



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal da Grande Dourados
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologias



JULIO CESAR PEREIRA LOBTCHENKO

**DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE E FERRAMENTA
GEOESPACIAL PARA ANÁLISE DA INTEGRIDADE
ECOLÓGICA EM NASCENTES DO CERRADO BRASILEIRO.**

DOURADOS 2025



**DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE E FERRAMENTA GEOESPACIAL PARA
ANÁLISE DA INTEGRIDADE ECOLÓGICA EM NASCENTES DO
CERRADO BRASILEIRO.**

Tese apresentada ao PPG Ciência e
Tecnologia Ambiental/ UFGD como
requisito para obtenção do título de Doutor
em Ciência e Tecnologia Ambiental. Área
de concentração: Ciência Ambiental.
Orientador: Dr. Eduardo Arruda



TERMO DE APROVAÇÃO

Após apresentação, arguição e apreciação pela banca examinadora, foi emitido o parecer Aprovado, para a tese intitulada: "**DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE E FERRAMENTA GEOESPACIAL PARA ANÁLISE DA INTEGRIDADE ECOLÓGICA EM NASCENTES DO CERRADO BRASILEIRO.**", de autoria de **Julio Cesar Pereira Lobtchenko**, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Grande Dourados.

Documento assinado digitalmente
gov.br **EDUARDO JOSE DE ARRUDA**
Data: 08/08/2025 17:07:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Jose de Arruda
Presidente da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br **ETENALDO FELIPE SANTIAGO**
Data: 13/08/2025 16:24:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Etenaldo Felipe Santiago
Membro Examinador (UEMS)

Documento assinado digitalmente
gov.br **JOELSON GONCALVES PEREIRA**
Data: 12/08/2025 16:22:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Joelson Goncalves Pereira
Membro Examinador (UFGD)

Documento assinado digitalmente
gov.br **MARCELO FOSSA DA PAZ**
Data: 12/08/2025 18:55:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Fossa da Paz
Membro Examinador (UFGD)

SHALINE SEFARA LOPES
FERNANDES:015597281
24
Assinado de forma digital por
SHALINE SEFARA LOPES
FERNANDES:01559728124
Dados: 2025.08.12 20:59:53
-04'00'

Prof^ª. Dr^ª. Shaline Sefara Lopes Fernandes
Membro Examinador (UEMS)

Dourados/MS, 08 de agosto de 2025.



Agradecimentos

Nenhum caminho acadêmico é trilhado a sós; é, antes, o resultado de incontáveis gestos de confiança, apoio e afeto. Deixo aqui o meu reconhecimento a todos que, de maneira visível ou silenciosa, tornaram esta etapa possível.

A meus pais, exemplo de dedicação e coragem, que me ensinaram que os sonhos não têm limites quando se somam ao trabalho e à fé. Todo avanço meu ecoa, primeiro, no suor e no carinho de vocês.

À Maikely, companheira incansável, que dividiu noites em claro, revisões intermináveis e dezenas de “testes de paciência” com ternura e compreensão. Seu amor converteu cada obstáculo em estímulo; seu sorriso foi o intervalo de descanso que eu precisava.

À minha irmã — parceira de vida — e ao meu cunhado, que, com bom-humor e leveza, transformam qualquer cansaço em riso e renovam minhas forças nos dias difíceis.

Ao meu orientador, pela confiança depositada, pelas discussões que afiaram ideias e pela liberdade concedida para explorar um tema que me move. Seu entusiasmo contagiante foi bússola e combustível.

Aos docentes e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, cujas aulas, sugestões e prontidão criaram um ambiente fértil para o crescimento científico e humano.

Aos órgãos de fomento e às instituições parceiras, que viabilizaram recursos logísticos e financeiros, provando que ciência se constrói em rede.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, deixaram uma marca nesta dissertação, meu mais sincero muito obrigado. Cada palavra aqui escrita leva a assinatura invisível de vocês.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal da Grande Dourados
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologias



*“Três coisas não podem ficar
escondidas por muito tempo: o Sol, a
Lua e a Verdade”.*
Siddhārtha Gautama, o Buda



Sumário

GENERAL SUMMARY	10
INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERENCIAS	18
CAPITULO 1	22
Resumo	22
Abstract.....	22
Introdução.....	24
Material e Métodos.....	26
Área de estudo	27
Obtenção das imagens	28
Processamento das Imagens	29
Cálculo dos Índices de Vegetação.....	29
Índice de Integridade Ecológica (EII)	30
Validação do Índice EII.....	31
Análise de Componentes Principais (PCA)	31
Autocorrelação Espacial	32
Análise da Integridade Ecológica das Nascentes	33
Resultados e Discussão.....	33
Validação do Índice EII.....	33
Análise da Integridade Ecológica das Nascentes	40
Conclusão	45
Referências	45
CAPITULO 2	53
Resumo	53
Abstract.....	53
Resumo gráfico.....	54
Introdução	55
Material e Métodos.....	57
Ambiente e Ferramentas.....	57
Arquitetura Modular	58
Fluxo de Processamento	59
Interface e Usabilidade	60
Geração de Saídas e Relatórios	60
Resultados e Discussão.....	60



Validação do plugin GeoFlow	68
Conclusão	70
Referências	71
CONCLUSÃO GERAL	75
Apêndice 1 – Mapas das Nascentes.....	77
Apêndice 2 – Código fonte do GeoFlow	98



Lista de Tabelas

Capítulo 1

Tabela 1 - Índices espectrais/estruturais/hidrológicos utilizados no Estudo.	29
Tabela 2 - Resultado da Análise de Componentes Principais das Nascente-04 e 06 para validação do EII.	34

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1 - Fluxograma com o percurso analítico do artigo.	27
Figura 2 - Localização das setes nascentes mapeadas nesse estudo.	28
Figura 3 - Matriz de Correlação de Spearman das nascentes utilizadas para a validação do índice. N4 – Nascente 04 e N6 – Nascente 06.	35
Figura 4 - Geodetector aplicado para validação do índice de integridade ecológica das nascentes analisadas. N4 - Nascente 04 e N6 - Nascente 06.	37
Figura 5 - Distribuição de agrupamento espacial do EII e diagrama de dispersão de Moran I para a Nascente 04.	39
Figura 6 - Distribuição de agrupamento espacial do EII e diagrama de dispersão de Moran I para a Nascente 06.	39
Figura 7 - Distribuição de classes de integridade ecológica por Nascente estudada.	40
Figura 8 - Mapas da Integridade Ecológica das Nascente estudadas.	41
Figura 9 - Distribuição de agrupamento espacial do EII para todas as nascentes estudadas.	44

Capítulo 2

Figura 1 - Arquitetura Modular do plugin GeoFlow.	58
Figura 2 - fluxo do processo do plugin GeoFlow.	60
Figura 3 - Menu Principal do plugin GeoFlow.	61
Figura 4 - Menu responsável pelo processamento do Raster, como remover banda alpha, definir noData e etc.	61
Figura 5 - Menu para selecionar qual índice calcular no plugin GeoFlow.	63
Figura 6 - Menu para calcular índice de NDVI no plugin GeoFlow.	64
Figura 7- Calculadora do índice de integridade ecológica – EII no plugin GeoFlow.	65
Figura 8 - Menu de seleção para escolher qual estatística deve ser calculada no plugin GeoFlow.	66
Figura 9 - Calculadora de estatísticas de Correlação de Pearson e Spearman no plugin GeoFlow.	66
Figura 10 - Menu para o cálculo de variáveis independentes no plugin GeoFlow.	68
Figura 11 - Índice de integridade ecológica, calculados a partir do plugin GeoFlow.	69
Figura 12 - Correlação de Spearman calculadas através do plugin GeoFlow.	70

RESUMO GERAL



LOBTCEHNKO, J.C.P Desenvolvimento de índice e ferramenta geoespacial para análise da integridade ecológica em nascentes do Cerrado Brasileiro. 2025. 98p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2025.

O Cerrado brasileiro, bioma de reconhecida importância para a conservação da biodiversidade e a regulação hídrica, encontra-se sob intensa pressão antrópica, especialmente pela expansão agrícola e processos de fragmentação ambiental. Diante desse cenário, esta tese teve como objetivo propor, testar e validar um Índice de Integridade Ecológica (EII) específico para áreas de nascentes, utilizando dados de sensoriamento remoto obtidos por drones multiespectrais. Complementarmente, foi desenvolvido um plugin geoespacial para o QGIS, capaz de operacionalizar todo o fluxo de cálculo do EII, análise espacial e geração automatizada de mapas e relatórios. No Capítulo 1, foi estruturada a metodologia para construção do EII, baseada na integração dos índices espectrais NDVI, NDWI, PSRI, BSI e CHM, sintetizados via Análise de Componentes Principais (PCA). A validação estatística demonstrou forte consistência entre os índices, com destaque para NDVI e NDWI, que apresentaram maior poder explicativo na variabilidade espacial da integridade ecológica, segundo análises de GeoDetector e correlação de Spearman. A aplicação do EII revelou que as nascentes analisadas apresentam, majoritariamente, condições de baixa a crítica integridade ecológica, com destaque para as nascentes N01, N02 e N06, que exibiram índices inferiores a 0,40, refletindo elevado grau de degradação. Por outro lado, a nascente N05 manteve integridade moderada (0,504), embora com zonas de alerta. O Capítulo 2 detalha o desenvolvimento e validação do plugin GeoFlow, uma ferramenta computacional que integra todo o fluxo de processamento do EII dentro do QGIS. O plugin permite desde o pré-processamento das imagens até a geração dos mapas finais, análises estatísticas e relatórios automáticos. Os testes de desempenho demonstraram que o plugin reduz significativamente o tempo de processamento, amplia a reprodutibilidade científica e permite sua utilização por usuários sem conhecimento avançado em programação. As funcionalidades foram validadas nas mesmas áreas de nascentes, confirmando os padrões espaciais detectados no Capítulo 1. De forma geral, os resultados desta tese confirmam que o EII é uma ferramenta robusta, sensível e aplicável à realidade das nascentes do Cerrado, e que sua implementação via plugin representa um avanço significativo na democratização das geotecnologias aplicadas ao monitoramento ambiental. A abordagem proposta se mostra escalável e passível de adaptação a outras regiões e biomas, fortalecendo a gestão ambiental baseada em dados de alta precisão.

Palavras chaves: Monitoramento, Sensoriamento remoto por drones, Planejamento e gestão ambiental, Índices espectrais



GENERAL SUMMARY

LOBTCEHNKO, J.C.P Development of a geospatial index and tool for analyzing the ecological integrity of springs in the Brazilian Cerrado. 2025. 98p. Thesis (PhD in Environmental Science and Technology). Faculty of Exact Sciences and Technology, Federal University of Grande Dourados, Dourados, MS, 2025.

The Brazilian Cerrado, a biome of recognized importance for biodiversity conservation and water regulation, is under intense anthropic pressure, especially due to agricultural expansion and environmental fragmentation processes. Given this scenario, this thesis aimed to propose, test, and validate an Ecological Integrity Index (EII) specific to spring areas, using remote sensing data obtained by multispectral drones. In addition, a geospatial plugin for QGIS was developed, capable of operationalizing the entire EII calculation flow, spatial analysis, and automated generation of maps and reports. In Chapter 1, the methodology for constructing the EII was structured, based on the integration of the spectral indices NDVI, NDWI, PSRI, BSI and CHM, synthesized via Principal Component Analysis (PCA). The statistical validation demonstrated strong consistency between the indices, with emphasis on NDVI and NDWI, which presented greater explanatory power in the spatial variability of ecological integrity, according to GeoDetector analyses and Spearman correlation. The application of the EII revealed that the analyzed springs mostly present conditions of low to critical ecological integrity, with emphasis on springs N01, N02 and N06, which exhibited indices below 0.40, reflecting a high degree of degradation. On the other hand, spring N05 maintained moderate integrity (0.504), although with alert zones. Chapter 2 details the development and validation of the GeoFlow plugin, a computational tool that integrates the entire EII processing flow within QGIS. The plugin allows for everything from pre-processing of images to generating final maps, statistical analyses and automatic reports. Performance tests have shown that the plugin significantly reduces processing time, increases scientific reproducibility and allows its use by users without advanced programming knowledge. The functionalities were validated in the same spring areas, confirming the spatial patterns detected in Chapter 1. In general, the results of this thesis confirm that EII is a robust, sensitive and applicable tool to the reality of Cerrado springs, and that its implementation via plugin represents a significant advance in the democratization of geotechnologies applied to environmental monitoring. The proposed approach proves to be scalable and adaptable to other regions and biomes, strengthening environmental management based on high-precision data.

Keywords: Monitoring, Remote sensing by drones, Environmental planning and management, Spectral indices



INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando aproximadamente 22% do território brasileiro o equivalente a cerca de dois milhões de quilômetros quadrados. Reconhecido como uma das regiões mais biodiversas do planeta, abriga cerca de 12 mil espécies de plantas, das quais mais de 4 mil são endêmicas, além de mais de 800 espécies de aves e 200 de mamíferos, o que o torna essencial para a conservação da biodiversidade global e para o equilíbrio ecológico do continente (SANO *et al.*, 2018; KLINK; MACHADO, 2021). O bioma também cumpre um papel estratégico na regulação climática e na manutenção dos ciclos hidrológicos. Suas formações vegetais, adaptadas a solos profundos e pobres em nutrientes, armazenam grandes quantidades de carbono, principalmente em suas raízes e no solo, funcionando como um importante sumidouro natural de gases de efeito estufa (ARANTE *et al.*, 2016, SANO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Além disso, o Cerrado é considerado o berço das águas do Brasil: abriga as nascentes de oito das doze principais bacias hidrográficas do país, sendo fundamental para a segurança hídrica de milhões de brasileiros. Sua vegetação permite a infiltração da água no solo, promovendo a recarga dos aquíferos e garantindo o fluxo regular dos rios, inclusive em períodos de seca prolongada (DOS SANTOS *et al.*, 2020). Do ponto de vista social, o Cerrado também é um território de vida. Comunidades tradicionais como indígenas, quilombolas e povos do campo mantêm formas sustentáveis de uso da terra, desenvolvendo práticas de manejo baseadas em saberes ancestrais, que contribuem para a conservação dos ecossistemas e a valorização cultural do bioma (FONSECA; BUSTAMANTE *et al.*, 2024).

Apesar de toda essa importância, o Cerrado enfrenta uma rápida e intensa degradação. Desde a década de 1970, o avanço da fronteira agrícola tem provocado a conversão de aproximadamente metade de sua vegetação nativa em áreas de pastagem e monocultura, principalmente para a produção de soja, milho e carne bovina. Embora esse processo tenha impulsionado o crescimento econômico, os impactos ambientais são severos: fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e redução da conectividade ecológica comprometem a resiliência dos ecossistemas (STRASSBURG *et al.*, 2020; FUSHIMI *et al.*, 2024). Além disso, a intensificação das queimadas, muitas vezes fora dos



ciclos ecológicos naturais, tem transformado o fogo, que historicamente era um agente de renovação, em um vetor de degradação. Combinadas às mudanças climáticas, essas queimadas se tornam mais frequentes, intensas e desreguladas, resultando em maior liberação de carbono, destruição de áreas sensíveis e aumento da vulnerabilidade ambiental (LIBONATI *et al.*, 2024).

O cenário atual demanda atenção urgente. A conservação do Cerrado é essencial não apenas para proteger sua biodiversidade, mas também para garantir os serviços ecossistêmicos que sustentam a vida humana, o equilíbrio climático e a disponibilidade hídrica no país. As estratégias de conservação devem reconhecer a complexidade ecológica e sociocultural do bioma, incorporando práticas sustentáveis de uso da terra e valorizando os conhecimentos das comunidades locais como aliados na preservação do território (RESENDE *et al.*, 2021; SCHÜLER; BUSTAMANTE, 2022).

Portanto, abordar os desafios de conservação do Cerrado requer uma abordagem integrada que combine conhecimento científico, políticas públicas eficazes e a participação ativa da sociedade. Somente com esforços coordenados será possível garantir a preservação do Cerrado e a continuidade dos serviços ecossistêmicos essenciais que ele fornece. A integridade ecológica do Cerrado é vital não apenas para a fauna e flora locais, mas também para a resiliência climática e o bem-estar humano em uma escala mais ampla (WORLD ECONOMIC FORUM, 2024; COLMAN *et al.*, 2024).

A degradação ambiental no Cerrado é um fenômeno complexo, resultante de múltiplos fatores que incluem desmatamento, práticas agrícolas inadequadas, uso insustentável dos recursos naturais e queimadas. Estudos indicam que aproximadamente 50% da vegetação original do Cerrado já foi destruída ou alterada significativamente, principalmente para dar lugar à agricultura e à pecuária intensiva (GARCIA; BALLESTER, 2016; PIERIN *et al.*, 2020). Essa conversão da terra não só provoca a perda de biodiversidade, mas também compromete a integridade ecológica do bioma, causando fragmentação de habitats e reduzindo a conectividade entre os remanescentes de vegetação nativa (PIERIN *et al.*, 2020).

A perda de cobertura vegetal no Cerrado afeta diretamente a qualidade do solo, aumentando a susceptibilidade à erosão (ALVES *et al.*, 2023). A ausência de vegetação para proteger o solo resulta em uma maior erosão hídrica e eólica, que pode levar à perda significativa de nutrientes e à redução da capacidade do solo de sustentar a vida vegetal.



A degradação do solo figura entre os principais impactos causados pelo desmatamento no Cerrado, comprometendo não apenas a produtividade agrícola ao longo do tempo, mas também a capacidade de regeneração natural das áreas afetadas. A intensificação da erosão acelera a perda de nutrientes, reduz a fertilidade do solo e contribui para a sedimentação dos cursos d'água, resultando em prejuízos significativos à qualidade da água e ao equilíbrio dos ecossistemas (GOMES *et al.*, 2022).

Outro fator crucial que contribui para a degradação do Cerrado é o uso intensivo do fogo. Embora o fogo seja uma parte natural do ciclo ecológico do Cerrado, as queimadas frequentes e de alta intensidade, muitas vezes provocadas por práticas agrícolas inadequadas, têm efeitos devastadores na estrutura da vegetação e na biodiversidade (LIBONATI *et al.*, 2024). Estudos mostram que as queimadas recorrentes alteram a composição da vegetação, favorecendo espécies invasoras e reduzindo a diversidade de espécies nativas, o que leva a uma simplificação dos ecossistemas (ARRUDA *et al.*, 2024).

A degradação também impacta significativamente a hidrologia do Cerrado (DOS SANTOS TEIXEIRA *et al.*, 2024). A remoção da cobertura vegetal reduz a capacidade de infiltração de água no solo, afetando a recarga dos aquíferos e alterando o regime hídrico das bacias hidrográficas. Isso pode levar à diminuição do fluxo dos rios e à redução da disponibilidade de água durante os períodos de seca, impactando tanto os ecossistemas quanto as atividades humanas que dependem desses recursos (SIQUEIRA *et al.*, 2021; ANACHE *et al.*, 2021). A alteração do ciclo hidrológico no Cerrado, portanto, tem implicações diretas para a segurança hídrica e para a estabilidade ecológica em uma escala regional.

Além dos impactos ecológicos, a degradação do Cerrado tem consequências socioeconômicas significativas. A redução da produtividade do solo (SCHWAMBACK *et al.*, 2024) e a perda de biodiversidade afetam diretamente as atividades econômicas baseadas nos recursos naturais do Cerrado, como a agricultura, a pecuária e o extrativismo. Comunidades rurais e tradicionais, que dependem desses recursos para sua subsistência, são particularmente vulneráveis à degradação ambiental (LOPES *et al.*, 2021). A degradação ambiental no Cerrado, portanto, não é apenas uma questão ecológica, mas também um desafio social e econômico que requer abordagens integradas



de conservação e desenvolvimento sustentável (CARRASCO *et al.*, 2021; CUNHA; BRAVO, 2022;

Para mitigar os efeitos da degradação, é crucial implementar práticas de manejo sustentável que visem à conservação do solo, à recuperação da cobertura vegetal e ao uso racional dos recursos hídricos. A restauração ecológica, utilizando espécies nativas do Cerrado, e a adoção de sistemas agroflorestais são estratégias eficazes para restaurar a funcionalidade dos ecossistemas degradados (MEDEIROS, *et al.*, 2022). Essas práticas não só ajudam a recuperar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, mas também contribuem para a resiliência do Cerrado frente às mudanças climáticas e às pressões antrópicas (CARRASCO *et al.*, 2021).

Para enfrentar esses desafios, é fundamental monitorar continuamente o estado do Cerrado e avaliar o impacto das mudanças ambientais em curso. A geotecnologia, que inclui o uso de imagens de satélite e drones, oferece ferramentas poderosas para essa finalidade. Ela permite a coleta de dados precisos sobre a cobertura do solo, a saúde da vegetação e os níveis de carbono, fornecendo informações valiosas para guiar ações de conservação e recuperação (RODRIGUES SILVA *et al.*, 2022; LEWIS *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2024; RODRIGUES *et al.*, 2025).

A geotecnologia tem emergido como uma ferramenta indispensável para o monitoramento e a conservação de biomas, como o Cerrado (RODRIGUES SILVA *et al.*, 2022). Utilizando técnicas avançadas de sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG) e veículos aéreos não tripulados (VANTs), a geotecnologia permite a coleta e análise de dados ambientais em escalas que seriam impossíveis de alcançar por métodos tradicionais. No Cerrado, essas tecnologias são essenciais para mapear mudanças na cobertura do solo, identificar áreas de degradação e monitorar a saúde da vegetação ao longo do tempo (LEWIS *et al.*, 2022).

O uso de imagens de satélite de alta resolução, como as fornecidas pelos satélites Landsat e Sentinel, possibilita a detecção detalhada de alterações na cobertura vegetal do Cerrado. Essas imagens permitem o monitoramento contínuo de grandes extensões de terra, facilitando a identificação de desmatamentos ilegais, queimadas e outros sinais de degradação (ARANTES *et al.*, 2021). Além disso, a análise de séries temporais de imagens de satélite oferece insights valiosos sobre as dinâmicas de mudança no bioma,



permitindo a identificação de tendências e a previsão de áreas que podem estar em risco de degradação futura (MATOSAK *et al.*, 2022).

Os VANTs têm complementado o uso de satélites, oferecendo uma capacidade de monitoramento em alta resolução para áreas menores e de difícil acesso. Com sensores especializados, como câmeras multiespectrais e termográficas, os VANTs são capazes de capturar detalhes finos da vegetação, avaliar a saúde das plantas e identificar estresses ambientais que podem não ser visíveis a partir de imagens de satélite (DE CASTRO *et al.*, 2021). Essa capacidade de realizar inspeções localizadas e detalhadas torna os VANTs uma ferramenta valiosa para programas de conservação e restauração ecológica.

A integração dos dados obtidos através de sensoriamento remoto com SIG permite uma análise espacial aprofundada, combinando informações sobre vegetação, topografia, hidrografia e solo. Essa abordagem facilita a criação de modelos preditivos que podem ser utilizados para simular cenários de mudança de uso da terra e planejar ações de mitigação e adaptação (RODRIGUES *et al.*, 2025). Além disso, a visualização dos dados em mapas interativos ajuda na comunicação dos resultados para gestores ambientais, tomadores de decisão e o público em geral, aumentando a conscientização e a ação em prol da conservação.

A geotecnologia também desempenha um papel crucial na avaliação dos estoques de carbono no Cerrado. Através da análise de imagens de satélite e dados de campo, é possível estimar a quantidade de carbono armazenado na biomassa e no solo, bem como monitorar as emissões resultantes de desmatamentos e queimadas. Esse monitoramento contínuo é essencial para entender como as mudanças no uso da terra afetam o ciclo de carbono e para desenvolver estratégias eficazes de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (SANTOS *et al.*, 2023).

Além de seu papel no monitoramento e na conservação, a geotecnologia oferece suporte fundamental para a implementação de políticas ambientais. Os dados gerados por essas tecnologias fornecem a base científica necessária para a formulação de leis e regulamentações que visam proteger o Cerrado. A precisão e a abrangência dos dados coletados permitem que as políticas sejam direcionadas para as áreas que mais necessitam de intervenção, otimizando recursos e esforços (MAGALHÃES *et al.*, 2021; LEWIS *et al.*, 2022).



Por fim, o uso de geotecnologia no Cerrado é um exemplo claro de como as inovações tecnológicas podem contribuir para a gestão ambiental sustentável. Ao fornecer informações precisas e em tempo real, essas tecnologias facilitam a tomada de decisões informadas e a implementação de ações que podem minimizar os impactos ambientais e promover a conservação do bioma. A continuidade no desenvolvimento e aplicação de geotecnologias será fundamental para enfrentar os desafios ambientais que o Cerrado e outros biomas enfrentam atualmente (GOMES *et al.*, 2022).

O monitoramento por imagens é uma aplicação essencial da geotecnologia, especialmente no contexto de biomas extensos e de difícil acesso como o Cerrado. Essa técnica envolve o uso de imagens de satélite e drones para capturar dados sobre a cobertura vegetal, o uso do solo e as mudanças ambientais ao longo do tempo. A capacidade de adquirir imagens em diferentes resoluções e espectros de luz permite a detecção precoce de desmatamentos, queimadas e outros sinais de degradação que são críticos para a gestão ambiental (ARANTES *et al.*, 2021; MATOSAK *et al.*, 2022; BERGIER, 2024).

Imagens de satélite, como as fornecidas pelos satélites Landsat, Sentinel e MODIS, são amplamente utilizadas para monitorar grandes extensões do Cerrado. Essas imagens oferecem uma visão abrangente e detalhada da paisagem, permitindo a identificação de mudanças no uso do solo e na cobertura vegetal em escalas regionais e locais. A análise de séries temporais de imagens de satélite facilita o acompanhamento das tendências de desmatamento e degradação, ajudando a direcionar ações de conservação para áreas mais impactadas (MAGALHÃES *et al.*, 2021; LEWIS *et al.*, 2022; MATOSAK *et al.*, 2022; BERGIER, 2024).

Além dos satélites, o uso de drones, ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), tem ganhado destaque por sua capacidade de coletar dados de alta resolução em áreas específicas. Equipados com câmeras multiespectrais e termográficas, os drones podem voar sobre áreas de difícil acesso e capturar detalhes finos da vegetação e do solo. Essas imagens detalhadas são fundamentais para identificar estresses ambientais, avaliar a saúde da vegetação e monitorar a recuperação de áreas degradadas (PEREIRA *et al.*, 2021).

Uma das principais vantagens do monitoramento por imagens é a capacidade de utilizar índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada



(*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), para avaliar a saúde das plantas. O NDVI, por exemplo, permite detectar mudanças na biomassa e no vigor da vegetação, oferecendo um indicador eficaz da integridade ecológica do Cerrado. Estudos têm demonstrado que a análise de índices de vegetação a partir de imagens de satélite é uma ferramenta poderosa para monitorar a dinâmica da vegetação e identificar áreas que estão sob risco de degradação (ANDRADE *et al.*, 2021).

O monitoramento por imagens não apenas facilita a identificação de áreas degradadas, mas também é crucial para a avaliação da eficácia das iniciativas de restauração e conservação. Ao comparar imagens de diferentes períodos, é possível avaliar o progresso das atividades de restauração e medir o impacto das políticas de conservação sobre a cobertura vegetal e a qualidade do solo. Dessa forma, o monitoramento contínuo fornece feedback valioso para ajustar e aprimorar as estratégias de manejo ambiental (WANG *et al.*, 2024)

Outro aspecto importante do monitoramento por imagens é a sua aplicação na detecção e controle de incêndios florestais. O Cerrado, devido ao seu regime natural de fogo, é propenso a queimadas, que podem se tornar devastadoras quando não controladas. O uso de imagens de satélite e drones permite a identificação rápida de focos de incêndio, possibilitando uma resposta mais ágil e eficiente na contenção das chamas. Essa capacidade de detecção preventiva é fundamental para minimizar os danos ambientais e proteger tanto a biodiversidade quanto os estoques de carbono do bioma (NAGEL *et al.*, 2023; GUIMARÃES *et al.*, 2025).

A integração dos dados obtidos através do monitoramento por imagens com outros tipos de dados ambientais, como aqueles coletados em campo, enriquece a compreensão dos processos ecológicos em curso no Cerrado. Essa abordagem integrada permite uma análise mais completa e precisa, essencial para a formulação de estratégias de manejo que levem em consideração as complexidades ecológicas do bioma. Ao fornecer uma base de dados robusta e atualizada, o monitoramento por imagens desempenha um papel central na preservação e gestão sustentável do Cerrado, alinhando-se com os objetivos de conservação e sustentabilidade (GOMES *et al.*, 2022).

Sob esta ótica, esta pesquisa pretende fornecer um novo índice de Integridade Ecológica para Áreas de Preservação Permanente de Nascentes do Cerrado, bem como,



gerar uma nova ferramenta geoespacial para o software Qgis que facilite a utilização deste novo índice.

Para atender esses objetivos a tese esta estruturada em dois artigos a saber:

Artigo 1 - Integridade ecológica de Áreas de Preservação Permanente da Savana Brasileira usando novo índice de sensoriamento remoto.

Artigo 2 - Desenvolvimento e Validação de Plugin Geoespacial no QGIS para Monitoramento Ambiental e Análise de Integridade Ecológica.

REFERENCIAS

ALVES, M. A. B.; DE SOUZA, A. P.; DE ALMEIDA, F. T.; HOSHIDE, A. K.; ARAÚJO, H. B.; DA SILVA, A. F.; DE CARVALHO, D. F. Effects of Land Use and Cropping on Soil Erosion in Agricultural Frontier Areas in the Cerrado–Amazon Ecotone, Brazil, Using a Rainfall Simulator Experiment. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 6, p. 4954, 2023. DOI: 10.3390/su15064954.

ANACHE, J. A. A.; DE LIMA, J. M.; DE OLIVEIRA, P. T. S.; SCHULER, A. E.; DE PAULA, G. M.; MENDIONDO, E. M. Impact of land use and climate change on runoff and soil loss in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Development**, v. 39, p. 100630, 2021. DOI: 10.1016/j.envdev.2021.100630.

ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. DE Q., OLIVEIRA, R. L. DE, TEIXEIRA, M. G., & PEREIRA, O. J. Spatiotemporal patterns of land degradation in a Brazilian Cerrado watershed based on landscape metrics and vegetation indices. **Science of the Total Environment**, v.797, art.149135., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149135>.

ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: past, present, and future influences of land cover and land use. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66–78, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>.

ARRASCO, L. R.; STEWARDSHIP & ECONOMIC REVIEW GROUP. Impacts of payments for ecosystem services on deforestation and poverty in low and middle-income countries: A systematic review. **Global Environmental Change**, v. 66, art. 102224, 2021. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102224

ARRUDA, V. L. da S.; ALENCAR, A. C. C.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; RIBEIRO, F. F.; ARRUDA, F. V.; CONCIANI, D. E.; SILVA, W. V.; SHIMBO, J. Z. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). **Fire Ecology**, v. 20, p. 64, 2024. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00298-4>.



CUNHA, J. E. F.; BRAVO, J. V. M. Effects of environmental protection policies on fragile areas of a watershed occupied by agriculture in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Management**, v. 319, art. 115695, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115695.

DE CASTRO, A. I.; SHI, Y.; MAJA, J. M.; PEÑA, J. M. UAVs for Vegetation Monitoring: Overview and Recent Scientific Contributions. **Remote Sensing**, Basel, v. 13, n. 11, p. 2139, 29 maio 2021. DOI: 10.3390/rs13112139.

DOS SANTOS TEIXEIRA, A.; VIEIRA, L. C. G.; DE SOUZA, C. A.; BERNARDI, J. V. E.; MONTEIRO, L. C. Evidence of water surface and flow reduction in the main hydrographic basin of the Brazilian savannah (Cerrado biome): the Araguaia River. **Hydrobiologia**, v. 851, p. 2503–2518, 2024. DOI: 10.1007/s10750-024-05471-z.

DOS SANTOS, R. M.; KOIDE, S.; TÁVORA, B. E.; DE ARAÚJO, D. L. Groundwater recharge in the Cerrado biome, Brazil—A multi-method study at experimental watershed scale. **Water**, Basel, v. 13, n. 1, p. 20, 24 dez. 2020. DOI: 10.3390/w13010020.

FONSECA, F. N. DE A., & BUSTAMANTE, M. M. C. The Importance of Indigenous Territories for the Provision of Ecosystem Services in the Brazilian Cerrado and the Cerrado-Amazon Transition. **SSRN**. 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4855858>

FUSHIMI, M.; DE LIMA, G. N.; CAPOANE, V.. Changes in Land Use and Cover and Their Environmental Impacts in the Cerrado of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 10, art. 4266, 2024. DOI: 10.3390/su16104266.

GARCIA, A. S.; BALLESTER, M. V. R. Land cover and land use changes in a Brazilian Cerrado landscape: drivers, processes, and patterns. **Journal of Land Use Science**, v. 11, n. 4, p. 538–559, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/1747423X.2016.1182221>.

GOMES, R. O.; SOUZA JÚNIOR, C. H. L.; CASTRO, F. C. C.; ALMEIDA, C. A. de. Mengying. Mapping Deforestation in Cerrado Based on Hybrid Deep Learning Architecture and Medium Spatial Resolution Satellite Time Series. **Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 209, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14010209>.

GUIMARÃES, M. J. M.; REIS, I. D. d.; BARROS, J. R. A.; LOPES, I.; DA COSTA, M. G.; RIBEIRO, D. P.; CARVALHO, G. C.; DA SILVA, A. S.; OLIVEIRA ALVES, C. V. Identification of vegetation areas affected by wildfires using RGB images obtained by UAV: a case study in the Brazilian Cerrado. **Geomatics**, Basel, v. 5, n. 1, p. 13, mar. 2025. DOI: 10.3390/geomatics5010013.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2021.

LEWIS, K.; DE V. BARROS, F.; CURE, M. B.; DAVIES, C. A.; FURTADO, M. N.; HILL, T. C.; HIROTA, M.; MARTINS, D. L.; MAZZOCHINI, G. G.; MITCHARD, E. T. A.; MUNHOZ, C. B. R.; OLIVEIRA, R. S.; SAMPAIO, A. B.; SARAIVA, N. A.; SCHMIDT, I. B.; ROWLAND, L. Mapping native and non-native vegetation in the



Brazilian Cerrado using freely available satellite products. **Scientific Reports**, v. 12, art. 1588, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-05332-6.

LIBONATI, R.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ALENCAR, A. A. C.; COCHRANE, M. A.; SANO, E. E. Climate change and fire: The case of Cerrado, the Brazilian Savanna. In: SHARMA, N. K.; ABHILASH, P. C. (eds.) **Climate change and wildfires: A global synthesis**. Singapore: Springer, 2024. p. 85–106. DOI: 10.1007/978-981-97-3870-0_6.

LOPES, G. R.; BASTOS LIMA, M. G.; REIS, T. N. P. Maldevelopment revisited: Inclusiveness and social impacts of soy expansion over Brazil's Cerrado in Matopiba. **World Development**, v. 139, p. 105316, 2021. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105316.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C., CARVALHO, W. S., & PEREIRA, M. A. S. Geotecnologias aplicadas na defesa do meio ambiente em municípios da Rota de Integração Latino-Americana: a atuação do Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul via Centro Integrado de Proteção e Pesquisa Ambiental, Brasil. **Interações (Campo Grande, Online)**, v. 22, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.20435/inter.v22i1.3040>.

MATOSAK, B. M.; FONSECA, L. M. G.; TAQUARY, E. C.; MARETTO, R. V.; BENDINI, H. d. N.; ADAMI, M. Mapping Deforestation in Cerrado Based on Hybrid Deep Learning Architecture and Medium Spatial Resolution Satellite Time Series. *Remote Sensing*, Basel, v. 14, n. 1, p. 209, 2022. DOI: 10.3390/rs14010209.

MEDEIROS, N. F.; FERNANDES, G. W.; RABELLO, A. M.; BAHIA, T. O.; SOLAR, R. R. C. Can our current knowledge and practice allow ecological restoration in the Cerrado? **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. 1, e20200665, 2022. DOI: 10.1590/0001-3765202120200665.

OLIVEIRA DMS, TAVARES RLM, LOSS A, MADARI BE, CERRI CEP, ALVES BJR, PEREIRA MG, CHERUBIN MR. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Rev Bras Ciênc Solo**. 47:e0220055, 2023. doi:10.36783/18069657rbcs20220055.

PIERIN, E. I.; SABATIER, R.; GUILLEMOT, J.; TORRES-DUMONT, A.; CARDOSO, A. W. Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado and their implications for regional climate. **Land Use Policy**, v. 95, 104582, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104582>.

RESENDE, F. M.; CIMON-MORIN, J.; POULIN, M.; MEYER, L.; JONER, D. C.; LOYOLA, R. The importance of protected areas and Indigenous lands in securing ecosystem services and biodiversity in the Cerrado. **Ecosystem Services**, v. 49, p. 101282, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoser.2021.101282.

RODRIGUES, V. A. A.; FONSECA, L. M. G.; ADAMI, M.; BAPTISTA, S. R.; XAVIER, A. A. P. Machine Learning-Based Cerrado Land Cover Classification Using High-Resolution Satellite Imagery. **Remote Sensing**, v. 17, n. 3, p. 480, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17030480>.



SANO, E. E.; ALMEIDA, A. A. R.; MARTINS, E. Cerrado ecoregions: a spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818–828, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.108.

SCHÜLER, J.; BUSTAMANTE, M. M. C. Spatial planning for restoration in Cerrado: balancing the trade-offs between conservation and agriculture. **Journal of Applied Ecology**, v. 59, n. 10, p. 2069–2079, 2022. DOI: 10.1111/1365-2664.14262.

SCHWAMBACK, D.; MUNIZ BRANDÃO, A. R.; BERTOTTO, L. E.; BERNDTSSON, R.; ZHANG, L.; WENDLAND, E.; PERSSON, M. Quantifying Soil Loss in the Brazilian Savanna Ecosystem: Current Rates and Anticipated Impact of Climate Changes. **Land Degradation & Development**, 2024. DOI: 10.1002/ldr.5331.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D. A.; MEIRA NETO, A. A.; RODRIGUES, D. B. B. Effects of climate and land-cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, 2021. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100931.

STRASSBURG, B. B. N., IRIBARREM, A., BEYER, H. L., CORDEIRO, C. L., CROUZEILLES, R., JAKOVAC, C. C., BRAGA JUNQUEIRA, A., LACERDA, E., LATAWIEC, A. E., BALMFORD, A., BROOKS, T. M., BUTCHART, S. H. M., CHAZDON, R. L., ERB, K. H., BRANCALION, P., BUCHANAN, G., COOPER, D., DÍAZ, S., DONALD, P. F., KAPOV, V., LECLÈRE, D., MILES, L., OBERSTEINER, M., PLUTZAR, C., SCARAMUZZA, C. A. DE M., SCARANO, F. R., & VISCONTI, P. Global priority areas for ecosystem restoration. **Nature**, v. 586, n. 7831, p. 724–729, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>.

STRÍKIS, N. M.; BUARQUE, P. F. S. M.; CRUZ, F. W.; BERNAL, J. P.; VUILLE, M.; TEJEDOR, E.; SIMÕES SANTOS, M.; SHIMIZU, M. H.; AMPUERO, A.; DU, W.; SAMPAIO, G.; SALES, H. R.; CAMPOS, J. L.; KAYANO, M. T.; APAËSTEGUI, J.; FU, R. R.; CHENG, H.; EDWARDS, R. L.; MAYTA, V. C.; FRANCISCHINI, D. d. S.; ARRUDA, M. A. Z.; NOVELLO, V. F. Modern anthropogenic drought in Central Brazil unprecedented during last 700 years. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, art. 1728, 26 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-45469-8.

WANG, R.; SUN, Y.; ZONG, J.; WANG, Y.; CAO, X.; WANG, Y.; CHENG, X.; ZHANG, W. Remote Sensing Application in Ecological Restoration Monitoring: A Systematic Review. **Remote Sensing**, v. 16, n. 12, p. 2204, 2024. DOI: 10.3390/rs16122204.

WORLD ECONOMIC FORUM. Towards a Sustainable Cerrado: Production and Protection—A Vision for a Just Transition. Geneva: World Economic Forum, 2024. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Sustainable_Transition_Cerrado_2024.pdf. Acesso em: 10 março. 2025.



CAPITULO 1

Novo Índice de Integridade Ecológica aplicado a Nascentes da Savana Brasileira usando Drones Multiespectral

LOBTCHENKO J. C.P & ARRUDA, E.

Resumo

A conservação das nascentes do Cerrado é crucial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade, especialmente diante das pressões impostas pela expansão agropecuária. Este estudo propõe e valida um Índice de Integridade Ecológica (EII) desenvolvido a partir de dados multiespectrais obtidos por drones, aplicado em Áreas de Preservação Permanente (APPs) de nascentes no Cerrado brasileiro. O EII integra variáveis derivadas dos índices NDVI, NDWI, PSRI, CHM e BSI, sintetizadas por meio de Análise de Componentes Principais (PCA), validadas com análises de correlação de Spearman, GeoDetector e Moran's I (global e local – LISA) para avaliar padrões espaciais de integridade. O NDVI e o NDWI destacaram-se como os principais fatores explicativos na variabilidade espacial do EII, refletindo a importância do vigor vegetativo e da umidade foliar para a saúde ecológica das nascentes. Os resultados revelaram forte autocorrelação espacial e padrões claros de fragmentação, com predominância de clusters de baixa integridade (Low-Low) e escassez de hotspots (High-High), indicando elevado grau de degradação ambiental nas áreas estudadas. As Nascentes N01, N02 e N06 apresentaram índices críticos ($<0,40$), enquanto N05 manteve integridade moderada (0,504), embora sob risco. O EII demonstrou ser uma ferramenta robusta, sensível e replicável para o diagnóstico ambiental, permitindo identificar áreas prioritárias para conservação e restauração. Sua aplicação fornece suporte técnico e científico para políticas públicas, monitoramento contínuo e manejo sustentável de recursos hídricos no Cerrado.

Palavras chaves: Geotecnologia; APP; Monitoramento ambiental; Restauração ecológica.

Abstract

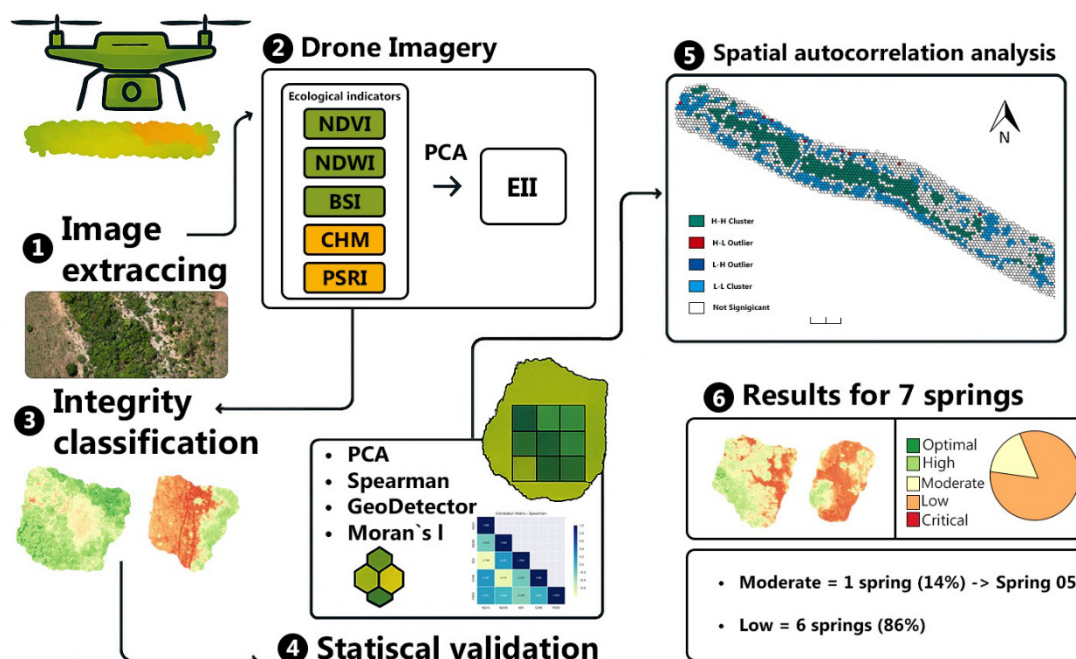
The conservation of Cerrado headwaters is crucial for the maintenance of ecosystem services and biodiversity, especially in the face of pressures imposed by agricultural expansion. This study proposes and validates an Ecological Integrity Index (EII) developed from multispectral data obtained by drones, applied in Permanent Preservation Areas (APPs) of headwaters in the Brazilian Cerrado. The EII integrates variables derived from the NDVI, NDWI, PSRI, CHM and BSI indices, synthesized through Principal Component Analysis (PCA), validated with Spearman, GeoDetector and Moran's I correlation analyses (global and local – LISA) to assess spatial patterns of integrity. NDVI

and NDWI stood out as the main explanatory factors in the spatial variability of the EII, reflecting the importance of vegetative vigor and leaf moisture for the ecological health of headwaters. The results revealed strong spatial autocorrelation and clear patterns of fragmentation, with a predominance of low-integrity clusters (Low-Low) and a scarcity of hotspots (High-High), indicating a high degree of environmental degradation in the studied areas. Springs N01, N02 and N06 presented critical indices (<0.40), while N05 maintained moderate integrity (0.504), although at risk. The EII proved to be a robust, sensitive and replicable tool for environmental diagnosis, allowing the identification of priority areas for conservation and restoration. Its application provides technical and scientific support for public policies, continuous monitoring and sustainable management of water resources in the Savannah.

Keywords: Geotechnology; APP; Environmental monitoring; Ecological restoration.

Resumo Gráfico

DEVELOPMENT OF A GEOSPATIAL INDEX AND TOOL FOR ANALYZING ECOLOGICAL INTEGRITY IN SPRINGS OF THE BRAZILIAN CERRADO.





Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando aproximadamente 22% do território brasileiro o equivalente a cerca de dois milhões de quilômetros quadrados. Reconhecido como uma das regiões mais biodiversas do planeta, abriga cerca de 12 mil espécies de plantas, das quais mais de 4 mil são endêmicas, além de mais de 800 espécies de aves e 200 de mamíferos, o que o torna essencial para a conservação da biodiversidade global e para o equilíbrio ecológico do continente (SANO *et al.*, 2018; KLINK; MACHADO, 2021). O bioma também cumpre um papel estratégico na regulação climática e na manutenção dos ciclos hidrológicos. Suas formações vegetais, adaptadas a solos profundos e pobres em nutrientes, armazenam grandes quantidades de carbono, principalmente em suas raízes e no solo, funcionando como um importante sumidouro natural de gases de efeito estufa (ARANTE *et al.*, 2016, SANO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Portanto, a preservação do Cerrado é essencial não apenas para a biodiversidade e a segurança hídrica, mas também para a estabilidade climática e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. As áreas de nascentes, em particular, representam um componente crítico desse sistema, pois desempenham funções ecológicas fundamentais que garantem a resiliência do bioma e o bem-estar das populações humanas dependentes dele (WANTZEN *et al.*, 2006; COLVIN *et al.*, 2019; CUNHA; BRAVO, 2022).

Por sua função estratégica na regulação hídrica, as áreas de nascentes estão protegidas pela legislação brasileira, sendo incluídas como Áreas de Preservação Permanente (APPs) pelo Código Florestal (BRASIL, 2012). Essas áreas possuem restrições de uso e exigem a manutenção da vegetação nativa para preservar sua capacidade de infiltração e evitar a erosão do solo. No entanto, a implementação dessa proteção enfrenta desafios, especialmente em regiões como o Cerrado, onde a expansão agrícola e a mecanização têm historicamente levado à degradação dessas áreas (STRASSBURG *et al.*, 2020; FUSHIMI *et al.*, 2024 LIBONATI *et al.*, 2024).

Dado o cenário de degradação e as crescentes pressões ambientais, o monitoramento contínuo das áreas de nascentes é fundamental para identificar os fatores de risco e orientar ações de conservação (COLLYER *et al.* 2022). Técnicas baseadas em sensoriamento remoto, como o uso de imagens de satélite e drones, têm demonstrado grande potencial para mapear e avaliar a saúde dessas áreas de forma eficiente e acessível.



A análise multiespectral e a modelagem de dados geoespaciais permitem identificar mudanças na cobertura do solo e na integridade ecológica, proporcionando subsídios para o manejo sustentável dessas áreas críticas (MARTIN; PROULX, 2020; MAGALHÃES *et al.*, 2021; GOMES *et al.*, 2022; LEWIS *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2025).

A integridade ecológica refere-se à capacidade de um ecossistema de manter sua estrutura, funções e processos naturais frente às pressões externas (DE LEO & LEVIN, 1997; ROCHE; CAMPAGNE, 2017; MARTIN; PROULX, 2020). Áreas de alta integridade apresentam maior resiliência a mudanças ambientais, enquanto aquelas degradadas são mais vulneráveis à perda de serviços ecossistêmicos críticos (GRANTHAM *et al.*, 2020).

O monitoramento da integridade ecológica, entretanto, enfrenta desafios significativos devido às características dispersas e de difícil acesso das nascentes no Cerrado. Métodos tradicionais de monitoramento exigem grande esforço humano e financeiro, limitando sua aplicação em larga escala. Neste contexto, a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem emergido como uma solução eficiente e de baixo custo para superar essas barreiras (XU *et al.*, 2019; ABDULLAH, *et al.*, 2024). Equipados com sensores multiespectrais, os VANTs oferecem dados de alta resolução que permitem uma análise detalhada das condições ambientais em áreas específicas. Além disso, as imagens multiespectrais obtidas pelos drones podem ser processadas para gerar mapas de índices de vegetação, como NDVI e PSRI, que indicam a saúde da vegetação e a presença de estresses ambientais (ABDULLAH, *et al.*, 2024; PARRA *et al.*, 2024).

O uso de VANTs também abre caminho para a aplicação de novos índices de integridade ecológica, adaptados às características específicas das áreas monitoradas pois sintetizam dados ambientais complexos em métricas simples e interpretáveis, permitindo uma avaliação objetiva das condições ecológicas em diferentes paisagens (DÍAZ-DELGADO *et al.*, 2019).

Dentre os índices mais utilizados para avaliação da qualidade ecológica em escala regional destaca-se o modelo de Índice Ecológico Baseado em Sensoriamento Remoto (RSEI) desenvolvido por Xu (2013). O RSEI combina quatro elementos principais: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que avalia a densidade e vigor da vegetação; WET (Indicada pela componente de umidade da transformação) que reflete a presença de



água no solo ou na vegetação, NDBSI (Normalized Difference Built-up and Soil Index) que indica superfície seca, geralmente associada à ocupação humana ou solo exposto e o LST que representa a temperatura da superfície terrestre, obtida através de dados de satélite térmico, refletindo estresse térmico ambiental. Esses elementos são combinados via análise de componentes principais (PCA) para gerar o RSEI. Este índice tem sido aplicado com sucesso em diversas regiões, proporcionando insights sobre mudanças ambientais e padrões de degradação (XU et al., 2018, 19; ZHANG et al., 2024). No entanto, sua generalidade limita a capacidade de capturar nuances específicas de ecossistemas como o Cerrado, onde características locais, desempenham um papel fundamental na saúde ecológica.

Dessa forma, com este trabalho objetivou-se criar e aplicar um índice de integridade Ecológica baseado em imagens multiespectrais de Drone para áreas de Preservação Permanente de Nascentes do Cerrado.

Material e Métodos

A Figura 1 apresenta um fluxograma sintético da metodologia empregada no Capítulo 1, organizado em cinco etapas sequenciais e codificado por cores para facilitar a leitura. Da esquerda para a direita, o diagrama ilustra (i) a caracterização da área de estudo no Cerrado sul-matogrossense, (ii) a aquisição das imagens multiespectrais por VANT com seus parâmetros de voo e pré-processamento em QGIS/Metashape, (iii) o cálculo dos índices espectrais NDVI, NDWI, BSI, CHM e PSRI que alimentam o novo EII, (iv) os procedimentos de validação estatística e análise espacial — incluindo PCA, correlação de Spearman, Moran's I e GeoDetector — e, por fim, (v) o mapeamento da integridade ecológica em classes que vão de “Ótima” a “Crítica”.

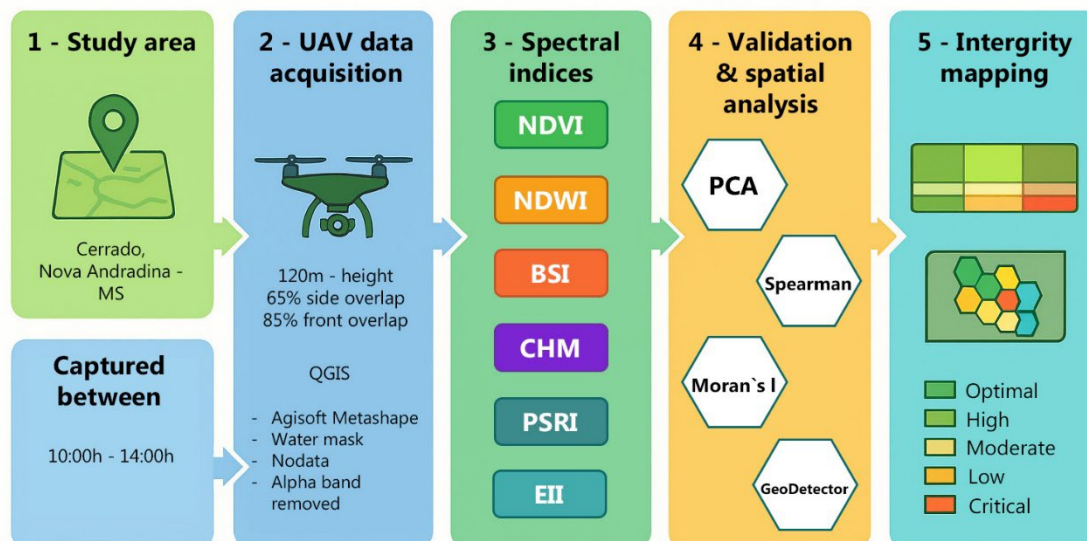


Figura 1 - Fluxograma com o percurso analítico do artigo.

Área de estudo

Foram monitoradas sete nascentes localizadas nas Sub-bacias do rio Ivinhema e Pardo, no Assentamento Dezesete de Abril, distrito de Nova Casa Verde, Nova Andradina, Mato Grosso do Sul (Figura 2). Inseridas no bioma Cerrado, essas áreas possuem vegetação composta por Cerradão, Cerrado stricto sensu e Mata de Galeria, conforme a classificação de Ribeiro e Walter (2008). No entanto, essas nascentes estão inseridas em uma matriz fortemente influenciada por atividades agropecuárias, como a produção de soja, milho, cana-de-açúcar e pastagens, o que impõe pressão significativa sobre os ecossistemas naturais (MAPBIOMAS, 2021).

O clima da região é classificado como tropical savânico (Aw) segundo a classificação de Köppen, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos. A temperatura média anual varia entre 19,5°C e 25,6°C, enquanto a precipitação média oscila entre 1230 mm e 1390 mm (ALVARES et al., 2014). Essas condições climáticas influenciam diretamente a dinâmica da vegetação e a recarga hídrica das nascentes, especialmente durante a estação chuvosa, quando os fluxos de água subterrânea são maximizados. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, caracterizados por uma rica camada superficial de matéria orgânica e textura muito argilosa (SANTOS; ZARONI, 2021).

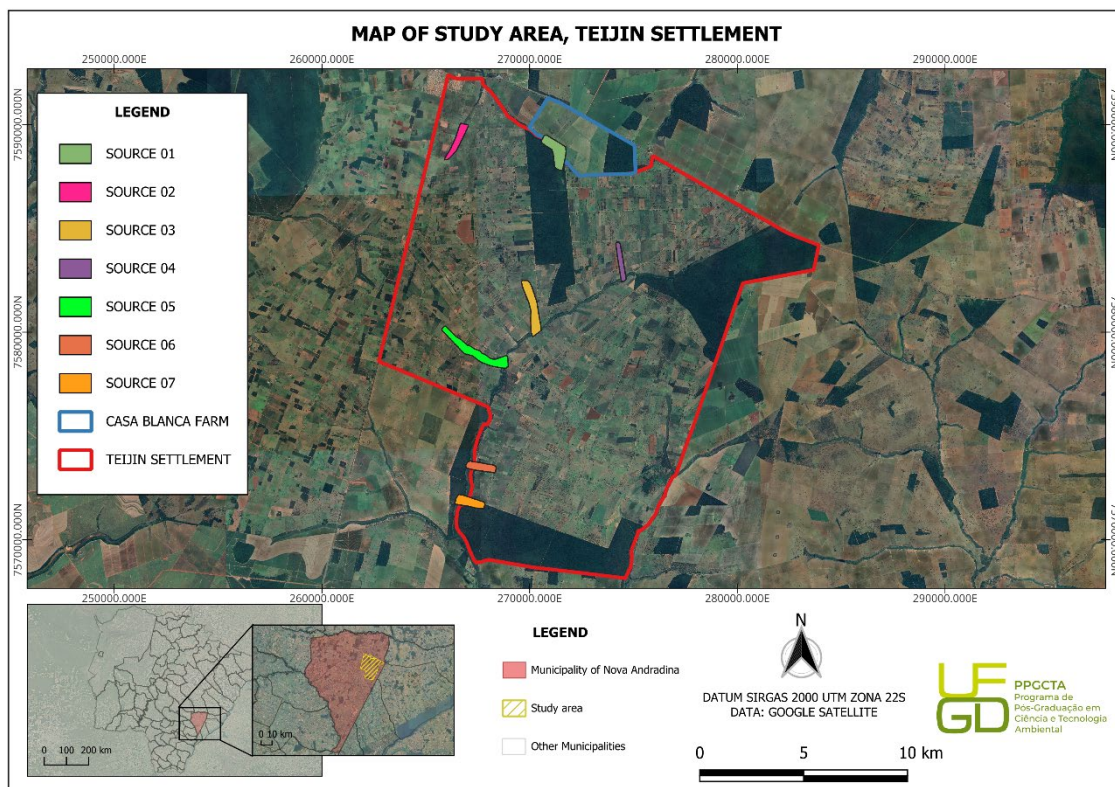


Figura 2 - Localização das setes nascentes mapeadas nesse estudo.

Obtenção das imagens

A coleta de imagens foi realizada utilizando o drone DJI Mavic 3 Multispectral, equipado com sensores RGB e multispectrais que capturam dados nas bandas azul, verde, vermelho, red edge e NIR. Os voos foram planejados no aplicativo DJI Pilot, seguindo as normas da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). O planejamento considerou a altura de voo de 120 metros (ANAC, 2023), sobreposição lateral de 65% e frontal de 85%, parâmetros que garantem a qualidade e precisão dos produtos geoespaciais (WOLF; DEWITT, 2000).

A coleta foi realizada durante a estação chuvosa, entre 10h e 14h, horário em que as condições de iluminação são ideais para minimizar sombras e variações espectrais (LILLESAND; KIEFER; CHIPMAN, 2015). O período chuvoso foi escolhido devido ao aumento da biomassa e ao vigor vegetativo, permitindo uma análise mais detalhada das condições ecológicas. Para cada nascente buscou-se cobrir o máximo possível do corpo hídrico.



Os dados capturados foram salvos em formato bruto para processamento posterior. A escolha do drone e dos parâmetros de voo foi baseada em sua capacidade de gerar imagens de alta resolução espacial e espectral, essenciais para calcular índices de vegetação e avaliar a integridade ecológica conforme sugerido por Andrés-Anaya *et al.* (2024).

Processamento das Imagens

O processamento das imagens foi conduzido no Agisoft Metashape, gerando ortomosaicos multiespectrais e RGB, além de Modelos Digitais de Superfície (DSM) e de Terreno (DTM). Esses produtos foram padronizados no mesmo tamanho de pixel para garantir a consistência nas análises subsequentes. As imagens passaram por correções geométricas e radiométricas, eliminando distorções e assegurando a qualidade dos dados processados conforme sugerido por Zhang *et al.* (2024).

Os ortomosaicos multiespectrais foram exportados para o software QGIS, onde foram aplicados tratamentos adicionais, como a remoção de pixels inválidos e bandas alpha. Para excluir áreas alagadas, foi criada uma máscara baseada no NDWI, que foi uniformemente aplicada a todos os índices calculados. Essa etapa garantiu que os resultados representassem exclusivamente as condições terrestres das nascentes.

Cálculo dos Índices de Vegetação

Os índices de vegetação utilizados neste estudo (Tabela 1) foram selecionados com base em sua capacidade de capturar aspectos críticos da integridade ecológica das nascentes. Eles abrangem variáveis como vigor da vegetação, estresse ambiental, presença de água e exposição do solo. Os índices foram calculados no software QGIS utilizando o novo plugin descrito no capítulo 2.

Tabela 1 - Índices espectrais/estruturais/hidrológicos utilizados no Estudo.



Índice	Fórmula	Descrição	Referência
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Indica o vigor da vegetação	Rouse <i>et al.</i> , (1973)
CHM	DSM - DTM	Captura a estrutura vertical da vegetação	Lefsky <i>et al.</i> (2002)
PSRI	$(\text{Red} - \text{Green}) / \text{NIR}$	Indica a presença de estresse foliar	Merzlyak <i>et al.</i> (1999)
NDWI	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$	Detecta a presença de água na vegetação	Gao (1996)
BSI	$((\text{Red} + \text{RedEdge}) - (\text{NIR} + \text{Green})) / ((\text{Red} + \text{RedEdge}) + (\text{NIR} + \text{Green}))$	Indica a exposição do solo	Modificado de Rikimaru, <i>et al.</i> (1997)

Índice de Integridade Ecológica (EII)

O EII foi construído a partir da integração dos índices calculados, utilizando análise de componentes principais (PCA) conforme metodologia proposta por Xu (2013). Essa técnica sintetiza os índices em uma única métrica, reduzindo redundâncias e maximizando a variância explicada pelos dados. A fórmula do EII é dada como:

$$PC1 = a_1(NDVI) + a_2(CHM) + a_3(1 - PSRI) + a_4(NDWI) + a_5(BSI)$$

Onde:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 : Coeficientes derivados da PCA, representando a contribuição de cada índice para o PC1.

Após o cálculo do PC1, os valores foram normalizados para gerar o EII conforme metodologia proposta por Zhang et al. (2024). Essa normalização escalou os valores entre 0 e 1, facilitando a interpretação dos resultados (XU et al., 2018, 2019). Para a normalização utilizou-se a seguinte fórmula:

$$EII = \frac{PC1 - PC1_{\min}}{PC1_{\max} - PC1_{\min}}$$



Validação do Índice EII

Para a validação do índice foram selecionadas duas nascentes nas quais aplicou-se quatro análises distintas para verificar a acurácia dos dados, todas as análises foram rodadas no novo plugin para o Qgis desenvolvido no capítulo 2.

Análise de Componentes Principais (PCA)

A fim de calibrar os dados e redução da dimensionalidade dos indicadores (NDVI, CHM, 1-PSRI, NDWI, BSI) foi realizada via PCA ortogonal (JOLLIFFE; CADIMA, 2016), com padronização *z-score* para eliminar viés de escala. A matriz de covariância foi decomposta como:

$$\Sigma = \mathbf{V}\Lambda\mathbf{V}^T,$$

Onde Λ = matriz diagonal de autovalores ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_5$) e $\mathbf{V}$ = autovetores. O primeiro componente principal (PC1), responsável pela máxima variância explicada ($\geq 70\%$), gerou os pesos a_1 a a_5 para o EII. A adequação foi verificada com:

- Teste de esfericidade de Bartlett ($*p* < 0.05$)
- KMO (Kaiser-Meyer-Olkin > 0.6).

Correlação de Spearman

A análise de correlação de Spearman (ZAR, 1999) foi aplicada para avaliar as relações não-paramétricas entre todos os índices espectrais componentes na construção do EII onde:

$$\rho = 1 - [6\sum d_i^2 / (n(n^2 - 1))],$$

onde d_i = diferença de ranks e n = número de amostras (≥ 30 nascentes). A significância ($*p* < 0.01$) foi testada via *t-test*: $t = \rho\sqrt{[(n-2)/(1-\rho^2)]}$.

Valores $|\rho| \geq 0.5$ indicaram relevância ecológica.

Geodetector

O GeoDetector quantificou o poder explicativo de cada índice (NDVI, CHM, (1-PSRI), NDWI, BSI) na variação espacial do EII, calculando o q-statistic (WANG *et al.*, 2023):



$q = 1 - (SSW/SST)$, onde SSW = soma das variâncias intraestrato e SST = variância total global. Foram testados:

- Detector de fator: $*q* \in [0,1]$ (poder explanatório)
- Detector de interação: $q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$ (sinergia entre fatores) com significância via permutações de Monte Carlo (10.000 iterações, $*p* < 0.05$).

Autocorrelação Espacial

Para avaliar padrões de agregação espacial do EII, calculou-se: Moran's I Global, Moran's I Local (LISA) e Modelo de Lag Espacial (ANSELIN *et al.*, 2006). Adotou-se uma matriz de pesos baseada em k-vizinhos ($k = 8$), normalizada por linhas. Moran's I Global indica o grau geral de autocorrelação; o LISA destaca hotspots e coldspots de integridade.

Moran's I Global

A dependência espacial global foi medida por:

$$I = [n/\sum_i \sum_j w_{ij}] \times [\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \sum_i (x_i - \bar{x})^2],$$

Com w_{ij} = matriz de pesos espaciais (vizinhança por $*k*$ -vizinhos mais próximos, $*k*=8$). A hipótese nula ($I=0$) foi rejeitada quando $|Z| > 1.96$ ($*p* < 0.05$), onde $Z = (I - E[I])/\sqrt{\text{Var}[I]}$.

Moran's I Local (LISA)

Hotspots e *coldspots* foram identificados via Anselin Local Moran's:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j,$$

$z_i = (x_i - \bar{x})/\sigma$, com significância calculada por permutações aleatórias (999 iterações, $*p* < 0.05$). Clusters foram classificados como:

- HH (*hotspot*): Sinaliza um pixel de alta integridade ecológica que está rodeado por vizinhos igualmente com valores elevados, evidenciando um cluster positivo
- LL (*coldspot*): Identifica um pixel de baixa integridade cercado por vizinhança também degradada, caracterizando um cluster negativo.
- HL/LH: Outliers espaciais.

Modelo de Lag Espacial



O lag espacial quantifica a influência exercida pelos valores de EII dos vizinhos sobre cada pixel, sendo calculado como:

$$L_i = \sum_j w_{\{ij\}} \cdot y_j$$

onde:

- y_j é o valor de EII no pixel j

- $w_{\{ij\}}$ é o peso espacial (normalizado por linha) que define a vizinhança (por exemplo, os 8 vizinhos mais próximos).

Análise da Integridade Ecológica das Nascentes

A análise da integridade ecológica das nascentes foi conduzida utilizando o Índice de Integridade Ecológica (EII) após sua validação, aplicado em cada pixel das imagens processadas em um Buffer de 50m de largura de cada lado a partir do centro. Essa medida se deu afim de uma padronização próxima a lei florestal (BRASIL, 2012) que define como área de APP 50m no entorno das nascentes de forma que esse índice possa ser usado para monitoramento e aplicação da lei. O comprimento do Buffer foi de um quilometro a fim de padronização apenas.

O Índice de Integridade Ecológica (EII) foi categorizado em cinco classes:

ÓTIMA - 0.8 – 1.0 - Área com integridade ecológica ótima;

ALTA - 0.6 – 0.8 - Área com integridade ecológica alta;

MODERADA - 0.4 – 0.6 - Área com integridade ecológica moderada;

BAIXA - 0.2 – 0.4 - Área com integridade ecológica baixa;

CRÍTICA - 0.0 – 0.2 - Área com integridade ecológica crítica.

Resultados e Discussão

Validação do Índice EII

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de componentes principais para as duas áreas avaliada a fim de validar o índice. Verifica-se que o primeiro componente (PC1) capta o gradiente espectral predominante e justifica a síntese dos cinco índices multiespectrais em um único indicador. Na Nascente-04, o PC1 explicou 66,6 % da variância total e o segundo componente (PC2) acrescentou 20,7 %, somando 87,3 %



acumulada; na Nascente-06, esses valores foram de 58,9 % e 21,6 %, totalizando 80,5 % acumulada. A retenção de componentes seguiu o Critério de Kaiser, que recomenda preservar apenas fatores com autovalor superior a 1, uma vez que cada componente deve explicar mais variância do que uma variável original padronizada (KAISER, 1960).

Tabela 2 - Resultado da Análise de Componentes Principais das Nascente-04 e 06 para validação do EII.

Componente	Autovalor	% Variância	NDVI	NDWI	BSI	CHM	PSRI
Nascente 04							
PC1	3,329	66,59	0,974	-0,928	-0,932	0,758	0,276
PC2	1,036	20,73	-0,033	0,306	-0,127	-0,089	0,958
Nascente 06							
PC1	2,943	58,9	0,966	-0,892	-0,872	0,615	0,281
PC2	1,081	21,62	-0,025	0,403	-0,113	0,029	0,951

Complementarmente, o ponto de cotovelo (scree test) aponta para o ponto de inflexão na curva de variância explicada, onde a inclinação diminui bruscamente, indicando o número ideal de componentes antes que o ganho de informação se torne marginal (CATTELL, 1966). A convergência desses métodos reforça a escolha de dois componentes, alinhando-se às melhores práticas de PCA em estudos ambientais (JOLLIFFE, 2002; ABDI; WILLIAMS, 2010).

A interpretação ecológica das cargas fatoriais confirma a coerência do PC1 e PC2 para capturar aspectos distintos da integridade das nascentes. No PC1, as altas cargas positivas do NDVI (+0,97 em ambas as nascentes) e as fortes cargas negativas do BSI ($\approx -0,93$) e NDWI ($\approx -0,89$) indicam que esse componente sintetiza o contraste entre vigor da vegetação e solo exposto/com baixa umidade (XU *et al.*, 2019). A CHM apresentou média contribuição ($\approx +0,65-0,76$), enquanto o PSRI teve menor influência direta no PC1 ($\approx +0,28$). Já o PC2 foi dominado pelo PSRI ($\approx +0,95$), refletindo processos de senescência da copa, e complementado pelo NDWI em moderada magnitude ($\approx +0,40$). Esse padrão de vetores reforça a adequação dos índices selecionados, pois o PC1 agrega fatores de

“verde vs. seco” e o PC2 isola “senescência vs. umidade”, conforme relatado em estudos de índices de integridade ecológica de Xu *et al.* (2019).

A matriz de correlação de Spearman entre os índices espectrais utilizados na construção do EII encontra-se na Figura 3.

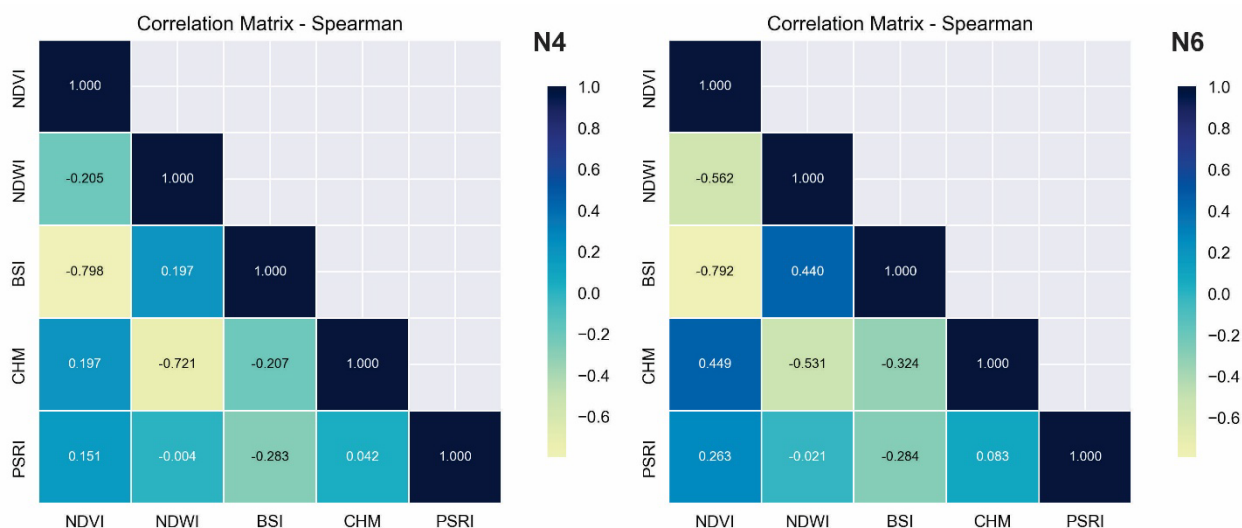


Figura 3 - Matriz de Correlação de Spearman das nascentes utilizadas para a validação do índice. N4 – Nascente 04 e N6 – Nascente 06.

Observa-se que ambas as nascentes apresentaram forte correlação negativa entre NDVI e BSI ($\rho \approx -0,79$), demonstrando que locais com elevado vigor da vegetação apresentam baixas taxas de solo exposto de forma consistente em ambientes de nascentes. Esse padrão, também observado em estudos de avaliação de qualidade ambiental pelo RSEI (TANG *et al.*, 2024), reforça que NDVI e BSI são índices confiáveis para caracterizar a integridade de nascentes no Cerrado brasileiro.

A correlação entre NDWI e CHM foi de forte a moderadamente negativa para as nascentes 04 e 06 respectivamente isso sugere que áreas com maior conteúdo de água foliar tendem a apresentar copas mais baixas, reflexo de micro variações de umidade e densidade de folhagem de sub-bosque (MCFEETERS, 1996; WALLACE *et al.*, 2012). Estudos de modelos de *Canopy Height Model* (CHM) via fotogrametria UAV e LiDAR também indicam que a altura de copa é influenciada por fatores hídricos do sub-bosque e por estruturas de vegetação emergente, ajustando-se a variações topográficas locais (LIU *et al.*, 2020).



A correlação entre NDVI–CHM foi positiva e moderada para a nascente 06 o que indica que maior biomassa foliar está associada a copas mais altas, característica crucial para a integridade das nascentes arbóreas (PETTORELLI *et al.*, 2005). A nascente 06 também apresentou correlação moderada negativa para o NDVI–NDWI o que revelam a complementaridade entre vigor vegetativo, estrutura vertical e umidade foliar. O NDVI, sensível à reflectância no infravermelho próximo e vermelho, captura o vigor da vegetação, ao passo que o NDWI realça a umidade interna das folhas (MCFEETERS, 1996).

As demais correlações foram fracas como BSI–PSRI e BSI–CHM, o que evidenciam que elementos como senescência foliar e estrutura do solo influenciam menos diretamente a variabilidade geral das nascentes, alinhando-se a achados em análises de solo orgânico e índices de vegetação, onde variáveis de solo são menos preditivas isoladamente (KARAMPETIAN *et al.*, 2024).

Dessa forma, a convergência de correlações fortes e moderadas entre as duas nascentes valida o EII como um indicador adimensional confiável, capaz de integrar múltiplos processos que definem a integridade ecológica de nascentes no Cerrado.

A aplicação do Geodetector nas Nascentes 04 e 06 evidenciou que a heterogeneidade espacial estratificada (SSH) dos fatores multiespectrais apresenta padrões consistentes e complementaridade ao explicar a variabilidade do Índice de Integridade Ecológica (EII) (Figura 4).

No Factor Detector, o NDVI liderou com $q = 0,946$ na Nascente-04 e $q = 0,925$ na Nascente-06, refletindo a preponderância do vigor vegetativo na estruturação espacial do EII. Em ambas as nascentes, o NDWI também se manteve com alto poder explicativo ($q = 0,884$ e $q = 0,788$), demonstrando a importância da umidade foliar em contextos de nascentes do Cerrado como proposto por Wang *et al.* (2023) para outros ecossistemas.

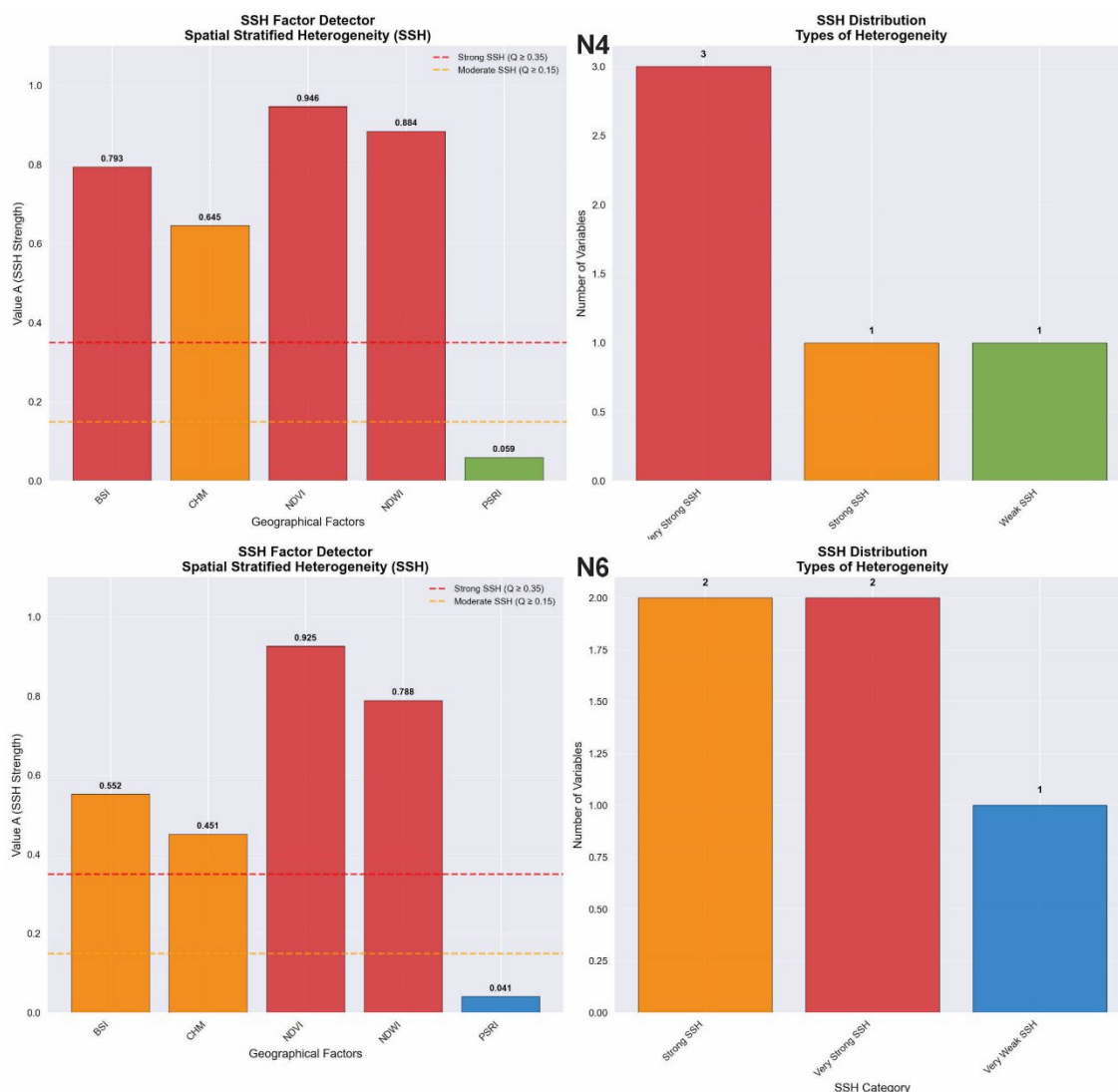


Figura 4 - Geodetector aplicado para validação do índice de integridade ecológica das nascentes analisadas. N4 - Nascente 04 e N6 - Nascente 06.

Vários estudos confirmam que o *Factor Detector* do GeoDetector identifica o (NDVI) e (NDWI) como principais explicadores da variabilidade ecológica ou ambiental em diversas paisagens (GE *et al.*, 2024; SUN *et al.*, 2024).

O BSI obteve $q = 0,793$ na Nascente-04 e $q = 0,552$ na Nascente-06, indicando que a capacidade de discriminar solo exposto contra vegetação é mais variável entre localidades, possivelmente em função de diferenças em cobertura vegetal residual e práticas de uso do solo como sugerido por Ngabire *et al.* (2023). O CHM apresentou $q = 0,645$ e $q = 0,451$, respectivamente, sinalizando que a estrutura vertical aporta explicações relevantes, mas reduzidas em áreas com copas mais homogêneas como sugerido por Zhang *et al.* (2025).



Por outro lado, o estresse foliar (PSRI) teve q muito baixo em ambas as nascentes (0,059 e 0,041), indicando que a variabilidade do estágio de senescência não contribui significativamente para estratificar o EII via Geodetector. Essa fraca influência do PSRI contrasta com o NDVI e reforça a necessidade de combinar múltiplos fatores para capturar processos complexos de integridade ecológica, conforme demonstrado em estudos de desertificação, onde PSRI e índices similares exibem menor poder explicativo (NGABIRE *et al.*, 2023).

Essas interações, todas superiores aos q individuais, confirmam que o EII é moldado por múltiplos processos interativos, em consonância com a teoria do Geodetector de aprimoramentos bivariados. A robustez dessas sinergias justifica a inclusão conjunta dos cinco índices multiespectrais no Modelo de Integridade Ecológica aqui proposto, garantindo que o EII reflita fielmente a variabilidade ecológica de nascentes no bioma Cerrado.

Nas análises de autocorrelação espacial do Índice de Integridade Ecológica (EII) para as Nascentes 04 e 06, observou-se forte dependência espacial em múltiplas escalas (Figuras 5 e 6).

Os elevados valores de Global Moran's I (0,654 para N04 e 0,714 para N06; ambos $p < 0,001$) indicam agrupamentos positivos robustos de EII, consistentes com padrões registrados em contextos urbano-ambientais e ecossistêmicos (MONDAL; GAVSKER, 2024). A Análise Local de Moran's I (LISA) revelou extensos clusters "High-High" (26,7 % em N04; 18,7 % em N06) e "Low-Low" (25,1 % e 23,5 %, respectivamente), demonstrando zonas coerentes de alta e baixa integridade, em conformidade com estudos de fragmentação e risco ecológico (REN *et al.*, 2024; YAERMAIMAITI *et al.*, 2024; LI *et al.*, 2025).

Por fim, a análise de Lag Espacial, ilustrada no Moran scatterplot, nas duas nascentes, os pontos concentram-se nos quadrantes I (H-H) e III (L-L), confirmando a propagação espacial de altas e baixas integridades. Este padrão de contiguidade espacial, refletido na inclinação pronunciada e no agrupamento dos pontos, reforça que processos de vigor vegetal, umidade foliar e solo exposto não ocorrem de forma aleatória, mas sim de modo espacialmente dependente conforme citado por Yamada (2024) o que valida o índice criado.

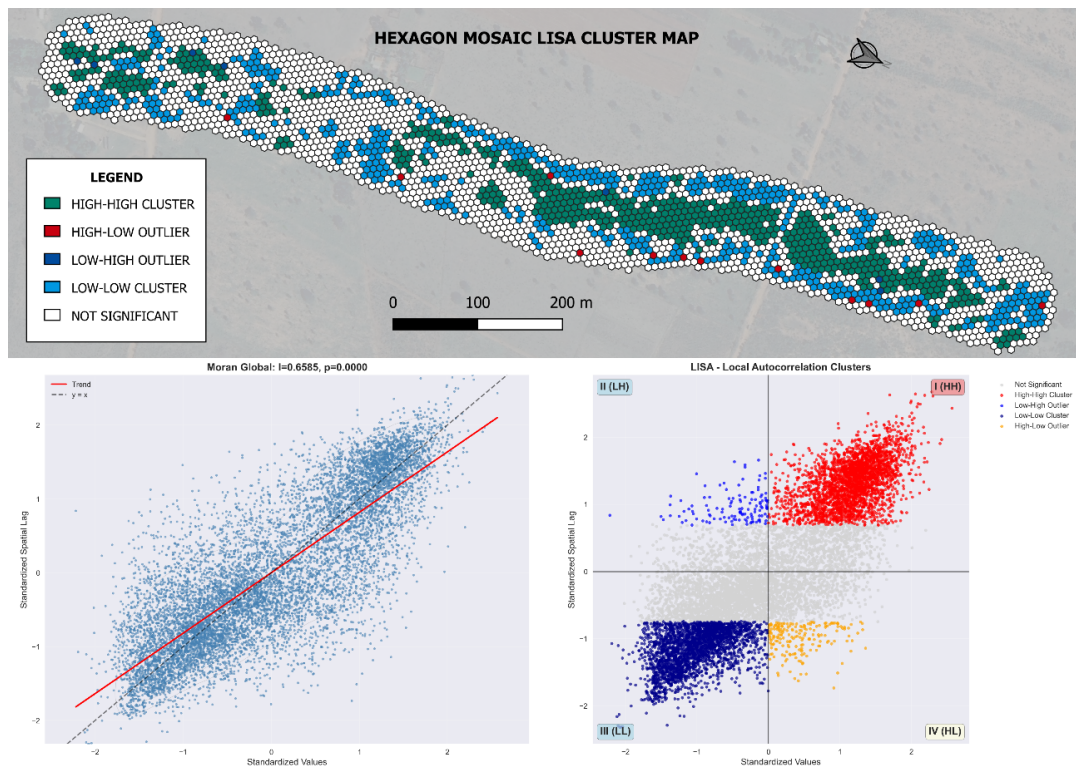


Figura 5 - Distribuição de agrupamento espacial do EII e diagrama de dispersão de Moran I para a Nascente 04.

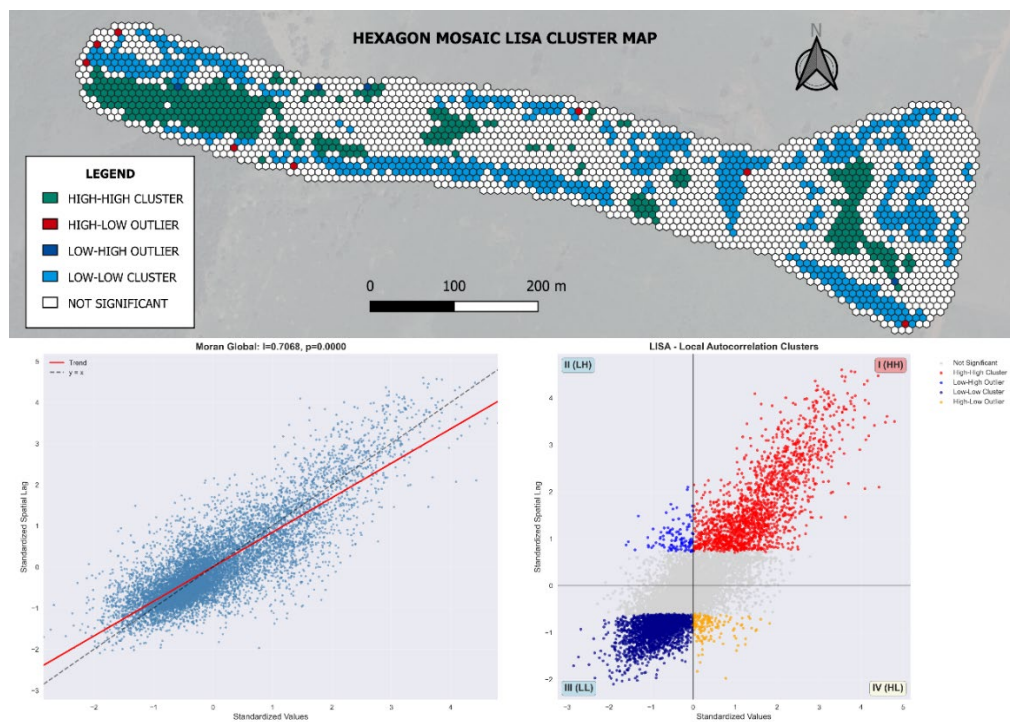


Figura 6 - Distribuição de agrupamento espacial do EII e diagrama de dispersão de Moran I para a Nascente 06.



Análise da Integridade Ecológica das Nascentes

A análise detalhada da integridade ecológica das nascentes avaliadas revela uma situação predominante de baixa integridade ecológica (Figuras 7 e 8). A Nascente 01 apresentou um índice de integridade de 0,388, sendo classificada predominantemente em baixa integridade (59,5%), com um pequeno percentual crítico (2,5%). A situação mais grave observada foi na Nascente 02, com 10% da área classificada como crítica e 61,5% como baixa integridade, resultando em um índice total de 0,343.

Esse resultado evidencia uma degradação preocupante, possivelmente decorrente de alterações intensas na cobertura vegetal e influência antropogênica direta, como agricultura e pecuária. Estudos em grandes paisagens fragmentadas mostram que a substituição de vegetação nativa por áreas agrícolas leva a quebras abruptas na integridade de comunidades biológicas, com perdas significativas de biodiversidade quando a cobertura nativa fica abaixo de 30 % (PARDINI *et al.*, 2010; BANKS-LEITE *et al.*, 2014; OCHOA-QUINTERO *et al.*, 2015).

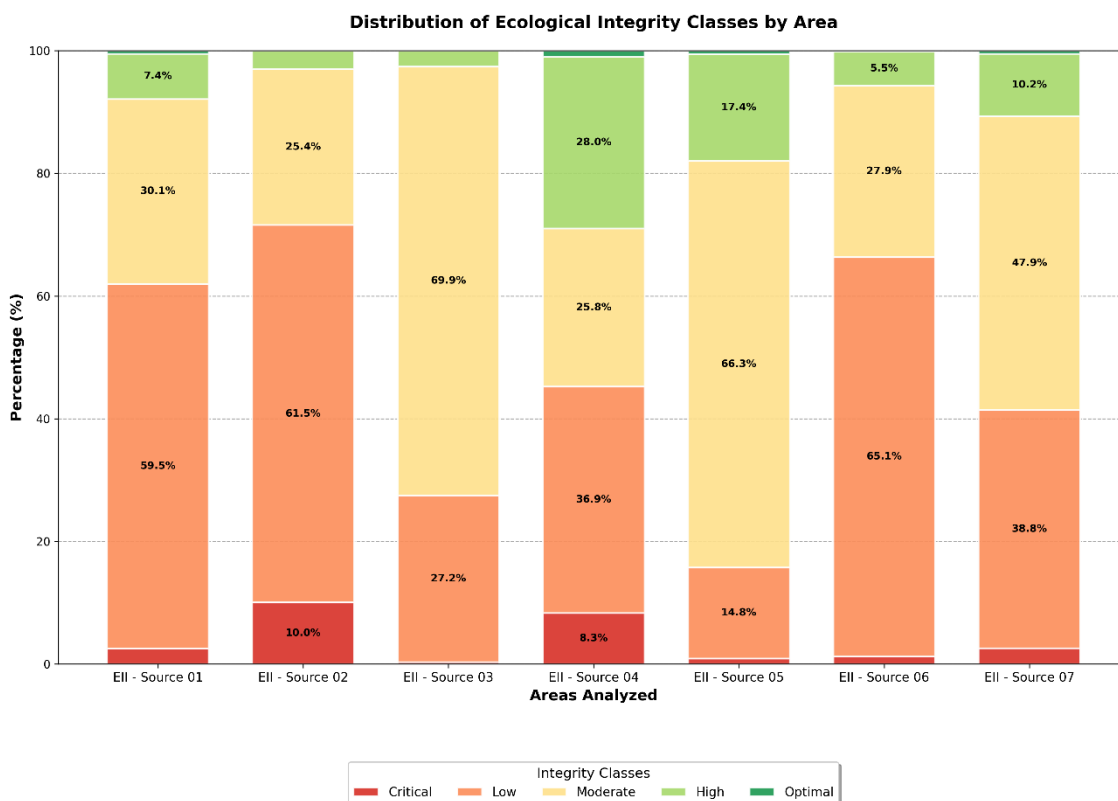


Figura 7 - Distribuição de classes de integridade ecológica por Nascente estudada.

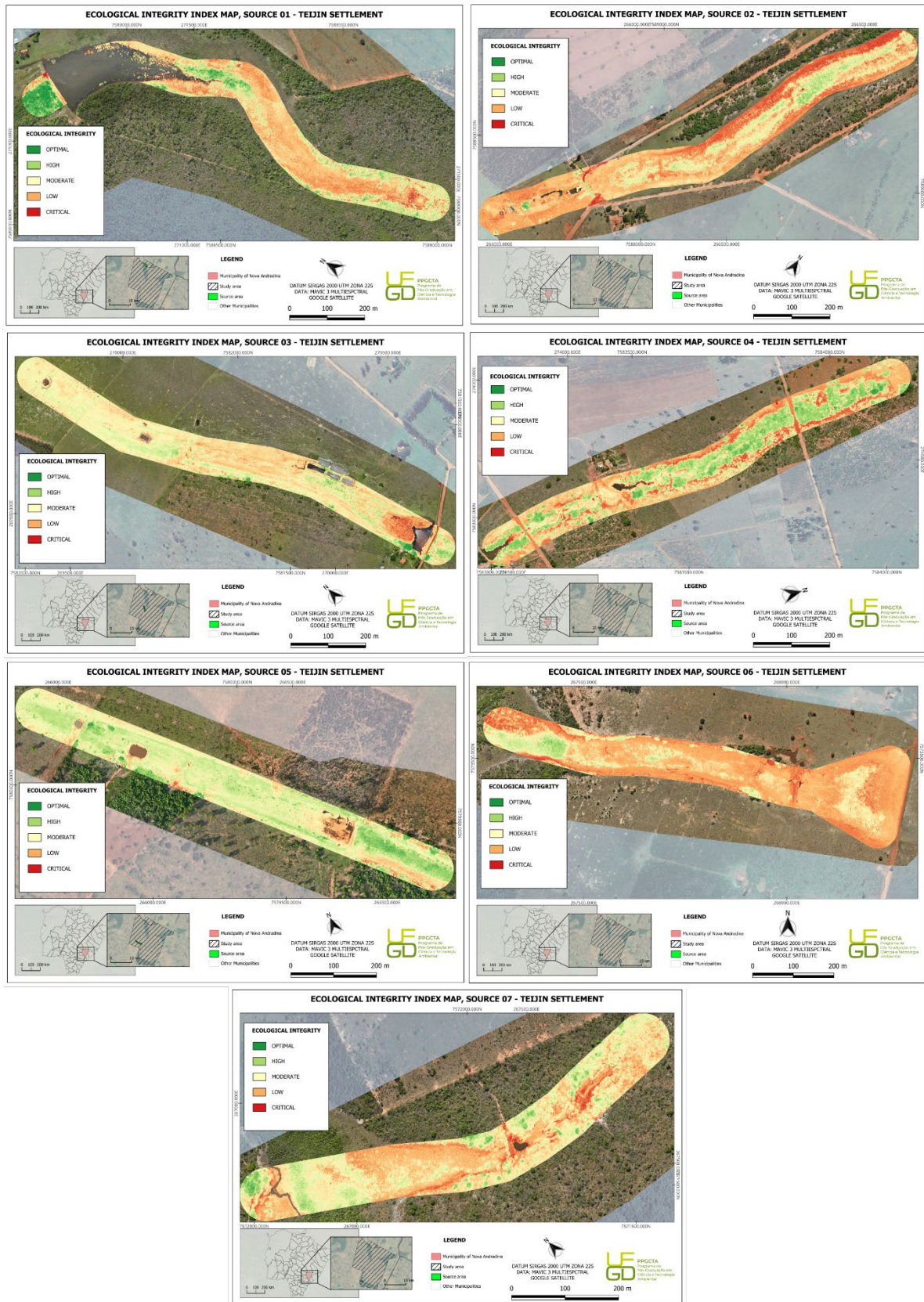


Figura 8 - Mapas da Integridade Ecológica das Nascente estudadas.



A Nascente 03 apresentou predominância de integridade moderada (69,9%) e um índice de 0,450, indicando uma condição intermediária, mas ainda vulnerável. Apesar do estado aceitável em grande parte da área, a presença considerável de zonas com baixa integridade (27,2%) alerta para potenciais ameaças que podem levar à deterioração rápida caso não sejam implementadas medidas de manejo ambiental preventivas.

Uma revisão global sobre a integridade de ecossistemas de nascentes aponta que níveis de condição “Vulnerável” (equivalentes a índices em torno de 0,40–0,60) estão associados a riscos elevados de perda de biodiversidade e colapso de processos ecológicos, exigindo manejo pró-ativo para evitar transições a estados críticos (STEVENSON *et al.*, 2021). Ademais, análises de indicadores ecológicos têm identificado limiares de cobertura natural (20–40 %) abaixo dos quais a integridade dos habitats decai abruptamente, reforçando a necessidade de ações de restauração e controle antrópico em paisagens fragmentadas (MAHAN *et al.*, 2015). Esses achados corroboram a situação observada na Nascente-03 (índice = 0,450; 69,9 % moderado; 27,2 % baixo), evidenciando a urgência de medidas de plantio de espécies nativas de mata ciliar.

A Nascente 04 exibe um cenário mais heterogêneo, com equilíbrio significativo entre áreas de integridade baixa (36,9%) e áreas de alta integridade (28%). Contudo, um índice geral de 0,453 indica que apesar da presença de zonas bem conservadas, existem setores em situação bastante preocupante (8,3% críticos), destacando a necessidade de estratégias específicas e ações localizadas de recuperação ecológica.

A Nascente 05 foi a única a demonstrar uma condição moderada mais satisfatória (66,3% da área), apresentando o índice mais alto entre as avaliadas (0,504). Contudo, não está isenta de ameaças, tendo 14,8% ainda classificados como integridade baixa. A implementação de monitoramento constante e práticas preventivas torna-se essencial para garantir que essas áreas não sofram degradação futura, reforçando a importância de monitoramento contínuo abordado por Costa *et al.*, (2023).

Em contrapartida, a Nascente 06 novamente evidencia preocupações significativas, com 65,1% classificados como baixa integridade e índice geral de apenas 0,377. Essa nascente apresenta claras indicações de elevada vulnerabilidade ambiental, possivelmente associada a práticas agrícolas extensivas e desmatamento no entorno, fatores comprovadamente prejudiciais às nascentes.



Finalmente, a Nascente 07, apesar de apresentar quase metade de sua área em condição moderada (47,9%), ainda possui um significativo percentual classificado como baixa integridade (38,8%), gerando um índice geral de 0,435. Tal situação ressalta que, embora existam áreas em melhores condições, é fundamental realizar ações urgentes para mitigar a expansão das zonas deterioradas.

A fim de propor estratégia de gestão para essas áreas, aplicou-se a distribuição de agrupamento espacial com base no índice I de Moran para todas as nascentes (Figura 9). As nascentes estudadas apresentam poucos padrões de agrupamento “alto-alto” e muitos agrupamentos “baixo-baixo”, enquanto os agrupamentos “baixo-alto” e “alto-baixo” foram raros e discretos na distribuição. Também se observou muitas áreas “não significativo” onde não houve um padrão espacial estruturado forte na variável analisada conforme Anselin *et al.* (2006).

Para as áreas com agrupamento H-H “pontos críticos” (hotspots) formada pelas áreas melhor conservadas com cobertura vegetal arbórea e que sofreu menor degradação, medidas de preservação e monitoramento contínuo devem ser priorizadas, garantindo a manutenção de processos ecológicos essenciais como ciclagem de água e estrutura florestal conforme proposto por Sun *et al.* (2023) e Tian *et al.* (2023).

Já nos agrupamentos L-L “pontos frios” (coldspots) e nas áreas “não significativas” que foram áreas que se encontram sem vegetação arbóreas e que reflete a existência de padrões consolidados de degradação bem como, para os agrupamentos alto-baixo (HL) e baixo-alto (LH) que refletem áreas com grande vulnerabilidade, intervenções de restauração ecológica e controle de solo exposto devem ser priorizados com urgência.

Por fim cabe mencionar que esses resultados reforçam a importância da aplicação de índices robustos como o EII na gestão ambiental, permitindo diagnósticos precisos e a identificação de áreas prioritárias para intervenções, contribuindo assim para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e sustentabilidade das nascentes.

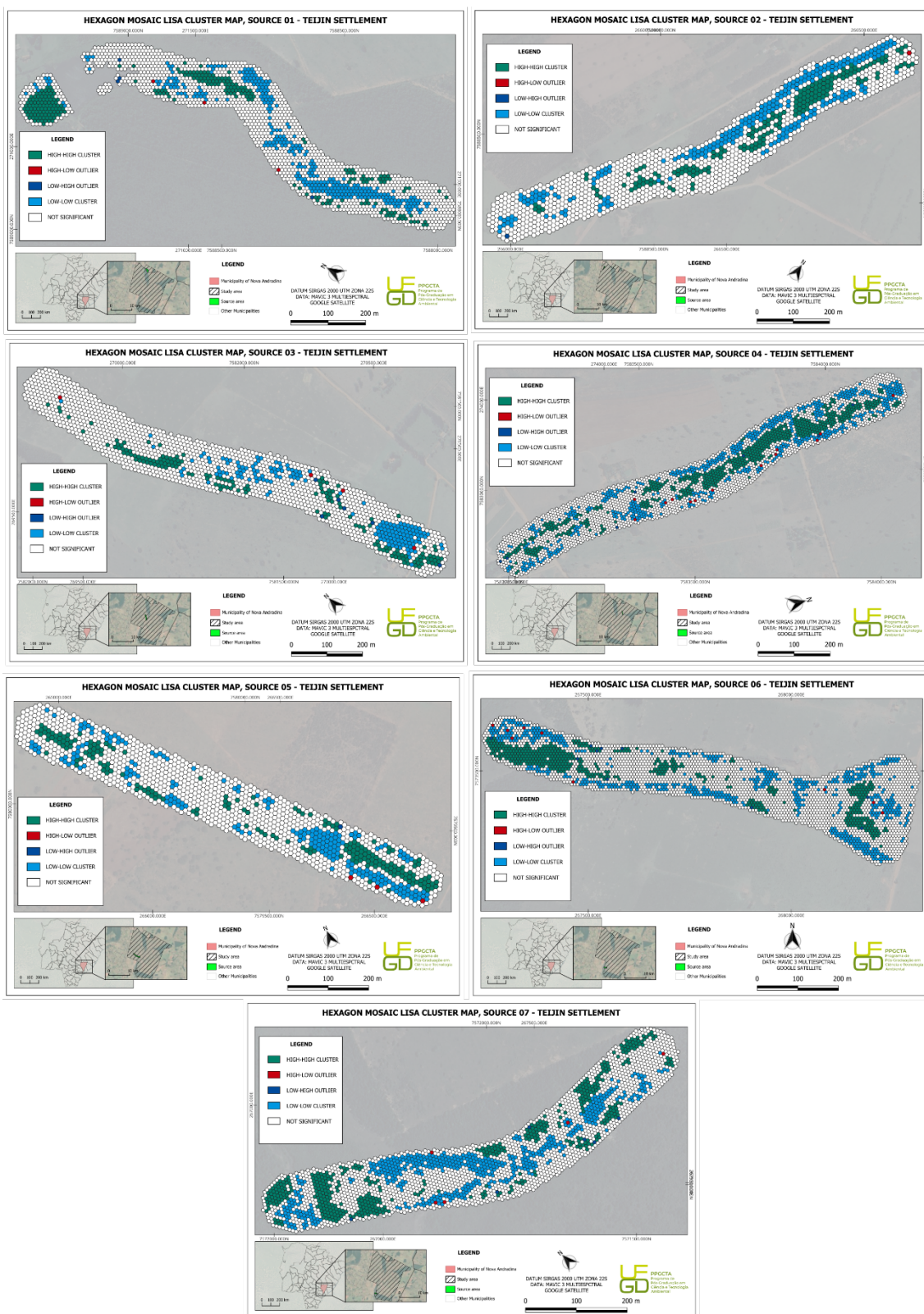


Figura 9 - Distribuição de agrupamento espacial do EII para todas as nascentes estudadas.



Conclusão

Este estudo demonstrou que o Índice de Integridade Ecológica (EII), desenvolvido a partir de dados multiespectrais de drones, representa uma ferramenta eficaz para avaliar a integridade ecológica de áreas de nascentes no bioma Cerrado. A integração de variáveis espectrais como NDVI, NDWI, CHM e PSRI, associada à aplicação de Análise de Componentes Principais (PCA), permitiu discriminar com precisão áreas com distintos níveis de conservação ambiental.

As análises evidenciaram que regiões com vegetação preservada apresentam elevados índices de integridade, enquanto áreas desmatadas, apresentam índices críticos ou moderados, sinalizando comprometimento ecológico.

Além disso, a análise espacial revelou padrões claros de heterogeneidade ecológica, com a formação de clusters de baixa e alta integridade, o que reforça a necessidade de políticas públicas voltadas tanto para a preservação de áreas estratégicas quanto para a restauração de ambientes degradados.

O EII se consolida como uma abordagem inovadora, de alta precisão e replicabilidade, sendo uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental, gestão de recursos hídricos e apoio à tomada de decisão em conservação ambiental no Cerrado, bem como para o estabelecimento de programas de restauração ecológica focados na proteção de nascentes e seus ecossistemas associados.

Referências

ABDULLAH, Meshal M.; AL-ALI, Zahraa M.; BLANTON, Austin; CHARABI, Yassine; ABULIBDEH, Ammar; AL-AWADHI, Talal; SRINIVASAN, Shruthi; FADDA, Eyad; MOHAN, Midhun. UAVs for improving seasonal vegetation assessment in arid environments. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, art. 1366712, 2024. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1366712.

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 4, p.433–459, 2010. DOI: 10.1002/wics.101

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. RBAC-E nº 94: **Requisitos para Certificação de Produto/RPAS**. Emenda nº 03. 22 dez. 2023.



ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ANDRÉS-ANAYA, P.; MOLADA-TEBAR, A.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; MORENO, M. Á.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; HERRERO-HUERTA, M. Radiometric improvement of spectral indices using multispectral lightweight sensors onboard UAVs. **Drones**, v. 8, n. 2, art. 36, 2024. DOI: 10.3390/drones8020036.

ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, v.38, n. 1, p. 5–22, 2006. DOI: 10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x.

ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: past, present, and future influences of land cover and land use. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66–78, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>.

BANKS-LEITE, C.; EWERS, R. M.; METZGER, J. P. Unravelling the drivers of community dissimilarity and species extinction in fragmented landscapes. **Ecology**, v. 93, n. 12, p. 2560–2569, 2012. DOI: 10.1890/11-2054.1.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (**Código Florestal**). Diário Oficial da União, Brasília, 2012.

Cattell, R. B.. The scree test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, v. 1, n. 2, p. 245–276, 1966. DOI: 10.1207/s15327906mbr0102_10.

CHEN, J. et al. A comparison of land cover classification using RADARSAT-1 and Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, n. 4, p. 499-509, 2005.

COLLYER, G.; ROSSO-PINTO, M. J.; SILVA, E. M. A.; MARRUGO-NEGRETE, J.; HANAI, F. Y. Análise do estado de conservação de nascentes urbanas no Brasil: estudo de caso em São Carlos/SP. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, p. 1–11, 2022. DOI: 10.11137/1982-3908_2022_45_49325.

COLVIN, S. A. R.; SULLIVAN, S. M. P.; SHIREY, P. D.; COLVIN, R. W.; WINEMILLER, K. O.; HUGHES, R. M.; FAUSCH, K. D.; INFANTE, D. M.; OLDEN, J. D.; BESTGEN, K. R.; DANEHY, R. J.; EBY, L. Headwater streams and wetlands are critical for sustaining fish, fisheries, and ecosystem services. **Fisheries**, v. 44, n. 2, p. 73–91, 2019. DOI: 10.1002/fsh.10229.

COSTA, R.; SILVA, M.; OLIVEIRA, L.; SOUSA, A.; SANTOS, F. Remote Sensing Applied to Ecological Monitoring of Cerrado Springs. **Remote Sensing** v. 5, n. 7, p. 1872, 2023. DOI:10.3390/rs15071872.

CUNHA, J. E. F.; BRAVO, J. V. M. Effects of environmental protection policies on fragile areas of a watershed occupied by agriculture in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115695, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115695.



DÍAZ-DELGADO, R.; MÜCHER, S. Editorial of Special Issue “Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring”. **Drones**, v. 3, n. 2, art. 47. 2019. DOI: 10.3390/drones3020047.

DJI. DJI Mavic 3 **Multispectral: Technical Specifications**. 2023. Disponível em: <https://www.dji.com>. Acesso em: 2024.

De Leo, G. A.; Levin, S. A. The multifaceted aspects of ecosystem integrity. **Conservation Ecology**, v. 1, n. 1, 1997. DOI: 10.5751/ES-00022-010103.

FUSHIMI, M.; DE LIMA, G. N.; CAPOANE, V.. Changes in Land Use and Cover and Their Environmental Impacts in the Cerrado of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 10, p. 4266, 2024. DOI: 10.3390/su16104266.

GAO, B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

GE, J.; QIAN, C.; ZHANG, C.; ZHANG, L.; SONG, W.; NA, F.; MA, H.; GUO, C.; JIANG, S. IRSEI-based monitoring of ecological quality and analysis of drivers in the Daling River Basin. **Scientific Reports**, v.14, p. 14506, 2024. DOI:10.1038/s41598-024-65511-5.

GOMES, R. O.; SOUZA JÚNIOR, C. H. L.; CASTRO, F. C. C.; ALMEIDA, C. A. de. Mengying. Mapping Deforestation in Cerrado Based on Hybrid Deep Learning Architecture and Medium Spatial Resolution Satellite Time Series. **Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 209, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14010209>.

GRANTHAM, H. S.; DUNCAN, A.; EVANS, T. D. et al. Anthropogenic modification of forests means only 40 % of remaining forests have high ecosystem integrity. **Nature Communications**, v. 11, art. 5978, 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-19493-3.

JOLLIFFE, I. T. Principal Component Analysis, 2nd ed.; Springer: New York, 2002.

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philos. Trans. R. Soc. A** 2016, 374, 20150202.

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educ. Psychol. Meas**, v. 20, n 1, p. 141–151, 1996.

KARAMPETIAN, G.; ZOUKIDIS, K.; GERTSIS, A.; KOUZIS, D.; PERROTIS, E.; et al. Estimation of soil organic carbon content using remote sensing and GIS techniques. In Short Paper Proceedings of the 11th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, **Food & Environment** (HAICTA 2024), CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3930, Karlovasi, Samos, Greece, 17–20 October 2024.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2021.



LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; HARDING, D. J.; PARKER, G. G.; ACKER, S. A.; GOWER, S. T. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, v. 11, n. 5, p. 393–399. 2002. DOI: 10.1046/j.1466-822x.2002.00303.x.

LEWIS, K.; DE V. BARROS, F.; CURE, M. B.; DAVIES, C. A.; FURTADO, M. N.; HILL, T. C.; HIROTA, M.; MARTINS, D. L.; MAZZOCHINI, G. G.; MITCHARD, E. T. A.; MUNHOZ, C. B. R.; OLIVEIRA, R. S.; SAMPAIO, A. B.; SARAIVA, N. A.; SCHMIDT, I. B.; ROWLAND, L. Mapping native and non-native vegetation in the Brazilian Cerrado using freely available satellite products. **Scientific Reports**, v. 12, art. 1588, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-05332-6.

LI, Y.; LIU, J.; ZHU, Y.; WU, C. Assessment of Landscape Ecological Risks Driven by Land Use Change Using Multi-Scenario Simulation: A Case Study of Harbin, China. **Land** v.14, n. 5, p. 947, 2025. DOI:10.3390/land14050947.

LIBONATI, R.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ALENCAR, A. A. C.; COCHRANE, M. A.; SANO, E. E. Climate change and fire: The case of Cerrado, the Brazilian Savanna. In: SHARMA, N. K.; ABHILASH, P. C. (eds.) **Climate change and wildfires: A global synthesis**. Singapore: Springer, 2024. p. 85–106. DOI: 10.1007/978-981-97-3870-0_6.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

LIU, Q.; FU, L.; CHEN, Q.; WANG, G.; LUO, P.; SHARMA, R. P.; HE, P.; LI, M.; WANG, M.; DUAN, G. Analysis of the spatial differences in canopy height models from UAV LiDAR and photogrammetry. **Remote Sens.** V. 12, p. 2884, 2020.

MAGALHÃES FILHO, F.J.C., CARVALHO, W.S., & PEREIRA, M.A.S. Geotecnologias aplicadas na defesa do meio ambiente em municípios da Rota de Integração Latino-Americana: a atuação do Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul via Centro Integrado de Proteção e Pesquisa Ambiental, Brasil. **Interações (Campo Grande, Online)**, v. 22, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.20435/inter.v22i1.3040>.

MAHAN, C. G.; YOUNG, J. A.; MILLER, B. J.; SAUNDERS, M. C. Using Ecological Indicators and a Decision Support System for Integrated Ecological Assessment at Two National Park Units in the Mid-Atlantic Region, USA. **Environmental Management** v. 55, n. 2, p. 508–522, 2015. DOI:10.1007/s00267-014-0391-y.

MAPBIOMAS. Coleção 7: **Mapeamento da cobertura e uso do solo do Brasil**. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 2024.

MARTIN, Charles A.; PROULX, Raphaël. Level-2 ecological integrity: Assessing ecosystems in a changing world. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, n. 3, p. 197–202, 2020. DOI: 10.1016/j.pecon.2020.08.001.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **Int. J. Remote Sens.** v.17, p. 1425–1432, 1996.



MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p.135–141, 1999. DOI: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.

MONDAL, S.; GAVSKER, K. K. Investigating the urban eco-environmental quality utilizing remote sensing-based approach: evidence from an industrial city of Eastern India. **Discover Applied Sciences** v.6, p. 666, 2024. DOI:10.1007/s42452-024-06345-8.

NGABIRE, M.; WANG, T.; LIAO, J.; SAHBENI, G. Quantitative Analysis of Desertification-Driving Mechanisms in the Shiyang River Basin: Examining Interactive Effects of Key Factors through the Geographic Detector Model. **Remote Sensing** v. 15, n. 12, p. 2960, 2023. DOI:10.3390/rs15122960.

OCHOA-QUINTERO, J. M.; GARDNER, T. A.; ROSA, I. M. D.; DE BARROS FERRAZ, S. F.; SUTHERLAND, W. J. Thresholds of species loss in Amazonian deforestation frontier landscapes. **Conservation Biology**, v. 29, n. 2, p. 440–451, 2015. DOI: 10.1111/cobi.12446.

OLIVEIRA DMS, TAVARES RLM, LOSS A, MADARI BE, CERRI CEP, ALVES BJR, PEREIRA MG, CHERUBIN MR. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Rev Bras Ciênc Solo**. 47:e0220055, 2023. doi:10.36783/18069657rbc20220055.

PARDINI, R.; BUENO, A. DE A.; GARDNER, T. A.; PRADO, P. I.; METZGER, J. P. Beyond the fragmentation threshold hypothesis: regime shifts in biodiversity across fragmented landscapes. **PLoS ONE**, v. 5, n. 10, e13666, 2010. DOI: 10.1371/journal.pone.0013666 journals.plos.org.

PARRA, L.; AHMAD, A.; ZARAGOZA-ESQUERDO, M.; IVARS-PALOMARES, A.; SENDRA, S.; LLORET, J.. A Comprehensive Survey of Drones for Turfgrass Monitoring. **Drones**, v. 8, n. 10, art. 563, 2024. DOI: 10.3390/drones8100563.

PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends Ecol. Evol.** v. 20, p.503–510, 2005.

REN, J.; DONG, Y.; HE, P.; LU, H. Spatial-temporal changes of landscape ecological risk in the Liuchong River Basin from the perspective of production-life-ecological space. **Frontiers in Environmental Science** v. 12, Article 1428058, 2024. DOI:10.3389/fenvs.2024.1428058.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado: ecologia e flora**, v. 1, p. 151-212, 2008.

RIKIMARU, A.; MIYATAKE, S. Development of a method for monitoring vegetation coverage ratio using multi-temporal Landsat TM data. Asian Association of Remote Sensing, ACRS Proceedings. Sem DOI – **Publicação de conferência**. 1997.



ROCHE, P. K.; CAMPAGNE, C. S. From ecosystem integrity to ecosystem condition: a continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 29, p. 63–68, 2017. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.12.009.

RODRIGUES, V. A. A.; FONSECA, L. M. G.; ADAMI, M.; BAPTISTA, S. R.; XAVIER, A. A. P. Machine Learning-Based Cerrado Land Cover Classification Using High-Resolution Satellite Imagery. *Remote Sensing*, v. 17, n. 3, p. 480, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs17030480>.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317). NASA SP-351, Goddard Space Flight Center, Washington, DC. 1973.

SANO, E. E.; ALMEIDA, A. A. R.; MARTINS, E. Cerrado ecoregions: a spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. *Journal of Environmental Management*, v. 232, p. 818–828, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.108.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. **Latossolos Vermelhos. Solos Tropicais**. EMBRAPA. 2021.

STEVENS, L. E.; ALY, A. A.; ARPIN, S. M.; APOSTOLOVA, I.; ASHLEY, G. M.; BARBA, P. Q.; BARQUÍN, J.; BEAUGER, A.; BENAABIDATE, L.; BHAT, S. U.; BOUCHAOU, L.; CANTONATI, M.; CARROLL, T. M.; DEATH, R.; DWIRE, K. A.; FELIPPE, M. F.; FENSHAM, R. J.; FRYAR, A. E.; GARSABALL, R. P.; GJONI, V.; GLAZIER, D. S.; GOLDSCHIEDER, N.; GURRIERI, J. T.; GUÐMUNDSDÓTTIR, R.; GUZMAN, A. R.; HÁJEK, M.; HASSEL, K.; HEARTSILL-SCALLEY, T.; HERCE, J. S.; HINTERLANG, D.; HOLWAY, J. H.; ILMONEN, J.; JENNESS, J.; KAPFER, J.; KARAOUZAS, I.; KNIGHT, R. L.; KREILING, A.-K.; LAMELI, C. H.; LEDBETTER, J. D.; LEVINE, N.; LYONS, M. D.; MACE, R. E.; MENTZAFU, A.; MARLE, P.; MOOSDORF, N.; NORTON, M. K.; PENTECOST, A.; PÉREZ, G. G.; PERLA, B.; SABER, A. A.; SADA, D.; SEGADELLI, S.; SKAALSVEEN, K.; SPRINGER, A. E.; SWANSON, S. K.; SCHWARTZ, B. F.; SPROUSE, P.; TEKERE, M.; TOBIN, B. W.; TSHIBALO, E. A.; VOLDOIRE, O. The Ecological Integrity of Spring Ecosystems: A Global Review. In **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, Elsevier. 2021. DOI:10.1016/B978-0-12-821139-7.00111-2.

STRASSBURG, B. B. N.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L.; CORDEIRO, C. L.; CROUZEILLES, R.; JAKOVAC, C. C.; BRAGA JUNQUEIRA, A.; LACERDA, E.; LATAWIEC, A. E.; BALMFORD, A.; BROOKS, T. M.; BUTCHART, S. H. M.; CHAZDON, R. L.; ERB, K. H.; BRANCALION, P.; BUCHANAN, G.; COOPER, D.; DÍAZ, S.; DONALD, P. F.; KAPOV, V.; LECLÈRE, D.; MILES, L.; OBERSTEINER, M.; PLUTZAR, C.; SCARAMUZZA, C. A. DE M.; SCARANO, F. R.; & VISCONTI, P. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, v. 586, n. 7831, p. 724–729, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>.



SUN, H.; CAO, W.; LIU, H.; ZHANG, X.; WANG, L.; WEN, L. Evaluation and driving factors of ecological integrity in the Alxa League from 1990 to 2020. **Frontiers in Ecology and Evolution** v. 11, 1266736, 2023. DOI:10.3389/fevo.2023.1266736.

SUN, J.; LI, H.; XIAO, R.; YAO, G.; ZOU, F. Dynamics of Heat Island Intensity in a Rapidly Urbanizing Area and the Cooling Effect of Ecological Land: A Case Study in Suzhou, Yangtze River Delta. **Sustainability** v. 16, n. 11, p. 4422, 2024. DOI:10.3390/su16114422.

TANG C, LI Q, TAO H, AIHEMAITI M, MU Z, JIANG Y. Evaluation and driving factors of ecological environment quality in the Tarim River basin based on remote sensing ecological index. **PeerJ**. v. 12, e18368, 2024. doi:10.7717/peerj.18368.

TIAN, X.; YANG, L.; WU, X.; WU, J.; GUO, Y.; GUO, Y.; CHEN, H.; LI, J.; LIN, Y. Landscape Fragmentation and Spatial Autocorrelation of a Typical Watershed in the Wenchuan Earthquake-Affected Area—A Case Study in the Longxi River Basin. **Forests** v. 14, n. 12, 2349, 2023. DOI:10.3390/f14122349.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C.; TURNER, D. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote Sens.** v. 4, p. 1519–1543, 2012.

WANG, H.; LIU, C.; ZANG, F.; LIU, Y.; CHANG, Y.; HUANG, G.; FU, G.; ZHAO, C.; LIU, X. Remote Sensing-Based Approach for the Assessing of Ecological Environmental Quality Variations Using Google Earth Engine: A Case Study in the Qilian Mountains, Northwest China. **Remote Sensing**, v. 15, n. 4, 960, 2023. DOI:10.3390/rs15040960.

WANTZEN, K. M.; SIQUEIRA, A. J. B.; CUNHA, C. N. N.; PEREIRA DE SÁ, M. F. Stream-valley systems of the Brazilian Cerrado: impact assessment and conservation scheme. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 16, n. 7, p. 713–732, 2006. DOI: 10.1002/aqc.807.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry**. 3. ed. Columbus: Merrill, 2000.

WU, S.; GAO, X.; LEI, J.; ZHOU, N.; WANG, Y. Spatial and Temporal Changes in the Normalized Difference Vegetation Index and Their Driving Factors in the Desert/Grassland Biome Transition Zone of the Sahel Region of Africa. **Remote Sensing**, v. 12, n. 24, 4119, 2020. DOI:10.3390/rs12244119.

Xu, H. Q. “A Remote Sensing Urban Ecological Index and Its Application.” **Acta Ecologica Sinica**, v. 33, n. 24, p. 7853–7862, 2013. 10.5846/stxb201208301223.

XU, H. Q.; WANG, M. Y.; SHI, T. T.; GUAN, H. D.; FANG, C. Y.; LIN, Z. LPrediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI). **Ecological Indicators**, v. 93, p. 730–740, 2018. DOI:10.1016/j.ecolind.2018.05.055.



XU, H.; WANG, Y.; GUAN, H.; SHI, T.; HU, X. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. **Remote Sens.** v. 11, n. 20, 2345, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11202345>.

XU, H. A remote sensing-based ecological index and its application to environmental quality assessment. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 252, p. 325–334, 20 ago. 2013. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.01.023. ```:contentReference[oaicite:1]{index=1}

Yaermaimaiti, A.; Li, X.; Ge, X.; Liu, C. Analysis of landscape pattern and ecological risk change characteristics in Bosten Lake basin based on optimal scale. **Ecological Indicators** v. 163, 112120, 2024. DOI:10.1016/j.ecolind.2024.112120.

YAMADA, H. Moran's I for Multivariate Spatial Data. **Mathematics** v. 12, n. 17, p. 2746, 2024. DOI:10.3390/math12172746.

ZAR, J. H. *Biostatistical Analysis* (4th ed.). Prentice Hall. 1999.

ZHANG, J.; DING, J.; ZHANG, Z.; WANG, J.; ZENG, X.; GE, X. Study on the inversion and spatiotemporal variation mechanism of soil salinization at multiple depths in typical oases in arid areas: A case study of Wei-Ku Oasis. **Agricultural Water Management**, v. 315, 109542, 2025. DOI:10.1016/j.agwat.2025.109542.

ZHANG, X.; JIA, W.; LU, S.; HE, J. Ecological assessment and driver analysis of high vegetation cover areas based on new remote sensing index. **Ecological Informatics**, v. 82, art. 102786, ago. 2024. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102786.

ZHAO, D.; HUANG, C.; SONG, K.; FANG, H. (Evaluation of methods for estimating bare soil from remote sensing imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1486–1499, 2007. DOI: 10.1016/j.rse.2007.07.004.



CAPITULO 2

Desenvolvimento e validação de ferramenta de análise geoespacial no QGIS aplicada ao monitoramento ambiental

LOBTCHENKO J. C.P & ARRUDA, E.

Resumo

O avanço das geotecnologias tem ampliado as possibilidades de análise ambiental, especialmente com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação do plugin GeoFlow, uma ferramenta de análise geoespacial integrada ao QGIS, destinada ao monitoramento ambiental e à avaliação da integridade ecológica de paisagens. O plugin foi concebido com arquitetura modular, permitindo aos usuários realizar, de forma independente ou integrada, etapas de pré-processamento, cálculo de índices espectrais, extração de variáveis topográficas e execução de análises estatísticas e espaciais. Entre as funcionalidades, destacam-se o cálculo de 18 índices espectrais, incluindo NDVI, NDWI, PSRI, CHM e um Índice de Integridade Ecológica (EII) configurável, além de modelos estatísticos como PCA, correlações, ANOVA, GeoDetector e Moran's I. A interface intuitiva do GeoFlow, baseada em PyQt5, permite a configuração dinâmica de parâmetros e a execução de rotinas complexas sem necessidade de codificação. A validação do plugin foi realizada em áreas de nascentes do Cerrado, demonstrando alto desempenho na geração de mapas temáticos, matrizes de correlação e relatórios automatizados. O GeoFlow se destaca como uma solução eficiente, acessível e de código aberto, capaz de integrar todo o fluxo de análise espacial em um único ambiente. A ferramenta oferece suporte decisivo para pesquisadores, gestores e tomadores de decisão na elaboração de diagnósticos ambientais, planejamento territorial e definição de ações de conservação.

Palavras-chaves: Python para geotecnologias; plugin geoespacial; Índice de Integridade Ecológica; processamento de imagens

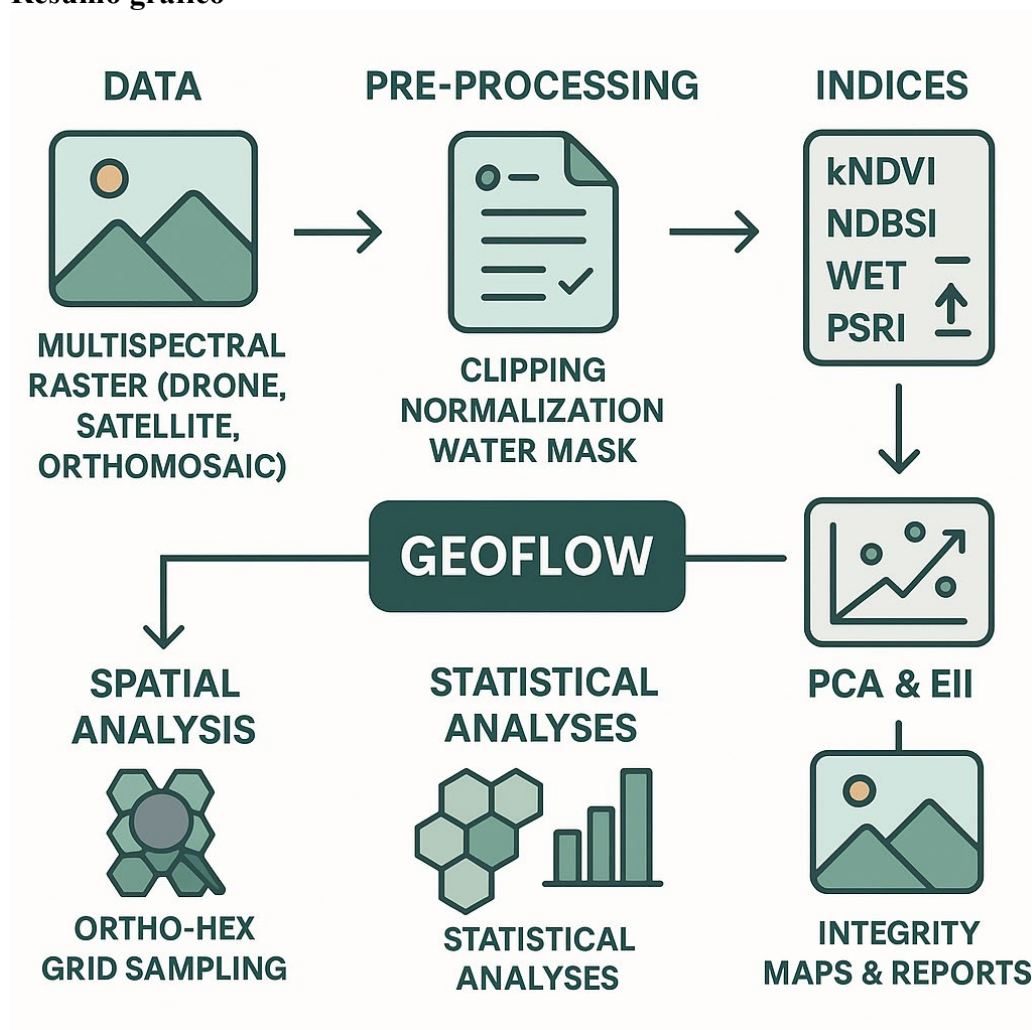
Abstract

Advances in geotechnologies have expanded the possibilities for environmental analysis, especially with the use of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing. This paper presents the development and validation of the GeoFlow plugin, a geospatial analysis tool integrated with QGIS, intended for environmental monitoring and assessment of the ecological integrity of landscapes. The plugin was designed with a modular architecture, allowing users to perform, independently or in an integrated manner, preprocessing steps, calculation of spectral indices, extraction of topographic variables and execution of statistical and spatial analyses. Among its functionalities, the calculation of 18 spectral indices, including NDVI, NDWI, PSRI, CHM and a

configurable Ecological Integrity Index (EII), in addition to statistical models such as PCA, correlations, ANOVA, GeoDetector and Moran's I, stand out. GeoFlow's intuitive interface, based on PyQt5, allows dynamic configuration of parameters and the execution of complex routines without the need for coding. The plugin was validated in areas of Cerrado headwaters, demonstrating high performance in generating thematic maps, correlation matrices and automated reports. GeoFlow stands out as an efficient, accessible and open-source solution, capable of integrating the entire spatial analysis flow in a single environment. The tool offers decisive support to researchers, managers and decision-makers in the preparation of environmental diagnoses, territorial planning and definition of conservation actions.

Keywords: Python for geotechnologies; geospatial plugin; Ecological Integrity Index; image processing

Resumo gráfico





Introdução

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) desempenham um papel fundamental na análise, visualização e gerenciamento de dados espaciais em diversas disciplinas (LÜ *et al.*, 2022; HUMBLE, 2023; HUANG, 2024). Essas ferramentas permitem integrar dados geográficos e alfanuméricos, facilitando a tomada de decisões informadas em campos como planejamento urbano, monitoramento ambiental e gestão de recursos naturais (LONGLEY *et al.*, 2015). A capacidade de combinar múltiplas camadas de informação espacial possibilita análises mais complexas, como a identificação de padrões espaciais e tendências temporais, destacando o potencial dos SIG como ferramentas indispensáveis em projetos científicos e de gestão territorial (LIU *et al.*, 2024; SALIMI *et al.*, 2024).

Uma das principais características dos SIG é a sua capacidade de processar dados em formatos raster e vetorial. Dados raster, como imagens de satélite, permitem análises baseadas em pixels, enquanto dados vetoriais, como limites de propriedades ou redes de drenagem, possibilitam análises mais precisas de elementos discretos. Essa flexibilidade operacional torna os SIG adequados para aplicações em diferentes escalas e resoluções espaciais, contribuindo para seu amplo uso em diversos setores (LONGLEY *et al.*, 2015; GOODCHILD, 2020; GIOFANDI *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2024).

A integração dos SIG com outras tecnologias, como drones e sensores remotos, tem ampliado significativamente suas capacidades. Dados obtidos por drones, por exemplo, podem ser processados diretamente em SIG para produzir ortomosaicos, modelos digitais de superfície e mapas temáticos. Esses avanços demonstram como os SIG continuam evoluindo para atender às demandas crescentes por análise de dados espaciais em tempo real e alta resolução (WALLACE *et al.*, 2018; DÍAZ-DELGADO *et al.*, 2019; BUDIHARTO *et al.*, 2021; QUAMAR *et al.*, 2023; ABDULLAH, *et al.*, 2024).

O processamento de imagens é uma etapa essencial em aplicações de SIG, especialmente em estudos que envolvem sensoriamento remoto. Imagens de satélite e de drones fornecem informações valiosas sobre a cobertura do solo, densidade da vegetação, umidade do solo e outros parâmetros ambientais. O processamento dessas imagens envolve técnicas como correção radiométrica, ortorretificação e classificação



supervisionada ou não supervisionada, que permitem a extração de informações precisas (RICHARDS, 2013; SHAKIL, 2023).

Avanços recentes no processamento de imagens incluem o uso de aprendizado de máquina para classificação e segmentação. Essas abordagens têm sido incorporadas em ferramentas SIG, permitindo análises mais rápidas e precisas. No entanto, a aplicação prática dessas técnicas ainda enfrenta desafios, como a necessidade de grandes conjuntos de dados de treinamento e a variabilidade nas condições atmosféricas que afetam a qualidade das imagens (ZHU *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2023; XI *et al.*, 2024).

O QGIS se destaca como um dos principais softwares SIG de código aberto, amplamente utilizado por pesquisadores, gestores e profissionais em todo o mundo. Sua popularidade se deve à flexibilidade e à robustez de suas ferramentas, que permitem realizar análises complexas de dados geoespaciais sem custos associados a licenças comerciais. Além disso, sua interface amigável e extensa documentação tornam o QGIS acessível a usuários com diferentes níveis de experiência (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020).

Uma característica fundamental do QGIS é sua capacidade de ser estendido por meio de plugins. Esses complementos adicionam funcionalidades específicas ao software, como ferramentas de análise avançada, cálculos automatizados e visualizações personalizadas. O uso de plugins tem permitido que o QGIS atenda às necessidades de nichos específicos, consolidando sua posição como uma ferramenta versátil para análise espacial (FONTOURA *et al.*, 2016).

O desenvolvimento de plugins no QGIS representa uma oportunidade única de personalizar o software para aplicações específicas. Utilizando linguagens como Python e C++, os usuários podem criar complementos que ampliam as funcionalidades do QGIS, desde cálculos automatizados até visualizações customizadas. Essa flexibilidade permite que pesquisadores e gestores implementem soluções que atendam diretamente às suas demandas analíticas (POIZOT; MÉAR, 2010; PODOLSKAIA, 2022; QGIS DOCUMENTATION, 2025).

Ferramentas como o Plugin Builder simplificam o processo de desenvolvimento, fornecendo uma estrutura inicial para os arquivos necessários. Além disso, o QGIS permite que os usuários exportem modelos de análise como scripts em Python, facilitando a replicação e a adaptação de fluxos de trabalho complexos. Essa integração de



funcionalidades coloca o QGIS em uma posição de destaque entre as plataformas SIG de código aberto (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023).

O plugin desenvolvido neste estudo foi criado para calcular o Índice de Integridade Ecológica (EII) e outros índices ecológicos, além de executar análises estatísticas (Capítulo 1). A sua implementação objetivou automatizar fluxos de trabalho tradicionalmente manuais, otimizando tempo e minimizando erros operacionais. O plugin também possibilita visualização dos resultados diretamente no ambiente do QGIS, por meio de barras de ferramentas e camadas temáticas, facilitando a interpretação. Nesse sentido, este trabalho objetiva apresentar uma ferramenta inédita que amplia a capacidade do QGIS na avaliação e monitoramento da integridade ecológica.

Material e Métodos

O desenvolvimento do plugin para QGIS, aqui denominado de “GeoFlow”, seguiu uma abordagem modular e flexível, permitindo ao usuário executar tarefas independentes de processamento de imagens (normalização, cálculo de índices espectrais, extração de variáveis topográficas) e análises estatísticas (PCA, correlações, ANOVA, GeoDetector, Moran’s I) sem dependências rígidas entre etapas. A implementação em Python, garantiu integração com o QGIS e alta eficiência computacional, apoiada em bibliotecas consolidadas como NumPy, SciPy e scikit-learn. Cada componente, desde a leitura de rasters até a geração de visualizações e relatórios em TXT/HTML, foi concebido para operar de forma autônoma, porém interoperável, assegurando reprodutibilidade e extensibilidade para futuras extensões.

Ambiente e Ferramentas

O plugin foi implementado em Python 3.13 e testado em QGIS 3.40 LTR, garantindo compatibilidade com versões atuais da plataforma. A IDE JetBrains PyCharm foi adotada devido às suas funcionalidades avançadas de depuração e suporte a projetos modulares. As principais dependências instaladas via pip incluem PyQt5 (para interface), GDAL/OGR (leitura e escrita de rasters e vetores), NumPy (cálculos matriciais), scikit-learn (PCA, normalização) e SciPy (estatísticas), além de libpysal/esda (análise de autocorrelação espacial).

Arquitetura Modular

A arquitetura modular foi inspirada em padrões de design de software para GIS (Figura 1) (SMITH; LAZZARATO; CARETTE, 2018). Cada componente do GeoFlow opera de modo autônomo, sem exigir etapas prévias.

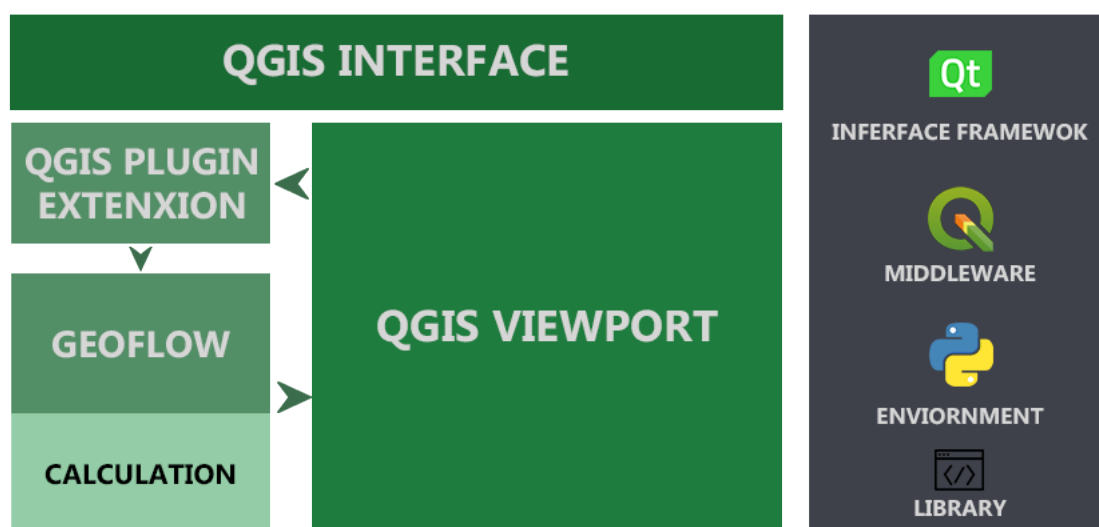


Figura 1 - Arquitetura Modular do plugin GeoFlow.

Os componentes do GeoFlow encontram-se descrito a seguir:

- Ingestão & Pré-processamento: leitura de arquivos GeoTIFF e shapefiles, tratamento de valores “NoData” e normalizações lineares de bandas (min-max) .
- Cálculo de Índices Espectrais: implementação de NDVI, SAVI, PSRI, GPP, EBBI e BSI modificado em operações vetoriais via NumPy, permitindo paralelização de blocos de dados.
- Extração de Variáveis Topográficas: derivação de slope, aspect e curvatura a partir de DEM usando algoritmos de Horn e Zevenbergen-Thorne, e cálculo de distância euclidiana a corpos d’água .
- Análises Estatísticas: PCA com padronização por StandardScaler, ANOVA paramétrica e correlação de Spearman via SciPy, gerando matrizes de correlação e visualizações de gráficos estatísticos.



- Análises Espaciais: GeoDetector para quantificar heterogeneidade estratificada (q-estatístico) e Moran's I global/local usando libpysal/esda.
- Saídas & Relatórios: exportação de rasters em GeoTIFF, relatórios textuais detalhados em .txt e dashboards interativos em HTML, com gráficos gerados por Matplotlib.
- Interface & Orquestração: conjunto de diálogos e menus implementados manualmente em PyQt5, permitindo ao usuário combinar livremente qualquer etapa sem permissão de dependências implícitas.

Fluxo de Processamento

O fluxo do processo encontra-se descrito a seguir: (Figura 2).

1. **Seleção de Camadas** - O usuário escolhe camadas raster ou vetoriais já carregadas no QGIS, listadas em caixas de seleção dinâmicas em diálogos construídos manualmente com PyQt5.
2. **Configuração de Parâmetros** - Parâmetros específicos (ex.: bandas para índices, limiar NDWI, classe de análise topográfica, nível de significância para ANOVA) são disponibilizados em campos de texto, combo-boxes e sliders, sem dependências entre módulos.
3. **Execução de Funções Independentes** - Cada função – normalização, cálculo de índice, extração de variável, análise estatística ou espacial – é invocada de forma autônoma. O usuário pode executar qualquer combinação de tarefas sem precisar processar etapas prévias.
4. **Visualização e Salvamento** - Resultados intermediários e finais são adicionados como camadas no QGIS e salvos em disco. Gráficos e relatórios gerados automaticamente auxiliam no diagnóstico rápido dos dados.

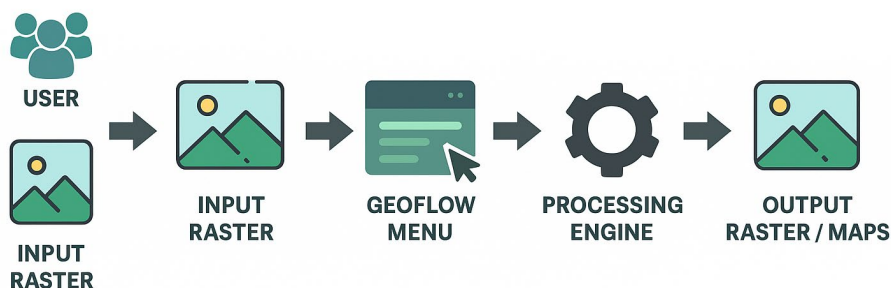


Figura 2 - fluxo do processo do plugin GeoFlow

Interface e Usabilidade

A GUI do “GeoFlow” prioriza clareza e responsividade. Os diálogos são organizados por abas temáticas (“Pré-processamento”, “Índices”, “Topografia”, “Estatística”, “Espacial”, “Saída”) permitindo selecionar, em qualquer ordem, as funcionalidades desejadas. Barras de progresso e logs em tempo real, exibidos em painel de texto, facilitam o monitoramento de longas operações.

Geração de Saídas e Relatórios

Todos os resultados são exportados como rasters GeoTIFF (compatíveis com qualquer software GIS), relatórios textuais em .txt (estatísticas de área e percentuais por classe) e dashboards HTML interativos (resumo de matrizes de correlação e resultados de GeoDetector), além de gráficos PNG produzidos com Matplotlib (WASKOM, 2021).

Resultados e Discussão

O plugin desenvolvido para o QGIS (Figura 3) demonstrou uma interface intuitiva e funcional, permitindo que usuários de diferentes níveis de experiência realizem análises geoespaciais avançadas. A interface principal do plugin foi projetada para simplificar os

fluxos de trabalho, com menus separados para a normalização de camadas, cálculo de índices e análises estatísticas. O design foi estruturado com base nos requisitos da comunidade de geotecnologias, priorizando funcionalidade e eficiência.

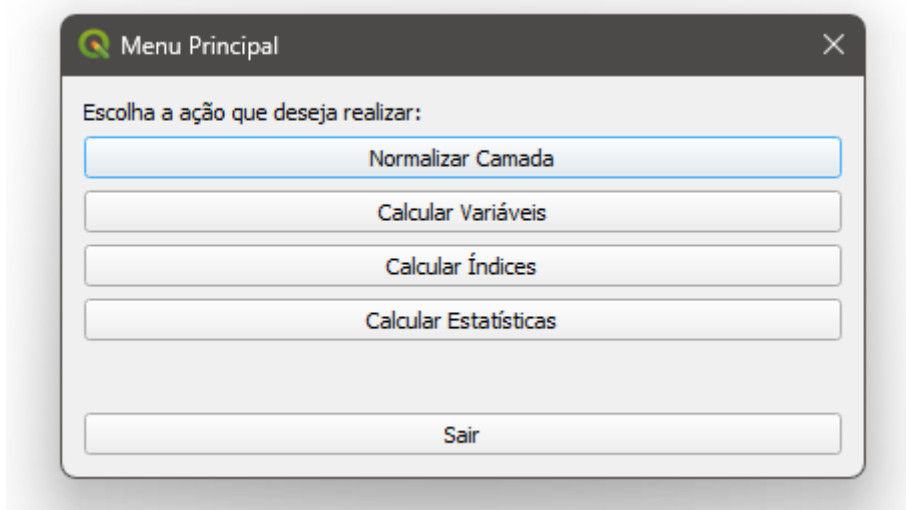


Figura 3 - Menu Principal do plugin GeoFlow.

A interface inicial do plugin, representada pela Figura 3, oferece três opções principais: "Normalizar Camada", "Calcular Variáveis", "Calcular Índices" e "Calcular Estatísticas". Essa divisão clara permite aos usuários acessar diretamente as ferramentas de que precisam, reduzindo a complexidade do processo e aumentando a produtividade. Durante a execução do plugin, os testes demonstraram que a interface reduz significativamente o tempo necessário para configurar parâmetros iniciais, como a identificação automática das bandas espectrais exibida na Figura 4.

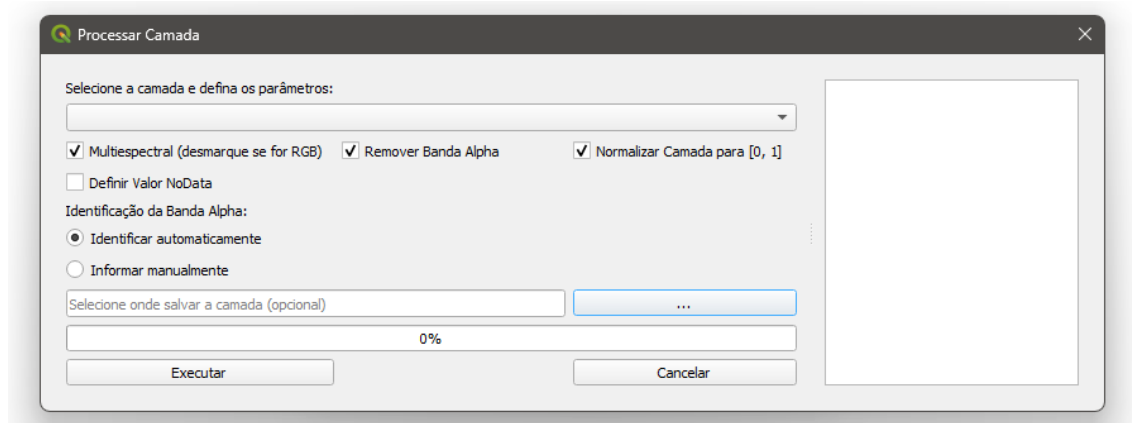


Figura 4 - Menu responsável pelo processamento do Raster, como remover banda alpha, definir noData e etc.



Esse ganho de eficiência é consistente com achados de outras ferramentas: o QGIS-Landsat Indices Plugin (Q-LIP) foi “concebido para reduzir o tempo de processamento e atender usuários sem forte conhecimento em processamento de imagens” (SEBBAH *et al.*, 2021). De forma análoga, o QSVI – plugin dedicado a índices Sentinel – mostrou-se, em média, 2,1 min mais rápido do que aplicações GIS convencionais ao processar conjuntos de dados de 1 GB. No próprio ecossistema QGIS, a versão 8.0 do Semi-Automatic Classification Plugin eliminou a necessidade de carregar previamente as bandas no projeto, permitindo escolhê-las diretamente a partir dos arquivos e encurtando ainda mais essa etapa de parametrização.

A etapa de normalização min–max oferecida pelo plugin (Figura 3) padroniza todos os valores digitais para o intervalo 0 – 1, evitando que diferenças na profundidade radiométrica (8, 12 ou 16 bits) provoquem vieses nos índices subsequentes. Ensaaios com dados PlanetScope fundidos a Sentinel-2 mostram que a simples normalização reduziu o erro espectral de reconstrução em modelos de deep learning destinados a harmonizar sensores multi-resolução (LATTE; LEJEUNE, 2020). Do ponto de vista da qualidade analítica, um experimento de segmentação de nuvens revelou que imagens normalizadas em 16 bits apresentam apenas 1–2 % de vantagem sobre as de 8 bits; sem normalização, a lacuna ultrapassa 10 %, evidenciando o papel crítico da escala comum (LIAO *et al.*, 2023).

A presença de um campo dedicado ao NoData potencializa essa padronização. Ao mascarar valores ausentes antes do cálculo de mínimo / máximo, elimina-se a influência de pixels nulos — comuns em bordas de cena, nuvens espessas ou falhas do sensor. Um estudo recente de composição multitemporal demonstrou que a atribuição explícita de NoData, seguida de normalização, elevou em 4–6 pontos percentuais a acurácia de classificadores SVM e U-Net ao remover nuvens persistentes (ADUGNA *et al.*, 2024).

Por fim, vale destacar que outros utilitários consolidados do ecossistema QGIS, como o Q-LIP, também adotam a normalização banda a banda como prática padrão antes de calcular mais de 40 índices ambientais, reforçando o alinhamento do presente plugin às melhores práticas de pré-processamento (SEBBAH *et al.*, 2021).

O menu de índices, apresentado na Figura 5, incluem opções para calcular uma ampla gama de índices, como NDVI, NDRE, CHM, PSRI e o EII. Cada índice possui configurações específicas que podem ser ajustadas para atender às particularidades de diferentes tipos de análise.

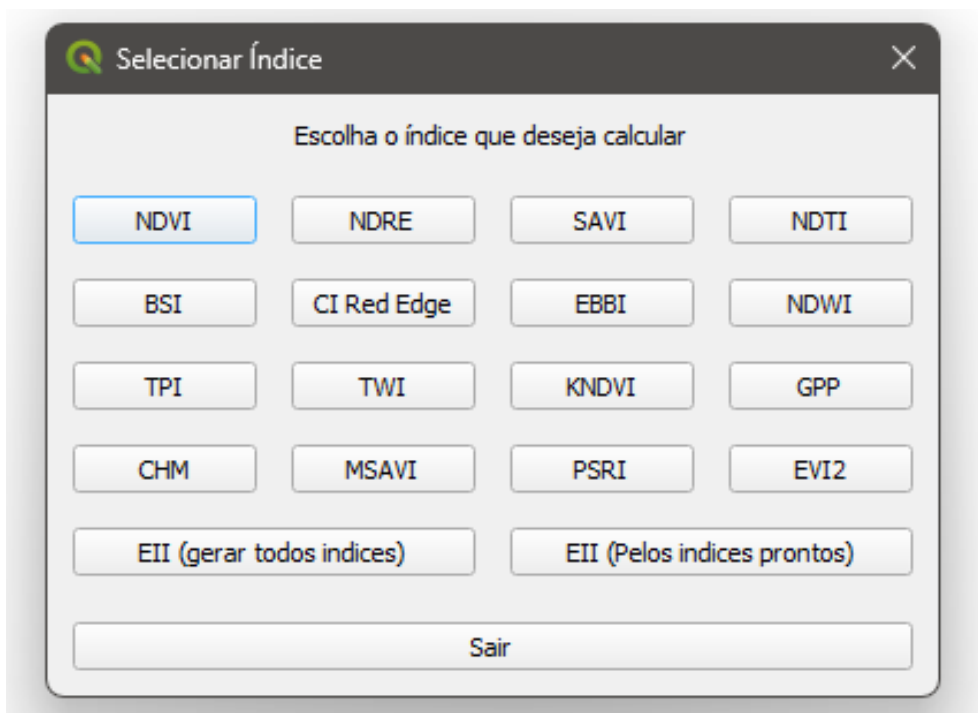


Figura 5 - Menu para selecionar qual índice calcular no plugin GeoFlow.

Por exemplo, o cálculo do NDVI permite a remoção automática de áreas de água e a normalização de valores entre 0 e 1 (Figura 6). Essa funcionalidade é especialmente relevante em estudos de integridade ecológica, onde áreas com cobertura de água podem distorcer os resultados se não forem adequadamente tratadas.

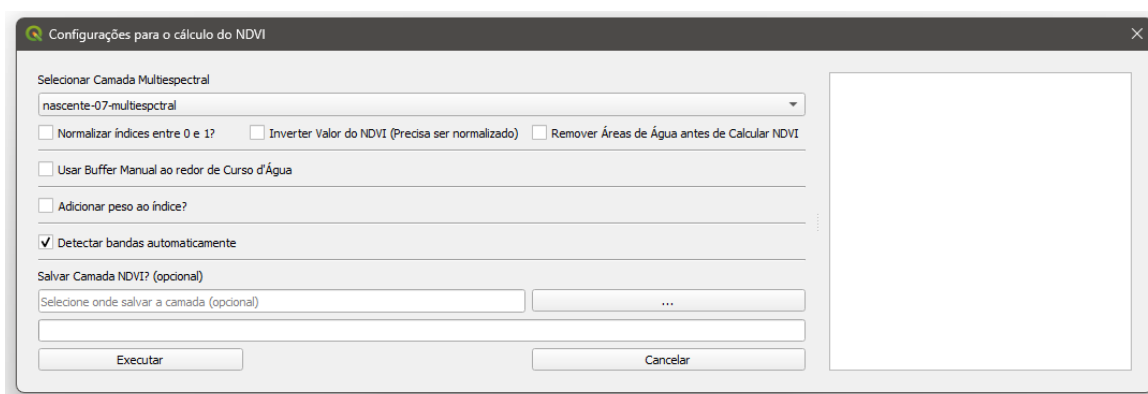


Figura 6 - Menu para calcular índice de NDVI no plugin GeoFlow.

A remoção automática dos pixels de água no cálculo do NDVI impede que a refletância muito baixa no infravermelho próximo destes alvos arraste o índice para valores próximos de zero, encobrindo variações reais da vegetação em zonas úmidas e nascentes, áreas-chave para avaliar integridade ecológica. Estudos realizado por Cortese *et al.* (2023) no delta do Mississippi demonstrou que suprimir corpos d'água antes de correlacionar o NDVI a gradientes de salinidade foi decisivo para isolar o aporte orgânico do solo.

De modo semelhante, ao combinar NDVI e NDWI para excluir pixels alagados, Ashok *et al.* (2021) elevaram a acurácia global de um mapeamento Landsat de um sítio Ramsar de 88 % para 95 %. Essa estratégia operacional já havia sido antecipada por McFeeters (1996), que propôs o NDWI justamente para evitar a “contaminação espectral” de índices de vegetação em paisagens aquáticas.

O menu dedicado ao cálculo do índice EII foi projetado para ser altamente personalizável, como mostrado na Figura 7. O EII pode ser configurado com diferentes combinações de índices de entrada, como NDVI, CHM e PSRI, dependendo das necessidades do estudo. Essa flexibilidade é essencial para adaptar o índice às características específicas das áreas de estudo e aos objetivos da análise.

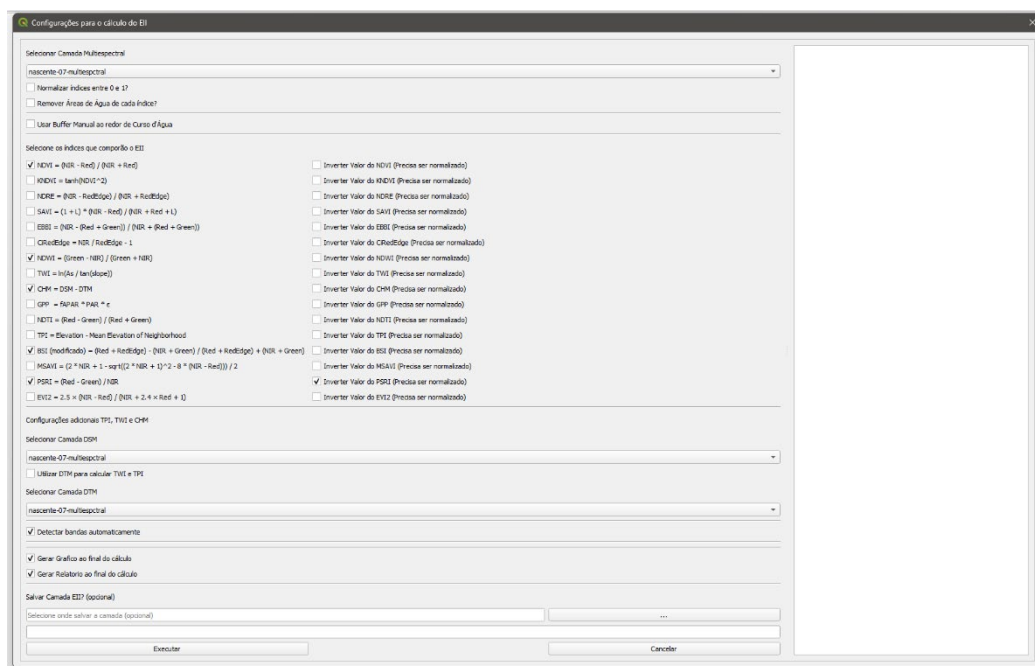


Figura 7- Calculadora do índice de integridade ecológica – EII no plugin GeoFlow.

No que diz respeito às análises estatísticas, o menu correspondente (Figura 8 e 9) reúne um conjunto de ferramentas que permitem explorar desde relações simples até padrões multivariados mais complexos. Os testes de correlação de Pearson e Spearman podem ser executados individualmente ou em lote, gerando automaticamente tabelas de coeficientes, valores-p e um mapa de calor que destaca dependências fortes ou inesperadas entre os índices. O PCA incorpora uma interface que exibe de imediato a variância explicada por cada componente, além de um biplot para interpretar a contribuição de cada variável, recurso útil para reduzir dimensionalidade antes de ajustar o EII ou de alimentar modelos de aprendizado de máquina.

Já a regressão múltipla admite seleção hierárquica de variáveis, cálculo dos diagnósticos de multicolinearidade (VIF) e exportação do relatório em formato .txt, o que facilita a posterior integração em fluxos de QGIS ou R. Em conjunto, essas opções transformam o plugin numa central de análise exploratória, reduzindo a necessidade de alternar entre softwares e assegurando que as decisões sobre ponderação e combinação de índices se baseiem em evidência estatística sólida.

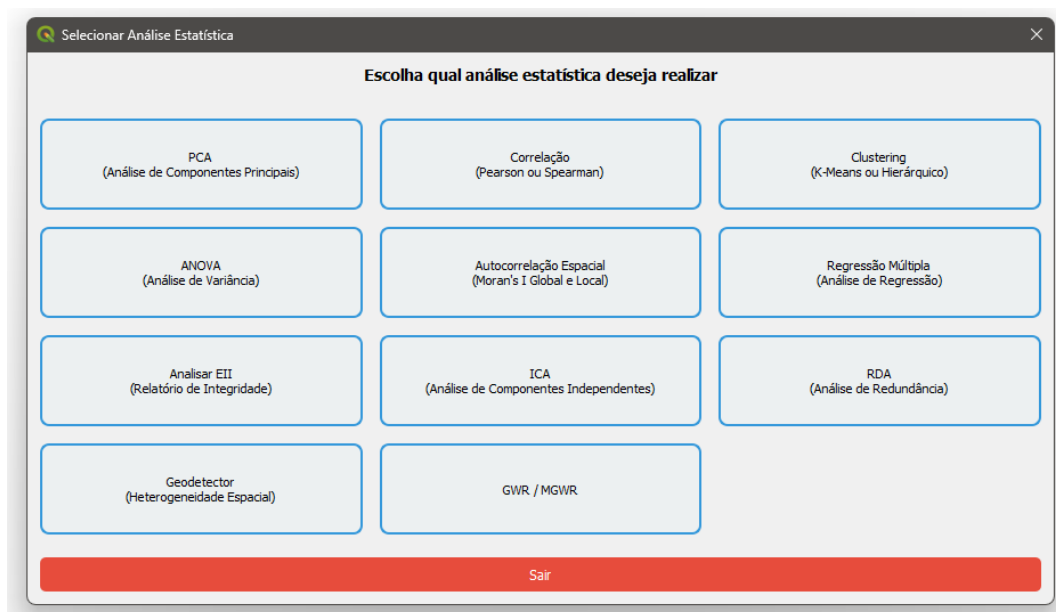


Figura 8 - Menu de seleção para escolher qual estatística deve ser calculada no plugin GeoFlow.

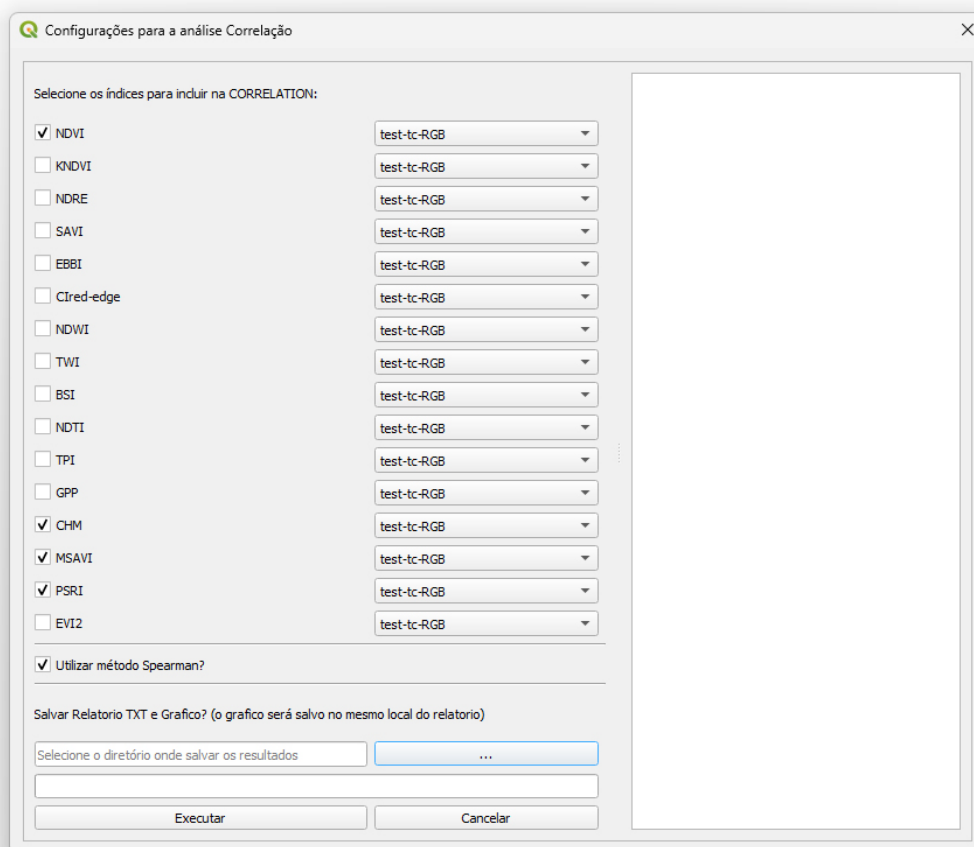


Figura 9 - Calculadora de estatísticas de Correlação de Pearson e Spearman no plugin GeoFlow.



Além dos módulos já descritos, o menu inclui ferramentas que enriquecem a interpretação espacial dos índices. O Clustering (K-means ou hierárquico) permite agrupar pixels com assinaturas espectrais semelhantes, útil para delinear zonas de manejo ou classes temáticas antes de rodar modelos supervisionados. A Autocorrelação Espacial calcula Moran's I global e local, evidenciando focos de alta ou baixa integridade que podem orientar ações prioritárias de restauração. O Geodetector mensura heterogeneidade espacial e quantifica a influência de fatores ambientais sobre o EII, enquanto o par GWR/MGWR ajusta regressões localizadas, revelando variações de relações estatísticas ao longo da paisagem. Para análises multivariadas avançadas, o menu oferece ICA, que separa componentes independentes e ajuda a isolar ruídos espectrais e RDA, útil para avaliar redundância entre conjuntos de variáveis e evitar sobreposição de informação.

Por fim, o item “Analisar EII” gera um relatório consolidado com histogramas, estatísticas-chave e mapas-classe, integrando todos os resultados em um documento pronto para inclusão no capítulo. Esses recursos adicionais transformam o plugin em um hub completo de análise espacial, eliminando a necessidade de scripts externos e garantindo que cada etapa, do pré-processamento à modelagem, permaneça dentro do mesmo fluxo de trabalho.

As análises realizadas com o plugin destacaram a importância de interfaces acessíveis e personalizáveis no QGIS, especialmente em contextos acadêmicos e de gestão ambiental. O plugin não só melhorou a eficiência do processamento de dados, mas também proporcionou novas perspectivas para a análise de integridade ecológica, consolidando-se como uma ferramenta essencial para estudos baseados em geotecnologias como já citado por Fontoura *et al.*, (2016) e Santos *et al.* (2021).

O submenu “Calcular Variáveis” (Figura 10) gera camadas derivadas do MDE e da hidrografia que enriquecem os modelos espaciais. A Inclinação (Slope) quantifica o gradiente do terreno e costuma ser um dos preditores mais sensíveis de erosão e biomassa, enquanto a Distância a Rios captura o gradiente de umidade e deposição aluvial. A Curvatura (perfil e de plano) distingue superfícies côncavas, tendentes a acumular água e nutrientes, das convexas, úteis para explicar variações locais de NDVI ou EII. Por fim, o Aspect identifica a orientação solar, controlando diferenças de insolação que influenciam temperatura do solo e vigor vegetal. Essas variáveis podem ser inseridas diretamente em regressões GWR/MGWR ou no Geodetector, permitindo quantificar a contribuição

espacial de fatores topográficos e hidrológicos sobre os índices espectrais—sem sair do fluxo do plugin.

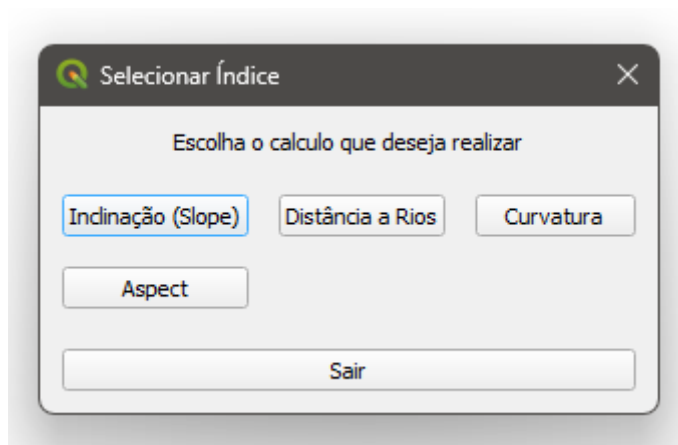


Figura 10 - Menu para o cálculo de variáveis independentes no plugin GeoFlow.

Validação do plugin GeoFlow

Após a finalização do desenvolvimento do plugin, realizou-se a validação de sua implementação utilizando os mapas gerados para as nascentes estudadas. Como resultado, a Figura 11 e demais mapas de EII ilustram as classificações de integridade ecológica das áreas processadas. Estes resultados foram obtidos diretamente da interface do plugin no QGIS, demonstrando sua funcionalidade prática.

As correlações entre os índices espectrais, essenciais para validar o modelo utilizado no cálculo do EII, estão apresentadas na Figuras 12. Essas análises fornecem suporte estatístico para as relações observadas nos mapas de integridade ecológica, evidenciando a consistência do índice e sua capacidade de integração com diferentes variáveis ambientais.

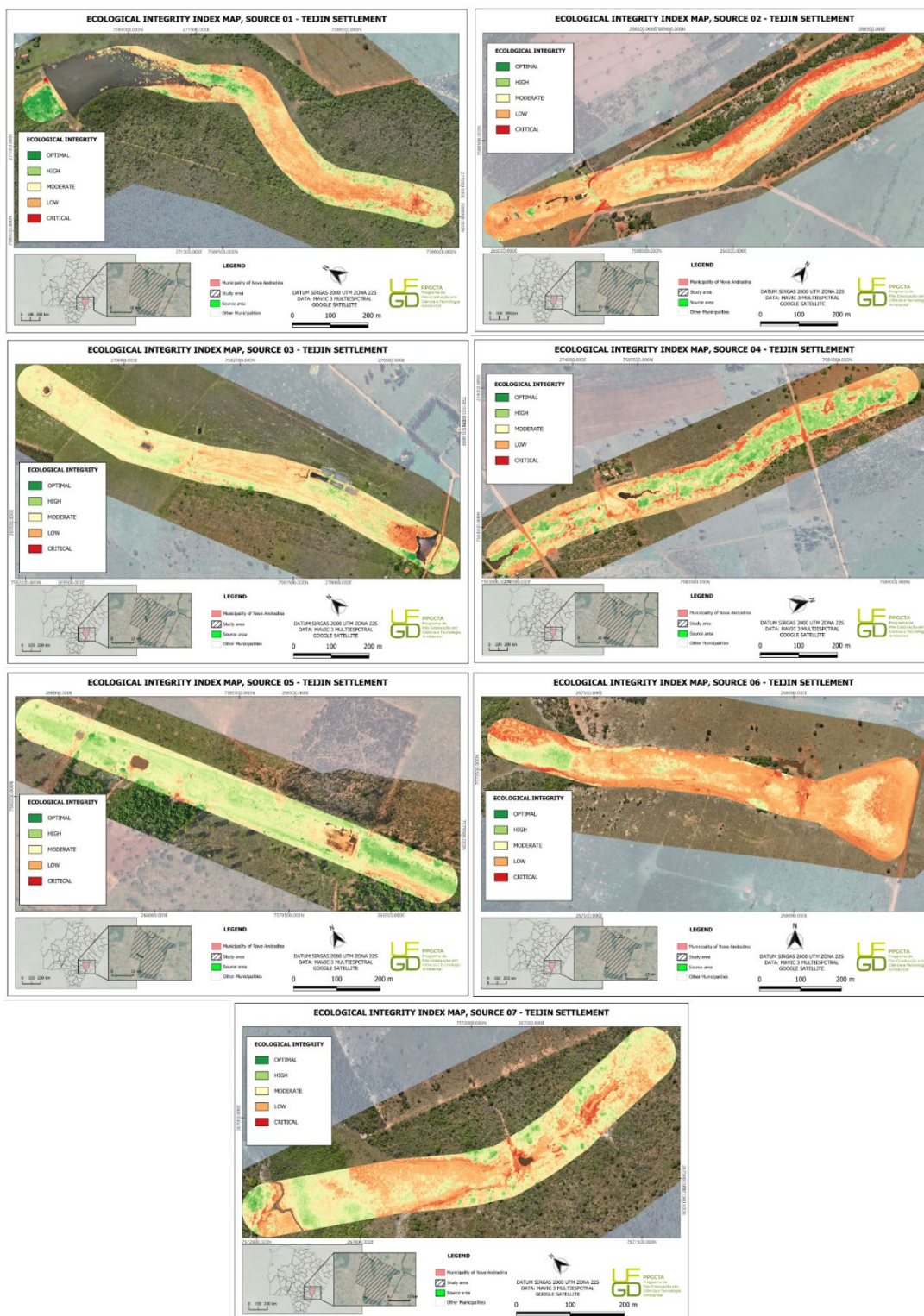


Figura 11 - Índice de integridade ecológica, calculados a partir do plugin GeoFlow.

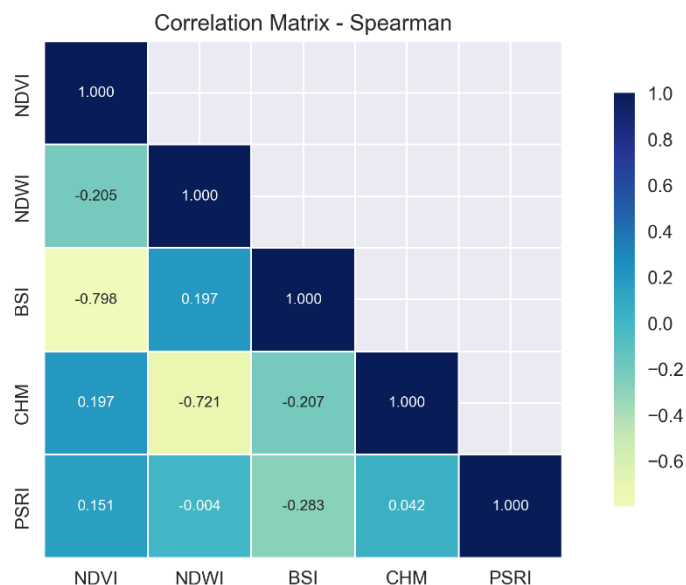


Figura 12 - Correlação de Spearman calculadas através do plugin GeoFlow.

O processo validado confirmou que o plugin desenvolvido é uma ferramenta funcional e prática para o cálculo do EII, além de suportar análises adicionais como correlação e estatísticas descritivas. Assim, os mapas e análises produzidos permitem uma avaliação confiável da integridade ecológica e podem ser utilizados como base para tomadas de decisão em manejo ambiental e planejamento territorial.

Conclusão

O desenvolvimento do plugin para QGIS constitui uma contribuição significativa à análise geoespacial voltada à integridade ecológica e ao monitoramento ambiental. A interface intuitiva integrou, em um único ambiente, cálculos de 18 índices multiespectrais, geração de variáveis topográficas derivadas do modelo digital de superfície e um painel de 11 rotinas estatísticas, eliminando a dependência de scripts externos e reduzindo substancialmente o tempo de configuração dos fluxos de trabalho.

O menu configurável para o Índice de Integridade Ecológica (EII) provou ser flexível e robusto, permitindo ajustar pesos e selecionar apenas as métricas pertinentes a cada área de estudo, em concordância com recomendações de avaliações multiescalares de integridade.



A validação com dados de nascentes do Cerrado demonstrou que o plugin GeoFlow processa grandes volumes de informação com mínimo esforço manual, possibilitando executar análises de correlação, regressão múltipla e PCA em poucos cliques. Essas rotinas revelaram relações consistentes entre métricas como NDVI, NDWI e CHM, confirmando sua relevância para estudos de vegetação, umidade e estrutura vertical em ecossistemas savânicos. A geração automática de mapas temáticos, matrizes de correlação e relatórios estatísticos facilita a comunicação dos resultados para pesquisadores, gestores e tomadores de decisão, reforçando a utilidade prática da ferramenta.

Além de atender a estudos em larga escala, o plugin GeoFlow mostrou potencial de aplicação em contextos regionais e locais, graças ao seu modelo aberto e extensível. Ao adotar princípios de ciência aberta e código livre, ele promove transparência, reprodutibilidade e colaboração, aspectos ressaltados como fundamentais para a evolução das geotecnologias ambientais.

Futuras versões poderão incorporar classificadores baseados em deep learning, relatórios de acurácia automatizados e integração com painéis web, ampliando ainda mais seu alcance e impacto na preservação ambiental e no planejamento sustentável.

Referências

ABDULLAH, Meshal M.; AL-ALI, Zahraa M.; BLANTON, Austin; CHARABI, Yassine; ABULIBDEH, Ammar; AL-AWADHI, Talal; SRINIVASAN, Shruthi; FADDA, Eyad; MOHAN, Midhun. UAVs for improving seasonal vegetation assessment in arid environments. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, art. 1366712, 2024. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1366712.

ADUGNA, T.; XU, W.; FAN, J.; LUO, X.; JIA, H. Multi-Temporal Pixel-Based Compositing for Cloud Removal Based on Cloud Masks Developed Using Classification Techniques. **Remote Sensing**, v. 16, n. 19, p. 3665, 2024. DOI 10.3390/rs16193665.

ASHOK, A., RANI, H. P., & JAYAKUMAR, K. V. Monitoring of Dynamic Wetland Changes Using NDVI and NDWI Based Landsat Imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 23, p. 100547, 2021. DOI 10.1016/j.rsase.2021.100547.

BUDIHARTO, W.; IRWANSYAH, E.; SUROSO, J. S.; CHOWANDA, A.; NGARIANTO, H.; GUNAWAN, A. A. S. Mapping and 3D modelling using quadrotor



drone and GIS software. **Journal of Big Data**, v. 8, art. 48, 2021. DOI: 10.1186/s40537-021-00436-8.

CORTESE, L., JENSEN, D. J., SIMARD, M., & FAGHERAZZI, S. Using Normalized Difference Vegetation Index to Infer Wetlands Salinity and Organic Contribution to Vertical Accretion Rates. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 128, n. 11, e2023JG007631, 2023. DOI: 10.1029/2023JG007631.

COSTA, L. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, M. E.; MUNHOZ, C. B. R.; COSTA, J. V. S.; RUFINO ALVES JÚNIOR, L.; DE MELLO, T. R. B.; DA CUNHA BUSTAMANTE, M. M. Woody Plant Encroachment in a Seasonal Tropical Savanna: Lessons about Classifiers and Accuracy from UAV Images. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, art. 2342, 2023. DOI: 10.3390/rs15092342.

DÍAZ-DELGADO, R.; MÜCHER, S. Editorial of Special Issue “Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring”. **Drones**, v. 3, n. 2, art. 47, 2019. DOI: 10.3390/drones3020047.

FONTOURA, J. C., MENDES, P. R. S., OLIVEIRA, A. B., & MENEZES, M. C. Desenvolvimento de ferramentas computacionais para o QGIS: aplicações em geoprocessamento. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n.3, p.459-472, 2016. DOI:10.14393/rbcv683-2016-591.

GIOFANDI, E. A. et al. The Comparison of Vector and Raster Data for the Calculation of Landscape Environment Using a Geographic Information System Approach. **IT Journal Research and Development**, v. 7, n. 2, p. 209–219, 2023. DOI: 10.25299/itjrd.2023.10878.

GOODCHILD, M. F. How well do we really know the world? Uncertainty in GIScience. **Journal of Spatial Information Science**, v. 20, p. 97–102, 2020. DOI: 10.5311/JOSIS.2020.20.664

HUANG, Y. Bíblia análise iométrica de aplicações GIS em estudos patrimoniais baseados em Web of Science de 1994 a 2023. **Ciência do Patrimônio**, v. 12, 2023. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01163-y>.

HUANG, Y. S. et al. A Raster–Vector Integration Framework for Landscape Indices Calculation with VARLI software. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 13, n. 7, art. 242, 2024. DOI: 10.3390/ijgi13070242.

HUMBLE, N. Caminhos futuros para SIG na educação básica: uma revisão de possibilidades e restrições. **Revista Europeia de Geografia**, v. 14, n. 3, Artigo 3. 2023. <https://doi.org/10.48088/ejg.n.hum.14.3.079.088>.

LATTE, N.; LEJEUNE, P. PlanetScope Radiometric Normalization and Sentinel-2 Super-Resolution (2.5 m): A Straightforward Spectral-Spatial Fusion of Multi-Satellite Multi-Sensor Images Using Residual Convolutional Neural Networks. **Remote Sensing**, v. 12, n. 15, 2366, 2020. DOI 10.3390/rs12152366.



LIAO, L.; LIU, W.; LIU, S. Effect of Bit Depth on Cloud Segmentation of Remote-Sensing Images. **Remote Sensing**, v. 15, n. 10, 2548, 2023. DOI 10.3390/rs15102548.

LIU, B., WU, C., XU, W., SHEN, Y., E TANG, F. merging trends in GIS application on cultural heritage conservation: a review. **Heritage Science**, v. 2, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01265-7>.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems & Science**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2015. DOI: 10.1002/9781119959998.

LÜ, G.; CHEN, M. Geographic information science in the era of geospatial big data: A cyberspace perspective. **Innovation in Geographic Information Science**, v. 108, p. 1513–1520, 2022. DOI: 10.1093.

MCFEETERS, S. K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996. DOI: 10.1080/01431169608948714.

PODOLSKAIA, E. S. Review of Open Source QGIS Forestry Plugins. **Forest Science Issues**, v. 5, n. 1, art. 98, 2022. DOI: 10.31509/2658-607x-202251-98.

POIZOT, E.; MÉAR, Y. Extending QGIS functionalities with user-developed plugins. **Open Source Geospatial Journal**, v. 4, p. 45-50, 2010.

QGIS Development Team. **QGIS User Manual**. Versão 3.20. 2020.

QGIS Development Team. (2023). **QGIS Documentation: Plugin Builder — Developing Python Plugins for QGIS**. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/pluginbuilder/>

QGIS Documentation. **Developing Python Plugins**. In: QGIS Developer Cookbook, versão 3.40, 2025.

QUAMAR, M. M.; AL-RAMADAN, B.; KHAN, K.; SHAFIULLAH, M.; EL FERIK, S. Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review. **Remote Sensing**, v. 15, art. 5039, 2023. DOI: 10.3390/rs15205039

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Springer, 2013.

SALIMI, H.; BAHRAMJERDI, S. F. N.; TOOTOONCHI, R.. The Role of Geographic Information Systems (GIS) in Participatory Conservation of Heritage Areas. **European Journal of Geography**, v. 16, n. 1, p. s1–s11, 2025. DOI: 0.48088/ejg.si.spat.hum.h.sal.1.11.

SANTOS, F. P., et al. Desenvolvimento de um plugin no QGIS para análise de dados espaciais. **Boletim de Geografia**, v. 39, n. 1, p.12-25, 2021.



SEBBAH, B.; ALAOUI, O. Y.; WAHBI, M.; MAATOUK, M.; NIZAR B. A. QGIS-Landsat Indices plugin (Q-LIP): Tool for environmental indices computing using Landsat data. **Environmental Modelling & Software**. p.137, 2021. 104972. 10.1016/j.envsoft.2021.104972.

SHAKIL, H. I. Radiometric Correction of Remote Sensing Images. **ResearchGate Presentation**, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.14013.84960.

SMITH, W. S.; LAZZARATO, A.; CARETTE, J.. State of the Practice for GIS Software. 2018. **Repositório: arXiv**, **arXiv:1802.03422 [cs.SE]**. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1802.03422>. Acesso em: 21 jun. 2025.

WALLACE, L. et al. Integrating Drone and Satellite Imagery for Habitat Classification: UAV imagery supports SVM classification of WorldView-3 and RapidEye for estuarine wetlands. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, art. 1257, 2018. DOI: 10.3390/rs10081257.

WASKOM, M. Seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, p. 3021, 2021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>.

XI, L.; ZHANG, Y.; WANG, J. Advances and Prospects in Machine Learning for Remote Sensing: A Comprehensive Survey. **Neural Computing and Applications**, 2024. DOI: 10.1007/s00521-024-10165-7.

ZHU, X. X.; TUIA, D.; MOU, L.; XIA, G.; ZHANG, L.; XU, F.; FRAUNDORFER, F. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 5, n. 4, p. 6–36, 2017. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307.



CONCLUSÃO GERAL

Esta tese contribui significativamente para o avanço das metodologias de avaliação ambiental no Cerrado, ao propor, desenvolver e validar um Índice de Integridade Ecológica (EII) específico para áreas de nascentes, aliado à construção de uma ferramenta computacional aplicada, na forma de um plugin geoespacial para QGIS.

A abordagem integrativa, baseada em dados de drones multiespectrais e análises espaciais avançadas, permitiu uma avaliação precisa e replicável das condições ecológicas de áreas sensíveis para outros ecossistemas.

No Capítulo 1, a construção do EII, fundamentada na combinação de índices espectrais (NDVI, NDWI, PSRI, CHM e BSI) sintetizados por Análise de Componentes Principais (PCA), demonstrou alta capacidade de discriminar diferentes níveis de integridade ecológica nas áreas de nascentes do Cerrado.

As análises de dependência espacial, com apoio de GeoDetector e Moran's I, indicaram que os fatores mais determinantes para explicar a variabilidade ecológica foram o NDVI e o NDWI, representando diretamente o vigor vegetativo e a disponibilidade hídrica. Os resultados revelaram um quadro crítico de degradação: nascentes como N01, N02 e N06 apresentaram índices inferiores a 0,40, refletindo condições de baixa a crítica integridade. Por outro lado, a nascente N05 foi classificada com integridade moderada (0,504), embora com sinais de alerta, enquanto a nascente N03 apresentou condição intermediária, porém vulnerável. A análise espacial revelou formação de clusters de baixa integridade, evidenciando processos de degradação espacialmente estruturados.

O Capítulo 2 complementou e operacionalizou os avanços metodológicos com o desenvolvimento do plugin GeoFlow, uma ferramenta geoespacial desenvolvida para o ambiente QGIS, capaz de integrar todo o fluxo de análise, desde o pré-processamento das imagens, cálculo dos índices, modelagem estatística (PCA, correlações, GeoDetector, Moran's I) até a geração automatizada de mapas e relatórios. A aplicação do plugin nas mesmas áreas de nascentes não só confirmou os padrões espaciais identificados no Capítulo 1, como também demonstrou eficiência técnica, reduzindo o tempo de processamento, otimizando a análise e ampliando o acesso às metodologias propostas, mesmo para usuários sem conhecimento avançado em programação.



De forma integrada, os dois capítulos convergem para um diagnóstico consistente: as nascentes analisadas encontram-se, em sua maioria, em condição de vulnerabilidade ambiental severa, resultado direto da fragmentação da vegetação nativa, avanço da agricultura e processos erosivos.

O EII demonstrou ser uma métrica robusta e sensível para monitoramento de pequenas unidades hidrográficas, enquanto o plugin GeoFlow representa uma solução inovadora e eficiente, capaz de democratizar o uso de geotecnologias no monitoramento ambiental.

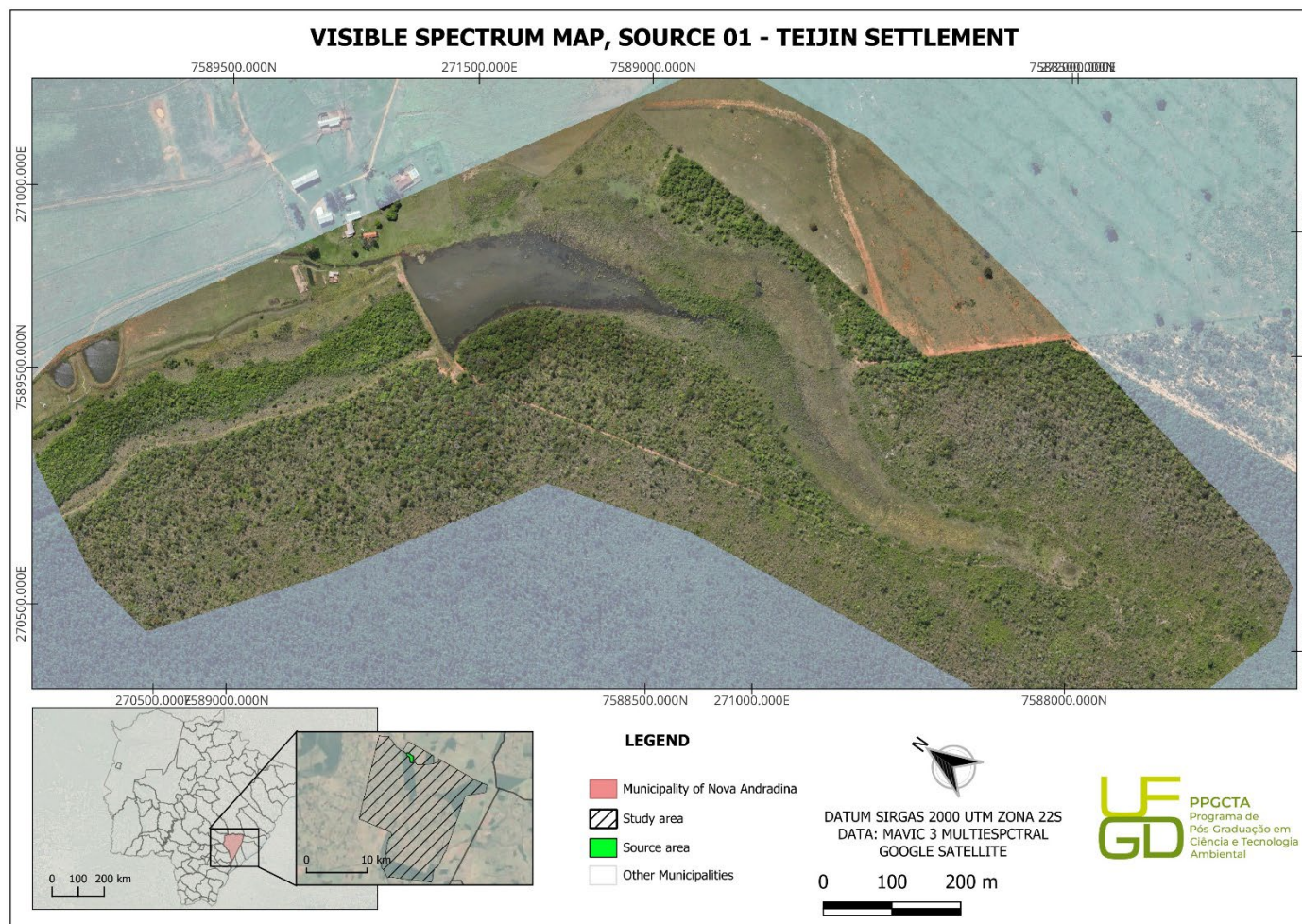
Portanto, esta tese entrega uma contribuição concreta e aplicável tanto ao meio científico quanto à gestão pública e privada, fornecendo bases técnicas para diagnóstico, planejamento ambiental, formulação de políticas de conservação e ações de restauração ecológica.

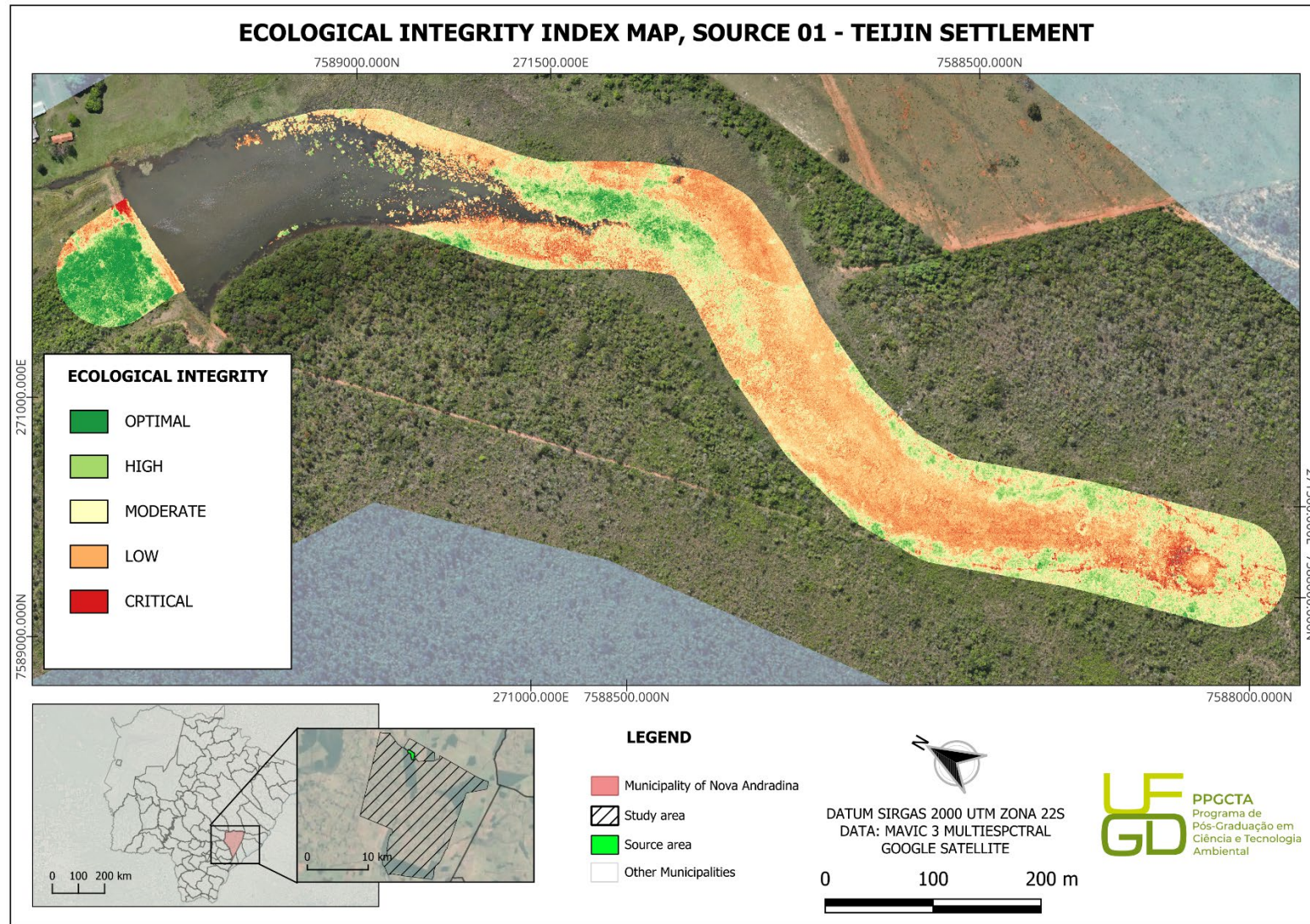
Além disso, reafirma o papel das geotecnologias de código aberto, como o QGIS, como plataformas viáveis, potentes e alinhadas aos princípios da ciência aberta, reprodutibilidade e sustentabilidade ambiental.

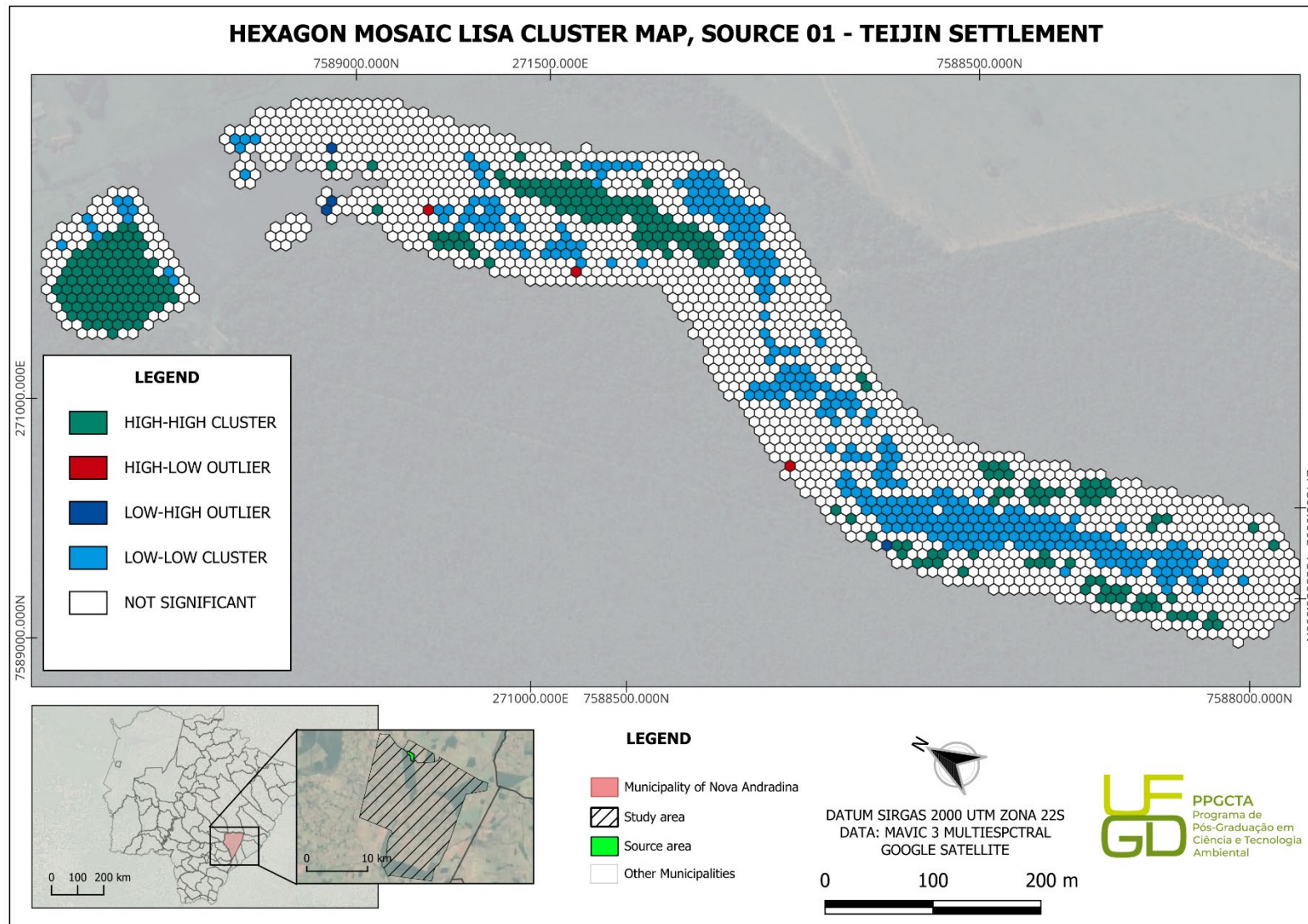
O avanço desta pesquisa poderá contemplar, em etapas futuras, a adaptação do EII para outras escalas (microbacias, bacias hidrográficas maiores), integração com sensores orbitais, modelos preditivos baseados em inteligência artificial e a ampliação do plugin para novos contextos ecológicos, consolidando-o como uma ferramenta estratégica no monitoramento e gestão ambiental dos biomas brasileiros e de outros ecossistemas tropicais.

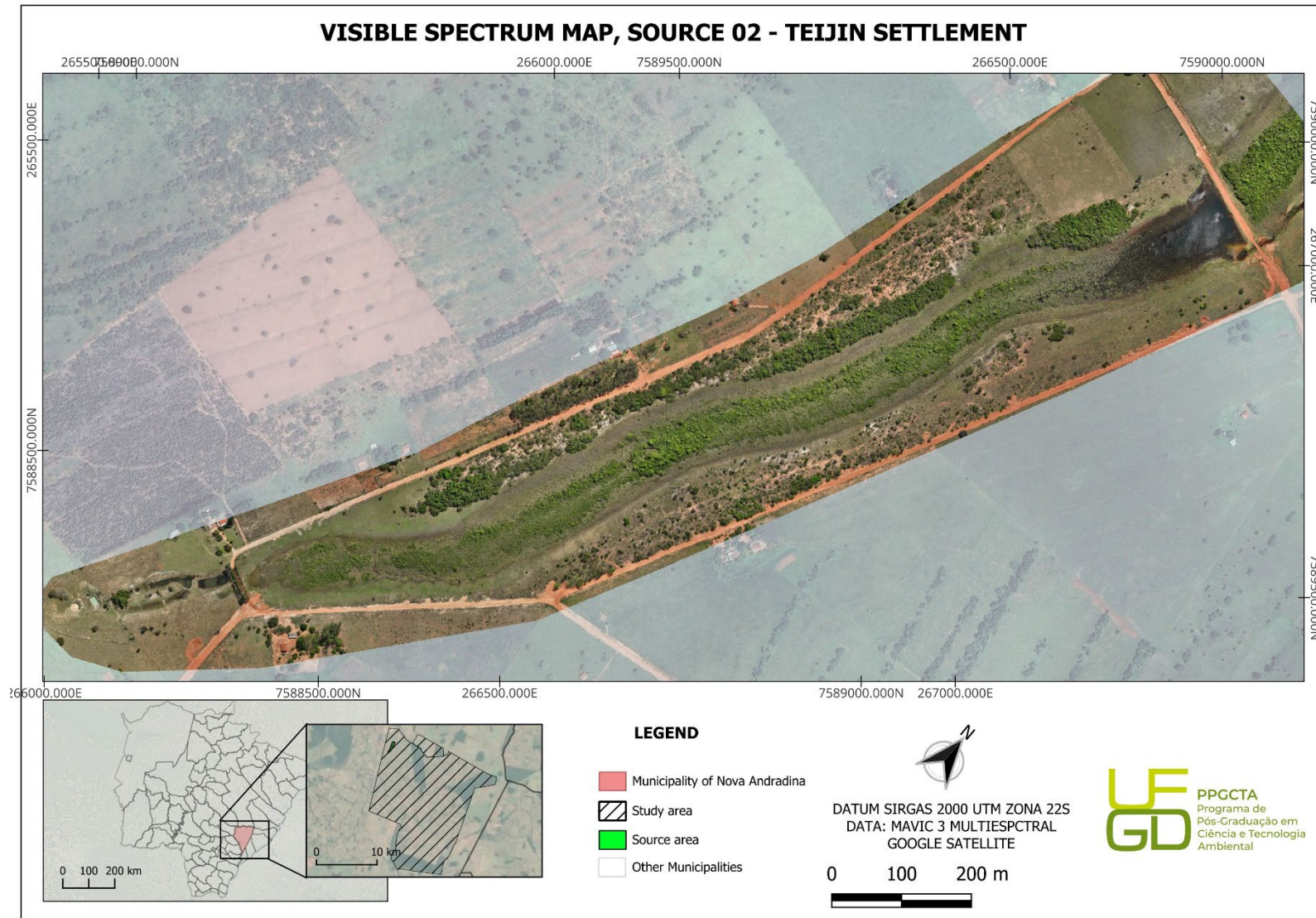


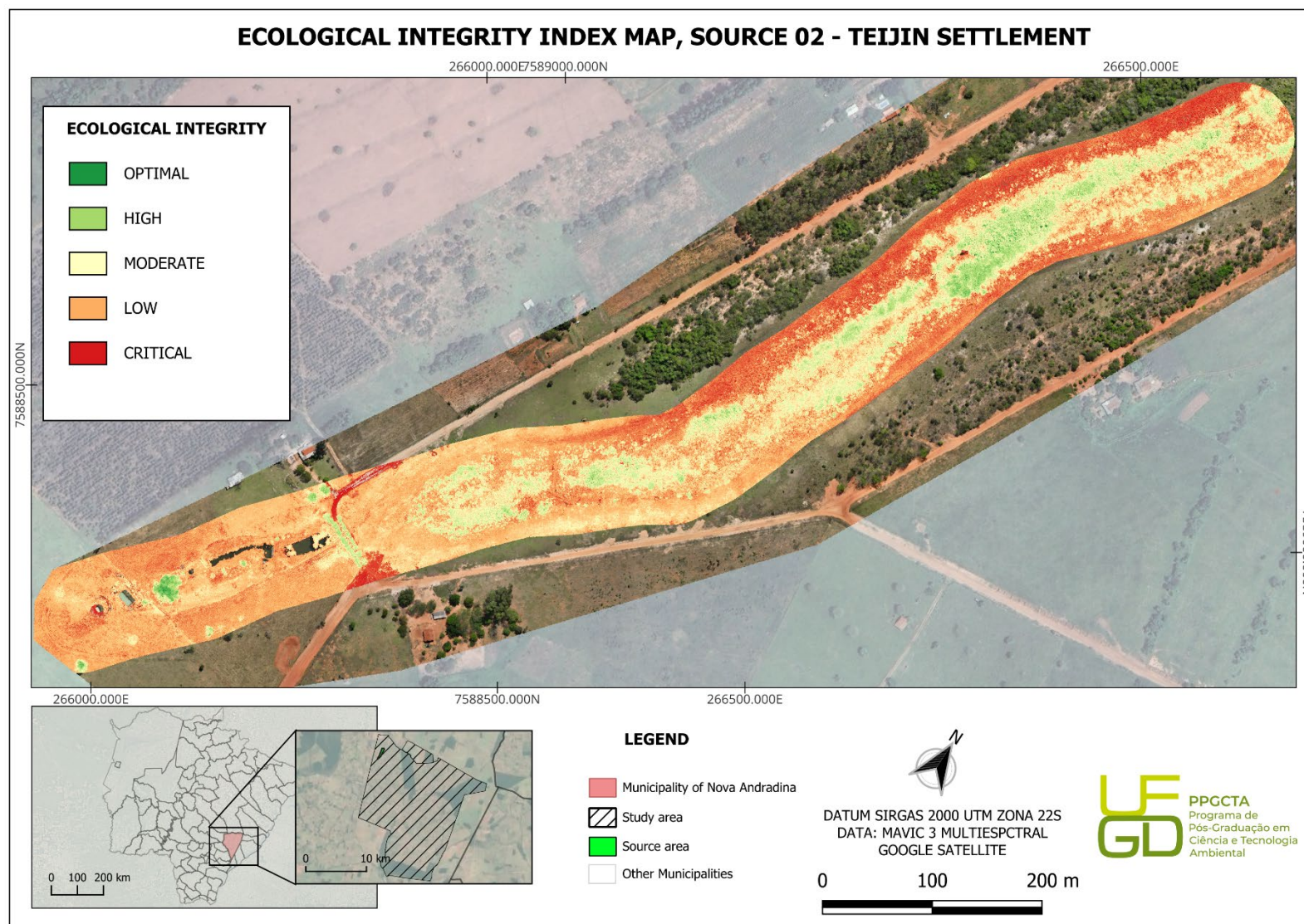
Apêndice 1 – Mapas das Nascentes

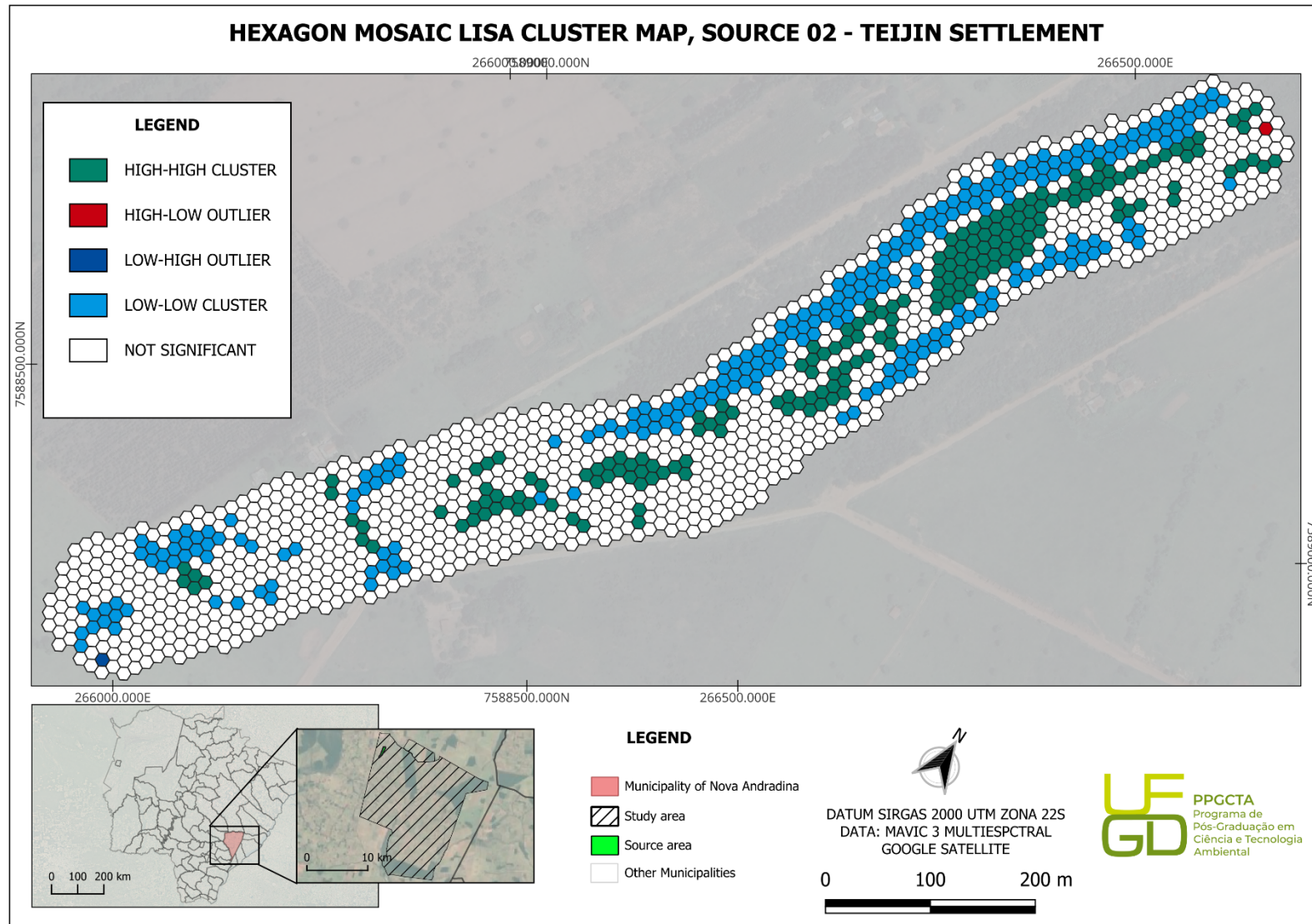


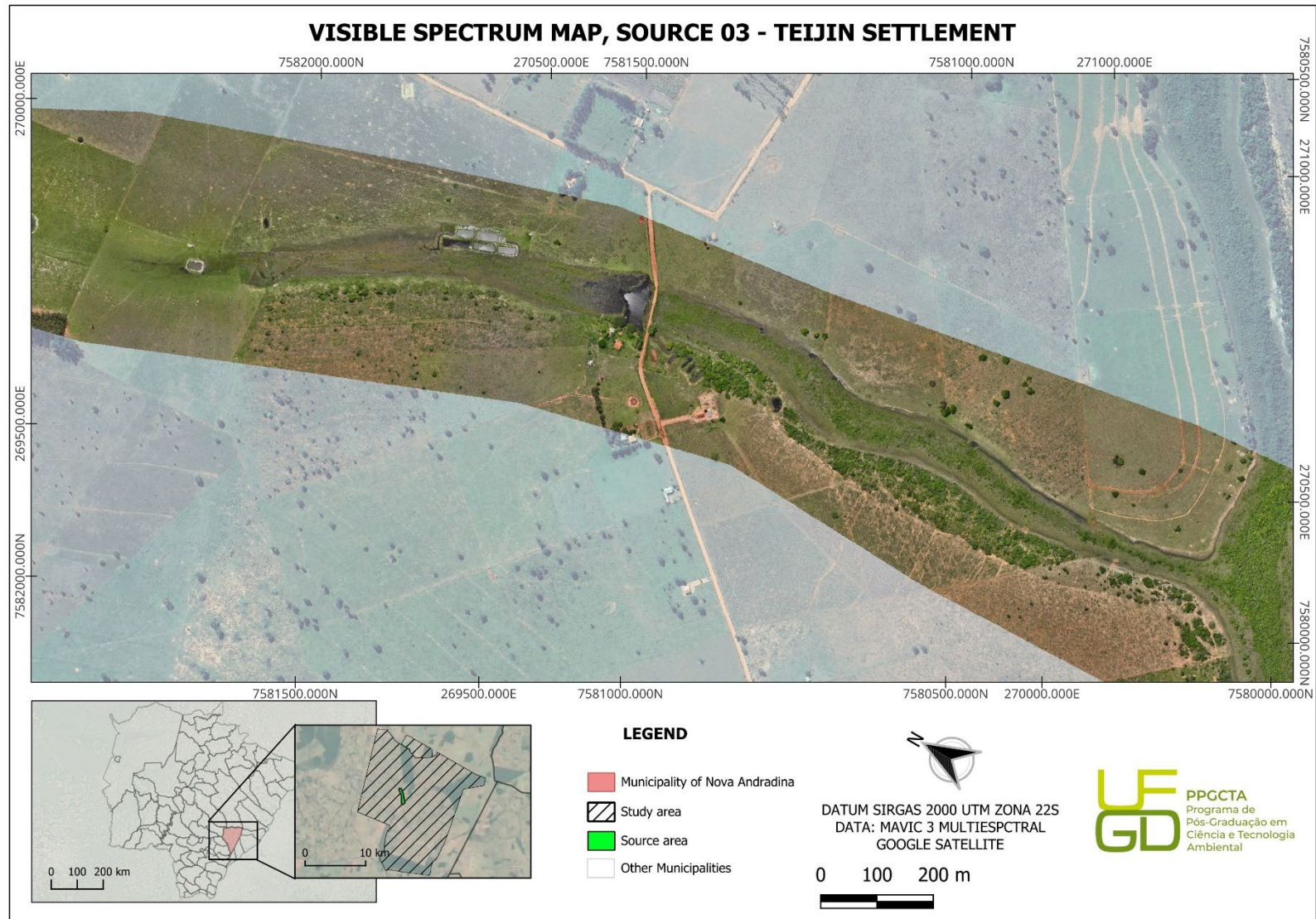


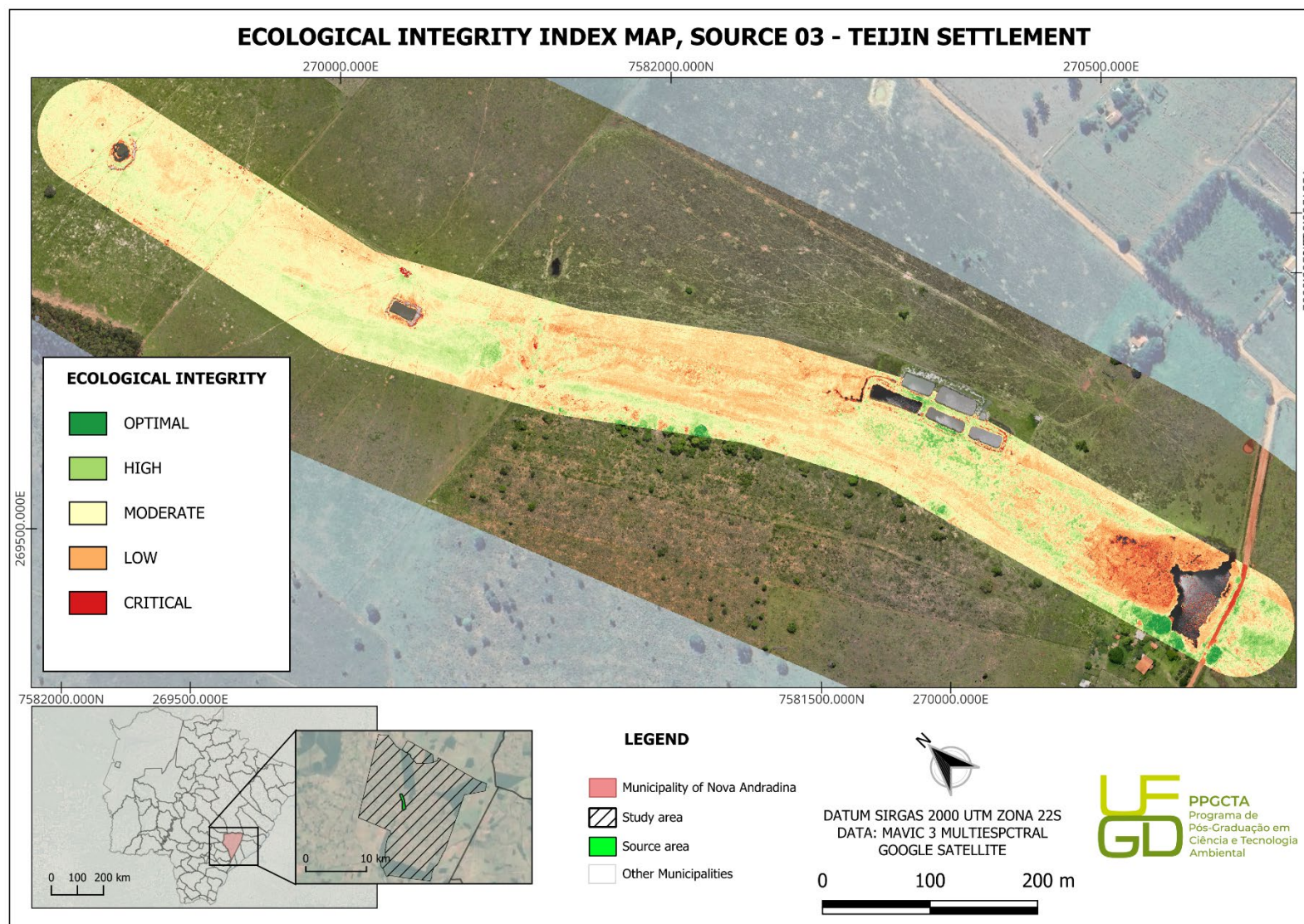


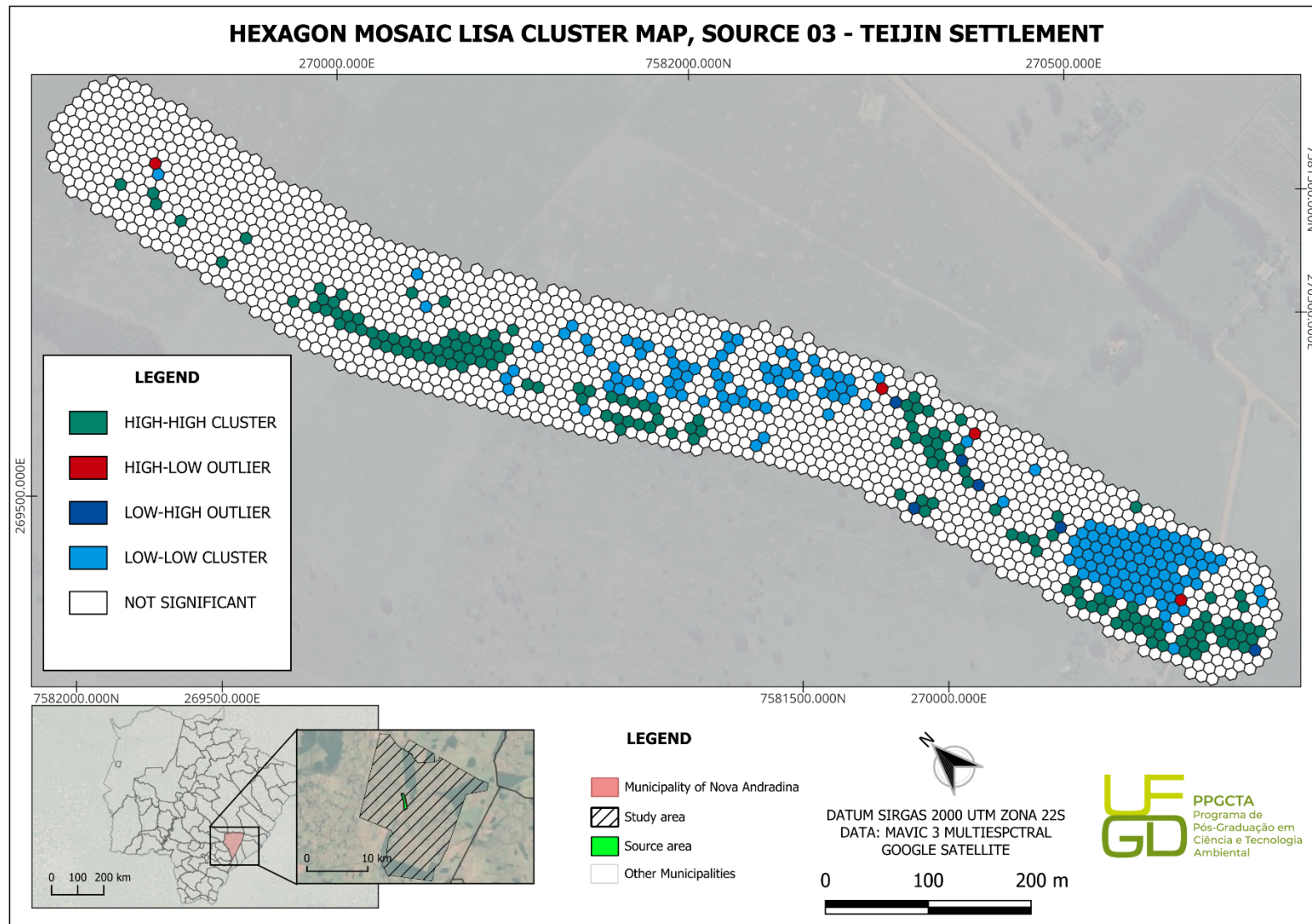


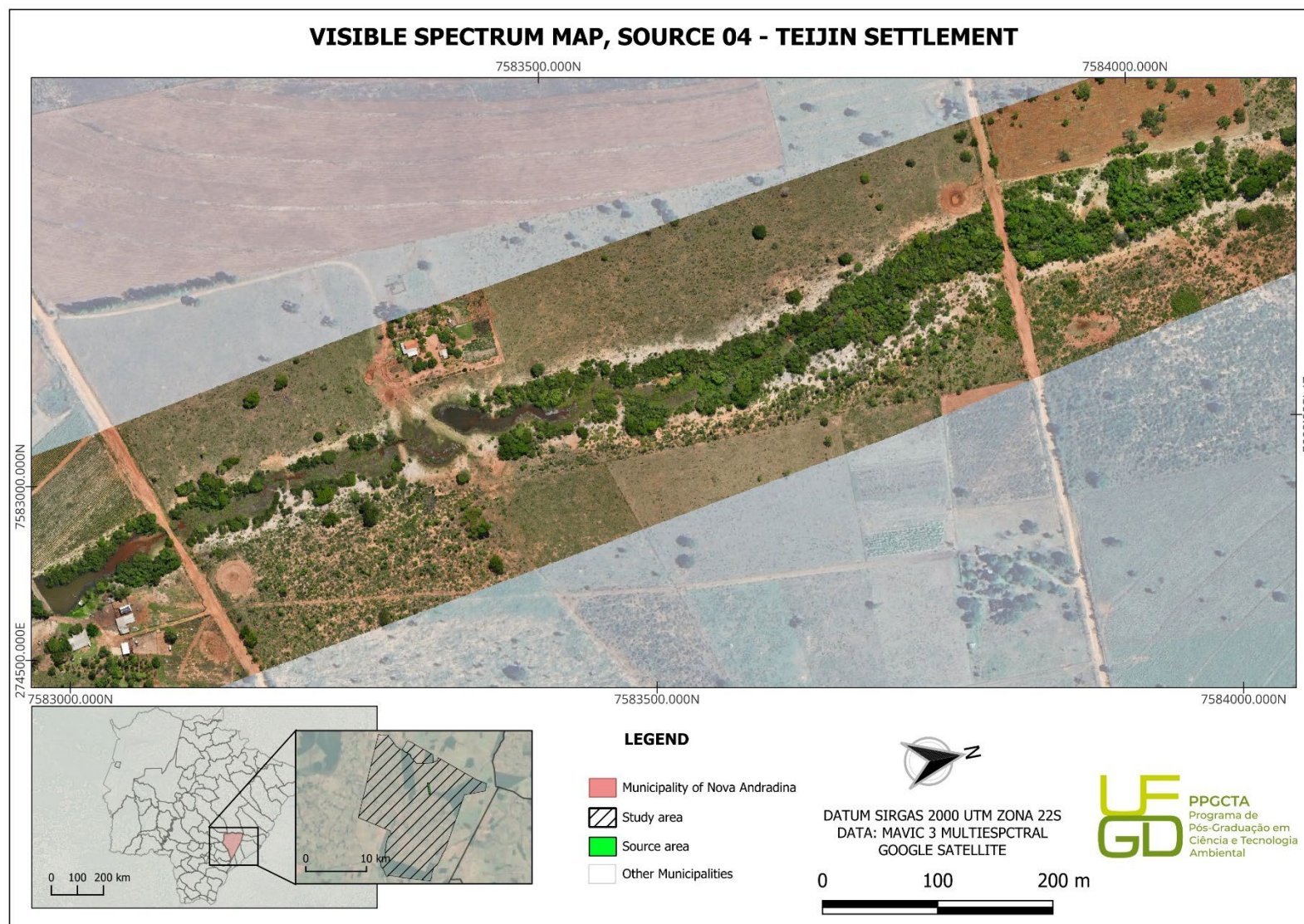


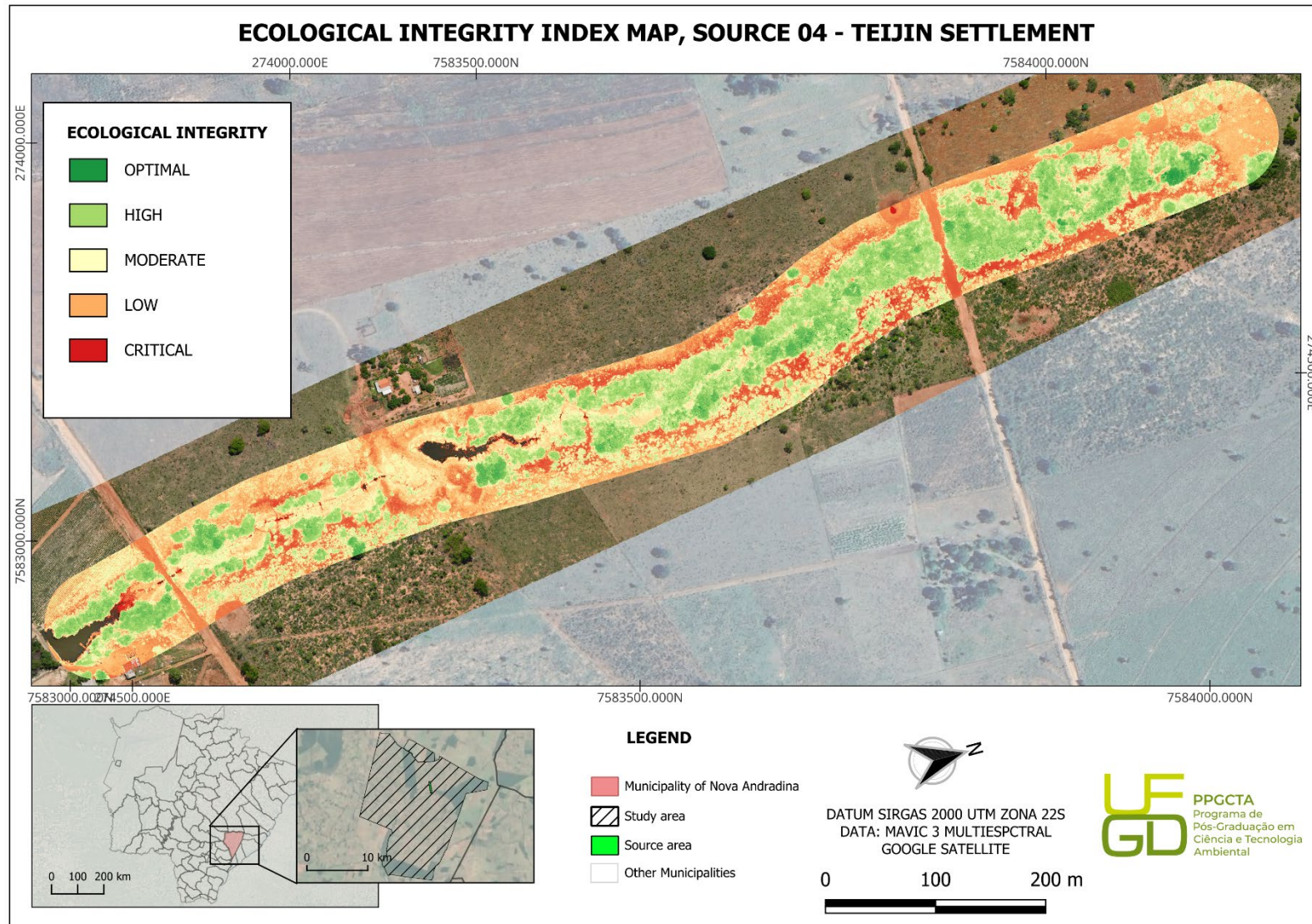


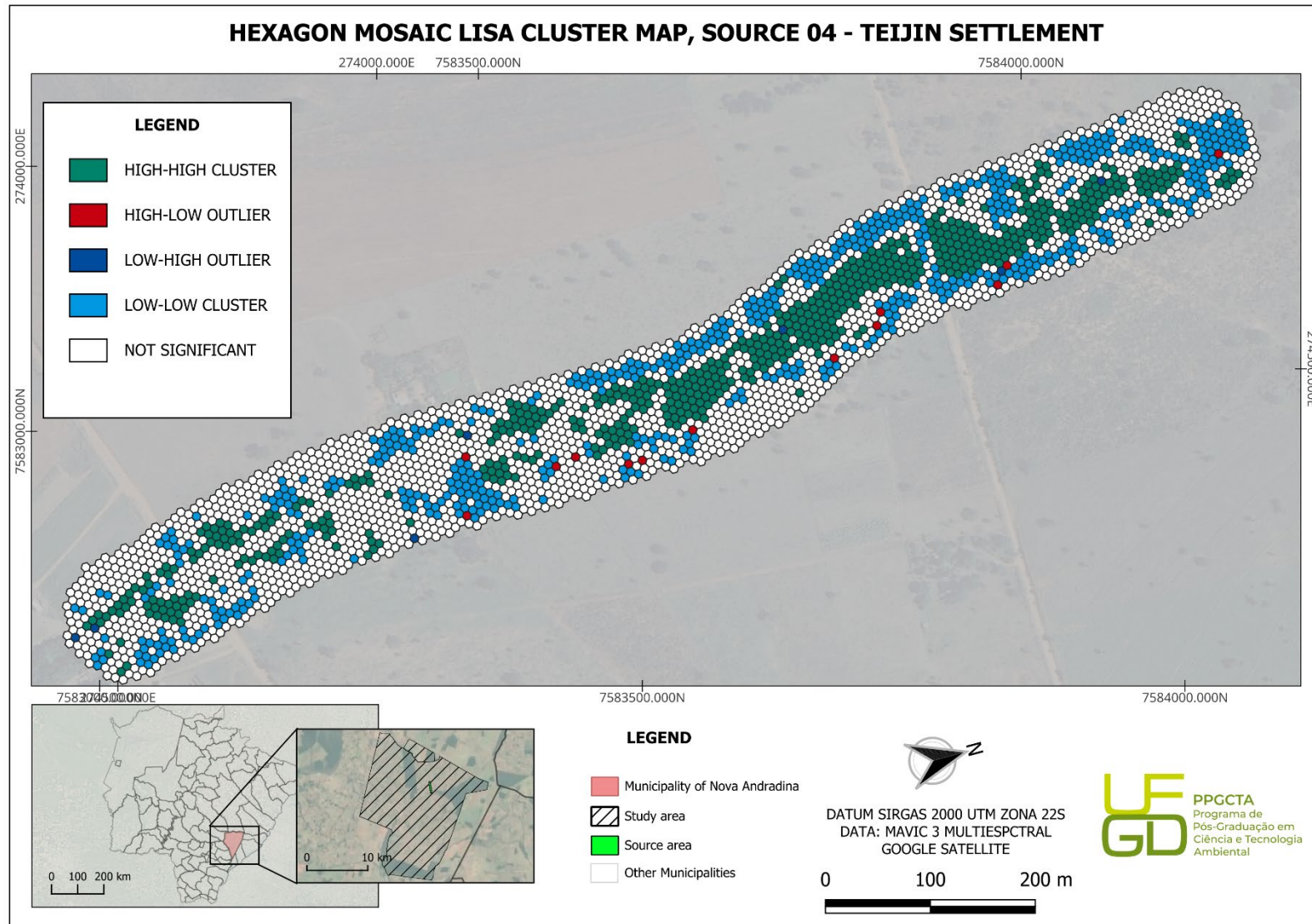


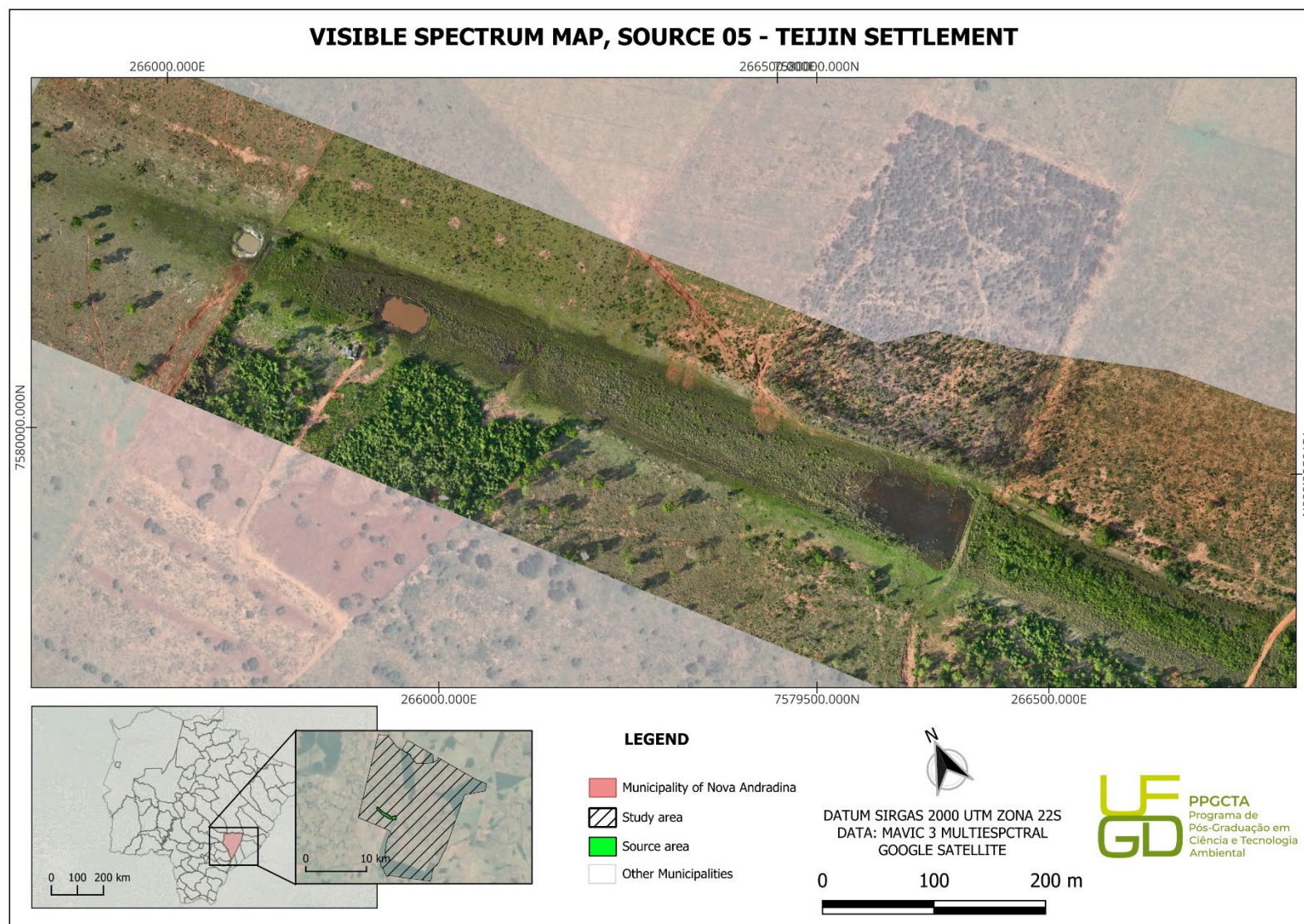


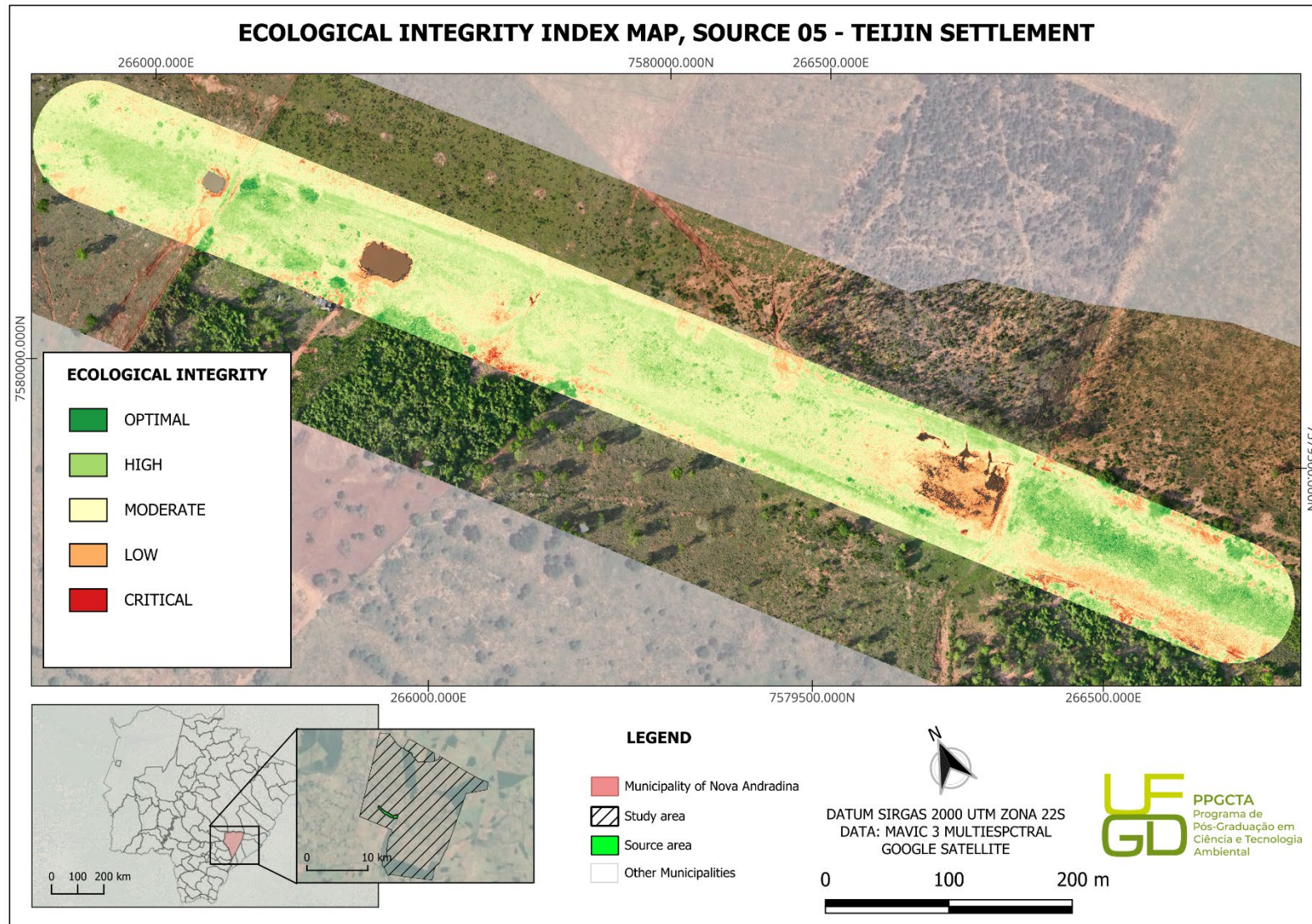


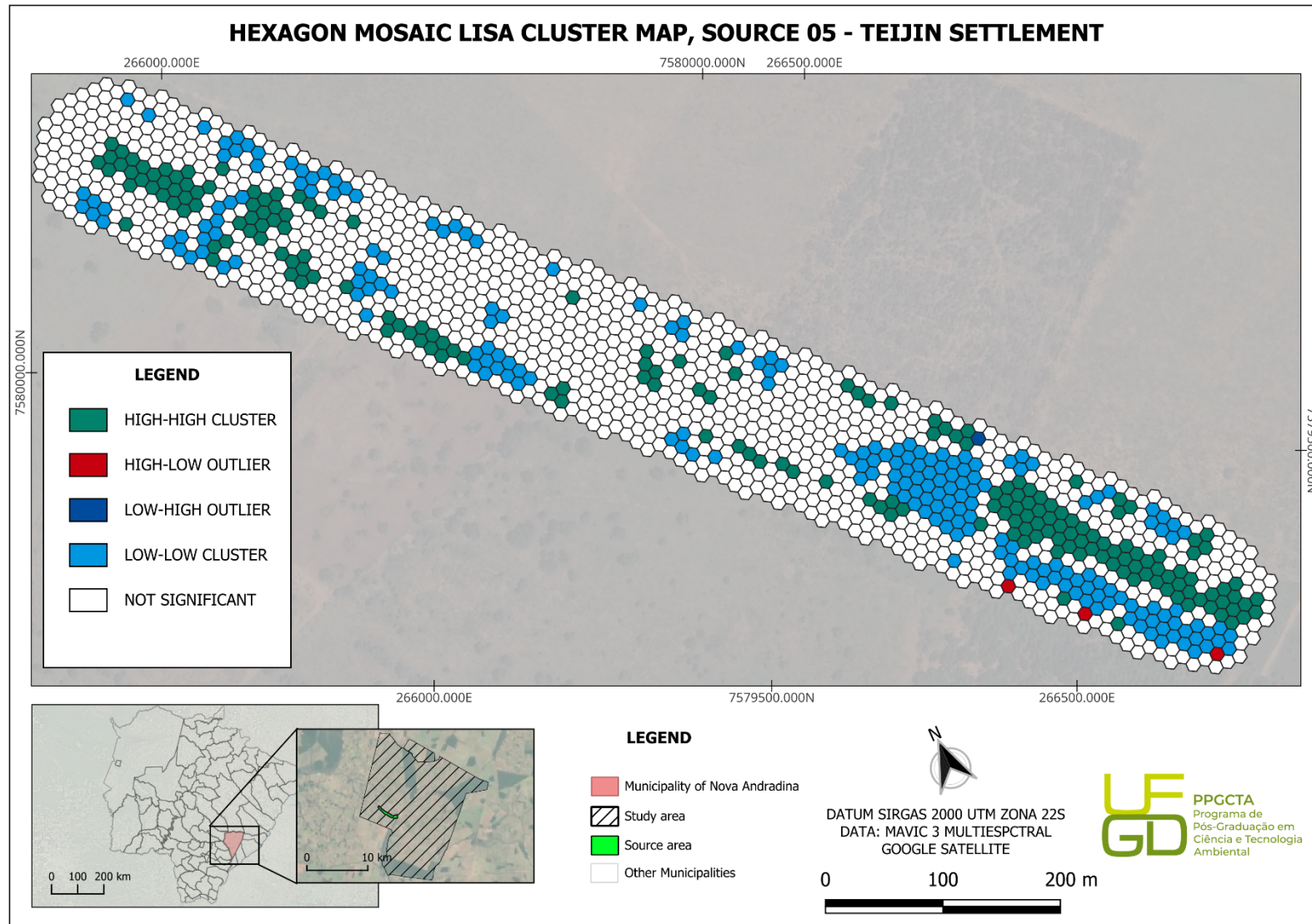


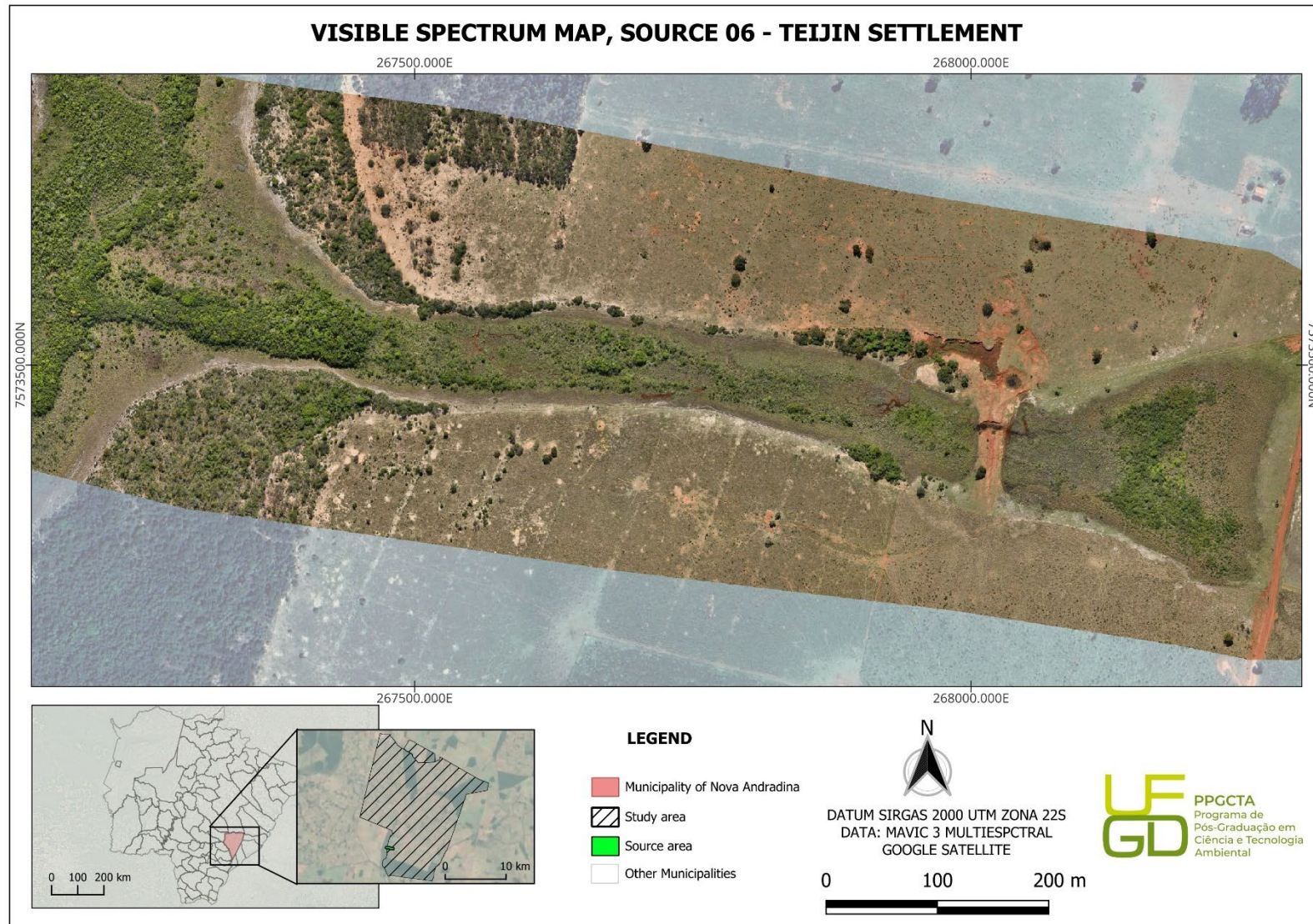


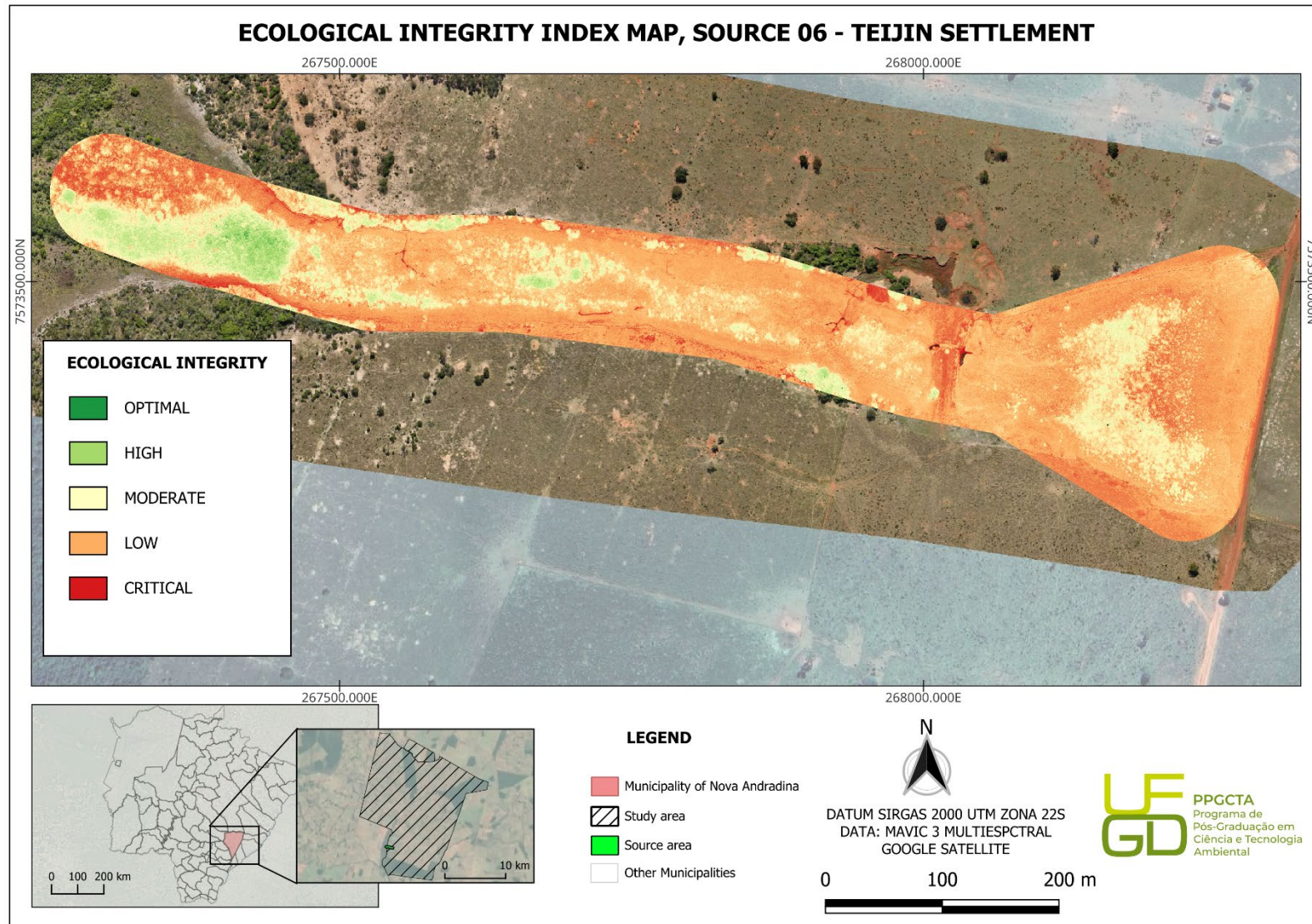


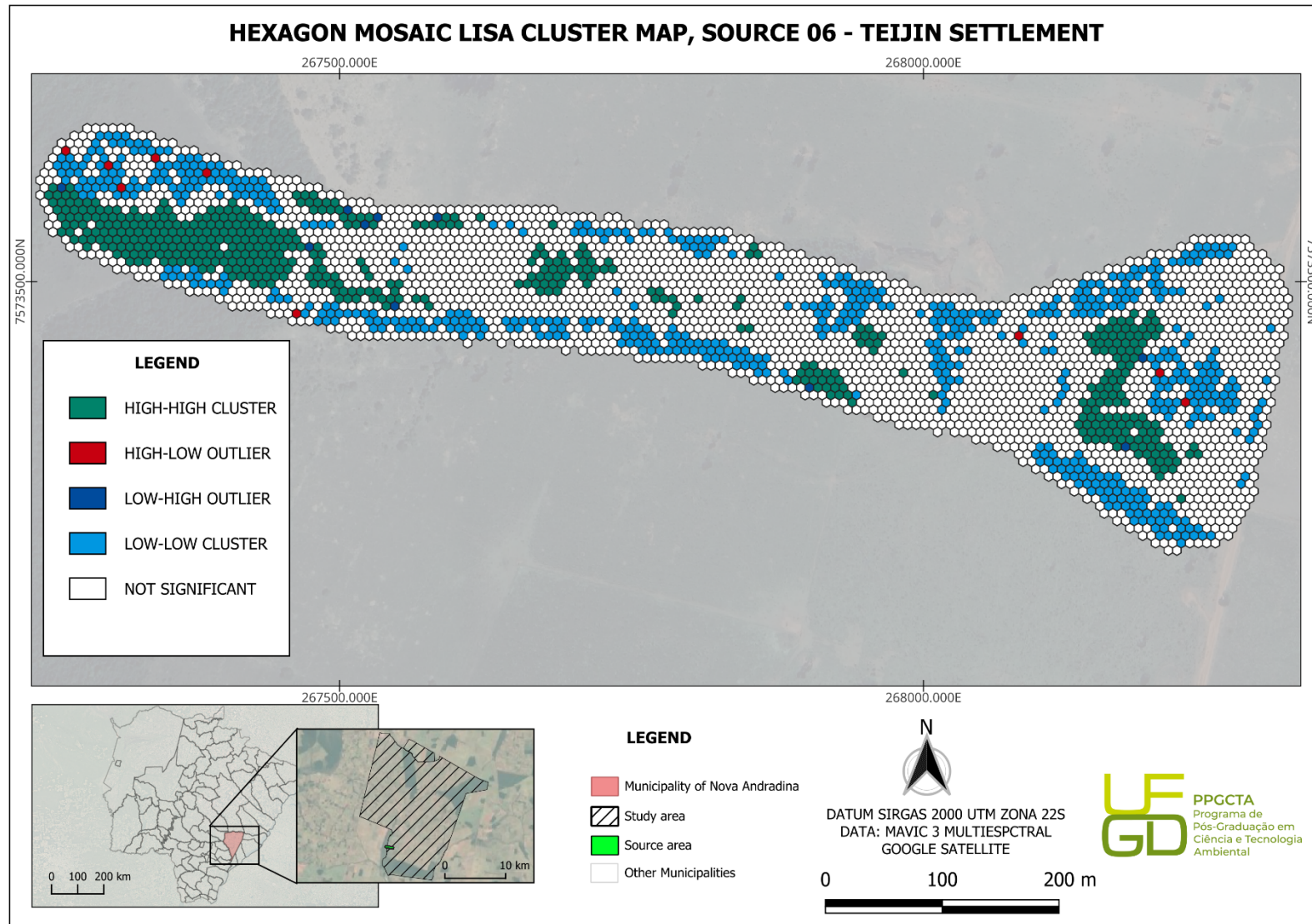


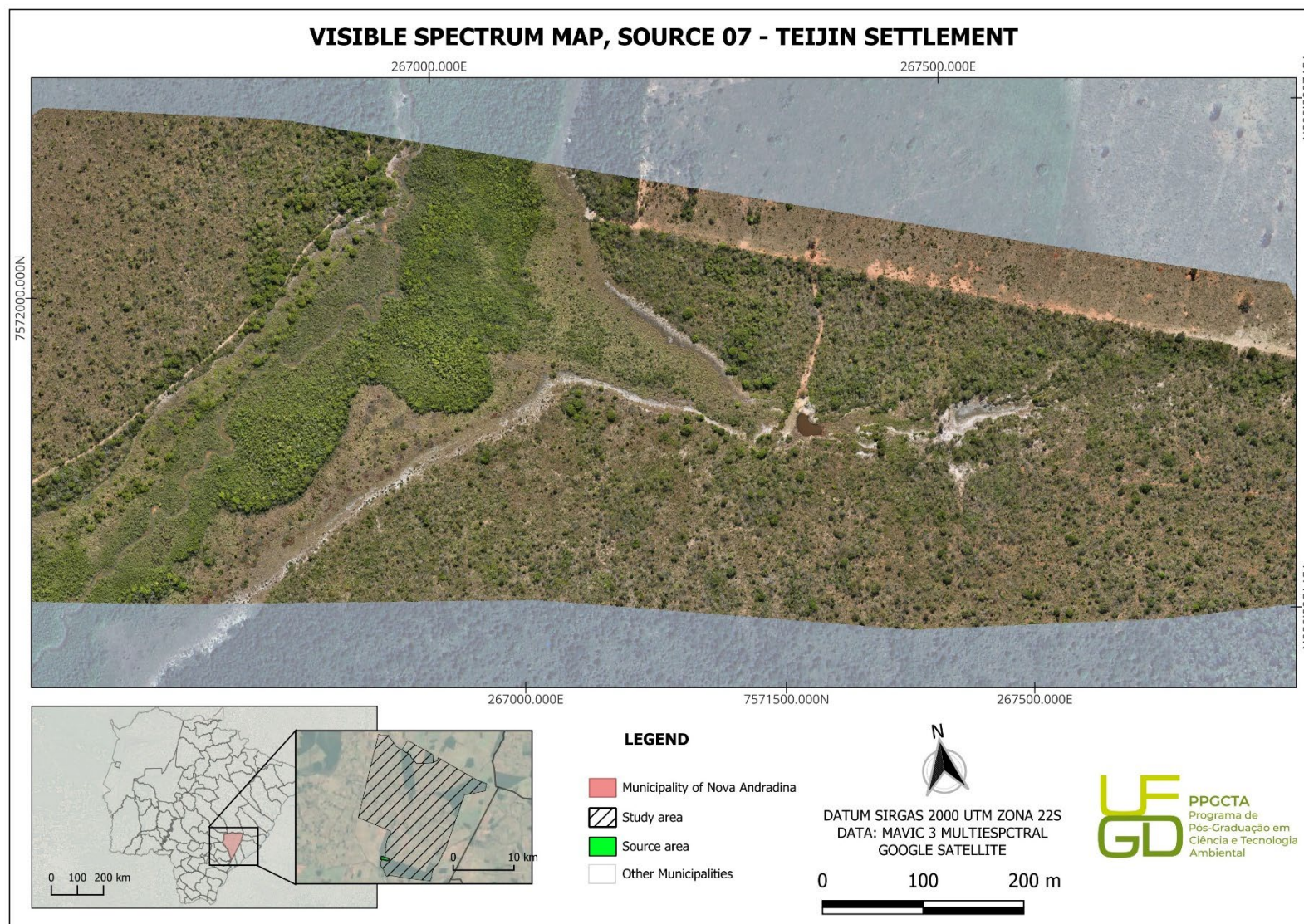


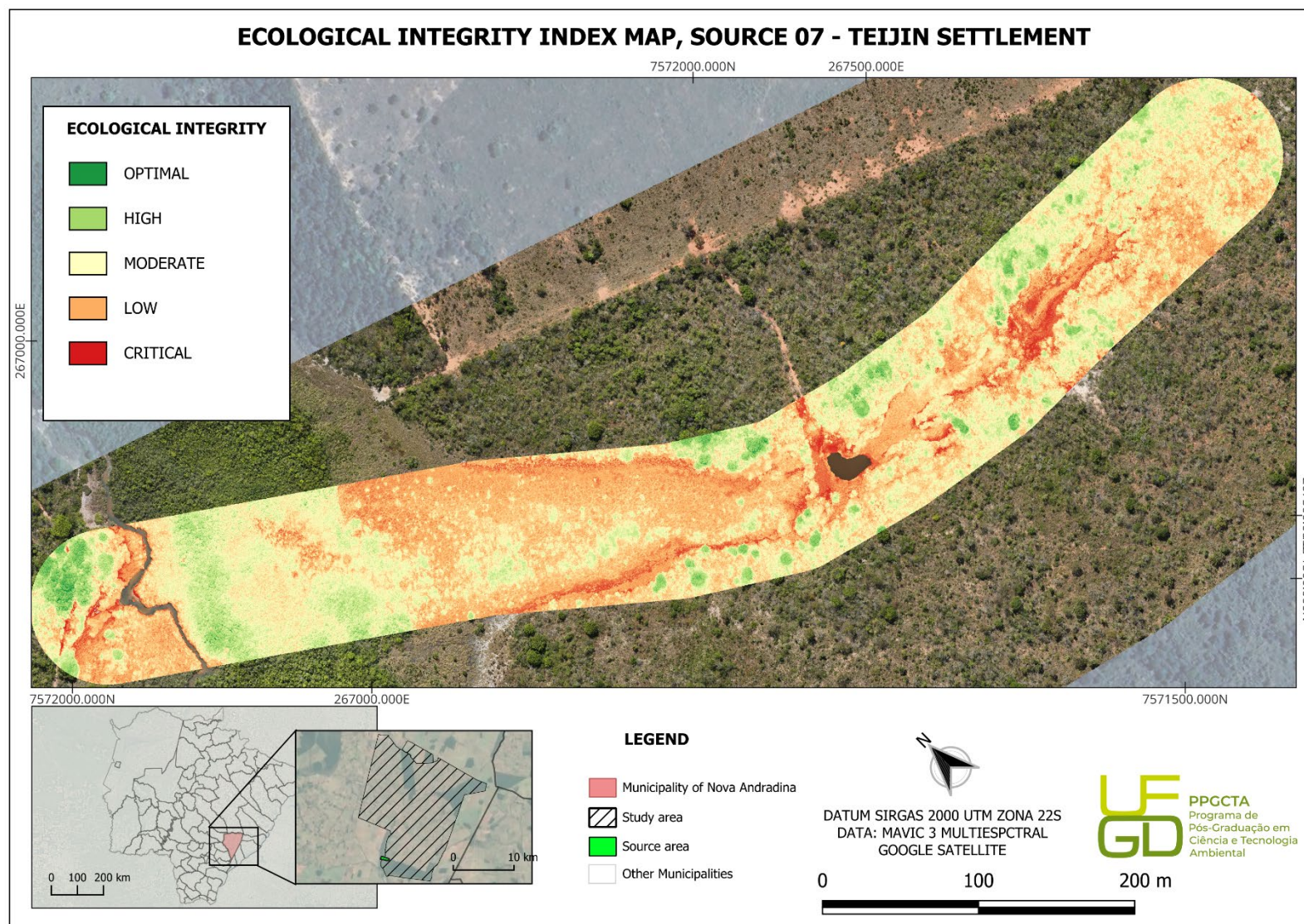


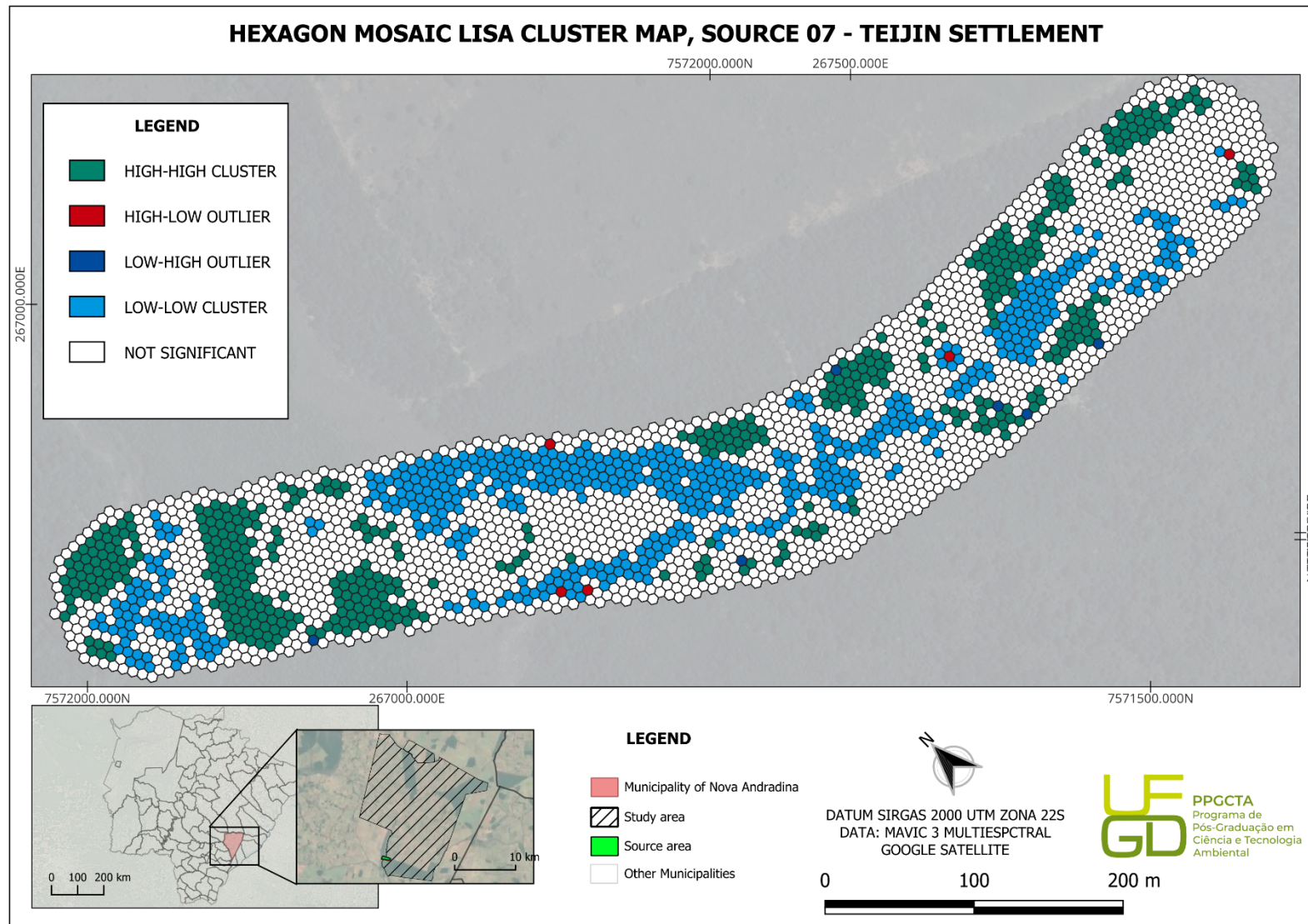














Apêndice 2 – Código fonte do GeoFlow

O repositório público com o código-fonte completo do plug-in GeoFlow, scripts auxiliares, documentação de instalação e exemplos de uso encontra-se disponível em:

<https://github.com/lobtchenko/GeoFlow.git>

O projeto é distribuído sob licença aberta (MIT) e pode ser clonado via Git para fins de verificação, reprodução dos resultados e futuras contribuições da comunidade.