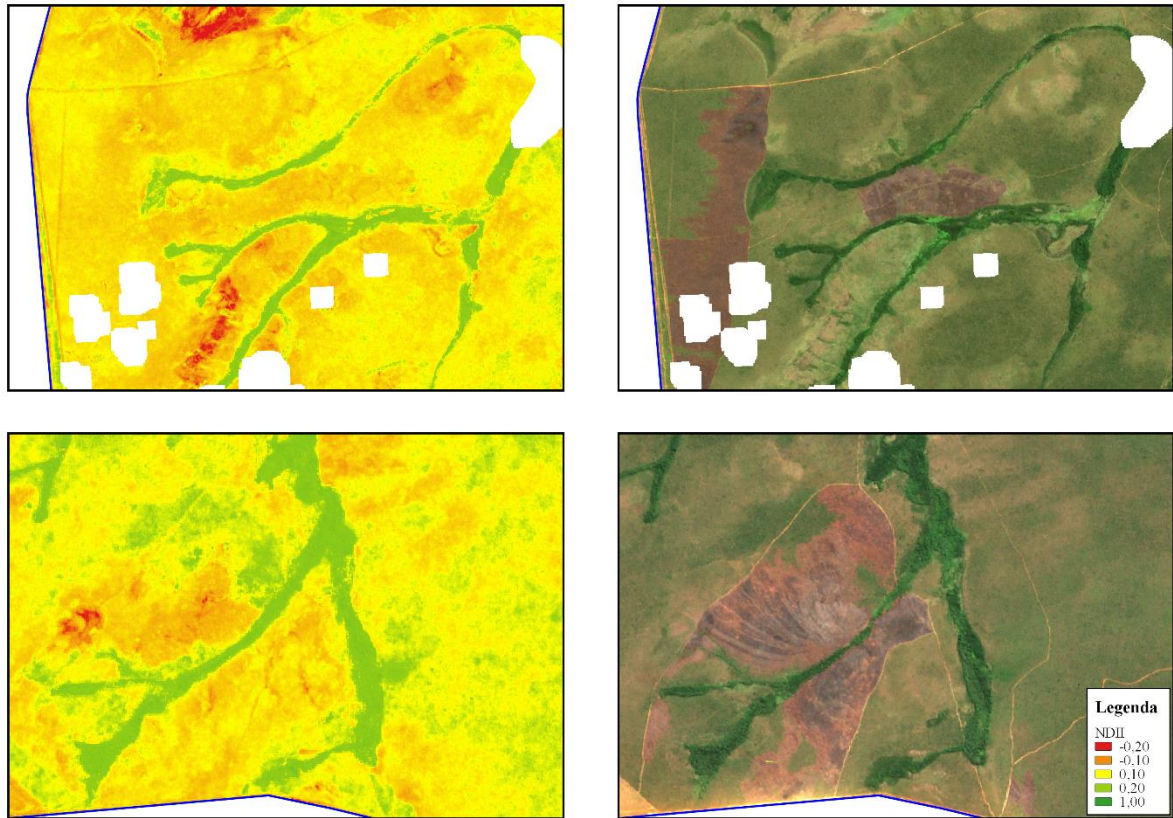


Fonte: Autor

Conforme Baptista⁵ et al. (2018), espera-se que as regiões queimadas apresentem menor umidade em relação as áreas não queimadas, e observando a amplitude dos valores colhidos para o NDII observou-se um comportamento mais homogêneo do que o NDVI. Esse comportamento indica que as regiões queimadas apresentavam um certo grau de semelhança entre si, ou seja, estresse hídrico condizente com a condição de potencial combustível a eventos de fogos. É importante colocar em análise esses dois índices, pois é possível levantar a tratativa de que é possível que regiões com alto teor de verdor também queimem, porém espera-se que

regiões com alto teor de umidade queimem menos e sejam mais persistentes a passagem das chamas.

Figura 29 – Cenas de NDII nas regiões queimadas

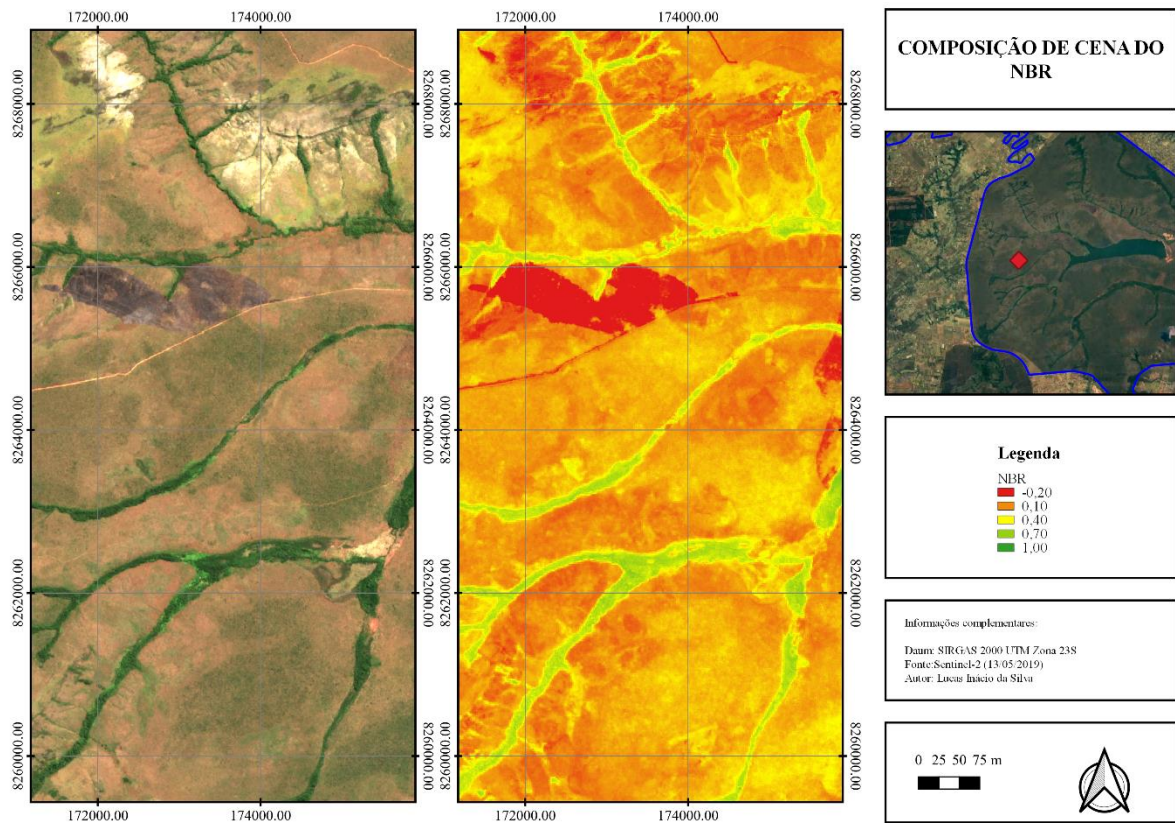


Fonte: Autor

Índice NBR

Conforme consta na Figura 30, o índice NBR foi calculado para delimitação poligonal da região queimada.

Figura 30 – Cena contendo o cálculo do NBR



Fonte: Autor

EXTRAÇÃO DE VALORES

O limiar identificado no Δ NBR como região queimada foi identificado nas cenas, e consequentemente, extraiu-se os valores por meio de pontos nos centróide dos pixels, conforme identificado pela Figura 31.

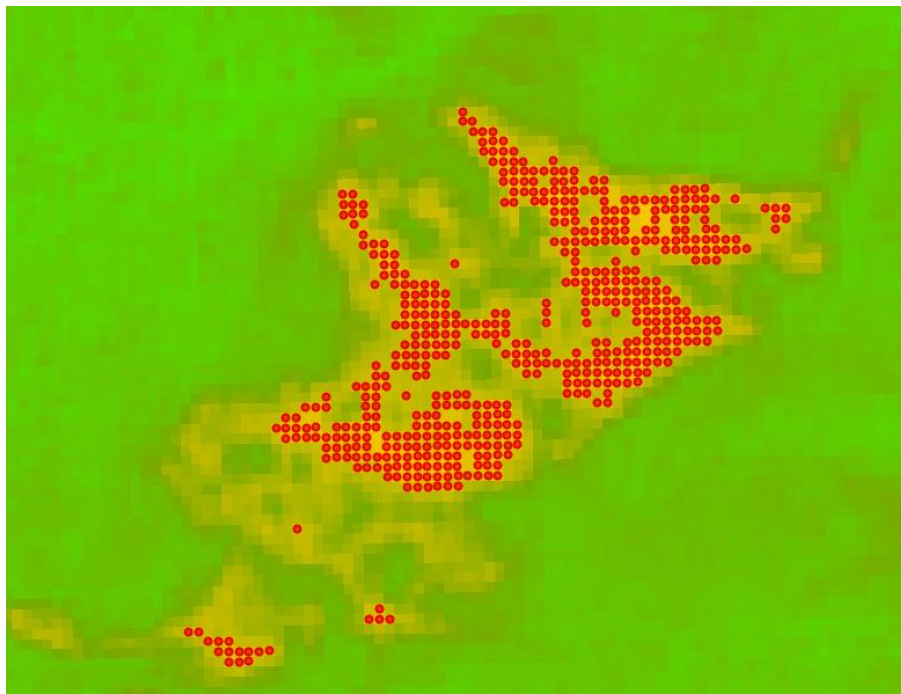
A importância de se utilizar os valores do Δ NBR, assim como constatado por Melo e Martins⁵⁴ (2019), é que o Δ NBR é mais sensível a determinação da poligonal queimada, visto que apenas o NBR poderá gerar confusão com áreas não queimadas, visto que utiliza a faixa do infravermelho próximo, sendo essa absorvida pela água na estrutura dos solos ou vegetação.

A extração dos valores, conforme ilustração parcial demonstrada na Tabela 3, representa os valores analisados. A análise dos valores, no contexto de cubo temporal, permitiu estabelecer um limiar crítico para a vegetação. Esse limiar identifica as condições mínimas para considerar a área vulnerável à deflagração de incêndios.

As colunas “NDII”, “NDVI”, “PSRI” e “Severidade” identificam os valores extraídos da imagem NDII, NDVI, PSRI e Severidade de queimada (Δ NBR). Será discutido no tópico

seguinte as questões referentes a cada ano, bem como serão pontuadas as observações pertinentes a cada ano.

Figura 31 – Cena contendo os pontos de extração sobre a máscara do Δ NBR



Fonte: Autor

Tabela 3 – Exemplo com 5 pontos de extração de valores em uma máscara Δ NBR

Ponto	NDII	NDVI	PSRI	Severidade
1	0,189	0,714	-0,086	459
2	0,194	0,721	-0,095	471
3	0,180	0,707	-0,081	474
4	0,185	0,716	-0,089	456
5	0,124	0,617	-0,081	460

Fonte: Autor

LIMIAR CRÍTICO

Foram analisados seis anos: 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022, conforme indicado nas datas da metodologia. Foi realizada a computação estatística dos pontos extraídos na metodologia para os índices: PSRI, NDVI e NDII.

Há de salientar que é necessário observar a distribuição dos valores conforme a interpretação dos valores dos índices, ou seja, o PSRI estabelece que regiões de valores abaixo de 0 são regiões com menor gradação da senescência da vegetação, o NDVI estabelece que regiões de valores acima de 0.2 são alvos vegetais com crescente gradação de verdor e o NDII estabelece que regiões de valores acima de 0 possuem gradativamente maior conteúdo de água na estrutura celular.

Filtrou-se então aos índices espectrais de cada ano para seus respectivos intervalos, definido pelo “limiar crítico”. Os valores de limites críticos foram definidos a média extraída de todos os anos analisados, ou seja, o valor médio dos valores registrados nas queimadas dos seis eventos.

Evento 1 – 2017

O Evento 1 possui uma particularidade, assim como o evento seguinte, referente ao período de seleção de imagens, pois foi constatado o evento de fogo no meio do período de estiagem, logo espera-se obter valores menores quando comparado a outros anos. Há também uma condição a ser considerada, o DF estava em um período pós-crise hídrica, em que se passou grande período de tempo sob regime de chuvas anormalmente baixos. O referido evento contou com a extração de 98.095 pontos, cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição estatística das análises de 2017

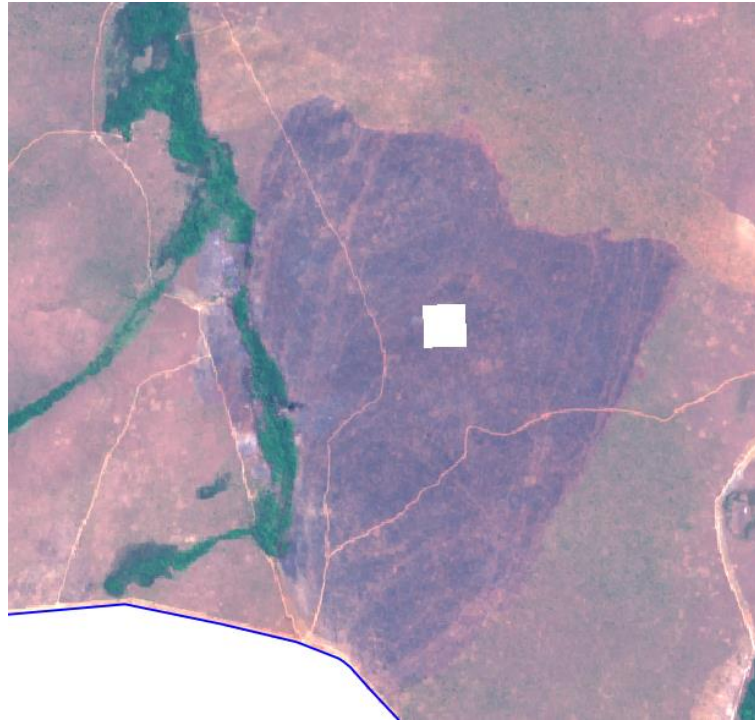
Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	-0.024	0.416	0.124
Desvio Padrão (σ)	0.075	0.061	0.055
Variância (σ^2)	0.006	0.004	0.003
Limite Superior	0.051	0.476	0.192
Limite Inferior	-0.100	0.355	-0.139

Fonte: Autor

O índice PSRI apresentou comportamento regular, em função da condição normal de estiagem do período do DF, indicando o envelhecimento esperado para o período. O NDVI acompanhou a análise do PSRI, indicando um verdor compatível, corroborado com o índice NDII. É possível observar as composições de antes e depois no ANEXO I.

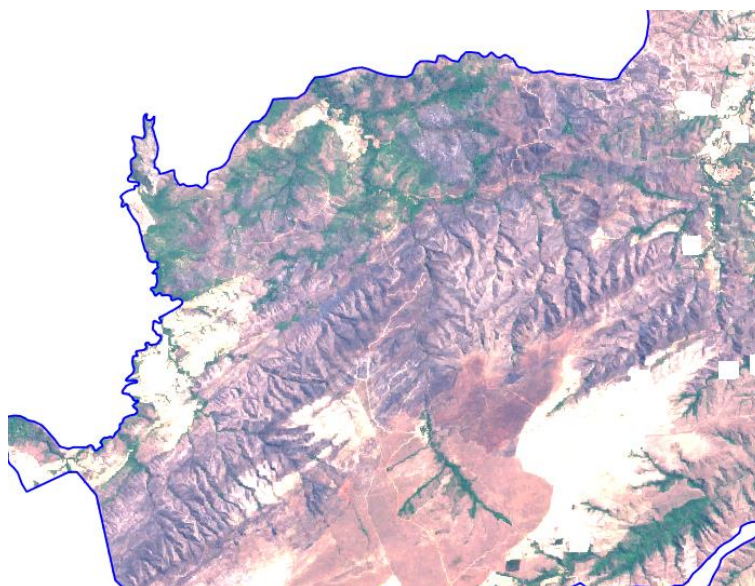
Para esse ano, observou-se grandes manchas de incêndios florestais, próximo à região sul do reservatório e na porção norte do Parque, próximo a região de relevo mais movimentado. O período observado contempla os meses de maio até junho, abrangendo o período exclusivamente de estiagem no DF, conforme observado nas Figura 32 e Figura 33.

Figura 32 – Manha de queimada ao sul do lago



Fonte: Autor

Figura 33 – Mancha de queimada ao norte do parque



Fonte: Autor

É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento nos ANEXO II, ANEXO III e ANEXO IV.

Evento 2 – 2018

O Evento 2 possui uma particularidade referente ao período de seleção de imagens, pois foi constatado o evento de fogo no meio do período de estiagem. O referido evento contou com a extração de 119 pontos, cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição estatística das análises de 2018

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	0.024	0.504	0.140
Desvio Padrão (σ)	0.060	0.050	0.023
Variância (σ^2)	0.004	0.002	0.001
Limite Superior	0.084	0.554	0.217
Limite Inferior	-0.036	0.455	-0.163

Fonte: Autor

Para o referido evento, conforme esperado e observado em menor proporção no evento seguinte, há uma queda nos valores médios, principalmente no NDVI e no NDII, indicando que o período de estiagem já atinge a região, reduzindo os níveis médios da saúde da vegetação. É possível observar as composições de antes e depois o ANEXO V.

Para esse ano, observou-se uma pequena mancha de incêndio florestal, próximo à sul do Parque, conforme indicado na Figura 34. O período observado contempla os meses de maio até junho, abrangendo o período exclusivamente de estiagem no DF.

Figura 34 – Mancha de queimada ao sul do parque



Fonte: Autor

É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento o ANEXO VI, ANEXO VII e ANEXO VIII.

Evento 3 – 2019

O Evento 3 demonstrou valores dentro da proporção esperada, visto que foi um ano regular de período climático. O referido evento contou com a extração de 68.272 pontos, cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 – Distribuição estatística das análises de 2019

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	0.017	0.646	0.094
Desvio Padrão (σ)	0.082	0.063	0.033
Variância (σ^2)	0.007	0.004	0.001
Limite Superior	0.100	0.710	0.128
Limite Inferior	-0.065	0.583	0.061

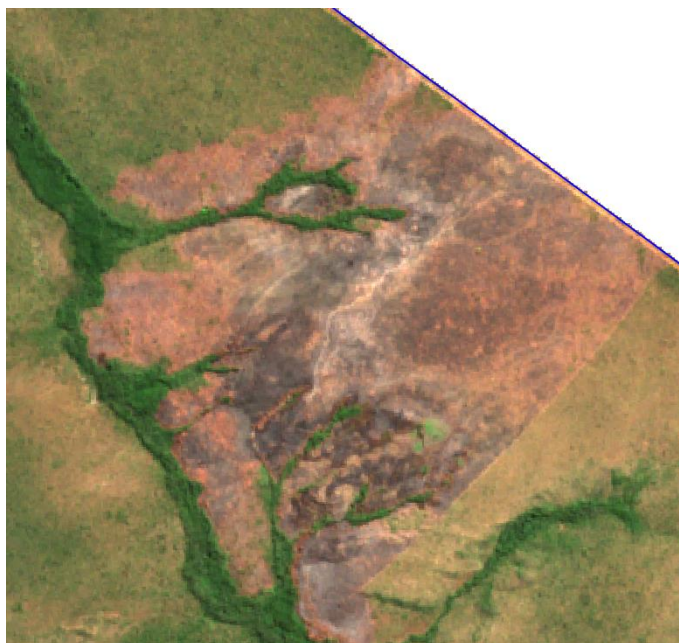
Fonte: Autor

Nota-se uma pequena diminuição dos valores, frente ao período de estiagem que já está em curso nos referidos meses, porém, trata-se de um processo com dinâmica proporcional, logo se o evento ocorresse em meses próximos aos dos outros eventos, observar-se-ia os valores proporcionalmente maiores. É possível observar as composições de antes e depois no ANEXO IX.

Para esse ano, observou-se algumas manchas de incêndios florestais nas regiões noroeste e noroeste do reservatório e na porção sudoeste do Parque, próximo a região que faz divisa com a rodovia que corta também a Floresta Nacional de Brasília, conforme observado nas Figura 35 e Figura 36. O período observado contempla os meses de maio até julho abrangendo o período exclusivamente de estiagem no DF.

É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento no ANEXO X, ANEXO XI e ANEXO XII.

Figura 35 – Mancha de queimada ao sudoeste do parque



Fonte: Autor

Figura 36 – Mancha de queimada na região próxima à rodovia



Fonte: Auto

Evento 4 – 2020

O Evento 4 demonstrou valores dentro da proporção esperada, visto que foi um ano regular de período climático. O referido evento contou com a extração de 33.968 pontos, cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Distribuição estatística das análises de 2020

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	0.023	0.646	0.089
Desvio Padrão (σ)	0.040	0.039	0.018
Variância (σ^2)	0.002	0.002	0.000
Limite Superior	0.062	0.685	0.107
Limite Inferior	-0.017	0.607	0.070

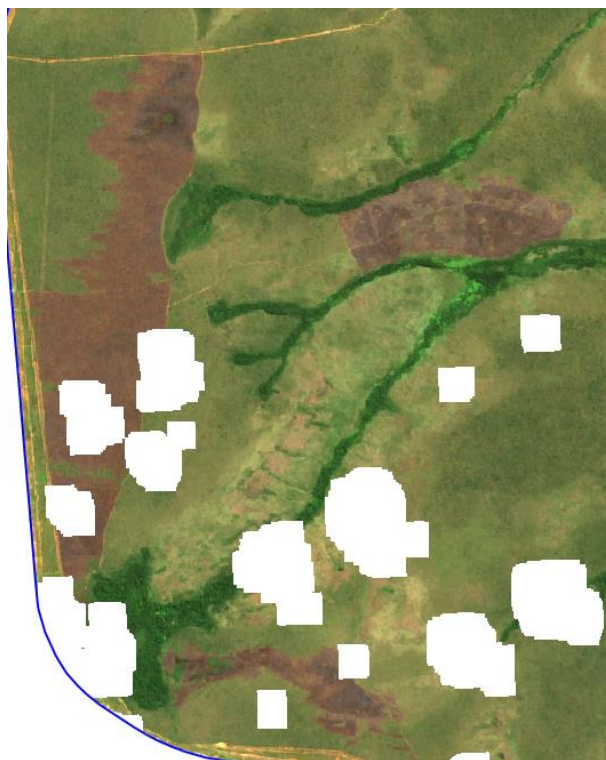
Fonte: Autor

O índice PSRI apresentou comportamento regular, em função da condição normal de estiagem do período do DF, indicando o envelhecimento esperado para o período. O NDVI acompanhou a análise do PSRI, indicando um verdor compatível, corroborado com o índice NDII. É possível observar as composições de antes e depois no ANEXO XIII.

Para esse ano, observou-se as manchas de incêndios florestais, próximo ao reservatório e na porção sudoeste do Parque, próximo a região que faz divisa com a rodovia que corta também a Floresta Nacional de Brasília, conforme é observado na Figura 37. O período observado contempla os meses de abril até junho abrangendo o período exclusivamente de estiagem no DF.

É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento no ANEXO XIV, ANEXO XV e ANEXO XVI.

Figura 37 – Mancha de queimada na região próxima à rodovia e do reservatório



Fonte: Auto

Evento 5 – 2021

O Evento 5 demonstrou valores dentro da proporção esperada, visto que foi um ano regular de período climático. O referido evento contou com a extração de 81.928 pontos, cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 8 – Distribuição estatística das análises de 2021

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	0.050	0.670	0.093
Desvio Padrão (σ)	0.072	0.055	0.025
Variância (σ^2)	0.005	0.003	0.001
Limite Superior	0.122	0.725	0.117
Limite Inferior	-0.022	0.615	0.068

Fonte: Autor

Foi possível observar na composição dos índices que os períodos extensos podem dar uma maior elasticidade aos valores dos índices, pois está sendo analisada a região em períodos

climáticos distintos, o que não invalida a análise. É possível observar as composições de antes e depois no ANEXO XVII.

Para esse ano, observou-se uma grande mancha de incêndios florestais, próximo ao reservatório e na região sul do Parque, conforme observado na Figura 38. O período observado contempla os meses de março até junho, aproximadamente 60 dias, abrangendo o final do período chuvoso e o início da estiagem no DF. Houve uma dificuldade em encontrar imagens para os períodos, devido a ocorrências de nuvens.

Figura 38 – Mancha de queimada ao sul do reservatório



Fonte: Autor

É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento no ANEXO XVIII, ANEXO XIX e ANEXO XX.

Evento 6 – 2022

O Evento 6 demonstrou valores dentro da proporção esperada, visto que foi um ano regular de período climático. O referido evento contou com a extração de 72.950 pontos cuja análise estatística pode ser observada na Tabela 9.

O índice PSRI apresentou comportamento regular, em função da condição normal de estiagem do período do DF, indicando o envelhecimento esperado para o período. O NDVI acompanhou a análise do PSRI, indicando um verdor compatível, corroborado com o índice NDII.

Observou-se extensas manchas de incêndios (conforme Figura 39), porém um pouco menor que o ano de 2021. O período analisado refere-se aos meses de abril até maio, períodos após a ocorrência de chuvas e que marcam o início do período de estiagem do DF.

Tabela 9 – Distribuição estatística das análises de 2022

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	-0.006	0.612	0.102
Desvio Padrão (σ)	0.076	0.060	0.027
Variância (σ^2)	0.006	0.004	0.001
Limite Superior	0.070	0.672	0.129
Limite Inferior	-0.082	0.551	0.075

Fonte: Autor

É possível observar as composições de antes e depois no ANEXO XXI. É possível observar a análise dos respectivos índices para o referido evento no ANEXO XXII, ANEXO XXIII e ANEXO XXIV.

Figura 39 – Mancha de queimada ao norte do reservatório



Fonte: Autor

Estabelecendo limites críticos

Após analisar os dados, é possível observar que o PSRI, conforme já indicado em outros estudos, se mostra como um fator de maior importância no potencial combustível. É possível observar que é o índice de menor variância, o que indica um comportamento homogêneo na

amostra queimada. O PSRI é aquele que melhor explica a criticidade para o início do incêndio, pois a variação dos outros índices indica que o fogo se alastrou em regiões com maior variabilidade de verdor e umidade.

A Tabela 10 demonstra o compilado dos valores extraídos, para facilitar a visualização e análise. É possível observar que não há grandes discrepâncias nos valores, ainda que existam análises em períodos climáticos com perturbações consideráveis.

Tabela 10 – Compilado dos valores extraídos

Ano	NDII	NDVI	PSRI
2017	-0.024	0.416	0.124
2018	0.024	0.504	0.140
2019	0.017	0.646	0.094
2020	0.023	0.646	0.089
2021	0.050	0.670	0.093
2022	-0.006	0.612	0.102

Fonte: Autor

É possível observar no índice PSRI uma maior dispersão de valores, sugerindo que as regiões queimadas possuíam alto grau de variabilidade de senescência. Essa alta variabilidade, associada a um desfavorável valor mediano do índice, reforça a ideia que o índice possui grande peso no fator de vulnerabilidade a incêndios.

Percebe-se que o NDVI possui valores médios muito próximos uns dos outros, indicando que a vegetação, nas regiões queimadas, possuía grau de verdor consideravelmente semelhante, e inclusive alto, sugerindo que o índice por si só não explica toda a vulnerabilidade a incêndios. O ano de 2017 representou um problema para análise de dados pela média, visto que a condição de pó-crise hídrica ainda desfavorece o equilíbrio e normal funcionamento do ciclo hídrico da região.

A Tabela 11 traz uma análise estatística em cima da média dos índices analisados. É possível observar que os valores médios do PSRI e do NDII estão próximos ao limite estabelecido em cada respectivo índice, indicando uma alta senescência da vegetação e um avançado estresse hídrico na vegetação. Os valores de NDVI indicam que a vegetação possui

um favorável grau de verdor, à exceção do ano de 2017, cujo valor encontra-se mais próximo ao limite de 0,2.

Tabela 11 – Estatística dos valores compilados

Dado Estatístico	NDII	NDVI	PSRI
Média (μ)	0.014	0.582	0.107
Desvio Padrão (σ)	0.026	0.101	0.021
Variância (σ^2)	0.001	0.010	0.001

Fonte: Autor

Conforme citado na metodologia, foi utilizado o limiar desfavorável de cada índice, estabelecido pela média. Optou-se também, após o cálculo dos limiares desfavoráveis de cada índice, realizar a média aritmética de cada resultado, obtendo assim um valor único de limite baseado na média dos limites desfavoráveis de cada ano.

Sendo assim, para o PSRI, adotou-se o valor crítico de “>0,107”, pois a porção de sentido positiva do índice mede, com gradatividade, a senescência da vegetação. Para o NDVI, adotou-se o valor de “<0.528”, pois o sentido negativo dos valores indica a gradação negativa do verdor da vegetação. Para o NDII, adotou-se o valor de “<0,014”, visto que o sentido negativo indica o estresse hídrico da vegetação. Em suma, encontrou-se, com os devidos arredondamentos, os valores de **0,15** para o PSRI, **0,58** para o NDVI e **0,015** para o NDII.

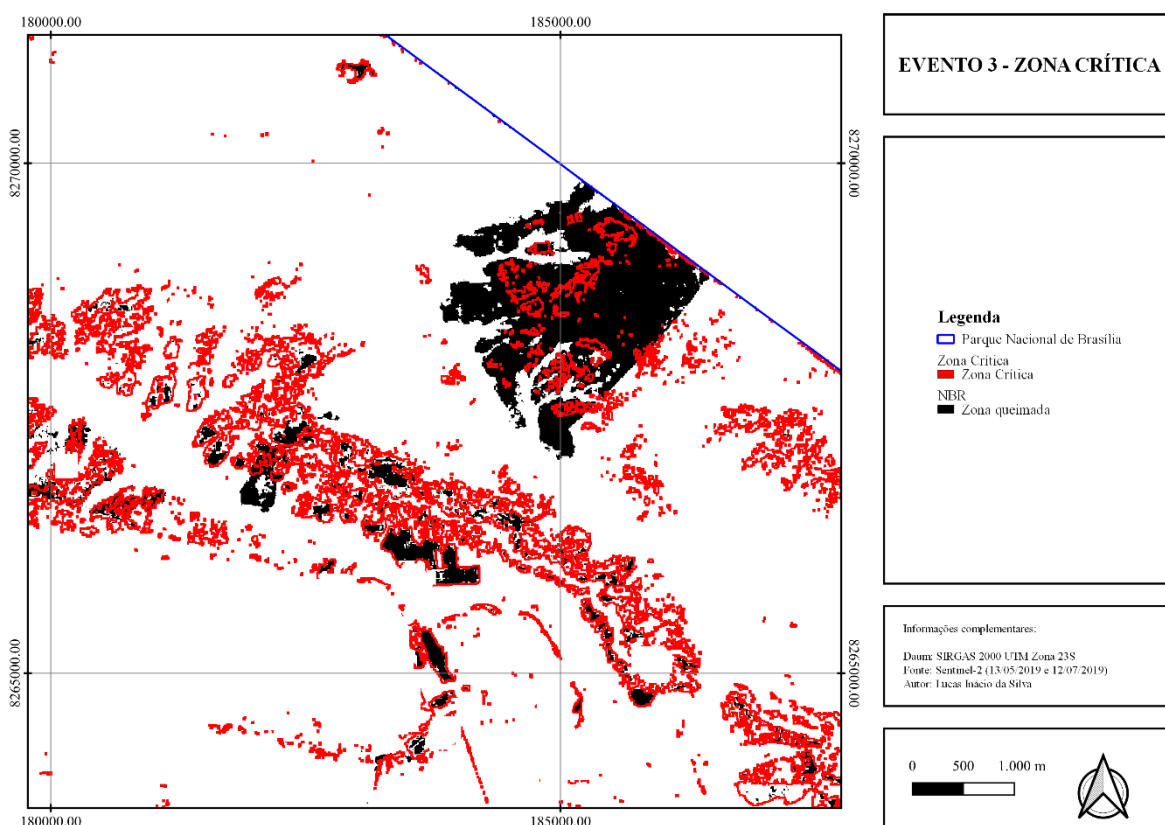
Os valores supracitados apresentam um alto grau de coerência, pois nos estudos de Baptista⁵ et al. (2018) e Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019) encontrou-se as médias, para as regiões queimadas, de 0,26 para o PSRI, 0.85 para o NDVI e 0.35 para o NDII. Há de salientar que o contexto climático e fitofisionômico da região de estudo de ambas pesquisas é completamente diferente. A diferença dos valores não invalida a metodologia aplicada, visto que os valores médios encontrados demonstram uma perspectiva um pouco mais pessimista frente ao cenário encontrado por Baptista⁵ et al. (2018) e Bento-Gonçalves⁹ et al. (2019).

Sendo assim, foram manipuladas as imagens dos períodos anteriores ao fogo dos índices espectrais supracitados, para que isolem os valores presentes no intervalo crítico encontrado. Uma nova imagem foi gerada, para cada ano, contendo a sobreposição de cada intervalo crítico do ano com os pixels queimados da imagem após o período do fogo. É possível observar alguns dos resultados nas Figura 40,

Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Observou-se então que a indicação das zonas críticas geradas pela combinação dos índices filtrados pelos limiares mostrou satisfatória conformidade com as regiões que realmente queimaram, permitindo assim o mapeamento de regiões com potencial combustível, corroborando a proposta elencada por Baptista⁵ et al. (2018).

Figura 40 – Cena com as sobreposições das zonas cíticas e as efetivamente queimadas no Evento 3

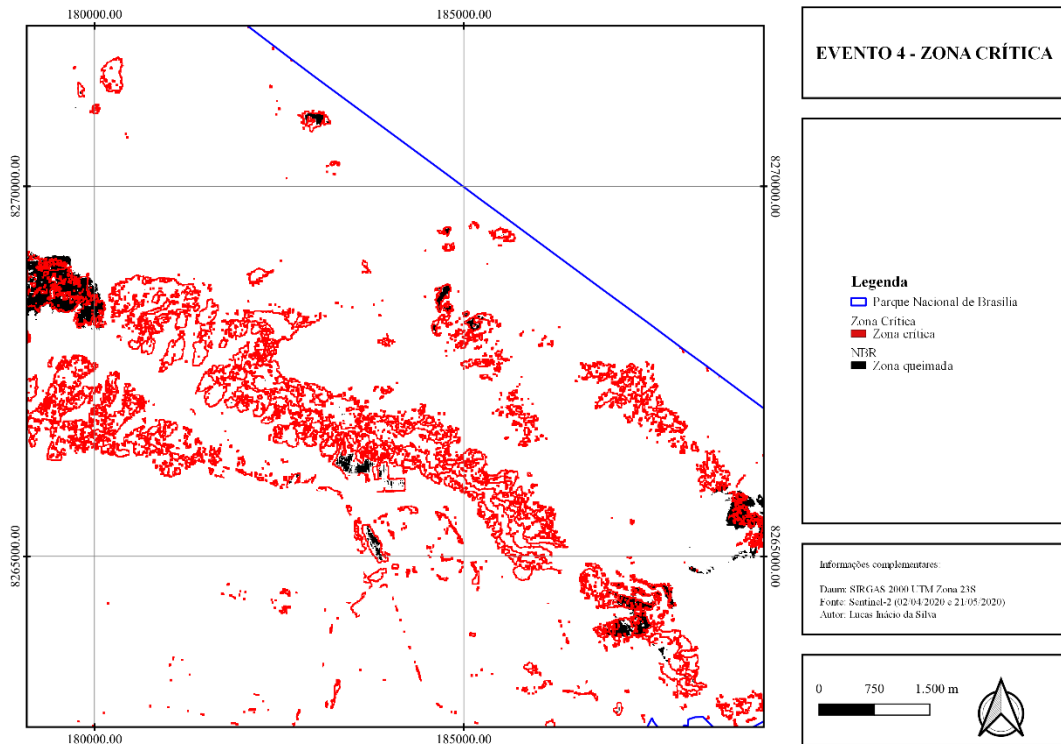


Fonte: Autor

Contudo, há de salientar que a mera espacialização dessas regiões pode apresentar problemas tais como: indicação de zonas inertes como potencial combustível, indicação de zonas já queimadas como potencial combustível e indicação de zonas que aparentemente não estão críticas.

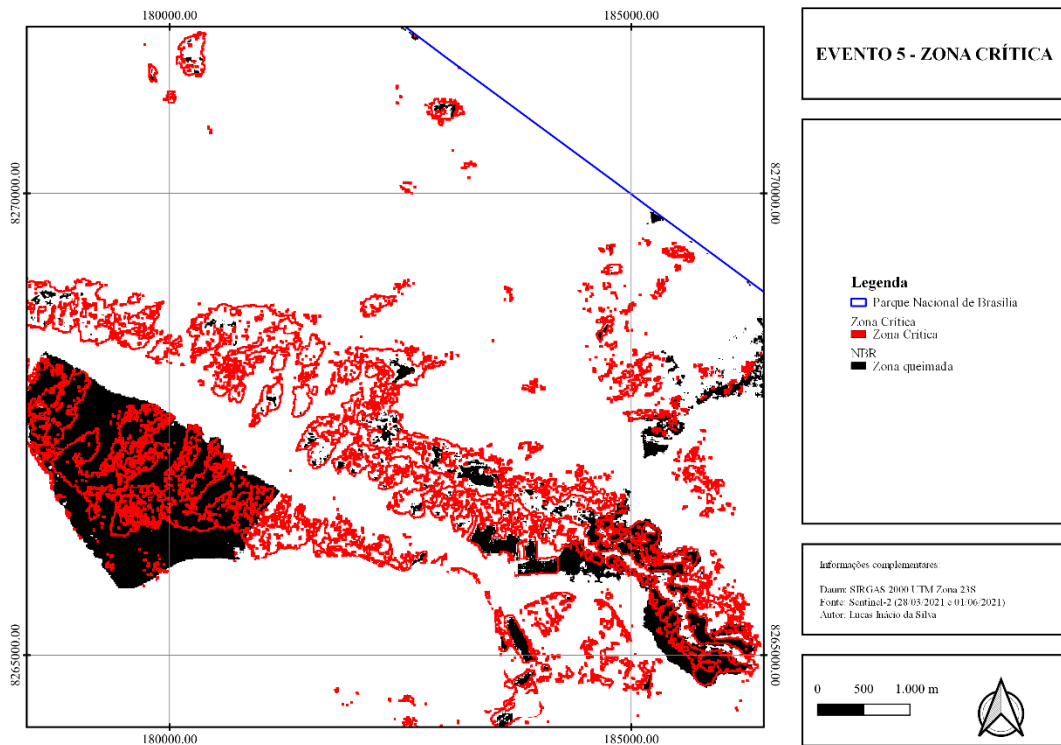
As zonas inertes, tais como solo exposto, ficam evidenciadas pelo método devido ao fato de apresentar comportamento espectral propício em cada índice, conforme indicado também observado por Melo⁵⁴ e Martins (2019). Isso se deve pela valoração desfavorável que recebe nos índices graças ao tipo de material que está sendo observado, porém é necessário ter o entendimento de que, embora essas zonas sejam críticas, não apresentam riscos de propagação de incêndios, tais como banco de areia ou brita por exemplo.

Figura 41 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 4



Fonte: Autor

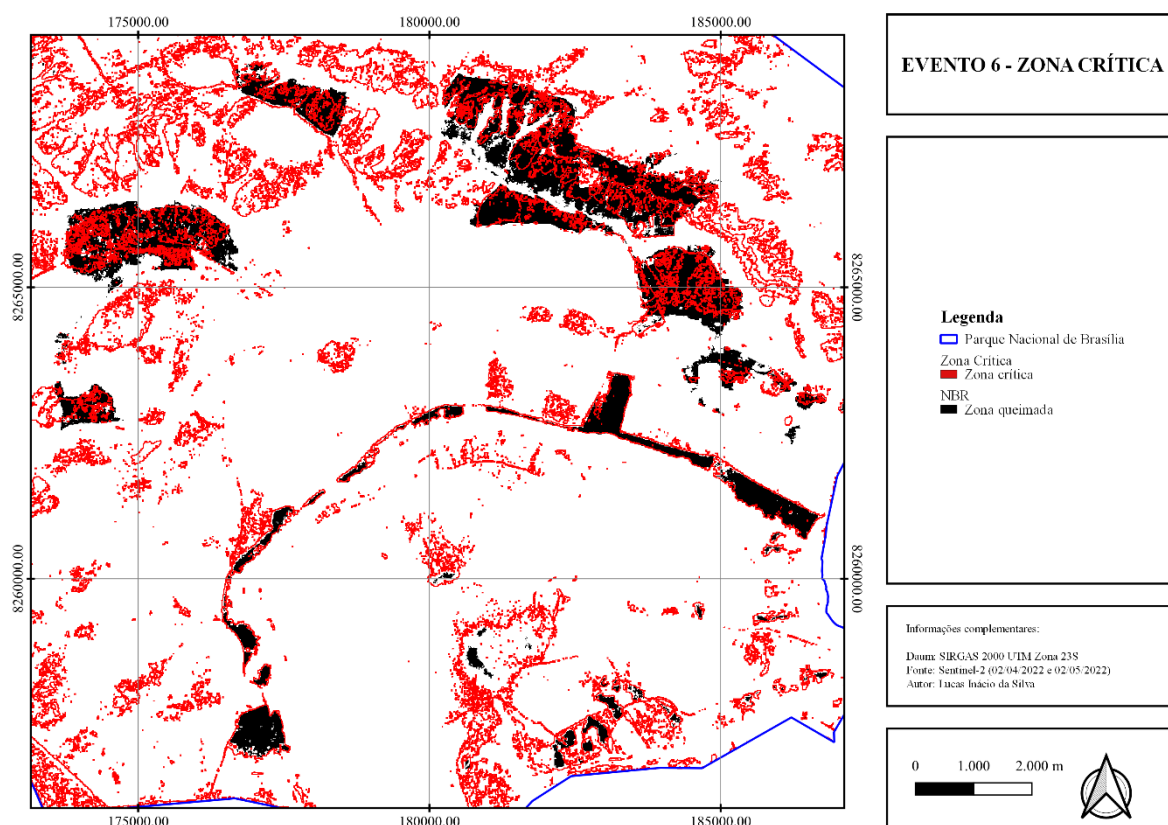
Figura 42 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 5



Fonte: Autor

As regiões queimadas também apresentam problemas nas imagens, pois há valoração desfavorável nos índices. Essa valoração deve-se ao fato de que são regiões que não apresentam valores de verdor e umidade compatíveis com estruturas vegetais e os valores de senescência sofrem uma interpretação errônea, gerada pela cicatriz da queimada.

Figura 43 – Cena com as sobreposições das zonas críticas e as efetivamente queimadas no Evento 6



Fonte: Autor

Escolheu-se os anos de 2017, 2019, 2021 e 2022 para realizar uma análise quantitativa espacial utilizando os dados obtidos pelos limiões, pois foram os períodos com maiores quantidades de dados extraídos. A Tabela 12 demonstra, em hectares, a análise sob a ótica da área realmente queimada (Área Queimada), a área crítica obtida pelos limiões (Área Crítica) e a área crítica efetivamente queimada (Área Efetiva), obtida pela intersecção da área queimada com a área crítica.

Observa-se a relação “Área Efetiva/Queimada”, que indica a porção da área que efetivamente queimou, aquela que está dentro da região crítica e queimada ao mesmo tempo, e a “Área Efetiva/Crítica”, indicando o quanto da região crítica realmente queimou. O ano de 2019 conseguiu identificar bem as regiões críticas, pois as manchas de queimadas se localizaram em grande parte dentro das regiões críticas.

Tabela 12 – Análise quantitativa dos períodos com maiores pontos extraídos

Análise	2017	2019	2021	2022
Área Queimada	3357.355	692.616	865.019	797.285
Área Crítica	1742.854	19176.207	2104.648	2411.144
Área Efetiva	9.814	671.423	4.682	14.83
Área Efetiva/Queimada	0.56%	3.50%	0.22%	0.62%
Área Efetiva/Crítica	0.29%	96.94%	0.54%	1.86%

Fonte: Autor

Proposição do Índice de Potencial Combustível

Após estudo e constatação da influência de cada índice no fenômeno dos incêndios, observou-se que: o índice PSRI representa um forte ganho quanto à fragilidade ao incêndio, quando comparado aos outros índices, afinal, a senescência da vegetação é o fator preponderante. Em segundo lugar, dá-se a segunda maior importância à presença de água na estrutura celular da fitofisionomia, identificada pelo NDII. Por fim, tem-se o NDVI como último fator de importância.

Como trata-se de uma modelagem computacional, observou-se que elementos inertes, ou que não representam potencial combustível, apresentavam valores errôneos e distorcidos com a dinâmica da realidade, logo decidiu filtra-las da imagem por meio de uma máscara, denominada Elementos de Real Potencial Combustível³ – ESPC, que indica regiões já queimadas e solo exposto.

Essa gradação é importante para determinar a equação da modelagem, que será responsável por evidenciar as condições potenciais de combustível a incêndio e determinar o Índice de Potencial Combustível⁷ – IPC, que será indicada pela equação 8.

Há de salientar que os ESPC são obtidos pela máscara do NDVI, visando reduzir os efeitos das regiões já queimadas e a ocorrência de solo exposto. O intervalo sugerido de [-1, 0.2], conforme observado na equação 9, reforça a ideia de eliminar os alvos sem atividade fotossintética. Como a máscara é binária, logo é necessário realizar o deslocamento do valor dos pixels para a região de valor 0,25 do IPC, visto que esse valor, segundo observado nos resultados da modelagem, abarcam as regiões estáveis, logo, é possível amortizar os valores das regiões ESPC, atribuindo-os à porção estável

$$IPC = \frac{-5 \times PSRI + 2 \times NDVI + 3 \times NDII}{10} + 0.25 \times ESPC \quad \text{equação 8}$$

$$ESPC = Máscara - NDVI_{[-1,0.2]} \quad \text{equação 9}$$

Observa-se que foi feito o ajuste no valor do PSRI para que sua porção negativa (que explica a menor senescência da vegetação) ficasse em conformidade com os demais índices. O Índice Potencial Combustível não era proposição inicial nem objetivo do trabalho, porém servirá de subsídio para estudos e aperfeiçoamentos futuros. É importante apontar que o IPC é calculado na imagem pré-fogo.

O resultado gerado pelo IPC deverá ser analisado em conjunto com os outros índices a fim de avaliar o grau de identificação das áreas potenciais combustíveis, observando a precisão na identificação das áreas queimadas (considerando que não ocorrerá incêndios em toda área considerada suscetível) bem como a necessidade de desconsideração de regiões não suscetíveis a queimadas, porém que se mostrem como falsos positivos em virtude das peculiaridades observadas nos próprios índices (tais como corpos hídricos, solo exposto e composição não vegetal).

A Figura 44 (espelhada no ANEXO XXV) mostra a aplicação do IPC face à metodologia descrita anteriormente. Cabe destacar que ambas visam realçar as regiões críticas. Existem diversas correspondências entre as duas metodologias, porém há de salientar que o IPC foi pensado para amortecer as regiões inertes e sem potencial para deflagração de fogo. Observou-se, para os eventos citados, que os valores do IPC variaram de -0.05 até 0.25, com as regiões correspondentes à metodologia da dissertação se encontrando no intervalo de [-0.05, 0.05]. A Tabela 13 demonstra a sugestão de valores observados.

Tabela 13 – Intervalos observados

Intervalo	Estado
[-0.05, 0.05]	Crítico
[0.06, 0.15]	Alerta
[0.15, 0.25]	Estável

Fonte: Autor

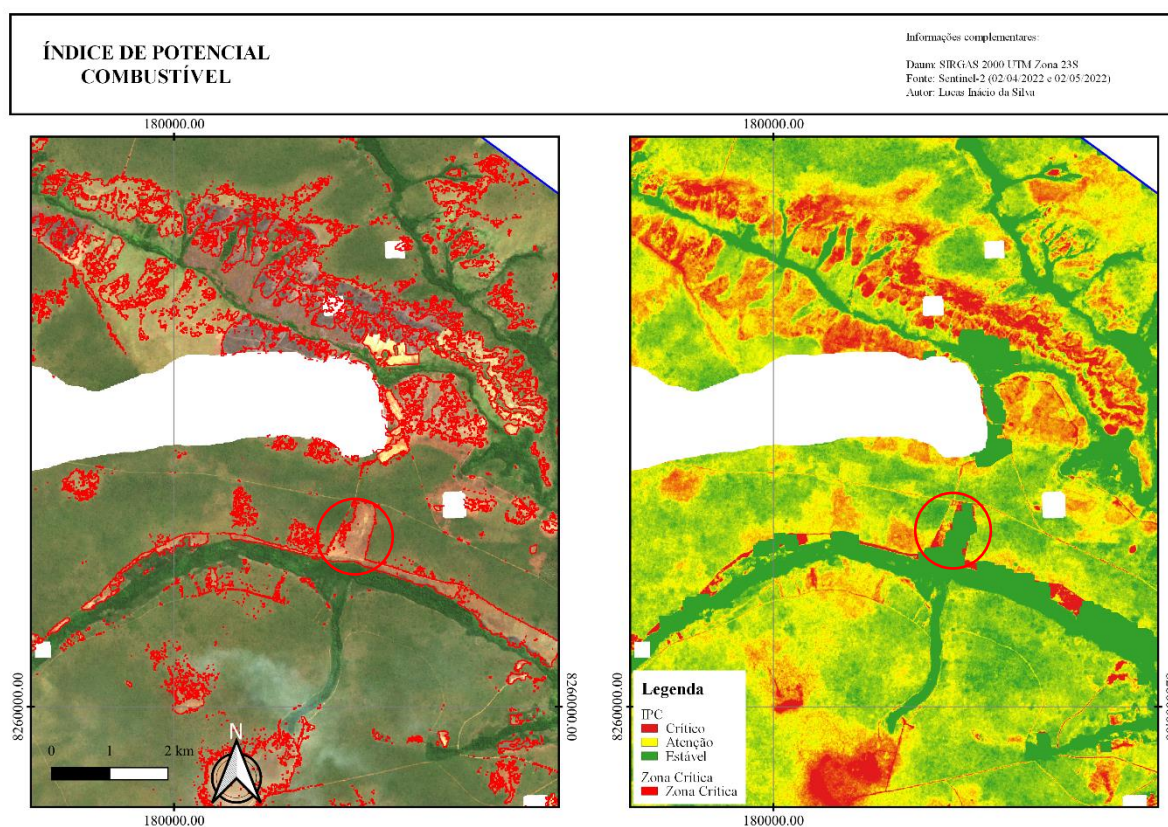
No período da imagem citada, que corresponde ao Evento 6, não foi possível trabalhar com cenas anteriores a abril. Nessa data, já haviam regiões queimadas antes da cena, conforme observado na imagem à esquerda. Essas regiões também foram identificadas no NBR,

produzindo duplicidade de dados. A metodologia da dissertação, conforme já discutido anteriormente, citou as referidas regiões como sendo críticas, embora seja sabido que as regiões queimadas necessitam de recuperação da vegetação para ocorrência de um novo incêndio.

Sendo assim, o IPC procura amortecer essas regiões, conforme observado na imagem da direita. É possível observar que as regiões críticas no IPC, em tons próximos ao vermelho, receberam a sobreposição de eventos de fogo, indicando um grau de acerto, bem como algumas dessas regiões se sobrepõem as regiões críticas da metodologia desenvolvida na dissertação.

Na Figura 45 é possível observar, com mais detalhes, as regiões que já estavam queimadas, dentro dos círculos vermelhos, bem como as regiões com materiais inertes, no círculo preto (cascalheiras). Nota-se que o IPC amorteceu essas regiões, considerando ainda que as zonas queimadas dentro dos círculos vermelhos já estavam lá e por isso foram identificadas no NBR, pois não deu tempo de recuperar.

Figura 44 – Cena o IPC



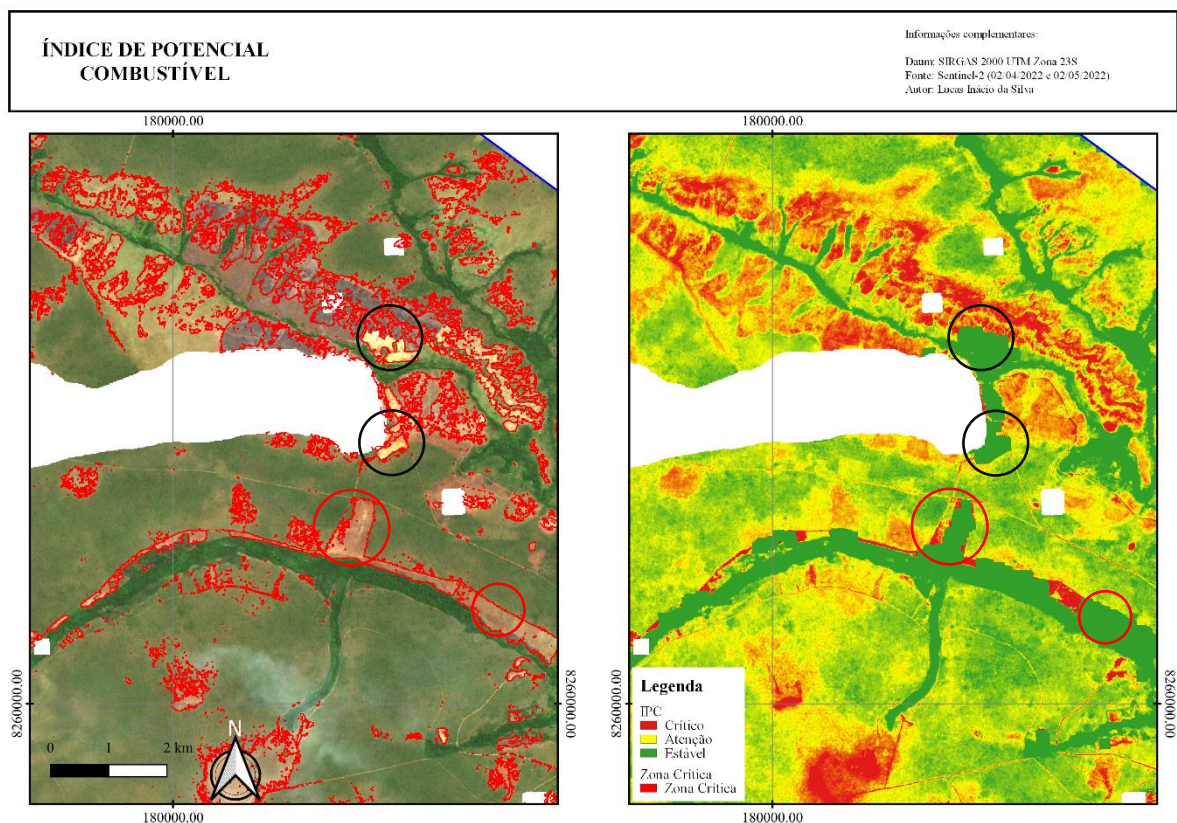
Fonte: Autor

Há também grande sobreposição das regiões queimadas com as porções críticas do IPC, conforme observado nas manchas pretas sob as vermelhas, bem como, conforme dito anteriormente, grande equivalência na metodologia da dissertação com o IPC. Na Figura 46, é

possível observar o IPC aplicado ao Evento 3, em 2019. Nota-se também uma boa sobreposição das zonas queimadas da imagem pós-fogo (calculada pelo NBR) com as regiões críticas.

O modelo ainda precisa ser testado com mais amplitude a fim de determinar suas eventuais fraquezas e descobrir novas formas de implementação, tais como a própria combinação, na modelagem, com a metodologia de determinação de zonas críticas desenvolvida na dissertação.

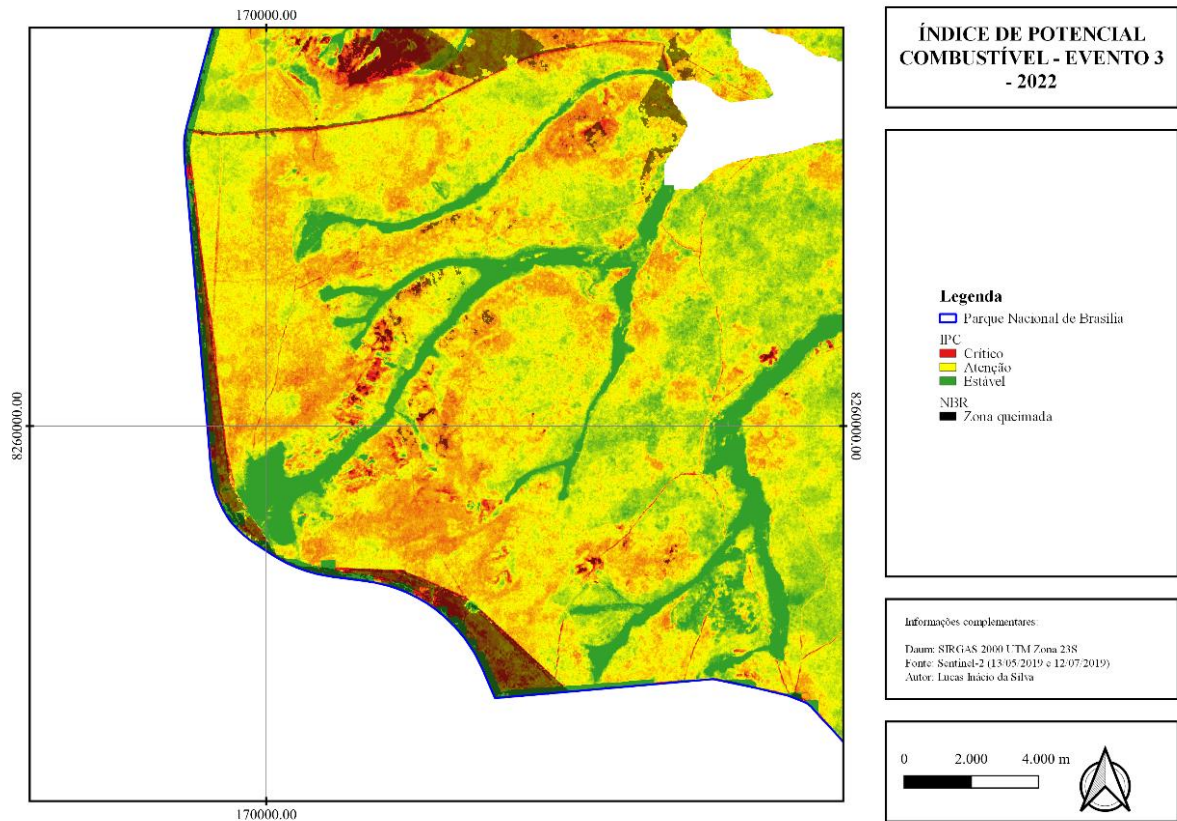
Figura 45 – Cena o com detalhes no IPC



Fonte: Autor

É necessário entender que, conforme já defendido por Torres⁸⁹ e Ribeiro (2008), o modelo de propagação de incêndios é complexo e envolve várias outras variáveis (tais como vento e ação antrópica) e a sua modelagem é bastante complexa.

Figura 46 – IPC



Fonte: Autor

PLATAFORMA DO GEE

Foi construído no GEE um aplicativo com o intuito de transformar a metodologia, que seria “manualmente” realizada no *code editor* do GEE, em algo mais próximo do usuário e com funcionalidades eficientes e diretas. A demonstração do aplicativo em sua tela inicial.

O aplicativo mostrou-se bastante eficiente e promissor no quesito de processar e gerar informação relacionada à metodologia. O funcionamento dela foi direcionado para aplicar os procedimentos da metodologia. É, por meio dos menus de navegação da plataforma, possível:

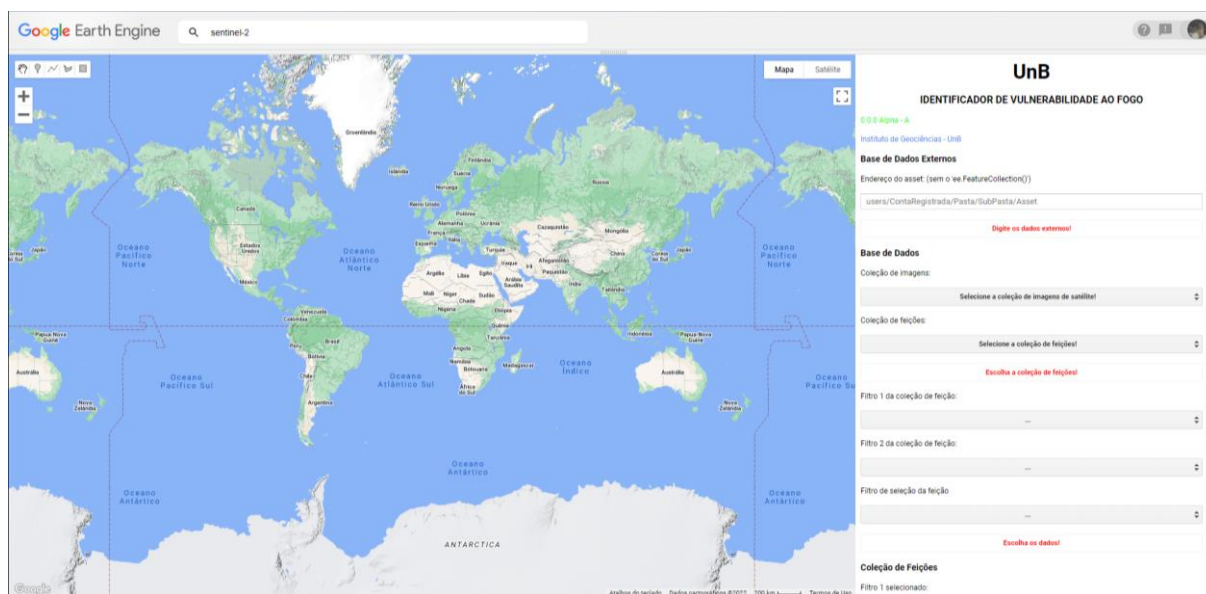
- Carregar a coleção de imagens: no caso da pesquisa foi o “Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C”;
- Carregar a feição: no caso da pesquisa foi o PARNA Brasília (a plataforma conta com recursos adicionais de filtragem, pois é possível carregar uma base de dados de feições e por meio da tabela de atributos é possível filtrar a feição desejada);
- Selecionar a data: a opção serviu para ajudar o processo de carregamento de imagens para averiguação de condições da cena, pois tradicionalmente teria que compilar a rotina toda

vez que uma nova verificação fosse feita e essa forma de análise tornou a plataforma otimizada na questão de visualização de imagens;

- Escolher as imagens pré- e pós-fogo: as imagens escolhidas são desenhadas em tempo real no compositor de mapas do GEE, o que permitiu a averiguação, de forma rápida, da qualidade de cena e ocorrência de eventos de fogo.

Conforme Figura 48, é possível observar o aplicativo com imagens carregadas para o Evento 1 (que será descrito no tópico a seguir).

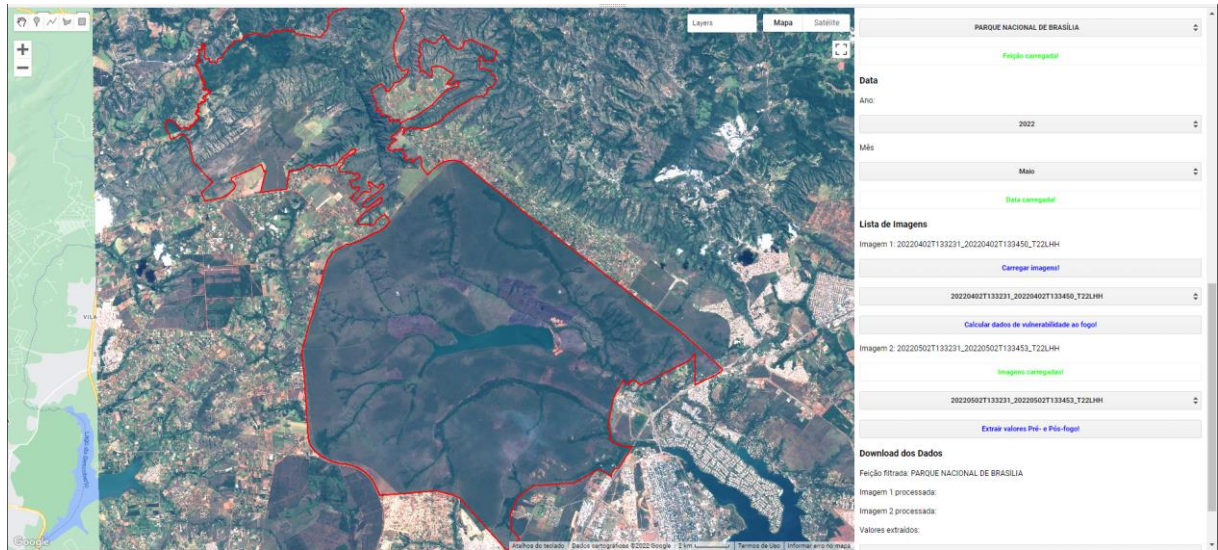
Figura 47 – Aplicativo construído no GEE



Fonte: Autor

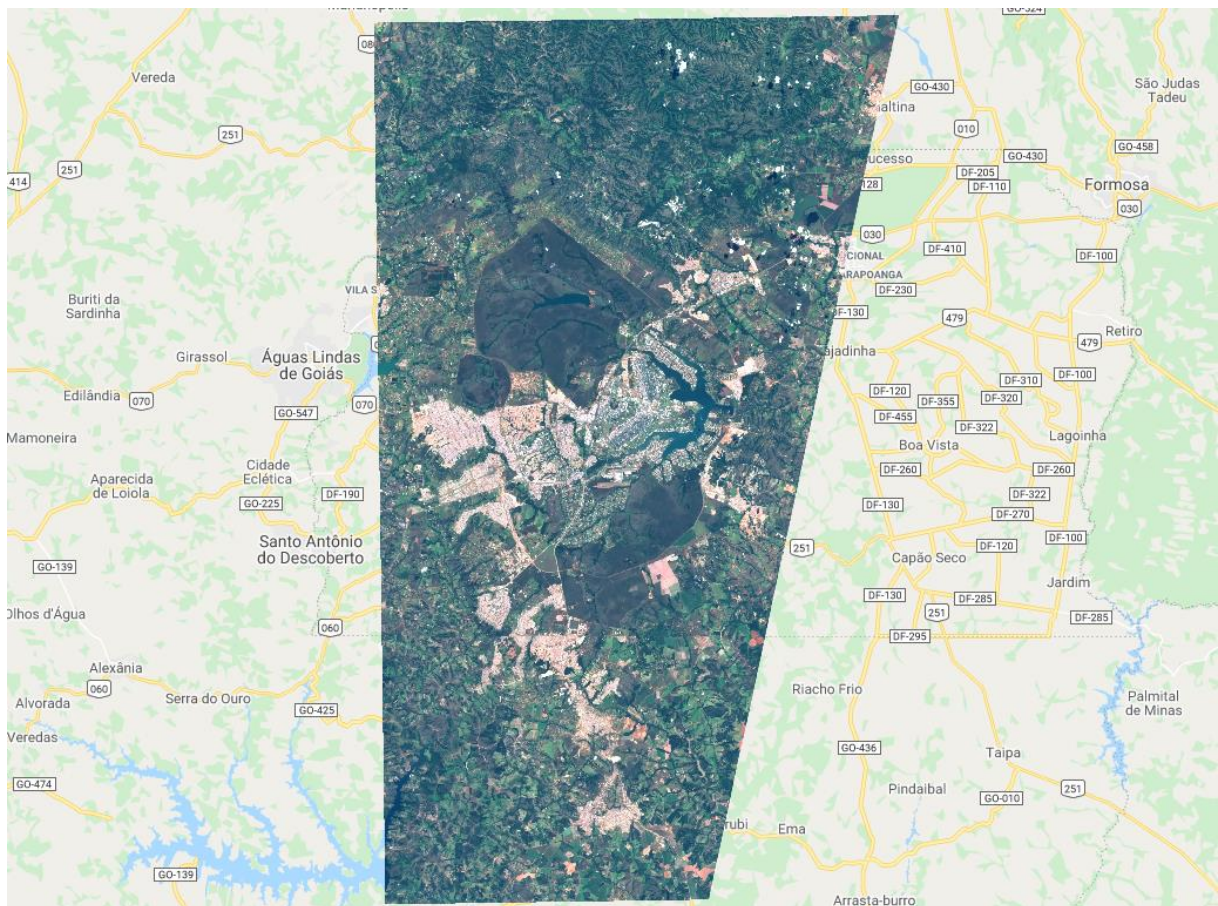
O levantamento das datas permitiu a rápida pesquisa na plataforma das imagens a serem utilizadas, bem como a averiguação da qualidade da cena, conforme observado na Figura 49. Por meio das opções construídas no aplicativo, foi possível realizar a metodologia descrita: calcular as máscaras dos materiais para cada evento, calcular os índices para cada evento e por fim realizar a extração dos dados.

Figura 48 – Plataforma do GEE com dados carregados



Fonte: Autor

Figura 49 – Identificação de cena do satélite Sentinel-2 MSI na plataforma do GEE

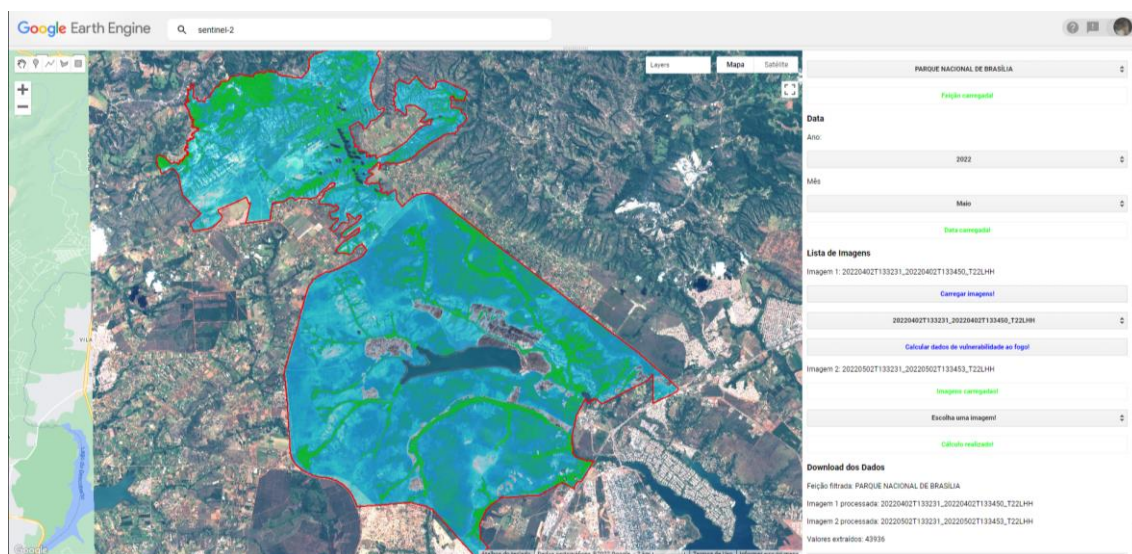


Fonte: Autor

A Figura 50 mostra o cálculo do índice NBR para a cena mencionada. Há de salientar que o processo é automático e todos os produtos são calculados em conjunto.

É possível observar que a plataforma logrou êxito e apresentou eficiência nos processos de identificação de cenas e cálculo dos produtos. A praticidade e velocidade dos processamentos aliados a boa otimização do aplicativo feito permitiu a construção de uma nova sistemática de análise de dados no GEE que subsidiará outras pesquisas que envolvam a mesma metodologia de análise de queimadas, pois, conforme observado, o processo pode ser replicado de maneira intuitiva e a proximidade que a interface gráfica traz ao usuário vai permitir a aproximação de pesquisadores que não possuem o aprofundamento na programação.

Figura 50 – Cálculo do NBR para a cena supracitada



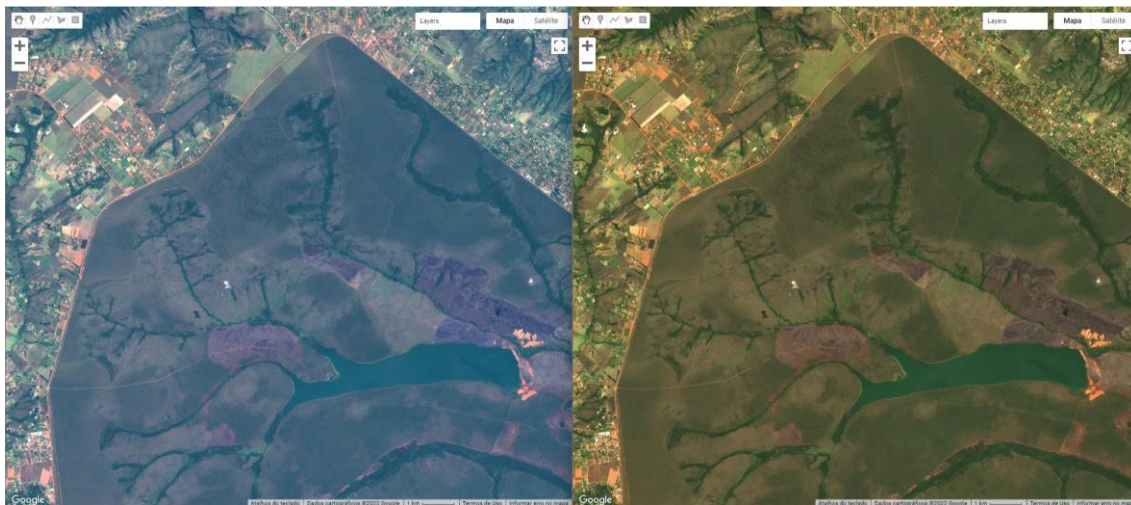
Fonte: Autor

Calibração Atmosférica

A integração do SIAC do código desenvolvido no portal do GEE mostrou-se bastante satisfatória. Foi possível realizar a correção atmosférica dos dados *Level-1C* dentro do aplicativo construído no GEE. A coleção *Level-1C* foi importada e corrigida com o *plugin* SIAC dentro do GEE. A Figura 51 mostra a mesma cena do *Sentinel-2*, porém a esquerda não possui correção atmosférica e a da direita possui a correção pela metodologia do SIAC.

A correção incorporada dentro do programa do GEE permite a análise de diversas imagens já aplicando a correção atmosférica, com a grande vantagem de ser uma solução completa dentro da plataforma, evitando *downloads* e *uploads* de informações.

Figura 51 – Confronto de cenas sem e com correção atmosférica, respectivamente

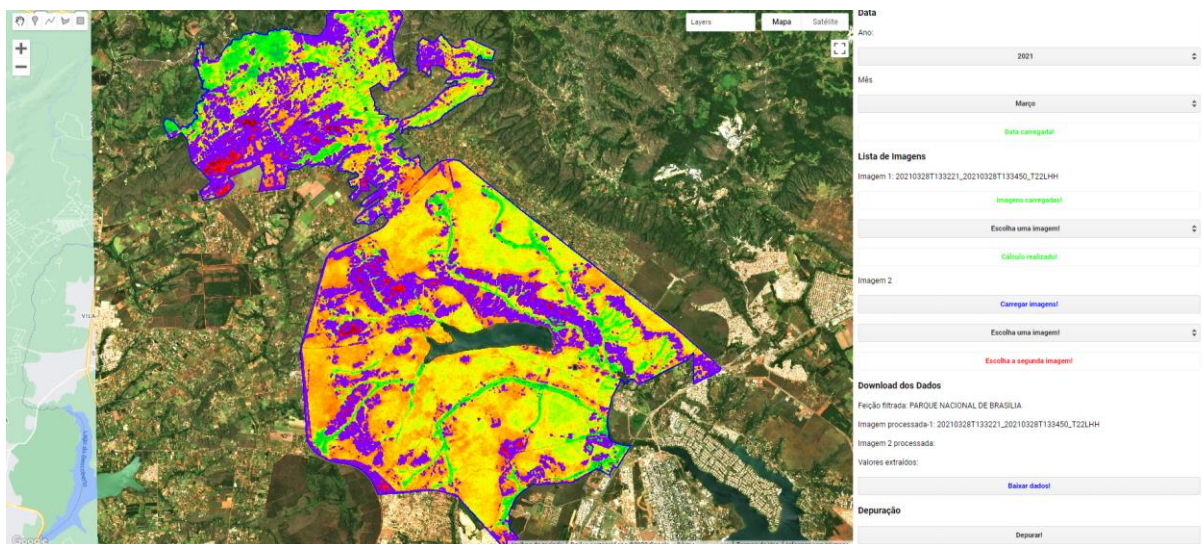


Fonte: Autor

Resultado final na plataforma

A Figura 52 demonstra a plataforma criada no GEE com a demonstração do funcionamento e com o resultado proposto pela metodologia, evidenciando as zonas com potencial combustível, servindo como sistema de alerta direcionador e auxiliador às políticas de combate a incêndios.

Figura 52 – Aplicação da metodologia empregada com o resultado das zonas críticas



Fonte: Autor

Há de salientar que a plataforma foi construída de modo a ser a possível analisar toda gama feições existentes, é possível importar uma feição e analisar as imagens que registram a

região desse polígono. No caso, está importado as feições das unidades de conservação, logo é possível estender essa análise para todas as unidades de conservação presentes no arquivo.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se, que a hipótese previamente lançada foi confirmada, é possível estipular limiares físicos que determinar o intervalo de criticidade a incêndios por meio de índices espectrais. Também foi possível desenvolver uma plataforma de alerta a regiões críticas a incêndio no GEE.

Observou-se que as regiões queimadas apresentavam um padrão de valores nos índices, que explicavam a criticidade da região, fazendo com que a mesma se tornasse um *hotspot* a eventos de fogo.

Observou-se também que a senescência média da região queimada se concentra na região de valores próximo ao intervalo que se considera o início do estágio de senescência, atribuindo a característica de que as regiões queimadas apresentavam vegetação mais velha.

A umidade das regiões queimadas também estava no limiar do início do intervalo de estresse hídrico, ou seja, tanto a senescência quanto o estresse hídrico apresentaram valores próximos ao início de seus intervalos negativos, indicando que essas regiões já passavam por um estresse generalizado, o que culminou em seu estágio propício para início de incêndios.

O verdor apresentou valores um pouco mais variados, indicando que a senescência e a umidade são fatores de maior peso para determinação da criticidade, pois essa variação indica que o verdor estava mais heterogêneo nas regiões queimadas, abrangendo vegetações com maior e menor grau de verdor.

A respeito do núcleo da metodologia, que consiste na criação da rotina no GEE para as validações das proposições da dissertação, verificou-se aquilo que se esperava do GEE: ferramenta rápida, precisa e com grande capacidade no que diz respeito a inovação de análises espaciais massivas, que se tornam inviáveis de serem feitas em ambientes de computadores pessoais.

A rotina criada para a análise mostrou-se bastante eficiente em integrar os dados relativos ao programa do satélite Sentinel-2 com os comandos de entrada. Foi possível representar toda a metodologia descrita sem grandes dificuldades. Existem sim apontamentos que devem ser feitos a respeito da análise, assim como qualquer outro trabalho científico: tantos os apontamentos que derivam do método quanto os inerentes aos índices e metodologias utilizados na análise.

A metodologia proposta para filtragem dos materiais contaminantes demonstrou-se eficaz e aplicável nas cenas obtidas, tendo os índices e produtos, de forma combinada, logrado êxito em selecionar e filtrar os materiais propostos.

A metodologia de cálculo de índice espectrais para cada período nos eventos mostrou-se satisfatória e a filtragem das imagens com as máscaras e os limiares propostos permitiu a composição de uma boa imagem para processamento e extração de valores desejados.

Sugere-se mais aprofundamento dos limiares usados nas máscaras, a fim de determinar com maior precisão qual melhor intervalo para cada bioma a ser analisado. Sugere-se também estender o estudo de limiares para outros biomas e unidades de conservação, a fim de obter a variação dos limiares em diferentes biomas.

Sobre a plataforma, sugere-se, além da constante manutenção e estudo, a implementação de mecanismos, tais como a mosaicagem de cenas, para que seja possível analisar regiões cuja dimensão ultrapasse a de uma cena simples, bem como realizar a modelagem do IPC sem a presença do NDVI, comparando os resultados com os obtidos por essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ AGUILAR, R.; ZURITA-MILLA, R.; IZQUIERDO-VERDIGUIER, E.; BY, R. A. A Cloud-Based Multi-Temporal Ensemble Classifier to Map Smallholder Farming Systems. **Remote Sensing**, v. 10, 2018.
- ² ALVES, D. B.; ALVARADO, S. T. Variação espaço-temporal da ocorrência do fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 44, n. 2, 2019.
- ³ ARRUDA, V. L. S.; PIOTEKOWSKI, V. J.; ALENCAR, A.; PEREIRA, R. S.; MATRICARDI, E. A. T. An alternative approach for mapping burn scars using landsat imagery, google earth engine, and deep learning in the brazilian savanna. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, 2021.
- ⁴ BABU, S. K. V.; ROY, A.; AGGARWAL, R. Mapping of forest fire burned severity using the sentinel datasets. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 5, p. 469-474, 2018.
- ⁵ BAPTISTA, G. M. M., BENTO-GONÇALVES, A., VIEIRA, A. **Avaliação das condições de verdor, umidade e de senescência da vegetação queimada no incêndio de braga, portugal, em outubro de 2017**. In: II Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente - Desafios para Afirmar a Lusofonia na Geografia Física e Ambiente, 2018, Guimarães, Portugal. Anais (on-line). Guimarães: CEGOT-UMinho, Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade do Minho, 2018. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/60165/1/II_ELAAGFA_Baptista_et_al.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020.
- ⁶ BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. **Geografia**, Rio Claro, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.
- ⁷ BATISTA, A. C. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2 p. 237-241, 2004.
- ⁸ BARMPOUTIS, P.; PAPAIONNOU, P.; DIMIITROPOULOS, K.; GRAMMALIDIS, N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. **Sensors**, v. 20, 2011.
- ⁹ BENTO-GONÇALVES, A.; VIEIRA, A.; BAPTISTA, G. ROCHA, J.; MOURA, SARAH. The 2017 Large wildfire of braga - evaluation of the different conditions of the burned vegetation. **Geo-Eco-Trop**, v. 43, n. 4, p. 627-640, 2019.
- ¹⁰ BRASIL. Lei nº 11.285, de 8 de março de 2006. **Altera os limites do Parque Nacional de Brasília**. Brasília: Presidência da República, [2006]. Disponível em: <

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11285.htm>. Acesso em: 08 mai. 2020.

¹¹ BROVELLI, M. A.; SUN, Y.; YORDANOV, V. Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on google earth engine. **International Journal of Geo-Information**, 2020.

¹² CAMARGOS, R. M. F. **Unidades de conservação em Minas Gerais: levantamento e discussão**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 67p., 2001.

¹³ CASU, F.; MANUNTA, M.; AGRAM, P. S.; CRIPPEN, R. E. Big remotely sensed data: tools, applications and experiences. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 1-2, 2017.

¹⁴ CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GRÉGOIRE, J-M. Detecting vegetatio leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing**, v. 77, p. 22-23, 2001.

¹⁵ CHEN, B.; XIAO, X.; LI, X.; PAN, L.; DOUGHTY, R.; MA, J.; DONG, J.; QIN, Y.; ZHAO, B.; WU, Z.; SUN, R.; LAN, G.; XIE, G.; CLINTON, N.; GIRI, C. A mangrove forest map of china in 2015: analysis of time series landsat 7/8 and sentinel-1a imagery in google earth engine cloud computing platform. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 104 - 120, 2020.

¹⁶ COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and conservation of the cerrado: recent advances and old challenges. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, p. 1465-1475, 2020.

¹⁷ DELCOURT., C. J. F.; COMBEE, A.; IZBICKI, B.; MACK, M. C.; MAXIMOV, T.; PETROV, R.; ROGERS, B. M.; SCHOLTEN, R. C.; SHESTAKOVA, T. A.; WEES, D.; VARAVERBEKE, S. Evaluating the differenced normalized burn ratio for assessing fire severity using sentinel-2 imagery in northeast siberian larch forests. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2311, 2021.

¹⁸ DU, Y.; ZHANG, Y.; LING, F.; WANG, Q.; LI, W.; LI, X. Water bodies' mapping from sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the swir band. **Remote Sensing**, v. 354, n. 8, 2017.

¹⁹ DUAN, T.; CHAPMAN, S. C.; GUO, Y.; ZHENG, B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crop Research**, v. 210, p. 71-80, 2017.

²⁰ CARELLA, E.; ORUSA, T.; VIANI, A.; MELONI, D.; BORGOGNO-MONDINO, E.; ORUSA, R. An integrated, tentative remote-sensing approach based on ndvi entropy to model canine distemper virus in wildlife and to prompt science-based management policies. **MDPI: Animals**, v. 12, n. 1049, 2022.

- ²¹ FALLEIRO, R. M.; SANTANA, M. T.; BERNI, C. R. As contribuições do manejo integrado do fogo para o controle dos incêndios florestais nas terras indígenas do Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v. 6, n. 2, p. 88-105, 2016.
- ²² FASSNACHT, F. E.; SCHMIDT-RIESE, E.; KATTENBORN, T.; HERNÁNDEZ, J. Explaining sentinel 2-based dnbr and rdnbr variability with reference data from the bird's eye (uas) perspective. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, n. 1, 2021.
- ²³ FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C. A synergetic approach to burned area mapping using maximum entropy modeling trained with hyperspectral data and viirs hotspots. **Remote Sensing**, v. 12, n. 858, 2020.
- ²⁴ FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 413–429, 2007.
- ²⁵ FREITAS, E. P. Agronegócio e geopolítica do liberalismo transnacional: biodiversidade e soberania alimentar em risco na América do Sul. **Tramas y Redes**, v. 44, n. 2, 2019.
- ²⁶ GAIKWAD, K. M.; QUADRI, A.; AKSHADA, S.; RESHMA, Z. Fire monitoring and control system. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 1800-1802, 2016.
- ²⁷ GOIS, G.; FREITAS, W. K.; JÚNIOR, J. F. O. Spatial-temporal of fire foci in the state of Rio de Janeiro, Brazil. Uberlândia: **Bioscience Journal**, v. 36, n. 3, p. 1008-1017, 2019.
- ²⁸ GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Elsevier: **Remote Sensing Environment** v.202, p. 18-27, 2017.
- ²⁹ GRANEMANN, D. C.; CARNEIRO, G. L. Monitoramento de focos de incêndio e áreas queimadas com a utilização de imagens de sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.1, n.1, p. 55-62, 2009.
- ³⁰ HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. **Observing the forest and the trees: the first high resolution global maps of forest cover change**. Science: AAAS, 2013.
- ³¹ HARDISKY, M.A., V. KLEMAS, and R.M. SMART. The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of *Spartina Alterniflora* Canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, p. 77-83, 1983.

- ³² HASHIM, H.; LATIF, Z. A.; ADAN, N. A. Urban vegetation classification with ndvi threshold value method with very high resolution (vhr) pleiades imagery. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 4, p. 237–240, 2019.
- ³³ HEROLD, M.; ROBERTS, D. A.; GARDNER, M. E.; DENNISON, P. E. Spectrometry for urban area remote sensing—Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. Elsevier: **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 304-319, 2004.
- ³⁴ HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. C.; ALVES, R. J. V.; WEBER, E. J.; ALEXANDRE A. B.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. The brazilian cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060-4073, 2021.
- ³⁵ HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, X.; LIU, C.; GONG, P.; YANG, J.; BAI, Y.; ZHENG, W.; ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in beijing using all landsat images in google earth engine. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 166-176, 2017.
- ³⁶ HUNT, E. R. Jr.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, p. 43–54, 1989.
- ³⁷ IBAMA; FUNATURA. **Índice geral do plano de manejo do parque nacional de Brasília**. Plano de Manejo.
- ³⁸ KAPLAN, G.; ADVAN, U. Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. **European Journal of Remote Sensing**, v. 50, n.1, p. 137-143, 2017.
- ³⁹ KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 1, p. 116-126, 2009.
- ⁴⁰ KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio**. Landscape Assessment: Sampling and analysis Methods, 2006.
- ⁴¹ KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Landscape Assessment: Sampling and Analysis Methods**. Landscape Assessment: Sampling and analysis Methods, 2006.
- ⁴² KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Measuring and remote sensing of burn severity**. Landscape Assessment: Sampling and analysis Methods, 1999.
- ⁴³ KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google earth engine applications since inception: usage, trends, and potential. **Remote Sensing**, v. 10, 2018.

- ⁴⁴ LEAL, Fabrício Assis; SOUZA, Cátia Menezes de; LEAL, Glória da Silva Almeida; MIGUEL, Eder Pereira. Utilização do ndvi na análise da vegetação após ocorrência de incêndio. **Nativa, Sinop**, v. 7, n. 2, p. 226-331, 2019.
- ⁴⁵ LIMA, G. S; RIBEIRO, G. A.; GONÇALVES, W. Avaliação da efetividade de manejo das unidades de conservação de proteção integral em minas gerais. **Sociedade de Investigações Florestais**, v. 29, n. 4, p. 647-653, 2005.
- ⁴⁶ LOBATO, R.; MENEZES, J.; LIMA, L. A.; SAPIENZA, J. A. Índice de vegetação por diferença normalizada para análise da redução da mata atlântica na região costeira do distrito de tamoios – cabo frio/rj. **Caderno de Estudos Geoambientais**, v. 1, n. 1, p. 14-22, 2010.
- ⁴⁷ MAGNO, R.; ROCHI, L.; DANIELLI, R.; MATESE, A.; GENNARO, S. F. D.; CHEN, C.; SON, N.; TOSCANO, P. Agrosadow: a new sentinel-2 cloud shadow detection tool for precision agriculture. **Remote Sensing**, v. 13, 2021.
- ⁴⁸ MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L.G. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio araguaia. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 1, p. 5-18, 2009.
- ⁴⁹ MARCYIN. **MarcYin/SIAC: for doi**. Belgium: Bruxelles, 2019.
- ⁵⁰ MARCYIN. **MarcYin/SIAC_GEE: To Publish the Code**. Belgium: Bruxelles, 2019.
- ⁵¹ McFEETERS, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, p. 1425-1432, 1996.
- ⁵² MEDEIROS, R.; PEREIRA, G. S. Evolução e Implementação dos Planos de Manejo Em Parques Nacionais no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 279-288, 2011.
- ⁵³ MEDEIROS, M. B.; FIEDLER, N. C. Incêndios Florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: Desafios para Conservação da Biodiversidade. Santa Maria: **Ciência florestal**, v. 14, n. 2, p. 157-168, 2003.
- ⁵⁴ MELO, A. C. A.; MARTINS, P. T. A. **Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no cerrado utilizando dados sentinel 2**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São Paulo: Santos, 2019.
- ⁵⁵ MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A, CHIVKUNOVA, Olga B.; RAKITIN, Victor Yu. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, p. 135-141, 1999.

- ⁵⁶ MERZLYAK, Mark N.; SOLOVCHENKO, A. Photostability of pigments in ripening apple fruit: a possible photoprotective role of carotenoids during plant senescence. Elsevier: **Plant Science**, v. 163, 2002.
- ⁵⁷ MILCZAREK, M.; ROBAK, A.; ALICJA, G. **Sentinel water mask (SWM) – new index for water detection on sentinel-2 images**. Conference: 7th Advanced Training Course on Land Remote Sensing, 2017.
- ⁵⁸ MILLER, J. D.; THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dnbr). **Remote Sensing**, v. 109, p. 66-80, 2006.
- ⁵⁹ MUTANGA, O.; KUMAR, L. Google earth engine applications. **Remote Sensing**, v. 11, 2019.
- ⁶⁰ NEMANI. **Collaborative Supercomputing for Global Change Science**. EOS, Transactions, American Geophysical Union, v. 90, p. 109-116, 2011.
- ⁶¹ NETO, G. B. S.; BAYMA, A. P.; FARIA, K. M. S.; OLIVEIRA, E. G.; MENEZES, P. H. B. J. Riscos de incêndios florestais no parque nacional de Brasília – Brasil. Coimbra: **Territorium**, v. 23, p. 161-170, 2016.
- ⁶² NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Especificação de um sistema computacional integrado de controle de incêndios florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, 2006.
- ⁶³ NURSAPUTRA, M.; LAREKENG, S. H.; NASRI; HAMZAH, A. S. **The ndvi algorithm utilization on the google earth engine platform to monitor changes in forest density in mining areas**. 2nd Biennial Conference of Tropical Biodiversity: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- ⁶⁴ OLIVEIRA, M. T.; CASSOL, H. L. G.; GANEM, K. A.; DUTRA, A. C.; PIETRO, J. D.; ARAI, E.; SHIMABUKURO, Y. E. Mapeamento da vegetação do cerrado – uma revisão das iniciativas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**, Curitiba, v. 72, 2020.
- ⁶⁵ PATEL, N. N.; ANGIULI, E.; GAMBA, P.; GAUGHAN, A.; LISINI, G.; STEVENS, F. R.; TATEM, A. J.; TRIANNI, G. Multitemporal settlement and population mapping from landsat using google earth engine. Elsevier: **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, 2014.
- ⁶⁶ PENG, W.; SONNE, C.; LAM, S. S.; OK, Y. S.; ALSTRUP, A. K. O. Recuperação das comunidades de arbutus unedo l. no alentejo e algarve sujeitas a ciclos e características de incêndios florestais distintos. **Revista da Associação Portuguesa de Ciência e Vegetação**, v. 12, 2019.

- ⁶⁷ PEREIRA, B. A. S.; VENTUROLI, F.; CARVALHO, F. A. Fire monitoring and control system. **Pesquisa Agropecuária**, v. 41, n. 3, p. 446-445, 2011.
- ⁶⁸ PEREIRA, M.; GUIOMAR, N. The ongoing cut-down of the Amazon rainforest threatens the climate and requires global tree planting projects: a short review. **Environmental Research**, v. 181, 2020.
- ⁶⁹ RAFTOPOULOS, M.; MORLEY, J. Ecocide in the amazon: the contested politics of environmental rights in brazil. **The International Journal of Human Rights**, v. 24, 2020.
- ⁷⁰ RIBEIRO, J. P. F. M.; BAPTISTA, G. M. M. **Análise da Severidade de Queimadas na Amazônia por meio de dados Hiperespectrais**. João Pessoa: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 477-484, 2015.
- ⁷¹ RIBEIRO, N.; RUECKER, G.; GOVENDER, N.; MACANDZA, V.; PAIS, A.; MACHAVA, D.; CHAUQUE, A.; LISBOA, S. N.; BANDEIRA, R. The influence off fire frequency on the structure and botanical composition of savanna ecosystems. **Ecology and Evolution**, v. 9, p. 8253-8264, 2017.
- ⁷² RODRÍGUEZ, M. P. R.; SOARES, R. V.; BATISTA, C. A. TETTO, A. F.; BACERRA, L. W. M. Comparação entre o perfil de incêndios florestais de monte alegre, brasil, e de pinar del río, cuba. **Floresta**, v. 43, n. 2, p. 231-240, 2013.
- ⁷³ ROUSE, J.W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., 1974. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS**. In: Proceeding Of Erts-1 Symposium. Anais ... NASA, United States.
- ⁷⁴ ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; TRIGG, S. N. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. **Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 1, 2006.
- ⁷⁵ SABBATINI, G.; STAMMATI, M.; TAVARES, M. C. H.; GIULIANI, M. V.; VISALBERGHI, E. **Interactions between humans and capuchin monkeys (Cebus libidinosus) in the Parque Nacional de Brasília, Brazil**. Applied Animal Behaviour Science, v. 97, p. 272-283, 2006.
- ⁷⁶ SANTOS, S. M. B.; BENTO-GONÇALVES, A.; FRANCA-ROCHA, W.; BAPTISTA, G. Assessment of burned forest area severity and postfire regrowth in chapada diamantina national park (bahia, brazil) using dnbr and rdnbr spectral indices. **Geosciences**, v. 10, n. 106, 2020.
- ⁷⁷ SANTOS, J. F.; SOARES, R; V.; BATISTA, A. C. Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. **Floresta**, v. 32, n.1, p. 93-100, 2006.

- ⁷⁸ SILVA, S. L.; BAPTISTA, G. M. M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de co2 em diferentes ambientes na amazônia brasileira. Curitiba: **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 354-470, 2015.
- ⁷⁹ SILVA, S. L.; BAPTISTA, G. M. M. Análise do grau de severidade de áreas queimadas na estação ecológica de águas emendadas por meio de dados do landsat 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 2, p. 431-438, 2015.
- ⁸⁰ SOARES, R. V.; SANTOS, J. F. **Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997**. Floresta, v. 32, n. 2, p 219-232, 2002.
- ⁸¹ SOUZA, C. M.; ROSA, M. R.; ALENCAR, A. A.; HASENACK, H.; FERREIRA, L. G.; OLIVEIRA, S. W.; FONSECA, A. V.; DINIZ, C. G.; MONTEIRO, D.; VÉLEZ-MARTIN, E. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020.
- ⁸² SRIWONGSITANON, N.; GAO, H.; SAVENIJE, H. H. G.; MAEKAN, E.; SAENGSAWANG, S.; THIANPOPIRUNG, S. Comparing the normalized difference infrared index (ndii) with root zone storage in a lumped conceptual model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 3361-3377, 2016.
- ⁸³ SRIWONGSITANON, N.; GAO, H.; SAVENIJE, H. H. G.; MAEKAN, E.; SAENGSAWANG, S.; THIANPOPIRUNG, S. The Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for soil moisture storage in hydrological modelling. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, 2015.
- ⁸⁴ SZABÓ, S.; GÁCSI, Z.; BALÁZS, B. Specific features of ndvi, ndwi and mndwi as reflected in land cover categories. **Landscape & Environment**, v. 10, p. 194-202, 2016.
- ⁸⁵ TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. M. M. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do df. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9 n. 1, p. 250-264, 2016.
- ⁸⁶ TEOBALDO, D.; BAPTISTA, G. M. M. Quantificação do grau de severidade de queimada em unidades de conservação no distrito federal por meio dos índices espectrais dnbr e rdnbr. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Anais XVI, p. 6534-6540, 2013.
- ⁸⁷ TEZA, C. T. V. **Proposta de modelagem de qualidade ambiental em áreas metropolitanas, por meio de dados de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília. Brasília, p. 110, 2016.
- ⁸⁸ TOMZHINSKI, G. W; COURA, P. H. F; FERNANDES, M. C. Avaliação da detecção de focos de calor por sensoriamento remoto para o parque nacional do itatiaia. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília –DF, v. 1, n 2, p. 201-211, 2011.

- ⁸⁹ TORRES, F. T. P.; RIBEIRO, G. A. Índices de risco de incêndios florestais em juiz de fora/mg. Seropédica: **Floresta e Ambiente**, v. 15, n.2, p. 24-34, 2008.
- ⁹⁰ TOWNSHEND, J.; JUSTICE, C.; LI, W.; GURNEY, C.; McMANUS, J. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. **Remote Sensing**, v. 35, p. 243-255, 1991.
- ⁹¹ TUBELIS, D. P. Fire management and aspects of the nesting biology of the red-legged seriema (*cariama cristata*) in woodlands at parque nacional das emas, central cerrado. **Revista Brasileira de Ornitologia**, v. 27, n. 4, p. 230-237, 2019.
- ⁹² VERNOOIJ, R.; GIONGO, M.; BORGES, M. A.; COSTA, M. M.; BARADAS, A. C. S.; WERF, G. R. V. D. Intraseasonal variability of greenhouse gas emission factors from biomass burning in the brazilian cerrado. **Biogeosciences**, v. 1, p. 1375-1393, 2021.
- ⁹³ VLASSOVA, L. PÉREZ-CABELLO, F.; MIMBERERO, M. R.; LLOVER, R. M.; GARCÍA-MARTIN, A. Analysis of the relationship between land surface temperature and wildfire severity in a series of landsat images. **Remote Sensing**, v. 6, p. 6136-6162, 2014.
- ⁹⁴ WARNER, R. A.; FAN, C. Optical spectra of phytoplankton cultures for remote sensing applications: focus on harmful algal blooms. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 4, n. 2, 2013.
- ⁹⁵ WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R.; ANDERSON, M.; BELWARD, A.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W.; FENG, G.; GOWARD, S. N.; HELDER, D.; HELMER, E.; NEMANI, R.; OREOPOULOS, L.; SCHOTT, J.; THENKABAIL, P. S.; VERMOTE, E. F.; VOLGEMANN, J.; WULDER, M. A.; WYNNE, R. Free access to landsat imagery. **Science**, v. 320, 2008.
- ⁹⁶ YANG, X.; ZHAO, S.; QIN, X.; ZHAO, N.; LIANG, L. Mapping of urban surface water bodies from sentinel-2 msi imagery at 10 m resolution via ndwi-based image sharpening. **Remote Sensing**, v. 9, n. 596, 2017.
- ⁹⁷ YIN, F.; LEWIS, P. E.; GÓMES-DANS, J. L. Bayesian atmospheric correction over land: sentinel-2/msi and landsat 8/oli. **EGUsphere**, v. 170, 2022.
- ⁹⁸ ZAGAJEWSKI, B.; TOMMERVIK, H.; BJERKE, J. W.; RACZKO, E.; BOCHENEK, Z.; KLOS, A.; JAROCINSKA, A.; LAVENDER, S.; ZIÓLKOWSKI, D. Intraspecific differences in spectral reflectance curves as indicators of reduced vitality in high-arctic plants. **Remote Sensing**, v. 9, 2017.
- ⁹⁹ ZHANG, Z.; LIU, M.; LIU, X.; ZHOU, G. A new vegetation index based on multitemporal sentinel-2 images for discriminating heavy metal stress levels in rice. **Sensors**, v. 18, 2018.

¹⁰⁰ ZHU, Z.; WULDER, M. A.; ROY, D. P.; WOODCOCK, C. E.; HANSEN, M. C.; RADELOFF, V. C.; HEALEY, S. P.; SCHAAF C.; HOSTERT, P.; STROBL, P.; PEKEL, J. LYMBURNER, L.; PAHLEVAN, N.; SCAMBOS, T. A. Benefits of the free and open landsat data policy. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 382-385, 2019.

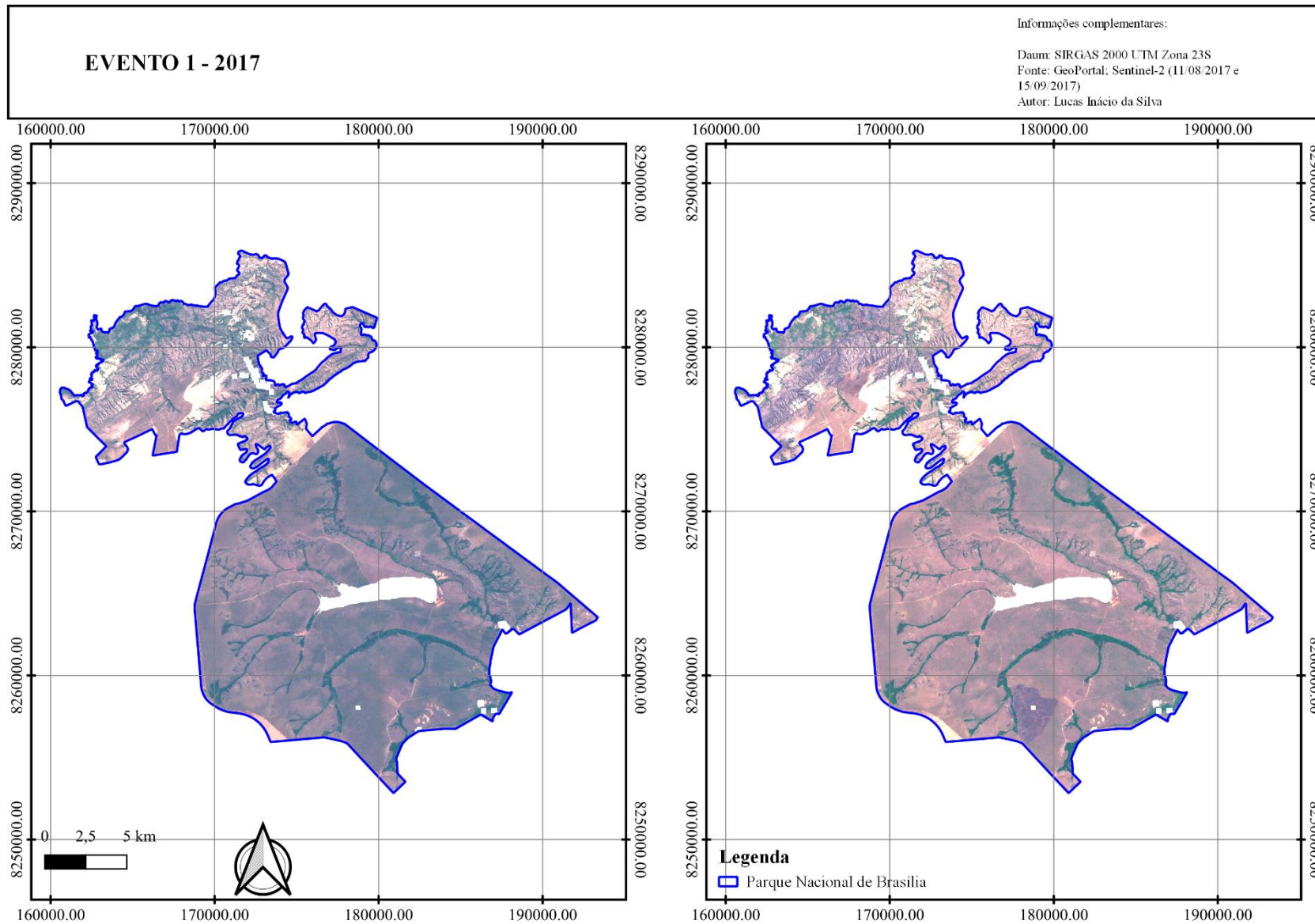
APÊNDICE A

LINK PARA O APLICATIVO NO GEE

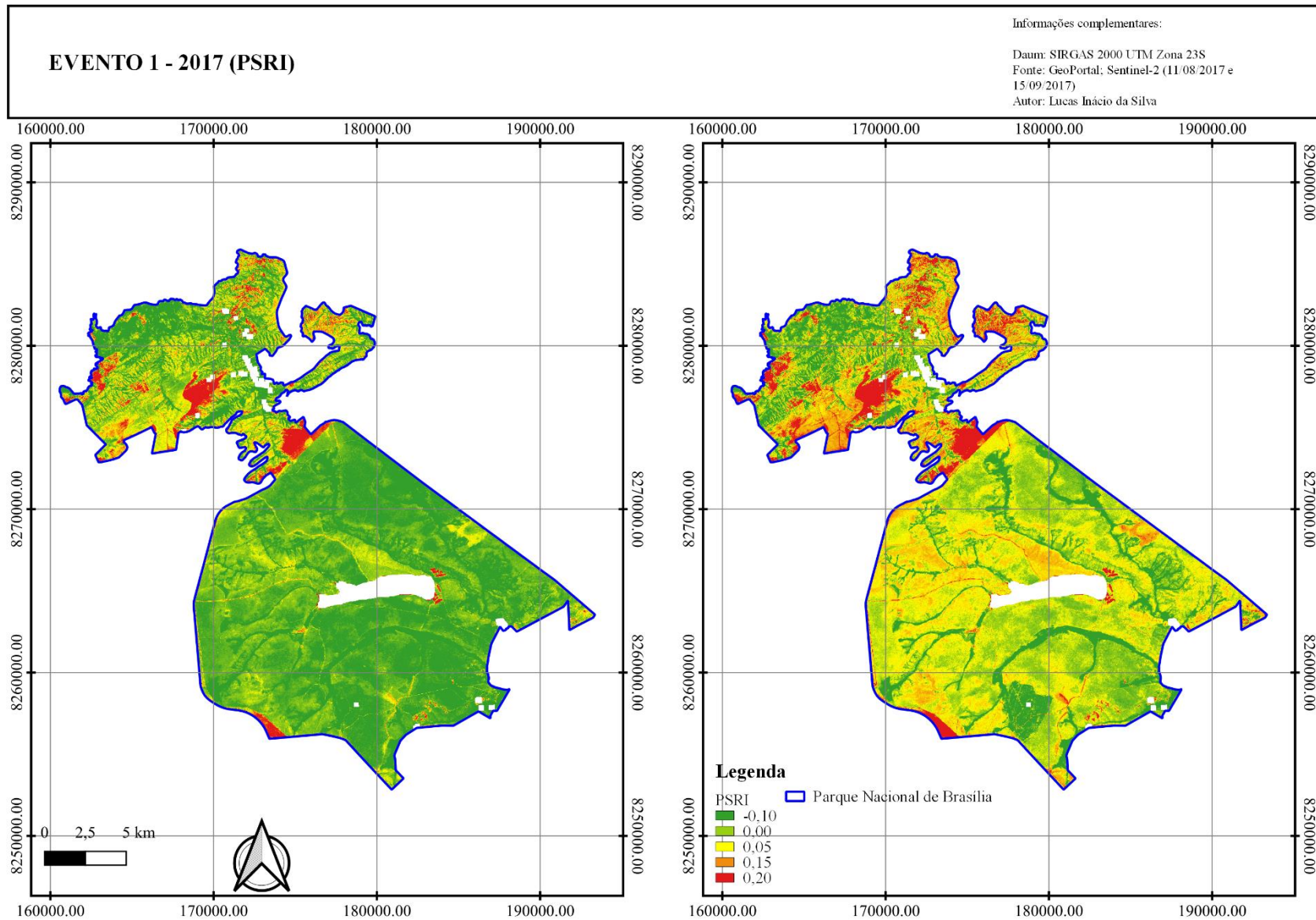


Escaneie o código acima para solicitar acesso à plataforma do GEE. Lembrando que durante a fase de implementação os acessos serão mediante solicitação. Após lançamento, será aberta de forma permanente.

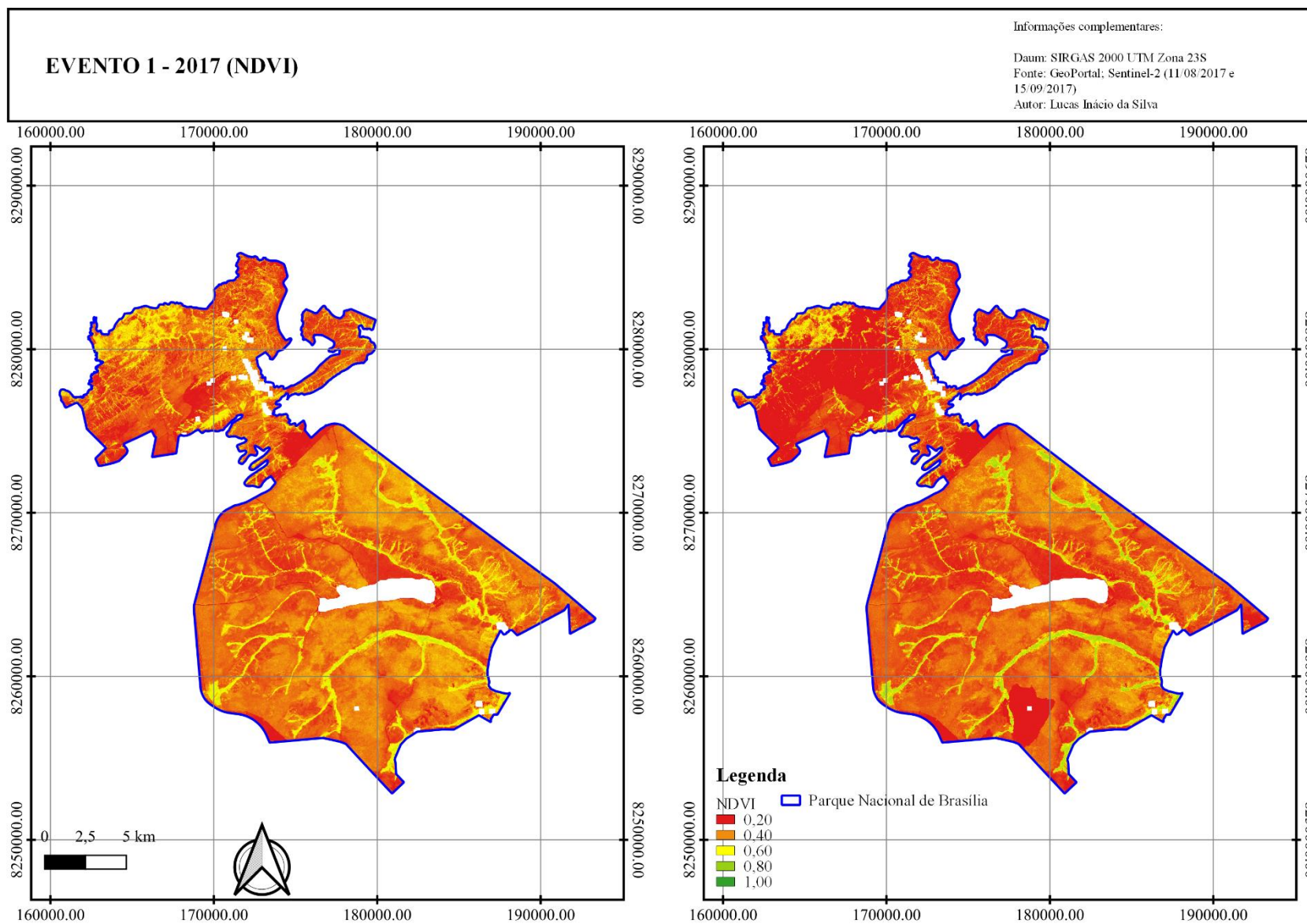
ANEXO I – EVENTO 1



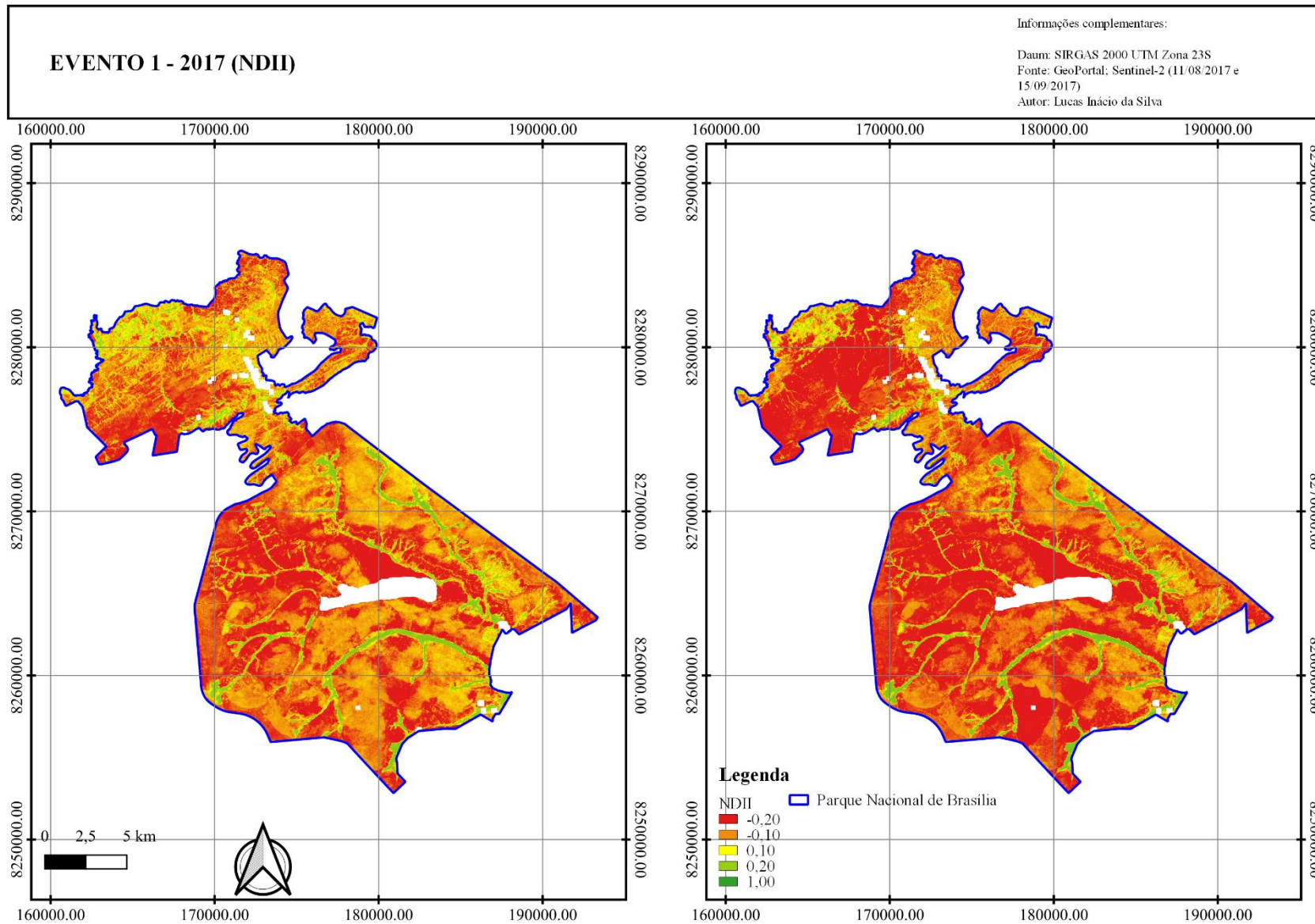
ANEXO II – Cena PSRI para o Evento 1



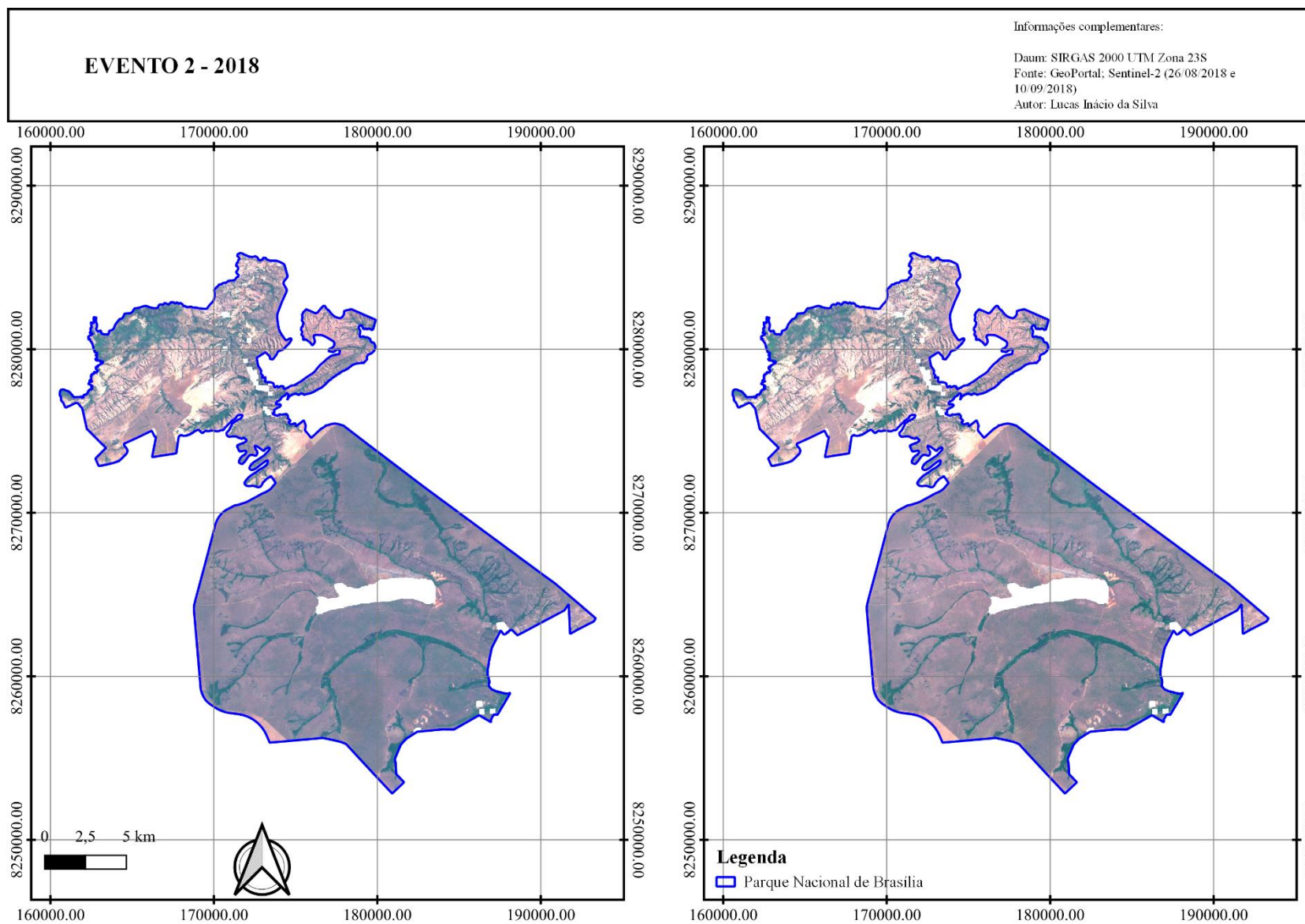
ANEXO III – Cena NDVI para o Evento 1



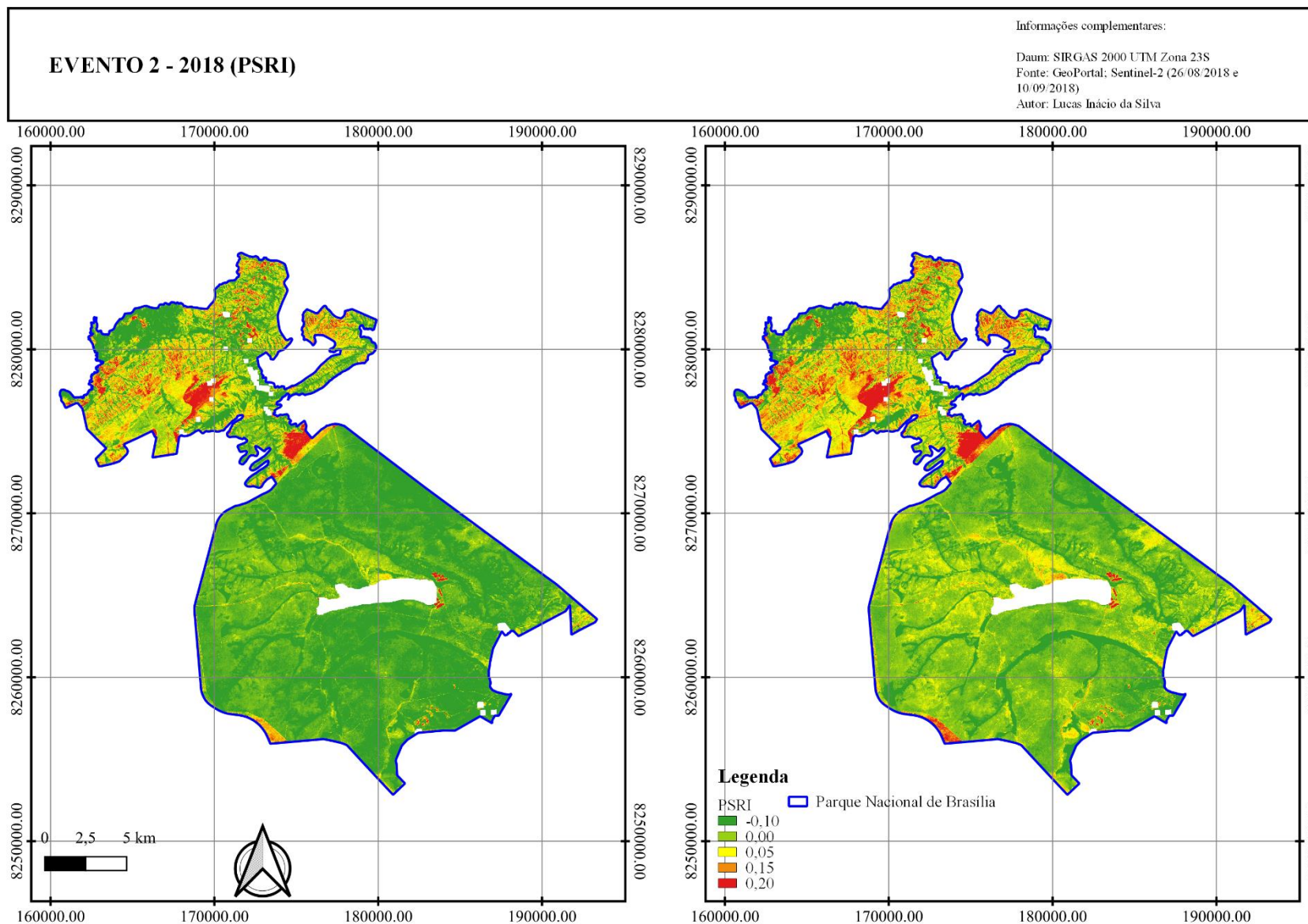
ANEXO IV – Cena NDII para o Evento 1



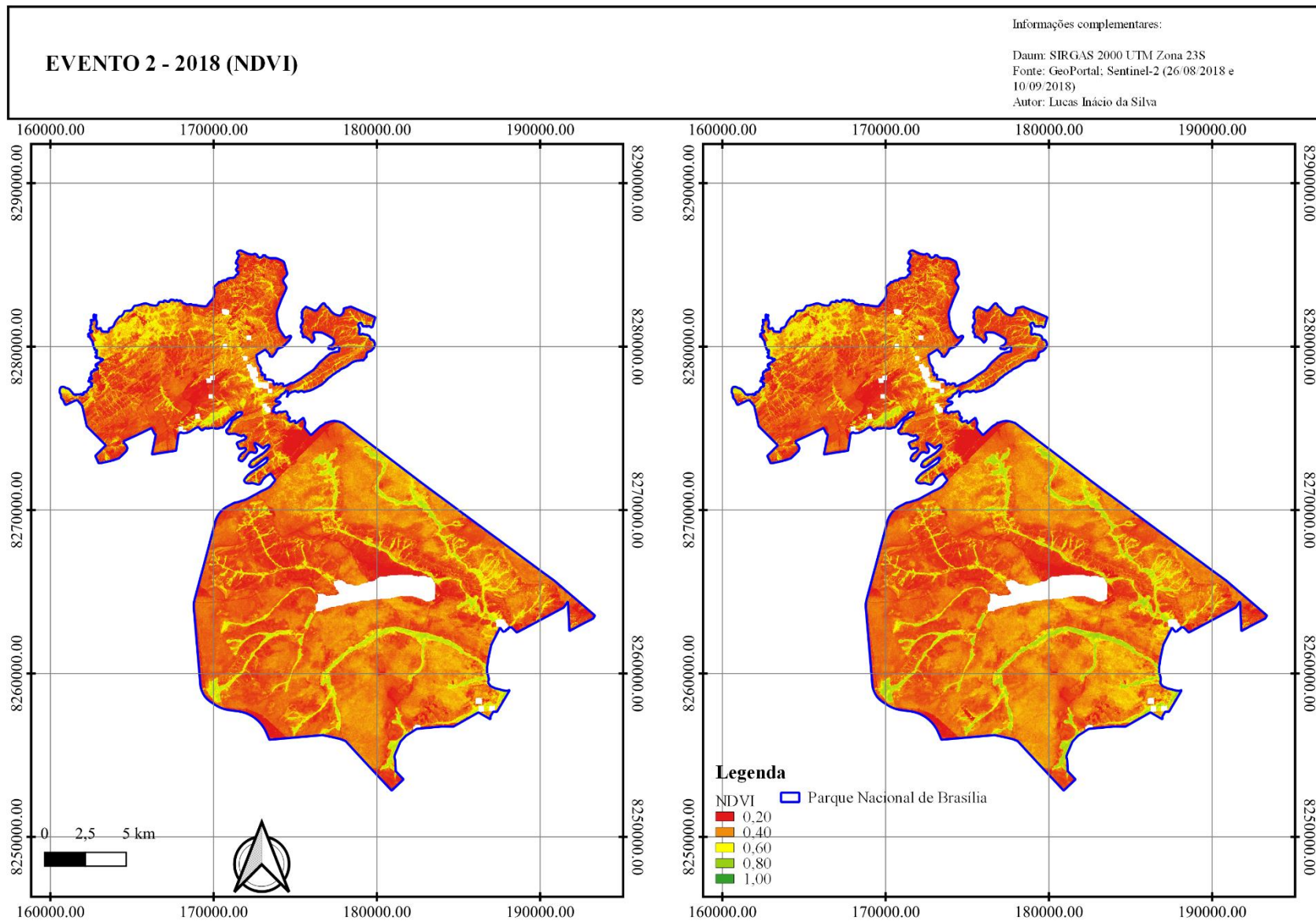
ANEXO V – Evento 2



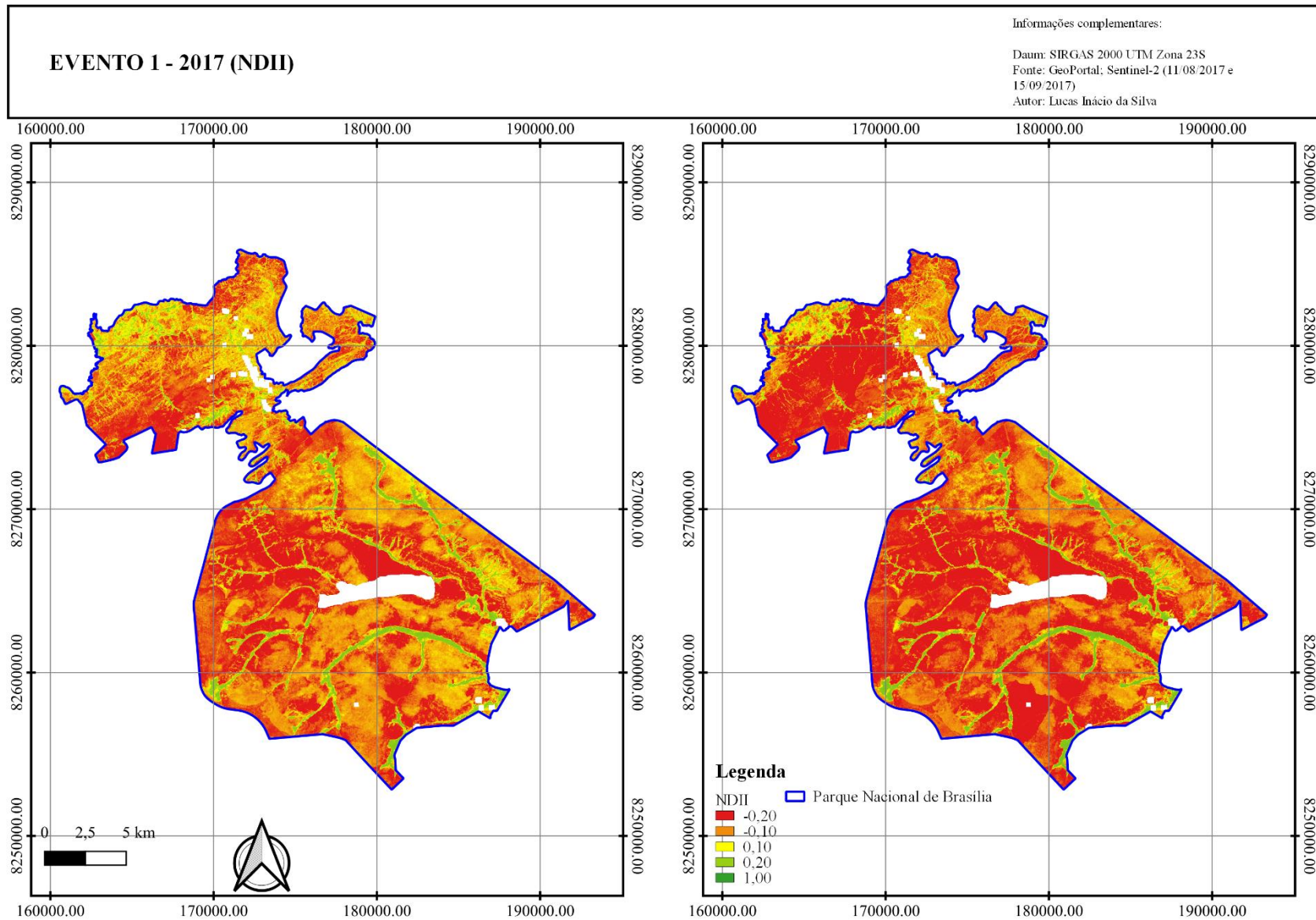
ANEXO VI – Cena PSRI para o Evento 2



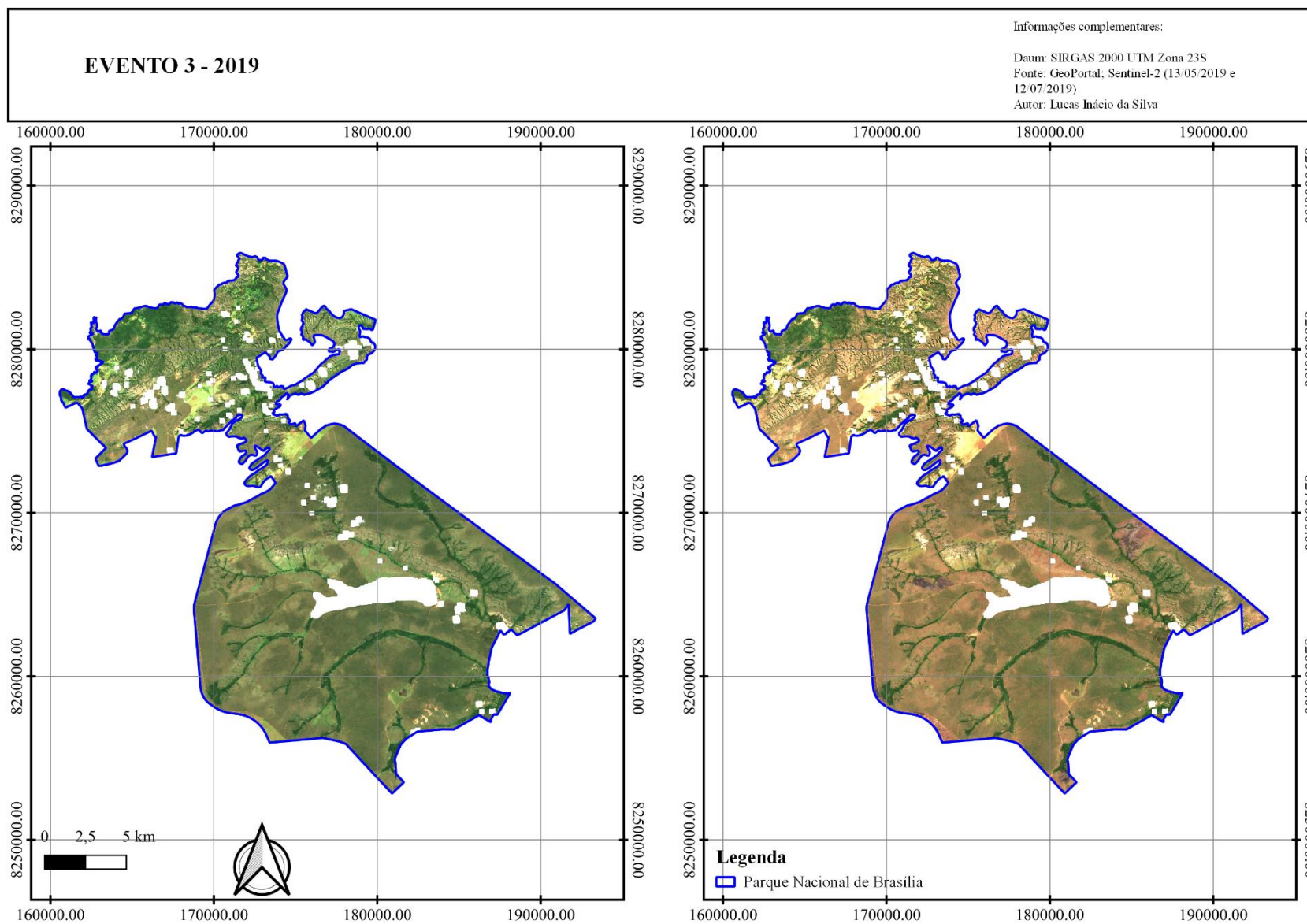
ANEXO VII – Cena NDVI para o Evento 2



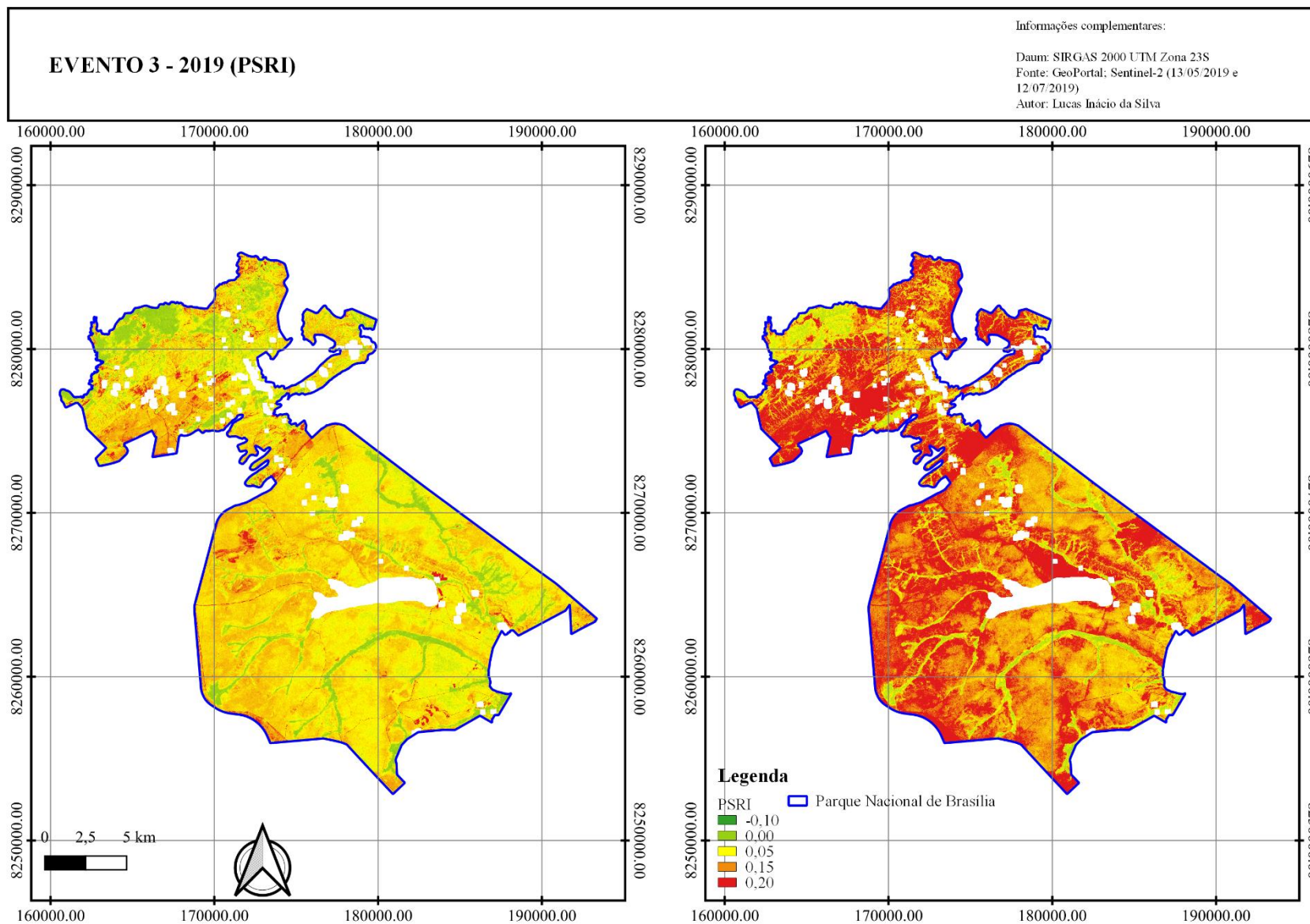
ANEXO VIII – Cena NDII para o Evento 2



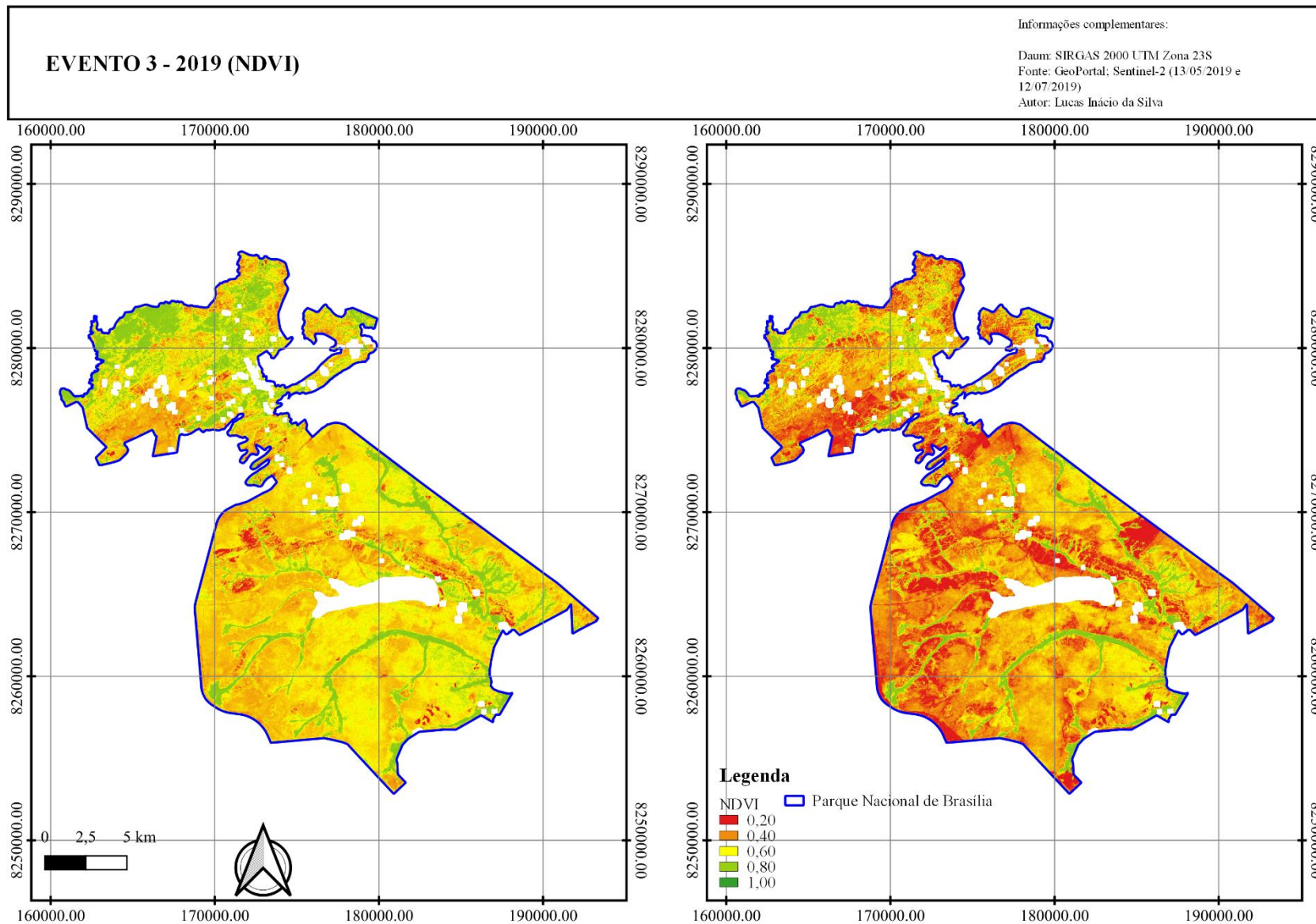
ANEXO IX – Evento 3



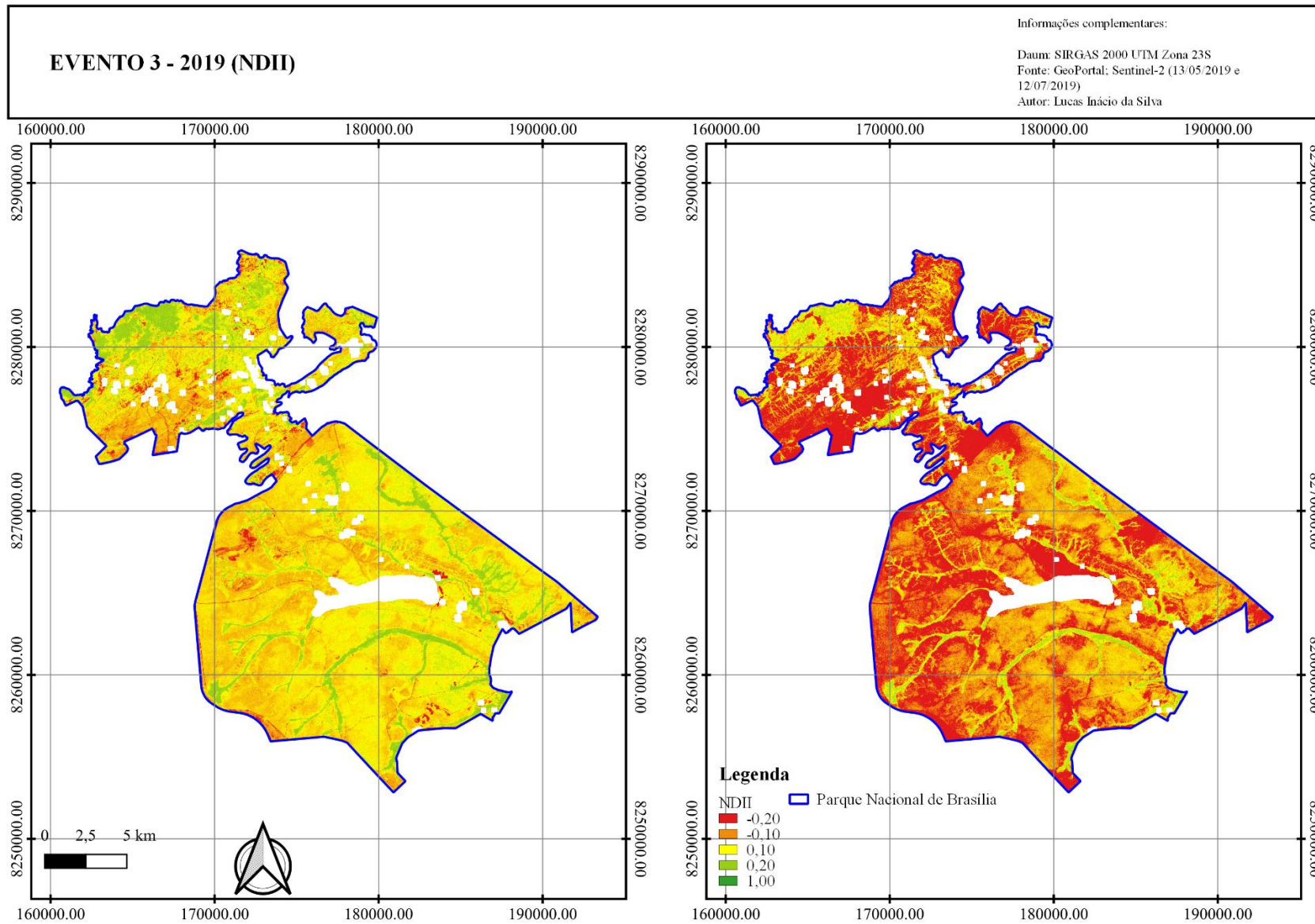
ANEXO X – Cena PSRI para o Evento 3



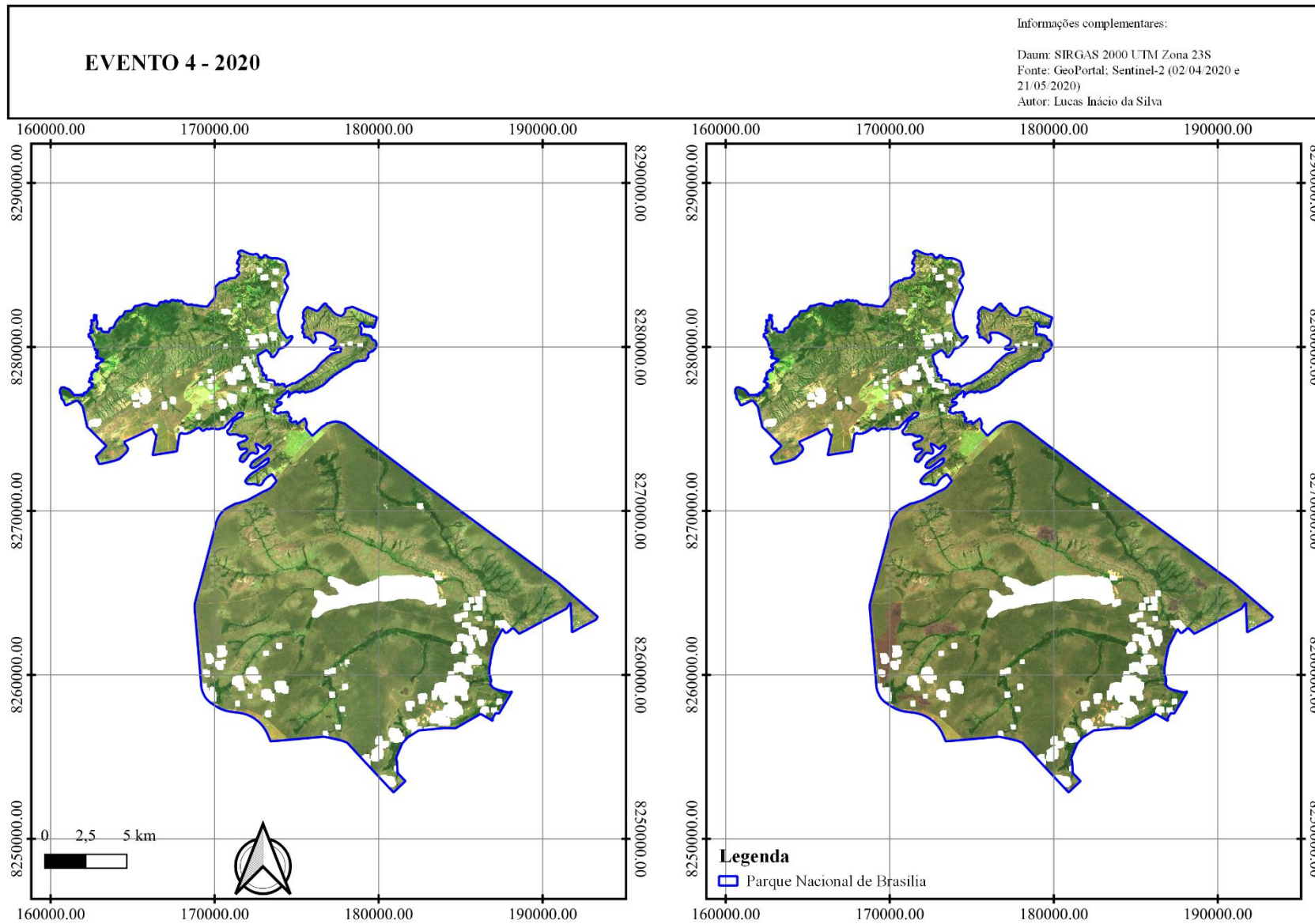
ANEXO XI – Cena NDVI para o Evento 3



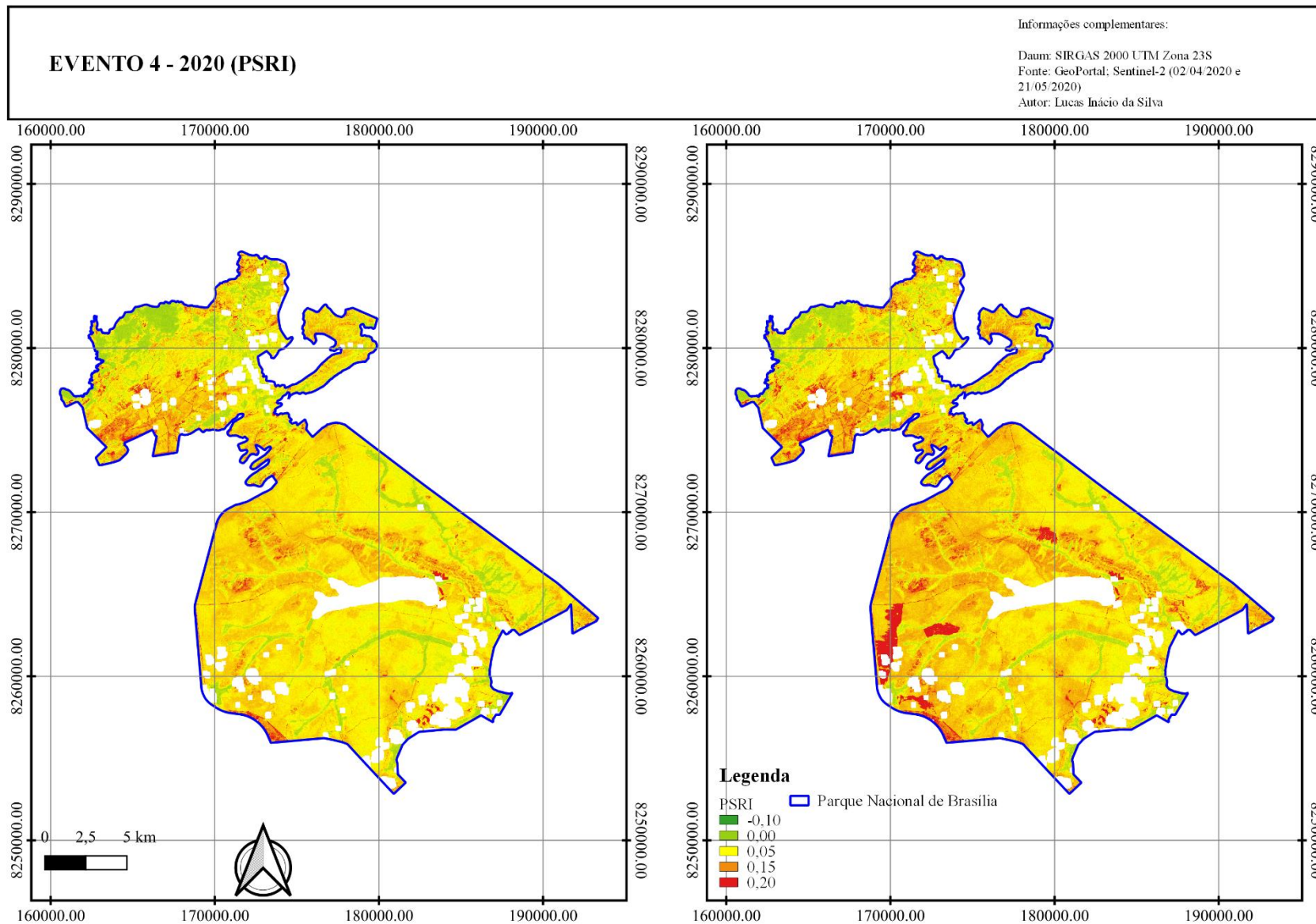
ANEXO XII – Cena NDII para o Evento 3



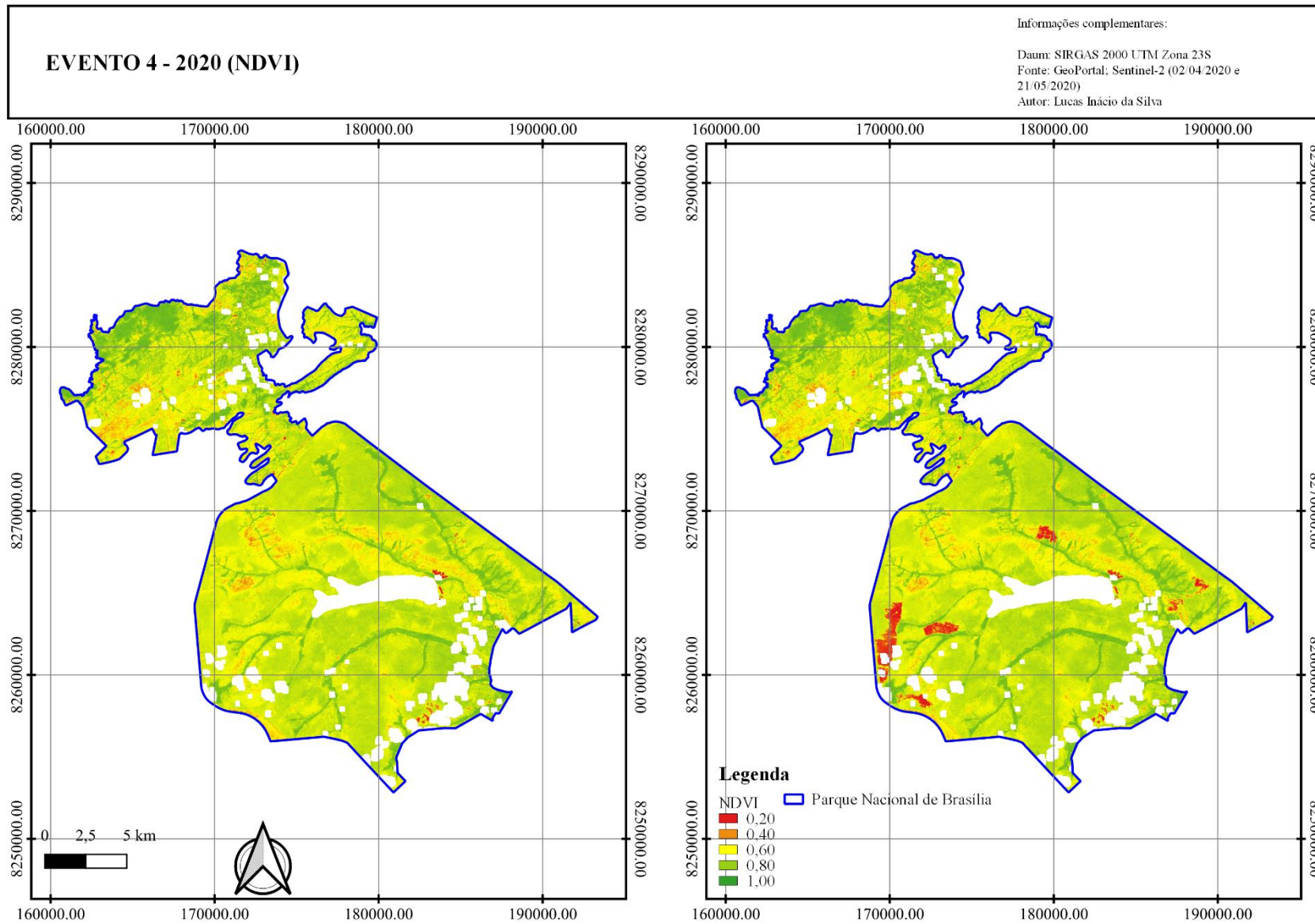
ANEXO XIII – Evento 4



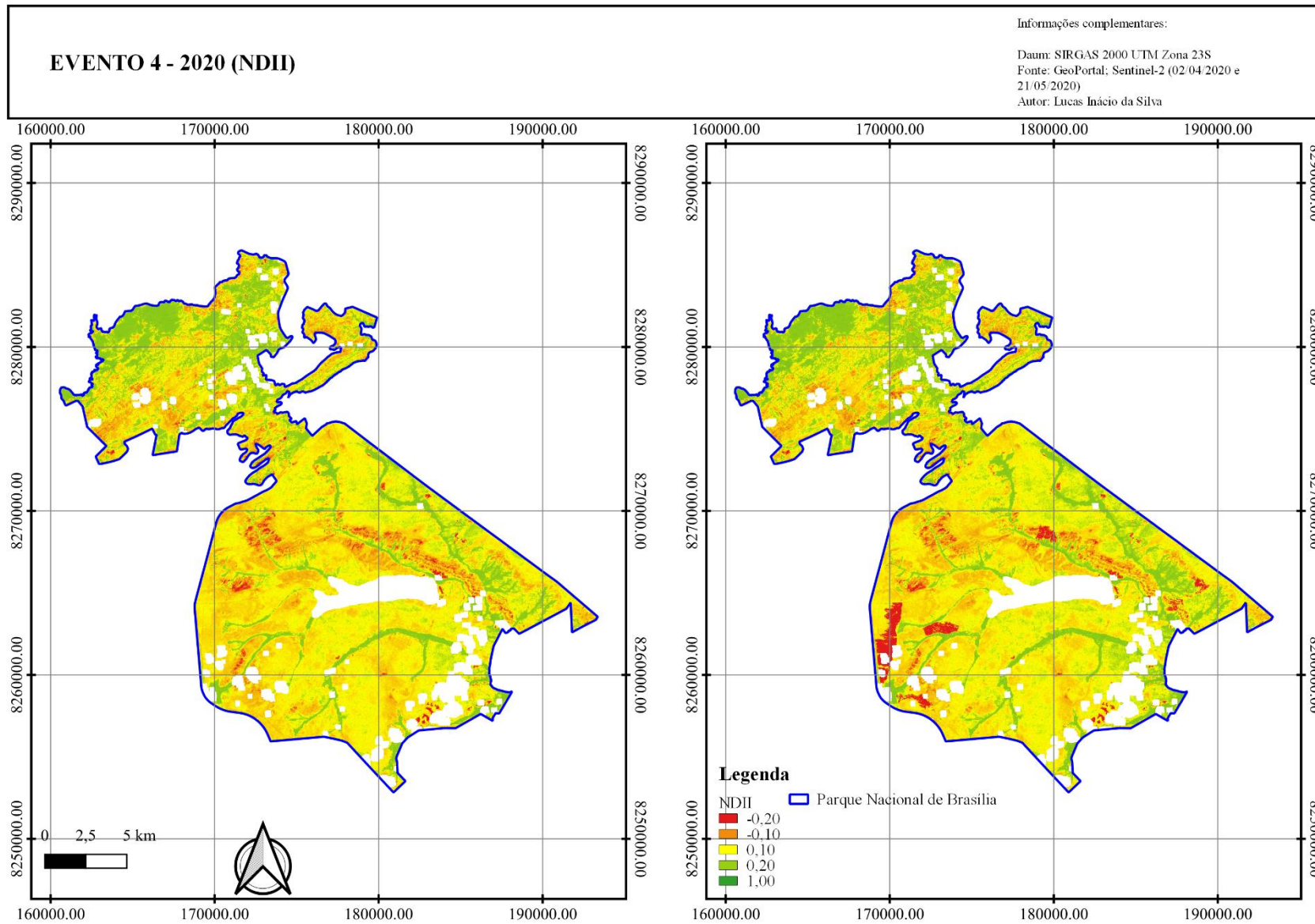
ANEXO XIV – Cena PSRI para o Evento 4



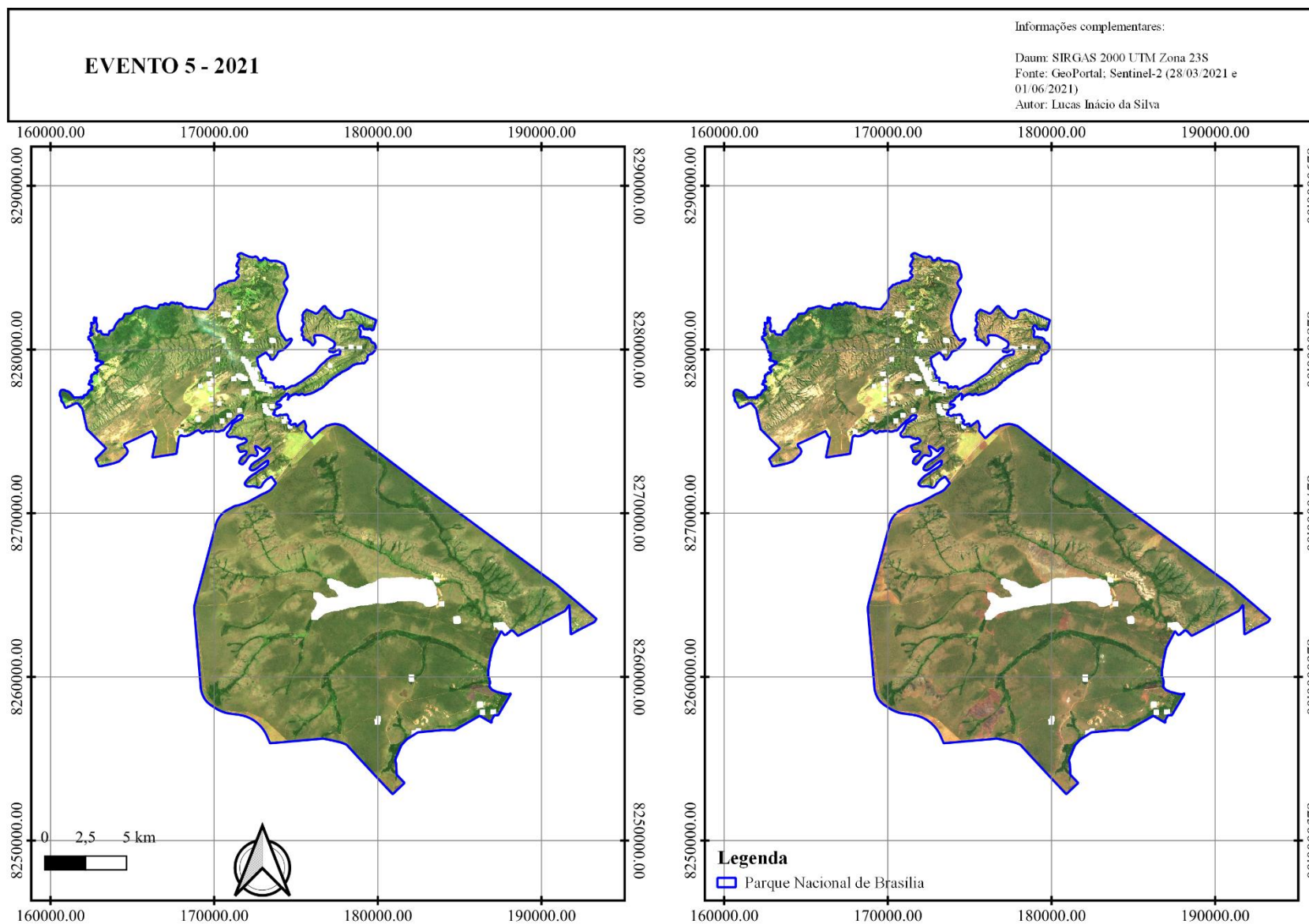
ANEXO XV – Cena NDVI para o Evento 4



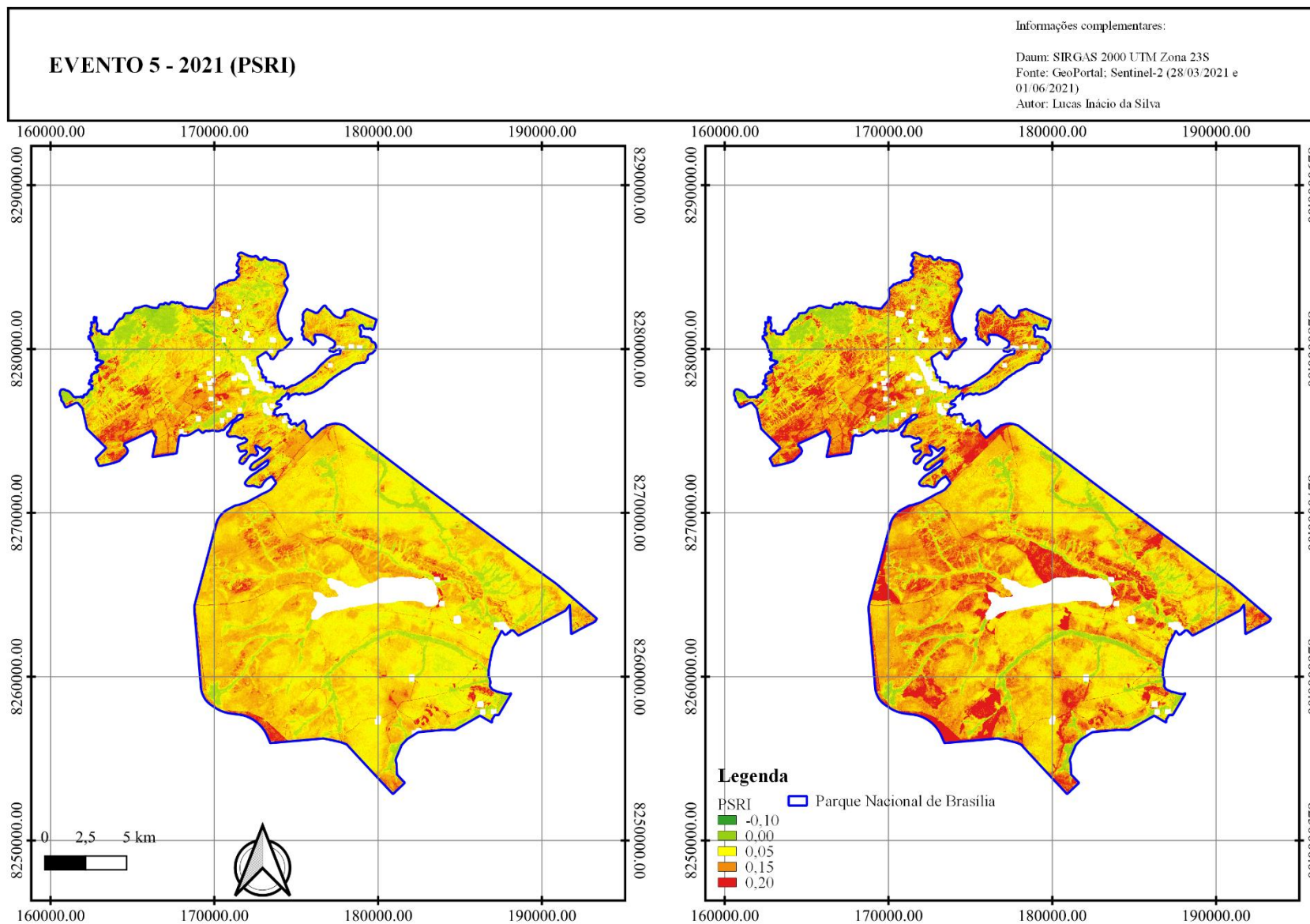
ANEXO XVI – Cena NDII para o Evento 4



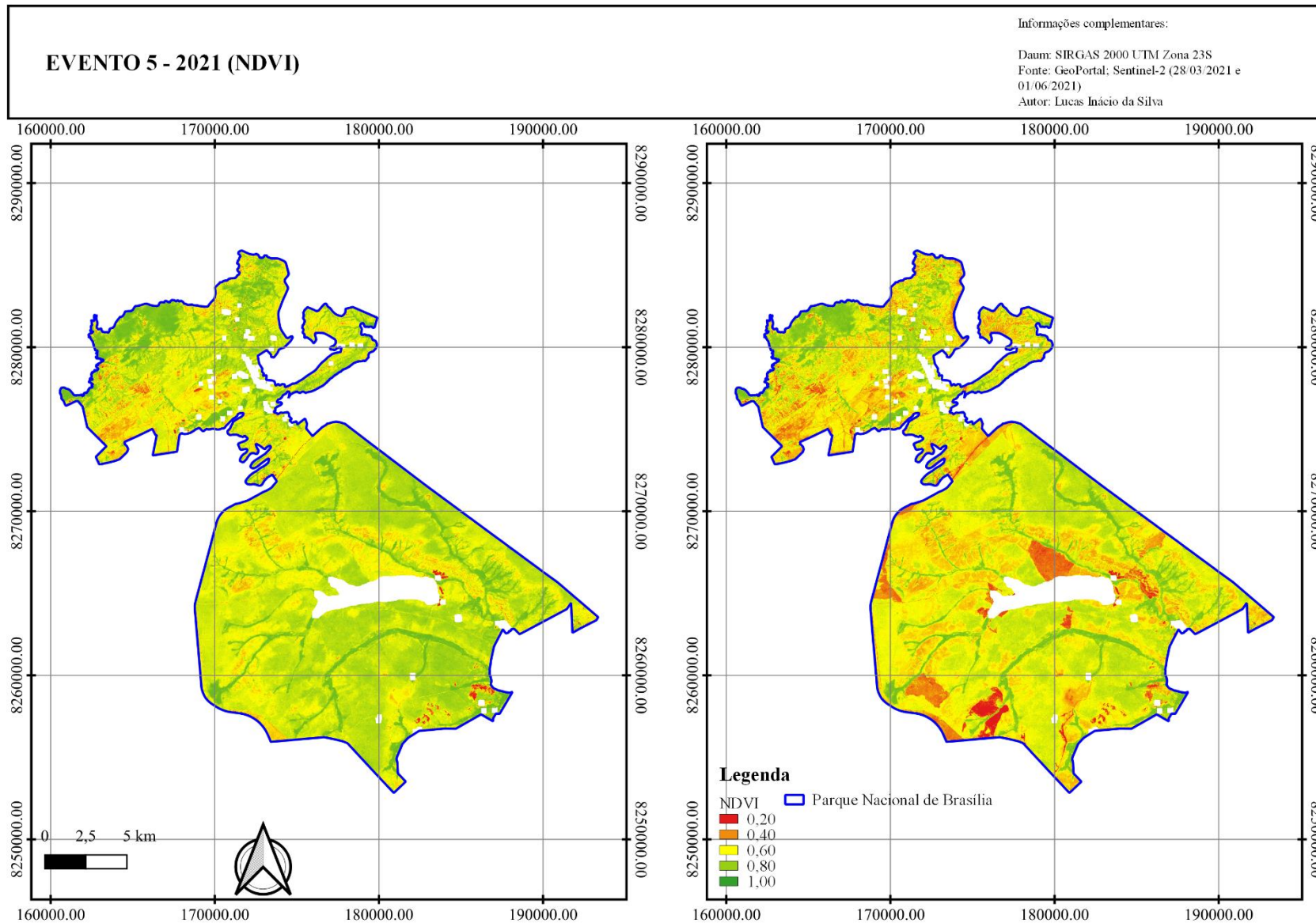
ANEXO XVII – Evento 5



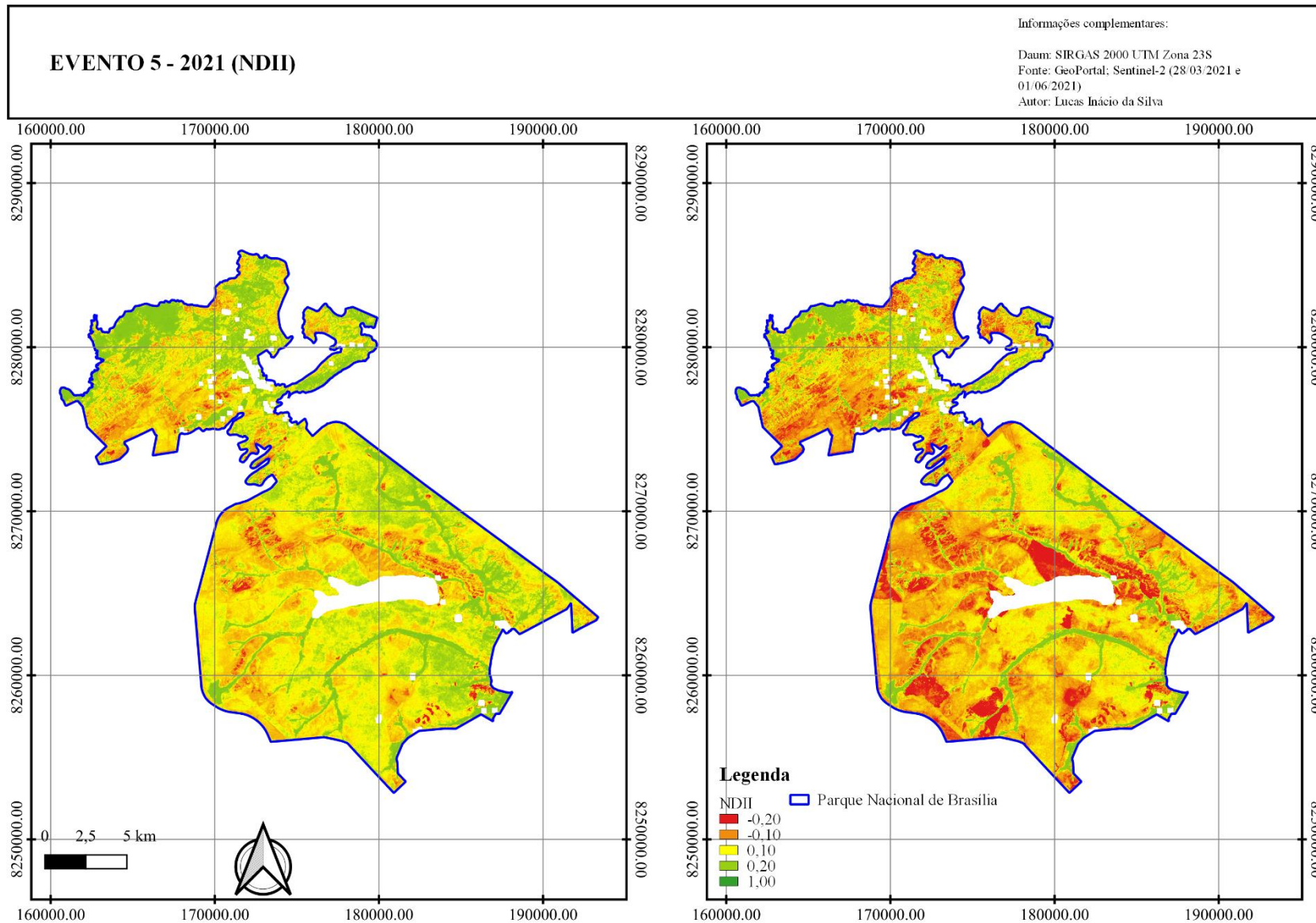
ANEXO XVIII – Cena PSRI para o Evento 5



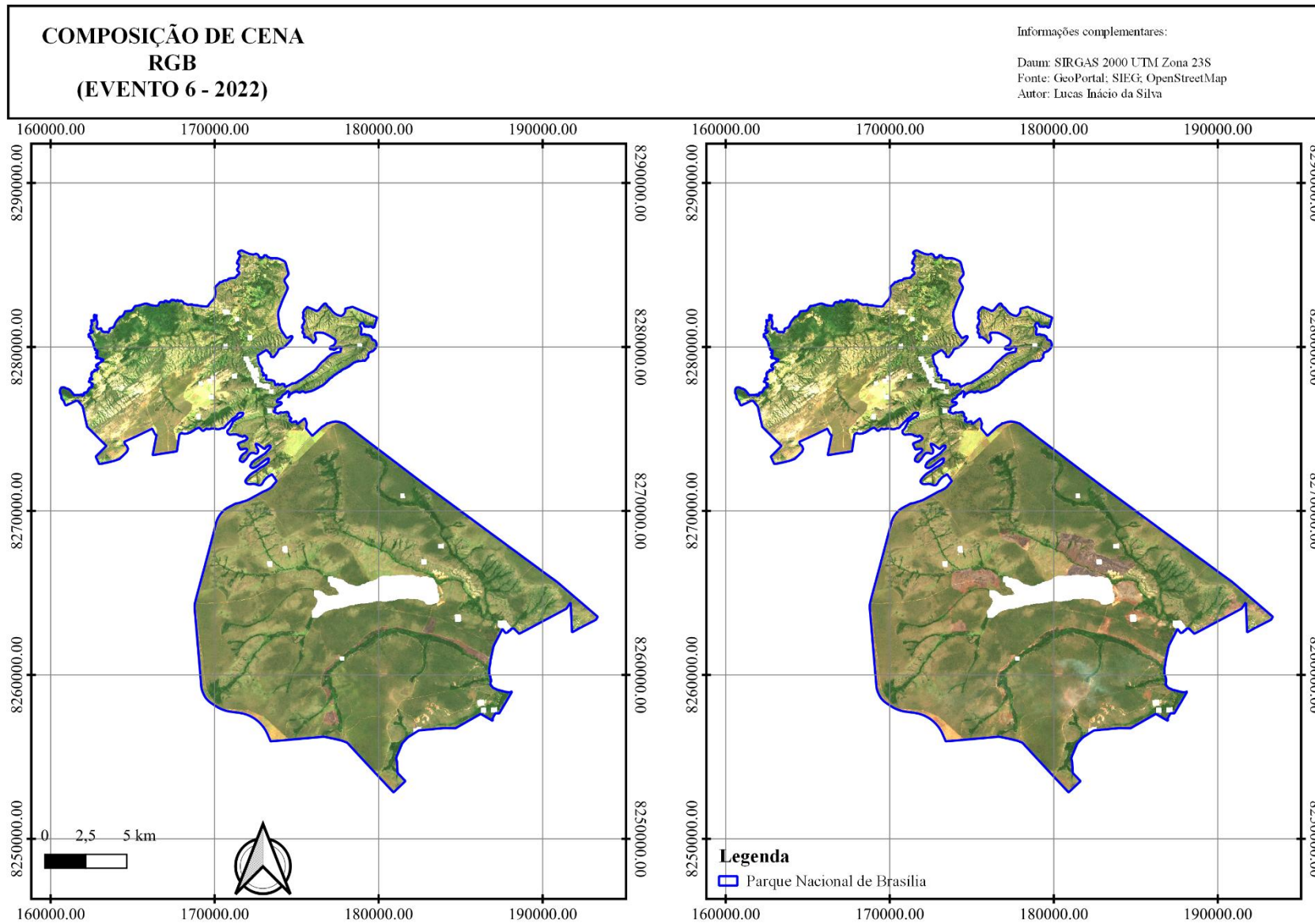
ANEXO XIX – Cena NDVI para o Evento 5



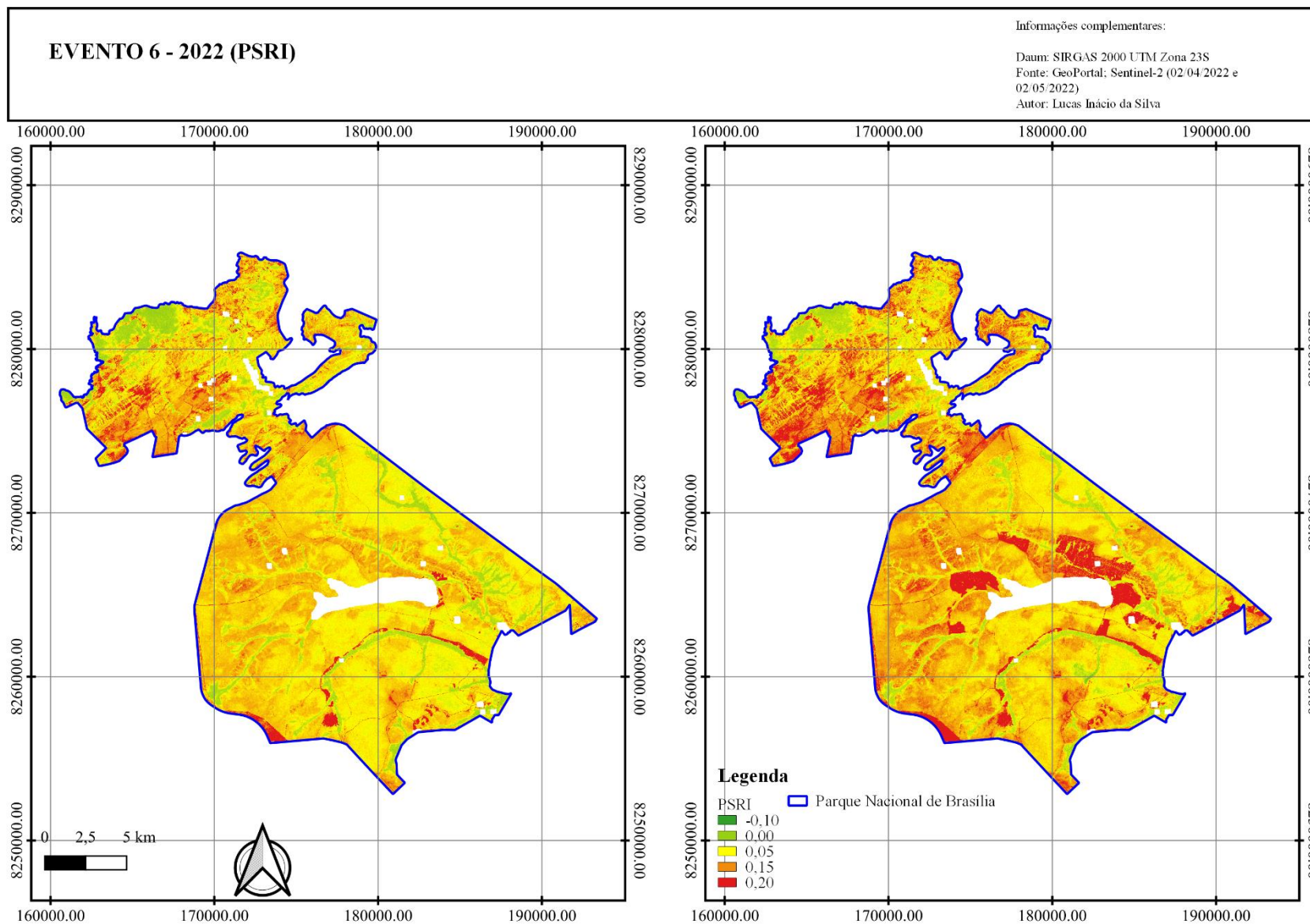
ANEXO XX – Cena NDII para o Evento 5



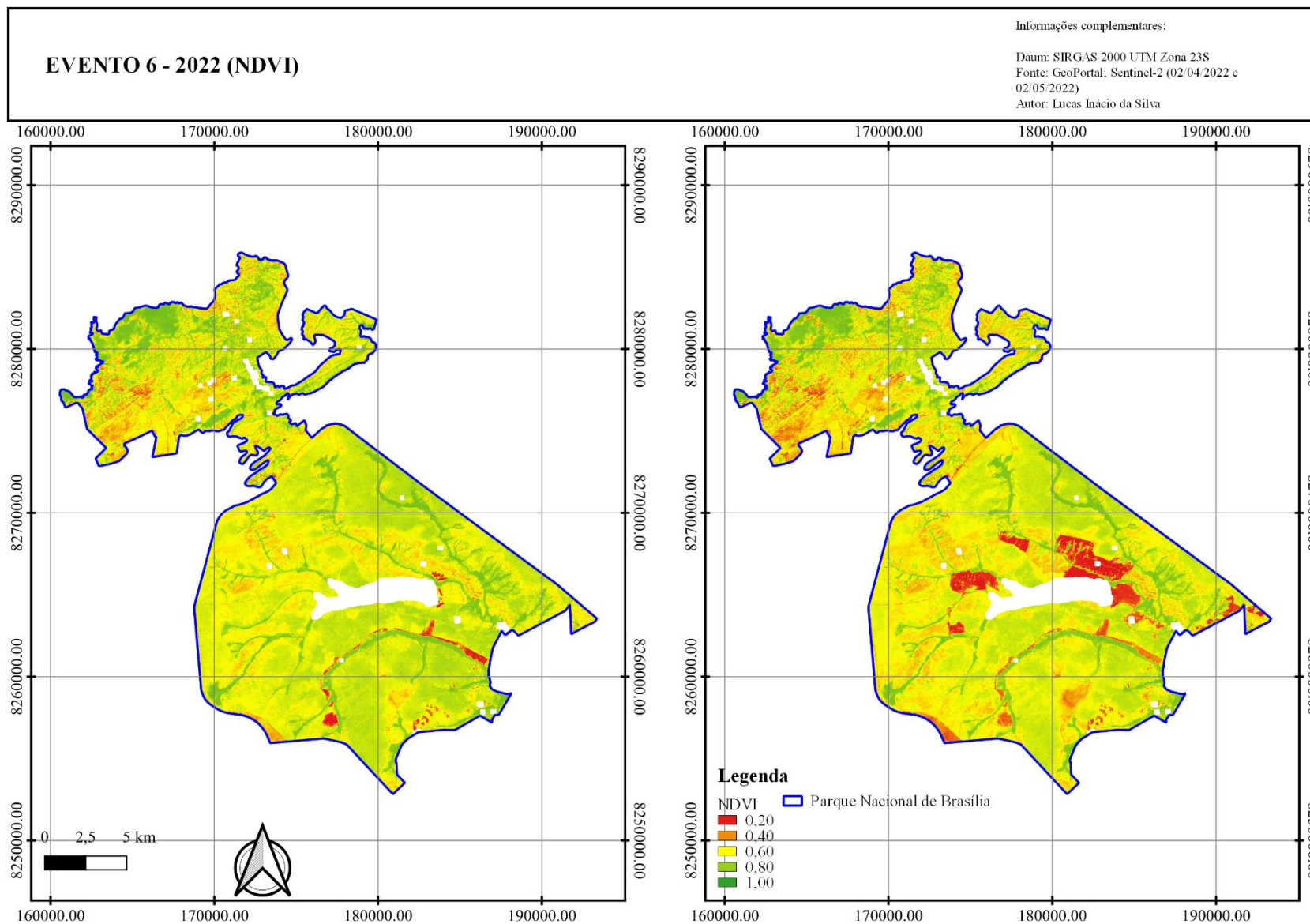
ANEXO XXI – Evento 6



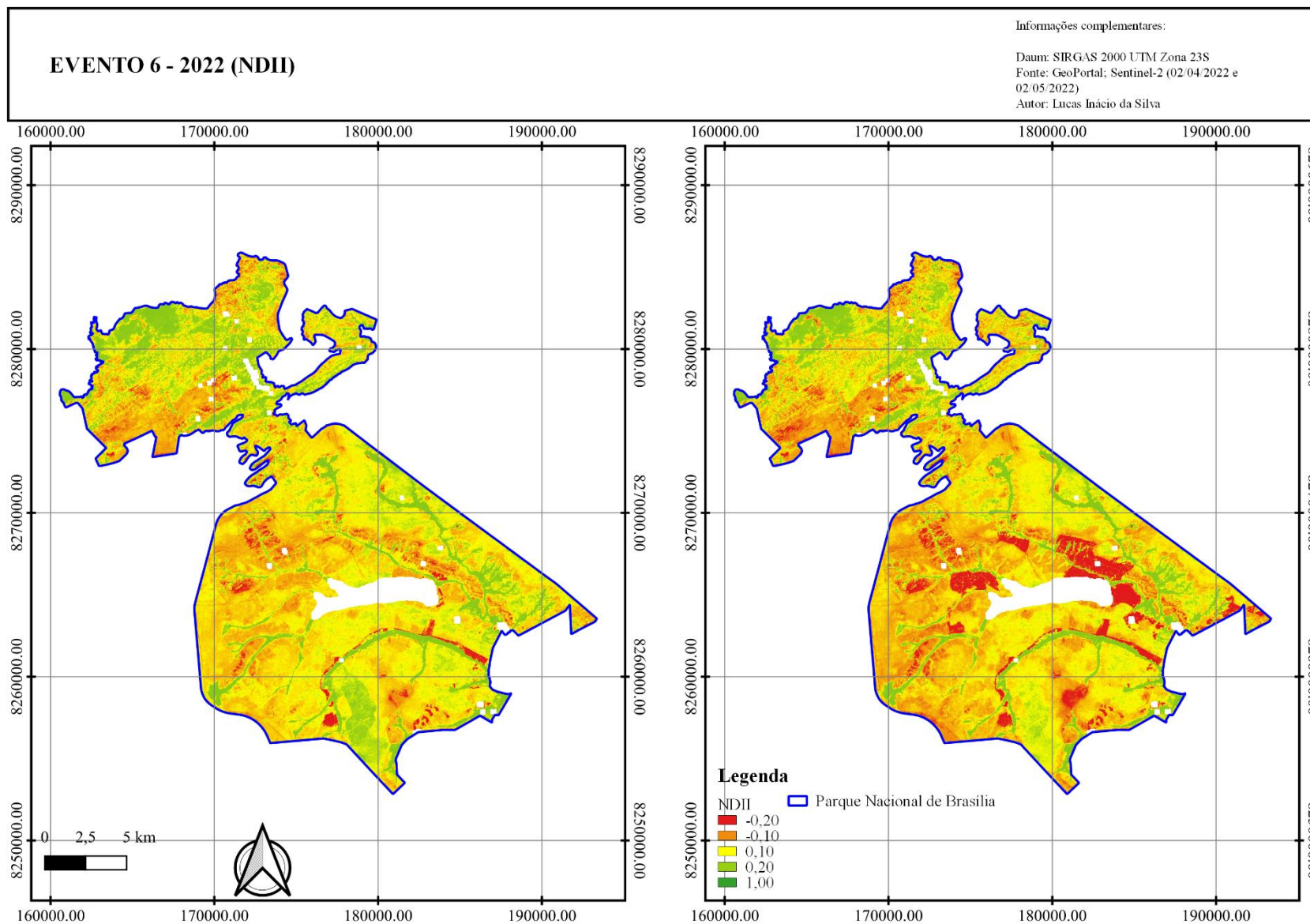
ANEXO XXII – Cena PSRI para o Evento 6



ANEXO XXIII – Cena NDVI para o Evento 6



ANEXO XXIV – Cena NDII para o Evento 6



ANEXO XXV – Cena IPC

ÍNDICE DE POTENCIAL COMBUSTÍVEL

Informações complementares:

Daum: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S
Fonte: Sentinel-2 (02/04/2022 e 02/05/2022)
Autor: Lucas Inácio da Silva

