



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ASHELEY AICHA DA SILVA LIMA

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT 7 E 8 E SENTINEL-2 PARA
MONITORAMENTO AGRÍCOLA, ANÁLISE DE DESMATAMENTO E USO DA
TERRA: UM ESTUDO DE CASO NO MÉDIO PARNAÍBA PIAUIENSE.**

FORTALEZA

2025

ASHELEY AICHA DA SILVA LIMA

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT 7 E 8 E SENTINEL-2 PARA
MONITORAMENTO AGRÍCOLA, ANÁLISE DE DESMATAMENTO E USO DA TERRA:
UM ESTUDO DE CASO NO MÉDIO PARNAÍBA PIAUIENSE.

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de
Graduação em Ciências Ambientais da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Geraldo
Ferreira.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L696u Lima, Asheley Aicha da Silva.

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT 7 E 8 E SENTINEL-2 PARA MONITORAMENTO AGRÍCOLA, ANÁLISE DE DESMATAMENTO E USO DA TERRA: : UM ESTUDO DE CASO NO MÉDIO PARNAÍBA PIAUIENSE. / Asheley Aicha da Silva Lima. – 2025.

48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Ciências Ambientais, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira..

1. Sensoriamento remoto. 2. Geoprocessamento. 3. Monitoramento agrícola. 4. Desmatamento. 5. Composição espectral. I. Título.

CDD 333.7

ASHELEY AICHA DA SILVA LIMA

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT 7 E 8 E SENTINEL-2 PARA
MONITORAMENTO AGRÍCOLA, ANÁLISE DE DESMATAMENTO E USO DA TERRA:
UM ESTUDO DE CASO NO MÉDIO PARNAÍBA PIAUIENSE.

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de
Graduação em Ciências Ambientais da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Aprovada em 12/03/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira – Orientador

LABOMAR – UFC

Dr. Thales Sehn Körting

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

UFC - Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos caminhos trilhados, às pessoas estimadas e às decisões tomadas que me conduziram a este momento, dedico este trabalho com sincera gratidão. Ao divino que iluminou cada passo desta jornada, minha reverência e reconhecimento.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais, Ocleilson e Josy, cuja dedicação e amor me proporcionaram o melhor de si e me concederam os companheiros de vida mais preciosos. Ao meu pai, Ocleilson, agradeço pelo constante incentivo aos meus estudos, pela amizade sincera e por me ter ensinado a enfrentar as adversidades com força e determinação, mesmo quando o mundo parecia implacável.

Aos meus queridos irmãos, os companheiros que me foram concedidos por meus pais, expresso profunda gratidão. Clarice, que se revela uma das minhas melhores amigas e sempre me ofereceu o cuidado e o amor típicos de uma irmã mais velha, provando que os dez anos que nos separam jamais diminuíram a força de nossa amizade; Winona, o coração pulsante de nossa família, merece um agradecimento especial por nunca ter renunciado a si mesma, mesmo diante de momentos de intensa dor e desafios, pois sem ela um pedaço essencial de mim jamais existiria; Kekinho, cuja chegada me fez saber que nunca estaria sozinha e que, juntos, poderíamos construir um mundo melhor, sendo fonte de força e inspiração; e Alisson, meu irmão silencioso e gênio artesão que, embora não nos une o sangue, foi escolhido pelo coração, sempre me acolhendo-me com tamanha gentileza em seu lar e participando de saudosas memórias em família.

Ao meu estimado e amado Tarso, cuja força e generosidade transformaram o meu entorno, agradeço pelo incentivo decisivo que foi crucial para a realização deste trabalho e pela amizade, cultivada ao longo de oito anos, que hoje integra parte de um dos sentimentos mais sublimes que possuo. À minha amiga Eduarda, companheira desde o ensino fundamental, sou imensamente grata pelo encorajamento, pelo companheirismo e pela lealdade que têm iluminado minha trajetória; à Wanda, amiga que ganhei de forma inusitada na faculdade disputando por uma cadeira de canhoto, agradeço pela constante companhia, vigor e incentivo durante toda a graduação; à Isadora, cujo coração imenso e amizade sincera sempre me proporcionaram conforto; e ao Erasmo, por nossas conversas profundas que culminaram na minha paixão pelo universo e por sempre terem acreditado no meu potencial.

Ao meu querido orientador e amigo, Prof. Dr. Antonio Geraldo, expresso minha mais profunda gratidão pelas aulas inspiradoras que despertaram meu interesse pela temática deste trabalho e, por meio de sua orientação, possibilitaram sua concretização. Nossas conversas e os inúmeros cafés partilhados transcenderão esta etapa, marcando de forma indelével minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos amigos Prof. Dr. Marcus Vinicius e Luzanira Fraga, agradeço pela amizade, pelos ensinamentos e pela oportunidade que me proporcionaram, estando sempre presentes nos momentos de necessidade; e à Hívila, sou grata por sua amizade e incentivo, que acrescentaram risos e leveza aos meus dias nesta etapa final.

Por fim, estendo meus sinceros agradecimentos a todo o corpo docente do Instituto de Ciências do Mar – Labomar, em especial ao Prof. Dr. Antonio Geraldo, ao Prof. Dr. Marcus Vinícius, à Prof. Dr. Danielle Sequeira e ao Prof. Dr. Rivelino Martins, cujos valiosos ensinamentos, incentivo e apoio foram fundamentais ao longo de minha formação.

Este trabalho é fruto não apenas do conhecimento acadêmico, mas também do amor, da dedicação e dos valores que me foram transmitidos por aqueles que me acompanharam nesta jornada, os quais reverberam em cada palavra aqui escrita.

Digno és, Jeová, nosso Deus, de receber a glória, a honra e o poder, porque criaste todas as coisas, e por tua vontade elas vieram à existência e foram criadas. (BÍBLIA. *Tradução do Novo Mundo da Bíblia Sagrada – Edição de Estudo*, Revelação 4:11).

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para o monitoramento agrícola, a análise de desmatamento e a caracterização do uso da terra em uma área específica localizada no município de Jardim do Mulato, Piauí. A pesquisa utilizou imagens de satélite dos sensores Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2, capturadas nos anos de 2000, 2014 e 2024, permitindo a análise multitemporal das transformações na paisagem. As composições espectrais NIR, RED e SWIR foram aplicadas para identificar as fases fenológicas das culturas predominantes na região, como soja e milho, desde a emergência até a colheita, facilitando o manejo agrícola. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi utilizado para avaliar a saúde das plantas e a produtividade das lavouras, bem como para identificar áreas sujeitas a estresse ambiental. A análise também permitiu detectar áreas de desmatamento e solo exposto após a colheita, orientando práticas conservacionistas, como o plantio direto e a rotação de culturas. Os resultados demonstraram a importância do sensoriamento remoto para a gestão territorial e para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, destacando a necessidade de monitoramento contínuo para a preservação dos recursos naturais. Conclui-se que a integração das tecnologias de geoprocessamento proporciona uma abordagem mais eficiente e precisa para o planejamento agrícola e a mitigação dos impactos ambientais, contribuindo para o desenvolvimento agrícola sustentável da região analisada.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Geoprocessamento; Monitoramento agrícola; Desmatamento; Uso da terra; Composição espectral.

ABSTRACT

This work addresses the application of remote sensing and geoprocessing tools for agricultural monitoring, deforestation analysis, and land use characterization in a specific area located in the municipality of Jardim do Mulato, Piauí. The research utilized satellite images from the Landsat 7, Landsat 8, and Sentinel-2 sensors, captured in the years 2000, 2014, and 2024, enabling a multitemporal analysis of landscape transformations. The NIR, RED and SWIR spectral compositions were applied to identify the phenological phases of the predominant crops in the region, such as soybeans and corn, from emergence to harvest, facilitating agricultural management. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to assess plant health and crop productivity, as well as to identify areas subject to environmental stress. The analysis also enabled the detection of deforested areas and exposed soil after harvest, guiding conservation practices such as no-till farming and crop rotation. The results demonstrated the importance of remote sensing for land management and the promotion of sustainable agricultural practices, highlighting the need for continuous monitoring to preserve natural resources. It is concluded that the integration of geoprocessing technologies provides a more efficient and precise approach to agricultural planning and the mitigation of environmental impacts, contributing to the sustainable agricultural development of the analyzed region.

Keywords: Remote sensing; Geoprocessing; Agricultural monitoring; Deforestation; Land use; Spectral composition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização geográfica do Estado do Piauí no Brasil.....	18
Figura 2 - Localização geográfica dos Estados com regiões componentes do MATOPIBA....	19
Figura 3 - Mapa da localização geográfica do município de Jardim do Mulato.....	20
Figura 4 - Áreas colhidas de soja e milho, em hectares, na região do Piauí no ano de 2023...	21
Figura 5 - Ranking das principais culturas agrícolas por valor de produção no Estado do Piauí em 2023.....	21
Figura 6 - Principais características da missão do programa Landsat 7.....	22
Figura 7 - Principais características da missão do programa Landsat 8.....	23
Figura 8 - Informações espectrais do Sentinel-2.....	24
Figura 9 - Fluxograma da metodologia utilizada.....	26
Figura 10- Calendário de plantio e colheita da soja no Nordeste.....	33
Figura 11 - Série Temporal de NDVI em outubro, anterior ao início da safra.....	33
Figura 12 - Série Temporal de NDVI em janeiro, com aumento gradativo do início de emergência.....	34
Figura 13 - Série temporal de NDVI em Março, apresentando valores indicando vigor vegetativo.....	34
Figura 14 - Série temporal de NDVI com valores de senescência em Abril.....	34
Figura 15 - Série Temporal de NDVI apresentando valores com sinalização de colheita.....	35
Figura 16 - Mapa em composição de cor verdadeira e composição falsa cor da área de interesse no ano 2000.....	37
Figura 17 - Mapa da área de interesse e áreas ao redor, em composição verdadeira e falsa cor, demonstrando abertura de talhões agrícolas ocorrida em 2014.....	38
Figura 18 - Mapa da área de interesse em composição de cor verdadeira e falsa cor em 2024.....	39
Figura 19 - Mapa com a visualização da área de interesse, em composição de cor verdadeira, apresentando início da emergência no talhão agrícola e em áreas agrícolas próximas.....	42
Figura 20 - Mapa da área de interesse e áreas agrícolas ao redor, , em composição de cor verdadeira, apresentando vigor vegetativo.....	43
Figura 21 - Mapa da área de interesse e áreas agrícolas ao redor, em composição em cor verdadeira, apresentando colheita - solo exposto.....	44
Figura 22 - Mapa da área de interesse com cultivo de soja e área próxima com cultivo de milho na composição NIR SWIR RED.....	46
Figura 23- Calendário de plantio e colheita de milho no Nordeste.....	47
Figura 24 - Série temporal de NDVI da cultura de milho em outubro, período anterior ao início da safra.....	47
Figura 25 - Série temporal de NDVI da cultura de milho em seu pico vegetativo, em janeiro.....	48

Figura 26 - Série temporal de NDVI do período de abril, com valores sugestivos de colheita.....	48
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. DADOS E METODOLOGIA.....	19
3.1 Área de estudo e culturas de interesse.....	19
3.2 Dados utilizados.....	23
3.3 Metodologia.....	26
4. DESENVOLVIMENTO.....	27
4.1. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados à análise ambiental e agrícola.....	27
4.2. Fotointerpretação de imagens de satélite para monitoramento do uso da terra no Piauí.....	29
4.3. Composições espectrais e índices de vegetação como ferramentas de análise.....	31
4.4. Aplicação do NDVI no monitoramento agrícola das culturas de soja.....	33
4.5. Análise multitemporal para identificação de desmatamento e mudanças no uso da terra.....	36
4.6. Monitoramento agrícola com foco em safra: emergência, senescência e colheita.....	40
4.7. Proposição de cultura e caracterização da terra com base nas composições NIR SWIR RED.....	44
5. CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento tem revolucionado a análise e o monitoramento ambiental, permitindo a identificação precisa das mudanças no uso e cobertura da terra, além de facilitar o acompanhamento das atividades agrícolas em diferentes regiões. Essas tecnologias possibilitam a obtenção de informações detalhadas por meio da interpretação de imagens de satélite, oferecendo subsídios para a tomada de decisão em setores como agricultura, meio ambiente e planejamento territorial (Coelho et al., 2016).

A aplicação dessas técnicas em áreas agrícolas tem se destacado, especialmente no que se refere ao monitoramento das culturas, como algodão, trigo, arroz, soja e milho – os últimos citados sendo de grande relevância para a economia do Piauí. A análise das diferentes fases das safras, desde a emergência até a colheita, pode ser realizada com maior precisão por meio da combinação de bandas espectrais específicas, como a composição em cor verdadeira, o infravermelho próximo (NIR), o vermelho (RED) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR), que proporcionam uma compreensão mais clara do desenvolvimento das plantações e da saúde da vegetação (Da Silva; Almeida, 2015).

Além do monitoramento agrícola, o sensoriamento remoto também se mostra eficaz na análise de desmatamento e mudanças no uso da terra, especialmente em regiões semiáridas, como o estado do Piauí. A utilização de índices de vegetação, como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), permite identificar áreas degradadas e acompanhar a regeneração natural, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos naturais e o combate à desertificação (De Jesus França et al., 2017).

Nesse contexto, a fotointerpretação das imagens de satélite é uma ferramenta essencial para a realização de estudos ambientais e agrícolas, possibilitando não apenas o diagnóstico das condições atuais, mas também a previsão de cenários futuros. A análise multitemporal das imagens, aliada ao uso de composições espectrais específicas, como NIR SWIR RED, ou NIR RED SWIR, permite identificar padrões de desmatamento e propor estratégias de manejo mais eficientes para diferentes tipos de cultura (Franco, 2023).

Portanto, o presente estudo tem como objetivo analisar a aplicabilidade do sensoriamento remoto e do geoprocessamento para o monitoramento agrícola, a análise do desmatamento e a identificação do uso da terra em uma área pré-definida no estado do Piauí. A investigação será conduzida com base na interpretação de imagens de satélite, destacando as composições espectrais mais adequadas para cada aplicação, como a cor verdadeira para

monitoramento de safra e as composições NIR SWIR RED e NIR RED SWIR para análise de desmatamento, monitoramento e identificação de culturas predominantes.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a aplicabilidade do sensoriamento remoto e do geoprocessamento para o monitoramento agrícola, a análise do desmatamento e a caracterização do uso da terra no município de Jardim do Mulato, Piauí. Utilizando imagens de satélite de diferentes períodos, busca-se avaliar as transformações na paisagem e seu impacto ambiental, com o propósito de aprimorar o acompanhamento das safras agrícolas e a detecção de áreas desmatadas.

2.2 Objetivos Específicos

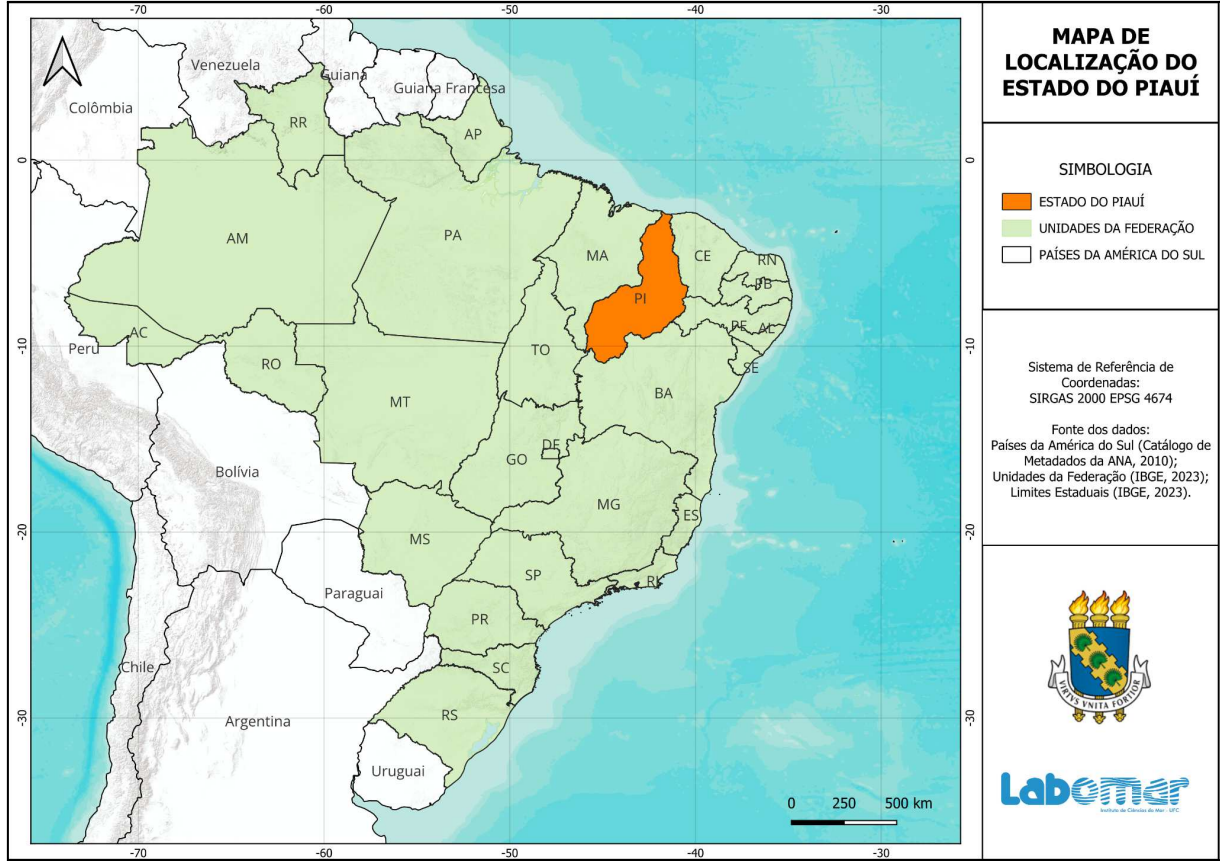
- Apresentar os princípios teóricos e as aplicações práticas do Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, enfatizando suas potencialidades e limitações na análise ambiental e agrícola.
- Aplicar técnicas de interpretação de imagens de satélite para mapear e monitorar o uso da terra na área de interesse em Jardim do Mulato, Piauí.
- Aplicar composições espectrais e índices de vegetação como ferramentas de análise: Avaliar o emprego de composições espectrais e índices (destacando o NDVI) para a análise da saúde e do vigor das vegetações, considerando tanto ambientes naturais quanto áreas agrícolas.
- Empregar o NDVI no monitoramento das culturas de soja e milho: Utilizar o índice NDVI como ferramenta de monitoramento para identificar padrões de crescimento, estresses e demais variáveis relevantes nas lavouras de soja.
- Demonstrar metodologias para caracterização da terra e cultura com base em composições NIR, RED e SWIR.

3. MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo e culturas de interesse

O estado do Piauí, localizado na região Nordeste do Brasil, tem experimentado, nas últimas décadas, uma notável expansão de suas terras destinadas à agricultura. Conforme ilustrado na Figura 1, que apresenta a localização do estado no contexto das unidades federativas do Brasil. Essa transformação foi impulsionada por políticas públicas voltadas ao incentivo à agropecuária. Essas políticas envolveram desde a oferta de financiamentos e incentivos fiscais até investimentos em infraestrutura rural. (IBGE, 2023)

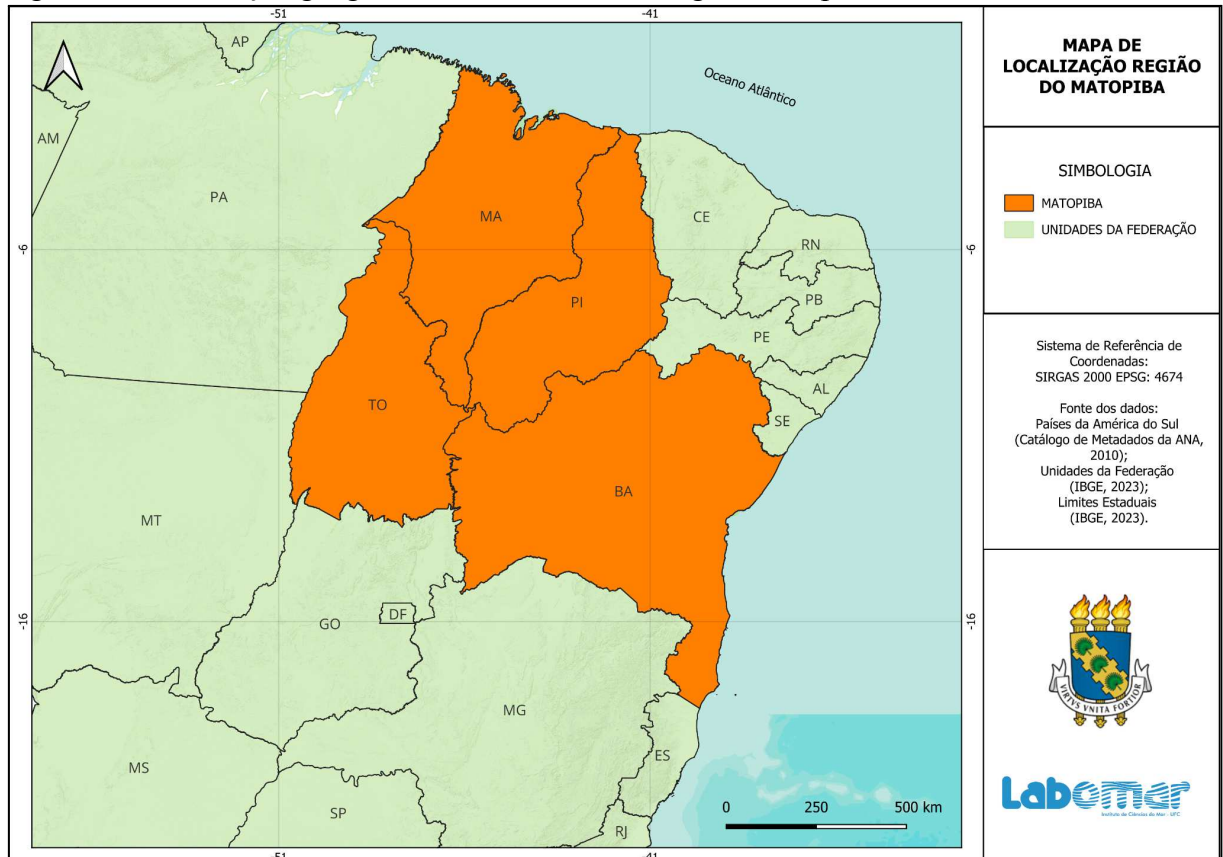
Figura 1 - Mapa de localização geográfica do Estado do Piauí no Brasil.



Fonte: Autoria própria

Como consequência, verificou-se uma significativa conversão de áreas de vegetação nativa em terras cultiváveis, especialmente na região conhecida como MATOPIBA. Este acrônimo refere-se às iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que compõem essa nova fronteira agrícola brasileira. A Figura 2 ilustra a localização dos Estados com regiões que fazem parte do Matopiba no Brasil.

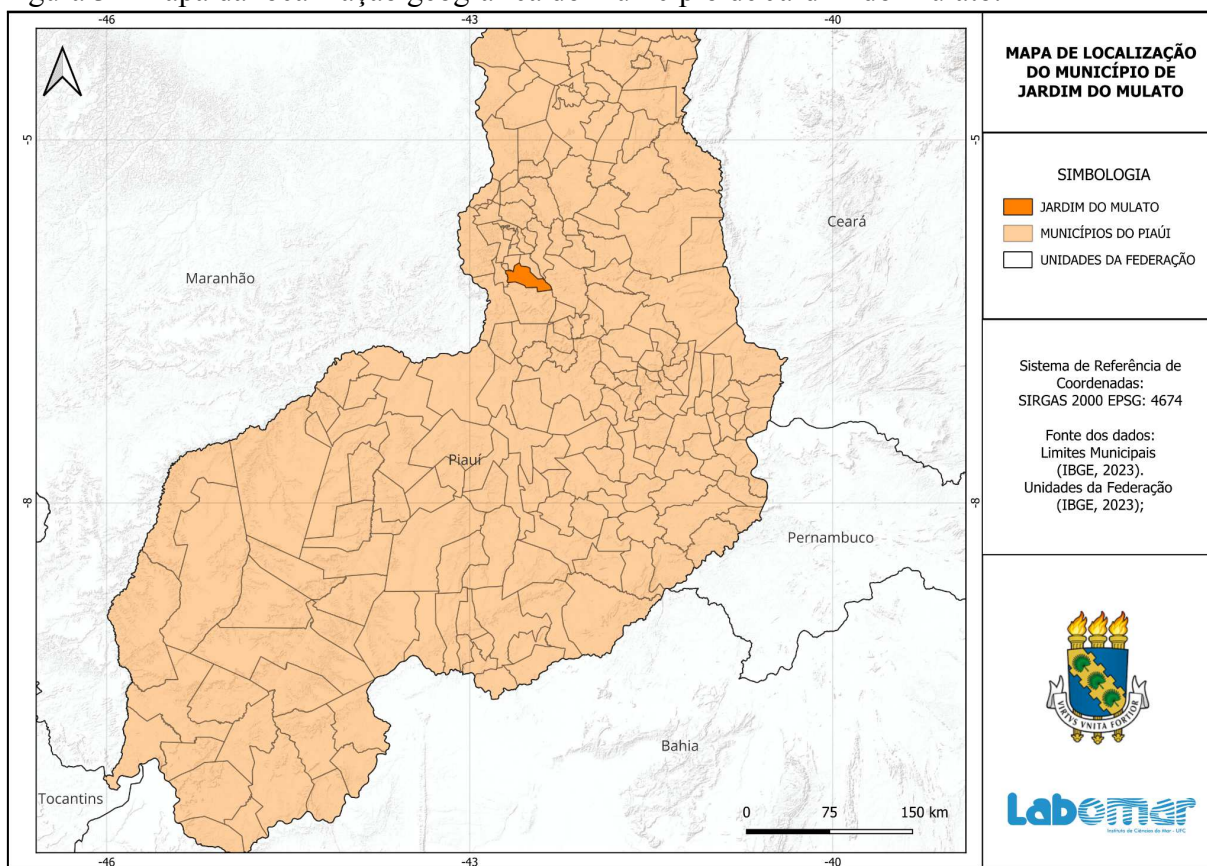
Figura 2 - Localização geográfica dos Estados com regiões componentes do MATOPIBA.



Fonte: Autoria própria.

Jardim do Mulato, situado na microrregião do Médio Parnaíba Piauiense, e município que compõe a região territorial do MATOPIBA, apresenta características geofísicas e socioeconômicas que o tornam um campo de estudo estratégico para análises via sensoriamento remoto. A Figura 3 ilustra a localização do município, permitindo uma melhor contextualização espacial dessa dinâmica agrícola. Com uma área de aproximadamente 469,22 km² e localizado a cerca de 141 km de Teresina, o município exibe um clima quente tropical, precipitação irregular e solos derivados de formações sedimentares, fatores que influenciam diretamente o uso e a ocupação da terra na região (CPRM, 2004).

Figura 3 - Mapa da localização geográfica do município de Jardim do Mulato.

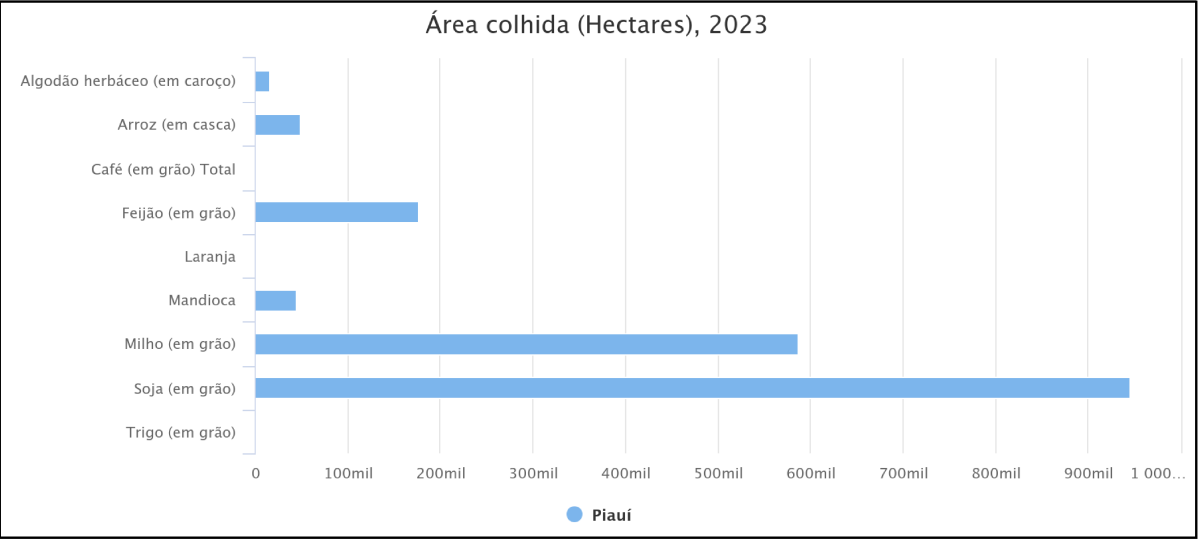


Fonte: Autoria própria.

Essa área tem se destacado por intensas transformações decorrentes da expansão agrícola e da crescente pressão do desmatamento – fenômeno associado tanto à conversão de vegetação nativa em áreas cultiváveis quanto à intensificação das culturas de grãos. Embora a agricultura local tenha sido tradicionalmente voltada para a produção sazonal de arroz, feijão, mandioca e cana-de-açúcar, a expansão das lavouras de soja e milho, características da dinâmica agrícola do MATOPIBA, tem promovido significativas alterações na paisagem.

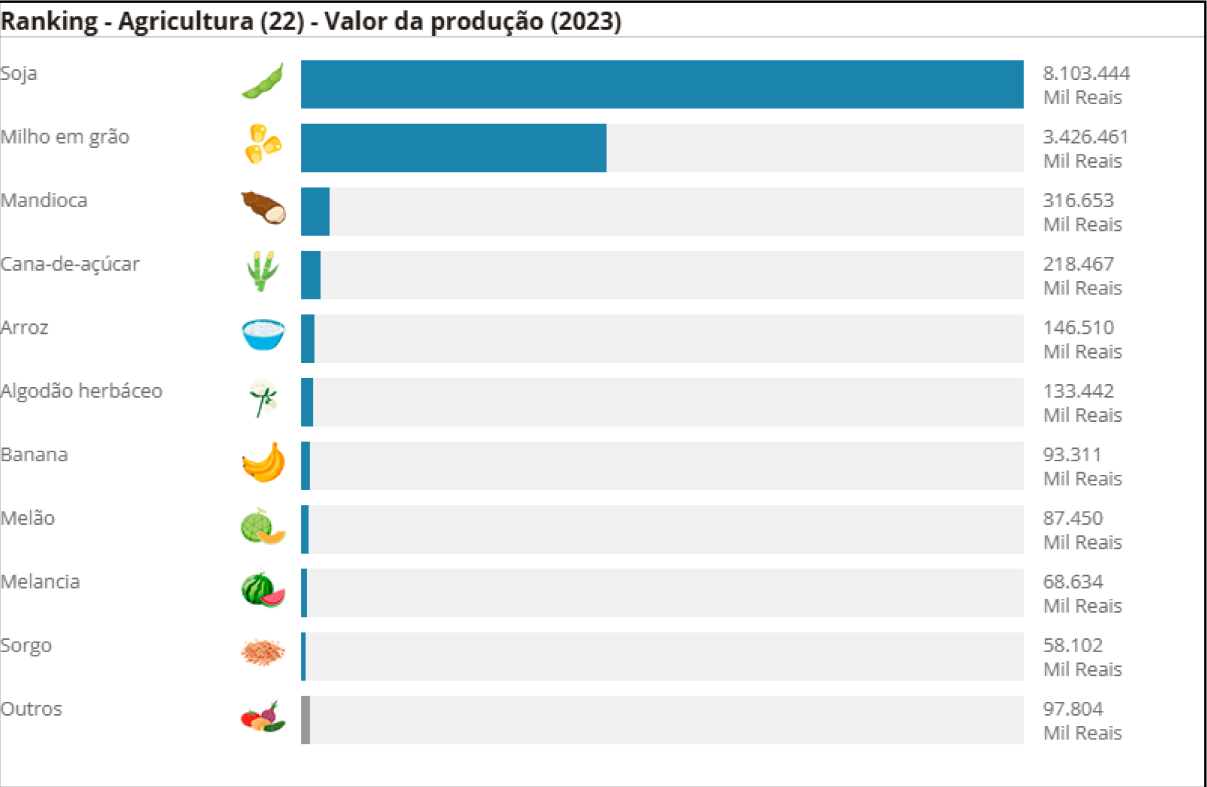
A escolha das culturas de soja e milho no presente estudo deve-se à sua elevada representatividade na região, tanto em termos de área colhida quanto de valor de produção, consolidando-se como motores do desenvolvimento agropecuário local. Conforme ilustrado na Figura 4, as áreas colhidas dessas culturas destacam-se significativamente. Adicionalmente, a Figura 5 apresenta um ranking das principais culturas agrícolas por valor de produção, evidenciando a predominância da soja e do milho na economia agrícola regional.

Figura 4 - Áreas colhidas de soja e milho, em hectares, na região do Piauí no ano de 2023.



Fonte: IBGE, 2023.

Figura 5 - Ranking das principais culturas agrícolas por valor de produção no Estado do Piauí em 2023.



Fonte: IBGE, 2023.

O sensoriamento remoto oferece ferramentas robustas para a análise temporais e espaciais, permitindo a detecção de alterações na cobertura vegetal e a identificação de padrões de cultivo. Assim, Jardim do Mulato se configura como uma área de estudo ideal para investigar o desmatamento, o monitoramento das culturas de soja e milho e as dinâmicas de

uso da terra, contribuindo para a compreensão dos impactos ambientais e para a proposição de estratégias de manejo sustentável.

3.2 Dados utilizados

Para a análise do desmatamento e do uso da terra, foram utilizadas imagens de satélite provenientes de diferentes sensores, conforme a disponibilidade temporal de cada missão. Para períodos anteriores a 2014, devido à disponibilidade de imagens, utilizaram-se imagens dos satélites Landsat 7, lançado em 1999, e que opera em órbita heliossíncrona, a uma altitude aproximada de 705 km, equipado com o sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). O Landsat 7, capta imagens em oito bandas espectrais, com suas especificações demonstradas na Figura 6.

Figura 6 - Principais características da missão do programa Landsat 7.

Satellite	Sensor	Band (Wavelength (µm))	Resolution (m)
Landsat 7	ETM+	1 (0.450 – 0.515)	30
		2 (0.525 – 0.605)	30
		3 (0.630 – 0.690)	30
		4 (0.775 – 0.900)	30
		5 (1.550 – 1.750)	30
		6 (10.40 – 12.50)	60 ²
		7 (2.080 – 2.350)	30
		8 (0.520 – 0.900)	15

Fonte: USGS, 2024.

Este estudo optou por empregar imagens do satélite Landsat 8 para a análise do desmatamento ocorrido em 2014, considerando suas características técnicas avançadas e alta resolução espacial. Lançado em 2013, o Landsat 8 opera em órbita heliossíncrona, a aproximadamente 705 km de altitude, com um período orbital de cerca de 99 minutos. Seu sistema de sensores é composto pelo Operational Land Imager (OLI), que capta dados em nove bandas espectrais, e pelo Thermal Infrared Sensor (TIRS), responsável por duas bandas térmicas, proporcionando uma cobertura detalhada do espectro eletromagnético (Figura 7). Essas características permitem a obtenção de imagens precisas e facilitam a identificação e quantificação das áreas desmatadas, sendo, portanto, uma ferramenta essencial para o monitoramento ambiental deste período.

Figura 7 - Principais características da missão do programa Landsat 8.

Landsat 8-9	OLI	1 (0.435 – 0.451)	30
		2 (0.452 – 0.512)	30
		3 (0.533 – 0.590)	30
		4 (0.636 – 0.673)	30
		5 (0.851 – 0.879)	30
		6 (1.566 – 1.651)	30
		7 (2.107 – 2.294)	30
		8 (0.503 – 0.676)	15
		9 (1.363 – 1.384)	30
	TIRS	10 (10.60 – 11.19)	100 ²
		11 (11.50 – 12.51)	100 ²

Fonte: USGS, 2024.

.No que diz respeito aos períodos posteriores a 2015, optou-se pelas imagens do integrante do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA), o Sentinel-2. Esse satélite possui um conjunto de 13 bandas espectrais distribuídas em resoluções espaciais de 10, 20 e 60 metros, operando em órbita heliossíncrona a uma altitude de aproximadamente 786 km. Detalhes da sua resolução podem ser observados na Figura 08.

Para o monitoramento agrícola no ano de 2024, foram utilizadas exclusivamente imagens do satélite Sentinel-2. Essa escolha permitiu a obtenção de dados precisos e detalhados, essenciais para a análise das mudanças na utilização da terra e nos padrões de cultivo, proporcionando uma avaliação robusta e atualizada do cenário agrícola da região.

Figura 8 - Informações espectrais do Sentinel-2.

Band number	S2A		S2B		Radiance sensibility range Lmin < Lref < Lmax (W.m ⁻² .sr ⁻¹ .μm ⁻¹)	SNR @ Lref
	Equivalent wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Equivalent wavelength (nm)	Bandwidth (nm)		
1	442.7	20	442.2	20	15.97 < 129.11 < 587.87	129
2	492.7	64	492.3	65	11.70 < 128.00 < 615.48	154
3	559.8	35	558.9	35	6.49 < 128.00 < 559.01	168
4	664.6	30	664.9	31	3.31 < 108.00 < 484.13	142
5	704.1	14	703.8	15	2.61 < 74.60 < 449.55	117
6	740.5	14	739.1	14	2.06 < 68.23 < 412.92	89
7	782.8	20	779.7	20	1.67 < 66.70 < 387.08	105
8	832.8	118	832.9	115	0.95 < 103.00 < 307.80	174
8a	864.7	20	864.0	20	0.95 < 52.39 < 307.80	72
9	945.1	20	943.2	20	0.51 < 8.77 < 232.91	114
10	1373.5	30	1376.9	30	0.06 < 6.00 < 45.00	50
11	1613.7	88	1610.4	93	0.40 < 4.00 < 69.78	100
12	2202.4	179	2185.7	181	0.10 < 1.70 < 24.60	100

Fonte: ESA, 2017.

De acordo com o United States Geological Survey (USGS, 2025), as imagens de satélite dos sistemas Landsat são provenientes de um repositório oficial que consolida dados históricos e atuais. Da mesma forma, as imagens do Sentinel-2, disponíveis pelo programa Copernicus, gerido pela European Space Agency (ESA, 2025), apresentam características técnicas – como alta resolução espacial e espectral – que as tornam adequadas para estudos detalhados de uso do solo. Assim, a aquisição dos dados por meio desses portais garante a confiabilidade e a qualidade das informações empregadas neste trabalho.

Os valores do NDVI foram extraídos das imagens de satélite utilizadas no estudo, permitindo uma avaliação quantitativa do vigor e da saúde da vegetação. Calculado a partir

das bandas de infravermelho próximo (NIR) e vermelho, o NDVI fornece uma medida sensível da atividade fotossintética, refletindo variações na densidade e na condição das áreas vegetadas. Essa métrica é essencial para identificar regiões de desmatamento, áreas sob estresse hídrico e mudanças sazonais na cobertura vegetal, servindo como um indicador fundamental para o monitoramento ambiental e agrícola.

3.3 Metodologia.

Na etapa destinada à identificação do desmatamento, optou-se pela composição das bandas NIR, RED e SWIR, pois essa combinação potencializa a capacidade de diferenciar áreas com vegetação densa – que apresentam alta refletância no infravermelho próximo – das áreas desmatadas, onde a redução drástica dessa refletância, aliada à absorção acentuada na banda do vermelho, evidencia a perda de cobertura florestal. O RGB, cor verdadeira, foi utilizado como composição comparativa para a análise. O tratamento das imagens foi realizado através de software livre e de código aberto para Sistemas de Informação Geográfica (SIG), denominado QGIS.

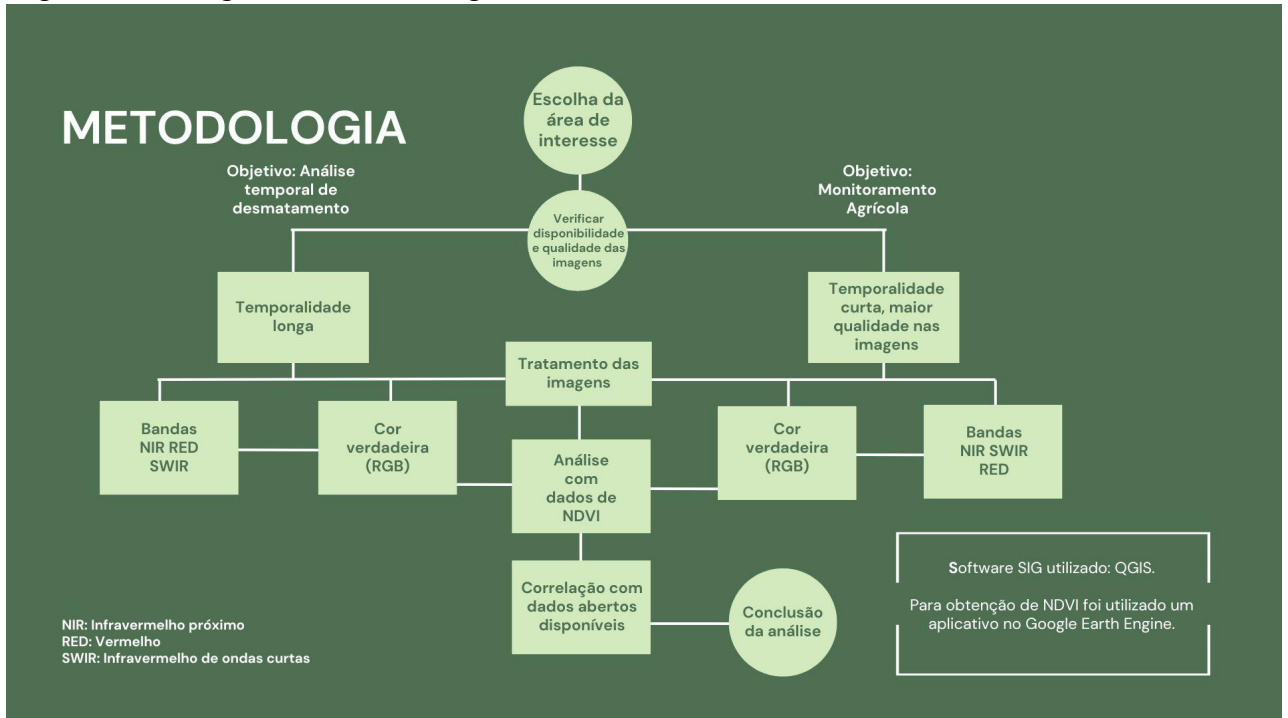
Para o monitoramento e identificação das culturas, a estratégia foi ampliar a análise incorporando a composição NIR SWIR e RED. Essa abordagem integrada possibilita não só a visualização natural das cenas (por meio do RGB, que reproduz as cores vistas a olho nu), mas também a detecção de variações espectrais sutis associadas à saúde e ao vigor das plantas, assim como sua composição característica, uma vez que as bandas NIR e SWIR evidenciam, respectivamente, a estrutura foliar e o teor de água das culturas.

Ademais, a extração dos valores do NDVI foi realizada a partir das imagens do Sentinel-2, utilizando uma aplicação desenvolvida na plataforma Google Earth Engine que abrangeu o período de 2020 a 2024. Esse procedimento permitiu a construção de séries temporais contínuas e robustas, fundamentais para a análise da dinâmica fenológica e das alterações decorrentes de intervenções humanas e de processos naturais.

Para melhor fixação e síntese das informações relativas à metodologia de trabalho, foi elaborado um fluxograma (Figura 9) que ilustra as etapas realizadas. Esse diagrama apresenta, de forma clara e estruturada, o processo adotado, desde a escolha da área de interesse e a verificação da disponibilidade e qualidade das imagens, até o tratamento dos dados de acordo com o objeto de estudo – seja para análise de desmatamento ou monitoramento – e a posterior correlação com dados abertos. Dessa forma, o fluxograma

contribui para a compreensão dos procedimentos metodológicos, reforçando a transparência e a consistência do desenvolvimento do trabalho.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados à análise ambiental e agrícola.

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento emergem como ferramentas indispensáveis para a análise ambiental e agrícola, possibilitando a obtenção de dados detalhados sobre a superfície terrestre a partir de imagens de satélite. Essas tecnologias permitem o monitoramento contínuo das mudanças no uso e cobertura da terra, contribuindo para a compreensão de dinâmicas espaciais e temporais associadas às atividades humanas e aos processos naturais. No contexto agrícola, o sensoriamento remoto possibilita a análise precisa das diferentes fases das culturas, como a emergência, o desenvolvimento vegetativo, a floração e a colheita, facilitando a tomada de decisões estratégicas para o manejo das lavouras e a otimização da produção (Coelho et al., 2016).

O geoprocessamento, por sua vez, complementa o sensoriamento remoto ao permitir a análise, o armazenamento, a manipulação e a visualização de dados georreferenciados. Essa abordagem integrada possibilita a identificação de áreas de maior produtividade, bem como a detecção precoce de problemas relacionados à saúde das plantas, como estresse hídrico e ataque de pragas. Além disso, o uso de índices espectrais, como o NDVI, viabiliza o acompanhamento em tempo real das condições vegetativas, possibilitando intervenções mais assertivas e sustentáveis (Da Silva; Almeida, 2015).

Na análise ambiental, o sensoriamento remoto também desempenha um papel crucial ao possibilitar o monitoramento de áreas sujeitas a processos de degradação, como desmatamento, erosão e desertificação. No semiárido brasileiro, por exemplo, as imagens de satélite têm sido amplamente utilizadas para avaliar a dinâmica do uso da terra e identificar regiões vulneráveis à degradação ambiental. Essa abordagem permite a formulação de políticas públicas mais eficazes e o desenvolvimento de estratégias de conservação ambiental, contribuindo para a mitigação dos impactos das atividades antrópicas (De Jesus França et al., 2017).

A integração entre o sensoriamento remoto e o geoprocessamento também tem se mostrado valiosa para o planejamento agrícola, permitindo a delimitação de áreas aptas para o cultivo e a estimativa da produtividade das safras. A análise multitemporal das imagens de satélite possibilita o acompanhamento do ciclo fenológico das culturas, facilitando a identificação de períodos críticos para a aplicação de insumos e a realização das práticas agrícolas. Dessa forma, é possível promover um manejo mais eficiente e sustentável das áreas

cultivadas, otimizando os recursos disponíveis e minimizando os impactos ambientais (Franco, 2023).

A aplicação dessas tecnologias no monitoramento agrícola no estado do Piauí destaca-se pela possibilidade de identificar as culturas predominantes por meio da análise das assinaturas espectrais específicas. A utilização das bandas NIR, SWIR e RED permite diferenciar as fases fenológicas das plantas, bem como estimar a biomassa e a produtividade das lavouras. Essa abordagem contribui para a gestão eficiente das áreas agrícolas, possibilitando a adoção de práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis (Lima, 2023).

Além do monitoramento agrícola, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para a análise das mudanças no uso e cobertura da terra, permitindo a identificação de áreas desmatadas e a avaliação da recuperação ambiental. As imagens de satélite capturadas ao longo do tempo possibilitam a realização de estudos multitemporais, contribuindo para o entendimento das dinâmicas ambientais e a formulação de estratégias de manejo mais eficazes. Essa abordagem é particularmente relevante em regiões sujeitas a pressões antrópicas intensas, como o semiárido piauiense, onde a degradação ambiental representa um desafio significativo para o desenvolvimento sustentável (Santiago et al., 2015).

Diante do avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento, as aplicações no campo ambiental e agrícola têm se expandido, proporcionando informações cada vez mais precisas e detalhadas. O desenvolvimento de novos sensores e a ampliação das plataformas de observação da Terra têm possibilitado a obtenção de dados em alta resolução espacial, temporal e espectral, contribuindo para a melhoria das práticas de gestão e planejamento territorial. Essa evolução tecnológica tem permitido a realização de análises mais robustas e a formulação de políticas públicas mais eficazes, promovendo o uso sustentável dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais (Souza et al., 2017).

4.2. Fotointerpretação de imagens de satélite para monitoramento do uso da terra no Piauí.

A fotointerpretação de imagens de satélite tem se consolidado como uma técnica essencial para o monitoramento do uso da terra, especialmente em regiões de grande relevância agrícola e ambiental, como o estado do Piauí. Essa abordagem permite analisar as características das áreas mapeadas por meio da interpretação das cores, formas, texturas e padrões presentes nas imagens capturadas por sensores orbitais. A partir dessas informações,

é possível identificar diferentes tipos de cobertura da terra, como áreas de cultivo, vegetação nativa, corpos hídricos e regiões degradadas, contribuindo para uma gestão territorial mais eficiente e sustentável (Coelho et al., 2016).

A capacidade de distinguir diferentes usos da terra está diretamente relacionada à composição espectral das imagens, que revela variações nas respostas refletidas pelas superfícies analisadas. No caso das áreas agrícolas, como as de cultivo de soja e milho, predominantes no Piauí, a fotointerpretação permite acompanhar o ciclo fenológico das culturas, desde a emergência até a senescência, proporcionando dados valiosos para o manejo das lavouras. A análise multitemporal, baseada em imagens capturadas em diferentes períodos, permite identificar padrões de plantio e colheita, bem como estimar a produtividade das áreas cultivadas (Da Silva; Almeida, 2015).

As composições espectrais utilizadas na fotointerpretação são fundamentais para a obtenção de informações detalhadas sobre o uso da terra. A combinação das bandas NIR (infravermelho próximo), SWIR (infravermelho de ondas curtas) e RED (vermelho) tem se mostrado especialmente eficaz para a análise de áreas agrícolas e para a identificação de desmatamento. No Piauí, essa abordagem tem sido aplicada para monitorar a conversão de áreas naturais em terras agrícolas, bem como para identificar práticas de manejo inadequadas que podem levar à degradação ambiental (De Jesus França et al., 2017).

Além do monitoramento agrícola, a fotointerpretação de imagens de satélite também tem sido amplamente utilizada para a análise das mudanças no uso e cobertura da terra em áreas urbanas e rurais. A identificação de áreas desmatadas, a expansão de pastagens e o crescimento de áreas urbanizadas podem ser monitorados com precisão, permitindo a formulação de políticas públicas mais eficazes para o ordenamento territorial e a conservação ambiental. No semiárido piauiense, essa abordagem tem sido fundamental para avaliar os impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas naturais e para orientar a adoção de práticas mais sustentáveis (Franco, 2023).

A utilização de índices de vegetação, como o NDVI, complementa a fotointerpretação ao fornecer informações quantitativas sobre a densidade e a saúde da vegetação. Esse índice é particularmente útil para o monitoramento das culturas agrícolas e para a detecção de áreas degradadas, possibilitando a identificação precoce de problemas como estresse hídrico, ataque de pragas e doenças. No contexto do Piauí, a aplicação do NDVI tem permitido acompanhar a evolução das lavouras, contribuindo para o planejamento agrícola e para a adoção de práticas de manejo mais eficientes (Lima, 2023).

O monitoramento do uso da terra por meio da fotointerpretação também se destaca pela capacidade de identificar áreas em processo de regeneração natural, bem como regiões sujeitas a pressões antrópicas intensas. As imagens de satélite capturadas ao longo do tempo permitem analisar a dinâmica das mudanças no uso da terra, contribuindo para a compreensão dos fatores que impulsionam essas transformações e para a formulação de estratégias de conservação mais eficazes. No Piauí, essa abordagem tem sido amplamente utilizada para monitorar as áreas sujeitas à desertificação, permitindo a adoção de medidas preventivas e corretivas mais assertivas (Santiago et al., 2015).

Dessa forma, a fotointerpretação de imagens de satélite tem se revelado uma ferramenta poderosa para o monitoramento do uso da terra no Piauí, permitindo não apenas a identificação das áreas cultivadas e das práticas agrícolas adotadas, mas também a avaliação dos impactos ambientais associados às atividades humanas. A integração dessa técnica com outras abordagens de geoprocessamento tem possibilitado a realização de análises mais detalhadas e a formulação de políticas públicas mais eficazes, contribuindo para a promoção do desenvolvimento sustentável e para a conservação dos recursos naturais na região (Souza et al., 2017).

4.3. Composições espectrais e índices de vegetação como ferramentas de análise.

A utilização de composições espectrais e índices de vegetação no sensoriamento remoto tem sido empregada para a análises de uso e cobertura da terra, oferecendo informações detalhadas sobre o comportamento da vegetação e sua resposta a fatores ambientais. A combinação de bandas espectrais permite destacar características específicas da superfície terrestre, possibilitando a identificação de padrões de vegetação, solo exposto, corpos d'água e áreas degradadas. (Coelho et al., 2016).

No estudo da área de Jardim do Mulato, Piauí, a análise foi realizada por meio dos satélites Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2, utilizando diferentes composições espectrais para monitoramento das transformações na paisagem ao longo do tempo, incluindo a avaliação de desmatamento e a evolução da cobertura vegetal em distintas datas, como 2000, 2014 e 2024, assim como identificação da cultura na área de interesse.

A seleção das composições espectrais adequadas para cada tipo de análise é essencial para a extração de informações precisas. No monitoramento da agricultura, por exemplo, a composição em cor verdadeira é amplamente utilizada para avaliar o desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo fenológico, permitindo a distinção entre áreas

de solo exposto, vegetação em crescimento e lavouras em estágio de maturação. No caso da soja, cuja duração do ciclo é de aproximadamente quatro meses, a interpretação das imagens obtidas por meio do Sentinel-2 permitiu identificar marcos importantes, como o solo anteriormente exposto antes do início do período de safra em 03 de outubro de 2023, a emergência da cultura em 21 de janeiro de 2024, o alto vigor vegetativo em 11 de março de 2024 e a colheita em 4 de maio de 2024. Essas informações foram associadas ao NDVI, um dos principais índices de vegetação, que indica a densidade e o vigor da vegetação com base na resposta espectral do dossel vegetal (Da Silva; Almeida, 2015).

O NDVI tem se mostrado uma ferramenta indispensável para a detecção de mudanças no uso da terra e para a caracterização da cobertura vegetal, permitindo a diferenciação entre áreas de vegetação densa, lavouras em crescimento e solos degradados. Em regiões como o semiárido piauiense, onde a vegetação nativa é frequentemente substituída por cultivos agrícolas, o uso desse índice auxilia no monitoramento das dinâmicas de ocupação do território e na identificação de áreas sujeitas a processos erosivos. A aplicação do NDVI na área de estudo possibilitou o acompanhamento das fases fenológicas da soja e do milho, contribuindo para a avaliação da produtividade agrícola e para a identificação de práticas de manejo mais eficientes (De Jesus França et al., 2017).

Além do NDVI, outras composições espectrais foram utilizadas na análise da área de interesse, como a NIR RED SWIR, empregada para a detecção de vegetação e a diferenciação entre os tipos de cobertura da terra. Essa composição permitiu avaliar a expansão das áreas agrícolas ao longo dos anos, evidenciando o impacto da conversão de vegetação nativa em áreas de cultivo. A partir das imagens Landsat 8 de 31 de maio de 2014, foi possível identificar a abertura de um novo talhão agrícola na região, confirmando a mudança no uso da terra e a intensificação das atividades agrícolas no município de Jardim do Mulato.

A interpretação das composições espectrais também se mostrou útil na análise das áreas em regeneração natural, permitindo identificar padrões de recuperação da vegetação após a colheita. A composição em falsa cor Land/Water foi utilizada para destacar a distribuição da biomassa vegetal e a presença de umidade no solo, auxiliando na avaliação das condições ambientais da área monitorada. As imagens do Sentinel-2 de 21 de novembro de 2024 revelaram a continuidade da atividade agrícola na região, com a presença de solos expostos e áreas preparadas para o próximo ciclo de plantio, demonstrando a dinâmica da ocupação da terra ao longo do tempo.

O uso dessas ferramentas de análise tem permitido uma abordagem mais precisa no monitoramento agrícola e na avaliação das mudanças no uso da terra, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas. A integração de composições espectrais e índices de vegetação permite não apenas identificar padrões espaciais e temporais, mas também prever tendências futuras e orientar ações voltadas para a sustentabilidade das atividades agrícolas. (Souza et al., 2017).

A análise conduzida na área de estudo demonstrou que a aplicação dessas técnicas possibilita uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de conservação ambiental.

4.4. Aplicação do NDVI no monitoramento agrícola das culturas de soja e milho.

A aplicação do NDVI tem se mostrado uma ferramenta essencial para o monitoramento agrícola, possibilitando a análise detalhada do desenvolvimento das culturas, como soja e milho, em diferentes estágios fenológicos. O NDVI é calculado a partir da diferença entre as refletâncias do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), fornecendo uma métrica precisa da densidade e do vigor da vegetação. Para expressar essa relação de forma quantitativa, a equação abaixo formaliza o cálculo do NDVI:

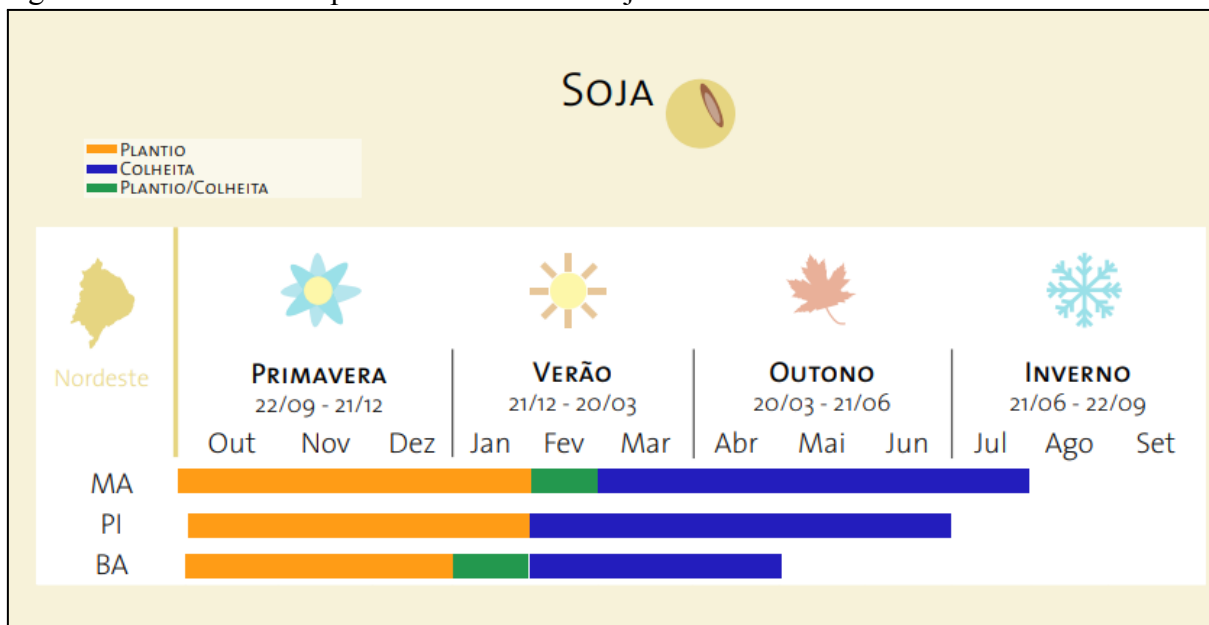
$$NDVI = \frac{NDVI - RED}{NDVI + RED}$$

No contexto agrícola, esse índice permite identificar áreas com bom desenvolvimento vegetativo, ciclagem de culturas, bem como regiões sujeitas a estresse hídrico ou nutricional, possibilitando a adoção de práticas de manejo mais eficientes. No estudo realizado na área de Jardim do Mulato, Piauí, o NDVI foi aplicado para acompanhar o ciclo produtivo das culturas predominantes, com destaque para a soja e o milho, em diferentes momentos do calendário agrícola (Coelho et al., 2016).

No caso específico da cultura da soja, cuja duração média do ciclo varia entre 90 e 120 dias, o NDVI foi empregado para monitorar as fases de desenvolvimento, desde o plantio até a colheita. Essa análise considerou o calendário de plantio específico para a região do Piauí e o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), estabelecido pelo Ministério da

Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Além disso, conforme ilustrado na Figura 10, o Calendário de Plantio e Colheita da Soja no Nordeste, divulgado pela Conab em 2020, aponta que o plantio ocorre principalmente entre outubro e janeiro, enquanto a colheita se concentra entre fevereiro e junho. Essa abordagem integrada permite uma análise detalhada dos estágios fenológicos da cultura e do vigor vegetativo ao longo de seu ciclo produtivo.

Figura 10- Calendário de plantio e colheita da soja no Nordeste.



Fonte: Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2020, Conab.

Os valores de NDVI retirados das imagens capturadas pelo satélite Sentinel-2 revelaram a presença de solo exposto em 3 de outubro de 2023 (Figura 11). Em 1º de janeiro, já se observava o início do aumento dos valores de NDVI (Figura 12), sinalizando os primeiros indícios do desenvolvimento vegetativo. Posteriormente, em 21 de janeiro de 2024, ocorreu o início efetivo da emergência da cultura.

Figura 11 - Série Temporal de NDVI em outubro, anterior ao início da safra.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 - Série Temporal de NDVI em janeiro, com aumento gradativo do início de emergência.



Fonte: Elaboração própria.

O monitoramento contínuo via NDVI possibilitou acompanhar a fase de senescência das culturas, facilitando a determinação do período ideal para a colheita. Conforme ilustrado no Figura 13, em 11 de março os valores de NDVI atingiram seu pico máximo, refletindo o auge do vigor vegetativo. Já o Figura 14 evidencia, em 30 de abril, uma queda acentuada na curva do NDVI, sinalizando o início da senescência na área de interesse.

Figura 13 - Série temporal de NDVI em Março, apresentando valores indicando vigor vegetativo.



Fonte: Elaboração própria.

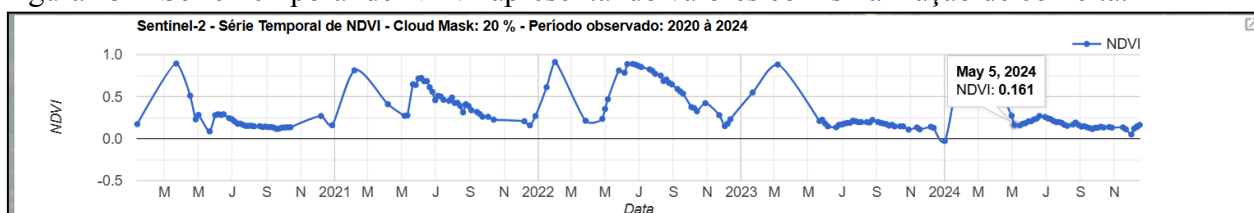
Figura 14 - Série temporal de NDVI com valores de senescência em Abril.



Fonte: Elaboração própria.

Em 5 de maio, o NDVI apresentou um sinal claro de que a cultura havia atingido seu estágio de maturação ideal para a colheita. Conforme demonstrado no Figura 14, houve uma queda significativa nos valores de NDVI, refletindo a redução do vigor vegetativo típica do período pós-maturação, os padrões retornando ao fim da curva sinalizam colheita, demonstrada no Figura 15.

Figura 15 - Série Temporal de NDVI apresentando valores com sinalização de colheita.



Fonte: Elaboração própria.

Esse padrão, alinhado com outros indicadores agrônômicos e com a fotointerpretação, reforça a recomendação de iniciar as atividades de colheita, contribuindo para a otimização do rendimento e da qualidade da produção. Tais informações são cruciais para o planejamento das diversas fases do cultivo e para a otimização do uso de recursos agrícolas, como água e fertilizantes. Além disso, a análise temporal das imagens permite identificar áreas com desenvolvimento desigual, possibilitando a aplicação localizada de insumos e a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis, contribuindo para a eficiência produtiva e a preservação ambiental, conforme De Jesus França et al., (2017).

Além do monitoramento das culturas, o NDVI foi utilizado para avaliar a cobertura da terra após a colheita, permitindo identificar áreas em regeneração natural e regiões com solo exposto. Essa análise se torna fundamental para o planejamento das atividades agrícolas na safra subsequente, possibilitando a adoção de práticas de conservação da terra e a implementação de sistemas de plantio direto. A integração do NDVI com outras composições espectrais permite uma análise mais abrangente das condições das lavouras, contribuindo para a tomada de decisões mais assertivas e para a gestão eficiente das áreas agrícolas.(Lima, 2023).

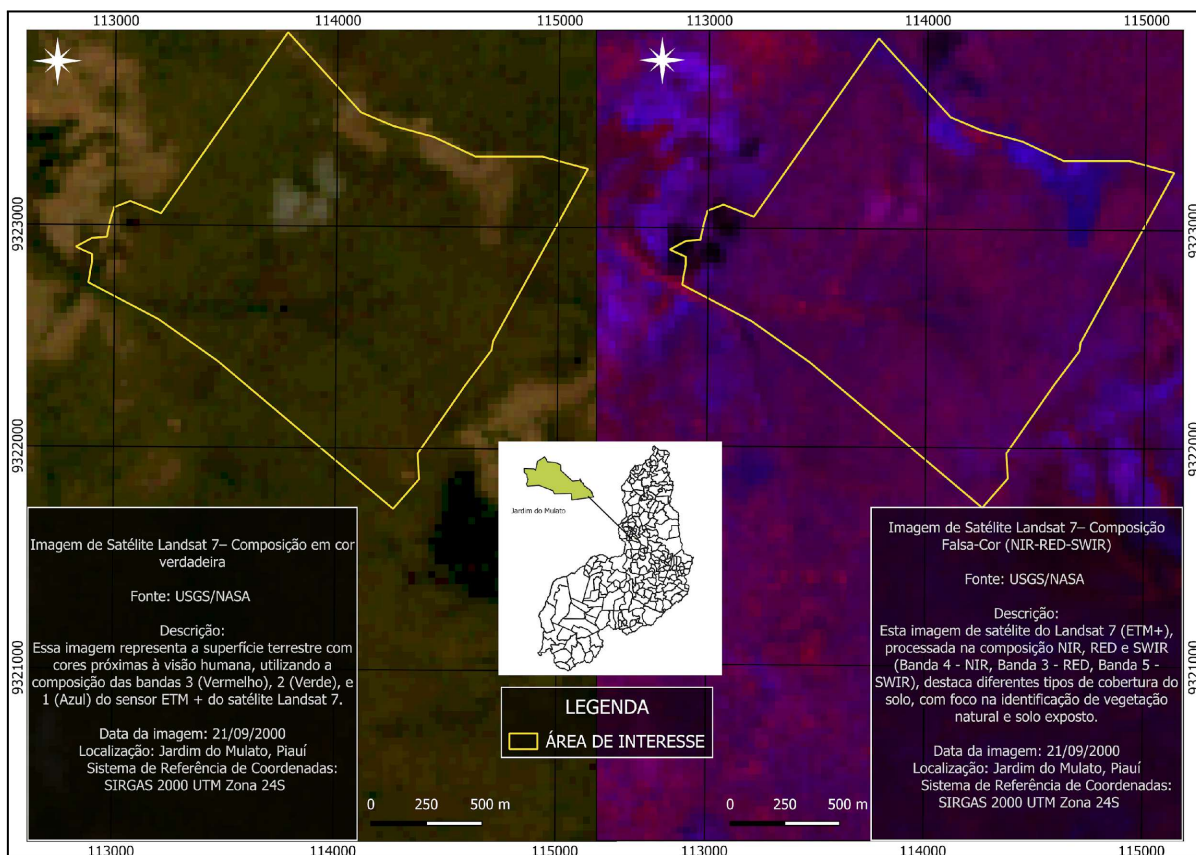
O uso do NDVI no monitoramento agrícola das culturas de soja também permite a identificação precoce de problemas, como falhas no plantio, estresse hídrico e ataque de pragas, possibilitando a intervenção oportuna e a mitigação dos impactos sobre a produtividade. A análise das imagens capturadas ao longo do ciclo produtivo revelou a importância do monitoramento contínuo para a gestão das lavouras e para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. Dessa forma, a aplicação do NDVI se destaca como uma ferramenta indispensável para a agricultura de precisão, proporcionando ganhos em produtividade, eficiência no uso de recursos e preservação ambiental (Souza et al., 2017).

4.5. Análise multitemporal para identificação de desmatamento e mudanças no uso da terra.

A análise multitemporal tem se mostrado uma abordagem fundamental para a identificação de desmatamento e mudanças no uso da terra, permitindo a comparação de imagens de satélite capturadas em diferentes períodos. Essa técnica possibilita a detecção de transformações na paisagem ao longo do tempo, revelando padrões de ocupação da terra, expansão agrícola, regeneração da vegetação e áreas degradadas. No estudo realizado em Jardim do Mulato, Piauí, foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2, obtidas nos anos de 2000, 2014 e 2024, respectivamente. A análise dessas imagens permitiu identificar a abertura de talhões agrícolas, o avanço da agricultura sobre áreas de vegetação nativa e a dinâmica das culturas de interesse na região.

O emprego de composições espectrais específicas, como a combinação NIR RED SWIR, foi fundamental para diferenciar áreas de vegetação, solos expostos e lavouras em variados estágios de desenvolvimento. Para analisar as condições iniciais da área de estudo, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7, capturadas em 21 de setembro de 2000, que evidenciaram a predominância da vegetação nativa na época. Conforme demonstrado no Mapa apresentado na Figura 16, o comparativo entre a imagem de cor verdadeira e a composição NIR RED SWIR destaca as variações na cobertura do solo, contribuindo para uma análise mais precisa do ambiente estudado.

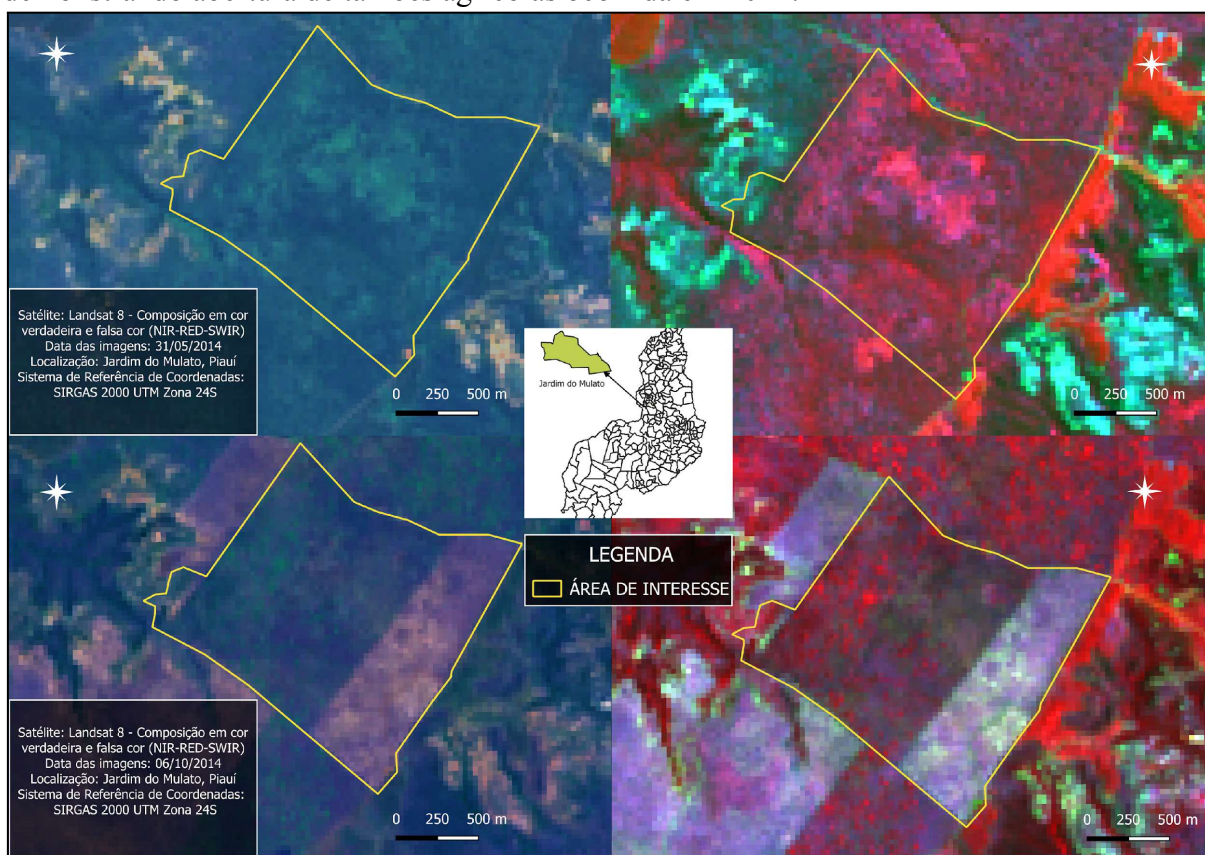
Figura 16 - Mapa em composição de cor verdadeira e composição falsa cor da área de interesse no ano 2000.



Fonte: Elaboração própria.

Em 31 de maio de 2014, imagens do satélite Landsat 8 registraram a área de interesse coberta por vegetação nativa. No entanto, em 6 de outubro do mesmo ano, observou-se a abertura de talhões agrícolas, evidenciando a conversão de áreas naturais em terras cultiváveis. Essa transformação reflete a intensificação da agricultura no Brasil, corroborada por estudo do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade de Maryland, que demonstrou que as áreas destinadas ao cultivo quase dobraram entre 2000 e 2014, passando de 26 milhões para 46,5 milhões de hectares (ZALLES et al., 2019). A Figura 17 deste estudo ilustra a expansão agrícola ocorrida em 2014, destacando a abertura de novos talhões agrícolas nesse período, tanto nos limites da área de interesse quanto ao seu redor.

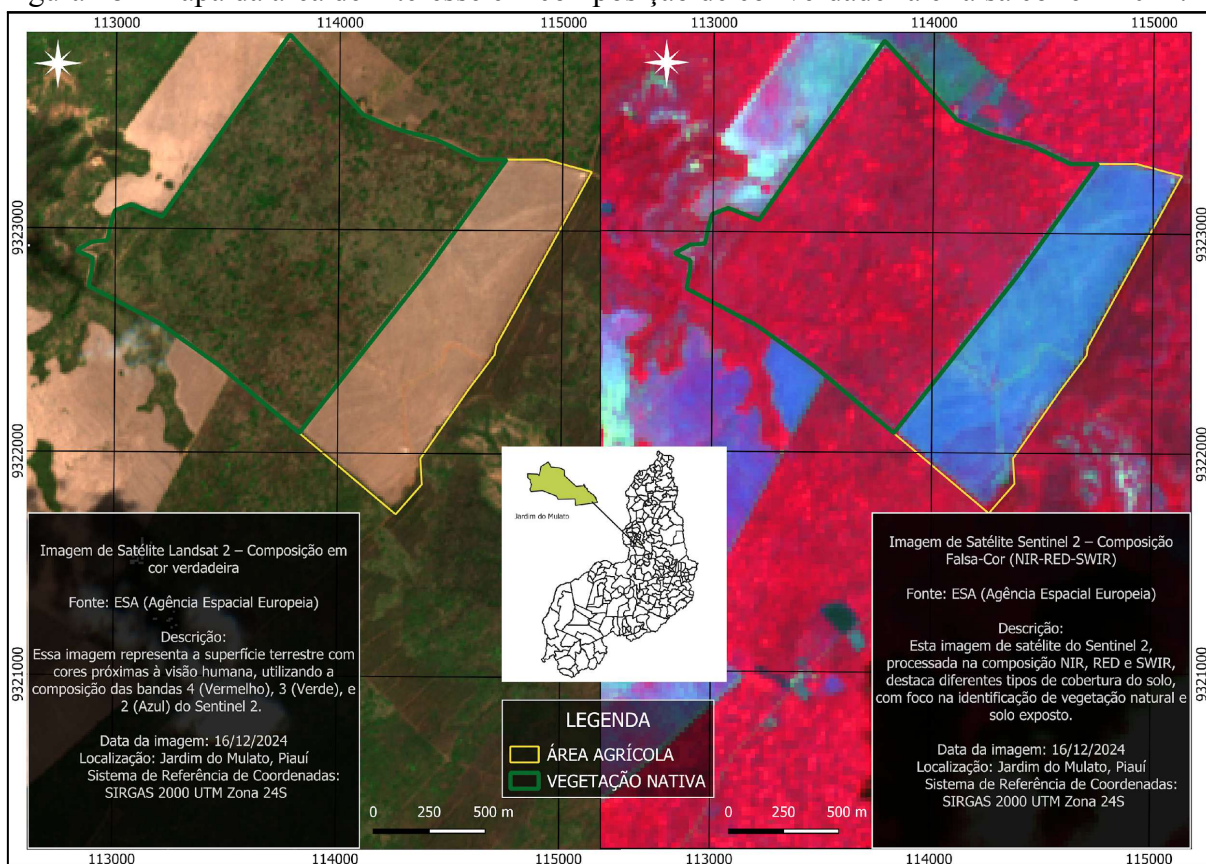
Figura 17 - Mapa da área de interesse e áreas ao redor, em composição verdadeira e falsa cor, demonstrando abertura de talhões agrícolas ocorrida em 2014.



Fonte: Elaboração própria.

Já as imagens do Sentinel-2, datadas de 16 de dezembro de 2024, revelaram a continuidade das atividades agrícolas e a presença de solos expostos, anterior à primeira safra de soja, evidenciando a intensificação do uso da terra na região. A Figura 18 ilustra claramente esse cenário, demonstrando a extensão das áreas de solo exposto e a persistência das práticas agrícolas.

Figura 18 - Mapa da área de interesse em composição de cor verdadeira e falsa cor em 2024.



Fonte: Elaboração própria.

A análise multitemporal também permitiu identificar áreas sujeitas a processos de degradação ambiental no entorno da área de interesse, como a erosão da terra e a fragmentação da vegetação nativa. A comparação das imagens capturadas em diferentes períodos revelou a redução das áreas de vegetação nativa, especialmente nas regiões de expansão agrícola. Essa informação é fundamental para a formulação de políticas públicas voltadas para a conservação ambiental e para o planejamento do uso sustentável dos recursos naturais. No contexto agrícola, a análise temporal das imagens possibilitou o monitoramento do ciclo produtivo das culturas da área de interesse, permitindo identificar as fases de plantio, desenvolvimento vegetativo e colheita, bem como possíveis áreas com baixa produtividade ou sujeitas a estresse ambiental (De Jesus França et al., 2017).

A integração do NDVI com a análise multitemporal foi crucial para a identificação das mudanças na cobertura da terra e para a avaliação da saúde da vegetação. Os valores do NDVI obtidos a partir das imagens do Sentinel-2 permitiram diferenciar as áreas com vegetação densa, as lavouras em desenvolvimento e os solos expostos após a colheita. A

comparação dos valores dos índices em diferentes períodos revelou a expansão das áreas agrícolas, bem como a regeneração de algumas áreas após o abandono das atividades agrícolas. Essa análise contribuiu para o entendimento das dinâmicas de uso da terra e para a identificação de áreas prioritárias para ações de conservação e recuperação ambiental.

Além da identificação de desmatamento, a análise multitemporal permitiu avaliar os impactos das atividades agrícolas sobre os recursos naturais, como a disponibilidade de água e a qualidade da terra. As imagens capturadas em momentos específicos do ciclo produtivo revelaram a intensificação do uso da terra, com aumento das áreas cultivadas e redução das áreas de vegetação nativa. A detecção precoce dessas mudanças possibilita a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis, como o plantio direto e a rotação de culturas, contribuindo para a preservação da terra e para a redução dos impactos ambientais associados à expansão agrícola (Lima, 2023).

A análise temporal das imagens também permitiu identificar áreas em processo de regeneração natural, evidenciando a resiliência ambiental da região após a interrupção das atividades agrícolas. As imagens de 2024 revelaram a presença de vegetação secundária em áreas anteriormente cultivadas, destacando a importância do monitoramento contínuo para a avaliação das tendências de uso da terra e para a formulação de estratégias de manejo mais eficazes. Essa abordagem tem se mostrado essencial para a gestão territorial e para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico da região sem comprometer a integridade dos ecossistemas locais (Santiago et al., 2015).

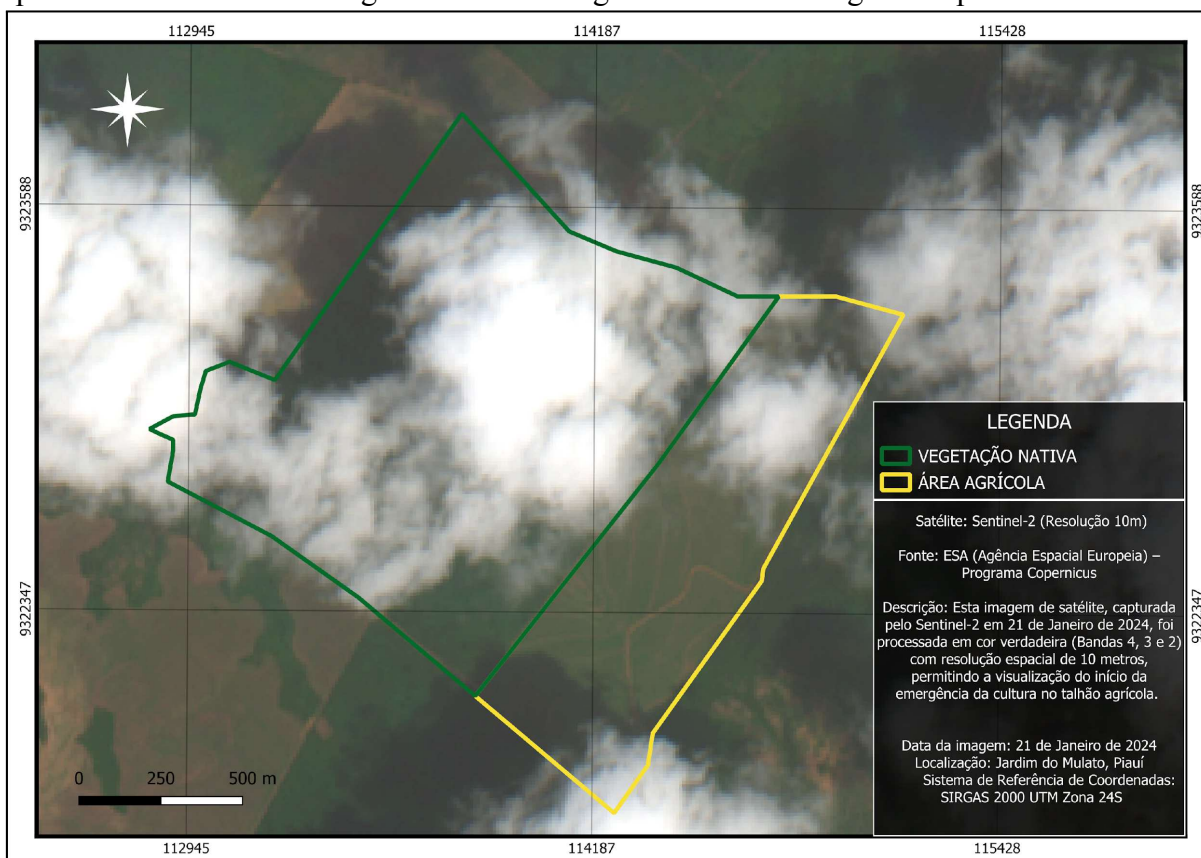
Portanto, a análise multitemporal não apenas permite a identificação das mudanças no uso da terra, mas também fornece informações valiosas para o planejamento do uso sustentável dos recursos naturais. No caso de Jardim do Mulato, a comparação das imagens capturadas em 2000, 2014 e 2024 revelou a intensificação das atividades agrícolas e a fragmentação da vegetação nativa, destacando a importância de políticas públicas voltadas para a conservação ambiental e para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. A integração dessa abordagem com outras técnicas de geoprocessamento tem contribuído para a formulação de estratégias de manejo mais eficazes, promovendo a sustentabilidade das atividades agrícolas e a preservação dos recursos naturais na região (Souza et al., 2017).

4.6. Monitoramento agrícola com foco em safra: emergência, senescência e colheita.

O monitoramento agrícola por meio de sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta indispensável para acompanhar as diferentes fases do ciclo produtivo das culturas, como a soja e o milho, com foco nas etapas de emergência, senescência e colheita. Essa abordagem permite a identificação precisa dos estágios fenológicos das plantações, facilitando a tomada de decisões estratégicas para o manejo das lavouras e a otimização dos recursos agrícolas. No estudo realizado em Jardim do Mulato, Piauí, o monitoramento foi conduzido por meio das imagens capturadas pelos Sentinel-2, que possibilitou a análise detalhada do ciclo produtivo das culturas predominantes na região.

A fase de emergência das culturas foi monitorada com base nas imagens do Sentinel-2, capturadas em 21 de janeiro de 2024, que apesar da presença de nuvens na região e em conjunto com os dados obtidos através do NDVI, revelaram o início do desenvolvimento vegetativo da plantação que pode ser observado na Figura 19. Nesse estágio, as plantas apresentam baixa densidade foliar e uma cobertura da terra ainda incompleta, o que se reflete em valores intermediários do NDVI. (Da Silva; Almeida, 2015). Essa informação é crucial para a identificação de falhas no plantio e para a adoção de práticas corretivas, como o replantio ou a aplicação localizada de fertilizantes, garantindo um estabelecimento mais uniforme das lavouras

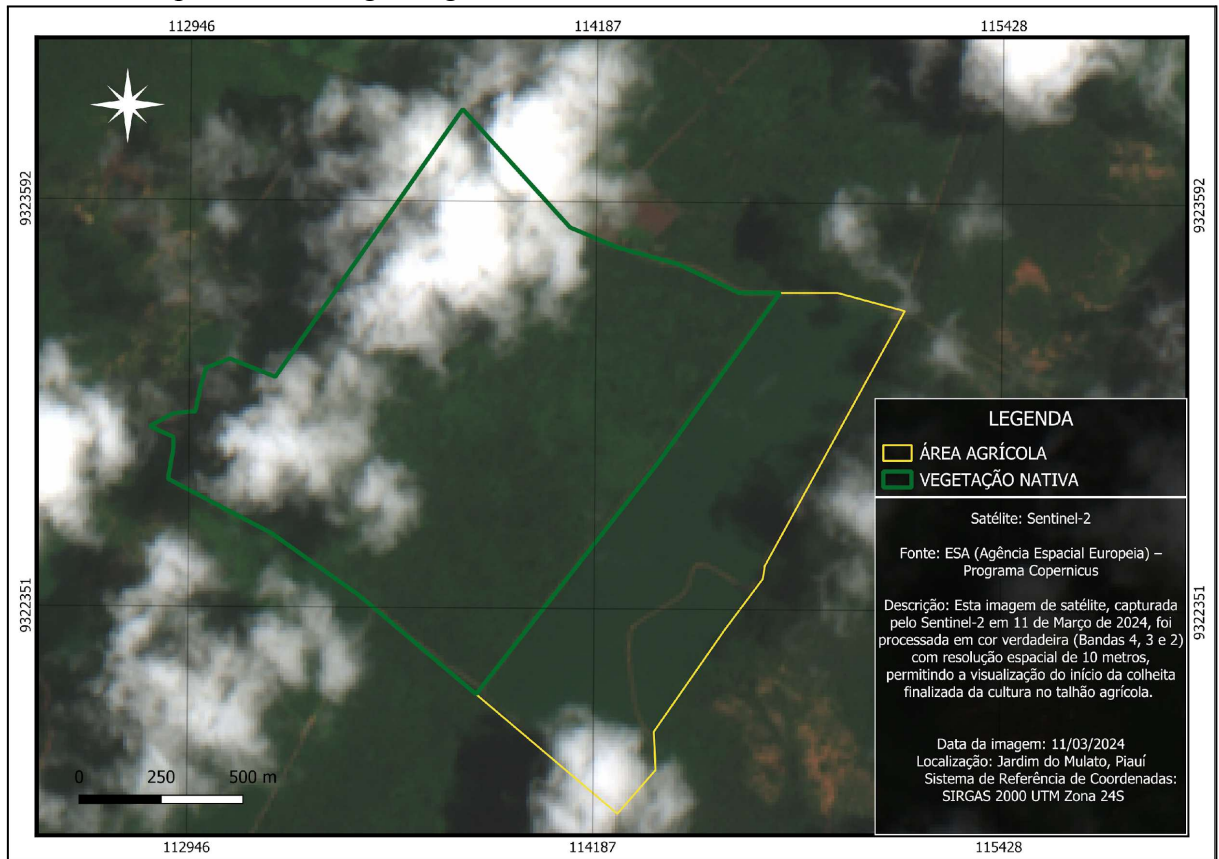
Figura 19 - Mapa com a visualização da área de interesse, em composição de cor verdadeira, apresentando início da emergência no talhão agrícola e em áreas agrícolas próximas.



Fonte: Elaboração própria.

À medida que a cultura evolui para o estágio de alto vigor vegetativo, a densidade foliar aumenta, resultando em valores mais elevados do NDVI, que indicam uma cobertura vegetal saudável e em pleno desenvolvimento. No caso das plantações de soja em Jardim do Mulato, essa fase foi registrada em 11 de março de 2024, quando as imagens em cor verdadeira revelaram áreas de vegetação densa e uniforme, conforme pode ser observado na Figura 20. Esse monitoramento, permite identificar a produtividade potencial, contribuindo para a adoção de práticas de manejo mais eficazes e para a otimização do uso de insumos agrícolas (De Jesus França et al., 2017).

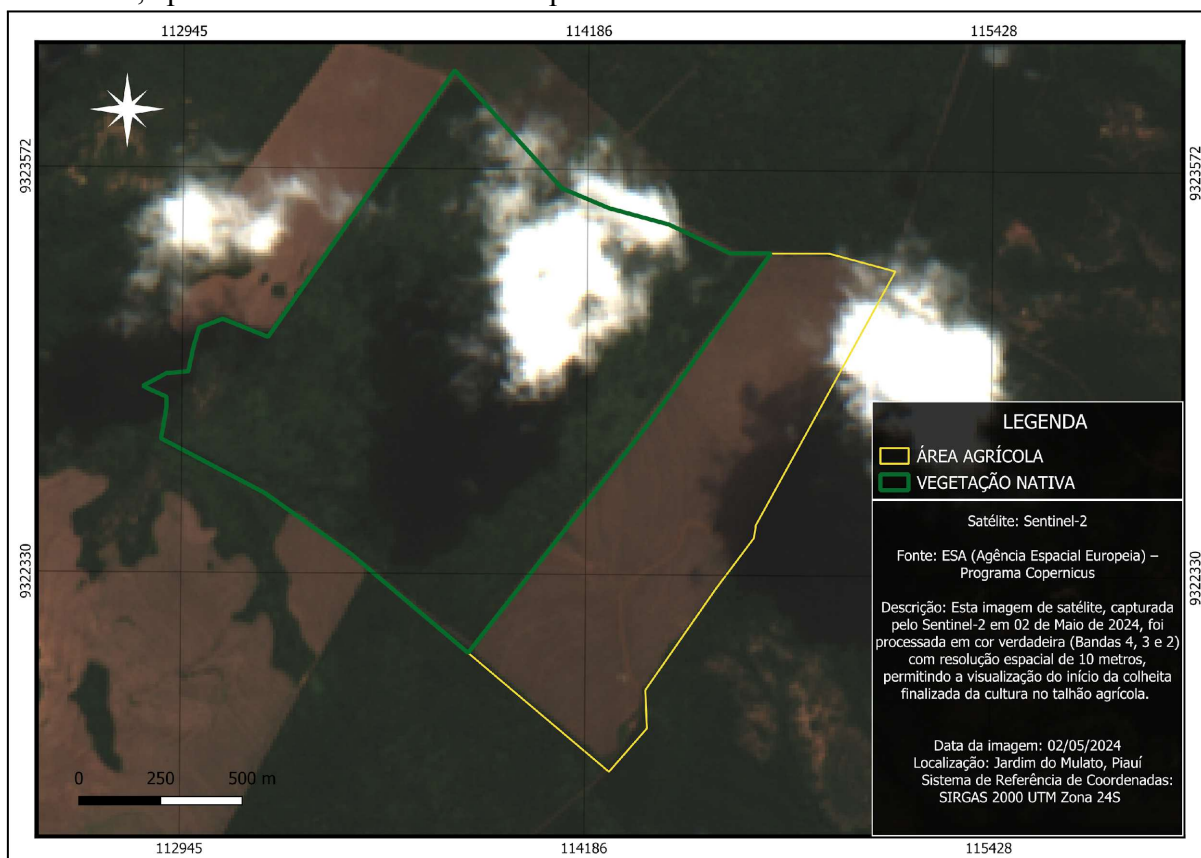
Figura 20 - Mapa da área de interesse e áreas agrícolas ao redor, em composição de cor verdadeira, apresentando vigor vegetativo.



Fonte: Elaboração própria.

A colheita propriamente dita foi registrada nas imagens de 02 de Maio de 2024, que revelaram a presença de solos expostos nas áreas anteriormente ocupadas pelas plantações de soja, possível de ser visualizado na Figura 21. A análise das imagens permite diferenciar as áreas já colhidas das lavouras ainda em desenvolvimento, possibilitando a identificação precisa das regiões que necessitavam de manejo pós-colheita. Essa abordagem se torna essencial para o planejamento das atividades agrícolas subsequentes, como o preparo da terra para o próximo ciclo de plantio e a adoção de práticas de conservação da terra, como o plantio direto e a rotação de culturas (Lima,2023).

Figura 21 - Mapa da área de interesse e áreas agrícolas ao redor, em composição em cor verdadeira, apresentando colheita - solo exposto.



Fonte: Elaboração própria.

O monitoramento contínuo das lavouras por meio de sensoriamento remoto também permite identificar áreas sujeitas a estresse ambiental, como deficiência hídrica, ataque de pragas e baixa fertilidade da terra. A análise das imagens capturadas ao longo do ciclo produtivo revelam variações nos valores do NDVI, indicando regiões com possível desenvolvimento desigual e possibilitando a adoção de práticas corretivas específicas. Essa abordagem contribui para a melhoria da produtividade agrícola e para a redução dos impactos ambientais associados às atividades agrícolas, promovendo um manejo mais eficiente e sustentável das áreas cultivadas (Santiago et al., 2015).

A integração do monitoramento agrícola com outras técnicas de geoprocessamento possibilitou uma análise mais abrangente das condições das lavouras, contribuindo para a tomada de decisões mais assertivas em todas as fases do ciclo produtivo. No caso das culturas de soja monitoradas em Jardim do Mulato, o acompanhamento das etapas de emergência, senescência e colheita foi fundamental para garantir a eficiência das operações agrícolas e para promover a sustentabilidade das atividades produtivas. Essa

abordagem tem se mostrado cada vez mais essencial para a agricultura moderna, permitindo a maximização da produtividade e a preservação dos recursos naturais (Souza et al., 2017).

4.7. Proposição de cultura e caracterização da terra com base nas composições NIR SWIR e RED.

A integração das bandas espectrais do infravermelho próximo (NIR), do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e da região do vermelho (RED) tem se consolidado como uma ferramenta robusta para a análise do vigor vegetativo e para a caracterização edáfica em estudos de sensoriamento remoto aplicados à agricultura. Essa abordagem permite não apenas identificar a saúde da vegetação, mas também inferir propriedades da terra, fundamentais para a proposição de culturas adequadas às condições ambientais locais.

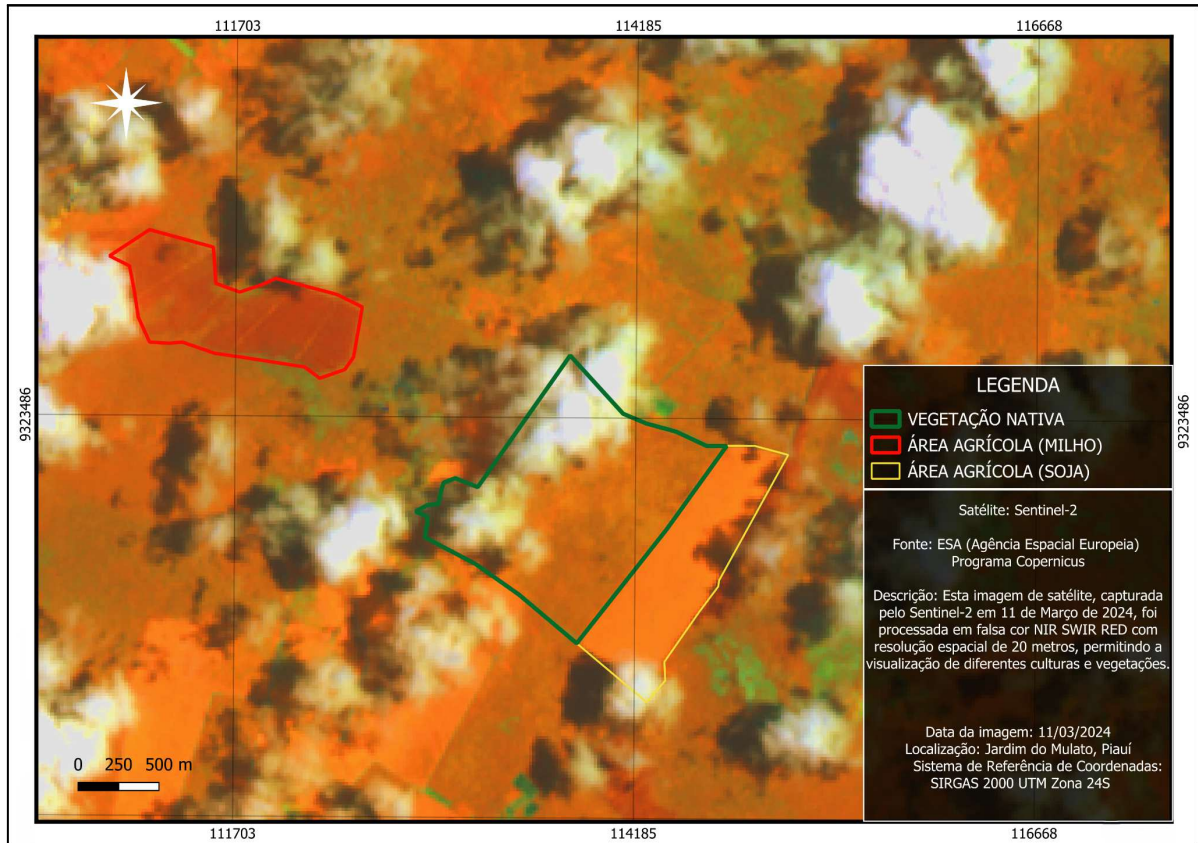
Conforme apontam CAMPBELL e WYNNE (2011), a vegetação saudável exibe alta refletância na banda NIR, o que resulta em uma representação de tonalidades avermelhadas em composições digitais. Entretanto, em determinadas culturas, como a soja em pleno vigor, observa-se que a refletância também elevada na banda SWIR – embora com intensidade inferior à do NIR – modifica essa representação cromática. Segundo o sistema aditivo de cores, a sobreposição do canal correspondente ao NIR (geralmente atribuído à cor vermelha) com o canal associado ao SWIR (interpretado como verde) gera a percepção de uma cor amarela.

Essa interação entre as bandas possibilita a diferenciação dos níveis de vigor vegetativos e a identificação de variações nas propriedades da vegetação e da terra, uma vez que alterações na refletância podem indicar variações na composição mineral, na umidade e na textura edáfica. Dessa forma, a aplicação conjunta das composições NIR, RED e SWIR não só aprimora o mapeamento e a avaliação da vegetação, como também contribui para uma caracterização mais precisa da terra, proporcionando uma base científica sólida para a proposição de culturas que se adequem melhor às condições edáficas e ambientais específicas.

As imagens capturadas em 11 de março de 2024 evidenciam um elevado vigor vegetativo, conforme demonstrado pela fotointerpretação e pelos índices de NDVI, que refletem a densidade foliar e a saúde das plantas. Nesse período, a composição falsa cor NIR-SWIR-RED, com o NIR atribuído ao canal do vermelho, SWIR ao canal verde e RED ao canal azul, mostra-se particularmente eficaz para a identificação de culturas, permitindo a comparação e o reconhecimento dos tipos de vegetação presentes tanto na área de interesse quanto em seus arredores. Conforme ilustrado na Figura 22, a área agrícola exibe uma

tonalidade amarela intensa, em contraste com uma área próxima, que apresenta nuances avermelhadas.

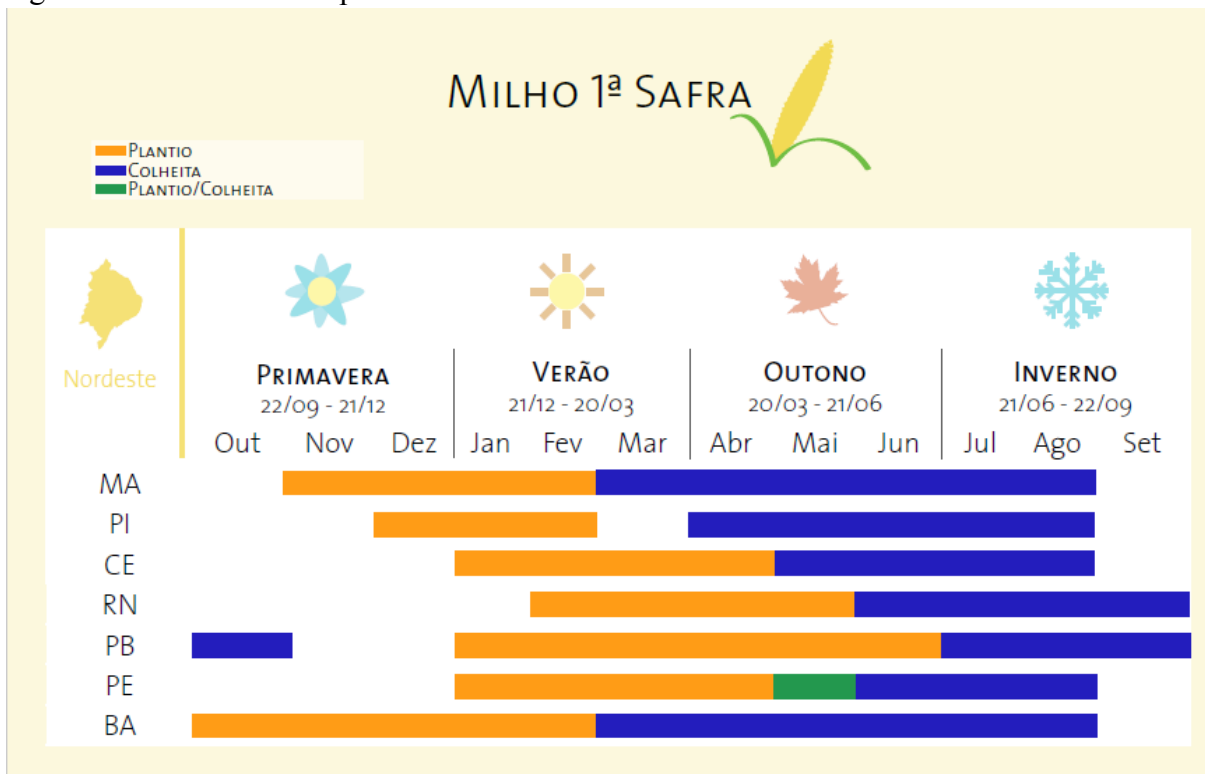
Figura 22 - Mapa da área de interesse com cultivo de soja e área próxima com cultivo de milho na composição NIR SWIR RED.



Fonte: Elaboração própria.

Como apoio à diferenciação de culturas por meio da composição NIR-SWIR-RED, o NDVI da área próxima se mostrou consistente com o calendário agrícola para a safra de milho (Figura 23), apresentando um ciclo com duração entre 110 e 145 dias. Cabe destacar que, conforme o calendário regional, o milho é plantado entre dezembro e abril, com colheita ocorrendo entre maio e agosto, o que reforça a correspondência dos resultados obtidos com os padrões agrícolas estabelecidos.

Figura 23 - Calendário de plantio e colheita de milho no Nordeste.



Fonte: Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2020, Conab.

Além disso, os valores do NDVI variaram ao longo do período analisado: em outubro, os índices estavam baixos (Figura 24); em janeiro, apresentaram elevação significativa (Figura 25); e, em abril, os valores voltaram a ser reduzidos, refletindo o ciclo fenológico da cultura (Figura 26). Em concordância com o Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil, da Conab.

Figura 24 - Série temporal de NDVI da cultura de milho em outubro, período anterior ao início da safra.



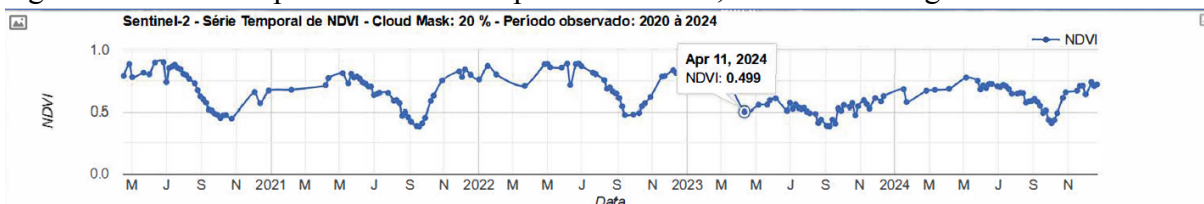
Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Série temporal de NDVI da cultura de milho em seu pico vegetativo, em janeiro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Série temporal de NDVI do período de abril, com valores sugestivos de colheita.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a integração das bandas NIR, SWIR e RED revela-se uma abordagem robusta para a proposição de culturas e a caracterização da terra. Essa combinação, associada com os dados de NDVI, permite identificar com precisão os níveis de vigor vegetativo e inferir proposição quanto à identificação de cultivo. A análise dos índices de NDVI, que demonstrou flutuações tanto em relação ao ciclo da soja quanto ao ciclo do milho, corrobora a eficácia desse método para monitorar o ciclo fenológico, conforme evidenciado nos dados apresentados. Dessa forma, a utilização conjunta das composições espectrais, aliada à interpretação dos índices de vegetação, oferece uma base científica sólida para a definição de culturas que se adequem às condições ambientais locais.

5. CONCLUSÃO

O estudo realizado demonstrou que a aplicação das ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento é indispensável para o monitoramento agrícola, a análise de desmatamento e a caracterização do uso da terra. A utilização de composições espectrais específicas e índices de vegetação possibilitou a identificação das dinâmicas territoriais ao longo do tempo, contribuindo para a compreensão das mudanças na paisagem e para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. A análise das imagens de satélite permitiu acompanhar com precisão o ciclo produtivo das culturas, desde a emergência até a colheita, revelando momentos críticos para o manejo das lavouras e para a mitigação de riscos.

A identificação das fases fenológicas das culturas, como a soja e o milho, permite a tomada de decisões mais assertivas, otimizando a aplicação de insumos e o planejamento das atividades agrícolas. Além disso, a análise multitemporal foi essencial para detectar áreas de desmatamento e avaliar a conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas, destacando a importância de um monitoramento contínuo para garantir a sustentabilidade das atividades produtivas. A caracterização da terra e identificação do cultivo com base nas composições espectrais revelou não apenas as condições atuais das áreas cultivadas, mas também a necessidade de práticas conservacionistas, como o plantio direto e a rotação de culturas.

O estudo também evidenciou a importância de integrar essas tecnologias ao planejamento territorial, permitindo não apenas a identificação de áreas propícias para o cultivo, mas também a detecção precoce de problemas, como estresse hídrico e baixa fertilidade. Essa abordagem contribui para a implementação de estratégias de manejo mais eficazes, garantindo maior eficiência produtiva e a preservação dos recursos naturais. A análise das imagens capturadas pelos satélites Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2 mostrou que a evolução das técnicas de sensoriamento remoto oferece um suporte cada vez mais preciso para o desenvolvimento agrícola sustentável.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o sensoriamento remoto e o geoprocessamento são ferramentas fundamentais para a gestão das atividades agrícolas e para o monitoramento ambiental. A integração dessas tecnologias permite não apenas a análise detalhada das condições atuais da terra e da vegetação, mas também a previsão de cenários futuros, orientando a adoção de práticas mais sustentáveis. O uso contínuo dessas ferramentas contribui para a mitigação dos impactos ambientais, promovendo um equilíbrio entre a produção agrícola e a conservação dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to Remote Sensing**. 5. ed. New York: Guilford Press, 2011.

COELHO, Ivan de Almeida Machado. **Uso de geotecnologias na análise da biomassa florestal no estado da Paraíba**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Diagnóstico do Município de Jardim do Mulato**. Fortaleza: CPRM, 2004.

DA SILVA, Glauciene Justino Ferreira; ALMEIDA, Nadjacleia Vilar. **Degradação ambiental no município de Parari-PB: uma análise por meio de sensoriamento remoto [Environmental degradation in the town of Parari-PB: an analysis by means of remote sensing]**. Revista Geografar, v. 10, n. 2, p. 140-164, 2015.

DE JESUS FRANÇA, Luciano Cavalcante et al. **A geotecnologia na avaliação e monitoramento da desertificação no semiárido do Brasil: um estudo de caso de Gilbués, Piauí**. Pesquisas agrárias e ambientais Volume VIII.

FRANCO, Maria Luiza Monteiro. **Caracterização de um polo gerador de viagem a partir do sensoriamento remoto: estudo de caso**. 2023. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2011

JÚNIOR, J. de O. L.; ROCHA, G. C.; BRAGA, T. F. M. .; GOMES, L. S. L. **Análise comparativa entre duas unidades de conservação no Piauí utilizando os princípios de boa governança: Comparative analysis between two conservation units in Piauí using the principles of good governance**. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 317–335, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34068. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/34068>. Acesso em: 12 fev. 2025.

LIMA, Marineldo de Brito. **Transformações na paisagem da região hidrográfica Canindé-Piauí no semiárido piauiense: uma análise da dinâmica de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2020**. 2023. 76 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2023.

LIMA, Mirelle Tainá Vieira; OLIVEIRA, Carlos Wagner; MOURA-FÉ, Marcelo Martins. **Análise multicritério em geoprocessamento como contribuição ao estudo da vulnerabilidade à erosão no estado do Ceará**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 5, p. 3156-3172, 2021.

SANTIAGO, Cristiane Maria Cordeiro et al. **Arranjo espacial da bacia hidrográfica do Rio São Nicolau-Piauí a partir da análise morfométrica e dos aspectos ambientais**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 8, n. 2, p. 402-421, 2015.

SOUZA, Leopoldo Marcílio Gonçalves. **Análise da evolução do desmatamento na bacia do rio Ipanema através do sensoriamento remoto**. 2017. 51 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

ZALLES, Viviana; HANSEN, Matthew C.; POTAPOV, Peter V.; STEHMAN, Stephen V.; TYUKAVINA, Alexandra; PICKENS, Amy; SONG, Xiao-Peng; ADUSEI, Bernard; OKPA, Chima; AGUILAR, Ricardo; JOHN, Nicholas; CHAVEZ, Selen. **Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 2, p. 428-435, jan. 2019. DOI: 10.1073/pnas.1810301115.