

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA
EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO**

**MARIA EDUARDA LODO NAVARRO
MAYSA GARCETE CHAVES**

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2024**

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO

Maria Eduarda Lodo Navarro

Maysa Garcete Chaves

Orientador: Prof. Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Grande Dourados, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrícola.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

N322c Navarro, Maria Eduarda Lodo
Comportamento espectral da cultura da soja em diferentes estágios de desenvolvimento [recurso eletrônico] / Maria Eduarda Lodo Navarro, Maysa Garcete Chaves. -- 2024.
Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Anamari Viegas de Araújo Motomiya.
TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2024.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Índices de vegetação. 2. NDVI. 3. NDRE. 4. PlanetScope. I. Chaves, Maysa Garcete . II. Motomiya, Anamari Viegas De Araújo. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DA SOJA EM DIFERENTES ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO

Por

Maria Eduarda Lodo Navarro

Maysa Garcete Chaves

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

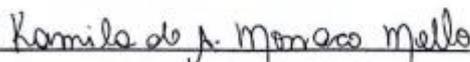
Aprovado em: 16 de fevereiro de 2024.



Prof. Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando
Membro da banca – UFGD/FCA



Dra. Kamila de Almeida Monaco Mello
Membro da banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS – Maria Eduarda Lodo Navarro

À minha família, expresso a minha sincera gratidão, por estar constantemente ao meu lado, oferecendo apoio emocional e incentivo durante os períodos mais desafiadores.

Em especial aos meus avós: Antônio de Souza e Clarice Lodo de Souza, por fazerem de mim o ser humano que sou hoje, por todos os ensinamentos, a educação que me foi dada, pelo carinho, e por todo o apoio que sempre me deram. Vocês fazem parte de todo o sucesso que eu venha alcançar na vida.

À Bruna Vitória da Silva Carrapateira, por ser meu pilar, por seu apoio inabalável, compreensão e incentivo durante todo o processo. Sua presença constante, seu amor e cuidado foram fundamentais para me manter motivada e focada. Obrigado por estar ao meu lado em cada etapa deste desafio acadêmico.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) por proporcionar um ambiente propício e os recursos necessários para o desenvolvimento acadêmico. Aos professores da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), pelo aprendizado adquirido durante todos estes anos.

À orientadora, Profa. Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya, pela grande contribuição por meio de nossas conversas construtivas, pelos sábios conselhos oferecidos.

Às amigas adquiridas na graduação Larissa Pereira Barros e Marianne de Souza Santos. Pela amizade, apoio, companheirismo, horas de estudos, conselhos e parceria.

À minha parceira de TCC, Maysa Garcete Chaves pela colaboração valiosa, dedicação e apoio ao longo deste projeto.

A todos que, mesmo não sendo explicitamente citados, desempenharam um papel relevante para a realização desta conquista.

Finalmente, expresso minha profunda gratidão a Deus pelo dom da vida, por toda a sabedoria que me foi concedida e por sua orientação constante a cada etapa desta jornada acadêmica. Agradeço por fortalecer-me nos momentos desafiadores, por proporcionar discernimento durante períodos de incerteza e por inspirar a perseverança indispensável

AGRADECIMENTOS – Maysa Garcete Chaves

A Deus e aos Orixás por me guiarem em todos os meus caminhos, me mostrando que com fé, sabedoria e determinação que somos capazes de enfrentar qualquer dificuldade que surgir.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) pela sua inerente contribuição na minha jornada acadêmica em Engenharia Agrícola. Pela infraestrutura oferecida que fornece um ambiente propício à aprendizagem.

À orientadora Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya pela confiança, por disponibilizar seu tempo, por suas orientações e ensinamentos que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho. À oportunidade dada por você de expandir meus conhecimentos.

Aos membros da banca, por disponibilizarem seu tempo e conhecimento para avaliar o meu trabalho. Suas contribuições são de suma importância na qualidade final deste TCC.

À minha família, meu alicerce. Aos meus pais, José Elessandro da Silva Chaves e Mara Garcete Vieira por acreditar, apoiar, pela dedicação e paciência, seus conselhos e palavras de sabedoria foram essenciais em momentos de incerteza, seu amor incondicional me impulsionou a superar desafios e me fez chegar a essa etapa da minha jornada acadêmica.

Aos meus avós Alexandrina Teixeira da Silva e Norvino Rodrigues Chaves (*in memoriam*) por suas orações, pelo amor, incentivo, por todo apoio oferecido.

À minha parceira de TCC, Maria Eduarda Lodo Navarro, agradeço por ter aceitado fazer parte e seguir comigo desde o início deste trabalho, por sua dedicação, colaboração, paciência e sua parceria que foi muito importante.

Aos meus amigos e colegas que fizeram parte da minha jornada de vida e acadêmica, obrigada por sempre me apoiarem e torcerem por mim.

A todos, mencionados e não mencionados, meus sinceros agradecimentos.

NAVARRO, M.E.L.; CHAVES, M.G. **Comportamento espectral da cultura da soja em diferentes estágios de desenvolvimento.** 2024. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2024.

RESUMO

A cultura da soja desempenha um papel importante na agricultura brasileira e mundial, sendo o grão mais produzido no Brasil e contribuindo significativamente para a renda rural. O avanço tecnológico no setor agrícola, juntamente com o uso de sensoriamento remoto (SR), tem otimizado a produção e a qualidade dos grãos, aumentando a competitividade internacional. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) são índices vegetativos obtidos por SR que fornecem informações valiosas sobre as culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento espectral da cultura da soja em diferentes estágios de desenvolvimento utilizando os índices de vegetação NDVI e NDRE e as bandas espectrais que os compõem. A pesquisa foi realizada em uma área de 37 hectares em Dourados, MS, Brasil, durante a safra 2022/2023. Utilizando o instrumento imageador *PlanetScope*, imagens foram coletadas em intervalos de 15 dias ao longo do ciclo da cultura. Os resultados mostraram que os valores médios de NDVI e NDRE variaram de acordo com o desenvolvimento da soja. O NDVI apresentou melhor resultado durante o crescimento da cultura enquanto o NDRE se mostrou mais sensível durante a fase de maturação da soja. Os dados espectrais indicaram um desenvolvimento bom e uniforme do talhão em estudo. Na faixa do vermelho, a reflectância foi baixa desde o início do cultivo, diminuindo ainda mais com o avanço dos estádios fenológicos. Na região da borda do vermelho, a reflectância apresentou-se um pouco mais elevada nas fases iniciais e finais do ciclo, com valores menores nos períodos de máximo desenvolvimento vegetativo. O comportamento é inverso no infravermelho próximo, com a reflectância mais elevada, principalmente no meio do ciclo. Os índices de vegetação, NDVI e NDRE, apresentaram valores menores no início e final de ciclo, com os valores aumentando conforme o desenvolvimento da cultura. Observou-se baixa variabilidade no talhão, com valores de coeficiente de variação abaixo de 10%.

Palavras-chave: Índices de vegetação, NDVI, NDRE, PlanetScope.

NAVARRO, M.E.L.; CHAVES, M.G. **Spectral behavior of the soybean crop at different stages of development.** 2024. 19 f. Course Conclusion Paper (Bachelor's Degree in Agricultural Engineering) - Faculty of Agrarian Sciences, Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2024.

ABSTRACT

The soybean crop plays an important role in Brazilian and world agriculture, being the most produced grain in Brazil and contributing significantly to rural income. Technological advances in the agricultural sector, together with the use of remote sensing (SR), have optimized grain production and quality, increasing international competitiveness. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDRE (Normalized Difference Red Edge) are vegetative indexes obtained by SR that provide valuable information about crops. The objective of this work was to evaluate the spectral behavior of soybean crops at different stages of development using the NDVI and NDRE vegetation indexes and the spectral bands that compose them. The research was carried out in a 37-hectare area in Dourados, MS, Brazil, during the 2022/2023 harvest. Using the PlanetScope imager, images were collected at 15-day intervals throughout the crop cycle. The results showed that the average NDVI and NDRE values varied according to soybean development. NDVI performed better during crop development, while NDRE proved to be more sensitive during the soybean's maturation phase. The spectral data indicated a good and uniform development of the plot under study. In the red range, reflectance was low from the start of cultivation, decreasing further as the phenological stages progressed. In the red edge region, reflectance was slightly higher in the early and late stages of the cycle, with lower values in the periods of maximum vegetative development. The opposite behavior occurred in the near infrared, with higher reflectance, especially in the middle of the cycle. The NDVI and NDRE vegetation indexes showed lower values at the beginning and end of the cycle, with values increasing as the crop developed. Low variability was observed in the plot, with coefficient of variation values below 10%.

Keywords: Vegetation index, NDVI, NDRE, PlanetScope.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Estádios fenológicos da cultura da soja	4
Figura 2. Mapa de localização da área estudada	7
Figura 3. Gráfico de precipitação pluviométrica e temperatura média durante o ciclo da cultura da soja na safra 2022/2023	8
Figura 4. Gráfico das médias das bandas do Infravermelho Próximo (<i>NIR</i>), borda do vermelho (<i>Red Edge</i>), e Vermelho (<i>Red</i>) ao longo do ciclo da safra 2022/2023	10
Figura 5. Gráfico das médias índices vegetativos NDVI e NDRE durante o ciclo.....	12
Figura 6. Mapas representativos das variações espaciais do NDVI.....	14
Figura 7. Mapas representativos das variações espaciais do NDRE	15

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Componentes do instrumento imageador <i>PlanetScope</i>	9
Tabela 2. Índices de vegetação e suas equações.....	9
Tabela 3. Análise estatística descritiva dos índices de vegetação	13

SUMÁRIO

	Página
1 Introdução.....	1
2 Revisão de literatura.....	3
2.1 Estádios fenológicos da soja.....	3
2.2 Sensoriamento remoto.....	4
2.3 Índices de vegetação.....	5
2.3.1 NDVI.....	6
2.3.2 NDRE.....	6
3 Material e métodos.....	7
4 Resultados e discussão.....	10
5 Conclusões.....	16
6 Referências bibliográficas.....	17

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) faz parte da família Fabaceae (leguminosas), com um grande potencial de consumo por humanos e animais devido à sua ampla utilização na produção de alimentos, rações e produtos industriais, especialmente devido ao alto teor de proteínas em seu grão. A cultura tem um papel fundamental na agricultura brasileira e mundial, destacando-se como o grão mais produzido no Brasil, o qual tem o maior espaço territorial dedicado à sua produção. A soja é uma das culturas mais importantes para a geração da renda rural brasileira, contribuindo com 51% do valor da produção total da agricultura (IBGE, 2019).

O crescimento na produção de alimentos deve-se aos avanços tecnológicos aplicados ao setor agrícola. Tais avanços, aliados às pesquisas para melhorar o uso de insumos, otimizaram a produção e a qualidade dos grãos, além disso, a mecanização do campo contribuiu para o aumento da produtividade, bem como para a maior competitividade internacional (Vergara *et al.*, 2017).

Dentre as tecnologias mais recentes, destaca-se o monitoramento da agricultura por sensoriamento remoto (SR). Segundo Weiss *et al.* (2020), o SR é um assunto vasto que tem sido amplamente abordado sob vários pontos de vista, com base em aplicações agrícolas específicas (agricultura de precisão, previsão de produção, irrigação, detecção de ervas daninhas), em plataformas de sensoriamento remoto específicas (satélites, veículos aéreos não tripulados - UAV, veículos terrestres não tripulados - UGV) ou sensores (detecção ativa ou passiva, domínio de comprimento de onda, amostragem espacial).

Os índices de vegetação (IV), oriundos de dados espectrais obtidos por SR, desempenham uma função importante no monitoramento das culturas. Diferentes índices de vegetação têm sido propostos para o estudo da vegetação (Simões *et al.*, 2003). O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos mais utilizados e está relacionado aos parâmetros biofísicos da vegetação como índice de área foliar (IAF), acúmulo de biomassa e produtividade (Bégué *et al.*, 2010). O NDRE é um índice utilizado como indicativo nutricional, podendo ser utilizado para avaliar o teor de clorofila e assimilação de nitrogênio, dentre outras possibilidades (Barnes, 2000).

Os IV são obtidos por meio de uma combinação de duas ou mais bandas espectrais, fornecendo informações estáveis sobre as superfícies em comparação com as medições de reflectância.

As bandas espectrais são necessárias para aplicações na agricultura, monitoramento ambiental e gestão de recursos naturais. Elas nos permitem obter informações valiosas sobre a saúde das plantas e a dinâmica da vegetação na superfície da Terra, as utilizadas nos índices NDVI e NDRE são o vermelho, Infravermelho próximo (IVP) e a borda do vermelho (*red edge*).

O *PlanetScope* é uma constelação de microssatélites com mais de 200 satélites, tem monitoramento diário e sua capacidade de coleta é de 200 milhões de km²/dia; as imagens têm resolução espacial de aproximadamente 3 metros por pixel (Planet, 2023). A obtenção e análise quantitativa de índices de vegetação, a partir de imagens orbitais com boa resolução espectral e espacial, proporcionam informações que podem orientar decisões estratégicas na gestão agrícola, resultando em práticas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e produtivas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento espectral da cultura da soja em diferentes estágios de desenvolvimento utilizando os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*) e as bandas espectrais que os compõem, a fim de se obter uma compreensão mais profunda das características espectrais das plantas e suas mudanças ao longo do ciclo de crescimento da cultura e contribuir para o avanço do conhecimento nas áreas de sensoriamento remoto aplicado à agricultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA SOJA

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*), oriunda do continente asiático, pertencente à classe das dicotiledôneas, família Fabaceae, é a oleaginosa anual mais cultivada no mundo. A composição dos grãos de soja apresenta em média 40% de proteína, 21% de óleo, 33% de carboidrato e 4% de cinzas na base seca (Perkins, 1995). É adaptada a regiões onde as temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C, sendo a temperatura ideal de desenvolvimento em torno de 30°C; a semeadura não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20°C (Farias *et al.*, 2007).

No decorrer do seu desenvolvimento, a cultura passa por uma série de diferentes estádios fenológicos que refletem suas mudanças morfológicas e fisiológicas. Visando unificar a descrição desses estádios, uma metodologia conhecida como estádios fenológicos foi desenvolvida e amplamente adotada, dividindo-os em: vegetativos, representados pela letra V e os reprodutivos pela letra R, sendo acompanhado por um número que identificam os estádios no decorrer destas duas fases de desenvolvimento da soja, exceto os estádios VE (emergência) e VC (cotilédone) (Farias *et al.*, 2007). A caracterização dos estádios vegetativos que sucedem ao estágio VC é feita com base no último nó (superior) da haste com uma folha completamente desenvolvida (Neumaier *et al.*, 2000).

Os estádios reprodutivos descrevem detalhadamente o período florescimento-maturação. São denominados pela letra R seguida dos números um até oito. Os estádios reprodutivos abrangem quatro distintas fases do desenvolvimento reprodutivo da planta, ou seja, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (Neumaier *et al.*, 2000) como representado na Figura 1.

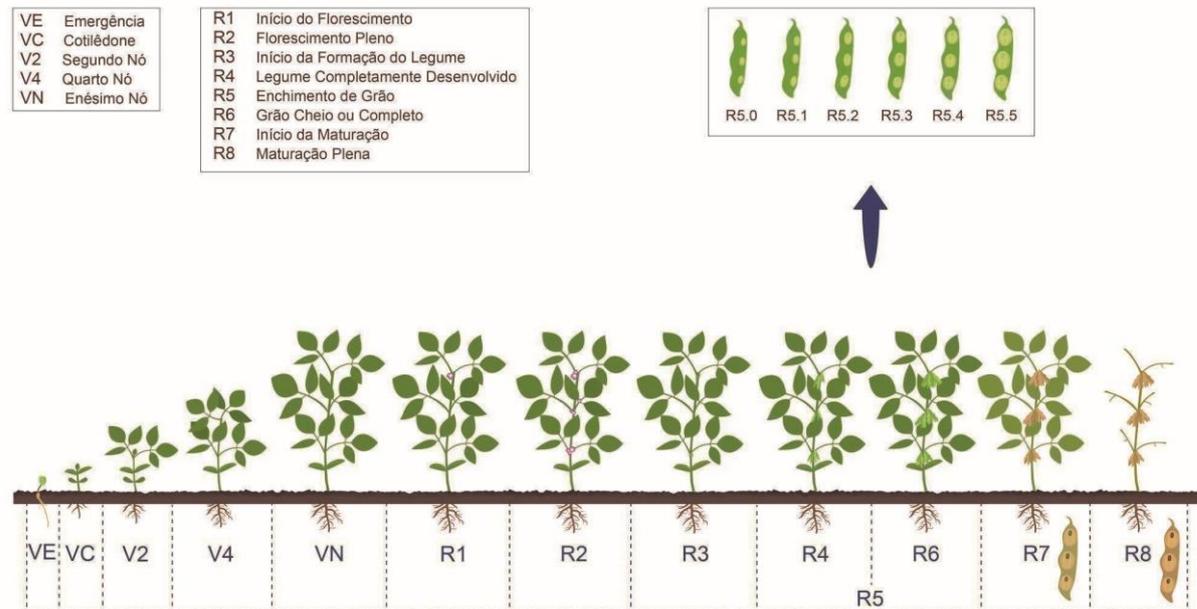


Figura 1. Estádios fenológicos da cultura da soja.

Fonte: Elevagro, 2013.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é uma ciência que visa a obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres. O objeto imageado é registrado pelo sensor por meio de medições da radiação eletromagnética, tal como a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto (Meneses e Almeida, 2012).

A detecção remota na agricultura refere-se às medidas sem contato das radiações refletidas, ou emitidas em áreas agrícolas, podendo ser feita por meio de satélites, aviões, veículos aéreos não tripulados e por sensores portáteis acoplados às máquinas agrícolas ou carregados pelo ser humano (Shiratsuchi *et al.*, 2014).

A utilização do SR apresenta algumas facilidades na obtenção de dados tais como disponibilidade em locais de difícil acesso ou acidentados; cobertura de grandes áreas geográficas contendo observações isoladas pontuais; caráter multidisciplinar da informação produzida; coleta de dados não destrutiva; e ajuste de erros por intermédio da avaliação de séries históricas de imagens (Jensen, 1996).

As condições de estresse por déficit hídrico são passíveis de mensuração por meio de técnicas sensoriamento remoto, pelo uso de dados provenientes de diferentes sensores, localizados em plataformas orbitais e suborbitais e expressos por meio de índices de vegetação - IVs (Donohue *et al.*, 2009).

Os índices de vegetação derivados de dados de sensoriamento remoto, como o NDVI e o NDRE fornecem informações sobre a saúde e vigor das plantas, auxiliando na identificação de áreas com potenciais problemas fitossanitários e orientando ações de manejo precisas e eficientes.

2.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação são definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais. Estas são selecionadas para melhorar a relação dos dados espectrais com os parâmetros da vegetação. Os dados utilizados para determinação dos IV são os valores de dados espectrais de saída do sensor, como radiância, número digital e reflectância, sendo estes últimos os mais comuns (Moreira, 2000).

Novo e Ponzoni (2001) detalham o comportamento espectral da vegetação e afirmam que na região do Visível, os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese. Na região do infravermelho próximo, existe uma absorção pequena da REM (radiação eletromagnética) e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nesta região. A banda Red Edge auxilia no estudo da sensibilidade das plantas além de permitir a discriminação entre formações vegetais arbóreas e rasteiras, devido a sua alta resolução espacial, que permite executar uma segmentação para avaliar detalhes em pequena escala (Souza *et al.*, 2011).

O êxito da utilização dos índices de vegetação se fundamenta no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define o crescimento e o desenvolvimento dessa comunidade (Huete, 1988).

2.3.1 NDVI

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) está entre os índices que melhor se correlaciona com a vegetação, já que utiliza banda espectrais obtidas no vermelho e infravermelho próximo, que possuem significativa correlação com o verde ou porções fotossinteticamente ativas das plantas (Moreira *et al.*, 2007).

O NDVI varia de -1 a +1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação enquanto o valor zero refere-se aos pixels não vegetados. Dessa forma, para cada estágio que se encontra a vegetação (cultura), um determinado valor do NDVI será atribuído, possibilitando avaliar a saúde daquela cultura (Lopes *et al.*, 2010). O cálculo do NDVI é obtido pela razão entre a diferença da resposta espectral nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, e a somatória dessas duas bandas (Figueiredo, 2005).

2.3.2 NDRE

O Índice *RedEdge* da Diferença Normalizada (NDRE) é semelhante ao NDVI, mas o vermelho é substituído pela borda do vermelho. Segundo Ramírez *et al.* (2019), a borda vermelha é sensível ao conteúdo de clorofila nas folhas, à variabilidade na área foliar e aos efeitos de fundo do solo. Assim, na prática, o NDRE pode corrigir dois inconvenientes que podem ocorrer com o NDVI. O primeiro está relacionado ao fato do vermelho ser fortemente absorvido pela parte superior da copa vegetal, de modo que os níveis mais baixos da copa não contribuem muito para os valores do NDVI. O segundo é que, em determinados estágios da vegetação, o alto teor de clorofila satura o valor máximo do NDVI, perdendo a capacidade de representar a variabilidade no estágio da vegetação. O vermelho não é tão fortemente absorvido pelo topo da copa e pode reduzir ambos os efeitos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um talhão de 37 hectares de uma área comercial situada na região do município de Dourados, MS, localizado na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 2). O local encontra-se em latitude de 22°14'S, longitude de 54°59'W e altitude de 434 m aproximadamente. O clima da região é do tipo Am, mesotérmico úmido, segundo a classificação de Köppen com temperaturas e precipitações médias anuais variando de 20°C a 24°C e de 1250 mm a 1500 mm, respectivamente. O solo da área é um Latossolo Vermelho distroférico com textura argilosa, com 59% de argila na camada de 0-20 cm.

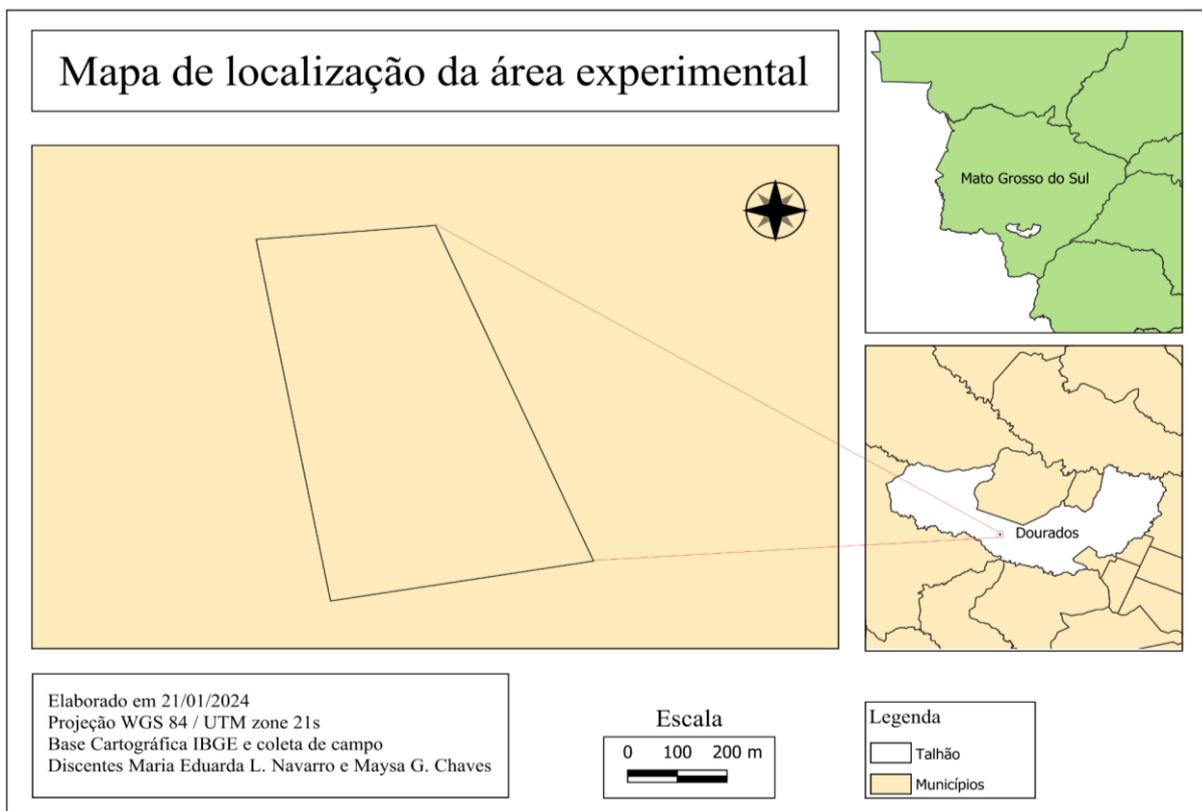


Figura 2. Mapa de localização da área estudada.

Fonte: Autores, 2024.

Os dados de precipitação acumulada e temperatura média do período em que foi feito o acompanhamento do desenvolvimento do talhão (Figura 3) foram obtidos por meio da estação meteorológica de Dourados – Embrapa Agropecuária Oeste (Guia Clima 2024).

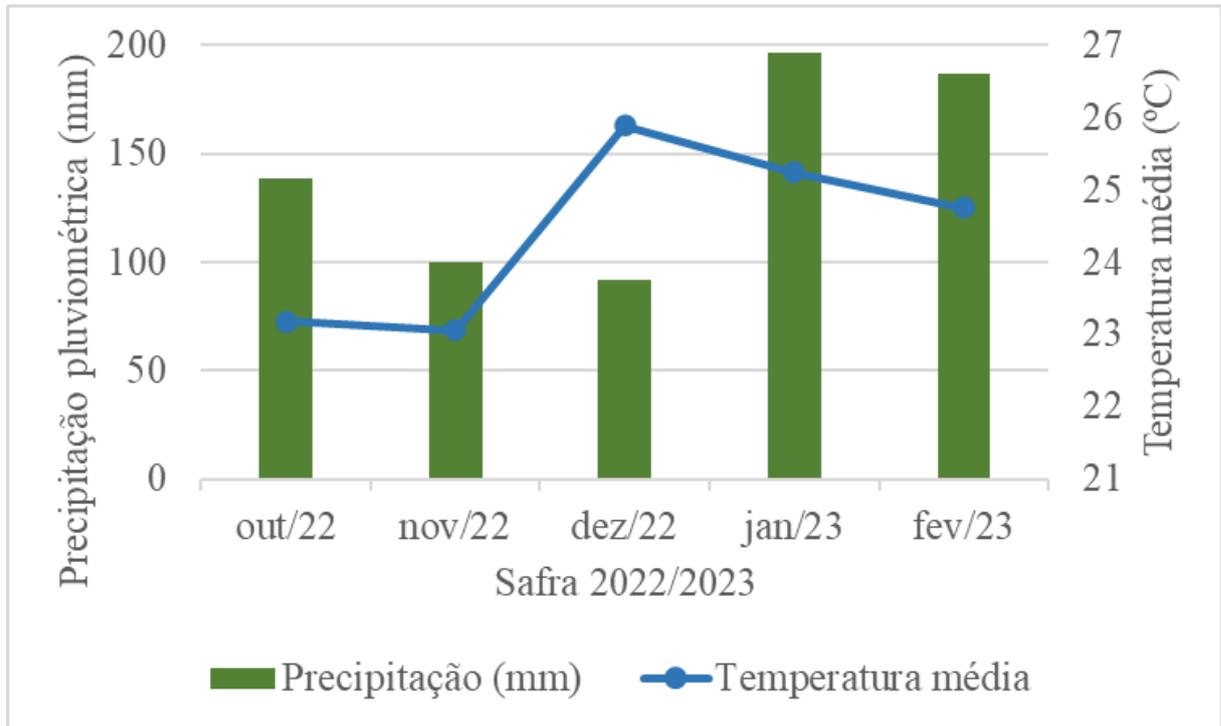


Figura 3. Gráfico de precipitação pluviométrica e temperatura média durante o ciclo da cultura da soja na safra 2022/2023.

Fonte: Autores, 2024.

Foi gerado um arquivo vetorial visando estabelecer os limites do talhão sob avaliação. Este arquivo foi utilizado para pesquisar e obter as imagens por meio do instrumento imageador *PlanetScope* (<https://www.planet.com/explorer>). Buscou-se padronizar a coleta das imagens a cada 15 dias ao longo da safra 2022/2023, porém, ocorreram dias nublados, nos quais não foi possível a obtenção dos dados. Assim, foram selecionadas as seguintes datas: 09/11/2022, 24/11/2022, 14/12/2022, 29/12/2022, 10/01/2023, 26/01/2023, 06/02/2023 e 18/02/2023. A resolução espectral do *PlanetScope* encontra-se na Tabela 1.

Realizou-se a conversão dos valores dos números digitais dos pixels em fatores de reflectância, utilizando-se os metadados das imagens, sendo o número digital de cada pixel multiplicado pelo coeficiente de reflectância fornecido a cada banda específica.

Tabela 1. Componentes do instrumento imageador *PlanetScope*.

Banda	Comprimento de onda (nm)	Nome da banda
1	431-452	Azul Costal
2	465-515	Azul
3	513-549	Verde I
4	547-583	Verde
5	600-620	Amarelo
6	650-680	Vermelho
7	687-713	Borda do vermelho
8	845-885	Infravermelho próximo

Foram analisadas as médias das bandas do Infravermelho Próximo (NIR), borda do vermelho (RedEdge), e vermelho (Red) e como cada banda se comportou em cada estágio da cultura. A partir das bandas, foram calculados o Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação da Borda do vermelho (NDRE) utilizando-se a calculadora *raster* do *software* Qgis (Tabela 2).

Tabela 2. Índices de vegetação e suas equações.

Índice	Equação	Autor
NDVI	$\frac{Nir - Red}{Nir + Red}$	Hatfield; Prueger (2010)
NDRE	$\frac{Nir - RedEdge}{Nir + RedEdge}$	Barnes <i>et al.</i> (2000)

em que:

Red - reflectância na banda do vermelho;

Nir - reflectância na banda do infravermelho próximo;

RedEdge - reflectância na banda da borda do vermelho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, estão apresentados os valores médios da resposta espectral da cultura da soja nas bandas do Infravermelho Próximo (*NIR*), borda do vermelho (*Red Edge*), e Vermelho (*Red*), ao longo do ciclo da safra 2022/2023. Na faixa visível (vermelho), observou-se que houve uma baixa reflectância desde o início do cultivo, que diminuiu ainda mais com o avanço dos estádios fenológicos. Esta baixa reflectância caracteriza o bom estado fisiológico da cultura, indicando que a maior parte da radiação eletromagnética foi absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes (clorofilas *a* e *b*) no mesófilo foliar (Moreira, 2007).

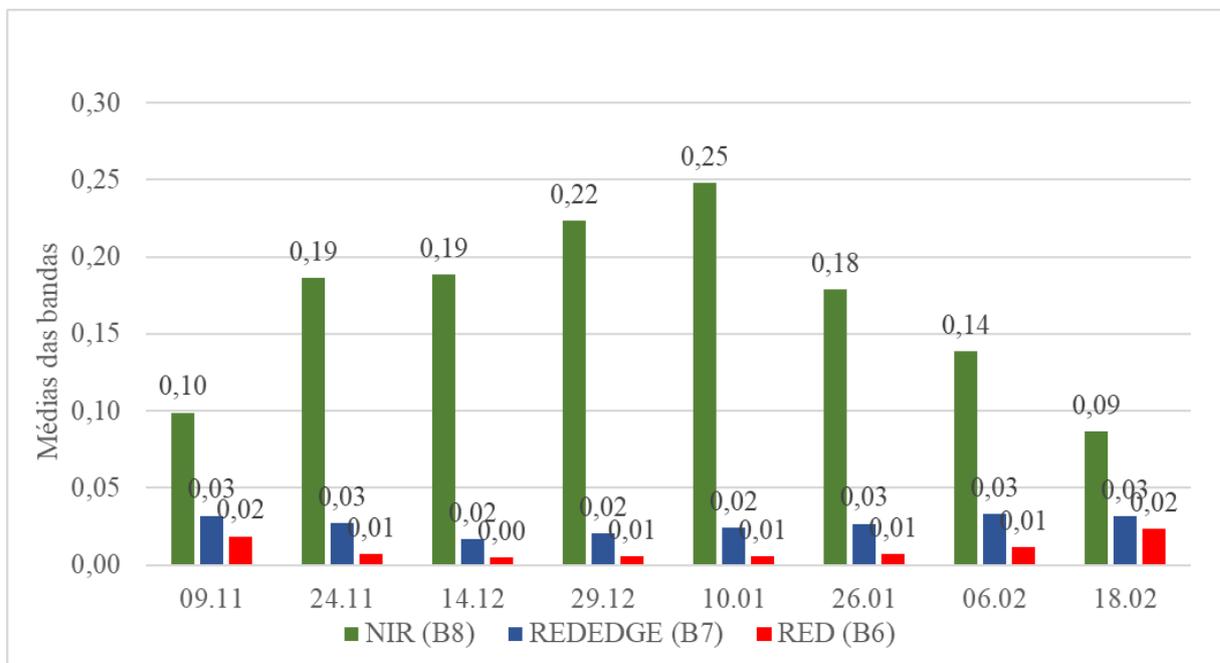


Figura 4. Gráfico das médias das bandas do Infravermelho Próximo (*NIR*), borda do vermelho (*RedEdge*), e Vermelho (*Red*) ao longo do ciclo da safra 2022/2023.

Fonte: Autores, 2024.

Segundo Read *et al.* (2003), a reflectância na região do visível do espectro eletromagnético varia em função da concentração de clorofila no tecido foliar, sendo este fortemente associado com o nível de nitrogênio (N) na planta. Assim, quanto menor o suprimento de N na planta, menor será o nível de clorofila e consequentemente menor será a absorção da radiação na região do visível. Deve-se atentar que, conforme Hungria *et al.* (2001),

a soja desenvolve relação simbiótica com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, as quais realizam fixação biológica do N atmosférico, e estas podem suprir todo o N necessário à cultura.

A reflectância na região da borda do vermelho apresentou-se um pouco mais elevada nas fases iniciais e finais do ciclo, com valores menores nos períodos de máximo desenvolvimento vegetativo. Esta região do espectro é sensível ao conteúdo de clorofila nas folhas e aos efeitos de fundo do solo, conforme destacam Ramírez *et al.* (2019).

Por outro lado, observou-se valores elevados da reflectância no infravermelho próximo (IVP). Nesta região do espectro eletromagnético, o comportamento da vegetação, conforme destacou Ponzoni (2001), é dominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas. Também o conteúdo de água da folha tem uma contribuição indireta neste comportamento. Assim, no IVP a folha saudável apresenta uma alta reflectância devido ao arranjo dos espaços intercelulares e conteúdo de água nas folhas. A radiação que penetra na folha é espalhada em grande parte devido à combinação da reflexão celular interna, decorrente das irregularidades das paredes externas das células, e da diferença entre os índices de refração ar/água nas células túrgidas. O volume de chuva em janeiro pode ter contribuído para o aumento de água na planta e pode ter influenciado no comportamento do IVP.

Segundo Xue e Su (2017), a vegetação saudável e densa está relacionada com altos valores de NDVI e NDRE, devido aos baixos valores de reflectância na faixa do vermelho *Red Edge* e altos valores de reflectância no infravermelho próximo.

Na Figura 5, estão apresentados os valores médios dos índices de vegetação NDVI e NDRE. Comumente, estes índices podem apresentar valores que variam entre -1 e +1, de acordo com a densidade da vegetação. Solos sem cobertura vegetal ou corpos d'água apresentam índices negativos, enquanto áreas cobertas com densa vegetação apresentam índices positivos e próximos a +1.

Observou-se que os valores dos índices variaram de acordo com o desenvolvimento da cultura; o valor médio do NDVI no dia 09/11/22 foi de 0,68, indicando início do desenvolvimento da cultura e a baixa cobertura do solo; no período entre 24/11/2022 e 26/01/2023, os valores médios foram superiores a 0,90, indicando que a soja estava no estágio reprodutivo, conforme Rodrigues *et al.* (2013), estágio no qual a planta apresenta elevada atividade fotossintética.

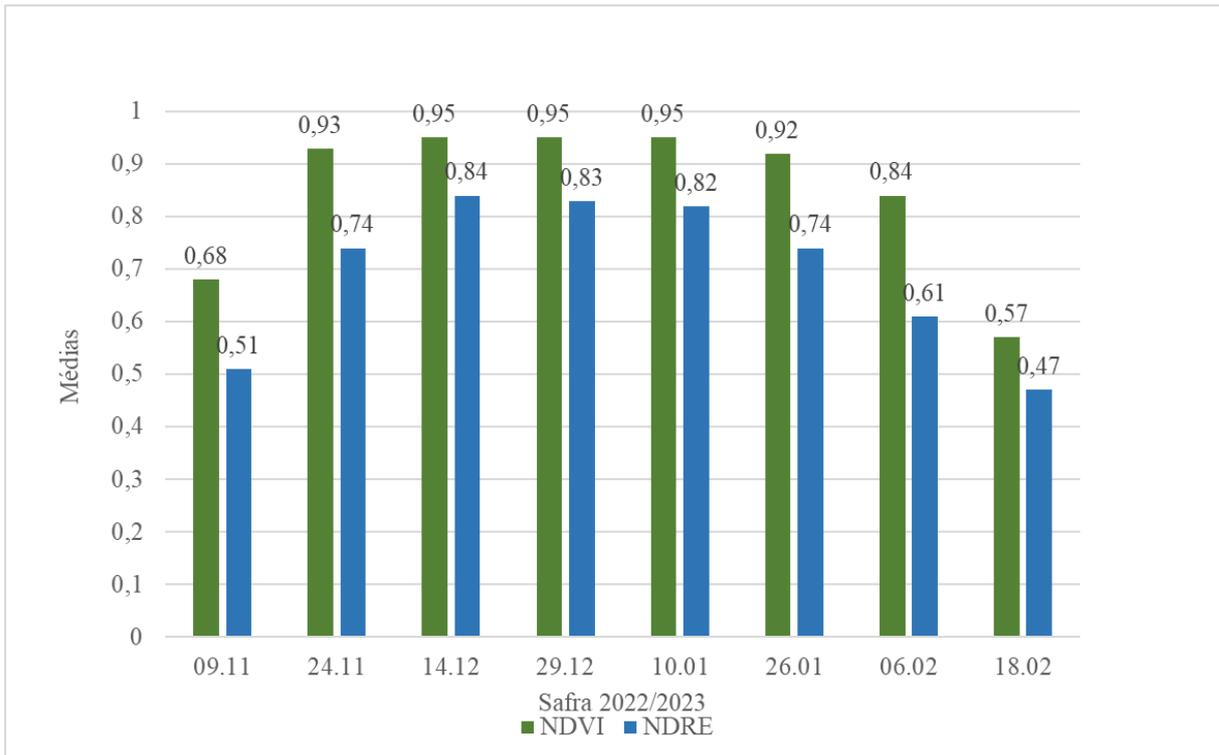


Figura 5. Gráfico das médias índices vegetativos NDVI e NDRE durante o ciclo.

Fonte: Autores, 2024.

A partir de 26/01/22, ocorre uma diminuição dos valores do NDVI, iniciando o período de maturação e senescência, próximo à colheita dos grãos. Nesta fase, as folhas diminuem a reflectância da radiação no infravermelho próximo, e aumenta a reflectância na região do visível. Quando o pico de reflectância é deslocado para a banda do vermelho, devido à degradação da clorofila e, a reflectância no infravermelho próximo diminui devido à degeneração das membranas celulares do mesófilo durante a senescência, ocorre uma diminuição nos valores de NDVI (Trentin e Fonseca, 2011).

O NDRE apresentou comportamento semelhante ao NDVI, porém com valores mais baixos. Do dia 14/12/2022 a 10/01/2022, os valores médios estiveram acima de 0,80, e começaram a diminuir no dia 26/01/2023. Pode-se afirmar que o NDRE é mais sensível em identificar alterações fisiológicas que indicam o início da maturação da cultura. Para Speranza *et al.* (2022), o NDRE, por utilizar uma banda espectral que representa reflectâncias entre as bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo, obtém melhor expressão nas regiões de transição entre plantas saudas e não saudas em uma área de produção agrícola. Griffiths *et al.* (2019) afirmaram que a inclusão das faixas de borda vermelha melhorou ligeiramente as precisões gerais na classificação de imagens em áreas agrícolas. Esse comportamento dos índices também foi observado neste trabalho, pois a partir de 26/01 o NDRE já apresentava

redução, enquanto o NDVI ainda saturado não apresentava alterações significativas que indicassem o início da maturação apresentou-se mais elevado que o NDRE em todo o ciclo da cultura.

Na Tabela 3, encontram-se os resultados da estatística descritiva dos índices avaliados. A variabilidade ou heterogeneidade dos dados pode ser classificada em função do coeficiente de variação (CV%), cujos valores podem ser: baixo, quando inferior a 10%; médio, entre 10 e 20%; alto, quando entre 20 e 30%; e muito alto, quando são superiores a 30% (Gomes, 2009). Os valores do coeficiente de variação dos índices ficaram abaixo de 10%, assim indicando uma baixa variabilidade no talhão em estudo.

Tabela 3. Análise estatística descritiva dos índices de vegetação.

Parâmetros	09/11/2022		24/11/2022		14/12/2022		29/12/2022	
	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE
Média	0,68	0,51	0,93	0,74	0,95	0,84	0,95	0,83
DP	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Mínimo	0,49	0,26	0,70	0,52	0,87	0,74	0,85	0,72
Máximo	0,75	0,58	0,95	0,79	0,98	0,88	0,97	0,87
CV (%)	4,09	4,18	1,08	2,70	1,05	1,19	1,05	1,20
Parâmetros	10/01/2023		26/01/2023		06/02/2023		18/02/2023	
	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE
Média	0,95	0,82	0,92	0,74	0,84	0,61	0,57	0,47
DP	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01
Mínimo	0,90	0,74	0,83	0,66	0,69	0,50	0,51	0,40
Máximo	0,97	0,88	0,94	0,78	0,92	0,77	0,65	0,53
CV (%)	0,51	1,42	0,79	1,61	3,04	4,26	2,74	3,05

DP: desvio padrão; CV (%): coeficiente de variação.

Fonte: Autores, 2024.

Nas Figuras 6 e 7, estão apresentados os mapas de NDVI e NDRE durante o desenvolvimento da cultura da soja. Uma vez gerados os índices de vegetação, estes foram agrupados em classes, adotando-se escalas de cores para facilitar a interpretação e visualização do estado geral da cultura na forma de mapas. Observa-se que o talhão apresenta comportamento uniforme nos índices, conforme mostrado pelo coeficiente de variação.

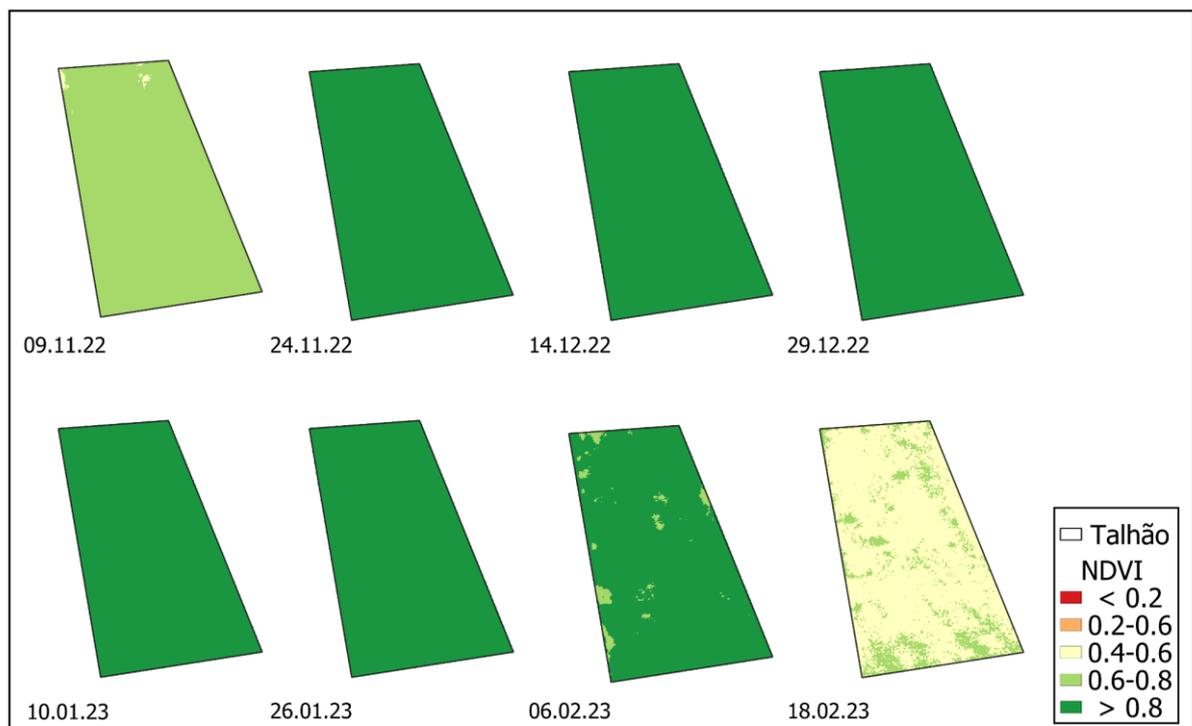


Figura 6. Mapas representativos das variações espaciais do NDVI.

Fonte: Autores, 2024.

O NDVI mostrou pouca variação durante o ciclo, e se manteve homogêneo e sem alterações nos mapas do dia 24/11/2022 a 26/01/2023 (Figura 6). Isso ocorreu devido a limitação que o NDVI sofre ao atingir valores próximos a +1, onde ele acaba saturando e perdendo a sensibilidade em determinados estágios da cultura, ou seja, o valor do infravermelho próximo continua crescendo, mas o valor do vermelho, não mostra uma variação significativa.

Peng e Gitelson (2012 *apud* Pereira, 2020), observaram que o NDVI apresentou resultados satisfatórios apenas nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura da soja e, ao se aproximar da maturidade, esse índice começa a ter um desempenho inferior aos índices que utilizam a banda da borda do vermelho.

O NDRE (Figura 7) permitiu uma análise mais precisa na transição entre os estádios fenológicos da cultura, mostrando-se mais sensível durante todo o ciclo em comparação ao NDVI. A partir do dia 14/12/2022 onde os valores do NDRE se encontram acima de 0,80, não houve variações expressivas na cultura pois a mesma encontra-se estável. Após o dia 10/01/2023, a mudança na coloração começou a ser visível, dando início à maturação e senescência da cultura, com a degradação da clorofila.

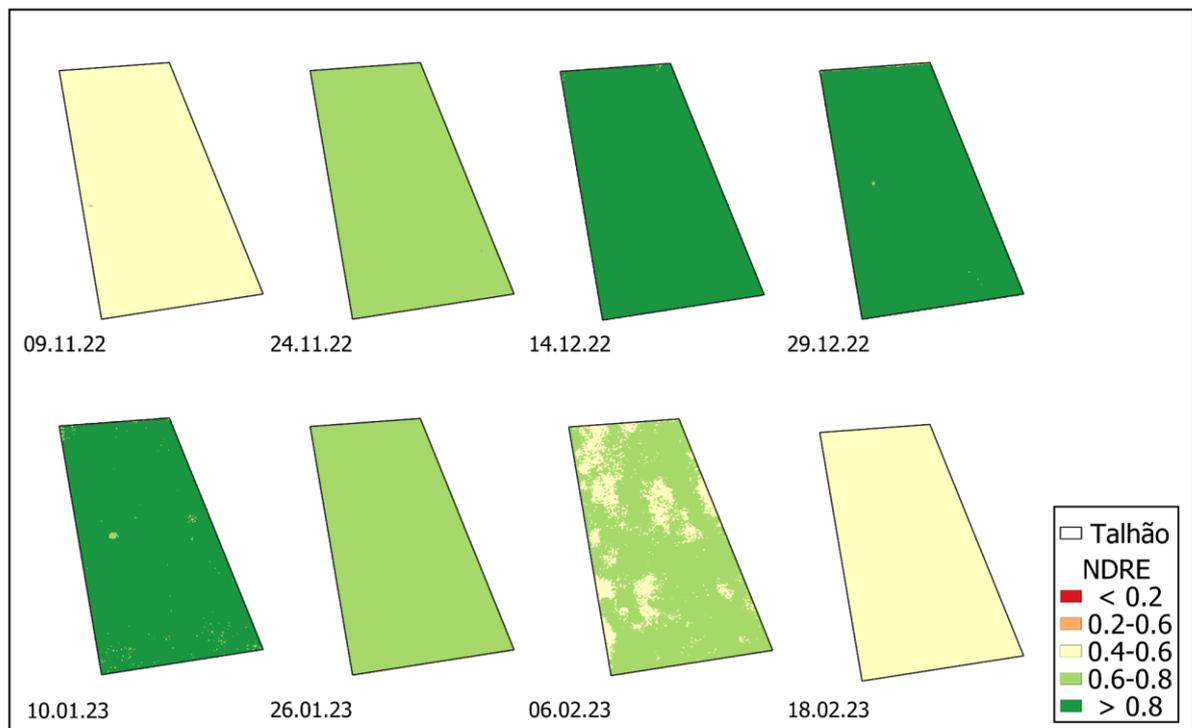


Figura 7. Mapas representativos das variações espaciais do NDRE.

Fonte: Autores, 2024.

5 CONCLUSÕES

A reflectância na faixa do vermelho foi inicialmente baixa e diminuiu ainda mais à medida que as plantas progrediam nos estádios fenológicos. Na região da borda do vermelho, a reflectância mostrou-se ligeiramente mais alta no início e no final do ciclo; no infravermelho próximo, a reflectância foi mais elevada, especialmente durante a fase intermediária do ciclo.

Os índices de vegetação, NDVI e NDRE, seguiram uma tendência de valores menores no início e no final do ciclo, aumentando à medida que as plantas se desenvolviam. Observou-se uma baixa variabilidade no talhão, com coeficientes de variação abaixo de 10%.

O NDRE mostrou maior sensibilidade para detectar variações nos estágios de crescimento da cultura do que o NDVI.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARNES, E.M. *et al.* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 2000, Madison, Bloomington. **Anais [...]**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. p. 1-15.

BÉGUÉ, A. *et al.* Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 20, p. 5391-5407, 2010.

DONOHUE, R.J. *et al.* Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981–2006. **Global Change Biology**, v. 15, n. 4, p. 1025-1039, 2009.

FARIAS, J.R.B. *et al.* **Ecofisiologia da soja**. Embrapa Soja, Londrina, v. 48, p. 1-9, 2007.

FIGUEIREDO, S.M.M. **Comparação entre técnicas de classificação digital de imagens Landsat no mapeamento do uso e ocupação do solo em Capixaba, Acre**. 2005.17f. Dissertação (Mestrado em Manejo Ambiental) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

GRIFFITHS, P. *et al.* Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 135-151, 2019.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. FEALQ, Piracicaba, SP. 451 p. 2009.

HATFIELD, J.L.; PRUEGER, J.H. Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. **Remote Sensing of Environment**, v. 2. p. 562-578, 2010.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUNGRIA, M. CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 48 p. 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (2019). **Produção Agrícola Municipal (PAM)**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>. Acesso em: 5 de jan de 2024.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.

LOPES, A. S. *et al.* Utilização de imagens de satélites e dados meteorológicos visando o monitoramento de mudanças climáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife, PE. **Anais [...]** Recife: [s.n.], 2010. p. 001-004.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto**. Brasília. CNPQ UNB, 2012. Disponível em: <https://memoria2.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82ae9693e4f69d8> . Acesso em 15 jan 2024.

MOREIRA, J.A.A. *et al.* Armazenamento de água em um Latossolo Vermelho distrófico no sistema integração agricultura pecuária. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA*, 15., 2007, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia: Embrapa Tabuleiro Costeiros, 2007.

MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 114 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

NEUMAIER, N. *et al.* **Estádios de Desenvolvimento da Cultura de Soja**. *In: BONATO, E. R. (Ed.). ESTRESSES EM SOJA*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 19-44.

NOVO, E.M.L.M.; PONZONI, F.J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), p. 52-58, 2001.

PEREIRA, K.M. **Variabilidade espacial e correlação de micronutrientes catiônicos do solo e NDRE da soja**. 35f. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

PEREIRA, L. S. *et al.* Sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão no cultivo de bambu. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 16, n. 1, p. 8-33, 2016.

PERKINS, E.G. **Composition of soybeans and soybeans products**. *In: ERICKSON, DAVID R. (Ed.). Practical handbook of soybean processing and utilization*. Champaign: AOCS Press, v. 1, p. 9-28, 1995.

PLANET. **Monitoramento de satélite em tempo real com Planet**. Disponível em: <https://www.planet.com/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

PONZONI, F.J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. *In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETO, J.S. (Ed.). Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais*. Brasília: UNB/EMBRAPA, p. 157-199, 2001.

RAMÍREZ, F.C. *et al.* Evaluation of fire severity indices based on pre- and post-fire multispectral imagery sensed from UAV. **Remote Sensing**, v. 11, p. 993. 2019.

READ, J.J. *et al.* Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. **American Society of Agronomy Special**, n. 66, p. 177-195, 2003.

RODRIGUES, S.P. *et al.* NDVI e fluxo de CO₂ em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.95-104, 2013.

SHIRATSUCHI, L.S. *et al.* Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. *In: BERNARDI, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014. p. 58-73.

SIMÕES, M.S. *et al.* Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2367-2374.

SOUZA, U.D.V. *et al.* Contribuição das novas bandas espectrais do satélite *Worldview-II* para a classificação de tipos vegetais em habitats costeiros: resultados iniciais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 15., 30 de abril a 5 de maio de 2011, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: INPE, 2011. p. 9040.

SPERANZA, E.A. *et al.* Delineamento de zonas de manejo para o planejamento de experimento *on-farm* na cultura do algodão. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – ConBAP*, 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Embrapa, 2022.

TRENTIN, C.B.; FONSECA, E.L. Monitoramento da fenologia da vegetação campestre do bioma Pampa e sua relação com a temperatura média do ar. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 15., 2011, Curitiba. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1628.

VERGARA, W.R. *et al.* Análise de viabilidade econômico-financeira para aquisição de uma unidade de armazenagem de soja e milho. **GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v.12, n.1, p. 41-61, 2017.

WEISS, M. *et al.* Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111402, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>. Acesso em: 11 jan. 2024.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v.17 p. 1-17, 2017.