

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de graduação em Engenharia Ambiental

**COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS DE SATÉLITE E DRONE PARA ANÁLISE
DE SUPRESSÃO DA VEGETAÇÃO NATIVA EM ÁREAS RURAIS**

Vitória de Figueiredo Corrêa Lima

Prof. Dr. Lucas Moreira Furlan

Rio Claro, São Paulo

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

VITÓRIA DE FIGUEIREDO CORRÊA LIMA

COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS DE SATÉLITE E DRONE
PARA ANÁLISE DE SUPRESSÃO DA VEGETAÇÃO NATIVA
EM ÁREAS RURAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Rio Claro - SP

2025

L732c

Lima, Vitória de Figueiredo Corrêa

Comparação entre imagens de satélite e drone para análise de supressão da vegetação nativa em áreas rurais / Vitória de Figueiredo Corrêa Lima. -- Rio Claro, 2025
68 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Rio Claro

Orientador: Lucas Moreira Furlan

1. Sistemas de informação geográfica. 2. Imagens multiespectrais. 3. Drone. 4.
Geoprocessamento. 5. Satélites artificiais em sensoriamento remoto. I. Título.

VITÓRIA DE FIGUEIREDO CORRÊA LIMA

COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS DE SATÉLITE E DRONE
PARA ANÁLISE DE SUPRESSÃO DA VEGETAÇÃO NATIVA
EM ÁREAS RURAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Ambiental.

Comissão Examinadora

Lucas Moreira Furlan (orientador)

Daiana Marques Costa

Lucília do Carmo Giordano

Rio Claro, 24 de Novembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Meu porto seguro e maior incentivo: dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Vencer na vida jamais foi um ato singular. Se eu chego a esta vitória, há muitos que a conquistam comigo. É a essas pessoas, que me sustentaram, inspiraram e me deram a força necessária para crescer, que dedico cada linha deste trabalho, que a minha jornada seja o reflexo do legado de vocês e a abertura para novos caminhos.

À minha amada família, meu alicerce inabalável. Aos meus pais, Roberto Carlos e Maria Aparecida, por todo o amor, sacrifício e por me guiarem com os valores inegociáveis da honestidade, do trabalho e da fé em dias melhores. Vocês me ensinaram que os sonhos são possíveis, mesmo quando a caminhada começa com obstáculos e ser a primeira da família a me formar em uma universidade pública é uma conquista nossa, fruto direto do que plantaram em mim.

À minha irmã, Mariana, eterna confidente e porto seguro, sou grata pelo companheirismo e pelas palavras certas nos momentos de maior dificuldade. Sua presença iluminou meu caminho e sua força me inspirou a continuar, mesmo quando o cansaço me desafiava. Você sempre enxergou em mim uma força e um potencial que, muitas vezes, eu mesma não conseguia ver.

Ao meu pequeno Vicente, afilhado amado e uma das maiores razões para seguir em frente. Desejo ser alguém de quem você possa sempre se orgulhar, guiando-o e mostrando que os sonhos se realizam com amor, esforço e perseverança. Este trabalho também é por você, Vicente, e pelo mundo que desejo te ajudar a construir.

Ao professor Lucas, meu sincero agradecimento pela orientação precisa e constante. Sua expertise, paciência e incentivo foram fundamentais para a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e por guiar meu desenvolvimento acadêmico ao longo desta jornada.

Aos meus amigos queridos, que me acolheram, apoiaram e me fizeram acreditar na minha capacidade, especialmente Julya, que tem essa personalidade única e um talento absurdo para ser excelente em tudo o que se propõe a fazer; Pedro, meu parceiro de ideias, alguém com quem eu me identifico de um jeito impressionante, desde estilos musicais, até visões de mundo; e Lucas, com quem eu posso passar horas conversando sobre a vida e, no minuto seguinte, estar chorando de rir por causa dele. Vocês não fazem ideia de quantas vezes nossa amizade me salvou. Cada conversa, abraço e risada compartilhada foi o combustível essencial para eu não parar.

Vocês foram minha força, minha motivação e minha base. Este trabalho não é apenas meu; ele é a soma de todos que acreditaram em mim. Obrigada por nunca me deixarem esquecer quem eu sou e de onde vim.

Com amor e eterna gratidão,

Vitória

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso aborda a temática da preservação ambiental e da busca por soluções sustentáveis, contextualizando o cenário da expansão agrícola no Brasil e os impactos da produção de biocombustíveis, regida pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). O objetivo geral do estudo foi realizar uma comparação quantitativa e qualitativa entre dados de sensoriamento remoto de diferentes plataformas, orbital e suborbital, para a análise de supressão da vegetação nativa em áreas rurais. Para isso, a metodologia concentrou-se no monitoramento multitemporal de um imóvel rural em Altinópolis, São Paulo, uma região caracterizada pela monocultura tecnificada de cana-de-açúcar. Foram utilizadas imagens de satélite Sentinel-2 Level 2A e CBERS-4A para a análise de longo prazo (2017 a 2025), e imagens de altíssima resolução obtidas com o Drone DJI Mavic Air 2S para detalhamento e validação. O processamento e análise dos dados, incluindo a aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e classificação manual, foram realizados no software ArcGIS Pro. Os resultados preliminares, evidenciados pela análise temporal, apontam para um declínio contínuo da vegetação nativa na área de estudo, com supressão visível nas bordas dos fragmentos. Conclui-se que, embora as imagens de drone se mostrem superiores em resolução espacial (2 a 5 centímetros), sendo essenciais para a identificação precisa de pequenas alterações, as imagens de satélite são mais viáveis para a cobertura de grandes áreas, sendo o mais indicado, o satélite CBERS-4A. Também pode ser considerada a combinação complementar de satélite (para visão panorâmica) e drone (para validação e detalhe) como a abordagem mais robusta para o monitoramento ambiental e o combate à supressão da vegetação nativa, visando a sustentabilidade e a efetividade do RenovaBio.

Palavras-chave: ARP. CBERS-04A. Sentinel-2. Classificação manual.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis addresses the theme of environmental preservation and the quest for sustainable solutions, contextualizing the scenario of agricultural expansion in Brazil and the impacts of biofuel production, governed by the National Biofuels Policy (RenovaBio). The general objective of the study was to conduct a quantitative and qualitative comparison between remote sensing data from different platforms, orbital and suborbital, to analyze the suppression of native vegetation in rural areas. To this end, the methodology focused on the multitemporal monitoring of a rural property in Altinópolis, São Paulo, a region characterized by technified sugarcane monoculture. Sentinel-2 Level 2A and CBERS-4A satellite imagery were used for long-term analysis (2017 to 2025), while very high-resolution images obtained with a DJI Mavic Air 2S Drone were used for detailing and validation. Data processing and analysis, including the application of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and manual classification, were performed using ArcGIS Pro software. Preliminary results, evidenced by temporal analysis, indicate a continuous decline of native vegetation in the study area, with visible suppression at the edges of the fragments. It is concluded that, although drone imagery proves superior in spatial resolution (2 to 5 centimeters), essential for the precise identification of small changes, satellite imagery is more feasible for covering large areas, with the CBERS-4A satellite being the most suitable. Furthermore, the complementary combination of satellite (for overview) and drone (for validation and detail) can be considered the most robust approach for environmental monitoring and combating native vegetation suppression, aiming for sustainability and the effectiveness of RenovaBio.

Keywords: RPA. CBERS-04A. Sentinel-2. Manual classification.

RESUMEN

Esta Tesis de Grado aborda el tema de la preservación ambiental y la búsqueda de soluciones sostenibles, contextualizando el escenario de la expansión agrícola en Brasil y los impactos de la producción de biocombustibles, regida por la Política Nacional de Biocombustibles (RenovaBio). El objetivo general del estudio fue realizar una comparación cuantitativa y cualitativa entre datos de teledetección de diferentes plataformas, orbitales y suborbitales, para analizar la supresión de vegetación nativa en áreas rurales. Para tal fin, la metodología se centró en el monitoreo multitemporal de una propiedad rural en Altinópolis, São Paulo, una región caracterizada por el monocultivo tecnificado de caña de azúcar. Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 Nivel 2A y CBERS-4A para el análisis a largo plazo (2017 a 2025), mientras que imágenes de muy alta resolución obtenidas con un Dron DJI Mavic Air 2S se utilizaron para el detallado y la validación. El procesamiento y análisis de datos, incluida la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la clasificación manual, se realizaron utilizando el software ArcGIS Pro. Los resultados preliminares, evidenciados por el análisis temporal, indican una disminución continua de la vegetación nativa en el área de estudio, con supresión visible en los bordes de los fragmentos. Se concluye que, aunque las imágenes de drones resultan superiores en resolución espacial (2 a 5 centímetros), esencial para la identificación precisa de pequeños cambios, las imágenes satelitales son más viables para cubrir grandes áreas, siendo el satélite CBERS-4A el más adecuado. Además, la combinación complementaria de satélite (para una visión general) y dron (para validación y detalle) puede considerarse el enfoque más robusto para el monitoreo ambiental y el combate a la supresión de vegetación nativa, buscando la sostenibilidad y la efectividad de RenovaBio.

Keywords: APR. CBERS-04A. Sentinel-2. Clasificación manual.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo Geral	12
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
4. BIBLIOGRAFIA	14
4.1. Satélites	14
4.1.1. Sentinel 2 – Level 2A.....	15
4.1.2. CBERS-04A	16
4.2. Drones	17
4.2.1. Drone Dji Mavic Air 2S	17
4.3. Geoprocessamento	18
4.3.1. Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	19
4.3.2. Arcgis Pro	19
4.4. Vegetação Nativa	20
4.5. Legislação Vigente.....	21
4.6. Município de Altinópolis - SP.....	22
4.7. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	23
4.8. MapBiomass	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
5.1. Análise de Áreas de Vegetação Nativa.....	27
5.2. Coleta e Processamento das Imagens Sentinel 2 - Level 2A.....	30
5.3. Coleta e Processamento das Imagens CBERS - 04A	31
5.4. Coleta e Processamento das Imagens do Drone DJI Air 2S.....	31
5.5. Aplicação do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada).....	33
5.6. Coleta de Dados do MapBiomass	33
5.7. Definição de Critérios de Desempenho	34

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6.1. Comparação entre Imagens.....	36
6.1.1. Análise de Imagens do Satélite Sentinel 2 – Level 2A	36
6.1.2. Comparação entre os Satélites Sentinel 2 – Level 2A e CBERS-04A (2017 por Ano de Safra).40	
6.1.3. Comparação entre os Satélites Sentinel 2 – Level 2A e CBERS-04A (Ano de Safra por Ano de Safra).....	45
6.1.4. Drone DJI Air 2S em Comparação com Imagens de Satélite	50
6.2. Ferramentas Complementares	55
6.2.1. Análise por Índice de Vegetação Nativa Normalizada	55
6.2.2. Análise pelo MapBiomas.....	57
6.3. Pontuação dos Critérios de Desempenho	58
7. CONCLUSÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

A preservação ambiental e a busca por soluções sustentáveis são questões centrais nas discussões contemporâneas, especialmente no contexto da agricultura e da produção de biocombustíveis. Nesse cenário, a crescente demanda por biocombustíveis no Brasil, incentivada por políticas públicas como o RenovaBio, tem gerado intensos debates sobre os impactos ambientais decorrentes da expansão agrícola, especialmente no que se refere à supressão da vegetação nativa em áreas rurais. O RenovaBio, instituído pela Lei 13.576/2017, visa promover a redução de emissões de gases de efeito estufa, fomentando a produção e o uso de biocombustíveis de forma sustentável. No entanto, o avanço de áreas agricultáveis para atender a essa demanda levanta preocupações quanto à preservação de ecossistemas naturais, especialmente em biomas como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia, que são fundamentais para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (Almada *et al.*, 2024). O RenovaBio é uma política inovadora, que, apesar de trazer benefícios econômicos e ambientais, traz também questionamentos relevantes e análises diretas a respeito da supressão da vegetação nativa em áreas rurais para a expansão da produção agrícola destinada ao biocombustível.

Nesta conjuntura, uma vez que a análise da vegetação em áreas rurais desempenha um papel fundamental na avaliação de impactos ambientais causados por atividades agrícolas, o monitoramento ambiental se torna uma ferramenta essencial para garantir que a expansão agrícola ocorra de maneira sustentável. Entre as ferramentas utilizadas para monitoramento de mudanças no uso do solo, destacam-se as imagens de satélite e drones, que são tecnologias amplamente empregadas devido à sua capacidade de oferecer dados geoespaciais detalhados, essenciais para monitorar a degradação ambiental (Sokolova *et al.*, 2020).

As imagens de satélite, fornecidas por sistemas como o CBERS-04A e o Sentinel-2, têm sido utilizadas para o monitoramento ambiental em larga escala, pois têm capacidade de resolução temporal e cobertura global e são cruciais para o estudo de mudanças no uso da terra, incluindo a supressão da vegetação nativa. Porém, mesmo com a ampla cobertura geográfica e capacidade de monitorar grandes regiões, as imagens de satélite apresentam limitações significativas, como a resolução espacial reduzida em comparação a tecnologias mais recentes, o que, muitas vezes, impede a detecção de mudanças em pequenas áreas ou em regiões com cobertura vegetal densa, onde a distinção entre diferentes tipos de vegetação é menos precisa (Nzeanorue *et al.*, 2024). Além disso, fatores climáticos, como a presença de nuvens, podem comprometer a qualidade das imagens, dificultando o monitoramento contínuo de determinadas regiões.

Por outro lado, o uso de drones para o monitoramento ambiental tem ganhado destaque devido à sua alta resolução espacial, permitindo a obtenção de imagens detalhadas e precisas em pequenas áreas, por serem equipados com sensores óticos e multiespectrais, os drones são capazes de fornecer dados geoespaciais em altíssima resolução, detectando mudanças sutis na vegetação que podem não ser capturadas por satélites (Shanmugapriya, N. *et al.*, 2024). A flexibilidade na operação dos drones permite que sejam utilizados em áreas de difícil acesso e em condições climáticas variadas, o que os torna uma ferramenta valiosa para o monitoramento de áreas críticas, como reservas legais e Áreas de Preservação Permanente (APPs). Entretanto, assim como os satélites, os drones também apresentam limitações operacionais, como a necessidade de voos planejados e a limitação da área de cobertura, o que os torna mais adequados para o monitoramento de pequenas e médias áreas. Além disso, a análise de grandes volumes de dados gerados por drones exige maior capacidade de processamento e infraestrutura tecnológica avançada, o que pode ser um desafio para algumas instituições e órgãos de fiscalização ambiental (Bhatia *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo comparar a eficácia do uso de imagens de satélite e drones na análise da supressão da vegetação nativa em um imóvel rural situado em Altinópolis, São Paulo, no contexto do programa RenovaBio. A partir dessa comparação, buscou-se avaliar a acurácia, a cobertura e a aplicabilidade de cada tecnologia para o monitoramento ambiental, a partir de técnicas de processamento digital e fotogrametria, como classificação e manual, a extensão da supressão da vegetação nativa e comparar a acurácia de diferentes sensores embarcados em diferentes plataformas e softwares. A análise da supressão da vegetação nativa em áreas agrícolas é fundamental para assegurar que a produção de biocombustíveis no Brasil ocorra de maneira sustentável, preservando a biodiversidade e os ecossistemas que desempenham um papel crucial na regulação climática e no sequestro de carbono.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Comparar qualitativa e quantitativamente dados multiplataformas e multissensores de sensoriamento remoto orbital e suborbital para o monitoramento da vegetação nativa em áreas rurais.

2.2. Objetivos específicos

- Comparação da eficácia da resolução espectral da luz visível de dados dos satélites CBERS-04A (sensor WPM), Sentinel-2 (2A), e do drone DJI Mavic Air 2S (sensor CMOS 20mp) para identificação de áreas vegetadas e;
- Comparação da resolução espacial dos satélites CBERS-04A (sensor WPM), Sentinel-2 (2A), e do drone DJI Mavic Air 2S (sensor CMOS 20mp) para identificação de áreas vegetadas;
- Comparação direta entre dados da cobertura vegetal total presente no ano de 2017 (Sanção da L13576/2027- Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) com os anos seguintes, com enfoque para os anos de 2023, 2024 e 2025;
- Comparação entre a área de vegetação nativa calculada por classificação de imagens manual.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) corresponde a um Cadastro Ambiental Rural (CAR) dedicado ao cultivo de cana-de-açúcar até meados de 2024, e está situada no município de Altinópolis, São Paulo. O município em questão faz parte da porção nordeste do estado, posicionado entre as coordenadas geográficas aproximadas de 47°24'06'' a 47°29'08.85'' de longitude oeste e 20°48'57.75'' a 21°12'23.54'' de latitude sul, com o meridiano central 45 como referência.

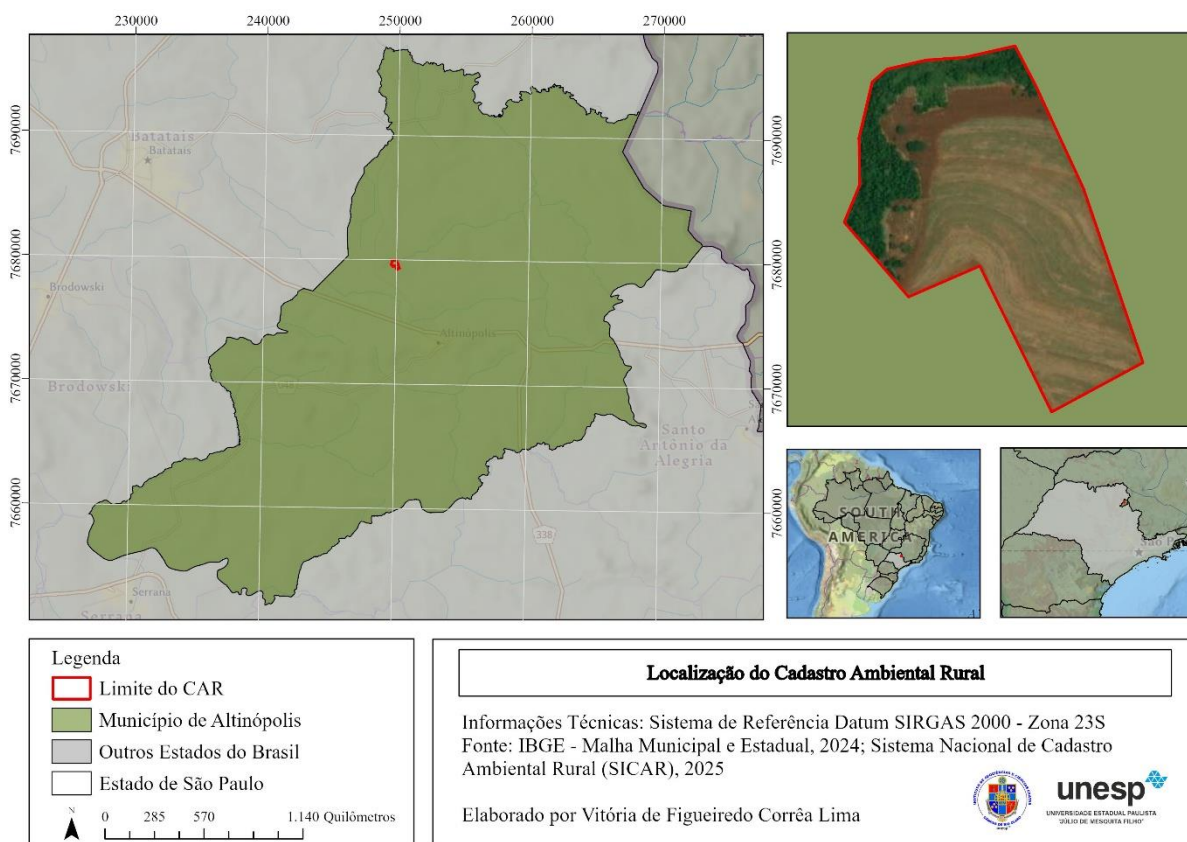
Com uma área territorial de cerca de 930 km², Altinópolis faz divisa com dez municípios, sendo oito localizados em São Paulo e dois pertencentes ao estado de Minas Gerais. Sua localização é estratégica no cenário de produção agrícola da região, sendo a cultura de cana-de-açúcar uma das principais atividades econômicas e uma clara expressão do uso antrópico predominante.

A área de estudo específica está localizada na zona rural do município, com acesso por estradas vicinais, como a estrada do Monjolinho. O local de interesse situa-se entre as coordenadas geográficas 20°58'1.80"S de latitude e 47°24'12.51"O de longitude, abrangendo uma extensão aproximada de 25,68 hectares. Conforme detalhado na Figura 1, trata-se de uma área predominantemente agrícola, caracterizada por um relevo suavemente ondulado e, crucialmente, pela presença de vegetação nativa remanescente em seu entorno.

A seleção deste CAR para análise se deu justamente pela representatividade da coexistência de intensa atividade agrícola (cana-de-açúcar) com a supressão e conservação da

vegetação nativa. Tais características são altamente relevantes para o contexto de estudo, alinhando-se aos objetivos do programa RenovaBio e permitindo a avaliação do impacto das atividades produtivas no cenário ambiental da região.

Figura 1 - Localização da Área de Estudo



Fonte: IBGE/2024; SICAR/2025. Autoria própria.

4. BIBLIOGRAFIA

4.1. Satélites

Qualquer corpo que circunda outro no espaço é definido como um satélite. Essa categoria se divide em duas classes: satélites de origem natural (como a Lua, que orbita a Terra) e artefatos construídos pela humanidade, conhecidos como satélites artificiais. O satélite artificial é um dispositivo ou máquina projetada cuja finalidade determina se ele será posicionado para viajar em torno da Terra ou de algum outro corpo celeste (Epiphanyo, 2002, p.10).

A órbita, por sua vez, é a trajetória circular ou elíptica percorrida pelo satélite. A permanência em órbita resulta de um equilíbrio delicado entre a força gravitacional de atração da Terra e a velocidade mantida pelo objeto. Essa velocidade é determinada pela altitude orbital.

Por exemplo, um dispositivo colocado em uma trajetória a 800 quilômetros acima da superfície terrestre precisa atingir uma velocidade de aproximadamente 26.000 quilômetros por hora. Para injetar o satélite em órbita, utiliza-se um veículo de propulsão específico: o foguete lançador (Epiphany, 2002, p.10).

Os satélites artificiais são frequentemente descritos como veículos lançados e mantidos em órbita ao redor da Terra, desempenhando um papel essencial na coleta contínua de dados. Eles reúnem informações sobre diversas propriedades e fenômenos terrestres. Operando a altitudes elevadas, geralmente entre 600 e 1.000 quilômetros acima da superfície, os satélites conseguem cobrir amplas regiões do planeta em cada varredura. Isso lhes confere a capacidade de captar uma grande quantidade de informações geoespaciais de maneira rápida e altamente eficiente (Epiphany, 2002, p.10).

O fato de estarem em movimento contínuo ao redor do planeta permite que os satélites forneçam uma cobertura repetitiva e sistemática de áreas específicas em intervalos regulares. Essa observação recorrente é crucial para o monitoramento dinâmico de mudanças, possibilitando a análise detalhada e de longo prazo das transformações ambientais, como aquelas provocadas pela atividade humana (Epiphany, 2002, p.10).

No contexto nacional, as atividades ligadas ao setor espacial, incluindo a concepção, o uso de veículos espaciais, satélites e foguetes, estão sob a supervisão da Agência Espacial Brasileira (AEB). A principal responsabilidade da AEB é elaborar e executar o Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), cujo objetivo é capacitar o Brasil a alcançar autonomia plena na construção e no subsequente lançamento de seus próprios satélites e foguetes (Epiphany, 2002, p.10).

Enquanto o projeto, o desenvolvimento e a fabricação de foguetes são atribuídos ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), integrante do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é responsável pelo avanço tecnológico, pelo monitoramento e pela aplicação prática dos satélites brasileiros (Florenzano, 2008).

4.1.1. Sentinel 2 – Level 2A

O satélite Sentinel-2 faz parte do programa Copernicus, que abrange um conjunto de sete missões, cada uma com a responsabilidade de monitorar diferentes aspectos específicos do nosso planeta. O Sentinel-2 tem a missão principal de observar as mudanças no ambiente terrestre, coletando informações detalhadas sobre o solo, a vegetação, os corpos d'água, e outros elementos da superfície. Ele realiza essa tarefa utilizando o sensor Multispectral Instrument

(MSI), que é capaz de capturar imagens em 13 diferentes bandas espectrais, permitindo uma análise precisa e variada das características da Terra (Morales, 2017).

Essas bandas espectrais têm diferentes níveis de resolução espacial: 10 metros para as bandas que observam detalhes mais finos, 20 metros para as que capturam áreas intermediárias, e 60 metros para aquelas que se concentram em padrões mais amplos. Além disso, o Sentinel-2 apresenta uma alta resolução temporal, conseguindo revisitar a mesma área em um intervalo de aproximadamente 5 dias. Esse tempo de revisita pode variar conforme a latitude, sendo mais curto em regiões mais distantes da linha do Equador (Morales, 2017).

O sucesso na obtenção de dados frequentes e detalhados deve-se ao fato de que a missão Sentinel-2 é composta por dois satélites gêmeos: o Sentinel-2A, lançado em junho de 2015, e o Sentinel-2B, colocado em órbita em maio de 2017. A presença desses dois satélites em órbitas complementares permite cobrir mais áreas em menos tempo, otimizando a coleta de informações sobre o meio terrestre. Essa configuração garante um monitoramento quase contínuo, essencial para o estudo de fenômenos como desmatamento, urbanização, agricultura e mudanças no uso do solo, entre outros aspectos ambientais (Morales, 2017).

4.1.2. CBERS-04A

O CBERS-04A-4A (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) é o sexto satélite da série CBERS-04A, fruto de uma cooperação entre o Brasil e a China, com o objetivo de monitorar os recursos naturais e o meio ambiente. Lançado em 20 de dezembro de 2019, a partir do Centro de Lançamento de Satélites de Taiyuan, na China, por um foguete Longa Marcha 4B, o CBERS-04A-4A desempenha um papel crucial na observação da Terra, oferecendo imagens de alta resolução que auxiliam no monitoramento de florestas, agricultura, desmatamento, ocupação do solo e combate a queimadas (Melo, 2023).

O satélite está equipado com três tipos de câmeras: a WPM (*Wide-Field Imager*), que captura imagens com resolução espacial de 55 metros e uma faixa de 733 km de largura, ideal para o monitoramento de vegetação e desmatamento; a MUX (*Multispectral Camera*), com resolução espacial de 16 metros e faixa de 100 km, usada para observar mudanças no uso do solo; e a AWFII (*Advanced Wide-Field Imager*), que oferece imagens com resolução espacial de 64 metros e uma faixa de 866 km, perfeita para monitoramento contínuo de grandes áreas, como florestas e zonas agrícolas. O CBERS-04A-4A opera em uma órbita heliosíncrona a cerca de 628 km de altitude, o que garante que ele possa capturar imagens com iluminação consistente, facilitando a comparação de dados ao longo do tempo. O satélite pesa aproximadamente 1.980 kg e tem dimensões de cerca de 1,5 metros de altura, 3 metros de

largura e 2 metros de profundidade, com painéis solares para suprimento de energia. Sua vida útil estimada é de 5 anos, dependendo das condições operacionais (Mcgregor *et al.*, 2024).

O programa CBERS-04A é fundamental para a soberania espacial brasileira, fornecendo dados que são essenciais para a gestão de recursos naturais, controle de desmatamento e resposta a desastres ambientais, como queimadas e enchentes. Além disso, as imagens geradas pelo satélite estão disponíveis gratuitamente através do portal do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>), o que amplia seu uso em áreas científicas, educacionais e governamentais (Boscolo *et al.*, 2024).

4.2. Drones

A legislação do Canadá define o drone como uma "Aeronave Remotamente Pilotada" (ARP), uma aeronave capaz de navegar, diferente de um balão, foguete ou pipa, que é operada por um piloto que não se encontra a bordo" (Kreps, 2025).

Apesar de esta definição ser limitada e poder incluir uma vasta gama de tecnologias de drones, ela possibilita delimitar com mais clareza o que um drone não é e como ele se diferencia de outros objetos voadores não tripulados (Kreps, 2025).

Kelsey Atherton, da publicação Popular Science, oferece um ponto de vista mais descritivo que sustenta essa demarcação mais ampla: a categoria "drone" refere-se a qualquer aparelho voador não tripulado e pilotado remotamente, com uma escala que varia desde um pequeno helicóptero de brinquedo controlado por rádio até o massivo Global Hawk, uma aeronave militar de 32.000 libras (cerca de 14.500 kg) e US\$ 104 milhões (Kreps, 2025).

Se o dispositivo voa e é controlado por um piloto em solo, ele se enquadra no conceito de drone usado no dia a dia (Kreps, 2025).

Dessa forma, torna-se mais fácil identificar o que um drone é e o que não é, mas permanece um desafio detalhar as especificidades dos diferentes modelos, suas utilidades e suas capacidades técnicas (Kreps, 2025).

4.2.1. Drone Dji Mavic Air 2S

O DJI Air 2S é um drone de uso semiprofissional que se destaca pela combinação entre qualidade de imagem, segurança de voo e portabilidade. Seu sistema óptico conta com um sensor CMOS de 1 polegada e 20 megapixels, tecnologia que permite capturar uma ampla faixa de tons e manter bom desempenho mesmo em ambientes com pouca luminosidade (Wretham, 2021). A lente apresenta distância focal equivalente a 22 mm, com abertura fixa em f/2,8, o que

garante nitidez uniforme em toda a imagem e simplifica o uso em diferentes condições de luz (Camerababs, 2021).

Em termos de vídeo, o modelo é capaz de gravar em resolução máxima de 5.4K a 30 quadros por segundo, além de 4K a 60 fps e Full HD até 120 fps. Essas configurações permitem registrar imagens com alto nível de detalhamento, adequadas para produções audiovisuais e análises técnicas (Dpreview, 2021). A taxa de bits de até 150 Mbps contribui para preservar as cores e os contrastes, oferecendo boa qualidade para tratamento posterior em softwares de edição (Camerababs, 2021).

O drone pesa cerca de 595 gramas, sendo leve o suficiente para transporte e operação em campo, mas mantendo estabilidade mesmo sob ventos moderados (Wretham, 2021). A autonomia de voo é de aproximadamente 31 minutos, podendo variar conforme o modo de operação e as condições meteorológicas (Dpreview, 2021).

Para aumentar a segurança, o Air 2S possui sensores de detecção de obstáculos na parte frontal, superior e inferior, integrados ao sistema APAS 4.0, que auxilia na prevenção de colisões. Ele também utiliza a tecnologia de transmissão OcuSync 3.0, que assegura comunicação estável entre o controle remoto e a aeronave, com alcance máximo de cerca de 12 quilômetros (Camerababs, 2021).

Combinando qualidade de imagem profissional, boa autonomia e recursos de segurança inteligentes, o DJI Air 2S é amplamente utilizado tanto para filmagens recreativas quanto em atividades técnicas, como mapeamento aéreo, inspeções e monitoramento ambiental (Wretham, 2021; Dpreview, 2021).

4.3. Geoprocessamento

De acordo com Xavier (2001), o termo "geoprocessamento" refere-se a um conjunto de técnicas computacionais que atua sobre bases de dados georreferenciados, ou seja, registros de eventos ou ocorrências associados a uma localização geográfica específica. Essas técnicas transformam esses dados em informações úteis, agregando valor ao conhecimento e oferecendo maior relevância para análises.

Uma definição mais ampla e prática do geoprocessamento envolve um conjunto de conceitos, métodos e ferramentas que, utilizando computação eletrônica, processa dados georreferenciados para realizar análises e criar sínteses. Essas análises consideram tanto as propriedades internas dos eventos ou entidades, quanto suas relações geográficas e topológicas. Em outras palavras, o geoprocessamento permite a integração de informações espaciais e

características específicas dos elementos analisados, gerando informações relevantes e valiosas para a tomada de decisões, especialmente em relação ao uso e gestão de recursos ambientais (Da Silva, 2021).

Além disso, o geoprocessamento abrange várias disciplinas, como cartografia, sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG), e modelagem espacial. Essas técnicas permitem não apenas a visualização e interpretação de dados geográficos, mas também a realização de simulações, previsões e monitoramento de mudanças ambientais ao longo do tempo. A capacidade de cruzar dados espaciais com outras variáveis, como clima, uso do solo, ou padrões demográficos, faz do geoprocessamento uma ferramenta essencial em áreas como urbanismo, agricultura de precisão, planejamento ambiental, e infraestrutura (Da Silva, 2021).

4.3.1. *Sistemas de Informações Geográficas (SIG)*

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é composto por um conjunto de ferramentas especializadas que permitem a aquisição, armazenamento, recuperação, processamento e disseminação de informações espaciais. Essas informações geográficas descrevem os objetos do mundo real com base em sua localização geográfica em um sistema de coordenadas, além de seus atributos não visíveis diretamente, como cor, pH, custo, incidência de pragas, entre outros. Também se incluem as relações topológicas que esses objetos mantêm entre si. Dessa forma, um SIG é amplamente utilizado em estudos ambientais e de recursos naturais, sendo uma ferramenta poderosa para previsão de fenômenos e suporte à tomada de decisões de planejamento, sempre levando em consideração que os dados geográficos representam um modelo simplificado do mundo real (Burrough, 1986).

Além disso, um SIG pode ser descrito como um sistema que reúne quatro capacidades principais para lidar com dados georreferenciados: entrada de dados, gerenciamento e armazenamento, manipulação e análise, e saída de informações. Os dados são considerados georreferenciados quando possuem duas características fundamentais: sua dimensão física e sua localização espacial (Aronoff, 1989). Essas propriedades tornam o SIG essencial para uma ampla gama de aplicações, como monitoramento ambiental, gestão territorial e análise de impactos em diferentes escalas geográficas.

4.3.2. *Arcgis Pro*

O ArcGIS Pro (esri.com) é uma plataforma abrangente de softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG) desenvolvida pela empresa norte-americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Este conjunto de ferramentas especializadas

oferece soluções robustas para uma variedade de operações envolvendo análises espaciais, armazenamento, manipulação, processamento e visualização de dados geográficos, sempre com base em padrões internacionais amplamente aceitos na área de geotecnologia (Law, 2019).

Uma das características essenciais do ArcGIS Pro reside na sua capacidade de operacionalizar a organização de dados geográficos através de uma arquitetura baseada em temáticas modulares, o que otimiza o gerenciamento da informação espacial. Esse processo é estruturado por meio de camadas de dados vetoriais e raster, onde cada layer representa uma feição geográfica específica, como redes de drenagem (hidrografia), classes de cobertura vegetal ou elementos de infraestrutura urbana. Intrínsecas a estas camadas, encontram-se as tabelas de atributos, que armazenam os dados descritivos (alfanuméricos) cruciais para a caracterização detalhada das entidades geográficas, provendo informações como nomenclatura, categorização taxonômica, valores quantitativos ou classificações específicas (Bajjali, 2023).

O software não apenas suporta a manipulação elementar dos dados, mas também viabiliza a execução de operações complexas de geoprocessamento. Tais operações abrangem desde a realização de consultas espaciais simples (queries) até a modelagem avançada de fenômenos geoespaciais e ambientais. Adicionalmente, o ArcGIS Pro integra-se de maneira robusta com insumos provenientes de sensoriamento remoto, processando dados de alta e baixa resolução, e se conecta a sistemas de gerenciamento de bancos de dados georreferenciados. Sua versatilidade permite a geração de uma vasta gama de produtos cartográficos temáticos, servindo de subsídio técnico indispensável em projetos de planejamento territorial, gestão ambiental estratégica, monitoramento de recursos naturais e inúmeras outras aplicações setoriais. A habilidade de sintetizar e analisar dados vetoriais, raster e alfanuméricos simultaneamente confere-lhe a capacidade de gerar análises multivariadas e customizadas, adaptando-se precisamente às demandas de diferentes segmentos profissionais (Hinton, 1996).

4.4. Vegetação Nativa

A vegetação nativa constitui um pilar fundamental da legislação ambiental brasileira e, por conseguinte, dos critérios de sustentabilidade aplicados a empreendimentos rurais. No contexto da gestão territorial, essa cobertura vegetal, também referenciada como vegetação natural, é regida primariamente pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN), frequentemente denominada Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), legislação que configura o principal arcabouço normativo que disciplina as ações de proteção, uso sustentável e recomposição dos remanescentes vegetais, notadamente no território rural. A LPVN confere aos entes federativos a responsabilidade comum pela formulação de políticas que visem à

preservação e restauração das funções ecológicas e sociais da vegetação nativa, demandando a colaboração ativa da sociedade civil.

Sob o prisma legal, a vegetação nativa abarca toda aquela que se manifesta de forma natural nos biomas e ecossistemas nacionais. Esta classificação engloba não apenas a vegetação primária, que se mantém em seu estado original com pouquíssima ou nenhuma alteração antrópica, mas também a vegetação secundária, que corresponde ao processo de regeneração natural de uma área que já sofreu alguma intervenção ou corte anterior, mas que ainda preserva as características de seu ecossistema de origem (Santana, 2020).

É fundamental que se compreenda que a legislação não inclui nesta categoria as culturas agrícolas estabelecidas, as pastagens introduzidas artificialmente ou as plantações florestais homogêneas com finalidade comercial, como o cultivo de espécies exóticas. A importância da vegetação nativa é refletida nas obrigações impostas aos proprietários rurais, que devem preservar frações específicas de seus imóveis: as Áreas de Preservação Permanente (APPs), que protegem áreas ecologicamente sensíveis como as margens de cursos d'água e topos de morro; e a Reserva Legal (RL), uma porção da propriedade dedicada à conservação da vegetação nativa com vistas ao uso econômico sustentável dos recursos naturais. A manutenção dessa cobertura vegetal é, portanto, uma imposição legal destinada a garantir as funções ambientais vitais e o balanço ecológico do território (Mendes *et. al.*, 2024).

4.5. Legislação Vigente

O RenovaBio, instituído pela Lei nº 13.576 em 26 de dezembro de 2017, representa a Política Nacional de Biocombustíveis, com o objetivo primordial de impulsionar a produção de combustíveis renováveis de forma mais sustentável. O programa estabelece um tratamento diferenciado no mercado para os biocombustíveis que demonstram menores emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de seu ciclo de vida (Oliveira, 2023).

Este desempenho é aferido pela Nota de Eficiência Energético-Ambiental, calculada com base na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a nota atribuída a cada unidade produtora certificada, proporcional ao volume fabricado, resulta na geração de Créditos de Descarbonização (CBios). A credibilidade do processo de certificação e a conformidade das informações são garantidas por meio de auditorias realizadas por empresas de inspeção credenciadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Oliveira, 2023).

Um dos pilares ambientais centrais do programa é a restrição rigorosa ao uso do solo, garantindo que a expansão da produção de biocombustíveis não ocorra por meio de novo

desmatamento: a elegibilidade da biomassa de origem agrícola para ser contabilizada no RenovaBio é determinada pelo histórico de uso do solo do imóvel rural fornecedor, conforme estabelecido no Informe Técnico nº 02/SBQ da ANP. O requisito fundamental estabelece que a área de cultivo não pode ter sofrido supressão de vegetação nativa a partir de 26 de dezembro de 2017, data de promulgação da lei, sendo este o marco temporal para a vedação (Cruz, *et. al.*, 2024).

Apesar da Lei ter sido sancionada em dezembro de 2017, a sua regulamentação detalhada pela Resolução ANP nº 758/2018 só ocorreu em novembro de 2018, o que criou um período de transição (gap regulatório). Contudo, o critério de elegibilidade é aplicado retroativamente à data de criação da política. O Informe Técnico da ANP detalha que a comprovação se dá por análise de imagens de satélite com resolução mínima de trinta metros (sugere-se os satélites Landsat-8 ou Sentinel-2) (Cruz, *et. al.*, 2024).

Para o intervalo entre 26 de dezembro de 2017 e 27 de novembro de 2018, caso seja detectada supressão, o produtor tem a obrigação de comprovar que a intervenção estava em total conformidade com as exigências ambientais vigentes à época, incluindo licenças. Após a publicação da resolução (novembro de 2018), o critério de não-supressão é de tolerância zero (Cruz, *et. al.*, 2024).

A aplicação da restrição é específica: incide apenas sobre as áreas do imóvel rural que são diretamente utilizadas para o cultivo da biomassa a ser certificada, e o conceito de vegetação nativa, neste caso, é amplo e abrange as formações primárias e secundárias; a única flexibilização é a de que a remoção de um único exemplar arbóreo isolado não é caracterizada como supressão, desde que em observância às normas ambientais aplicáveis, e é importante ressaltar que esta exigência de não-supressão não se aplica à biomassa que é gerada a partir de resíduos (Oliveira, 2023).

O RenovaBio se insere em um contexto de marcos legais nacionais, como o Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.651/2012), que regula o uso e a proteção da vegetação nativa em propriedades rurais e estabelece as normas para Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais, utilizando o Cadastro Ambiental Rural (CAR) como ferramenta de monitoramento (Oliveira, 2023).

4.6. Município de Altinópolis - SP

Altinópolis, município localizado na região nordeste do estado de São Paulo, possui uma área total aproximada de 925 km². Desse total, apenas cerca de 3 km² correspondem à zona urbana, evidenciando o predomínio do espaço rural na configuração territorial do município.

Segundo o Censo LUPA (Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária) de 2009, existem 543 Unidades de Produção Agropecuária (UPA) em Altinópolis, cuja soma das áreas atinge 87.501 hectares. Destas, 364 unidades (cerca de 67% do total) são de pequeno porte, com até 100 hectares, mas representam somente 16,4% da área produtiva total, equivalente a 14.368 hectares. O mesmo levantamento apontou que a produção agrícola local é dominada por monoculturas tecnificadas, principalmente de cana-de-açúcar e eucalipto, que juntas ocupam aproximadamente 41.408 hectares, o que corresponde a 47% da área agropecuária do município (São Paulo, 2009).

Em Altinópolis, o módulo fiscal é definido em 22 hectares. De acordo com a legislação federal (BRASIL, 2006), considera-se agricultura familiar aquela desenvolvida em propriedades de até quatro módulos fiscais, o que, no caso do município, corresponde a uma área máxima de 88 hectares. Essa relação reforça a importância da pequena produção rural no contexto local, embora ela enfrente desafios significativos frente à concentração fundiária e à expansão das grandes culturas agroindustriais (São Paulo, 2009).

Um ponto de destaque é a forte influência do setor agroindustrial na economia municipal: a expansão das monoculturas, especialmente da cana-de-açúcar e do eucalipto, representa a principal base econômica de Altinópolis. No entanto, essa dependência de commodities voltadas ao mercado externo gera vulnerabilidade socioeconômica, tornando a região suscetível às oscilações de preços internacionais e à perda de diversidade produtiva (São Paulo, 2009).

No aspecto ambiental, o cultivo intensivo da cana-de-açúcar constitui um dos maiores desafios para a sustentabilidade territorial. Estudos estimam que essa cultura possa provocar, em média, 12 toneladas de erosão por hectare a cada ano, acarretando degradação significativa dos solos e comprometendo a fertilidade das terras agrícolas. Além disso, há um impacto expressivo sobre os recursos hídricos, que são fundamentais tanto para a manutenção das atividades agropecuárias quanto para o equilíbrio ecológico da região (Alvarenga, 2008).

4.7. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*, ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é o índice de vegetação mais amplamente empregado no sensoriamento remoto, configurando-se como um indicador numérico essencial para mensurar a saúde, o vigor e a densidade da vegetação (Huang, 2021).

Seu princípio fundamental reside nas propriedades ópticas únicas das plantas saudáveis, que são determinadas pela Clorofila e pela Estrutura Celular das folhas. A eficácia do NDVI baseia-se no forte contraste da Assinatura Espectral da vegetação entre duas bandas: na luz Vermelha (RED / Visível), a clorofila absorve a maior parte da energia para a fotossíntese, resultando em baixa reflectância. Já no Infravermelho Próximo (NIR / Não Visível), a estrutura celular das folhas reflete intensamente a energia como mecanismo de termorregulação, resultando em alta reflectância (Murakami, 2016).

O NDVI quantifica essa relação através de uma fórmula normalizada (padronizada para não depender das condições de iluminação), dada por: $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$, onde NIR representa a reflectância na faixa do infravermelho próximo e RED corresponde à reflectância na faixa do vermelho do espectro eletromagnético. O valor resultante varia em uma escala numérica de -1,0 a +1,0. Valores positivos altos (próximos a 1,0) indicam vegetação muito densa e vigorosa, como florestas e vegetação nativa saudável, enquanto valores próximos de 0,0 ou negativos correspondem a solo exposto, rochas, água ou estruturas urbanas. No contexto desta pesquisa, o NDVI obtido pelo Sentinel-2 foi essencial para a qualificação da cobertura, fornecendo um indicador da saúde intrínseca do fragmento e confirmando espectralmente que a área digitalizada manualmente possuía o vigor esperado (valores altos, próximos a 0,74). Adicionalmente, permitiu a detecção de estresse em áreas de efeito de borda, onde o vigor é ligeiramente menor, auxiliando o classificador humano a tomar decisões informadas sobre os limites do polígono (Pamuji, 2023).

4.8. MapBiomass

O MapBiomass (Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra do Brasil) (<https://brasil.mapbiomas.org/>) é uma iniciativa pioneira que se consolidou como a principal fonte de dados para o monitoramento das transformações da paisagem nacional. Seu papel é fornecer uma série histórica anual, com alta granularidade, das classes de uso e cobertura do solo em todo o território brasileiro. O projeto opera processando anualmente milhares de imagens de satélite, predominantemente da missão Landsat, com resolução espacial de 30 metros, desde 1985 até o presente. O grande diferencial do MapBiomass é a capacidade de gerar mapas consistentes ao longo de décadas, permitindo a análise da dinâmica de mudança na paisagem. A plataforma utiliza algoritmos de aprendizado de máquina (Machine Learning) em ambiente de processamento em nuvem (Google Earth Engine) para classificar os pixels, garantindo a uniformidade metodológica e a capacidade de processar volumes massivos de dados (Moreira, 2023).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esta análise de comparação de tecnologias de monitoramento, é importante ressaltar que, segundo a legislação do RenovaBio, a inelegibilidade de uma área para a produção de biocombustíveis somente é caracterizada quando a supressão é seguida pela conversão do solo para o plantio da cultura destinada ao biocombustível (por exemplo, cana-de-açúcar). Se a área suprimida for destinada a outros usos (como pastagem ou abandono), o CAR não seria considerado inelegível pelo programa. No presente estudo, a variável de conversão de uso do solo foi isolada para permitir a avaliação pura da eficácia do sensoriamento remoto (Satélite vs. Drone) na detecção da alteração da cobertura.

Neste trabalho de conclusão de curso, foi realizada uma comparação entre imagens de satélite e imagens obtidas por drone para a análise da supressão da vegetação nativa, no âmbito do programa RenovaBio, seguindo os critérios de elegibilidade de 3 anos consecutivos (2023, 2024 e 2025), referentes às safras de 2022, 2023 e 2024 em comparação com imagens de 2017. A pesquisa teve início com a caracterização da área de estudo, localizada no município de Altinópolis, no estado de São Paulo, região marcada pela presença de vegetação nativa impactada por atividades humanas, em especial a monocultura tecnificada de cana-de-açúcar.

A coleta de dados foi feita por meio de duas fontes principais: imagens de satélite e imagens aéreas adquiridas com drone. As imagens de satélite utilizadas foram obtidas dos sensores CBERS-04A-4A e Sentinel-2 Level 2A, acessadas, respectivamente, por meio das plataformas “INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais” (<https://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>) e “Copernicus Browser” (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). A princípio, ambas forneceram dados multiespectrais com resolução espacial de 10 metros por pixel, adequadas para o monitoramento da cobertura vegetal. As bandas espectrais empregadas incluíram o infravermelho próximo (NIR), Red Edge e as bandas visíveis (RGB), fundamentais para a detecção de variações na vegetação nativa da área em questão.

As imagens de drone e satélite foram submetidas ao mesmo fluxo de processamento: georreferenciamento, aplicação não supervisionadas, e geração de mapas temáticos com o software ArcGIS Pro. Esses mapas mostraram visualmente as áreas de vegetação nativa preservada e aquelas em que ocorreu possível supressão, possibilitando uma comparação entre os métodos quanto à precisão e nível de detalhamento. A análise considerou as diferenças de resolução espacial e a eficácia de cada tecnologia na detecção de mudanças na cobertura vegetal.

Foi conduzida uma análise quantitativa para comparar a área de vegetação suprimida detectada por cada tipo de imagem, utilizando técnicas manuais. A acurácia das classificações foi avaliada, destacando as vantagens e limitações de cada abordagem. Entre os desafios observados estiveram a interferência de nuvens nas imagens de satélite e as limitações operacionais dos drones, como tempo de voo e área de cobertura, questões que foram discutidas à luz da aplicabilidade das ferramentas no monitoramento da vegetação nativa dentro das diretrizes do RenovaBio.

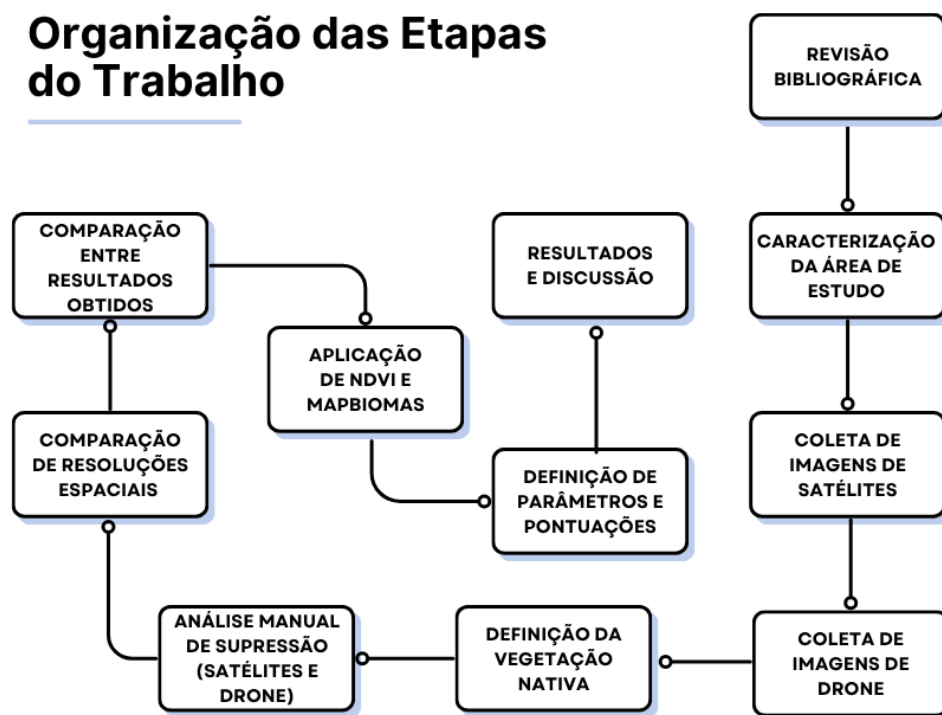
Simultaneamente ao trabalho prático, foi realizada uma revisão bibliográfica voltada ao embasamento metodológico e à seleção dos indicadores utilizados na análise. Essa revisão abrangeu estudos que utilizaram sensoriamento remoto, especialmente com drones e satélites, em contextos de monitoramento ambiental. Também foram analisadas metodologias comparativas entre essas tecnologias em diferentes escalas espaciais, contribuindo para a fundamentação técnica e científica da pesquisa.

Com base nas análises realizadas e na literatura consultada, foram desenvolvidas propostas preliminares para aprimorar o monitoramento ambiental no contexto do RenovaBio. As sugestões buscam aumentar a precisão na detecção de alterações na cobertura vegetal e melhorar os mecanismos de controle e fiscalização, sempre em conformidade com a legislação vigente.

A Figura 2 apresenta o fluxograma que detalha, de forma sequencial e lógica, a metodologia empregada para a análise multitemporal da área de estudo. Este esquema é crucial para demonstrar o rigor técnico e a transparência das etapas de geoprocessamento, desde a definição do referencial teórico-legal até a validação cartográfica dos resultados.

Figura 2 – Fluxograma esquemático das etapas metodológicas

Organização das Etapas do Trabalho



Fonte: Autoria própria.

5.1. Análise de Áreas de Vegetação Nativa

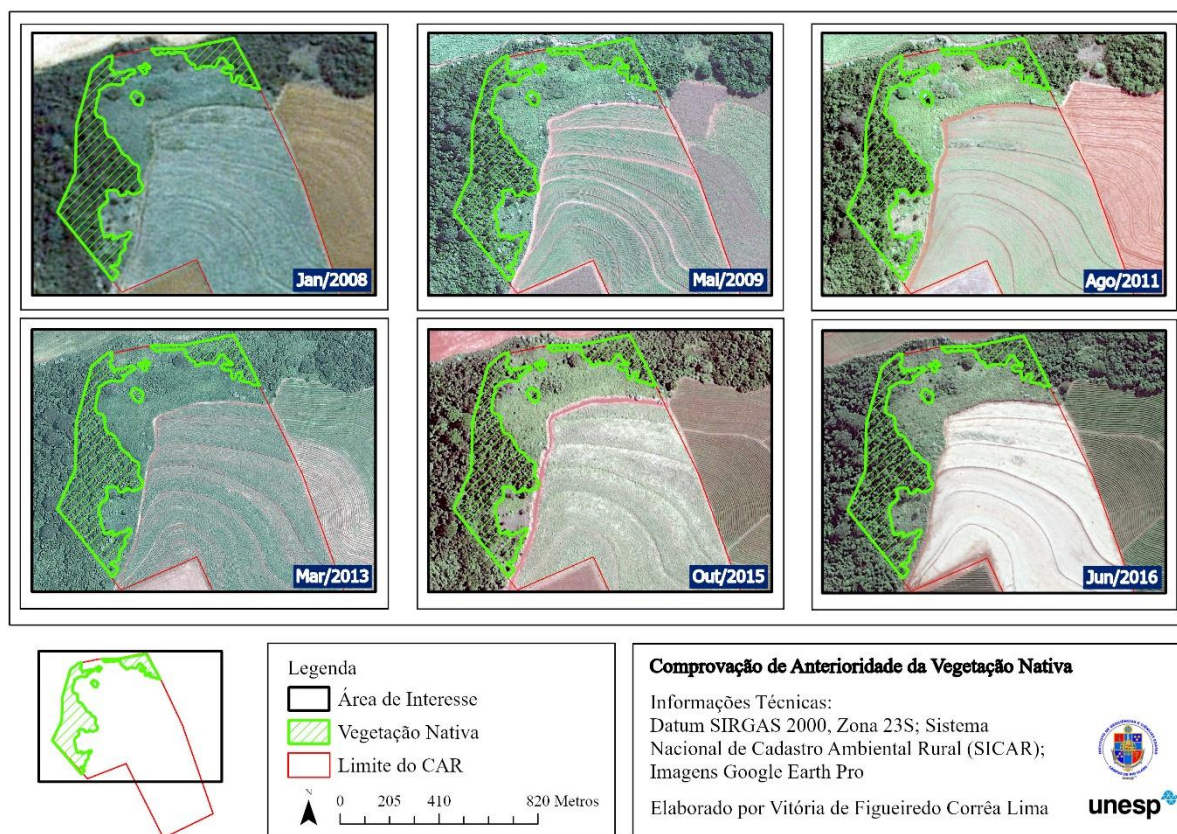
O mapeamento da vegetação nativa na área de estudo, delimitada pelo Cadastro Ambiental Rural (CAR), foi realizado com o objetivo primordial de comprovar a anterioridade dessa cobertura vegetal em relação ao marco legal da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017. A determinação da persistência da vegetação em um período anterior a 2017 é um critério indispensável para a validação da sustentabilidade da biomassa, conforme os regulamentos do programa.

Para atingir este objetivo, empregou-se uma análise multitemporal diacrônica através de imagens de satélite disponíveis no acervo do Google Earth Pro. O recorte temporal abrange o período de janeiro de 2008 a junho de 2016, conforme ilustrado na Figura 3. A escolha desse período visa estabelecer um ponto de corte temporal que antecede a legislação do RenovaBio, permitindo classificar como nativa a vegetação que se manteve estável e ininterrupta ao longo desses anos.

O processamento das imagens e a delimitação dos polígonos foram conduzidos no software ArcGIS Pro. Primeiramente, múltiplas imagens de satélite das datas selecionadas (2008, 2009, 2011, 2013, 2015 e 2016) foram exportadas e georreferenciadas no ArcGIS Pro para garantir a precisão espacial do mapa, utilizando o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 (Zona 23S). Em seguida, foi realizada uma interpretação visual de todas as imagens para identificar os fragmentos de vegetação.

O critério de classificação adotado considerou como “Vegetação Nativa” apenas a cobertura vegetal que apresentou evidência visual de sua existência e estabilidade ininterrupta desde a data mais antiga disponível na série (janeiro de 2008) até o ano final (junho de 2016). É fundamental destacar que, seguindo o entendimento dos regulamentos do RenovaBio, que considera supressão quando há contato entre copas, os indivíduos arbóreos isolados não foram considerados na delimitação do polígono de vegetação nativa, focando-se apenas em áreas com densidade de dossel mais elevada. Por fim, a delimitação final da área de Vegetação Nativa foi digitalizada manualmente no ArcGIS Pro, sobrepondo o limite do CAR da área de estudo, resultando no mapa apresentado na Figura 3, que serve como prova cartográfica da anterioridade da Vegetação Nativa.

Figura 3 - Delimitação da Vegetação Nativa e Análise de Anterioridade (2008–2016)



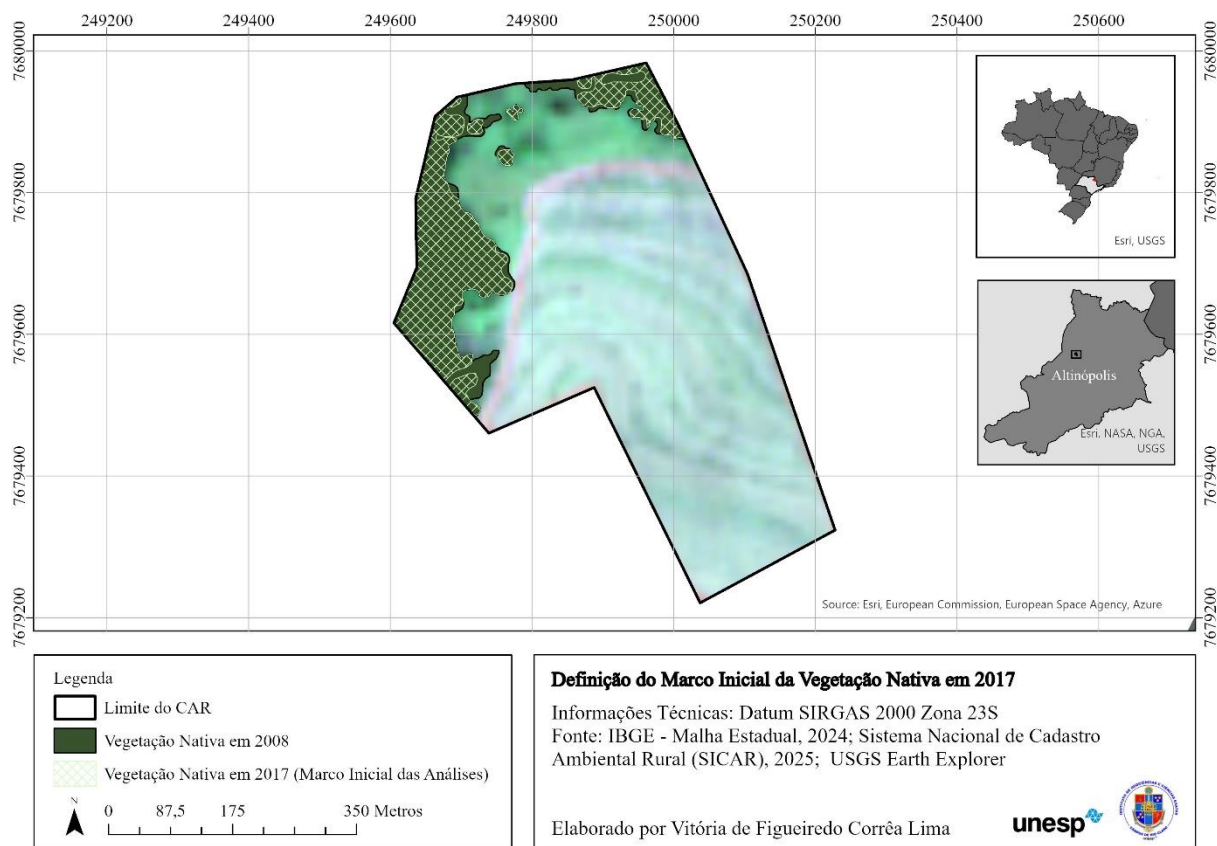
Fonte: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), 2025; Google Earth Pro. Autoria própria.

A Figura 4 apresenta o Marco Inicial da Vegetação Nativa em 2017, um elemento cartográfico crucial para as análises subsequentes do estudo. Este mapa resulta da comparação multitemporal entre a área mapeada como Vegetação Nativa em janeiro de 2008 (conforme definido na metodologia anterior) e a situação dessa mesma área em junho de 2017, data que estabelece o marco legal do RenovaBio.

O polígono "Vegetação Nativa em 2008", representa a cobertura vegetal estável e ininterrupta identificada no período de 2008 a 2016. Ao sobrepor esta área às imagens de satélite de 2017, foi possível identificar e excluir as porções que sofreram supressão ou apresentaram redução na densidade do dossel no intervalo entre as análises.

Desta forma, a área destacada em verde claro (polígono "Vegetação Nativa em 2017 (Marco Inicial das Análises)") corresponde apenas aos fragmentos que mantiveram a estabilidade da cobertura vegetal original até a data de corte legal. É este polígono de 2017 que foi como base zero para a continuidade da análise multitemporal, garantindo que o estudo se restrinja à biomassa validamente anterior ao marco regulatório. Para a delimitação precisa do marco inicial, foi utilizada a imagem do satélite Sentinel 2 (tile 23KKS), datada de 16/11/2017.

Figura 4 – Definição do Marco Inicial da Vegetação Nativa em 2017



Fonte: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), 2025; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

5.2. Coleta e Processamento das Imagens Sentinel 2 - Level 2A

As imagens do satélite Sentinel-2 foram adquiridas para os anos de 2017, 2023, 2024 e 2025, respeitando critérios de qualidade como baixa cobertura de nuvens através da plataforma “Copernicus Browser” (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). As cenas selecionadas foram do tile geográfico identificado como T23KKS, em que as imagens de 2017 foram obtidas em 16 de novembro de 2017, as imagens da safra de 2022, foram obtidas em 19 de janeiro de 2023, as imagens da safra de 2023, foram obtidas em 29 de janeiro de 2024, e as imagens da safra de 2024, foram obtidas em 17 de fevereiro de 2025. O recorte das imagens foi feito com base nos limites da área de estudo, seguido da seleção das bandas relevantes e do processamento no software ArcGIS Pro. A partir dessas imagens, foram elaborados mapas temáticos que representam a distribuição da cobertura vegetal ao longo do tempo, permitindo identificar áreas de supressão.

5.3. Coleta e Processamento das Imagens CBERS - 04A

Complementarmente, também foram adquiridas imagens do satélite CBERS-04A referentes aos mesmos anos de análise, com o objetivo de compor a análise temporal e a validação geométrica. As imagens utilizadas correspondem às datas de 13 de maio de 2023, 19 de junho de 2024 e 26 de maio de 2025. Essas imagens foram obtidas por meio do Catálogo de Imagens do INPE (<https://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore>), considerando a menor presença de nuvens e compatibilidade temporal com as imagens do Sentinel-2.

É crucial salientar que o satélite CBERS-04A não possui imagens disponíveis para o ano de 2017, pois seu lançamento ocorreu apenas em dezembro de 2019. Por essa razão, a definição do marco inicial (2017) e a análise comparativa de longo prazo foram realizadas exclusivamente com o satélite Sentinel-2, enquanto as imagens do CBERS foram empregadas para compor a análise temporal e a validação geométrica das safras de 2022, 2023 e 2024, aproveitando sua alta resolução para um monitoramento detalhado.

A seleção, recorte e processamento dessas imagens seguiram os mesmos critérios adotados anteriormente. O processamento também foi feito no ArcGIS Pro, com a estratégia aplicada de fusão de bandas espectrais com diferentes resoluções, utilizando a técnica de *pan-sharpening*, em que a banda pancromática de maior resolução espacial (2 metros), presente nos sensores do CBERS-04A, foi combinada com as bandas multiespectrais de menor resolução (10 metros). Essa combinação resultou em imagens coloridas com maior resolução espacial e espectral, com a finalidade de gerar produtos visuais e analíticos mais detalhados, mesmo sem a captação original desses dados em resolução tão refinada.

Com base nesses dados, foram gerados mapas temáticos para cada ano, permitindo analisar alterações espaciais na vegetação nativa e contribuindo para uma compreensão mais robusta da dinâmica ambiental da região estudada.

5.4. Coleta e Processamento das Imagens do Drone DJI Air 2S

O mapeamento foi realizado no dia 10 de abril, utilizando um drone DJI Air 2S, equipamento dotado de sensor óptico de alta resolução, adequado para levantamentos aerofotogramétricos de pequena escala. Para o planejamento e execução do voo, empregou-se o software Map Pilot Pro, operado por meio de um iPhone 15 Pro Max.

O Map Pilot Pro foi utilizado em sua versão gratuita, que possibilita a definição dos parâmetros básicos de voo e a geração do plano de sobrevoo automático. O plano de voo foi elaborado no dia anterior à coleta dos dados, cobrindo uma área total de 48,26 hectares. O

padrão de voo adotado foi a emissão normal em linhas paralelas, sem cruzamento de trajetórias ou formação de quadrículas, resultando em uma coleta linear das imagens. A altitude de voo foi fixada em 80 metros a partir do ponto de decolagem, com velocidade média de 10 m/s. A sobreposição longitudinal e lateral das imagens foi de 75% em ambos os sentidos, garantindo cobertura contínua e adequada para posterior processamento fotogramétrico.

Durante o levantamento, o drone percorreu uma distância total de 18,58 km, com duração aproximada de 32 minutos e 17 segundos, incluindo pausas para substituição de bateria. Devido à interrupção em um dos voos, foi necessário reiniciar a operação, resultando em duas missões distintas. O total final registrado foi de 788 imagens georreferenciadas, número superior ao estimado inicialmente pelo software (762 imagens). As fotografias totalizaram 6,4 GB de armazenamento, correspondendo a 2.842 pontos de coleta automática.

Esses dados compuseram a base para o processamento fotogramétrico e elaboração dos produtos cartográficos utilizados nas análises subsequentes.

O processamento das imagens obtidas durante o levantamento aerofotogramétrico foi realizado no software Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, 2023), amplamente utilizado para o processamento de dados provenientes de drones e câmeras digitais.

Inicialmente, as 788 fotografias georreferenciadas capturadas pelo drone DJI Air 2S foram importadas para o ambiente do Metashape, que executou a etapa de alinhamento das imagens, na qual foram identificados pontos-chave (*key points*) e pontos de amarração (*tie points*), possibilitando a geração de uma nuvem de pontos esparsa. A partir dessa etapa, realizou-se a otimização da calibração da câmera e o refinamento dos parâmetros internos e externos de orientação.

Em seguida, o programa gerou a nuvem de pontos densa, com base na correlação estereoscópica entre as imagens sobrepostas (75% de sobreposição longitudinal e lateral), que serviu como base para a modelagem tridimensional da superfície, possibilitando a criação de produtos como o Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT) e ortomosaico georreferenciado.

O sensor óptico do DJI Air 2S possui resolução de 20 megapixels, com tamanho de pixel físico de aproximadamente 2,4 μm , o que confere alta precisão e detalhamento às imagens capturadas. Após o processamento, o tamanho de pixel resultante (Ground Sample Distance – GSD) foi de aproximadamente 2,2 centímetros, valor compatível com levantamentos de baixa altitude (80 metros), garantindo acurácia espacial satisfatória para análises de uso e cobertura do solo.

O ortomosaico final foi exportado em formato GeoTIFF, compatível com softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG), e posteriormente utilizado nas etapas de análise espacial e classificação manual feitas utilizando o software ArcGis Pro.

5.5. Aplicação do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada)

O cálculo do NDVI foi realizado como uma etapa de análise espectral complementar para avaliar o vigor e a saúde da vegetação nativa na área de estudo, fornecendo um suporte de qualificação aos resultados de quantificação geométrica. O satélite utilizado foi o Sentinel-2 (Banda TCI L2A - Cor Verdadeira Corrigida Atmosfericamente), selecionado devido à sua superioridade espectral. As bandas essenciais empregadas foram a Banda 4 (RED), correspondente à faixa do vermelho visível e crucial para medir a absorção da clorofila, e a Banda 8 (NIR), correspondente à faixa do infravermelho próximo e fundamental para medir a refletância da estrutura celular. O processamento e o georreferenciamento das imagens foram realizados no software ArcGIS Pro.

O processamento das imagens Sentinel-2 para obtenção do NDVI foi conduzido em ambiente ArcGIS Pro, seguindo a fórmula padrão. As imagens L2A do Sentinel-2, que já incluem correção atmosférica (Refletância na Superfície), foram importadas e alinhadas ao sistema de coordenadas SIRGAS 2000, Zona 23S. O NDVI foi calculado utilizando a ferramenta *Raster Calculator* (Calculadora Raster) do ArcGIS Pro, aplicando-se a equação:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

No *Raster Calculator*, a expressão foi configurada da seguinte forma: ("Sentinel2_B8" - "Sentinel2_B4") / ("Sentinel2_B8" + "Sentinel2_B4").

O raster resultante (NDVI) foi classificado com uma paleta de cores variando do azul/roxo para os valores mais baixos até o vermelho intenso para os valores mais altos, facilitando a identificação visual do vigor da vegetação. A interpretação concentrou-se na correlação dos valores mais altos, indicativos de vegetação robusta, com a área do polígono de vegetação nativa. Esse método garantiu a obtenção de um índice espectral preciso, cuja análise complementou a avaliação geométrica da vegetação nativa.

5.6. Coleta de Dados do MapBiomass

O MapBiomass (Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra do Brasil - Coleção 8.0) foi empregado como uma ferramenta de auditoria temporal e contextualização histórica da

área de estudo, com o objetivo de validar o histórico de uso e cobertura do solo no polígono de interesse. A fonte de dados foi acessada diretamente por meio do Living Atlas (Atlas Interativo) do ArcGIS Pro, o que garantiu o acesso imediato a dados georreferenciados e consolidados da série temporal. Foram consultadas as informações referentes ao ano de 2025 para comparação direta com o mapeamento primário e analisada a série histórica para confirmar a permanência da Formação Florestal. Os dados do MapBiomas possuem resolução espacial de 30 metros (base Landsat) e o foco principal foi a classe “Formação Florestal”, correlacionada com a área de vegetação nativa mapeada em campo.

A extração e o processamento dos dados foram realizados integralmente no ambiente ArcGIS Pro, aproveitando a integração do *Living Atlas*. Os dados do MapBiomas foram acessados no painel do *Living Atlas* e adicionados ao mapa, alinhando-se automaticamente ao sistema de coordenadas do projeto (SIRGAS 2000, Zona 23S). O polígono do limite do CAR da área de estudo foi utilizado como máscara de recorte (*Clip Raster*) para isolar apenas os pixels de interesse. Em seguida, o raster de uso e cobertura do solo foi reclassificado para destacar as classes relevantes para a análise.

5.7. Definição de Critérios de Desempenho

Para assegurar a escolha dos dados de sensoriamento remoto mais adequados aos objetivos deste mapeamento, que demandava precisão e capacidade de escala para atender aos requisitos do RenovaBio, realizou-se uma avaliação comparativa entre três fontes principais: o satélite CBERS-4A, o satélite Sentinel-2 e a captura por ARP (Aeronave Remotamente Pilotada). A metodologia de avaliação baseou-se em cinco critérios operacionais considerados essenciais para a delimitação da vegetação nativa e o monitoramento da supressão.

Para cada critério, os sensores foram pontuados em uma escala de 1 a 3, onde 1 (Ruim) indicou desempenho insatisfatório ou limitações significativas; 2 (Moderado) indicou desempenho satisfatório, mas com potencial para melhorias; e 3 (Bom) indicou o melhor desempenho, oferecendo máxima adequação ao critério operacional.

O primeiro critério, Custo por Área (Disponibilidade Gratuita/Escala), avaliou a viabilidade econômica do uso dos dados para projetos que abrangem grandes extensões territoriais. Foi crucial para garantir a replicabilidade e o baixo custo do mapeamento, favorecendo fontes de dados gratuitos (satélites) em detrimento de custos logísticos do ARP.

O segundo critério foi a Resolução Espacial (Capacidade de Detalhe Geométrico), que se mostrou fundamental para a delimitação precisa dos fragmentos de vegetação nativa e a

identificação de bordas; dados de resolução mais alta foram valorizados por facilitarem o mapeamento em escala de propriedade.

Em seguida, a Frequência de Revisita (Disponibilidade de Imagens Recentes) foi avaliada como essencial para a análise multitemporal diacrônica e para garantir a disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens nas datas de interesse, como o marco de 2017. Uma alta frequência permitiu um monitoramento temporal mais consistente.

O critério Qualidade para Mapeamento (Interpretação Visual e Espectral) uniu a capacidade do sensor de discriminar a vegetação de outras classes de uso do solo (através das bandas espectrais) e a adequação das imagens para a interpretação visual e digitalização manual. Este foi um critério crucial, pois o método adotado dependeu tanto do potencial de classificação automática quanto da análise visual minuciosa do analista, exigindo que as imagens mitigassem o viés de interpretação.

Por fim, a Praticidade Operacional e Escalabilidade avaliou a facilidade e rapidez de aquisição, processamento e uso dos dados em projetos de grande escala. Foi um fator determinante para avaliar a eficiência do método em grandes áreas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Comparação entre Imagens

A comparação entre as imagens de satélite e as imagens obtidas por drone permitiu avaliar com maior precisão as alterações na cobertura da vegetação nativa na área de estudo, especialmente no contexto da política pública RenovaBio. Cada uma das tecnologias utilizadas apresentou características específicas que influenciaram diretamente nos resultados obtidos e na qualidade das análises. Foram feitas classificações de vegetação nativa de forma manual, em complementação com a utilização do NDVI e MapBiomias.

6.1.1. *Análise de Imagens do Satélite Sentinel 2 – Level 2A*

A comparação das imagens Sentinel-2 dos anos de 2023, 2024 e 2025 com o ano base de 2017 revelou um cenário de declínio contínuo da vegetação nativa na área analisada. Os mapas gerados indicam uma redução progressiva das áreas vegetadas ao longo do período, sem evidências de regeneração significativa ou recuperação da cobertura natural da vegetação nativa.

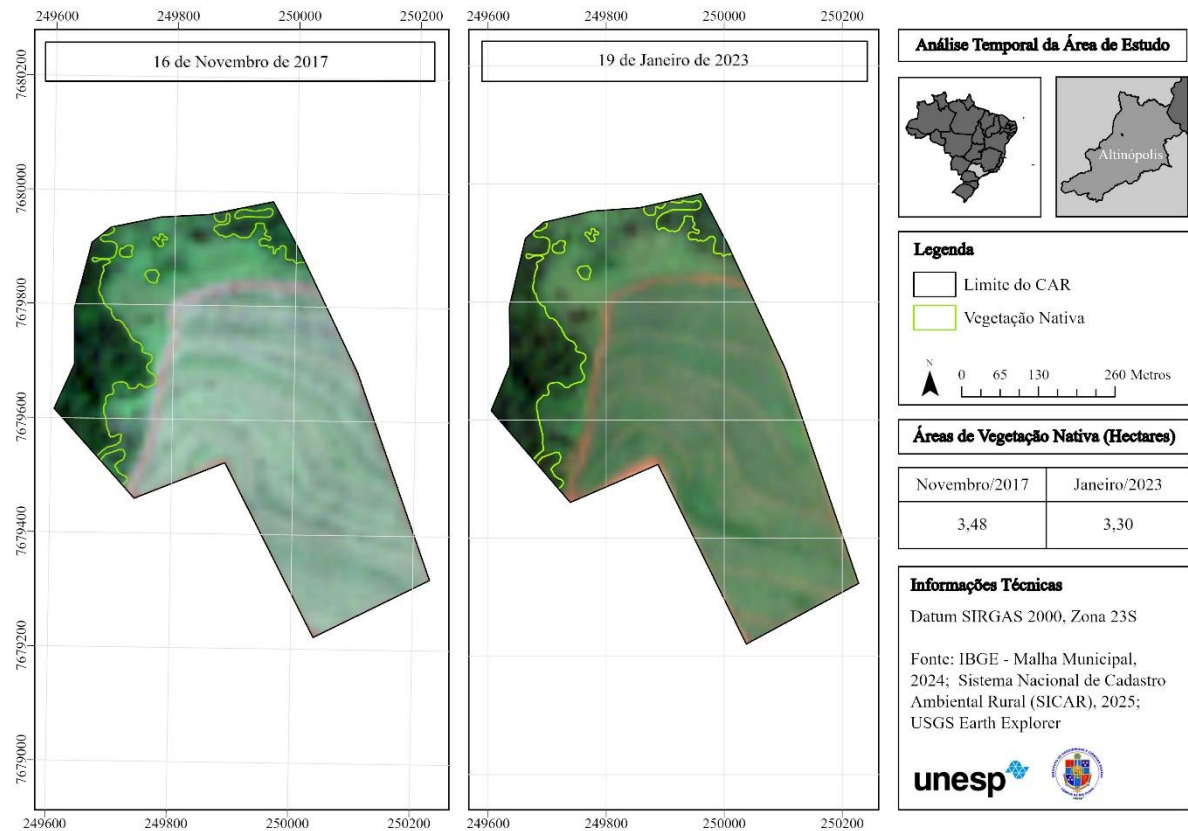
Apesar da capacidade do satélite Sentinel-2 em captar dados multiespectrais úteis para a análise de cobertura do solo, foi constatada certa dificuldade em identificar com exatidão os fragmentos de vegetação nativa, principalmente aqueles de menor porte. A resolução espacial de 10 metros limita a distinção entre vegetação nativa, áreas de pastagem e culturas perenes, o que pode gerar incertezas na delimitação precisa das manchas de vegetação natural.

Ainda assim, mesmo com essas limitações, os dados analisados demonstram uma tendência clara de supressão vegetal ao longo dos últimos anos, com perda de cobertura nativa especialmente evidente nas bordas de fragmentos já existentes, e é válido ressaltar que a delimitação das áreas de vegetação nativa foi realizada manualmente, com base na interpretação visual das imagens e no histórico da paisagem, conforme descrito na legislação vigente.

A Figura 5 mostra a comparação entre os anos de 2017 e 2023, evidenciando as primeiras áreas de perda de cobertura vegetal, especialmente nas bordas de fragmentos já existentes.

É possível notar uma ligeira redução na vegetação nativa, com a área passando de 3,48 hectares (2017) para 3,30 hectares (2023). A perda de 0,18 hectares representa um declínio discreto, mas já indica impactos nas bordas dos fragmentos. Visualmente, nota-se clareamento em algumas áreas, sugerindo início de supressão.

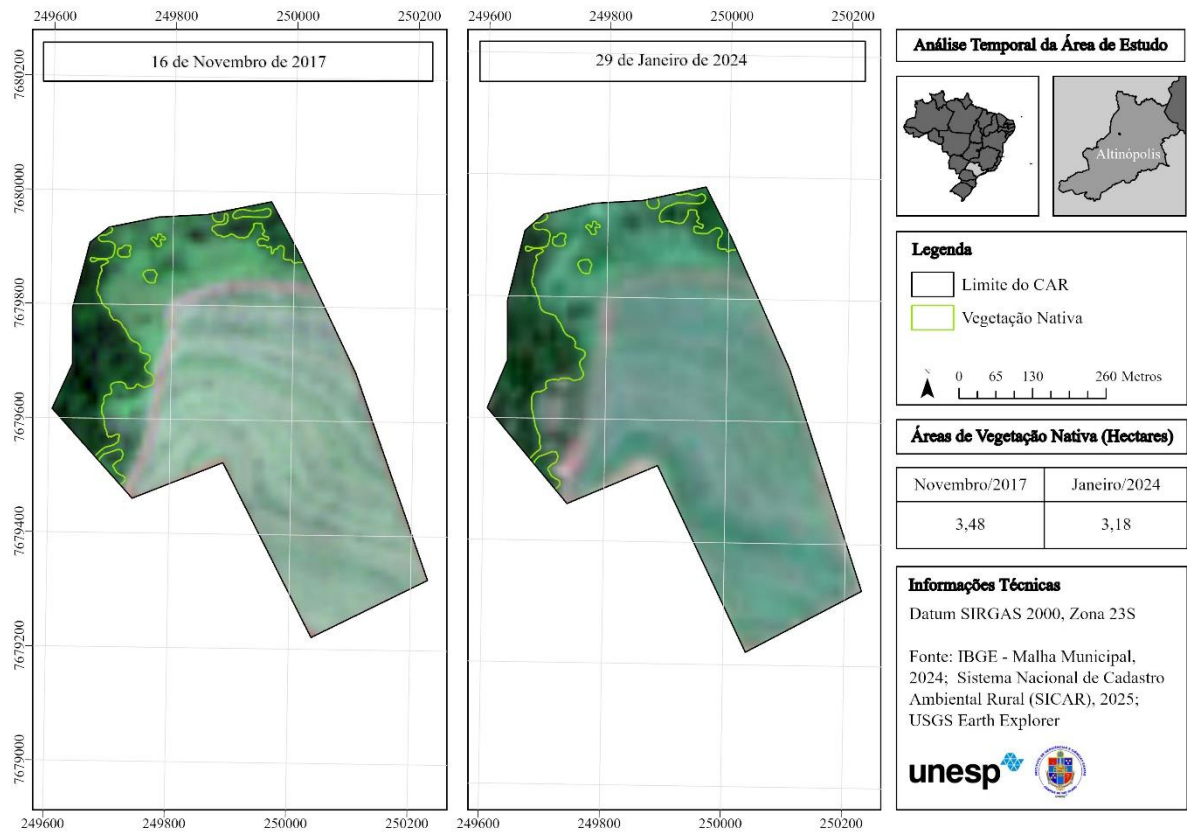
Figura 5 - Análise temporal entre 2017 e 2023 na área de estudo



Fonte SICAR/2025; IBGE/2022; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

Conforme ilustrado na Figura 6, o período de 2017 a 2024 demonstra uma intensificação sutil da supressão de vegetação nativa. A área nativa em 2024 totalizou 3,18 hectares, configurando uma perda acumulada de 0,30 hectares desde 2017. As alterações tornaram-se mais visíveis nas áreas de vegetação localizadas nos polígonos superiores da área de estudo, onde houve uma diminuição notável da densidade vegetal.

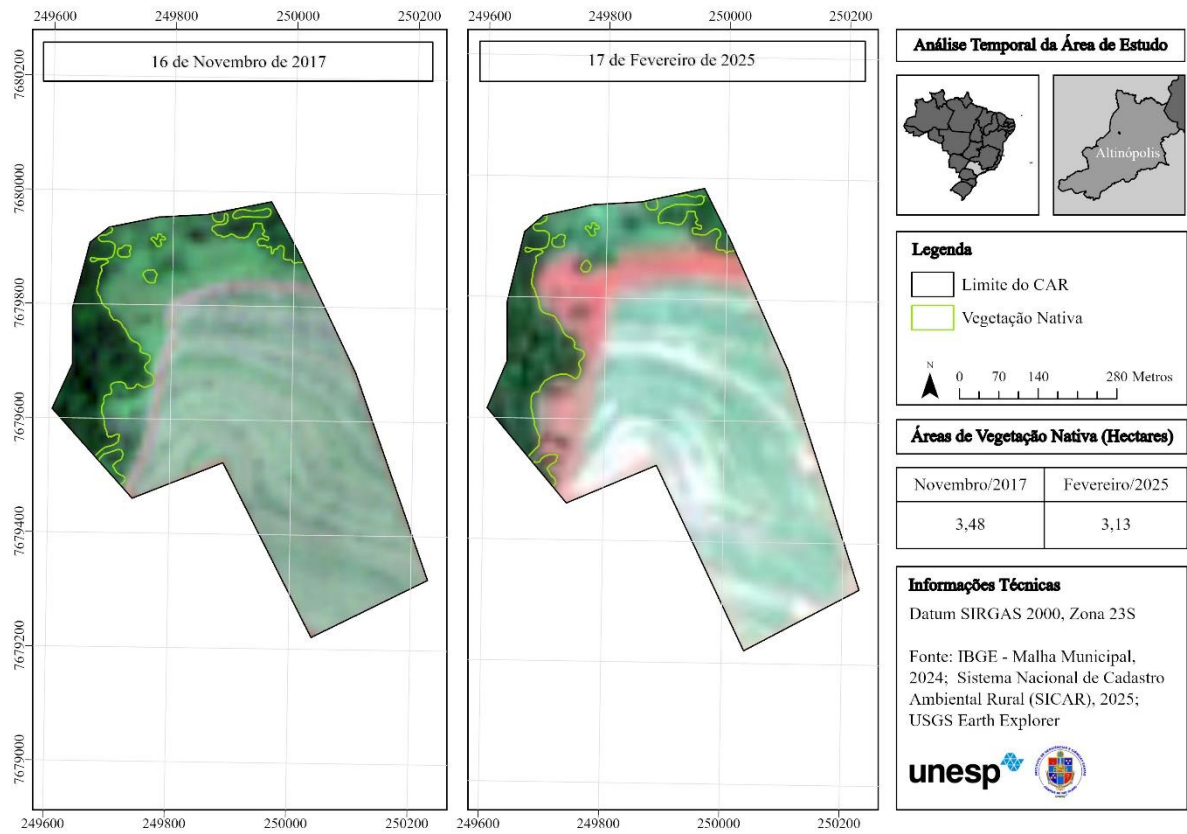
Figura 6 - Análise temporal entre 2017 e 2024 na área de estudo



Fonte SICAR/2025; IBGE/2022; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

A análise temporal da Figura 7, que compara 2017 e 2025, demonstra o cenário de maior impacto em termos de supressão. A área foi reduzida a 3,13 hectares, totalizando uma perda de 0,35 hectares, correspondente a 10,06% da cobertura vegetal original registrada em 2017. Observa-se uma evidente fragmentação, caracterizada por rupturas nos contornos dos polígonos e pela substituição do dossel por áreas de solo exposto, indicando, possivelmente, a preparação da área para futuros usos agrícolas ou plantios.

Figura 7 - Análise temporal entre 2017 e 2025 na área de estudo



Fonte SICAR/2025; IBGE/2022; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

A Tabela 1 sintetiza a variação da cobertura de vegetação nativa entre 2017 e 2025, em consonância com as Figuras 5, 6 e 7, evidenciando um declínio progressivo e contínuo da área vegetada ao longo dos anos. Os dados indicam que a área de vegetação nativa se reduziu de 3,48 hectares em 2017 para 3,13 hectares em 2025, resultando em uma perda total de 0,35 hectares, equivalente a 10,06% da cobertura original.

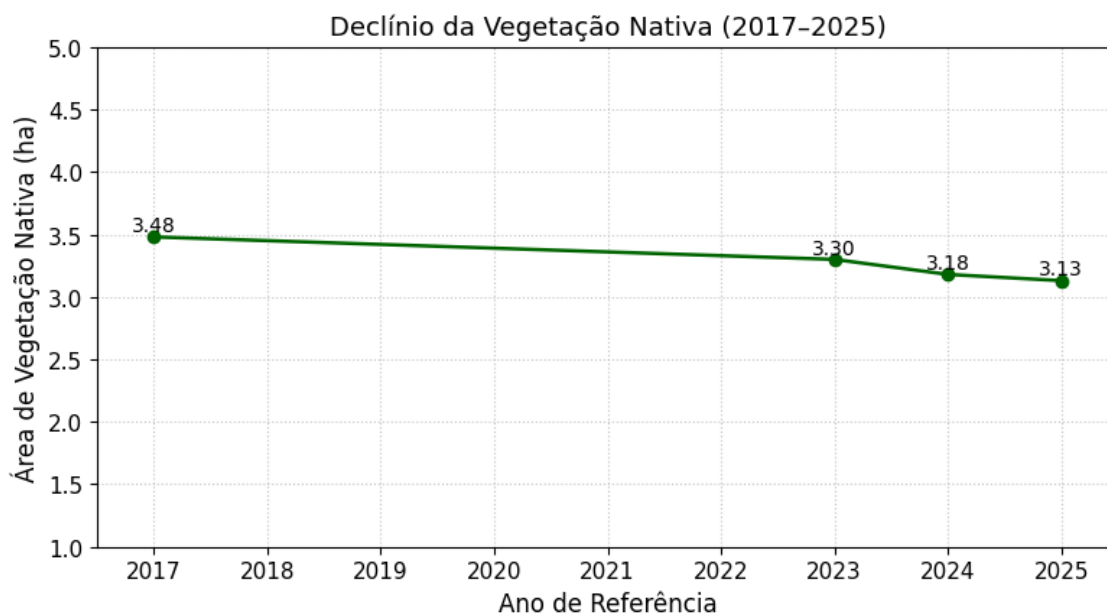
Tabela 1 – Declínio da vegetação nativa entre 2017 e 2025 na área de estudo por imagens Sentinel

Ano de Referência	Área de Vegetação Nativa (ha)	Variação em relação a 2017 (ha)	Percentual de Perda (%)	Principais Observações
2017	3,48	0	0	Ano base da análise; fragmentos íntegros e contornos bem definidos.
2023	3,3	-0,18	-5,17	Pequena redução da área; início de fragmentação perceptível.
2024	3,18	-0,3	-8,62	Continuidade da perda de vegetação; bordas mais irregulares.
2025	3,13	-0,35	-10,06	Redução acumulada significativa; indícios de supressão recente.

Fonte: autoria própria.

Para ilustrar de forma visual a síntese apresentada na Tabela 1, o Gráfico 1 demonstra o declínio contínuo da cobertura de vegetação nativa entre 2017 e 2025.

Gráfico 1 – Declínio da vegetação nativa entre 2017 e 2025 por Sentinel-2



Fonte: autoria própria, ambiente Google Colab, utilizando a linguagem Python e a biblioteca Matplotlib para geração do gráfico.

6.1.2. Comparação entre os Satélites Sentinel 2 – Level 2A e CBERS-04A (2017 por Ano de Safra)

A comparação entre a imagem Sentinel-2 de 2017 e as imagens CBERS-04A dos anos de 2023, 2024 e 2025 evidenciou um declínio contínuo da vegetação nativa na área de estudo. Os mapas gerados demonstraram uma redução progressiva das áreas vegetadas ao longo do período analisado, sem indícios de regeneração significativa ou recuperação da cobertura natural.

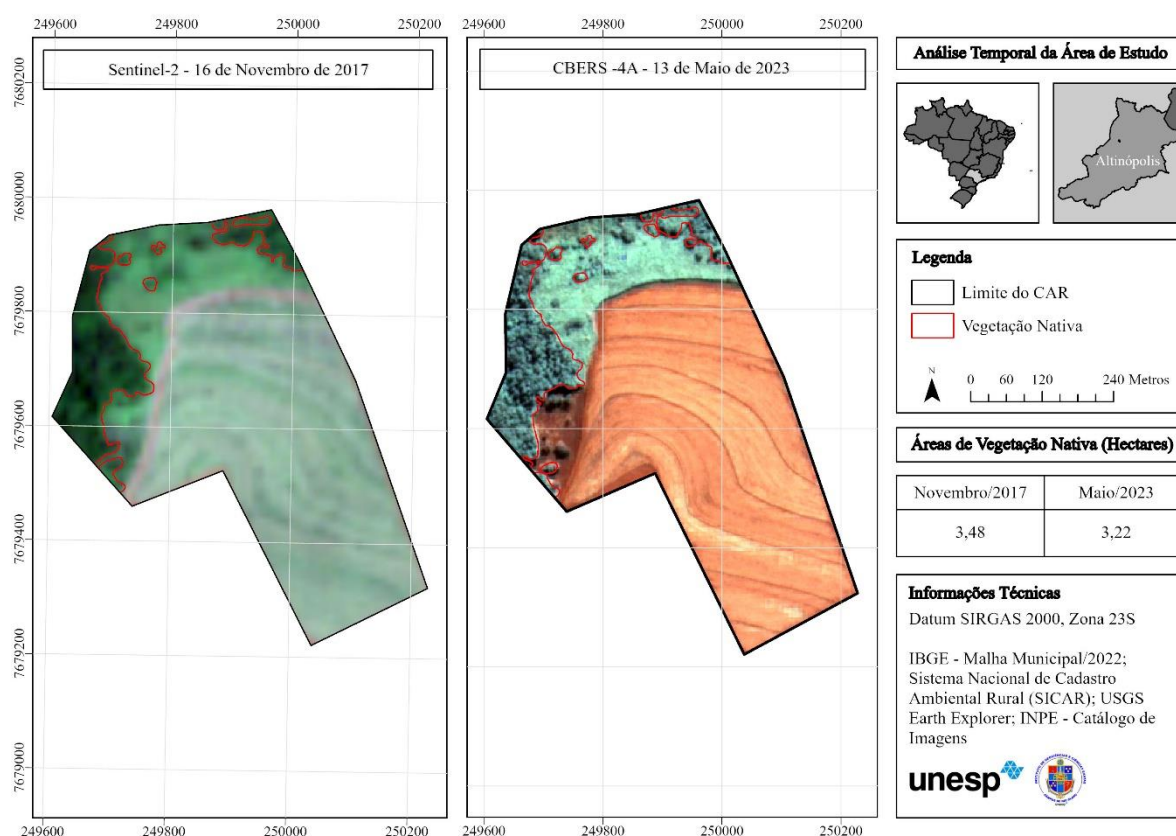
Embora o satélite CBERS-04A apresente resolução espacial adequada para o monitoramento de áreas extensas, foi observada certa limitação na diferenciação de fragmentos de menor porte, o que pode introduzir pequenas incertezas na delimitação precisa das manchas de vegetação nativa.

Ainda assim, os resultados obtidos confirmaram a tendência de supressão vegetal observada nos anos anteriores, com perdas mais expressivas entre 2017 e 2024, quando a área

de vegetação nativa diminuiu de 3,48 ha para 3,09 ha, correspondendo a uma redução de 11,21%. Em 2025, registrou-se leve redução para 3,08 ha, correspondendo a 11,49%.

A Figura 8 apresenta a comparação entre as imagens de 2017 (Sentinel-2) e 2023 (CBERS-4A), evidenciando as primeiras áreas de redução da cobertura vegetal, com a área nativa diminuindo de 3,48 ha para 3,22 ha, o que representa uma perda de 0,26 ha (7,47%) em relação ao valor inicial. Observa-se o início de um processo de fragmentação, com clareamento nas bordas dos fragmentos nativos já existentes, indicando a influência crescente de atividades antrópicas sobre a paisagem.

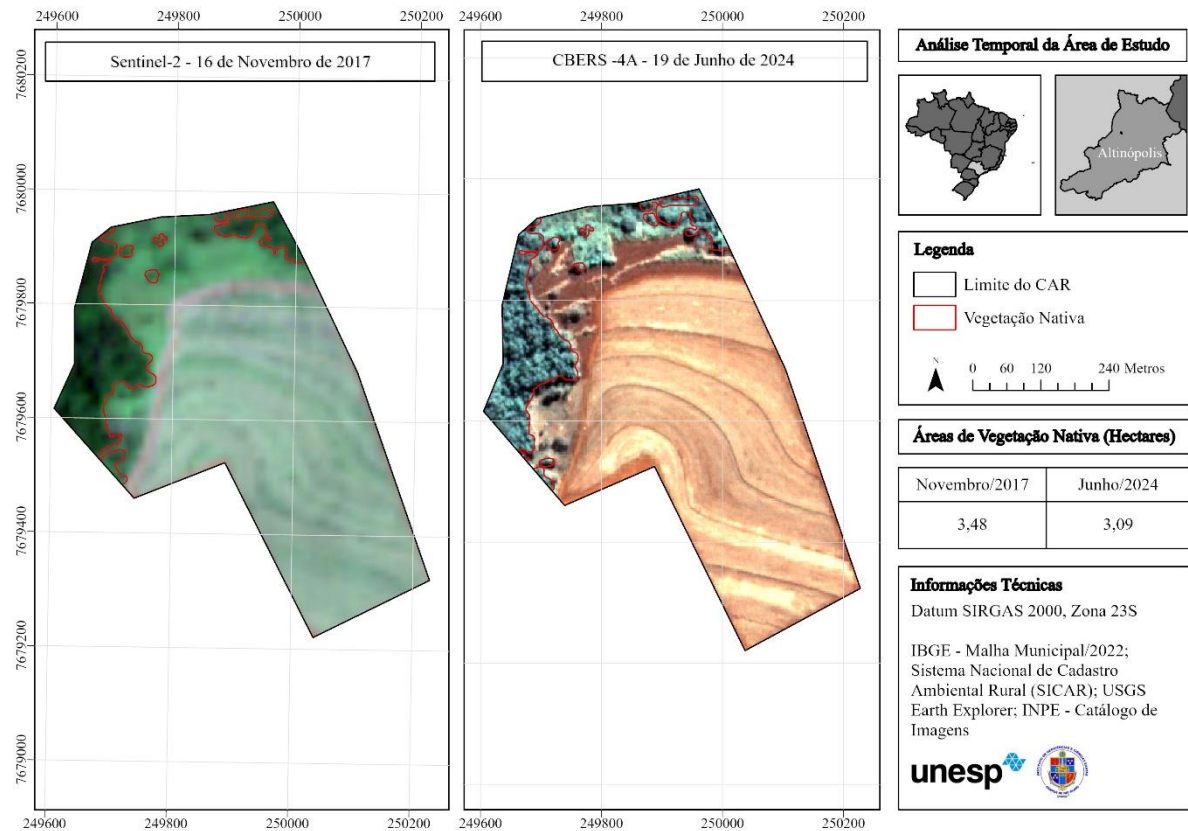
Figura 8 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (Nov/2017) e CBERS-04A (mai/2023)



Fonte SICAR/2025; IBGE/2022; INPE/2025; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

A Figura 9, que compara as imagens de 2017 (Sentinel-2) e 2024 (CBERS-4A), destaca uma redução da vegetação nativa, com a área passando de 3,48 ha para 3,09 ha, o que representa uma perda de 0,39 ha (11,21%) em relação ao período inicial. As áreas mais afetadas concentram-se nas bordas dos fragmentos, reforçando a tendência de supressão progressiva da cobertura vegetal ao longo do período analisado.

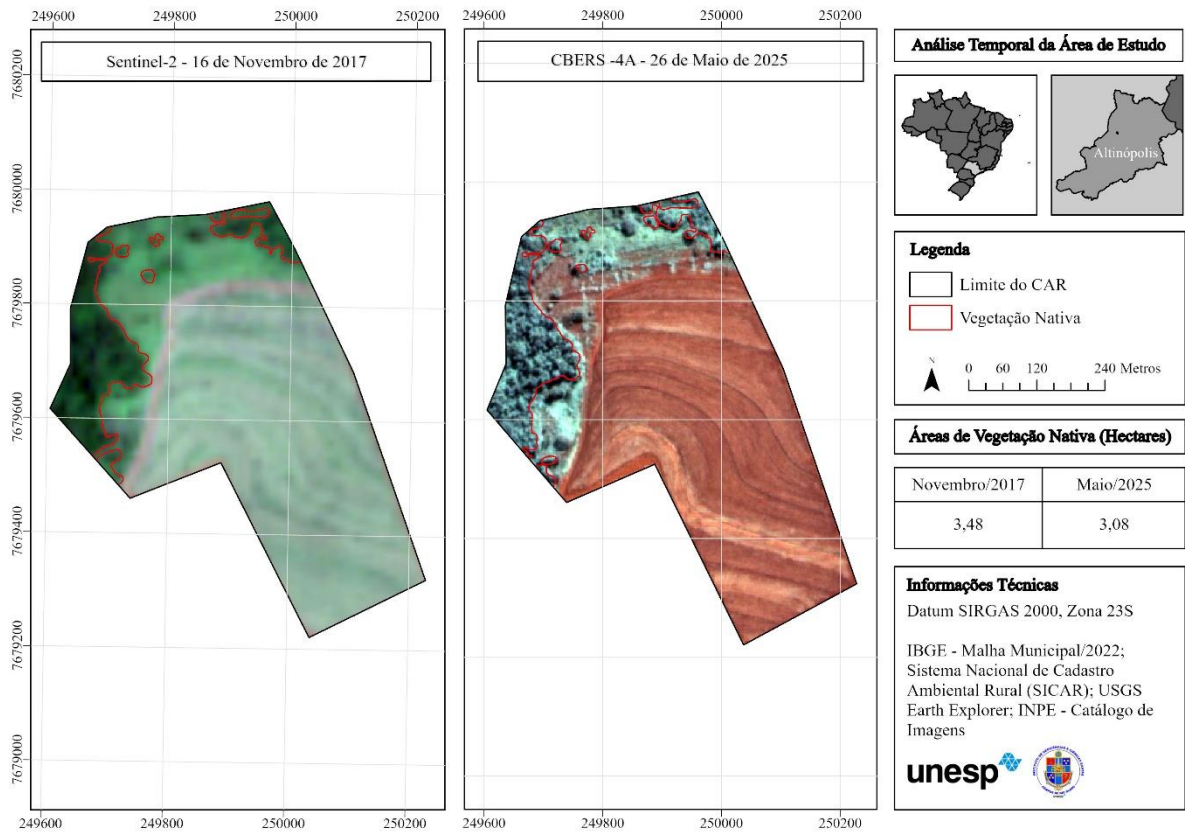
Figura 9 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (Nov/2017) e CBERS-04A-4 (Jan/2024)



Fonte SICAR/2025; IBGE/2022; INPE/2025; USGS Earth Explorer. Autoria própria.

A Figura 10, que compara as imagens de 2017 (Sentinel-2) e 2025 (CBERS-4A), evidencia a consolidação da supressão vegetal, porém com uma redução sutil em relação ao cenário de 2024. A área de vegetação nativa passou de 3,48 ha para 3,08 ha, representando uma perda total de 0,40 ha (11,49%) em relação a 2017, mas apenas 0,01 ha a menos que em 2024. Essa variação discreta indica uma estabilização relativa do processo de supressão, embora ainda sejam observados sinais de fragmentação e clareamento em áreas específicas.

Figura 10 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (Nov/2017) e CBERS-04A-4 (mai/2025).



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

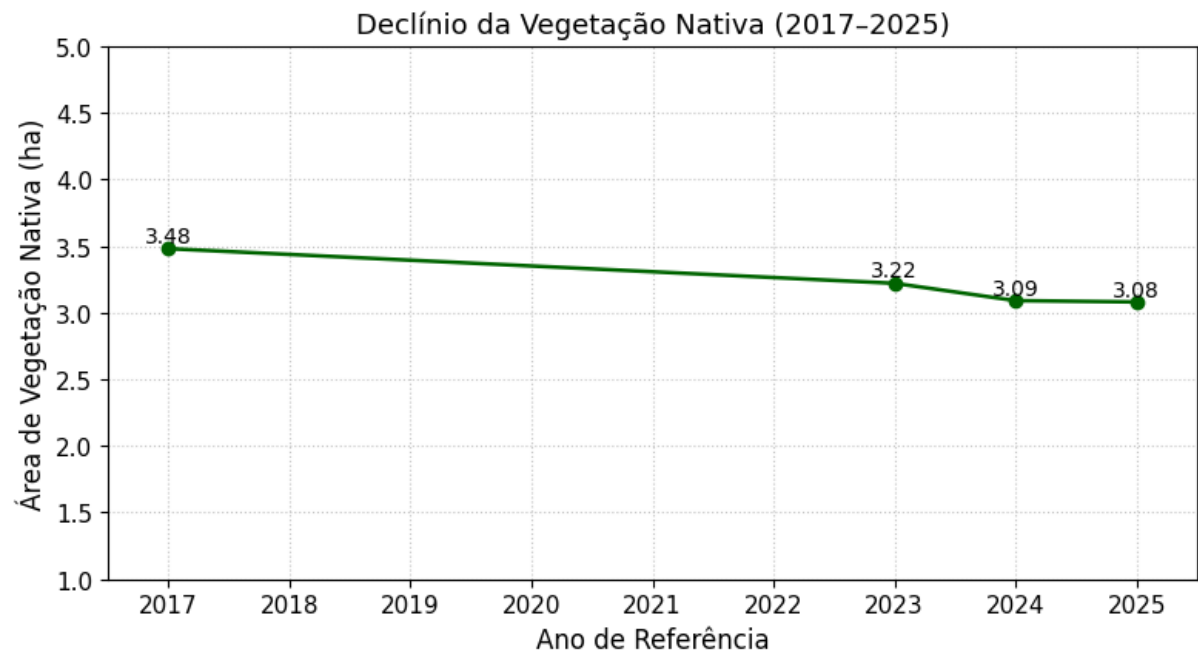
A Tabela 2 apresenta a variação temporal da vegetação nativa entre 2017 e 2025, considerando o mapeamento inicial realizado com imagem Sentinel-2 e as análises posteriores com o satélite CBERS-4A. Observa-se uma redução contínua da cobertura vegetal, especialmente acentuada entre 2017 e 2024, quando a área de vegetação passou de 3,48 ha para 3,09 ha, representando uma perda acumulada de 11,21%. Em 2025, a área reduziu-se ligeiramente para 3,08 ha, totalizando uma perda de 0,40 ha (11,49%) em relação a 2017. O Gráfico 2 ilustra as situações apresentadas.

Figura 10 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (Nov/2017) e CBERS-04A-4 (mai/2025)

Ano de Referência	Área de Vegetação Nativa (ha)	Variação em relação a 2017 (ha)	Percentual de Perda (%)	Principais Observações
2017 (Sentinel-2)	3,48	—	—	Referência inicial de cobertura vegetal.
2023 (CBERS-4A)	3,22	-0,26	-7,47	Indícios de clareamento nas bordas e início de fragmentação.
2024 (CBERS-4A)	3,09	-0,39	-11,21	Redução perceptível da densidade vegetal e fragmentação crescente.
2025 (CBERS-4A)	3,08	-0,4	-11,49	Supressão mais evidente e substituição por áreas de solo exposto.

Fonte: autoria própria.

Gráfico 2 – Declínio da vegetação nativa entre 2017 e 2025 por Sentinel (2017) e CBERS-04A (anos de safra)



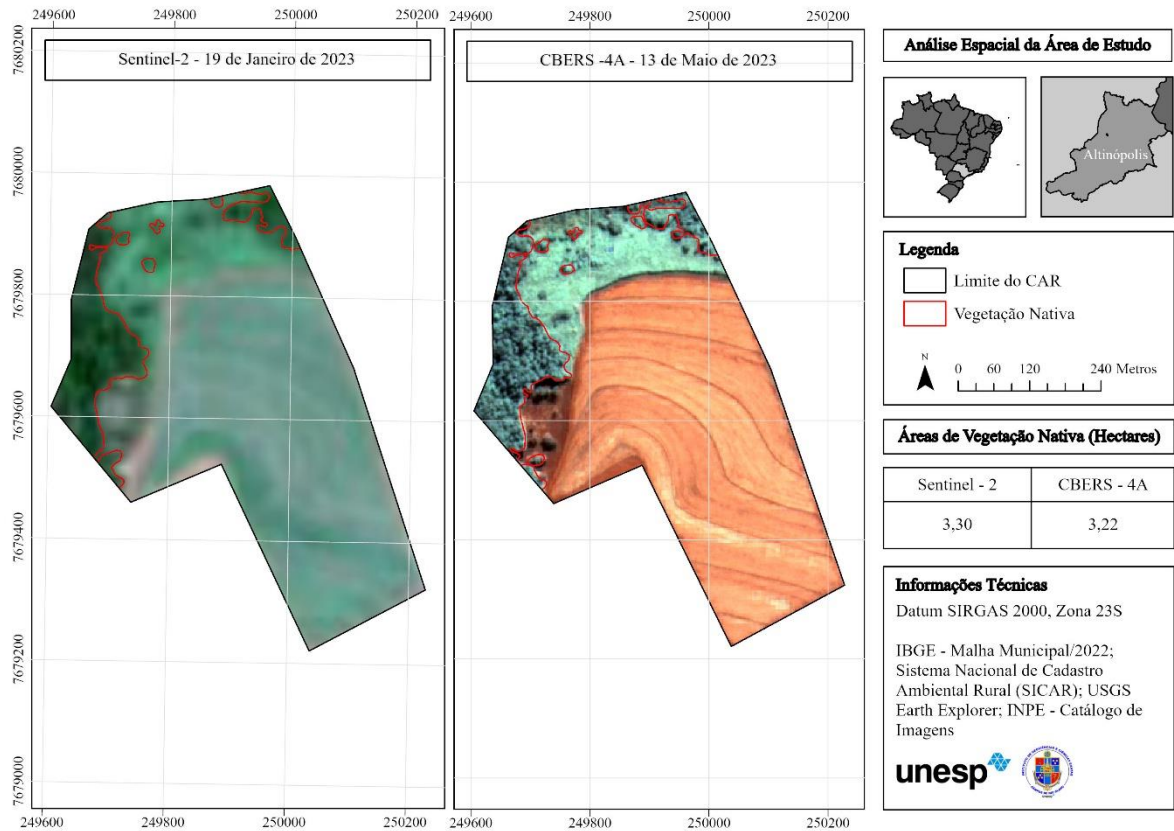
Fonte: autoria própria, ambiente Google Colab, utilizando a linguagem Python e a biblioteca Matplotlib para geração do gráfico.

6.1.3. *Comparação entre os Satélites Sentinel 2 – Level 2A e CBERS-04A (Ano de Safra por Ano de Safra)*

Além da análise multitemporal de longo prazo, que comparou a imagem Sentinel-2 (2017) com as imagens CBERS-04A (2023, 2024 e 2025), realizou-se um estudo de validação de dados por satélite, comparando a capacidade de detecção da vegetação nativa entre o Sentinel-2 e o CBERS-04A dentro do mesmo ano-safra. Essa metodologia teve como objetivo verificar a diferença visual e a precisão na delimitação dos remanescentes, isolando a influência das variações temporais. Para tal, foram comparados pares de imagens: Sentinel-2 (2023) com CBERS-04A (2023); Sentinel-2 (2024) com CBERS-04A (2024); e Sentinel-2 (2025) com CBERS-04A (2025). As comparações visuais e as métricas de área obtidas nesses pareamentos interanuais reforçaram a superioridade do CBERS-04A. A resolução de 2 metros do CBERS-04A demonstrou maior fidelidade na captura de fragmentos menores e nas transições de borda, o que se alinha com a maior área de supressão de vegetação nativa detectada por este sensor no período de 2023 a 2025.

A Figura 11 ilustra essa comparação para o ano-safra de 2023, mostrando as variações de detalhe entre o Sentinel-2 e o CBERS-04A.

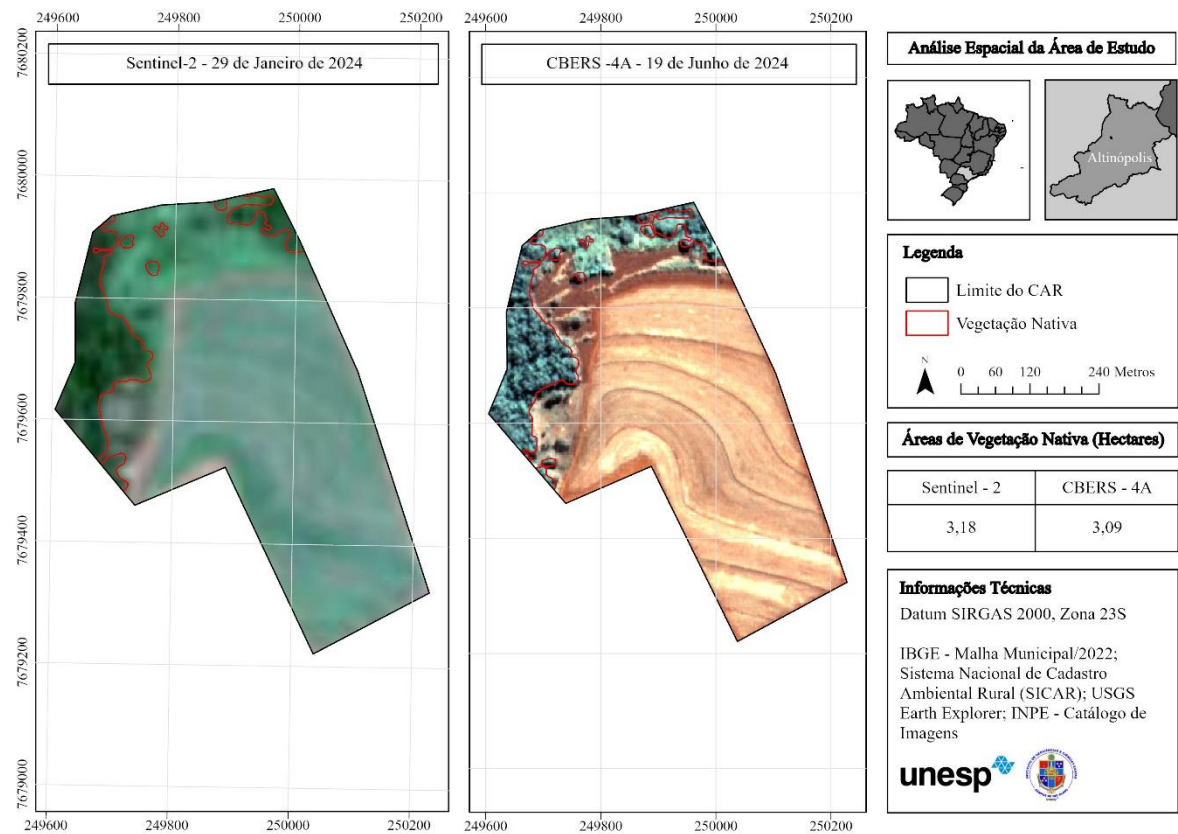
Figura 11 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (jan/2023) e CBERS-04A-4 (mai/2023).



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

A Figura 12 apresenta o comparativo entre a imagem Sentinel-2 de 2024 e a imagem CBERS-04A também de 2024, ambos referentes a época de melhor contraste da vegetação, isolando o fator temporal mais evidente e permitindo uma avaliação direta e qualitativa.

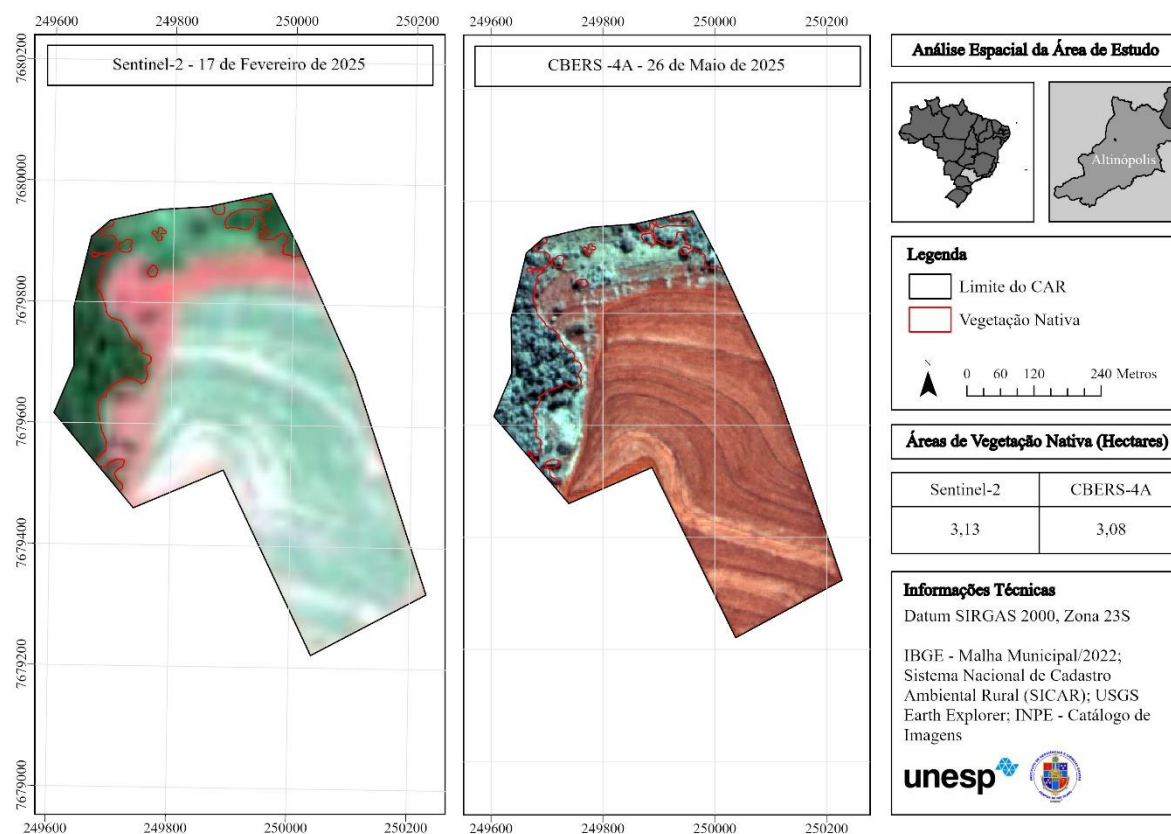
Figura 12 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (jan/2024) e CBERS-04A-4 (jun/2024)



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

A Figura 13 apresenta o comparativo entre a imagem Sentinel-2 de 2025 e a imagem CBERS-04A de 2025, ambos referentes a época de melhor contraste da vegetação, finalizando a análise entre ambos os satélites em questão.

Figura 13 – Comparação entre as imagens dos satélites Sentinel-2 (fev/2025) e CBERS-04A-4 (mai/2025)



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

Os resultados da análise multitemporal evidenciam que, ao longo do período avaliado, a vegetação nativa da propriedade apresentou uma redução contínua. Essa tendência é confirmada tanto pelos dados provenientes do Sentinel-2 quanto pelos obtidos pelo CBERS-4A, ainda que cada sensor apresente particularidades metodológicas relevantes.

Com base nos valores obtidos pelo CBERS-4A, verifica-se que a área de vegetação nativa diminuiu de 3,22 hectares em 2023 para 3,09 hectares em 2024, correspondendo a uma variação de $-0,13$ hectare ($-3,94\%$). No período seguinte, de 2024 para 2025, a redução foi mais discreta, passando de 3,09 hectares para 3,08 hectares, equivalente a $-0,05$ hectare ($-1,62\%$). Assim, o intervalo 2023–2024 concentra a maior perda, enquanto o ano de 2025 apresenta desaceleração desse processo, sugerindo um possível início de estabilização da vegetação remanescente.

Do ponto de vista metodológico, é fundamental destacar que o Sentinel-2, devido ao comportamento espectral de suas bandas e ao modo como estrutura a classificação, tende a uniformizar superfícies contínuas de vegetação, podendo gerar pequenas estimativas em áreas fragmentadas ou com manchas finas. Em contraste, o CBERS-4A, por permitir maior distinção

de intervalos, descontinuidades e fragmentos estreitos, geralmente calcula valores ligeiramente menores, como observado nos três anos analisados (3,30 hectares vs. 3,22 hectares em 2023; 3,18 hectares vs. 3,09 hectares em 2024; 3,13 hectares vs. 3,08 hectares em 2025).

Embora essa diferença seja muito sutil dentro do contexto deste CAR de 25,68 hectares, ela não deve ser interpretada como irrelevante em análises de maior escala. Em grandes imóveis rurais, em regiões com alta fragmentação, ou na avaliação conjunta de centenas de cadastros ambientais rurais, essas pequenas discrepâncias podem se acumular, ampliando a divergência entre sensores e produzindo variações que deixam de ser discretas para se tornarem metodologicamente significativas. Nesses cenários, a capacidade do CBERS-4A de identificar lacunas internas e detalhar pequenos intervalos de vegetação tende a minimizar superestimativas, o que pode torná-lo mais adequado para monitoramentos extensos, especialmente quando a precisão espacial da vegetação nativa é determinante para a certificação ou auditoria ambiental.

Portanto, ainda que a diferença observada neste estudo seja pequena, ela sugere que, em grandes áreas, o CBERS-4A pode oferecer uma representação mais fidedigna da vegetação nativa remanescente, reforçando a importância de considerar a escala de análise na escolha do sensor. A oscilação geométrica identificada ao longo do triênio representa uma trajetória consistente de diminuição da vegetação nativa na área de estudo. Após a queda mais expressiva registrada em 2024, a desaceleração observada em 2025 indica possível tendência de estabilização, embora seja necessário manter o monitoramento contínuo para confirmação.

A Tabela 3 apresenta a comparação da área de vegetação nativa mapeada na propriedade utilizando dados Sentinel-2 (Level 2A) e CBERS-04A-4A, para os anos de safra de 2023, 2024 e 2025.

Tabela 3: Comparativo da Área de Vegetação Nativa (ha) Mapeada Utilizando Imagens Sentinel-2 e CBERS-04A-4A (2023-2025)

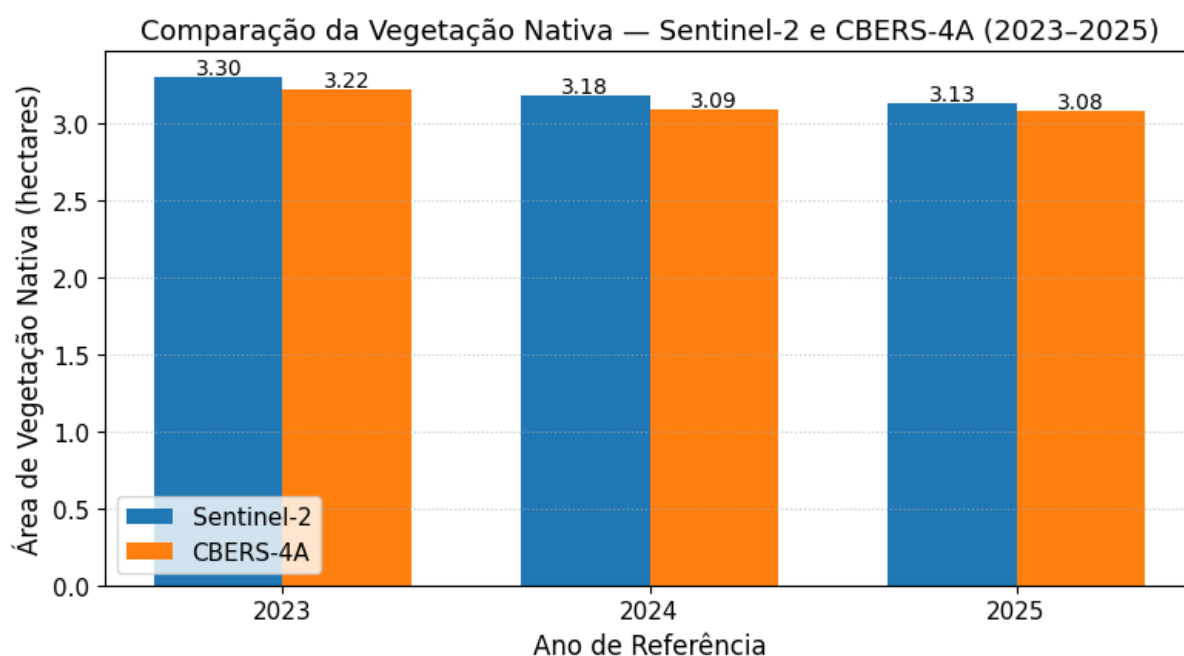
Ano de Referência	Área de Vegetação Nativa (ha) – Sentinel-2 – Level 2A	Área de Vegetação Nativa (ha) – CBERS 4A	Variação (ha)	Percentual de Variação (%)
2023	3,3	3,22	–	–
2024	3,18	3,09	–0,13	–3,94 %
2025	3,13	3,08	–0,05	–1,62 %

Fonte: autoria própria.

O Gráfico 3 ilustra a evolução da área de vegetação nativa das três safras, apresentando os resultados de mapeamento de dois satélites distintos. O comparativo demonstra uma coerência crucial na tendência de supressão (perda de vegetação) entre 2023 e 2025, o que valida a ocorrência do fenômeno.

Embora o sensor Sentinel-2 (Level 2A) registre valores absolutos ligeiramente superiores devido à sua resolução espacial mais fina, a interpretação da supressão foi otimizada com o uso do CBERS-04A-4A. Para fins de delimitação e reconhecimento visual da supressão, os dados do CBERS-04A-4A (com sua composição de bandas e sensibilidade espectral) apresentaram uma melhor coerência e clareza para distinção da vegetação nativa nas áreas de interesse. Desse modo, os dados do CBERS-04A-4A foram considerados a base mais confiável para o mapeamento e quantificação das perdas de vegetação nativa, reforçando a identificação da supressão real na propriedade.

Gráfico 3 – Comparação da Área de Vegetação Nativa mapeada pelos satélites Sentinel-2 e CBERS-04A-4A (2023 a 2025)



Fonte: Autoria própria, ambiente Google Colab, utilizando a linguagem Python e a biblioteca Matplotlib para geração do gráfico.

6.1.4. Drone DJI Air 2S em Comparação com Imagens de Satélite

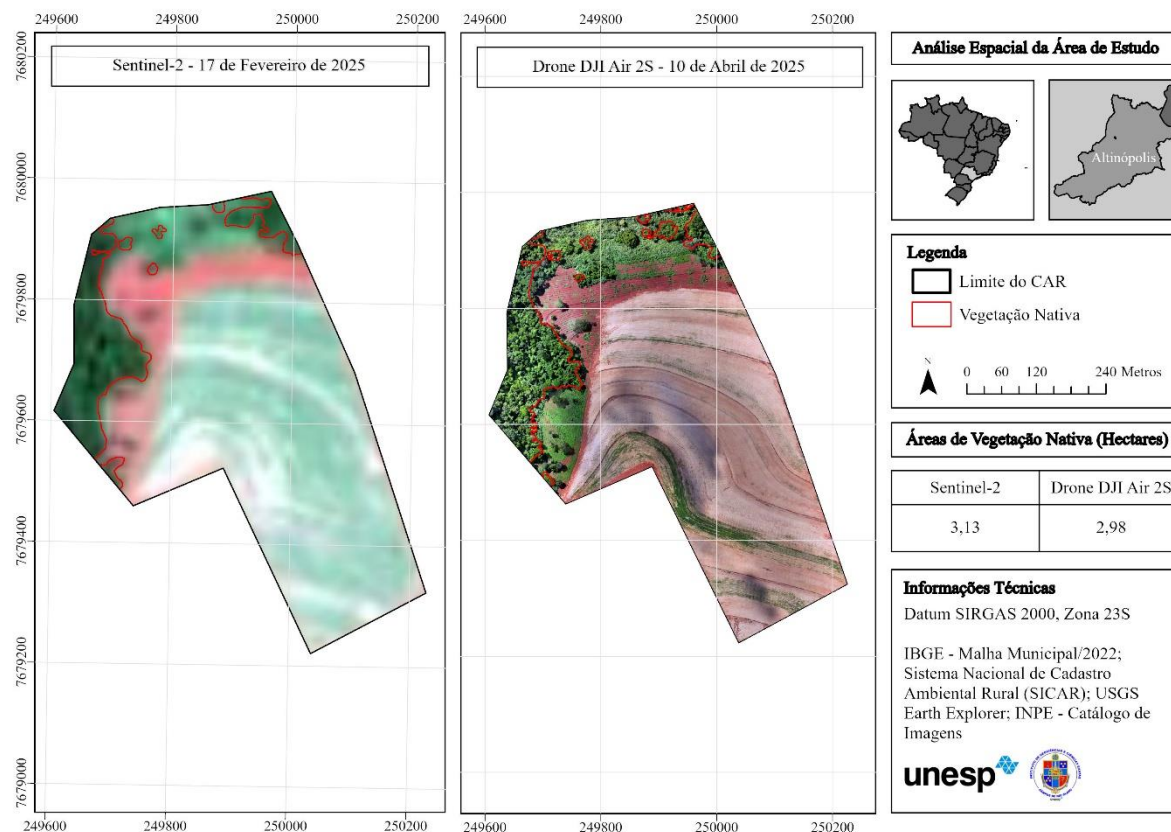
A análise visual e quantitativa realizada entre o mapeamento obtido pelo Drone DJI Air 2S e as imagens de satélite indicou discrepâncias significativas nas áreas estimadas de

vegetação nativa, evidenciando limitações associadas à resolução espacial dos sensores orbitais utilizados. A imagem de alta resolução produzida pelo drone em abril de 2025 registrou uma área de 2,98 hectares, representando com elevada precisão o dossel arbóreo e suas descontinuidades internas, como clareiras, bordas irregulares, microfragmentos e áreas parcialmente abertas. Esse nível de detalhamento permitiu caracterizar com maior fidelidade a estrutura espacial da vegetação nativa.

Em contraste, a imagem do Sentinel-2 referente a fevereiro de 2025 apresentou uma estimativa de 3,13 hectares, o que representou uma diferença de 5,03% acima do valor registrado pelo drone. Essa superestimação ocorreu porque o sensor, com resolução espacial de 10 metros, apresenta limitação na discriminação de microtexturas e na detecção de variações sutis no dossel arbóreo. Como consequência, houve uma tendência natural de generalização cartográfica, o que levou à agregação de pixels mistos e à suavização das bordas do fragmento de vegetação nativa. Esse comportamento resultou na uniformização de áreas heterogêneas e na incorporação de pequenas descontinuidades como parte contínua do remanescente florestal.

A Figura 14, revela essa discrepância nas áreas mapeadas, evidenciando as limitações da resolução espacial média do Sentinel-2 no contexto da delimitação precisa de fragmentos.

Figura 14 – Comparação entre a imagem do satélite Sentinel-2 (fev/2025) e o drone Dji Air 2S (abr/2025)



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

A comparação entre o mapeamento realizado pelo Drone DJI Air 2S e a imagem do satélite CBERS-4A (Figura 15) evidenciou diferenças importantes na estimativa da área de vegetação nativa, embora ambas as fontes de dados tenham apresentado boa concordância espacial. O levantamento aerofotogramétrico do drone, executado em abril de 2025, registrou uma área de 2,98 hectares, refletindo com alta precisão a configuração real do dossel arbóreo, incluindo microclareiras, bordas sinuosas e fragmentos estreitos que compunham o remanescente florestal. A elevada resolução espacial do sensor embarcado permitiu identificar detalhes morfológicos que não eram detectados por sensores orbitais de média resolução.

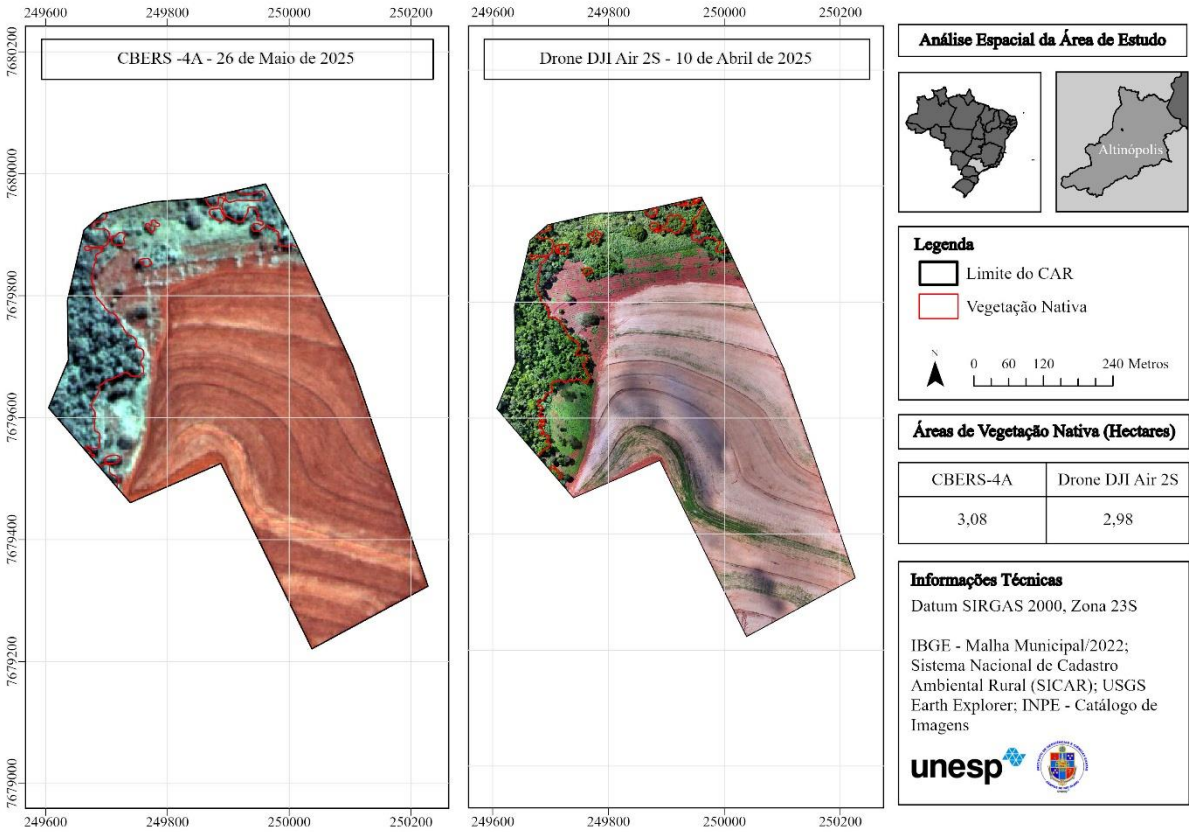
A imagem do CBERS-4A, por sua vez, estimou a área de vegetação nativa em 3,08 hectares, apresentando uma diferença de 3,36% acima do valor captado pelo drone. Essa variação foi relativamente pequena, sobretudo quando comparada às discrepâncias observadas entre o drone e sensores de menor resolução espacial. O desempenho do CBERS-4A indicou que o satélite foi capaz de distinguir com maior eficiência discontinuidades no dossel, pequenos intervalos de vegetação e manchas estreitas, o que reduziu substancialmente a superestimação da área total quando comparado ao Sentinel-2.

Observou-se que essa proximidade entre os valores obtidos pelo drone e pelo CBERS-4A refletiu a maior capacidade do satélite em capturar heterogeneidades internas do fragmento florestal. Contudo, mesmo com essa maior precisão relativa, foi possível identificar alguns casos de agregação de pixels mistos, especialmente ao longo das bordas mais irregulares, o que contribuiu para um leve aumento da área final mapeada.

Apesar da diferença ter sido sutil no contexto da área analisada de 25,68 hectares, a tendência é de que tais discrepâncias se ampliem proporcionalmente em estudos aplicados a imóveis rurais maiores ou a conjuntos extensos de cadastros ambientais. Em cenários de grande escala, essa diferença percentual pode deixar de ser marginal, adquirindo maior relevância para análises espaciais destinadas a processos de auditoria e certificação ambiental.

A comparação demonstrou que o CBERS-4A apresentou desempenho consistente e mais próximo do padrão de referência representado pelo drone, indicando sua adequação para o monitoramento da vegetação nativa em escala ampliada. Essa proximidade reforçou o potencial do CBERS-4A como uma alternativa confiável na quantificação de remanescentes florestais em análises operacionais, sobretudo em contextos como o programa RenovaBio.

Figura 15 – Comparação entre a imagem do satélite CBERS-04A – 4A (mai/2025) e o drone Dji Air 2S (abr/2025)



Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta a comparação dos resultados de área obtidos por cada plataforma, destacando o percentual de perda ou divergência em relação ao padrão de referência do Drone.

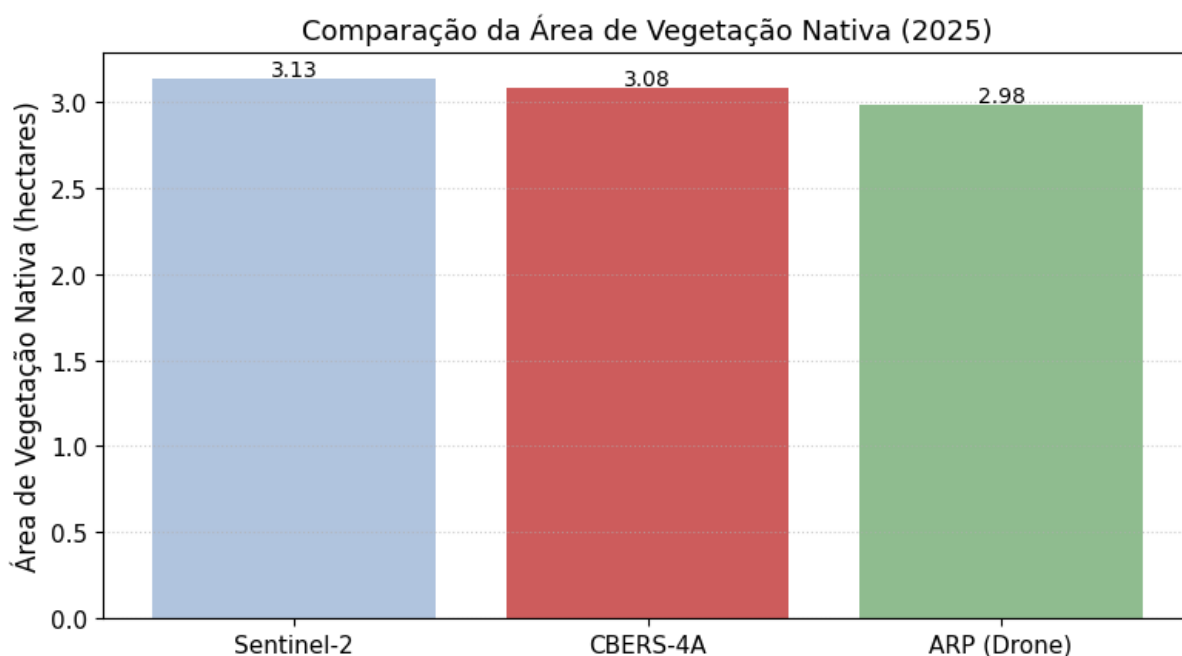
Tabela 4 - Comparativo de Área Mapeada de Vegetação Nativa e Divergência Metodológica (2025)

Ano de Referência	Área de Vegetação Nativa Drone (hectares)	Área de Vegetação Nativa CBERS (hectares)	Área de Vegetação Nativa Sentinel (hectares)	Percentual de Perda Sentinel – Drone (%)	Percentual de Perda CBERS – Drone (%)	Principais Observações
2025	2,98	3,08	3,13	5,03%	3,36%	O drone registra menor área por capturar microfragmentos e interrupções da vegetação; o CBERS aproxima-se mais do valor real, enquanto o Sentinel tende a uniformizar e superestimar pequenas manchas.

Fonte: autoria própria.

O Gráfico 4 apresenta a comparação das áreas de vegetação nativa calculadas para o ano de 2025. O gráfico evidenciou que Drone DJI Air 2S apresentou 2,98 hectares como referência de campo; em comparação, o Sentinel-2 estimou 3,13 hectares e o CBERS-4A estimou 3,08 hectares, ambos superiores ao valor aerofotogramétrico, caracterizando uma tendência de superestimação orbital, sendo o CBERS-4A o sensor mais próximo ao padrão de referência.

Gráfico 4 – Comparação das Áreas de Vegetação Nativa mapeadas pelas plataformas Drone (DJI Air 2S), Sentinel-2 e CBERS-04A-4A no ano de 2025



Fonte: Autoria própria, com base nos dados de classificação manual, ambiente Google Colab, utilizando a linguagem Python e a biblioteca Matplotlib para geração do gráfico.

6.2. Ferramentas Complementares

A metodologia de classificação de vegetação nativa, especialmente sob a exigência de interpretação manual do programa Renovabio, requer uma robusta validação cruzada. Portanto, a pesquisa incluiu o uso de ferramentas e bases de dados complementares com o objetivo de avaliar se sua precisão e validade são adequadas para auxiliar na identificação e delimitação da vegetação nativa no nível de detalhe necessário.

6.2.1. Análise por Índice de Vegetação Nativa Normalizada

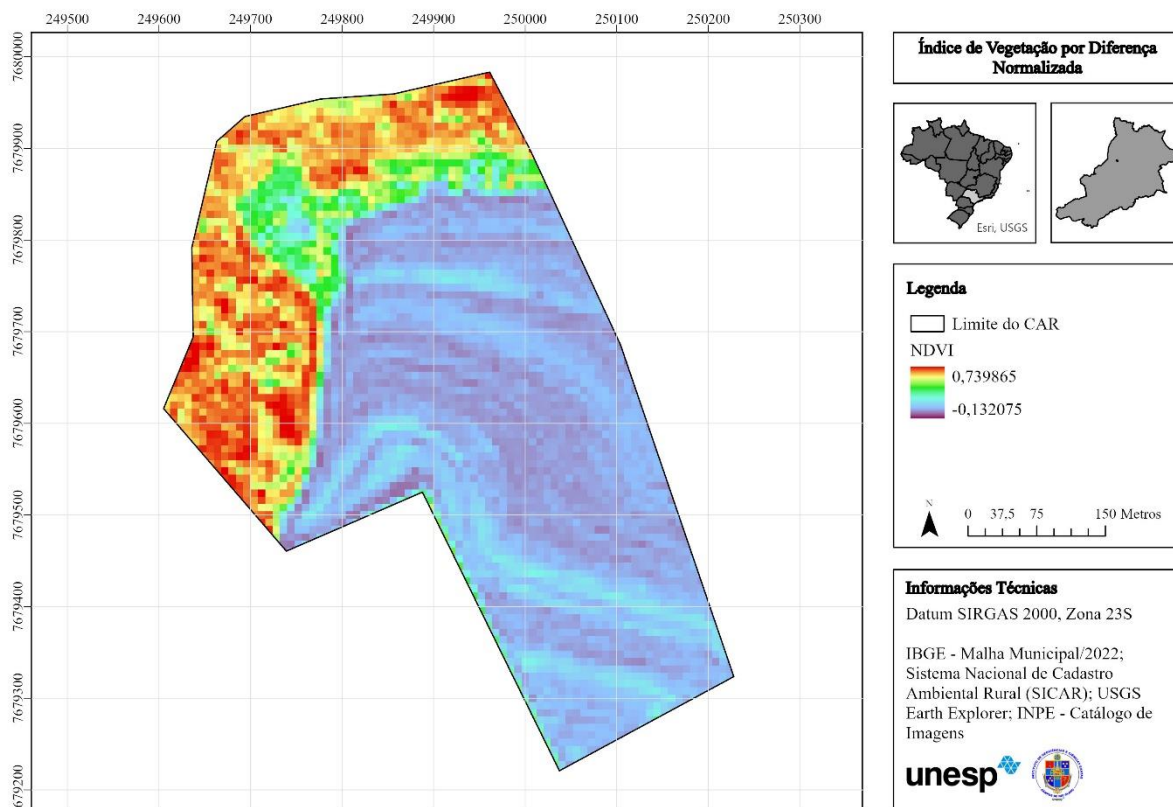
A análise visual do NDVI (Figura 16) representou os valores mais elevados do índice e o maior vigor vegetativo por meio dos tons de vermelho mais intenso, com valores próximos

de 0,74. Em contraste, as tonalidades em azul e roxo corresponderam aos valores mais baixos do NDVI, próximos de $-0,13$, associados a solo exposto ou áreas sob influência de atividade antrópica.

No mapa, a porção noroeste do polígono, correspondente à vegetação nativa, apresentou predominantemente tonalidades vermelhas intensas, o que confirmou a elevada vitalidade e a robustez fisiológica do fragmento. As demais áreas, por sua vez, exibiram tons que variaram do azul claro ao roxo, caracterizando regiões sob uso agrícola ou com ausência de cobertura vegetal arbórea. Foram observadas também faixas de transição ao longo das bordas do fragmento, onde as cores não atingiram o vermelho máximo, sugerindo a presença de vegetação menos densa ou sujeita a efeitos de borda.

Apesar de sua utilidade no diagnóstico do vigor da vegetação, o NDVI não se mostrou adequado para a questão central desta pesquisa, que envolveu a análise da superestimação da área de vegetação nativa. Por se tratar de um índice espectral voltado à avaliação fisiológica da vegetação e não à definição geométrica de limites, o NDVI não solucionou a ambiguidade existente na classificação manual das bordas do fragmento. Dessa forma, a interpretação espacial permaneceu dependente de dados de alta resolução, como os fornecidos pelo CBERS-4A, que se mostraram essenciais para a determinação precisa do polígono final.

Figura 16 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da área de estudo



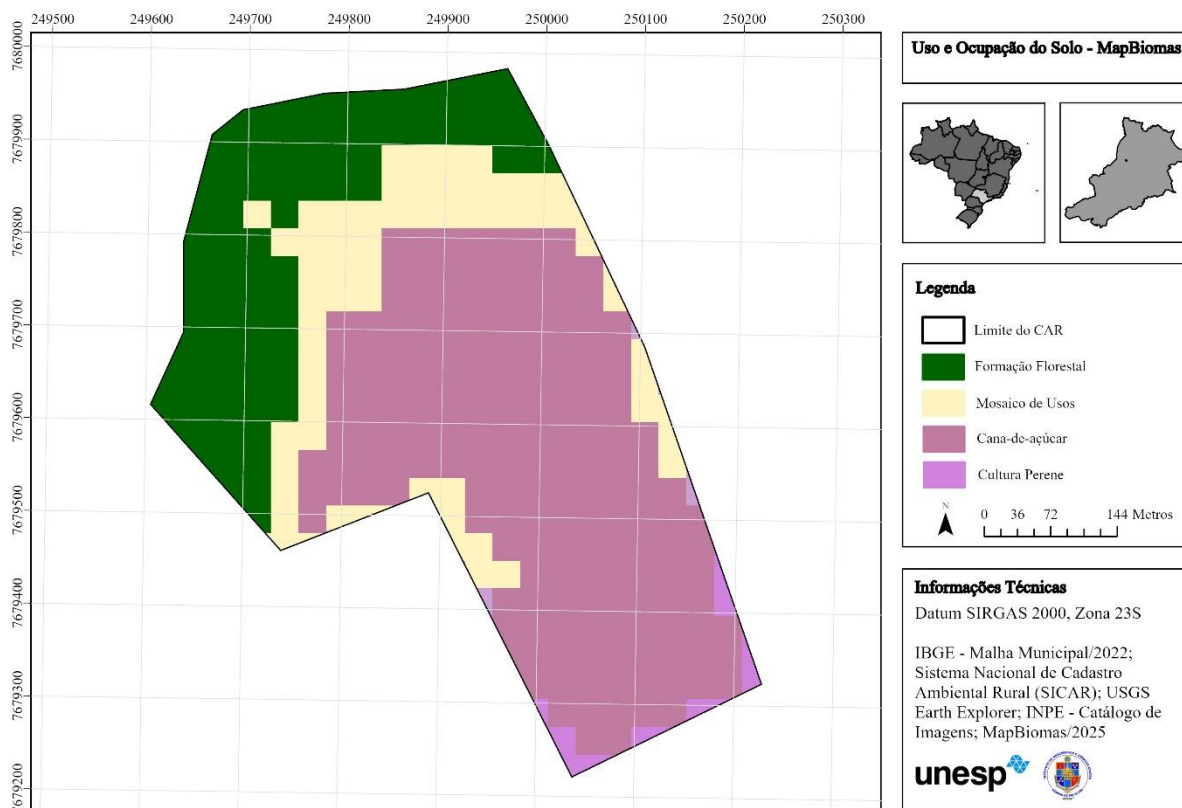
Fonte: INPE/2025; IBGE/2022; SICAR/2025; USGS/2025. Autoria própria.

6.2.2. Análise pelo MapBiomias

A Figura 17, que representa o Uso e Ocupação do Solo na área de estudo conforme a base de dados MapBiomias (referente ao ano de 2025), é a evidência visual da inadequação da resolução de 30 metros para o monitoramento detalhado exigido pelo Renovabio. Embora o mapa cumpra seu papel de contextualização, identificando a presença da Formação Florestal no canto superior esquerdo e distinguindo-a das áreas de Cultura Perene e Mosaico de Usos, a delimitação geométrica é grosseira.

O polígono de Formação Florestal apresenta bordas quadráticas e simplificadas, uma característica inerente à baixa resolução espacial. Esta representação falha em capturar a irregularidade das bordas do fragmento, ignora falhas internas críticas (clareiras) e impede a identificação de feições antrópicas de pequena escala, tornando-o inútil para a quantificação precisa da área. Em suma, a análise do MapBiomias confirma que, apesar de ser uma ferramenta válida para a auditoria temporal e o contexto histórico, a sua baixa precisão geométrica ratifica a necessidade de altas resoluções para o detalhamento e a fiscalização requeridos pela legislação do programa Renovabio.

Figura 17 - Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo, com base nos dados do MapBiomias (2025)



Fonte: autoria própria.

6.3. Pontuação dos Critérios de Desempenho

A avaliação comparativa entre o ARP, o satélite CBERS-4A e o satélite Sentinel-2 permitiu compreender, de forma integrada, as potencialidades e limitações de cada fonte de dados para o mapeamento de vegetação nativa em escala de propriedade, atendendo às exigências específicas do RenovaBio. Os resultados demonstraram que a resolução espacial, a interpretação espectral, a escala de operação e a praticidade de aquisição influenciaram diretamente a precisão da delimitação dos fragmentos analisados.

Nesse contexto, a ilustração 1 sintetizou a avaliação comparativa dos sensores. Com base nos cinco critérios adotados, cada sensor recebeu a respectiva nota (1 a 3) com base nas evidências e análises apresentadas no trabalho:

1. Custo por Área (Disponibilidade / Escala): este critério avaliou a viabilidade econômica de se utilizar a fonte de dados em projetos de grande escala, considerando custo de aquisição, custos logísticos associados à coleta e potencial para replicabilidade em múltiplos Cadastros Ambientais Rurais.

- a. *Sentinel-2* — *nota 3*: é um dado de acesso livre, com amplo catálogo histórico e cobertura global, o que o torna economicamente viável para análises extensas e repetidas;
 - b. *CBERS-4A* — *nota 3*: também é disponibilizado sem custo para o usuário em muitos repositórios públicos; sua aquisição não implica logística de campo, favorecendo escala operacional;
 - c. *ARP (Drone)* — *nota 1*: apesar de fornecer dados de alta resolução, a operação de ARP implicou custos diretos (voo, operador, deslocamento, processamento) e limitações logísticas que tornam a expansão para largas extensões onerosa e pouco prática.

2. Resolução Espacial (Capacidade de Detalhe Geométrico): este critério mediu a capacidade do dado em representar a geometria real do fragmento, identificar bordas, microfragmentos e pequenas descontinuidades no dossel.
 - a. *Sentinel-2* — *nota 1*: com pixel de 10 metros para bandas úteis à vegetação, o Sentinel-2 apresentou baixa discriminação de microfragmentos e promoveu uniformização de manchas, levando à superestimação observada (ex.: 3,13 hectares versus 2,98 hectares do ARP);
 - b. *CBERS-4A* — *nota 2*: ofereceu resolução espacial intermediária, capaz de detectar fragmentos estreitos e reduzir parte da superestimação, aproximando-se dos valores aerofotogramétricos (3,08 hectares);
 - c. *ARP (Drone)* — *nota 3*: proporcionou o mais alto nível geométrico, capturando bordas irregulares, clareiras internas e microfragmentos, sendo o padrão de referência para a geometria do polígono.

3. Frequência de Revisita (Disponibilidade Temporal de Imagens): aqui avaliou-se a regularidade com que imagens livres e utilizáveis (baixa cobertura de nuvens, datas relevantes) estavam disponíveis, fator importante para análises multitemporais.
 - a. *Sentinel-2* — *nota 3*: alta frequência de revisita (em média 5 dias) e longo histórico permitiram maior chance de obter imagens em datas de interesse e de construir séries temporais consistentes;

- b. *CBERS-4A* — *nota 2*: apresentou periodicidade menor e catálogo menos denso que o *Sentinel-2*, mas ainda ofereceu imagens relevantes para comparação temporal;
 - c. *ARP (Drone)* — *nota 1*: revisita dependente de nova operação de campo; não há disponibilidade automatizada contínua, limitando sua utilidade para análise temporal sem custo e esforço logístico constantes.
- 4. Qualidade para Mapeamento (Interpretação Visual e Espectral): este critério integrou a qualidade espectral das bandas para discriminação de classes e a legibilidade visual para digitalização manual e inspeção do analista.
 - a. *Sentinel-2* — *nota 2*: dispõe de bandas úteis ao sensoriamento vegetacional, porém a combinação de sua resolução espacial e mistura de pixels reduziu a fidelidade na interpretação de bordas e microfragmentos, exigindo maior cautela na vetorização manual;
 - b. *CBERS-4A* — *nota 3*: mostrou melhor equilíbrio entre resolução espacial e qualidade espectral para discriminar descontinuidades do dossel, o que facilitou a interpretação visual e reduziu o viés da digitalização em comparação com o *Sentinel-2*;
 - c. *ARP (Drone)* — *nota 3*: forneceu imagens de alta resolução e detalhe radiométrico suficiente para interpretação precisa, permitindo vetorização com mínimo viés interpretativo e validação geométrica robusta.
- 5. Praticidade Operacional e Escalabilidade: avaliou-se a facilidade de aquisição, processamento, integração em fluxos de trabalho e capacidade de aplicação em grande número de unidades de análise.
 - a. *Sentinel-2* — *nota 3*: workflows consolidados, integração com plataformas de processamento e ampla disponibilidade tornaram-no altamente prático e escalável;
 - b. *CBERS-4A* — *nota 3*: apesar de menor revisita que o *Sentinel-2*, manteve boa praticidade operacional e foi considerado adequado para escalabilidade, sobretudo quando se priorizava melhor detalhamento espacial sem incorrer nos custos de *ARP*;

- c. *ARP (Drone)* — *nota 1*: apresentou limitações operacionais (logística, necessidade de equipe de campo, condicionantes meteorológicas, tempo de processamento por missão) que comprometeram sua aplicabilidade em escalas maiores.

Ilustração 1 - Avaliação Comparativa dos Sensores

Critério de Avaliação	Sentinel-2	CBERS-4A	ARP (Drone)	Justificativa Técnica da Avaliação
1. Custo por Área (Disponibilidade / Escala)	3	3	1	Sentinel-2 e CBERS-4A apresentam aquisição gratuita e cobertura nacional contínua. O ARP possui alto custo operacional, logística complexa e baixa escalabilidade para grandes áreas.
2. Resolução Espacial (Precisão Geométrica)	1	2	3	O Sentinel-2 (10 m) apresentou maior superestimação da área e baixa discriminação de fragmentos estreitos. O CBERS-4A demonstrou capacidade intermediária, aproximando-se do drone. O ARP apresentou máxima precisão (subcentimétrica–centimétrica).
3. Frequência de Revisita (Disponibilidade Temporal)	3	2	1	Sentinel-2 possui revisita de 5 dias e amplo catálogo histórico (incluindo 2017). O CBERS-4A possui revisita inferior. O ARP depende de operação manual e condições de campo, sem revisita automática.
4. Qualidade para Mapeamento (Interpretação Visual e Espectral)	2	3	3	O Sentinel-2 apresentou limitações ao uniformizar pequenas descontinuidades. O CBERS-4A discriminou melhor microfragmentos, aproximando-se dos valores do ARP. O ARP apresenta a melhor interpretação visual e geométrica.
5. Praticidade Operacional e Escalabilidade	3	3	1	Os satélites permitem processamento ágil e escalável para centenas de CARs. O ARP é operacionalmente limitado, com baixa escalabilidade e alta dependência logística, não adequado para análises extensivas.

Fonte: Autoria própria.

A ilustração 2 apresentou o resumo técnico da pontuação acumulada dos sensores, permitindo avaliar o desempenho geral de cada plataforma com base nos critérios previamente analisados. As notas atribuídas em cada um dos cinco parâmetros foram somadas para oferecer

uma visão integradora da adequação operacional e técnica de cada método de aquisição de dados para o mapeamento de vegetação nativa no contexto do RenovaBio. O resultado final evidenciou diferenças relevantes entre as três fontes de informação espacial, refletindo tanto suas características intrínsecas quanto seu comportamento empírico ao longo das análises deste trabalho.

O Sentinel-2 obteve um total de 12 pontos, demonstrando bom desempenho em critérios associados à temporalidade, custo e escalabilidade, embora tenha sido limitado na precisão geométrica devido à resolução espacial de 10 metros. Esse desempenho mostrou que, apesar das restrições observadas na delimitação de fragmentos menores, o sensor continuou sendo operacionalmente vantajoso para análises regionais e para a obtenção de séries históricas consistentes.

O CBERS-4A, com 13 pontos, apresentou o melhor desempenho geral entre os três sensores avaliados. Isso ocorreu porque o satélite conseguiu equilibrar custo zero, boa resolução espacial, qualidade espectral satisfatória e praticidade operacional, aproximando seus resultados daqueles obtidos pelo ARP em termos de fidelidade geométrica. Esse equilíbrio técnico foi determinante para que o CBERS-4A acumulasse a maior pontuação, confirmando sua adequação para o mapeamento de vegetação nativa em escala de propriedade e para as necessidades específicas do programa RenovaBio.

O ARP (Drone) acumulou 9 pontos, destacando-se como a melhor fonte de referência geométrica entre os três métodos devido ao alto detalhamento espacial. No entanto, seu desempenho geral foi comprometido pelos elevados custos operacionais, pela necessidade de logística de campo e pela limitada escalabilidade para grandes extensões territoriais. Assim, apesar de sua superioridade geométrica, o ARP mostrou-se inviável como solução principal para projetos que demandam análise em larga escala, o que justificou sua menor pontuação total.

É fundamental reiterar que essa avaliação comparativa, assim como o conjunto de critérios utilizados para atribuir as notas, não se baseou em metodologias padronizadas encontradas na literatura científica. Os parâmetros analisados foram definidos pela autora deste trabalho a partir de uma perspectiva crítica, orientada pela necessidade de propor alternativas metodológicas adequadas ao escopo do estudo e às demandas operacionais do RenovaBio. Portanto, a pontuação acumulada e o desempenho geral dos sensores devem ser interpretados como uma síntese crítica aplicada a este caso específico, e não como um modelo universal de avaliação.

Ilustração 2 - Resumo técnico da pontuação

Sensor	Soma das Notas	Desempenho Geral
Sentinel-2	12	Bom na escala temporal e operacional, limitado na precisão geométrica
CBERS-4A	13	Melhor equilíbrio entre custo, resolução e qualidade de mapeamento, aproximando-se do ARP
ARP (Drone)	9	Melhor precisão geométrica, porém inviável em larga escala (alto custo e baixa praticidade)

Fonte: Autoria própria.

7. CONCLUSÕES FINAIS

O conjunto de análises desenvolvidas neste trabalho reforçou a importância de empregar o satélite CBERS-4A como ferramenta central para a avaliação de vegetação nativa no contexto do RenovaBio. A resolução espacial superior e a capacidade de discriminar fragmentos estreitos ou descontínuos permitem reduzir incertezas interpretativas e aproximar o mapeamento de uma representação mais fiel da realidade observada em campo. Dessa forma, o uso sistemático do CBERS-4A tende a qualificar o processo de certificação, tornando-o mais consistente e menos suscetível a divergências metodológicas.

Ao longo das análises realizadas, observou-se também uma limitação estrutural no programa. A metodologia oficial do RenovaBio não apresenta critérios suficientemente específicos e possui lacunas significativas que dificultam a interpretação homogênea dos resultados. A ausência de parâmetros objetivos para definir o que deve ser considerado vegetação nativa suprimida, assim como a falta de orientações claras sobre o tamanho mínimo de fragmento, a largura de corredores vegetados ou critérios espectrais e geométricos, resulta em grande margem interpretativa. Essa vagueza metodológica faz com que diferentes analistas adotem entendimentos distintos sobre uma mesma área, criando um viés interpretativo inevitável e comprometendo a padronização dos resultados.

Diante desse cenário, torna-se fundamental propor melhorias na metodologia do programa. Uma alternativa seria estabelecer a definição de parâmetros espaciais, espectrais e operacionais que orientem o uso de imagens orbitais no processo de auditoria. A adoção de diretrizes mais objetivas e detalhadas contribuiria para reduzir a subjetividade do mapeamento e proporcionaria maior segurança técnica, jurídica e operacional às usinas, aos auditores e ao próprio programa.

As conclusões deste estudo indicam que o CBERS-4A se apresentou como o sensor mais adequado para essas análises e reforçam a necessidade de aperfeiçoamento das diretrizes atuais, de modo a garantir maior clareza, padronização e confiabilidade no monitoramento da supressão de vegetação nativa dentro do RenovaBio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Informe Técnico nº 02/SBQ v. 4 – Orientações gerais: procedimentos para certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis*. Rio de Janeiro: ANP, 2021.

AGISOFT LLC. *Agisoft Metashape User Manual – Professional Edition, Version 2.0*. St. Petersburg, Russia:

Agisoft LLC, 2023. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf. Acesso em: 21 jun 2025.

ALMADA, Hellen Kezia et al. Indigenous lands and conservation units slow down non-GHG climate change in the Cerrado-Amazon ecotone. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 22, n. 2, p. 177-185, 2024.

ALVARENGA, Rafael Pazeto; QUEIROZ, Timoteo Ramos. *CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS E IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO PAULISTA*. 2008.

ARÉVALO-SANDI, Alexander et al. Law But Not Order: Effectiveness of Brazil's Native Vegetation Protection Law in Preventing Forest Loss in Human Occupied Areas of the Amazon. Available at SSRN 4846069, 2022.

ARONOFF, S. *Geographic information systems: a management perspective*. Ottawa, WDL Publications, 1989. 295 p.

BAJJALI, William. Introduction to Geodatabase. In: **ArcGIS Pro and ArcGIS Online: Applications in Water and Environmental Sciences**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 81-95.

BHATIA, Dinesh; DHILLON, Akash Singh; HESSE, Henrik. Preliminary Design of an UAV Based System for Wildlife Monitoring and Conservation. In: *International Conference on Aeronautical Sciences, Engineering and Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 51-63.

BOSCOLO, Helena K. et al. Contributions of the Brazil's National Institute for Space Research (INPE) to emergency response in the International Space and Major Disasters Charter. *Discover Applied Sciences*, v. 6, n. 4, p. 178, 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 27 dez. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 13 nov. 2025.

BRASIL, Presidência da República. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006: Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Brasília, 2006.

BURROUGH, P.A. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford, Clarendon Press, 1986. 193 p.

CÂMARA, Gilberto; ORTIZ, Manoel Jimenez. Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA: CARTOGRAFIA, SENSORIAMENTO E GEOPROCESSAMENTO*. 1998. p. 59-88.

CAMERALABS. *DJI Air 2S Review*. 2021. Disponível em: <https://www.cameralabs.com/dji-air-2s-review/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

CASTRO, Janine Quadros. *Imagens de Satélites e UAV no Monitoramento de uma Lavoura de Soja*. 2023.

CRUZ, Mauro César Cardoso et al. Transição energética sustentável: uma aplicação do RenovaBio. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 7, p. e5604-e5604, 2024.

DA SILVA, Jorge Xavier. Geoprocessamento no Apoio à Decisão. **CONTINENTES**, 2021.

DE CARVALHO, Eber Luiz Arruda et al. Detecção de Manifestações Patológicas em Pavimento Asfáltico por Meio de Drone. **UNICIÊNCIAS**, v. 28, n. 1, p. 20-24, 2024.

DENNY, Danielle Mendes Thame. Competitive renewables as the key to energy transition—RenovaBio: the Brazilian biofuel regulation. In: **The regulation and policy of latin American energy transitions**. Elsevier, 2020. p. 223-242.

DPREVIEW. *DJI's Air 2S is the Ultimate Consumer Drone*. 2021. Disponível em: <https://www.dpreview.com/reviews/review-dji-s-air-2s-is-the-ultimate-consumer-drone>. Acesso em: 13 nov. 2025.

EPIPHANIO, José Carlos N. Satélites de Sensoriamento Remoto. Inpe: Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. São Paulo, 2002. cap. 2. p. 10.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Os satélites e suas aplicações**. Sindicato dos servidores Públicos Federais na Área de Ciências e Tecnologia do Vale do Paraíba-SindCT, 2008.

GUERINO, Ritielly Maria Guimarães et al. Expansão e impactos socioambientais da cultura de Eucalyptus spp.(Myrtaceae) no Brasil: um panorama da literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e48811326751-e48811326751, 2022.

HINTON, J. C. GIS and remote sensing integration for environmental applications. **International journal of geographical information systems**, v. 10, n. 7, p. 877-890, 1996.

HUANG, Sha et al. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of forestry research**, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2021.

ICAO, Doc. 2015. 10019, “Manual sobre sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS)” 2015.<http://store.icao.int/products/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019>. ICAO. 2011. Cir '328 AN/190', Circular sobre Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (UAS).

KREPS, Sarah E.; ROGERS, James Patton. **Drones: What everyone needs to know®**. Oxford University Press, 2025.

LAUDARES, Sarita Soraia de Alcântara et al. New contours of the native vegetation protection law of 2012. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. e20160612, 2019.

LAW, Michael; COLLINS, Amy. Getting to know ArcGIS PRO. **(No Title)**, 2019.

MATSUURA, MI da SF et al. RenovaCalc: a calculadora do Programa RenovaBio.

MCGREGOR, Ian R.; CONNETTE, Grant; GRAY, Josh M. A multi-source change detection algorithm supporting user customization and near real-time deforestation detections. *Remote Sensing of Environment*, v. 308, p. 114195, 2024.

MELO, Bárbara Gomes de et al. Mapeamento supervisionado de áreas irrigadas por pivôs usando imagens CBERS-04A para fins da análise de outorga. 2023.

MENDES, Larissa Gomes et al. IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE: Identification and evaluation of land use and occupation of permanent Preservation Areas in a sub-watershed of the Doce River. **Geosciences= Geociências**, v. 43, n. 3, p. 489-496, 2024.

MORALES, N. F. B. Teledetección Espacial: Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y MODIS. 1ª. ed. Perú, 2017.

MOREIRA, Afonso Maria de Almeida. Estudo sobre o agronegócio e o desmatamento nos biomas terrestres brasileiros-período 2007 e 2021. 2023.

MUGNAI, Francesco; TUCCI, Grazia. A comparative analysis of unmanned aircraft systems in low altitude photogrammetric surveys. **Remote sensing**, v. 14, n. 3, p. 726, 2022.

MURAKAMI, Keach; MATSUDA, Ryo. Optical and physiological properties of a leaf. In: **LED Lighting for Urban Agriculture**. Singapore: Springer Singapore, 2016. p. 113-123.

NWAOGU, Janet Mayowa et al. Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Automation in Construction*, v. 150, p. 104827, 2023.

NZEANORUE, Chibuike Godswill et al. Advanced remote sensing technologies for tracking landscape changes and environmental conditions. 2024.

OLIVEIRA, Veronica Martins Costa de. **Avaliação do RenovaBio como indutor da eficiência energética ambiental no processo produtivo do etanol**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PAMUJI, Rizky et al. Utilizing Electromagnetic Radiation in Remote Sensing for Vegetation Health Analysis Using NDVI Approach with Sentinel-2 Imagery. **Kasuari: Physics Education Journal (KPEJ)**, v. 6, n. 2, p. 127-135, 2023.

RENOVABIO, GT-ACV. RenovaBio: inovação para a sustentabilidade. *AgroANALYSIS*, v. 40, n. 1, p. 31-32, 2020.

RONQUIM, Carlos Cesar et al. Dynamics of the natural regeneration of forest remnants in the state of São Paulo, Brazil. 2024.

SANTANA, José Paulo et al. Phytosociology of the shrub-arboreal stratum of the Ibura National Forest, Northeastern Brazil: are 35 years sufficient to promote the regeneration of a forest fragment?. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 15, n. 2, p. 89-106, 2020.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Coordenadoria de assistência técnica integral. Instituto de economia agrícola. Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo LUPA 2009. São Paulo: SAA/CATI/IEA, 2009.

SHANMUGAPRIYA, N. et al. Synergizing Remote Sensing, Geospatial Intelligence, Applied Nonlinear Analysis, and AI for Sustainable Environmental Monitoring.

SILVA, Jorge Xavier da. O que é Geoprocessamento? *Revista do Crea - RJ*, v. 79, p. 42-44, 2009.

SILVA, Vanessa Cecília Benavides; MACHADO, P. de S. Iniciando no ARCGIS. Belo Horizonte: Centro Universitário de Belo Horizonte, 2010.

SOKOLOVA, Alla; RATOSHNIUK, Tatiana; MARTYNYUK, Myhaylo. Estimation of ecological factors of sustainable rural development: regional features. *Journal of Innovations and Sustainability*, v. 6, n. 1, p. 02-02, 2022.

VANCINE, Maurício Humberto et al. The Atlantic Forest of South America: spatiotemporal dynamic of remaining vegetation and implications for conservation. **bioRxiv**, p. 2023.09. 16.558076, 2023.

WRETHAM, Daniel. *DJI Air 2S Review*. 2021. Disponível em: <https://www.danielwrethamphotography.com/post/dji-air-2s-review>. Acesso em: 13 nov. 2025.

ZHANG, Zhenglin; GALVIN, Liberty. Native grasses' potential of providing ecological weed suppression in rangeland and natural areas: A scoping review. *Outlook on Agriculture*, v. 52, n. 4, p. 391-398, 2023.