

Londrina, PR / Maio, 2024

50 anos do NDVI:  
desmistificando o índice e  
ponderando sua utilização  
para o monitoramento  
da soja na era digital





**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Soja  
Ministério da Agricultura e Pecuária**

ISSN 2176-2937

# **Documentos 463**

Maio, 2024

**50 anos do NDVI: desmistificando o  
índice e ponderando sua utilização para  
o monitoramento da soja na era digital**

*Luís Guilherme Teixeira Crusiol, Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli,  
José Renato Bouças Farias, Marcos Rafael Nanni,  
Renato Herrig Furlanetto, Adilson de Oliveira Junior,  
Alexandre Lima Nepomuceno, Allan Misael Flausino,  
Amanda Silveira Reis, Bruna Maia da Silva,  
Cesar de Castro, Cláudia Vieira Godoy,  
Evandro Antonio Minato, Everson Cezar,  
Fábio Alvares de Oliveira, Glaucio Lebosso Alemparte Abrantes dos Santos,  
João Vítor Ferreira Gonçalves, José Salvador Simonetto Foloni,  
Juliana Chiquetti Fazam, Julio Cezar Franchini,  
Karym Mayara de Oliveira, Larissa Alexandra Cardoso Moraes,  
Liliane Márcia Mertz-Henning, Marcelo Augusto Batista,  
Norman Neumaier, Renan Falcioni,  
Samuel Roggia, Sergio Luiz Gonçalves*

**Embrapa Soja**  
Londrina, PR  
2024

**Embrapa Soja** Publicação digital: PDF  
Rod. Carlos João Strass, s/n Edição executiva  
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta *Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*  
CEP 86065-981 Revisão de texto  
Caixa Postal 4006 *Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*  
Londrina, PR Normalização  
Fone: (43) 3371 6000 *Valéria de Fátima Cardoso (CRB-9/1188)*  
www.embrapa.br/soja Projeto gráfico  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac *Leandro Sousa Fazio*

Comitê Local de Publicações da Embrapa Soja  
Presidente Diagramação  
*Adeney de Freitas Bueno* *Marisa Yuri Horikawa*

Secretária-executiva Foto da capa  
*Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite* *Luís Guilherme Teixeira Crusiol*

Membros  
*Claudine Dinali Santos Seixas, Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Fernando Augusto Henning, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Maria Cristina Neves de Oliveira, Mônica Juliani Zavaglia Pereira e Norman Neumaier*

### **Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Soja

---

50 anos do NDVI: desmistificando o índice e ponderando sua utilização para o monitoramento da soja na era digital / Luís Guilherme Teixeira Crusiol ... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2024.

83 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 463).

1. Sensoriamento remoto. 2. Espectrometria. I. Crusiol, Luís Guilherme Teixeira. II. Sibaldelli, Rubson Natal Ribeiro. III. Farias, José Renato Bouças. IV. Nanni, Marcos Rafael. V. Furlanetto, Renato Hergig. VI. Oliveira Junior, Adilson de. VII. Nepomuceno, Alexandre Lima. VIII. Flausino, Allan Misael. IX. Reis, Amanda Silveira. X. Silva, Bruna Maia da. XI. Castro, Cesar de. XII. Godoy, Cláudia Vieira. XIII. Minato, Evandro Antonio. XIV. Cezar, Everson. XV. Oliveira, Fábio Alvares de. XVI. Santos, Glaucio Lebosco Alemarte Abrantes dos. XVII. Gonçalves, João Vitor Ferreira. XVIII. FOLONI, José Salvador Simonetto. XIX. Fazam, Juliana Chiquetti. XX. Franchini, Julio Cezar. XXI. Oliveira, Karym Mayara de. XXII. Moraes, Larissa Alexandra Cardoso. XXIII. Mertz-Henning, Liliâne Márcia. XXIV. Batista, Marcelo Augusto. XXV. Neumaier, Norman. XXVI. Falcioni, Renan. XVII. Roggia, Samuel. XVIII. Gonçalves, Sergio Luiz. XXIX. Série.

CDD (21. ed.) 621.3678

# Autores

---

## **Luís Guilherme Teixeira Crusiol**

Geógrafo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante, bolsista FAPED/Embrapa Soja, Londrina, PR

## **Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli**

Matemático, especialista em Estatística, Londrina, PR

## **José Renato Bouças Farias**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

## **Marcos Rafael Nanni**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

## **Renato Herrig Furlanetto**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante da University of Florida, Wimauna, FL, EUA

## **Adilson de Oliveira Junior**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

## **Alexandre Lima Nepomuceno**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Molecular Biology and Plant Physiology, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

## **Allan Misael Flausino**

Geógrafo, Embrapa Soja, Londrina, PR

## **Amanda Silveira Reis**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, professora da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

## **Bruna Maia da Silva**

Cientista-aeronáutica, mestranda em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR

**Cesar de Castro**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Cláudia Vieira Godoy**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Evandro Antonio Minato**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**Everson Cezar**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, professor da Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade de Passos, Passos, MG

**Fábio Alvares de Oliveira**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Glaucio Lebosso Alemparte Abrantes dos Santos**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**João Vitor Ferreira Gonçalves**

Geógrafo, doutorando em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**José Salvador Simonetto Foloni**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Juliana Chiquetti Fazam**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR

**Julio Cezar Franchini**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Karym Mayara de Oliveira**

Engenheira-agrônoma, doutoranda em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**Larissa Alexandra Cardoso Moraes**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Liliane Márcia Mertz-Henning**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência e Tecnologia de Sementes, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Marcelo Augusto Batista**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**Norman Neumaier**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Agronomy, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Renan Falcioni**

Biólogo e engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências Biológicas e doutor em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR

**Samuel Roggia**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Entomologia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Sergio Luiz Gonçalves**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR



# Apresentação

---

Para o sucesso da atividade agrícola na atualidade são necessárias tomadas de decisão cada vez mais rápidas e assertivas. Diante dessa necessidade, a busca por informações por meio do sensoriamento remoto tem atraído os principais gestores da cadeia produtiva da soja e o uso de índices de vegetação tem ocorrido de forma ampla e popular. Para esse sensoriamento, há praticamente 50 anos, foi proposto o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) que, ainda hoje, constitui-se no índice de vegetação mais popular e uma das ferramentas mais utilizadas no processamento digital de imagens dentro da chamada agricultura de precisão.

Nos últimos anos, com a popularização de drones ou VANTs (veículos aéreos não tripulados), o NDVI teve uma ampla difusão em diferentes setores do agronegócio. Entretanto, é preciso ponderar na utilização do NDVI para o monitoramento da soja, se a resposta espectral obtida é inerente às plantas de soja ou à mistura espectral com solo, palhada e demais objetos que possam estar dispostos na área de interesse. Isso é crucial para que o uso do NDVI no monitoramento agrícola não caia em descrença pelos setores ligados à cadeia produtiva da soja.

Nesse cenário, a presente publicação reúne dados espectrais coletados em diferentes experimentos conduzidos na Embrapa Soja, na Universidade Estadual de Maringá e em áreas de parceiros entre as safras 2010/2011 e 2023/2024 com o objetivo de demonstrar que as variações nos valores de NDVI da soja coletados no nível do dossel ocorrem, de forma majoritária, em função do percentual de cobertura do solo, da biomassa e da área foliar e com magnitude diminuta em função de estresses fisiológicos, como deficiência hídrica e nutricional, ocorrência de doenças e presença de insetos.

Espera-se, com essa publicação, subsidiar o melhor emprego do NDVI como uma ferramenta digital eficiente para o monitoramento da cobertura do solo nos sistemas de produção de soja, trazendo ao

leitor o contexto histórico da formulação do NDVI, apresentando os parâmetros técnico-científicos que embasaram a teoria do índice e destacando sua aplicabilidade no monitoramento da vegetação.

*Adeney de Freitas Bueno*  
Chefe-adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento  
Embrapa Soja

# Sumário

---

Introdução.....	11
Histórico e teoria - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) .....	13
Sensoriamento remoto para o monitoramento da soja .....	25
Comportamento espectral de uma área agrícola .....	30
Resposta espectral temporal da soja .....	35
Comportamento temporal do NDVI .....	39
Relação entre NDVI, área foliar, biomassa e produtividade...43	
Valores de NDVI foliar da soja sob estresses bióticos e abióticos .....	49
NDVI foliar da soja em condições de seca .....	51
NDVI foliar da soja sob a ocorrência de ferrugem-asiática ( <i>Phakopsora pachyrhizi</i> ) .....	56
NDVI foliar da soja com deficiência moderada e severa de potássio .....	60
NDVI foliar da soja sob a deficiência de macro e micronutrientes .....	63
NDVI foliar da soja sob a presença de percevejo-marrom ( <i>Euschistus heros</i> ).....	66
Contribuição de bandas espectrais para a caracterização de estresses bióticos e abióticos em soja .....	69
Usos potenciais do NDVI para monitoramento da soja.....	74
Considerações finais .....	76
Referências .....	78



## Introdução

---

Há 50 anos foi proposto o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) que, cinco décadas depois, constitui-se no índice de vegetação mais popular e uma das ferramentas mais utilizadas no processamento digital de imagens.

Proposto inicialmente em 1973, o NDVI tinha por objetivo monitorar a fenologia da vegetação nativa por meio das imagens do recém lançado satélite Landsat-1. Anos depois, o NDVI passou a ser associado às condições de desenvolvimento de lavouras agrícolas, incluindo a soja.

Já no século 21, o NDVI passou a ser ainda mais utilizado sob a ótica da chamada agricultura de precisão, sendo reconhecido como importante aliado na detecção e no mapeamento da variabilidade espacial em áreas produtoras por meio de sensores de campo e, sobretudo, de imagens de satélite.

Nos últimos anos, com a popularização de drones ou VANTs (veículos aéreos não tripulados), o NDVI experienciou uma nova etapa de sua utilização, com ampla difusão em diferentes setores do agronegócio.

A expressividade do NDVI em trabalhos com soja é evidenciada por pesquisa bibliográfica na base de dados do repositório Google Scholar, onde foram localizados mais de 435 mil documentos com a palavra-chave NDVI entre 1973 e 2024. Desses, mais de 27 mil estavam associados ao termo '*soybean*' e outros 6 mil à '*soja*', o que representa aproximadamente 8% do total de documentos.

De forma rotineira o NDVI é visto por empresas, produtores, corpo técnico de cooperativas e agências de assistência técnica como a mais recente e potente inovação da agricultura digital para mapeamento e diagnóstico de fatores limitantes às altas produtividades. Observa-se, porém, carência de informações que corroborem a utilização do NDVI para monitoramento da soja e identificação dos fatores limitantes, trazendo clareza quanto ao potencial de sua utilização, bem como de suas limitações.

Há quase 50 anos, em artigo endereçando o futuro da utilização de tecnologia computacional para o sensoriamento remoto, publicado em uma das mais renomadas revistas de sensoriamento remoto, Landgrebe (1976) menciona os avanços tecnológicos obtidos na década anterior e destaca que “ter sugerido que dentro de uma década veríamos sensores multiespectrais usados em conjunto com um computador para avaliações ágeis de produção agrícola e de uso de milhões de hectares teria causado pelo menos sobranceiras levantadas se não gargalhadas na maioria das pessoas”. O trabalho com o sensoriamento remoto continua trazendo novidades e ao mesmo tempo revisita as técnicas ou ferramentas já consagradas.

Portanto, essa publicação tem como objetivo trazer ao leitor o contexto histórico da formulação do NDVI, apresentando os parâmetros técnico-científicos que embasaram a teoria do índice e destacando sua aplicabilidade no monitoramento da vegetação. Objetiva-se ainda demonstrar que variações nos valores de NDVI da soja coletados no nível do dossel ocorrem, de forma majoritária, em função do percentual de cobertura do solo, biomassa e área foliar e com magnitude diminuta em função de estresses fisiológicos.

Essa publicação não objetiva, todavia, fazer comparações nos valores de NDVI de diferentes fontes de estresses fisiológicos ou ainda quantificar a assertividade do índice para diagnóstico ou estimativa de atributos agrônômicos em relação a outros índices de vegetação, bandas espectrais ou demais modelos espectrais.

## Histórico e teoria - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

---

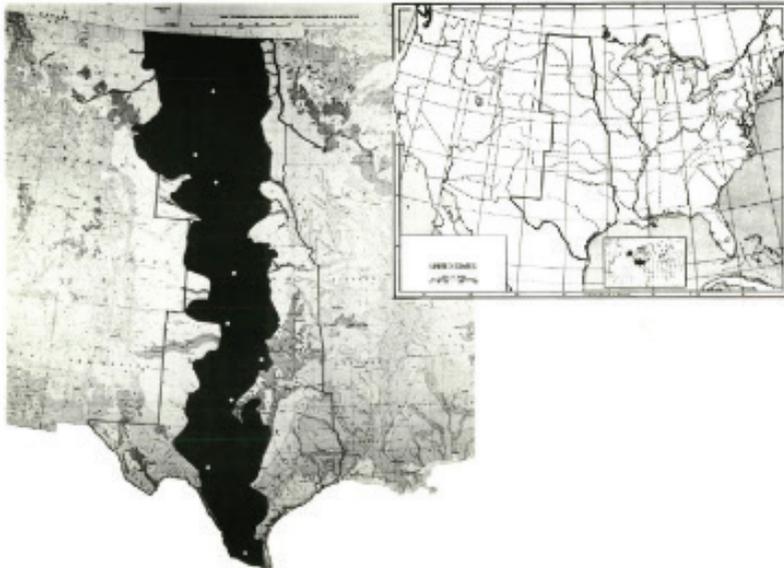
Quando o assunto é processamento de dados espectrais para monitoramento de áreas agrícolas, incluindo imagens de satélite e VANTs, é consenso dizer que o NDVI é o índice mais difundido e utilizado, seja para o mapeamento de áreas agrícolas, ou como indicador de produtividade ou da ocorrência de estresses bióticos ou abióticos nas lavouras. Contudo, observa-se, rotineiramente, uma visão de diferentes grupos ligados à cadeia produtiva da soja de que o desenvolvimento e a aplicação do NDVI se deram apenas no contexto da agricultura digital, sobretudo nas duas últimas décadas e em especial nos últimos anos com a crescente utilização de VANTs.

Proposto em 1973 por pesquisadores do Centro de Sensoriamento Remoto da *Texas A&M University*, o NDVI é resultado da combinação aritmética das bandas espectrais vermelho e infravermelho-próximo e mostra-se, cinco décadas depois, como importante ferramenta para quantificação da cobertura vegetal e da biomassa em uma determinada área.

Nos parágrafos a seguir serão apresentados os conceitos teórico-metodológicos que fundamentaram a formulação do NDVI.

Com o lançamento do satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), posteriormente renomeado para Landsat-1, lançado em 23 de julho de 1972 e constituindo-se no primeiro satélite desenvolvido exclusivamente para observação do Planeta Terra (USGS, 2024), houve grande movimentação no campo científico para validar diferentes aplicações de seus dados espectrais às mais diversas áreas do conhecimento. O sensor multiespectral a bordo do ERTS-1 possuía quatro bandas espectrais, sendo elas: Banda 4 (verde, de 500 nm a 600 nm), Banda 5 (vermelho, de 600 nm a 700 nm), Banda 6 (infravermelho-próximo, de 700 nm a 800 nm) e Banda 7 (infravermelho-próximo, de 800 nm a 1100 nm).

Especificamente, Rouse et al. (1973) publicaram, em abril de 1973, o relatório do projeto de pesquisa intitulado 'Monitoramento do avanço e recuo (onda verde) da vegetação primaveril nativa' (*Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*). Esse relatório marca a formulação do mais difundido índice de vegetação (NDVI) para monitorar o que os autores chamaram à época de onda verde nas grandes planícies (Figura 1) nos Estados Unidos (*Great Plains Corridor*) utilizando dados multiespectrais do satélite ERTS-1.



**Figura 1.** *Great Plains Corridor* e localização das áreas de monitoramento.

Fonte: adaptado de Rouse et al. (1973).

Em dezembro daquele ano (1973) ocorreu o Terceiro Simpósio do satélite ERTS-1, com anais publicados no início de 1974, onde Rouse et al. (1974a) apresentaram a formulação do NDVI em formato de publicação científica e, na sequência, Rouse et al. (1974b) publicaram um relatório complementar ao apresentado no ano anterior, promovendo maiores discussões no uso do índice de vegetação.

Buscando avaliar a aplicação dos dados espectrais do ERTS-1 na avaliação quantitativa da vegetação nas grandes planícies nos Estados Unidos, os pesquisadores monitoraram 10 áreas em um transecto sentido norte-sul, que se estendia desde o estado do Texas até a Dakota do Norte, com um amplo gradiente de vegetação arbustiva nativa. Assim, simultaneamente às passagens do ERTS-1, os cientistas coletavam, em campo, informações como percentual de vegetação verde, biomassa, porcentagem de umidade na vegetação, fenologia, além de dados climáticos e registros fotográficos.

De acordo com Rouse et al. (1973), as grandes planícies nos Estados Unidos apresentam grande variabilidade dos elementos climáticos, o que influencia diretamente a dinâmica da vegetação nessa área. Logo, dados de satélite apresentavam grande potencial para monitorar o início do crescimento, as alterações de biomassa, o início e a duração da estação seca. Ainda de acordo com os autores, atenção especial merecia ser dada à sazonalidade das secas e outros fatores bioclimáticos que poderiam influenciar as atividades agrícolas. Ou seja, a partir das imagens de satélite, poder-se-ia caracterizar a vegetação nativa frente aos elementos climáticos, sobretudo volumes de precipitação pluviométrica e fazer inferências sobre as condições para implantação das lavouras.

Ainda no relatório de pesquisa apresentado, foram formuladas as seguintes hipóteses:

- Tempo é fator importante na discriminação de um gradiente de feições na superfície terrestre, associações de solo, tipos de vegetação e outras formas naturais.
- Utilizando o tempo como fator discriminante, a onda verde pode ser detectada por repetidas análises de imagens multiespectrais.
- Os parâmetros derivados do ERTS-1 são adequados para modelar o gradiente de vegetação natural em distintas áreas.
- Os parâmetros de sistemas de vegetação são adequadamente únicos para fornecer novas informações para o setor agrícola regional.

À época, o processamento e a análise dos dados espectrais foram executados no Centro de Processamento de Dados da *Texas T&M University* por meio de um supercomputador IBM 360/65 (Figura

2) com 2,5 Megabytes de armazenamento. A título de comparação com as tecnologias atuais, os aparelhos celulares mais vendidos no Brasil no ano de 2023 podem ter aproximadamente 200 mil vezes mais armazenamento do que o supercomputador utilizado.

A partir dos resultados obtidos, os pesquisadores apontam que, embora imagens coloridas tenham alto potencial para fornecer informações qualitativas, as bandas espectrais em escala de cinza apresentam maior potencial para descrever, de forma quantitativa, as variações na vegetação nativa. Assim, os cientistas destacaram os principais resultados obtidos quanto às bandas espectrais individualmente:

- A banda 4 (verde) apresentou baixo contraste, sendo útil, porém, na identificação de cidades, estradas e aeroportos.

- A banda 5 (vermelho) mostrou-se a banda mais representativa para estudos da vegetação, com elevado potencial para monitoramento de áreas agrícolas, florestas e campos. Destaca-se, ainda, que o coeficiente de variação dessa banda é um bom indicativo da homogeneidade das áreas avaliadas.

- As bandas 6 e 7 (NIR) evidenciaram baixo contraste de áreas vegetadas, exibindo, porém, elevado contraste com corpos hídricos.



**Figura 2.** Computador IBM System/360 similar ao utilizado na formulação do NDVI (5 Reasons..., 2014).

Tais resultados subsidiaram a fundamentação teórica do que os autores chamaram de parâmetro de razão de bandas (*band ratio parameter - BRP*) ou índice de vegetação (*vegetation index - VI*). Vale ressaltar que até então o nome do que hoje conhecemos como NDVI era apenas 'índice de vegetação' (VI). O nome Índice de Vegetação da Diferença Normalizada passou a ser utilizado anos mais tarde, conforme abordado por Tucker (1980).

Assim, considerando o comportamento espectral da vegetação, com baixa reflectância na banda do vermelho e elevada reflectância na banda infravermelho-próximo, Rouse et al. (1973) sugerem que a combinação entre essas duas bandas seria um bom indicativo do verdor (*greenness*) das áreas monitoradas e um parâmetro quantitativo das alterações de cobertura vegetal e biomassa, assim como já

abordado anteriormente no Primeiro Simpósio do satélite ERTS-1, em 1972 (Finch Jr., 1973).

Inicialmente, Rouse et al. (1973) mencionam a possibilidade da razão simples entre as bandas NIR e vermelho, abordada anos antes por Jordan (1969). Contudo, ainda de acordo com os autores, a simples razão NIR/vermelho estaria sujeita a possíveis variações de local para local e das diferentes passagens do satélite. Os pesquisadores propuseram, portanto, a diferença entre as bandas NIR e vermelho normalizada pela soma dessas duas bandas, dando origem ao NDVI, conforme equação 1:

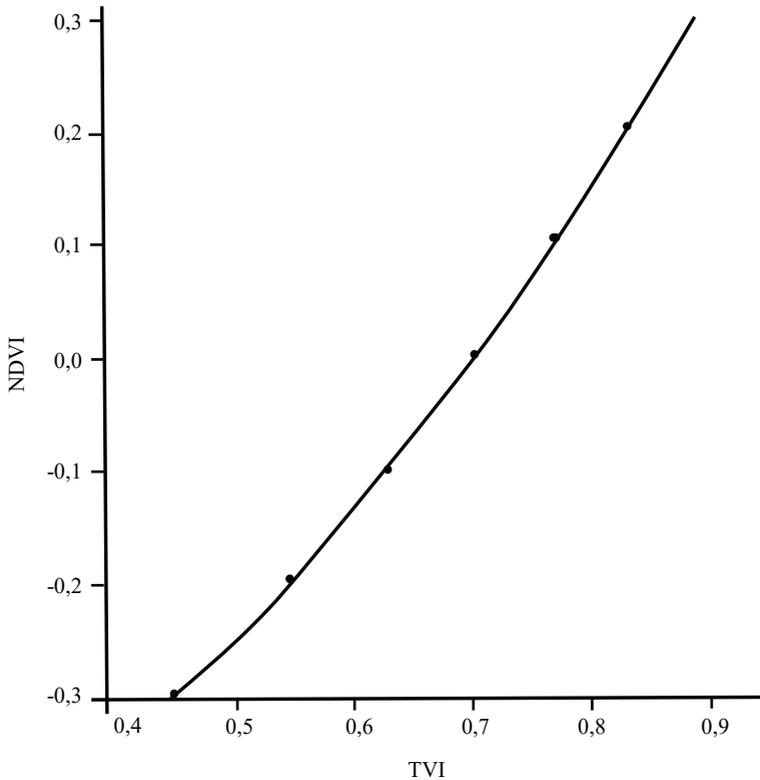
$$NDVI = \frac{NIR - Vermelho}{NIR + Vermelho} \quad (\text{Equação 1})$$

onde NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada; NIR é a reflectância na banda infravermelho-próximo e Vermelho é a reflectância na banda vermelho.

Na sequência, Rouse et al. (1973) destacam que, para evitar o processamento e a análise com números negativos e para evitar que a variância dos dados seja proporcional à média, o VI deveria ser acrescido de uma constante (0,5) e calculada a raiz quadrada do valor resultante, conforme apresentado na Equação 2. À tal transformação os autores deram o nome de Índice de Vegetação Transformado (*Transformed Vegetation Index - TVI*). Embora o TVI tenha sido bastante utilizado nos anos seguintes, os próprios pesquisadores apontaram, em seu relatório subsequente (Rouse et al., 1974b), elevada similaridade nos resultados obtidos pelos TVI e NDVI, conforme apresentado na Figura 3.

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (\text{Equação 2})$$

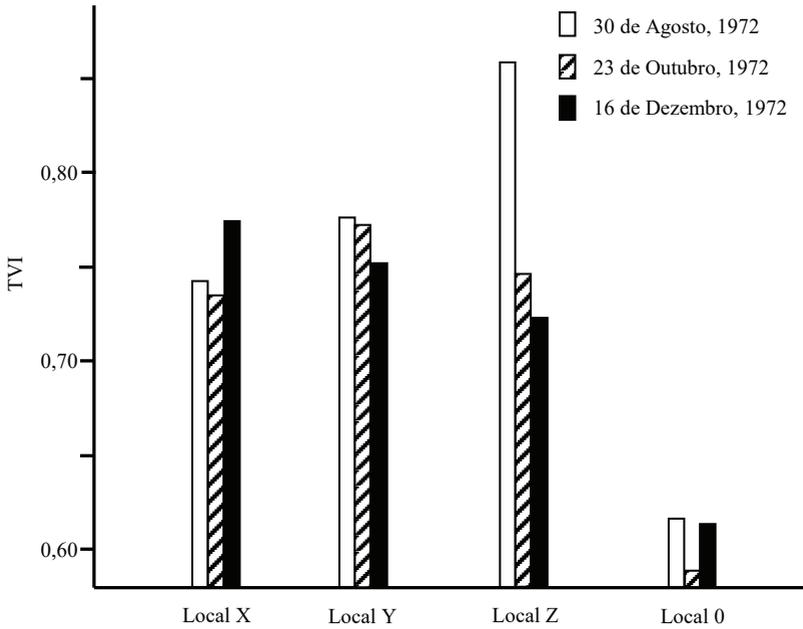
onde TVI é o Índice de Vegetação Transformado e NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada.



**Figura 3.** Correlação entre NDVI e TVI.

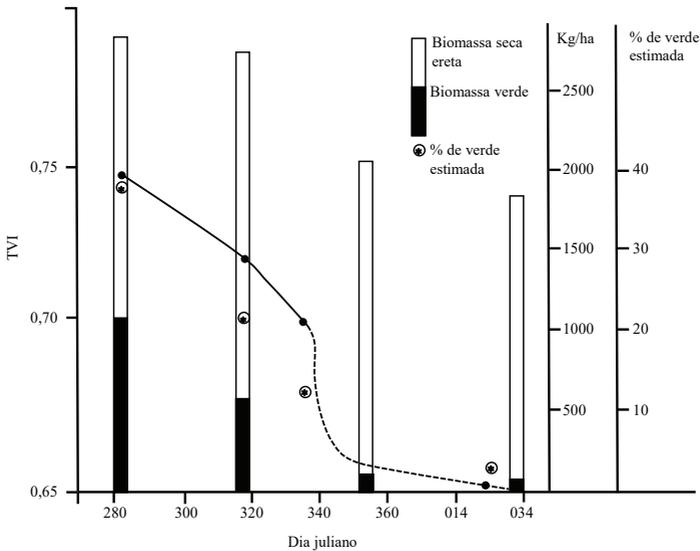
Fonte: adaptado de Rouse et al. (1973).

Rouse et al. (1973) apresentam a avaliação da resposta espectral, traduzida pelo TVI, de quatro áreas-alvo, contendo vegetação arbustiva, floresta, lavoura e área urbana destacando o contraste existente entre áreas vegetadas e urbana, e a relação direta entre o TVI e a fenologia da vegetação (Figura 4). Posto isso, os autores relacionam os valores do TVI aos valores de biomassa e percentual de área verde medidos em campo (Figura 5) e afirmaram, por meio de regressão multivariada, que 99% da variação do índice é explicada pela biomassa e pela cobertura do solo.



**Figura 4.** Valores de TVI em área com predominância de pastagem e agricultura de sequeiro (Local X), pastagem natural e floresta (Local Y), agricultura irrigada (Local Z) e área urbana (Local 0).

Fonte: adaptado de Rouse et al. (1973).



**Figura 5.** Valores de TVI em função da biomassa seca ereta, biomassa verde e percentual de cobertura verde (a queda brusca ocorrida aos 336 dias deve-se, de acordo com os autores, à ocorrência de geada).

Fonte: adaptado de Rouse et al. (1973).

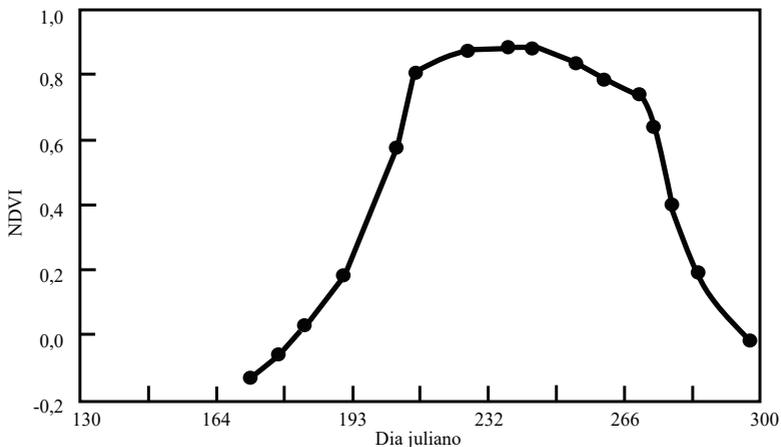
É importante salientar que no próprio relatório onde o NDVI foi proposto os pesquisadores mencionam a necessidade de investigação futura sobre a influência do solo e sua umidade, da altura e do vigor da vegetação, do teor de água e dos pigmentos foliares nos valores do índice de vegetação.

Tais interferências foram extensivamente abordadas nos anos seguintes, destacando que a estrutura do dossel, com movimentação horizontal-vertical das folhas, queda de folhas, folhas menores e até mesmo um menor índice de área foliar (IAF), resultando na exposição do solo, pode resultar em resposta espectral diferenciada sem haver, necessariamente, alterações espectrais na folha individualmente (Colwell, 1974; Tucker, 1977). Além disso, sugeriu-se, ainda naquela época, que a radiação NIR apresenta espalhamento no interior do dossel superior à radiação vermelho e que sombras no

dossel, influenciadas pelo ângulo de incidência solar, podem resultar em índices de vegetação distintos.

Tucker (1979) demonstrou a correlação negativa entre a radiação vermelho e biomassa e a correlação positiva entre biomassa e a radiação NIR. Ou seja, à medida que a biomassa de uma área aumenta, ocorrem a diminuição da reflectância no vermelho e o aumento da reflectância no NIR. Nesse trabalho (Tucker, 1979), são apresentadas ainda diversas combinações entre bandas espectrais, as quais podemos chamar de diferentes índices de vegetação, para estimativa de biomassa.

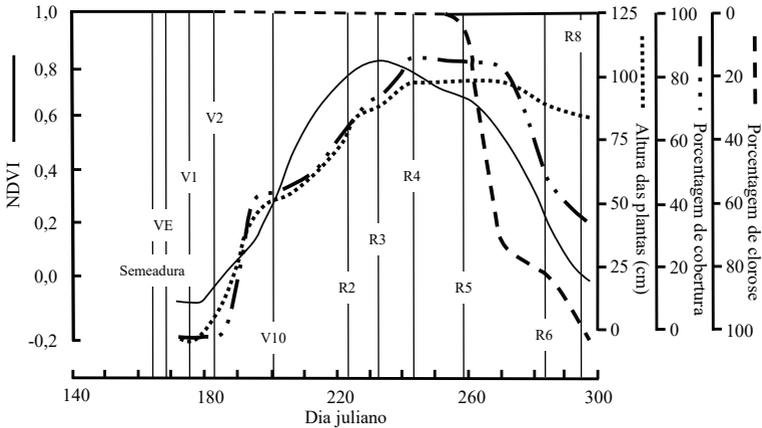
Um dos primeiros, se não o primeiro, usos do NDVI para monitoramento da cultura da soja foi realizado por Tucker et al. (1979), onde os autores apresentam o comportamento temporal do NDVI em uma lavoura de soja por meio de um espectrorradiômetro posicionado a dois metros do dossel, captando, portanto, a resposta espectral mista entre solo, sombra e vegetação (Figura 6). Na Figura 6, é possível observar o aumento dos valores de NDVI em função do desenvolvimento da lavoura, com posterior estabilização dos valores próximo a 0,8 e subsequente diminuição do NDVI.



**Figura 6.** NDVI em função dos dias julianos em uma parcela experimental de soja.

Fonte: adaptado de Tucker et al. (1979).

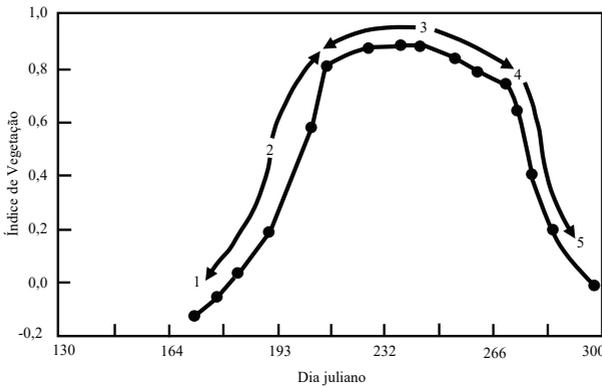
Na Figura 7, também extraída de Tucker et al. (1979), são apresentados os valores de NDVI em diferentes fases do desenvolvimento da soja em relação aos parâmetros agrônômicos: altura de plantas; percentual de cobertura do solo e percentual de amarelecimento foliar (ao que os autores chamam de clorose).



**Figura 7.** NDVI, altura de planta, percentagem de cobertura do solo e percentagem de amarelecimento foliar da soja em função dos dias julianos.

Fonte: adaptado de Tucker et al. (1979); estádios de desenvolvimento adaptados de Fehr e Caviness (1977).

Os resultados evidenciam que o aumento dos valores de NDVI total de uma área (vegetação, solo e palhada) se dá em função do aumento da cobertura do solo, com posterior diminuição do NDVI em função do início e aumento do amarelecimento foliar. Os autores classificaram ainda os valores do NDVI em função da fenologia da soja, como resultado das alterações na biomassa e na cobertura do solo. A Figura 8 apresenta a classificação do NDVI de acordo com Tucker et al. (1979): 1- Da emergência até 20%-30% de cobertura do solo; 2- Rápidos crescimento e desenvolvimento foliar; 3- Completa cobertura do solo pela vegetação; 4- Início da senescência e da maturação; 5- Maturação completa.



**Figura 8.** NDVI em função do desenvolvimento da soja. 1- Da emergência até 20%-30% de cobertura do solo; 2- Rápidos crescimento e desenvolvimento foliar; 3- Completa cobertura do solo pela vegetação; 4- Início da senescência e maturação; 5- Maturação completa.

Fonte: adaptado de Tucker et al. (1979).

Com base na contextualização histórica apresentada nessa seção, o NDVI foi proposto como indicador quantitativo da cobertura vegetal do solo e da biomassa ali presente e foi assim utilizado nos anos seguintes, servindo como poderosa ferramenta de monitoramento da dinâmica da vegetação e subsidiando inferências quanto à fenologia e até mesmo, ainda que de forma indireta, sobre as condições de desenvolvimento da vegetação. Entretanto, mais recentemente, o NDVI passou a ser muito utilizado como indicador qualitativo e quantitativo de parâmetros agrônômicos, como por exemplo, a produtividade, servindo até mesmo como diagnóstico agrônômico em áreas de monitoramento. Contudo, desde a proposição do NDVI até os dias atuais, fica evidenciado que a relação entre NDVI e parâmetros agrônômicos se dá pela relação direta entre NDVI e biomassa e pela relação indireta entre a biomassa e tais parâmetros (Sakamoto, 2020).

Logo, serão apresentadas, nas seções seguintes, as características espectrais da cultura da soja, assim como valores de NDVI em diferentes sistemas de produção buscando avaliar sua dependência em relação à biomassa e aos fatores limitantes às altas produtividades.

## Sensoriamento remoto para o monitoramento da soja

---

Em monitoramento agrícola, o uso de imagens obtidas por satélites ou câmeras acopladas a VANTs está inserido no âmbito do sensoriamento remoto, campo do conhecimento que busca a aquisição de informações sobre objetos dispostos na superfície terrestre por meio da interação da radiação eletromagnética (REM) ↔ alvo de interesse (culturas agrícolas) ↔ sensor.

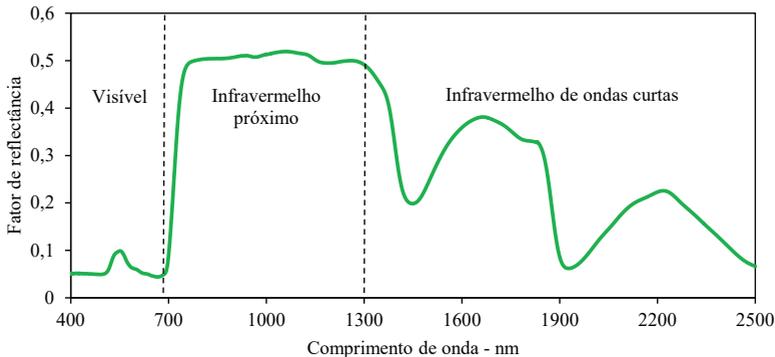
Quando incide sobre um determinado alvo, a REM apresenta três formas de interação: absorção, reflexão e transmissão, as quais permitem a aquisição de grandezas denominadas, respectivamente, de absortância, reflectância e transmitância. Considerando que a avaliação de culturas agrícolas, mais especificamente a soja, ocorre com o uso de sensores posicionados acima do dossel da vegetação, o estudo do fluxo de radiação refletido torna-se mais viável, visto que o estudo da absorção e da transmissão demandaria o uso de sensores posicionados abaixo do dossel vegetal, aumentando o tempo de coleta de dados e inviabilizando a utilização do sensoriamento remoto em larga escala.

O fluxo de REM refletida pela vegetação, ou qualquer outro alvo, é chamado de radiância, a qual sofre influência direta do fluxo de REM incidente, de acordo com as condições de iluminação (tanto natural quanto artificial). Com o objetivo de normalizar as interferências oriundas das condições de iluminação, os valores de radiância são rotineiramente convertidos em reflectância, resultado da razão da radiância do alvo (dossel vegetal), pela radiância de uma superfície de referência (calibração), sendo expressos em porcentagem (Crusiol et al., 2024).

A REM se propaga em diferentes comprimentos de onda. O conjunto de todos os comprimentos de onda da REM compõem o chamado espectro eletromagnético, sendo que comprimentos entre 400 nm e 2500 nm são de maior interesse para estudos da vegetação por

estarem associados ao seu comportamento fisiológico e à estrutura celular (Jensen, 2009). Esses comprimentos de onda interagem com a vegetação com características singulares de absorção, reflexão e transmissão.

O comportamento espectral da cultura da soja em condições de campo no estágio R5.3 (Fehr; Caviness, 1977) está apresentado na Figura 9.



**Figura 9.** Comportamento espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3.

O espectro visível, comumente abreviado como 'Vis' (entre 400 nm e 700 nm), é fortemente associado ao metabolismo fotossintético, ocorrendo, portanto, maior absorção da REM (Ponzoni et al., 2012). Embora toda a faixa espectral do Vis esteja associada à absorção da radiação fotossinteticamente ativa, os intervalos espectrais entre 450 nm e 520 nm e entre os 630 nm a 690 nm apresentam maiores inflexões de reflectância, relacionadas à absorção da REM pela clorofila (Jensen, 2009). A maior reflectância em comprimentos de onda próximos a 550 nm confere cor verde às folhas de soja.

O espectro infravermelho-próximo, comumente abreviado por 'NIR' (do inglês *near-infrared*), é composto por comprimentos de onda entre 720 nm e 1300 nm e apresenta as maiores porcentagens de reflectância da vegetação (em torno de 40% a 60%), estando relacionado, sobretudo, às estruturas celulares foliares e ao espalhamento

interno da radiação no interior da folha (Ponzoni et al., 2012). Nessa faixa espectral a reflectância é quase constante, sendo que a transmissão e a reflexão desses comprimentos de ondas permitem melhor balanço térmico das folhas (Jensen, 2009).

Comprimentos de onda entre 1300 nm e 2500 nm representam o infravermelho de ondas curtas, comumente abreviado por 'SWIR', do inglês *shortwave infrared* e sua reflectância é inversamente proporcional ao conteúdo de água presente na folha (Crusiol et al., 2024).

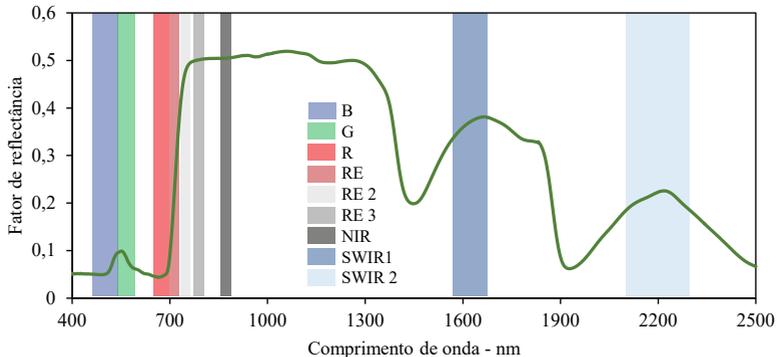
Essa resposta espectral da vegetação, mais especificamente da cultura da soja, tem sua curva de reflectância bastante característica, sendo que maiores valores de reflectância tendem a ser observados quando as plantas são submetidas a alguma fonte de estresse fisiológico. Dessa forma, captar a resposta diferencial da cultura da soja sob um determinado fator limitante às altas produtividades é uma importante fonte de informação para o ajuste das práticas agrícolas a fim de evitar, ou minimizar, possíveis perdas de produtividade.

É nesse cenário que imagens, obtidas tanto por VANTs quanto por satélites, vêm sendo amplamente utilizadas na agricultura. Isso porque as imagens possibilitam o monitoramento agrícola de forma ágil e não destrutível e com custo relativamente baixo.

Uma imagem digital é formada por uma matriz de pixels (linhas e colunas). Cada pixel da imagem contém as informações espectrais referentes à uma área no terreno (superfície imageada). Essa informação espectral é seriada em bandas espectrais, sendo que cada banda espectral registra um intervalo específico de comprimentos de onda. Tanto as imagens captadas por VANTs quanto por satélites são, majoritariamente, multiespectrais, ou seja, a radiação incidente é distribuída em algumas poucas bandas espectrais, normalmente de três a nove bandas.

Dessa forma, cada pixel da imagem representa o fluxo de radiação refletida pelo alvo de interesse (expresso em número digital ou já convertido em reflectância, a depender do sensor utilizado) para cada banda espectral. Essas informações das diferentes bandas espectrais podem, por fim, ser relacionadas às condições de desenvolvimento da lavoura.

A Figura 10 apresenta a resposta espectral da soja, de 400 nm a 2500 nm e a representação dessa resposta espectral nas bandas espectrais compatíveis com o sensor multiespectral do satélite Sentinel-2.



**Figura 10.** Comportamento espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3 com delimitação das bandas espectrais Vis-NIR-SWIR (B, azul; G, verde; R, vermelho; RE, *red-edge* 1; RE 2, *red-edge* 2; RE 3, *red-edge* 3; NIR, *near infrared*; SWIR 1, *shortwave infrared* 1; e SWIR 2, *shortwave infrared* 2) do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2, conforme Crusiol et al. (2022).

As imagens obtidas por VANTs ou satélites podem ser submetidas a diferentes técnicas de processamento de imagens, sendo o cálculo de índices de vegetação uma das técnicas mais utilizadas e de maior simplicidade de processamento. Definidos como operações aritméticas entre bandas espectrais e expressos em medidas radiométricas adimensionais, os índices de vegetação são utilizados com a finalidade de ressaltar o comportamento espectral da vegetação, maximizando a sensibilidade da interação da REM com parâmetros biofísicos da vegetação.

O NDVI é o índice mais utilizado para monitoramento de áreas vegetadas, sobretudo áreas agrícolas. Muito embora o NDVI tenha sido formulado e proposto como indicador quantitativo da presença de vegetação em uma área de interesse, observa-se, atualmente, uso indiscriminado desse índice para a obtenção de informações sobre as lavouras sem, na maioria das vezes, atentar para a dependência

majoritária desse índice à biomassa ali presente e não necessariamente às condições fisiológicas das plantas imageadas.

Dessa falta de parametrização para interpretação das imagens NDVI, podem surgir imensas fontes de erro, induzindo inferências que nem sempre condizem com a realidade observada em campo. Logo, compreender o que é o NDVI, a razão pela qual foi proposto, o que ele representa e qual o seu comportamento em plantas de soja, é fundamental para garantir informações fidedignas das áreas agrícolas.

A presente publicação reúne dados coletados em diferentes experimentos instalados na Embrapa Soja, na Universidade Estadual de Maringá e em áreas de parceiros entre as safras 2011/2012 e 2023/2024.

Os valores de NDVI foram adquiridos em quatro diferentes níveis, possibilitando a avaliação da resposta espectral da soja nos níveis foliar e do dossel, sob a influência do solo, da palhada e da sombra.

No nível orbital foram utilizados valores de NDVI derivados da plataforma SatVeg ([www.satveg.cnpia.embrapa.br](http://www.satveg.cnpia.embrapa.br)), com resolução espacial de 250 metros, em talhões agrícolas com dimensões suficientes para garantir a aquisição de pixel puro da lavoura de soja. A essa base de dados, iremos nos referir como 'NDVI orbital'. Os dados derivados dessa base de dados são exclusivamente referentes ao dossel vegetal, o que compreende a influência do solo exposto, da palhada e das sombras.

No nível aéreo foram utilizados valores de NDVI derivados de imagens multiespectrais obtidas por câmera acoplada ao VANT. Os dados espectrais foram analisados considerando: todos os pixels das parcelas experimentais, o que envolve a influência do solo e da palhada expostos; adicionalmente, foi aplicado um filtro em todas as imagens para eliminar pixels de solo, palhada e sombras, minimizando, assim, sua influência sobre os valores de NDVI. Os voos foram realizados para garantir resolução espacial com pixel interior a 5 cm. A essas duas bases de dados, iremos nos referir respectivamente como 'NDVI aéreo dossel' e 'NDVI aéreo foliar'. Assim, os dados derivados da base de dados 'NDVI aéreo dossel' são exclusivamente

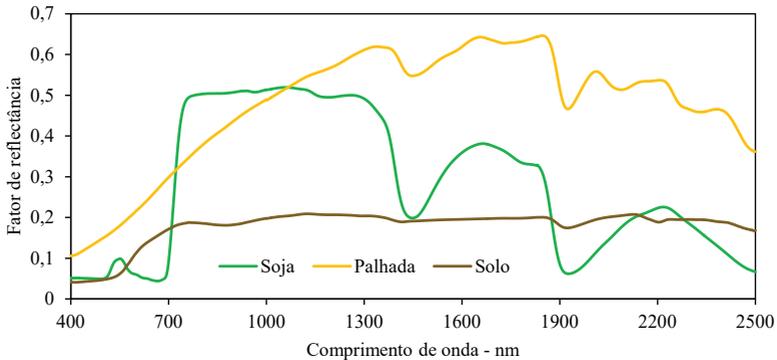
referentes ao dossel vegetal, sob a influência do solo exposto, palhada e das sombras; enquanto os dados derivados da base de dados 'NDVI aéreo foliar' referem-se exclusivamente aos pixels relativos às folhas da soja.

No nível do campo foram utilizados valores de NDVI derivados de sensor ativo capaz de realizar medições no nível do dossel, o que envolve a influência do solo exposto, da palhada e das sombras. O sensor foi posicionado a 1 metro perpendicularmente acima do dossel, minimizando, assim, interferências de posicionamento, conforme abordado por Crusiol et al. (2017). A essa base de dados, iremos nos referir como 'NDVI no nível do dossel'.

Ainda no nível do campo, foi utilizado um espectrorradiômetro para determinação dos valores de NDVI no nível foliar, o que exclui interferências do solo exposto, da palhada e das sombras. As leituras de reflectância foram realizadas, salvo em fases iniciais de desenvolvimento, no folíolo central do terceiro trifólio, a partir do topo, completamente desenvolvido. A aquisição da reflectância de folhas de soja foi realizada por meio do sensor Fieldspec 3 Jr (*Analytical Spectral Devices*, Boulder, CO, USA), espectrorradiômetro com resolução espectral de 3 nm entre 350 nm e 1400 nm e 30 nm entre 1.400 nm e 2.500 nm, sendo que a curva espectral final é disponibilizada em intervalos de 1 nm, com 2.101 bandas espectrais. A essa base de dados, iremos nos referir como 'NDVI foliar'. Especificamente para avaliação da presença de insetos, foi utilizado o espectrorradiômetro LI-1800 LI COR, com resolução espectral de 2 nm entre 300 nm e 1.110 nm.

## Comportamento espectral de uma área agrícola

Buscando compreender o NDVI e o contexto de sua formulação, faz-se necessário compreender, antes, o comportamento espectral de uma área agrícola. Solo, palhada (das safras anteriores) e vegetação (lavoura implantada) são os alvos presentes em uma área agrícola e cada um deles apresenta um comportamento espectral característico, como apresentado na Figura 11.



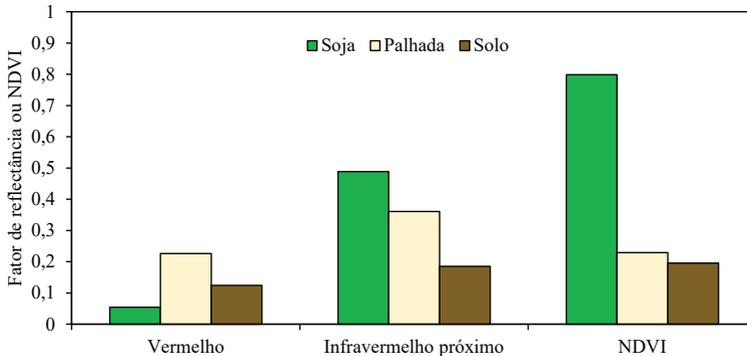
**Figura 11.** Comportamento espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3, Latossolo Vermelho eutroférico e palhada de braquiária.

No espectro visível, a palhada apresenta reflectância superior ao do solo e às das plantas de soja, daí seu aspecto ‘esbranquiçado’ quando observada em uma imagem obtida por VANT. O solo e as plantas de soja apresentam valores próximos de reflectância nos comprimentos de onda correspondentes às bandas azul e verde (460 nm a 580 nm), ainda que valores superiores sejam observados para a soja. Contudo, é na banda do vermelho (660 nm) que a soja apresenta resposta contrastante tanto com a palhada quanto com o solo, com nítida diferenciação também entre esses dois alvos, apresentando os menores valores de reflectância.

Nos comprimentos de onda do infravermelho-próximo (860 nm) o comportamento espectral apresenta configuração diferente daquele observado no espectro visível: se na banda vermelho a soja apresenta reflectância inferior ao solo e à palhada, no infravermelho-próximo a soja apresenta os mais elevados valores de reflectância.

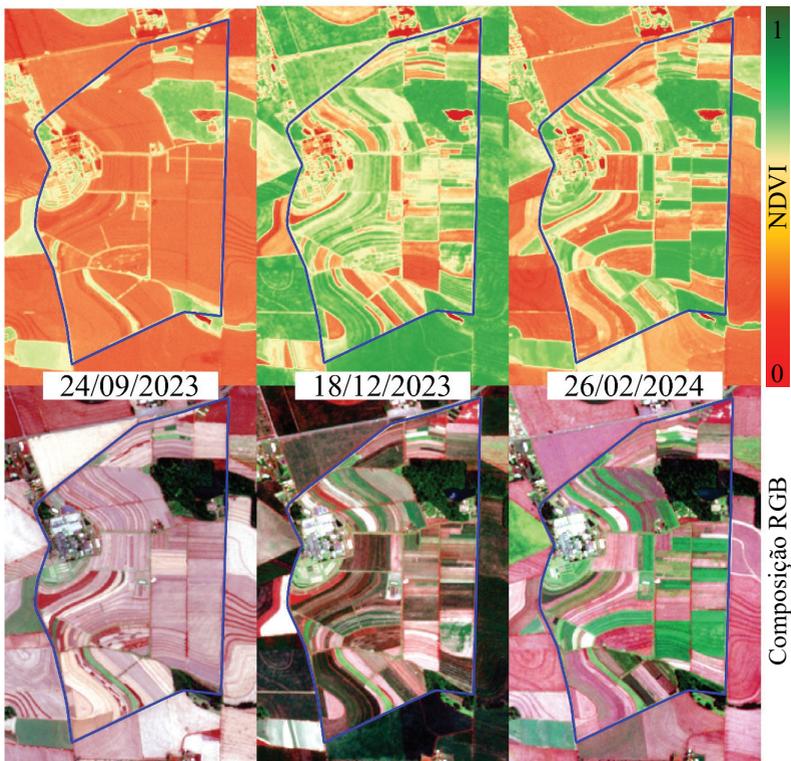
A Figura 12 apresenta os valores de reflectância compatíveis com as bandas vermelho e infravermelho-próximo do satélite Sentinel-2 derivados da resposta espectral apresentada na Figura 11 e também os valores de NDVI calculados a partir dessas bandas. Embora diferentes respostas sejam observadas entre as bandas vermelho e

infravermelho-próximo, a soja apresenta os maiores contrastes de reflectância entre essas duas bandas em relação à palhada e ao solo. Esse comportamento diferencial é evidenciado pelos valores de NDVI, onde a soja apresenta valores muito superiores (aproximadamente 0,8) em relação ao solo e à palhada (aproximadamente 0,2).



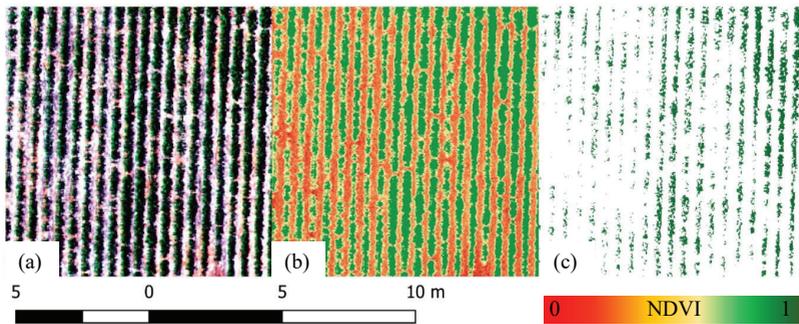
**Figura 12.** Valores de NDVI de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3, Latossolo Vermelho eutroférico e palhada de braquiária calculados a partir da reamostragem da resposta espectral apresentada na Figura 11 para as bandas espectrais do satélite Sentinel-2.

A Figura 13 apresenta o NDVI orbital e a imagem visível correspondente da Fazenda Experimental da Embrapa Soja em três datas distintas ao longo da safra 2023/2024 com variação, ao longo do tempo, da cobertura do solo por palhada e plantas de soja em sua maioria. Em 24/09/2023, momento anterior ou próximo à semeadura da soja, observam-se baixos valores de NDVI nas áreas com solo exposto ou cobertos por palhada. Já em 18/12/2023 tem-se, praticamente em toda a imagem, elevados valores de NDVI orbital, indicando a instalação dos experimentos com soja e o incremento da biomassa nessas áreas. Já em 26/02/2024, destaca-se a colheita de diversas áreas semeadas com soja, ou ainda a completa ausência de folhas no momento que antecede a colheita, com algumas áreas, porém, com cobertura vegetal do solo, onde os maiores valores de NDVI orbital são observados.



**Figura 13.** Imagens NDVI e composição RGB do satélite Sentinel-2 na Fazenda Experimental da Embrapa Soja (linha azul) nas datas de 24/09/2023, 18/12/2023 e 26/02/2024.

A mistura espectral do NDVI orbital entre vegetação e solo/palhada fica ainda mais evidente em imagem de NDVI aéreo de uma lavoura de soja, obtida por câmera acoplada ao VANT, com elevada resolução espacial (Figura 14).



**Figura 14.** Lavoura de soja aos 55 dias após a semeadura (DAS) representada por imagem RGB obtida por câmera multiespectral acoplada a VANT (a) e imagens NDVI no nível aéreo dossel (b) e NDVI no nível aéreo foliar (c).

Na Figura 14A, evidencia-se a presença de solo e palhada expostos nas entrelinhas da soja, com ampla variabilidade da cobertura do solo pela soja. O NDVI aéreo dossel demonstra baixos valores nas áreas de solo e palhada, ao passo que elevados valores são observados nas plantas de soja (Figura 14B). Após a remoção dos pixels de solo, palhada e sombra da imagem, a Figura 14C demonstra mínimas diferenças nos valores de NDVI aéreo foliar da soja. Se na Figura 14B, com exposição do solo e da palhada, os valores de NDVI oscilaram entre 0,02 e 0,98, com média de 0,39 e desvio padrão 0,22; na Figura 14C, os valores de NDVI oscilaram entre 0,54 e 0,97, com média de 0,80 e desvio padrão de 0,06. Tais informações reforçam a contribuição majoritária do solo e da palhada no NDVI obtido no nível do dossel, demonstrando que ao considerar a área de amostragem como um todo (soja, palhada e solo) tem-se valores de NDVI muito abaixo daqueles, de fato, inerentes às plantas de interesse. Portanto, o NDVI no nível do dossel correlaciona-se principalmente com a taxa de cobertura do solo por vegetação, que é resultado da produção de biomassa vegetal. Assim, esse indicador diferencia os pontos de menor desenvolvimento de plantas em uma lavoura, contudo, é incapaz de diagnosticar a causa dessa limitação, uma vez que o NDVI das folhas apresenta variação reduzida.

Em uma área agrícola a proporção de área de solo, palhada e vegetação se altera ao longo da safra. Se nos momentos próximos à semeadura tem-se a presença somente de solo com diferentes percentuais de cobertura por palha, à medida que a soja se desenvolve tem-se maior cobertura pelas folhas, minimizando, assim, a proporção de solo e palhada visíveis em uma imagem. Ao final da safra, com o amarelecimento e posterior queda das folhas, diminui-se a influência da vegetação e tem-se, novamente, maior exposição do solo e da palhada. Ou seja, essa mistura espectral entre soja, solo e palhada torna complexa a interpretação de imagens obtidas por VANT e, principalmente, por satélite.

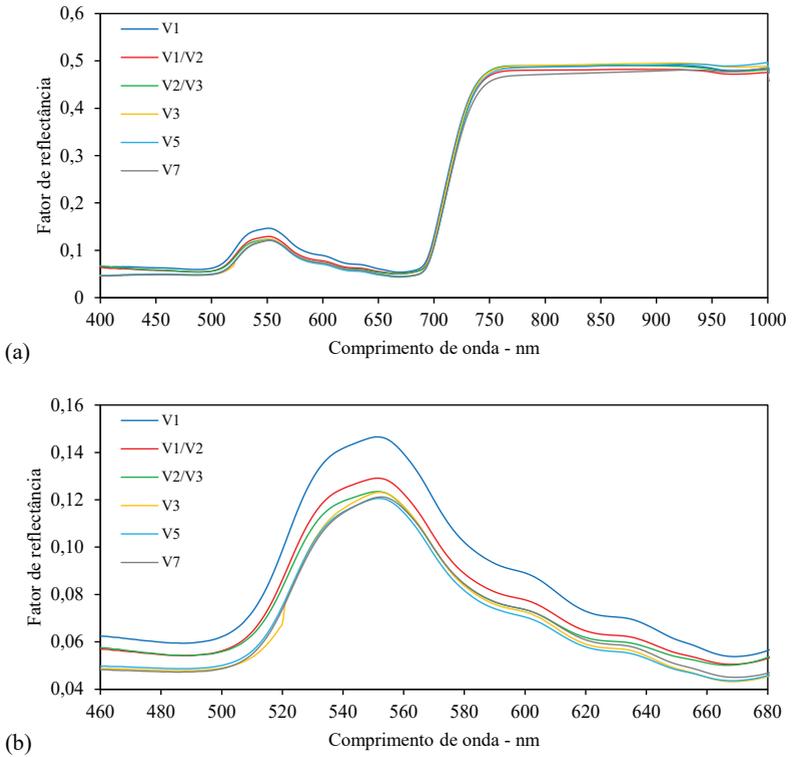
Dessa mistura espectral e a partir dos valores de reflectância da soja, do solo e da palhada bem como de seus valores de NDVI (Figuras 11 e 12), pode-se afirmar que: à medida que a soja se desenvolve e suas folhas aumentam a cobertura do solo e a palhada, a reflectância na banda vermelho diminui, enquanto que os valores de reflectância na banda infravermelho-próximo aumentam.

Logo, conforme apresentado na Figura 12, os valores médios de NDVI em uma área agrícola (considerando a mistura espectral entre soja, solo e palha) tendem a aumentar à medida que a lavoura se desenvolve e a diminuir à medida que as plantas entram em senescência.

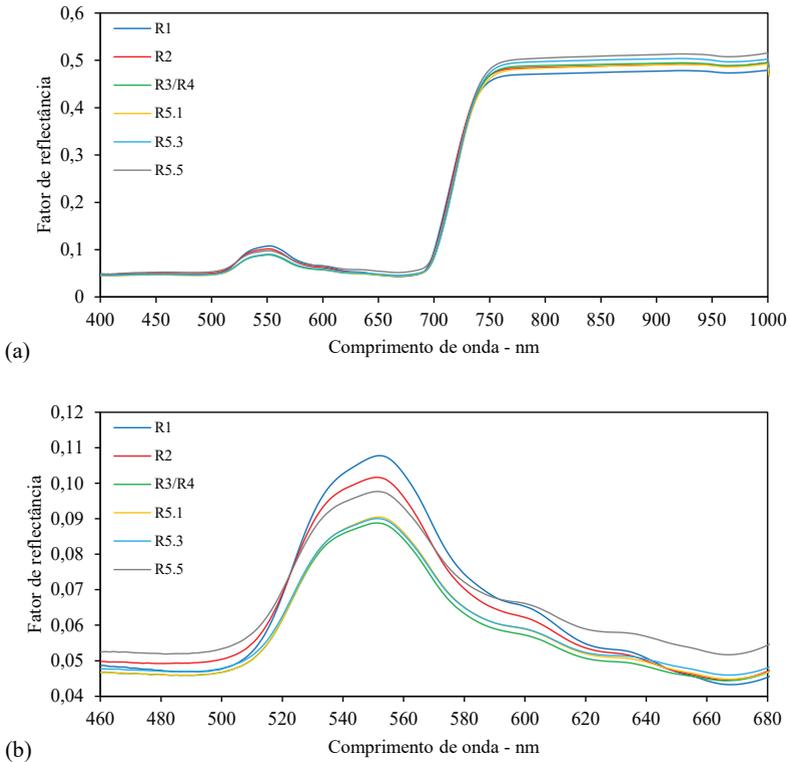
## Resposta espectraltemporal da soja

Como discutido na seção anterior, embora o comportamento espectral entre soja, solo e palhada seja bastante distinto, a mistura espectral de uma área agrícola apresenta variações ao longo da safra devido às diferentes proporções entre esses três elementos.

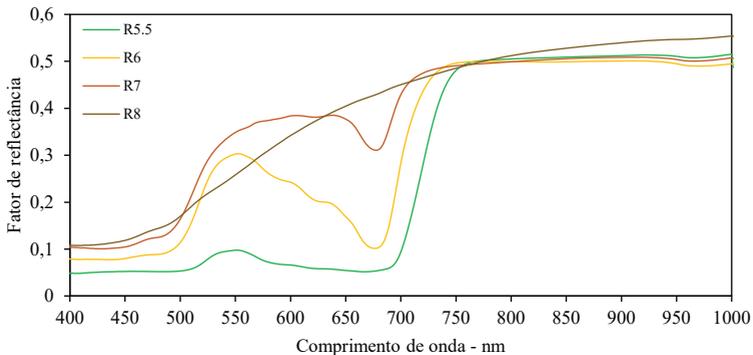
Nessa seção, atenção será dada à interpretação da magnitude de alteração da reflectância da soja ao longo de seus estádios de desenvolvimento (Fehr; Caviness, 1977), sobretudo no espectro visível, fortemente associado à absorção da radiação fotossinteticamente ativa. A Figura 15 apresenta o comportamento espectral da soja nos estádios vegetativos de desenvolvimento. A reflectância foliar da soja nos estádios reprodutivos de desenvolvimento está apresentada nas Figuras 16 e 17.



**Figura 15.** Resposta espectral da soja no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b) nos estádios vegetativos de desenvolvimento.



**Figura 16.** Resposta espectral no nível foliar da soja no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b) nos estádios reprodutivos de desenvolvimento até o completo enchimento dos grãos nas vagens.



**Figura 17.** Resposta espectral no nível foliar da soja no espectro Vis-NIR nos estádios reprodutivos de desenvolvimento, do completo enchimento de grãos nas vagens à maturação.

Desde o estágio V1, com folhas unifolioladas, passando pelo estágio V7 até o estágio R5, o comportamento espectral da soja mantém um padrão bem definido, com maiores valores de reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho-próximo e com menores valores de reflectância no espectro visível, com pico de reflectância na banda verde (550 nm).

As alterações observadas no infravermelho-próximo apresentam pouca associação com os estádios de desenvolvimento por sofrerem ampla influência da espessura foliar e da estrutura celular. Já a reflectância no espectro visível, fortemente associada à absorção da radiação fotossinteticamente ativa, apresenta diminuição dos valores de reflectância à medida que a planta se desenvolve. Tal comportamento fica evidente no detalhe do espectro visível nas Figuras 15B e 16B. Ou seja, em situações onde não há restrições ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, existe o aumento da absorção da radiação fotossinteticamente ativa e, portanto, menor reflectância, à medida que a soja se desenvolve, atendendo assim, à demanda fisiológica das plantas.

Esse comportamento se intensifica ao longo dos estádios vegetativos (Figura 15) e também reprodutivos (Figura 16). Ao atingir o estágio R5.5, de 75% a 100% de granação, a soja inicia a diminuição da

absorção da radiação fotossinteticamente ativa, aumentando, portanto, a reflectância no espectro visível. Esse comportamento deve-se à diminuição da atividade fotossintética da planta uma vez que, após a translocação de nutrientes das folhas para os grãos, iniciar-se-á a senescência, diminuindo, assim, suas atividades fisiológicas.

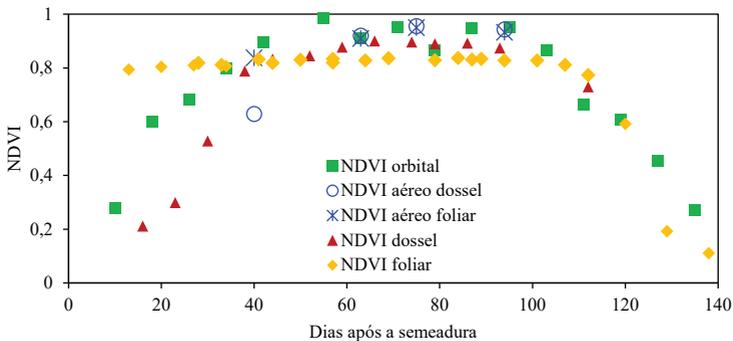
A Figura 17 demonstra as alterações no padrão de reflectância foliar da soja no espectro Vis-NIR nos estádios de desenvolvimento R5.5, R6, R7 e R8, contemplando a fase de maturação da cultura. Com o amarelecimento das folhas de soja ocorre ampla alteração no espectro visível, resultando em aumento expressivo da reflectância de R5.5 para R6, e de R6 para R7 em comprimentos de onda entre 500 nm e 680 nm. Nesses três estádios, porém, destaca-se a presença da inflexão na reflectância aos 680 nm, caracterizando a continuidade, ainda que em taxas menores, das atividades fisiológicas. Em R8, com folhas praticamente secas, a reflectância da folha assemelha-se à resposta espectral da palhada (Figura 11). Somente nesse estádio de desenvolvimento ocorre alteração no padrão de reflectância no infravermelho-próximo.

## Comportamento temporal do NDVI

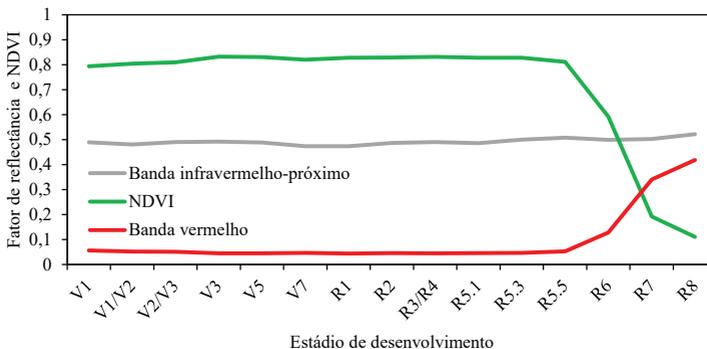
Compreendido o comportamento espectral da soja, suas alterações ao longo do tempo e a mistura espectral existente em uma área agrícola, objetiva-se, nessa seção, apresentar o comportamento temporal do NDVI orbital (obtido por satélite), NDVI aéreo dossel e foliar (obtido por VANT com e sem filtragem de pixels de solo, palhada e sombra das imagens), NDVI no nível do dossel e NDVI foliar.

A Figura 18 evidencia o comportamento discordante, ao longo do tempo, entre os valores de NDVI obtidos no nível do dossel (satélite, aéreo dossel e dossel) em relação aos valores de NDVI foliar e NDVI aéreo foliar, com filtragem de pixel de solo, palhada e sombra das imagens. Tal discordância entre esses dois níveis de aquisição de dados (dossel e folha) deve-se à interferência do solo e da palhada expostos na área agrícola e também das sombras existentes no dossel.

Essa interferência é corroborada pela Figura 19, onde são apresentados os valores de NDVI da soja calculados a partir da resposta espectral nos diferentes estádios de desenvolvimento (Figuras 15, 16 e 17). No nível foliar, o NDVI da soja apresenta, desde a folha unifoliolada (V1) até o completo enchimento de grãos, valores próximos a 0,8. Com a senescência da soja, tem-se maiores valores de refletância na banda vermelho e, como consequência, menores valores de NDVI. Ressalta-se, porém, que a diminuição do NDVI na fase de maturação é resultado do aumento de refletância nos comprimentos de onda do vermelho, uma vez que a refletância na banda NIR permanece quase que inalterada.



**Figura 18.** Comportamento temporal do NDVI da soja obtido no nível orbital, aéreo, do dossel e foliar.



**Figura 19.** Comportamento do NDVI foliar da soja e dos respectivos valores de refletância nas bandas vermelho e infravermelho-próximo em função dos estádios de desenvolvimento.

Logo, as alterações de NDVI na Figura 18 até a estabilização de seus valores (próximos aos 50 DAS) deve-se, quase que exclusivamente à influência do solo e da palhada, com valores inferiores à soja (Figura 12). Ou seja, à medida que o percentual de cobertura do solo pelas folhas de soja aumenta, aumenta-se a reflectância no infravermelho-próximo e diminui-se a reflectância na banda vermelho. Quando ocorre o completo fechamento da entrelinha da soja, os valores de NDVI estabilizam e assim permanecem até o início da senescência (próximo aos 90 DAS). A partir desse momento a diminuição do NDVI se dá tanto pela diminuição dos valores de NDVI foliar quanto pelo aumento da exposição do solo e da palhada em resposta à queda das folhas.

Os valores de NDVI obtidos por VANT (NDVI aéreo dossel e foliar) ressaltam de forma muito didática como o solo e a palhada influenciam a diminuição do NDVI nas fases iniciais do desenvolvimento da lavoura. Aos 40 DAS os valores de NDVI sem a filtragem do solo e da palhada (NDVI aéreo dossel) foram 0,62, contra os 0,83 obtidos após a eliminação dos pixels de solo e palhada das imagens (NDVI aéreo foliar). Esses valores (0,83) são muito próximos daqueles obtidos no nível foliar. Contudo, em uma avaliação agrícola onde considera-se apenas o NDVI de uma área, e não apenas das plantas, valores até 25% inferiores podem ser obtidos, sem que ocorra, necessariamente, diminuição nos valores de NDVI da planta.

A Figura 20 representa diferentes fases do desenvolvimento de uma lavoura de soja e seus valores de NDVI orbital correspondentes, evidenciando menores valores no início do ciclo com acréscimo à medida que a cobertura do solo também aumenta. Após se atingir o patamar com plena cobertura do solo e início do amarelecimento das folhas, tem-se a diminuição dos valores de NDVI, prosseguindo assim até a maturação plena e a colheita.

Esses resultados são extremamente importantes para o monitoramento de áreas sojícolas pois evidenciam que maiores ou menores valores de NDVI no nível de dossel estão muito mais associados à cobertura do solo pelas plantas do que à resposta da fenologia da soja.

Necessita-se, portanto, interpretar os valores de NDVI em função das alterações de biomassa, área foliar e produtividade para avaliar seu potencial para o monitoramento das condições de desenvolvimento da lavoura.



**Figura 20.** Fotos e comportamento temporal do NDVI orbital em uma lavoura de soja.

## Relação entre NDVI, área foliar, biomassa e produtividade

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam, aos 33, 57 e 89 DAS, os valores de NDVI da soja no nível do dossel (A), nível aéreo dossel, sem a filtragem de pixels de solo, palhada e sombras (B) e nível foliar (C) em função do IAF (Figura 21), da massa seca da parte aérea (Figura 22) e da produtividade (Figura 23). Esses dados foram coletados em experimento para avaliação do déficit hídrico na cultura da soja, servindo, portanto, como fonte de variação para os parâmetros monitorados. Nesse experimento foram avaliadas diferentes cultivares submetidas a quatro condições hídricas: irrigado (recebendo chuvas e irrigação, quando necessário, com potencial matricial entre -0,03 MPa e -0,05 MPa), não irrigado (NIRR, recebendo apenas águas de chuva) e déficit hídrico induzido nos estádios vegetativos (DHV) e reprodutivos (DHR) por meio de abrigos móveis.

A Figura 21 (21A e 21B) demonstra, aos 33 e 57 DAS, incremento nos valores de NDVI à medida que o IAF aumenta. Esse incremento proporcional estabiliza-se ainda aos 57 DAS com IAF próximo de 2,5. A partir de então, como observado aos 89 DAS, o NDVI demonstra insensibilidade às variações do IAF. Ou seja, no nível do dossel o NDVI é dependente do IAF nas fases iniciais da cultura, o que não ocorre no nível foliar (Figura 21C).

Na Figura 21C, é possível observar que desde as fases iniciais da cultura o NDVI já apresenta valores elevados, corroborando os resultados apresentados na Figura 19 e também aqueles observados, décadas antes, por Colwell (1974) e Tucker (1977), onde os autores contextualizam que a estrutura do dossel, proporcionando a exposição do solo, pode resultar em diferente resposta espectral sem haver, necessariamente, alterações espectrais na folha individualmente.

Esse comportamento fica ainda mais evidenciado quando analisados os valores de NDVI em função da massa seca da parte aérea (Figura 22). No nível do dossel (Figura 22A e 22B), o NDVI apresentou dependência dos valores de massa seca aos 33 e 57 DAS,

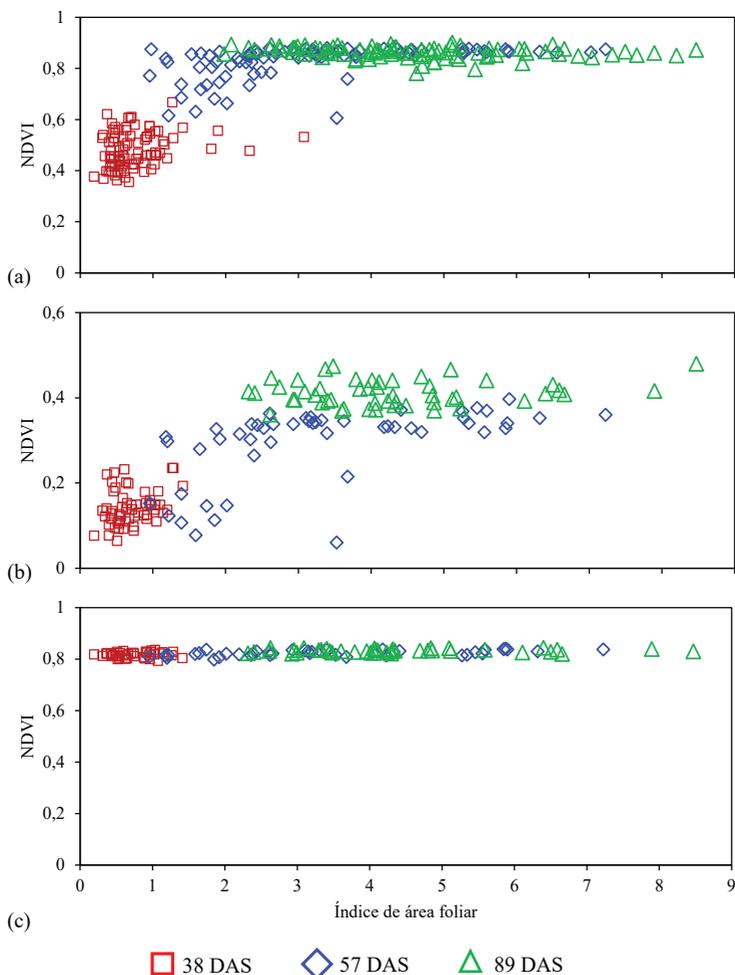
especialmente na primeira data. Com massa seca de aproximadamente 5 g por planta, os valores de NDVI apresentaram estabilização e assim seguiram até 89 DAS. De forma antagônica, a Figura 22C demonstra que, invariavelmente aos valores de massa seca da parte aérea, o NDVI foliar mantém-se em um patamar definido, assim como já abordado na Figura 21C. Tais resultados reforçam que os valores de NDVI no nível do dossel são proporcionais aos parâmetros de crescimento da planta até o momento em que ocorre a total cobertura do solo pelas plantas. A partir de então, existe a estabilização ou a saturação do NDVI.

A Figura 23 apresenta os valores de NDVI em função da produtividade da soja e demonstra o incremento nos valores de NDVI entre as datas avaliadas e a falta de relação entre NDVI e produtividade em cada uma dessas datas no nível do dossel (Figura 23A e 23B). Novamente, no nível foliar (Figura 23C) os valores de NDVI não apresentam qualquer variação em relação às datas de avaliação e, tampouco, correlação com a produtividade obtida.

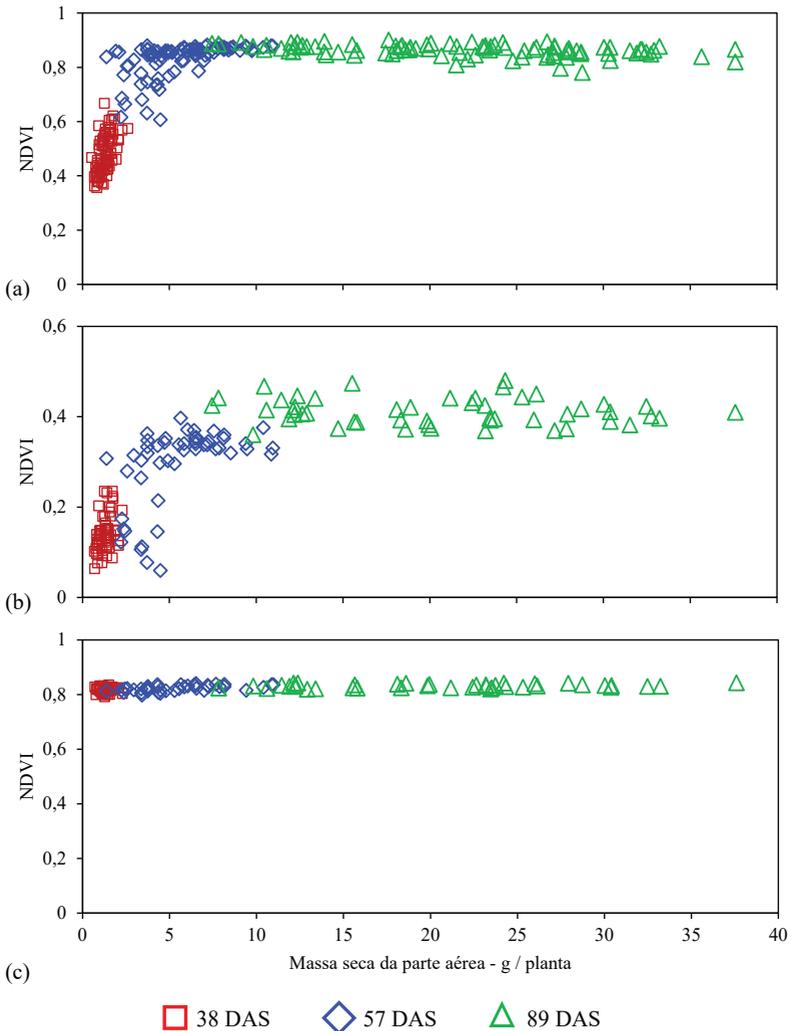
O resultado da análise e a interpretação de um conjunto de 710 amostras, contemplando cultivares de soja sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica em diferentes safras, evidencia o incremento proporcional do NDVI no nível do dossel até valores de IAF entre 3 e 4, assim como massa seca da parte aérea com valores entre 5 g e 10 g por planta (Figura 24). A partir desses valores, o NDVI no nível do dossel apresenta estabilização, sofrendo diminuição apenas próximo à senescência, como demonstrado na Figura 19.

Os valores de NDVI no nível do dossel em função do IAF e biomassa nas fases iniciais da cultura apresentam ampla variabilidade, enquanto que os valores obtidos no nível foliar apresentam insensibilidade às variações dos parâmetros de crescimento, em função da diferente resposta espectral entre vegetação, solo e palhada nas bandas vermelho e infravermelho-próximo (Figuras 11 e 12). Contudo, essas informações são derivadas de área experimental onde são avaliados diferentes condições de disponibilidade hídrica. Para dirimir questionamentos sobre essa ampla variabilidade estar ou não associada à resposta espectral da soja sob diferentes status hídrico,

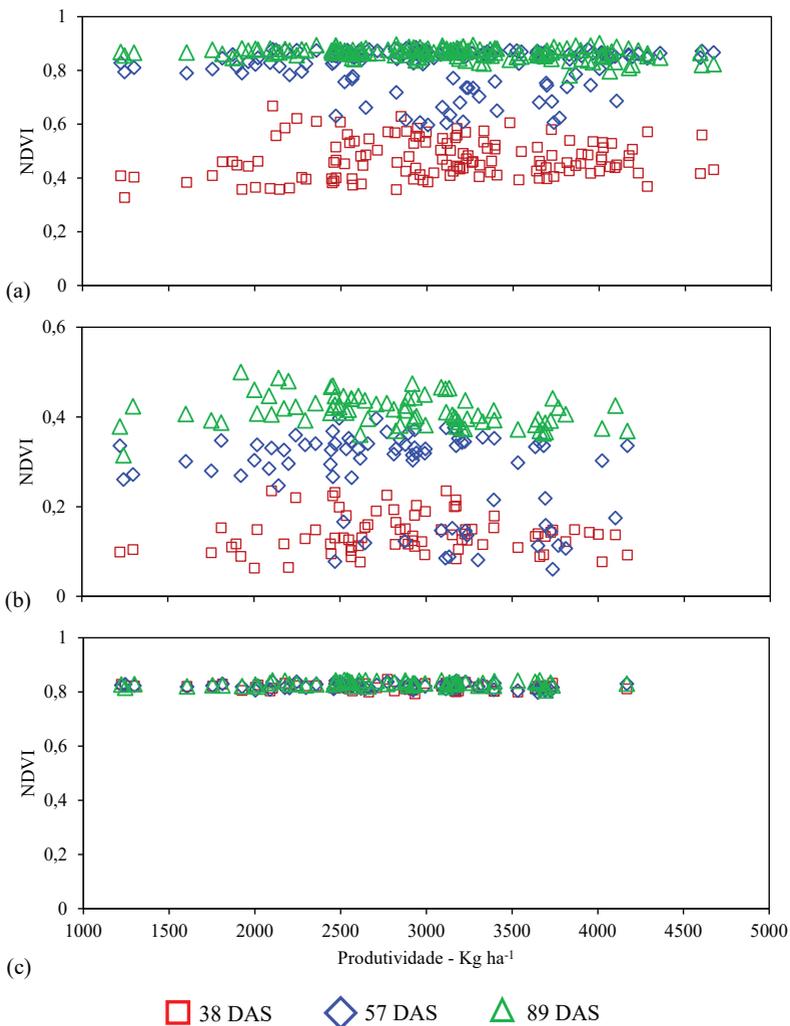
serão apresentados, na próxima seção, valores de NDVI foliar da cultura da soja sob diferentes fontes de estresse, como déficit hídrico e nutricional, presença de insetos e ocorrência de doenças.



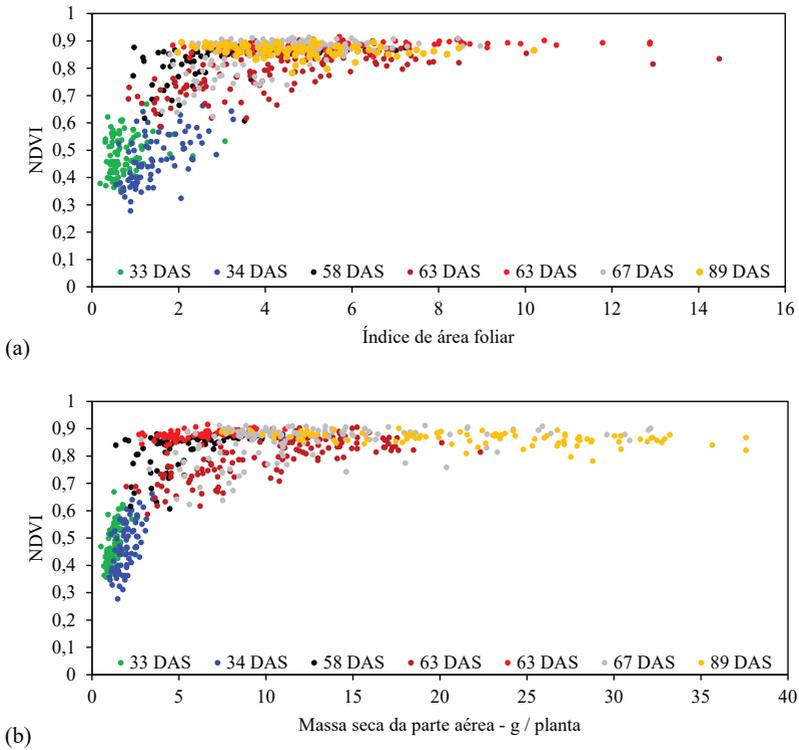
**Figura 21.** Valores de NDVI no nível do dossel (a), NDVI aéreo dossel (b) e NDVI foliar (c) da soja em função do índice de área foliar (IAF) aos 33 DAS, 57 DAS e 89 DAS.



**Figura 22.** Valores de NDVI no nível do dossel (a), NDVI aéreo dossel (b) e NDVI foliar (c) da soja em função da massa seca da parte aérea aos 33 DAS, 57 DAS e 89 DAS.



**Figura 23.** Valores de NDVI no nível do dossel (a), NDVI aéreo dossel (b) e NDVI foliar (c) da soja aos 33 DAS, 57 DAS e 89 DAS em função da produtividade da soja.



**Figura 24.** NDVI no nível do dossel da soja em função do índice de área foliar (IAF, a) e da massa seca da parte aérea (b) em diferentes fases do desenvolvimento da soja.

## Valores de NDVI foliar da soja sob estresses bióticos e abióticos

---

Os valores de NDVI foram mensurados em áreas experimentais com o objetivo de avaliar diferentes fontes de estresses bióticos e abióticos em plantas de soja, como deficiência hídrica e nutricional, ocorrência de doenças e presença de insetos.

Para avaliação espectral sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, conduziram-se avaliações em experimento instalado nos campos experimentais da Embrapa Soja com diferentes genótipos de soja submetidos a quatro condições hídricas: irrigado (IRR, recebendo chuvas e irrigação, quando necessário, com potencial matricial entre -0,03 MPa e -0,05 MPa), não irrigado (NIRR, recebendo apenas águas de chuva) e deficit hídrico induzido nos estádios vegetativos (DHV) e reprodutivos (DHR). As parcelas dos tratamentos DHV e DHR foram instaladas sob abrigos móveis, programados para fecharem (no período vegetativo ou no reprodutivo) sempre que precipitações pluviométricas superiores a 0,1 mm fossem registradas, promovendo, assim, diferentes condições de disponibilidade hídrica. Informações complementares sobre a modelagem espectral da soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica e das variáveis de interesse agrônomo estão apresentadas em Braga et al. (2021), Carvalho et al. (2015) e Crusiol et al. (2017, 2020, 2021a, 2021b, 2021c, 2023).

Para avaliação espectral de plantas de soja sob a ocorrência de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), foi conduzido um experimento nas casas de vegetação da Universidade Estadual de Maringá e a avaliação da severidade de ataque seguiu a escala diagramática proposta por Godoy et al. (2006). Para tanto, plantas de soja foram inoculadas com o fungo *P. pachyrhizi* e depois envoltas por saco plástico contendo tecido umedecido com água para criar um ambiente favorável à infecção do fungo. Após o início dos sintomas visuais foram definidos os tratamentos experimentais e conduzidas as avaliações

espectrais. Em condições de campo, em áreas experimentais da Embrapa Soja e de parceiros, foram avaliadas plantas sob diferentes severidades de ferrugem-asiática seguindo a escala diagramática proposta por Godoy et al. (2006). Informações complementares sobre a modelagem espectral da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática estão apresentadas por Furlanetto et al. (2021).

Para avaliação espectral de plantas com deficiência de potássio (K), foram utilizados experimentos nos campos experimentais da Embrapa Soja, conduzidos desde a década de 1980 (Firmano et al., 2019, 2020, 2021). As parcelas de soja recebem diferentes doses de adubação potássica, ao longo do tempo, criando, assim, diferentes teores de  $K^+$  no solo e de nutriente nas folhas, com gradações de sintomas de  $K^+$  nas folhas: deficiência nutricional severa, deficiência moderada e estado nutricional adequado de  $K^+$ . Em campos experimentais de parceiros, foram avaliadas plantas de soja submetidas a tratamentos experimentais com diferentes doses de calcário e gesso sob diferentes saturações por bases (V%), promovendo gradiente de disponibilidade de macro e micronutrientes às plantas. Em casa de vegetação, na Universidade Estadual de Maringá, plantas de soja foram cultivadas em solução nutritiva com elemento faltante, resultando na deficiência de macro e micronutrientes. Informações complementares sobre a disponibilidade nutricional e a modelagem espectral estão apresentadas em Furlanetto et al. (2023), Oliveira et al. (2016) e Santos et al. (2023).

Para avaliação de plantas de soja sob a presença de percevejo-marrom (*Euschistus heros*), foi conduzido experimento nas casas de vegetação da Embrapa Soja com presença e ausência de percevejo por planta. Para tanto, cada planta de soja foi protegida por uma gaiola telada. Após o período de infestação com o inseto (96 horas), foram realizadas as avaliações espectrais. Nos campos experimentais da Embrapa Soja, plantas de soja foram submetidas a diferentes populações de percevejo-marrom (0, 2, 4, 8 e 16 percevejos por planta) e avaliadas aos 4 e 10 dias após a infestação. Para tanto, cada parcela experimental foi protegida por uma gaiola telada. Informações complementares sobre a modelagem espectral da soja sob a presença

de percevejo-marrom estão apresentadas em Fazam (2018) e Rodrigues et al. (2013).

Nessa seção serão apresentadas as respostas espectrais da soja no nível foliar no espectro Vis-NIR submetida a diferentes fontes de estresse bióticos e abióticos e também os valores correspondentes de NDVI foliar e NDVI no nível do dossel sob os respectivos estresses fisiológicos. Rotineiramente, o NDVI é interpretado por plataformas que ofertam o monitoramento agrícola via NDVI orbital ou aéreo por meio da escala de NDVI no nível do dossel:

De -1 a 0: Alvo não vegetal ou planta sem atividade fisiológica;

De 0 a 0,33: Planta não saudável;

De 0,33 a 0,66: Planta moderadamente saudável;

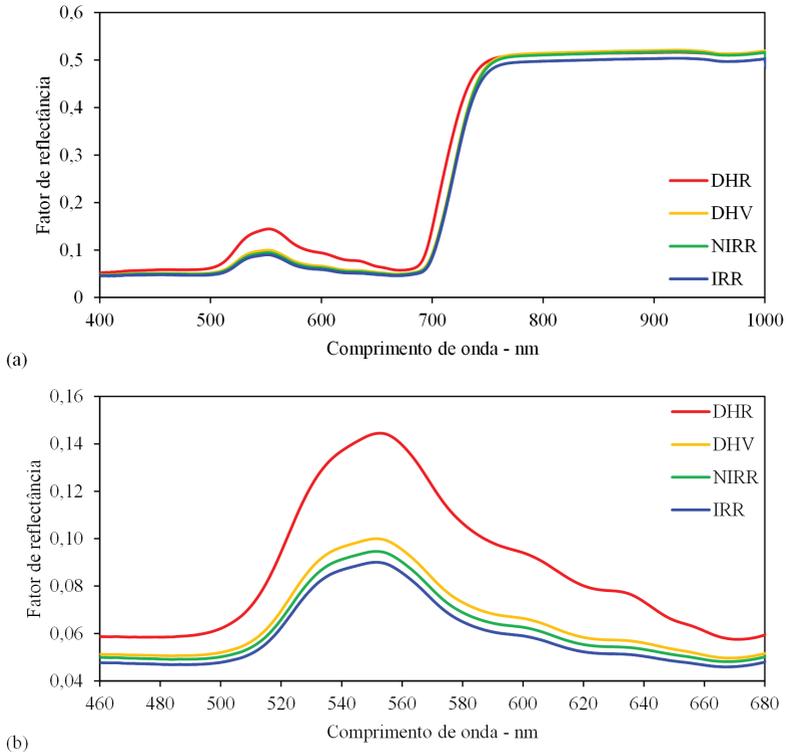
De 0,66 a 1: Planta muito saudável.

Ressalta-se que a escala de NDVI rotineiramente utilizada não considera as variações do NDVI no nível do dossel decorrentes das fases do desenvolvimento da lavoura. Com base nesses valores usualmente adotados pelo mercado de imagens para monitoramento agrícola, os valores de NDVI no nível foliar e do dossel serão interpretados buscando parametrizar a magnitude da influência dos estresses fisiológicos frente à influência da cobertura vegetal nos valores obtidos.

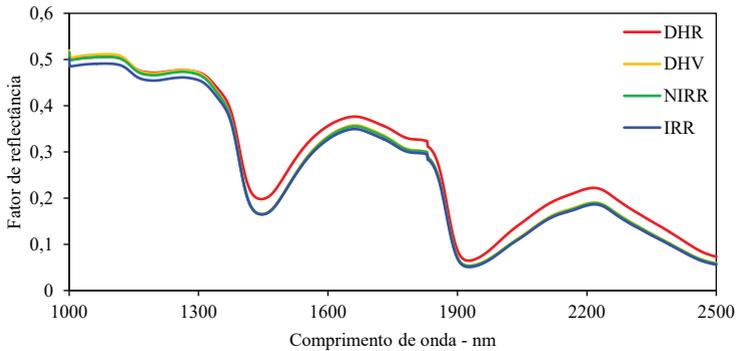
## **NDVI foliar da soja em condições de seca**

A Figura 25 apresenta o comportamento espectral, no nível foliar da soja, no estágio R5.3, sob quatro condições de disponibilidade hídrica: irrigado (IRR), não irrigado (NIRR), deficit hídrico no período vegetativo (DHV) e deficit hídrico no período reprodutivo (DHR). Observa-se, que as plantas sob restrição hídrica, natural (NIRR) ou induzida (DHV e DHR), apresentam reflectância no espectro visível superior às plantas sob irrigação. Enquanto que as maiores diferenças são observadas na banda verde, próximo a 550 nm, tais disparidades tendem a diminuir em comprimentos de onda próximos a 670

nm (banda vermelho). Especificamente sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, a Figura 26 apresenta o comportamento espectral, no nível foliar, da soja no espectro SWIR, com valores de reflectância inferiores nas plantas sob irrigação.

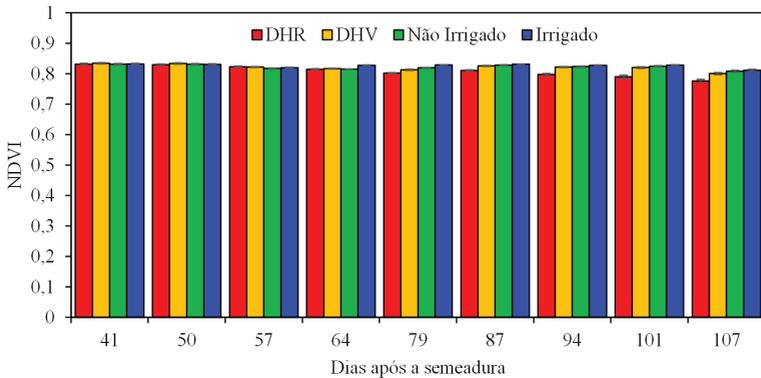


**Figura 25.** Comportamento espectral no nível foliar da soja no estágio de desenvolvimento R5.3 sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (irrigado – IRR, não irrigado – NIRR, deficit hídrico no período vegetativo – DHV – e deficit hídrico no período reprodutivo – DHR) no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b).

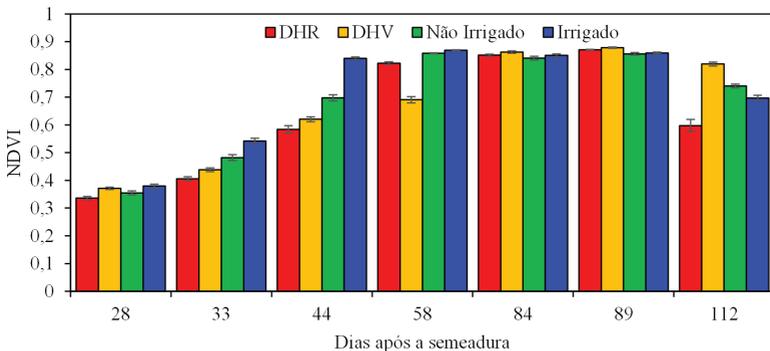


**Figura 26.** Comportamento espectral no nível foliar da soja no estágio de desenvolvimento R5.3 sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (irrigado – IRR, não irrigado – NIRR, deficit hídrico no período vegetativo – DHV – e deficit hídrico no período reprodutivo – DHR) no espectro SWIR.

Dessa resposta espectral, foram calculados os valores de NDVI foliar para diferentes fases do desenvolvimento da cultura para essas quatro condições hídricas (Figura 27). A amplitude nos valores de NDVI foliar, considerando a influência da condição hídrica e também da fenologia, foi de apenas 0,05. Ou seja, o NDVI foliar medido em plantas sob diferentes condições hídricas e em diferentes estádios de desenvolvimento apresenta variação de 0,78 a 0,83; variação extremamente inferior àquela observada na Figura 28, onde apresenta-se a resposta do NDVI no nível do dossel, sujeito à influência da biomassa e do IAF.

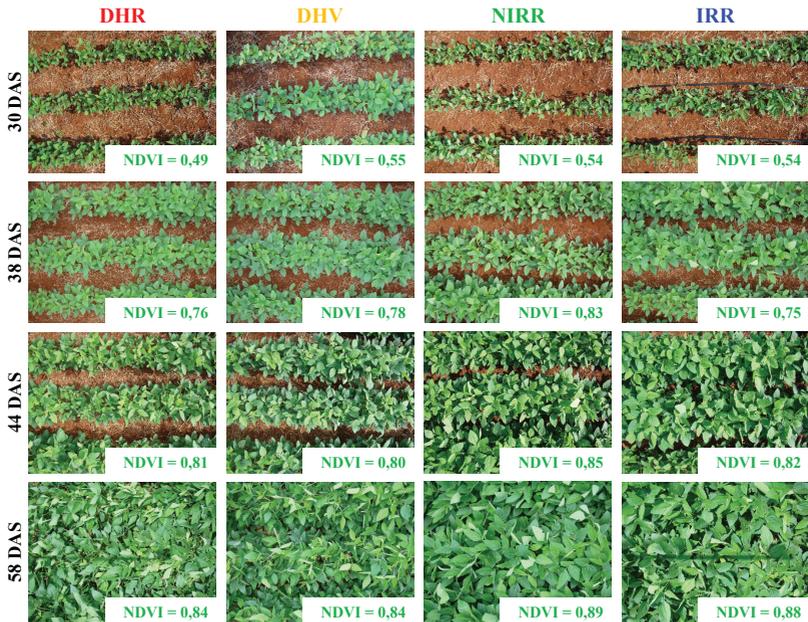


**Figura 27.** Valores de NDVI foliar da soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (irrigado – IRR, não irrigado – NIR, déficit hídrico no período vegetativo – DHV – e déficit hídrico no período reprodutivo – DHR). As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.



**Figura 28.** Valores de NDVI no nível do dossel da soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (irrigado – IRR, não irrigado – NIR, déficit hídrico no período vegetativo – DHV – e déficit hídrico no período reprodutivo – DHR). As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

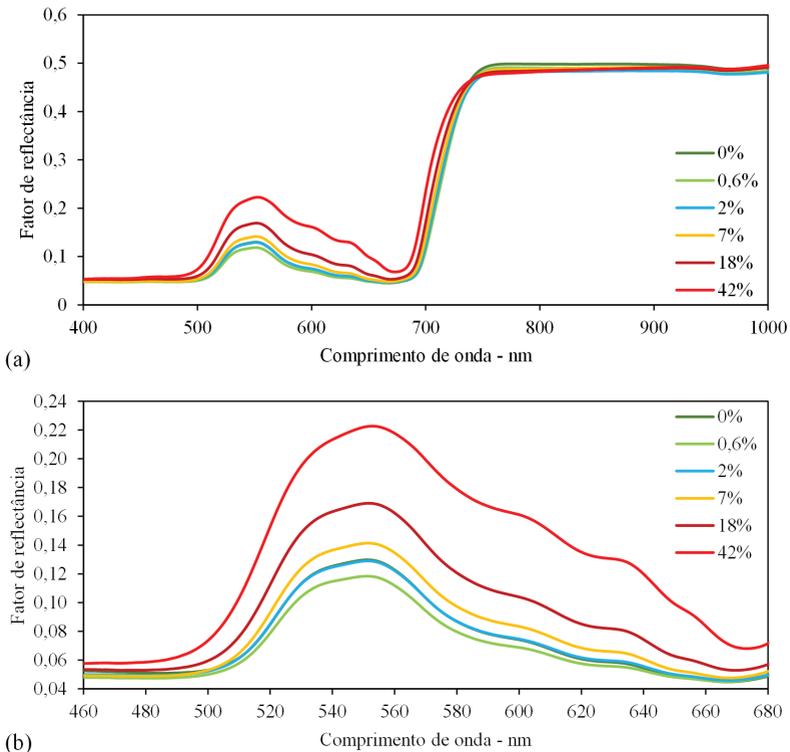
Complementarmente, a Figura 29 apresenta as imagens das parcelas onde foram mensurados os valores de NDVI no nível do dossel, reforçando as condições diferenciadas de cobertura do solo. Como observado, as condições hídricas da soja pouco afetam os valores de NDVI foliar, sendo que as alterações promovidas no nível do dossel são fruto da relação direta entre condição hídrica e biomassa ou IAF e da relação indireta entre NDVI e condição hídrica.



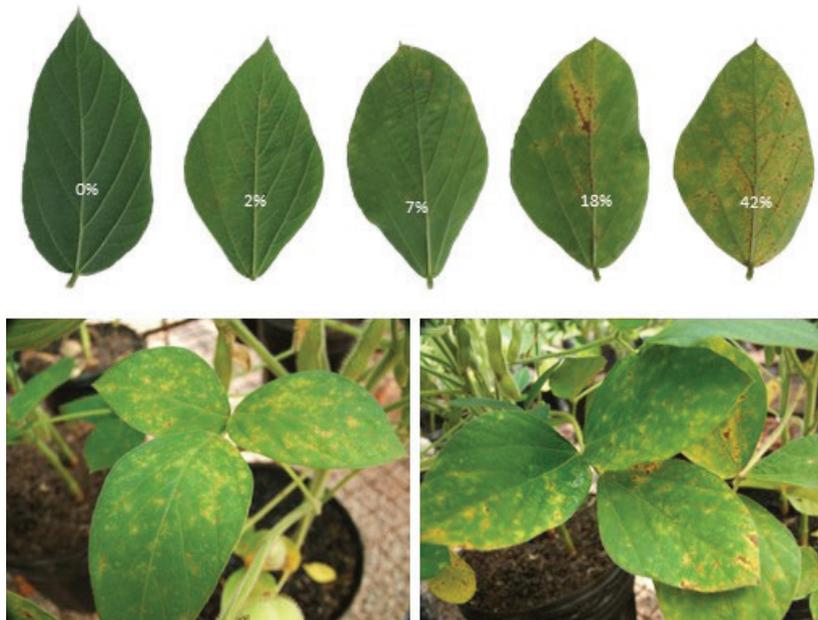
**Figura 29.** Plantas de soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (irrigado – IRR, não irrigado – NIRR, déficit hídrico no período vegetativo – DHV – e déficit hídrico no período reprodutivo – DHR) aos 30, 38, 44 e 58 dias após a semeadura (DAS).

## NDVI foliar da soja sob a ocorrência de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*)

A Figura 30 apresenta o comportamento espectral foliar da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática. Na Figura 31 estão apresentados os sintomas foliares correspondentes às severidades estimadas.



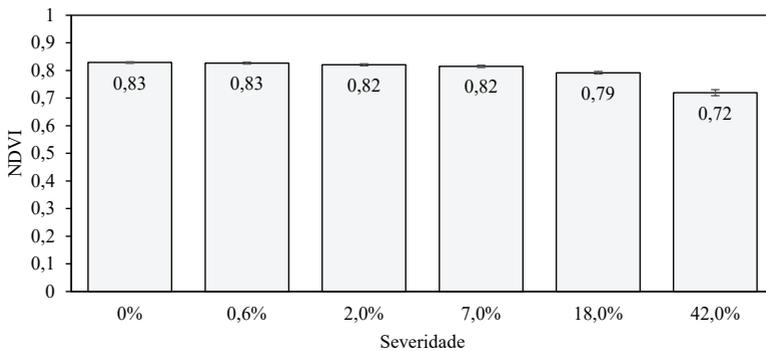
**Figura 30.** Comportamento espectral foliar da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b).



**Figura 31.** Folhas de soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*).

Assim como observado para as condições de restrição hídrica, o estresse por ataque do patógeno causador da ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) resulta em aumento da reflectância no espectro visível. Esse aumento ocorre de forma proporcional à severidade da doença, com maiores diferenças na banda verde (550 nm) e diminuição dessas diferenças em direção aos comprimentos de onda da banda vermelho (670 nm).

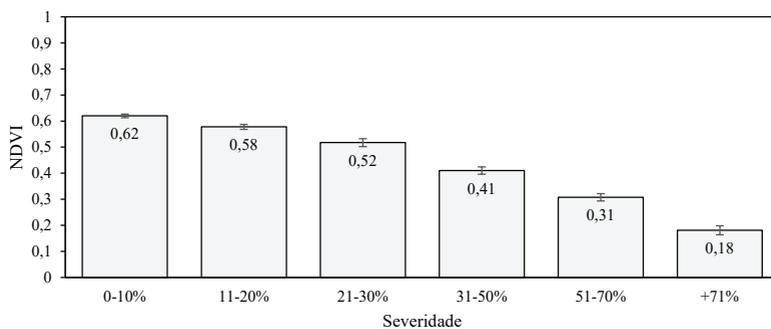
Embora amplas alterações espectrais sejam observadas no espectro visível, o infravermelho-próximo apresenta estabilidade dos valores de reflectância, tornando os valores de NDVI foliar dependentes quase que exclusivamente da reflectância na banda do vermelho. A Figura 32 apresenta os valores de NDVI foliar da soja calculados a partir das curvas espectrais apresentadas na Figura 30.



**Figura 32.** Valores de NDVI foliar da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

O NDVI foliar da soja (Figura 32) sem a presença do patógeno apresentou valor muito próximo aqueles com severidade de até 18%, com amplitude de 0,05 entre 0,79 e 0,83. Valores destoantes de NDVI foliar foram observados apenas para a severidade de 42% (0,72), valor considerado alto e indicador de planta saudável em interpretações na escala de NDVI no nível do dossel. Ou seja, o monitoramento da ferrugem-asiática por meio do NDVI no nível do dossel está sujeito à majoritária influência da biomassa, do IAF e da cobertura do solo, com pequeno impacto do NDVI inerente às folhas com a presença do patógeno.

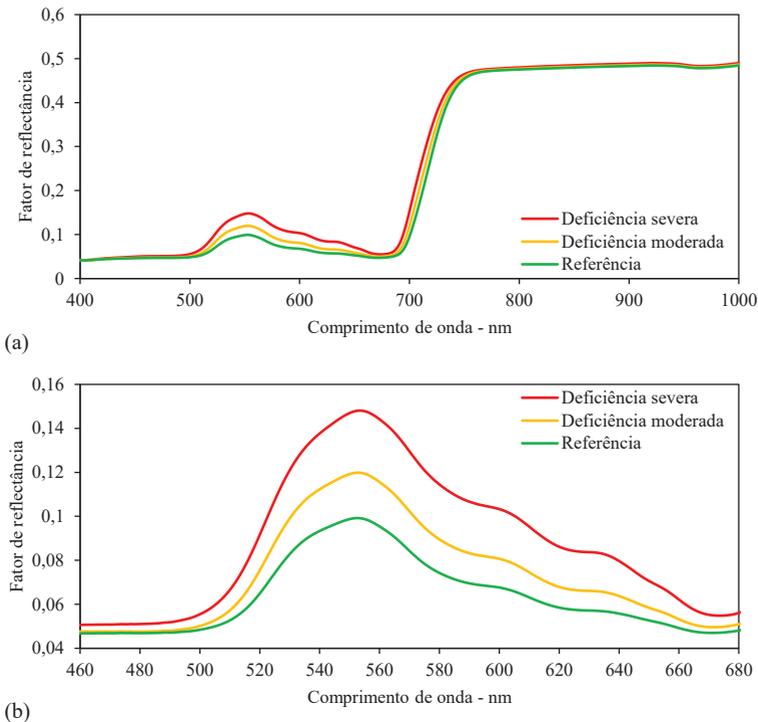
Diferentemente do NDVI foliar (Figura 32), as associações existentes entre o NDVI no nível do dossel e a severidade da doença ocorrem preferencialmente pela queda das folhas, maior exposição do solo e, conseqüentemente, menores valores de NDVI, sem que existam, necessariamente, alterações espectrais no nível foliar, conforme apresentado na Figura 33. Nessa Figura, são apresentados valores de NDVI no nível do dossel da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática, com valores de NDVI menores chegando até 0,18, corroborando a influência da biomassa, especialmente nas maiores severidades, e impactando os valores medidos de NDVI.



**Figura 33.** Valores de NDVI no nível do dossel da soja sob diferentes severidades de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

## NDVI foliar da soja com deficiência moderada e severa de potássio

O comportamento espectral foliar da soja no estágio de desenvolvimento R5.3 sob deficiência moderada e severa de potássio está apresentado na Figura 34. Na Figura 35 estão apresentados os sintomas foliares nas deficiências de  $K^+$ .



**Figura 34.** Comportamento espectral foliar da soja sob diferentes graduações de deficiência de  $K^+$  no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b) no estágio de desenvolvimento R5.3.



Figura 35. Folhas de soja sob diferentes gradações de deficiência de K<sup>+</sup>.

Reforçando o comportamento espectral da soja sob estresse, maiores valores de reflectância no espectro visível foram observados para plantas sob deficiência nutricional, com aumentos proporcionais à intensidade da deficiência de K<sup>+</sup>. Assim como ocorrido sob seca e ocorrência de ferrugem-asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), alterações mais pronunciadas ocorrem na banda verde (550 nm), com diminuição dessas alterações em direção à banda vermelho (670 nm). Novamente, mínimas alterações são observadas no espectro infravermelho-próximo.

O NDVI foliar calculado a partir dessas respostas espectrais, Figura 34, bem como da resposta espectral dos estádios de desenvolvimento V4, R2 e R4, está apresentado na Figura 36.

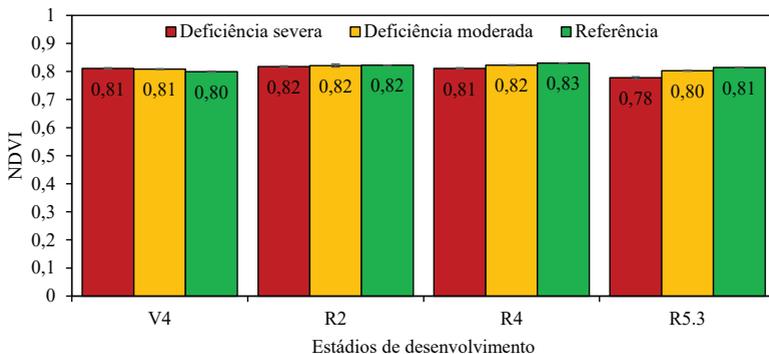
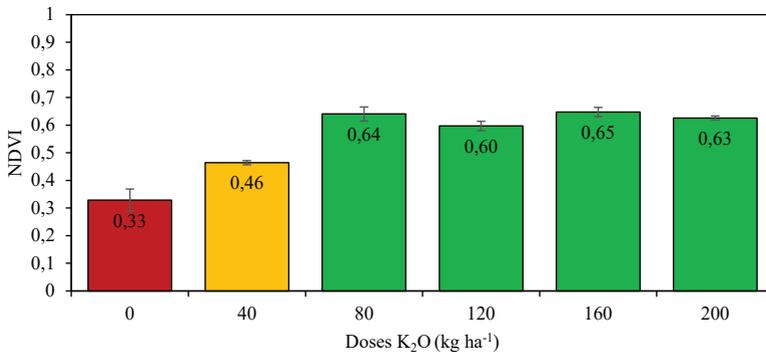


Figura 36. Valores de NDVI foliar da soja sob diferentes severidades de deficiência de K<sup>+</sup>. As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

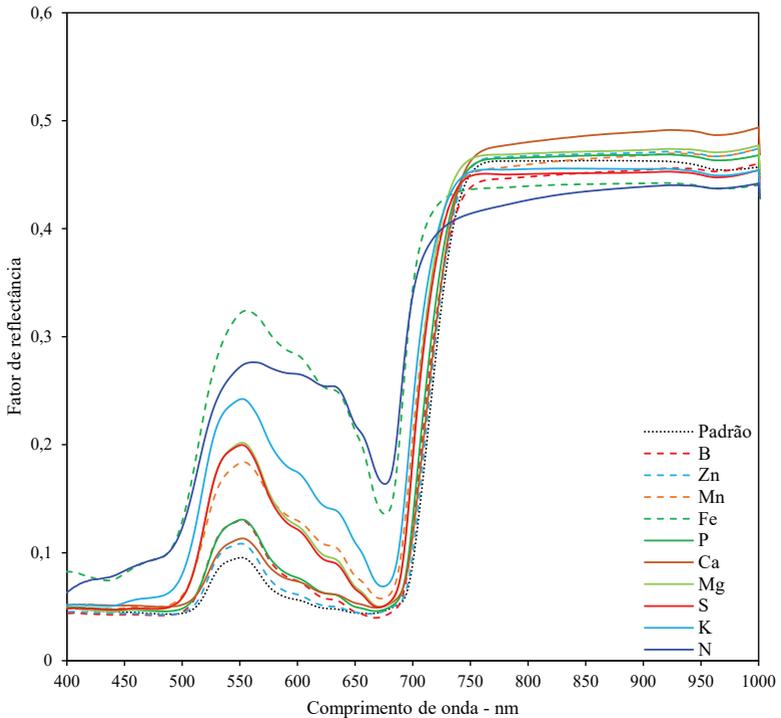
A baixa magnitude das alterações do NDVI foliar entre os diferentes estádios de desenvolvimento e de deficiência nutricional, fica evidenciada em função da amplitude dos valores, com mínimo de 0,78 e máximo de 0,83. Esses valores, em uma interpretação na escala de NDVI no nível do dossel seriam considerados adequados para a cultura e não apontariam as limitações nutricionais presentes na lavoura. Outrossim, quando as avaliações foram realizadas em plantas no estágio R5, com diferentes teores de  $K^+$  no solo, os valores de NDVI no nível do dossel (Figura 37) mostraram-se muito inferiores, oscilando de 0,33 a 0,65.



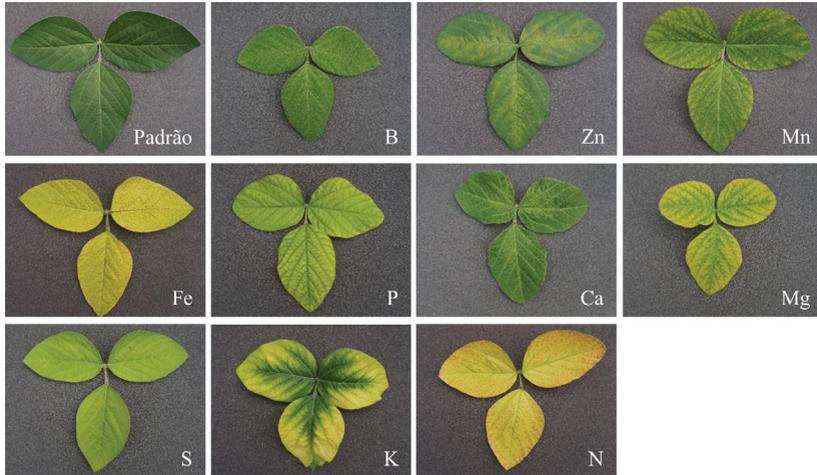
**Figura 37.** Valores de NDVI no nível do dossel da soja no estágio de desenvolvimento R5 sob diferentes doses de  $K^+$ . As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

## NDVI foliar da soja sob a deficiência de macro e micronutrientes

O comportamento espectral foliar da soja sob a deficiência de macro e micronutrientes está apresentado na Figura 38. Na Figura 39 estão apresentados os sintomas foliares sob deficiência desses macro e micronutrientes.



**Figura 38.** Comportamento espectral foliar da soja sob a deficiência de macro e micronutrientes no espectro Vis-NIR.



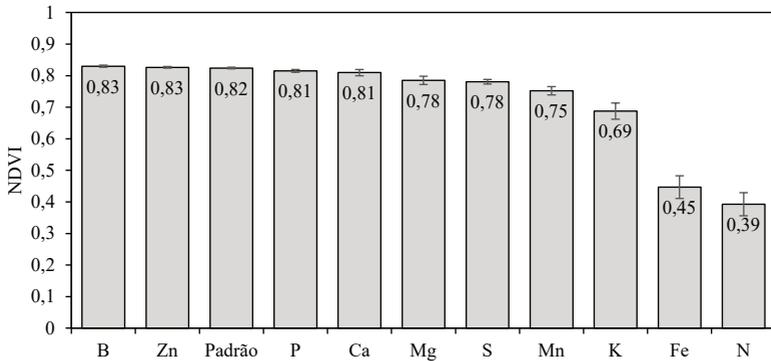
**Figura 39.** Folhas de soja sob deficiência de macro e micronutrientes.

Embora alterações tenham sido observadas no espectro infravermelho-próximo, é no espectro visível que as maiores diferenças foram detectadas (Figura 38). Em relação às plantas com plena nutrição, a deficiência de macro ou micronutrientes resultou no aumento da reflectância foliar, corroborando os resultados observados em condições de restrição hídrica, ocorrência de ferrugem-asiática e deficiência de  $K^+$ .

Enquanto que alguns nutrientes, como zinco (Zn), cálcio (Ca), boro (B) e fósforo (P), apresentam pequenos aumentos de reflectância, enxofre (S), magnésio (Mg) e manganês (Mn) apresentaram alterações mais expressivas. Os maiores valores de reflectância foram observados sob a deficiência de potássio (K), ferro (Fe) e nitrogênio (N).

Embora a deficiência dos nutrientes avaliados apresente assinatura espectral singular para cada um deles (Figura 38), com bandas características em diferentes faixas do espectro eletromagnético, os valores de NDVI foliar demonstram baixa capacidade de diferenciá-los, conforme apresentado na Figura 40. Os valores mais discrepantes foram verificados para as deficiências nutricionais de N e Fe, com

sintomas visuais severos de clorose generalizada das folhas, condições em que a contribuição do NDVI não foi significativa em relação ao diagnóstico pelo olhar humano.



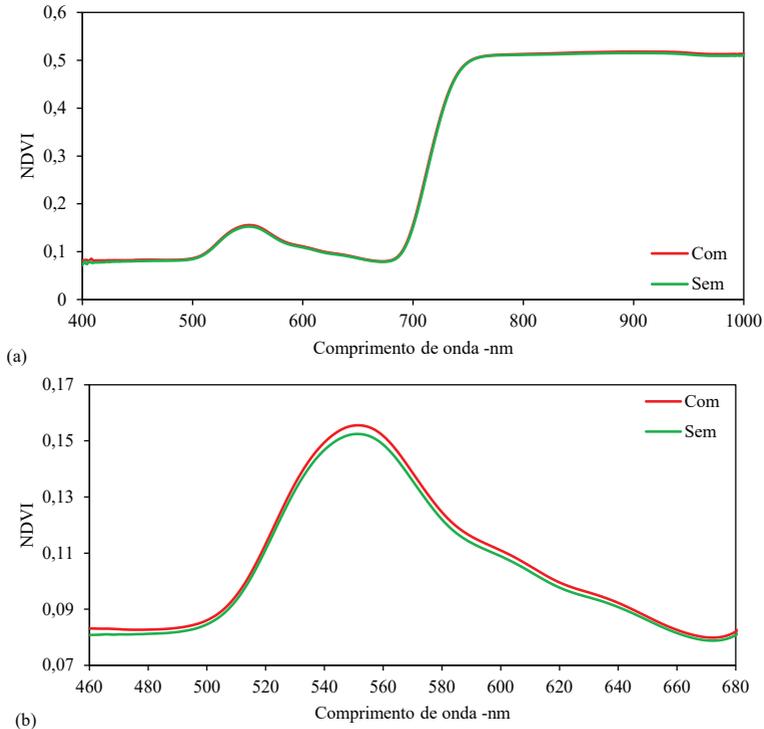
**Figura 40.** Valores de NDVI foliar da soja cultivada em solução nutritiva completa e sob a deficiência de macro e micronutrientes, em casa de vegetação. As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

Em comparação aos valores de NDVI usualmente interpretados na escala de NDVI no nível do dossel por serviços de monitoramento agrícola, com exceção de potássio, ferro e nitrogênio, os valores de NDVI sob a deficiência dos nutrientes poderiam ser interpretados como adequados, sugerindo pleno desenvolvimento vegetal. Valores intermediários foram observados para a deficiência de potássio (0,69), mas ainda com valores aceitáveis em uma avaliação no nível do dossel e apenas ferro e nitrogênio apresentaram NDVI foliar abaixo de 0,5. A variabilidade dos valores foliares, sob a deficiência de macro e micronutrientes é de magnitude menor do que a variabilidade do NDVI no nível do dossel observada em função da área foliar e da biomassa (Figuras 21 e 22, respectivamente), fato que indica cautela na interpretação dos valores de NDVI no nível do dossel quando se considera a presença do solo e da palhada.

Além disso, atenção merece ser dada às limitações das aferições de NDVI no nível do dossel para monitoramento de nutrientes móveis, em que a deficiência ocorre nas folhas inferiores das plantas, dificultando ou ainda impossibilitando a análise dessas folhas.

## NDVI foliar da soja sob a presença de percevejo-marrom (*Euschistus heros*)

A Figura 41 apresenta a resposta espectral foliar da soja na ausência e na presença de percevejo-marrom. Pequenas alterações foram observadas no espectro Vis-NIR. No espectro visível (Figura 41B), maiores diferenças foram observadas na banda verde (550 nm), com menores diferenças em direção aos comprimentos de onda da banda vermelho. Ressalta-se, como já abordado anteriormente, que plantas de soja sob a influência de estresses fisiológicos apresentam aumento da reflectância no espectro visível.



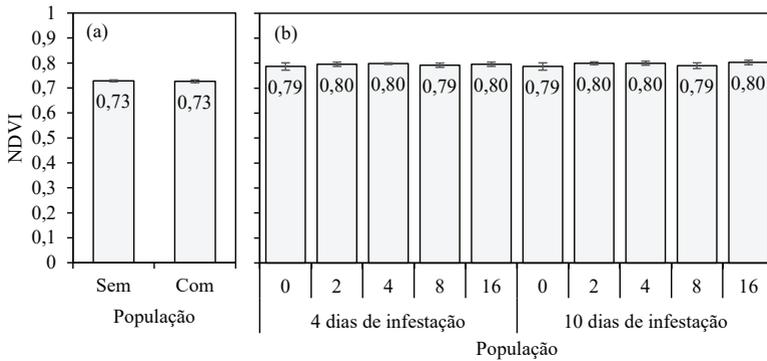
**Figura 41.** Comportamento espectral foliar da soja sob diferentes populações de percevejo-marrom (*Euschistus heros*) no espectro Vis-NIR (a) e detalhe do espectro Vis (b).

Na Figura 42 estão apresentadas as parcelas experimentais com gaiolas com diferentes populações de percevejo-marrom.



**Figura 42.** Parcelas experimentais com gaiolas com diferentes populações de percevejo-marrom (*Euschistus heros*).

Na Figura 43a, pode-se observar que a variação do NDVI foliar da soja com a presença de percevejo-marrom é de pequena magnitude, assim como já observado em estresses como a seca, a presença de ferrugem-asiática ou mesmo a deficiência de alguns nutrientes. Porém a variação do NDVI nível do dossel da soja (Figura 43B) também se mostra de pequena magnitude independente da população e no tempo de infestação de percevejo-marrom, com valores de NDVI no nível do dossel oscilando de 0,79 a 0,80.



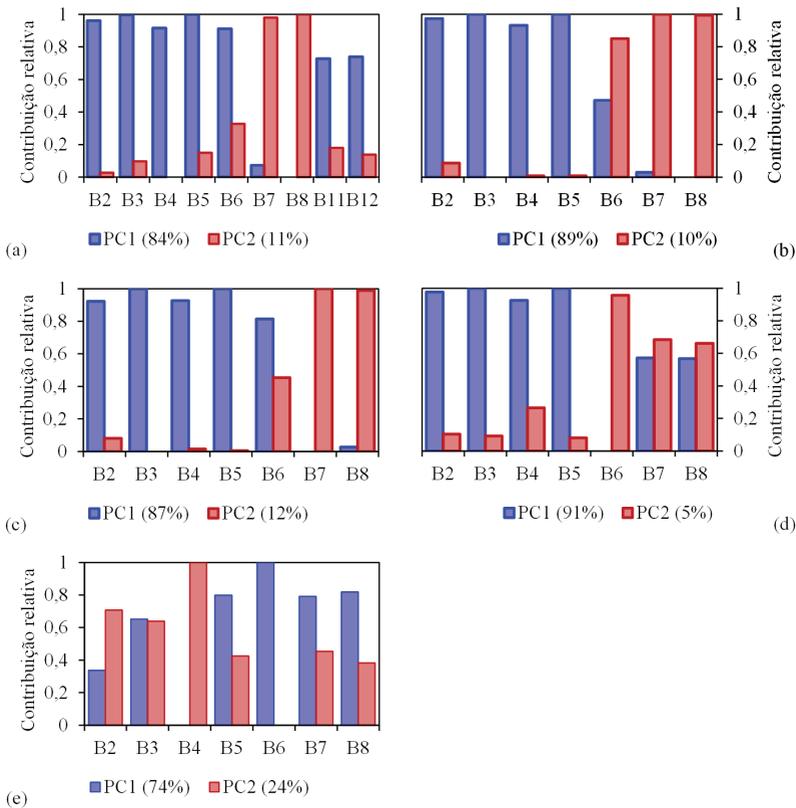
**Figura 43.** Valores de NDVI foliar de plantas de soja na ausência e na presença de percevejo-marrom (a) e NDVI no nível do dossel da soja sob diferentes populações de percevejo-marrom em dois tempos de infestação (b). As barras de erro referem-se ao Erro Padrão da Média.

Diferentemente dos resultados observados sob déficit hídrico e nutricional e também sob ocorrência de ferrugem-asiática, o NDVI no nível do dossel da soja sob a presença de percevejo-marrom apresentou baixa magnitude devido ao fato de que a presença do percevejo-marrom não resulta na diminuição da biomassa, redução da área foliar ou mudança significativa nos padrões de cores das folhas.

## Contribuição de bandas espectrais para a caracterização de estresses bióticos e abióticos em soja

Os dados coletados pelo sensor Fieldspec 3 Jr., no nível foliar, foram reamostrados para as bandas espectrais Vis-NIR-SWIR (B2, azul; B3, verde; B4, vermelho; B5 *red-edge* 1; B6, *red-edge* 2; B7, *red-edge* 3; B8, NIR; B11, SWIR 1; e B12, SWIR 2) do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2, conforme abordado por Crusiol et al. (2022) e submetidos à Análise de Componentes Principais no software *The Unscrambler*® (CAMO Software - Norway), onde avaliou-se a contribuição relativa de cada banda espectral para a caracterização da resposta da soja, aos fatores fontes de estresse correspondentes. A modelagem PLSR (Regressão por Mínimos Quadrados Parciais), realizada por meio do software *The Unscrambler*® (CAMO Software - Norway), foi utilizada para avaliar o poder preditivo de cada banda espectral na estimativa de atributos como teor nutricional foliar e produtividade da soja.

Buscando uma representação espectral mais fidedigna das reais condições de desenvolvimento da cultura da soja, livre das influências do IAF e da biomassa sobre os valores de NDVI no nível do dossel, a Figura 44 apresenta os resultados da análise de componentes principais, onde as curvas espectrais das Figuras 25, 26, 30, 34, 38 e 41 foram reamostradas para as bandas espectrais compatíveis com o satélite Sentinel-2. Nessas análises, foi avaliada a contribuição relativa de cada uma dessas bandas para o agrupamento das: condições hídricas (a), severidades de ferrugem-asiática (b), deficiência de K<sup>+</sup> (c), deficiência de macro e micronutrientes (d) e presença de percejo-marrom (e).



**Figura 44.** Contribuição relativa das bandas espectrais compatíveis com o satélite Sentinel-2 no nível foliar para a primeira (PC1) e a segunda (PC2) componente principal na análise de agrupamento da resposta espectral foliar da soja sob distintas: condições hídricas (a), severidades de ferrugem-asiática (b), deficiência de K<sup>+</sup> (c), deficiência de macro e micronutrientes (d) e presença de percevejo-marrom (e).

Sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (Figura 44a), para a primeira componente principal (PC1), os resultados demonstram que 84% da variabilidade espectral das condições hídricas pôde ser explicado pela contribuição majoritária das bandas azul, verde, vermelho e *red-edge*, com comprimentos de onda entre 460 nm e

747 nm (B2 a B6); além das bandas 11 e 12, reconhecidas por sua relação direta com o conteúdo de água na folha. O efeito residual dessa variabilidade espectral (11%) apresentou grande contribuição das bandas do infravermelho-próximo (B7 e B8).

Sob diferentes severidades de ferrugem-asiática (Figura 44b), os resultados demonstram que 89% da variabilidade espectral das condições hídricas pôde ser explicado pela PC1, com contribuição majoritária das bandas azul, verde, vermelho e *red-edge*, com comprimentos de onda entre 460 nm e 711 nm (B2 a B5). A PC2, associada a 10% da variabilidade espectral, apresentou ampla contribuição das bandas do *red-edge* e infravermelho-próximo (B6, B7 e B8).

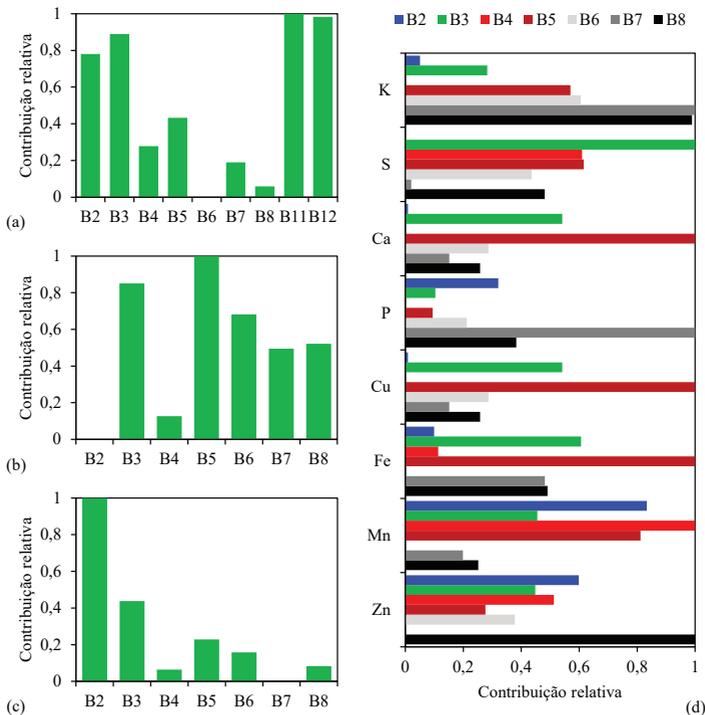
Sob diferentes gradações de deficiência de K<sup>+</sup> (Figura 44c), a PC1, responsável por 87% da variabilidade espectral, teve maiores contribuições das bandas do espectro visível e *red-edge* (B2 a B6), com comprimentos de onda entre 460 nm e 747 nm. A variabilidade espectral residual (12%), representada pela PC2, teve grande contribuição das bandas do infravermelho-próximo (B7 e B8).

Sob a deficiência de macro e micronutrientes (elemento faltante - Figura 44d), a PC1 pôde explicar 91% da variabilidade espectral, sob grande contribuição das bandas visível e *red-edge* (B2 a B5) e relativa contribuição das bandas infravermelho-próximo (B7 e B8). Maiores contribuições das bandas NIR e também da banda 6 foram observadas somente na segunda componente principal, responsável por apenas 5% da variabilidade espectral.

Sob a presença de percevejo-marrom (Figura 44E) a banda vermelho (B4) apresentou a menor contribuição para a PC1, correspondente a 74% da variabilidade espectral, ao passo que as bandas B6, B7 e B8 apresentaram maior contribuição. Na PC2, a banda vermelho (B4) apresentou maior contribuição na variabilidade espectral residual (24%).

Esses resultados evidenciam a possibilidade de novos modelos espectrais para diagnóstico de estresses bióticos e abióticos em soja serem desenvolvidos a partir de diferentes bandas espectrais, e não somente pelas tradicionais bandas vermelho e infravermelho-próximo usadas para o cálculo do NDVI.

De forma similar, a Figura 45 apresenta a contribuição relativa das bandas espectrais para estimativa de variáveis de interesse agrônomo sob a modelagem PLSR. Para a estimativa de produtividade de soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (Figura 45a), evidencia-se as maiores contribuições relativas nas bandas azul, verde e SWIR (B2, B3, B11 e B12, respectivamente). Para a estimativa de produtividade da soja sob diferentes níveis de  $K^+$  (Figura 45b), evidenciam-se as maiores contribuições nas bandas verde e *red-edge* (B3 e B5), sendo que a banda vermelho (B4) apresentou pequena contribuição.



**Figura 45.** Contribuição relativa das bandas espectrais no nível foliar, compatíveis com o satélite Sentinel-2, para a estimativa de variáveis de interesse agrônomo sob a modelagem PLSR: produtividade da soja sob diferentes condições de disponibilidade hídrica (a) e de  $K^+$  (b); teor foliar de  $K^+$  (c) e de diferentes macro e micronutrientes (d).

As contribuições dessas bandas espectrais para estimativa do potássio foliar sob modelagem PLSR estão apresentadas na Figura 45c e demonstram ampla contribuição das bandas azul, verde e *red-edge*; ao passo que mínimas contribuições foram observadas para as bandas vermelho e infravermelho-próximo, usadas para o cálculo do NDVI. A contribuição das bandas espectrais compatíveis com o satélite Sentinel-2 para estimativa do teor foliar de diferentes macro e micronutrientes está apresentada na Figura 45d. Os resultados apontam que cada nutriente tem contribuição diferenciada das diferentes bandas espectrais. Ou seja, cada banda apresenta maior ou menor potencial na estimativa do teor foliar de um determinado nutriente.

Os resultados obtidos apontam que modelos de estimativa de variáveis de interesse agrônômico podem ser desenvolvidos com o uso simultâneo de diferentes bandas, minimizando a dependência do uso do NDVI e também demais índices que forneçam informações similares, sobretudo no nível do dossel, onde sofrem ampla influência do solo e da palhada até o fechamento das entrelinhas de plantio.

## Usos potenciais do NDVI para monitoramento da soja

---

Ao longo das seções anteriores, buscou-se evidenciar que variações nos valores de NDVI medido no nível do dossel ocorrem majoritariamente em função de variações da cobertura do solo, sendo que estresses bióticos e abióticos resultam em alterações diminutas nos valores de NDVI foliar da soja. A partir desse comportamento, objetivava-se, na presente seção, apresentar usos potenciais para o NDVI no nível do dossel (incluindo VANTs e satélites) para o monitoramento da soja.

Dada a sensibilidade do NDVI no nível do dossel à presença de vegetação, tem-se no mapeamento de áreas vegetadas o principal potencial para o uso do NDVI no nível do dossel. Associados às variações de cobertura do solo, valores de NDVI no nível do dossel ao longo do tempo permitem caracterizar a sazonalidade da vegetação presente em uma área, permitindo a identificação de floretas perenes, pastagens e cultivos agrícolas. Por meio de uma densa série temporal de valores de NDVI e considerando o ciclo médio das culturas agrícolas, tem-se a possibilidade de mapeamento de diferentes culturas agrícolas (Crusiol et al., 2021d).

Nesse contexto, o NDVI no nível do dossel tem elevado potencial para indicar a emergência das lavouras implantadas e o acréscimo de biomassa, tornando possível a estimativa da data de semeadura. Se no início da safra, e nas mensurações subsequentes, o NDVI no nível do dossel apresenta ampla variabilidade, tem-se um indicativo de variabilidade no acréscimo de biomassa, o que sugere a ação de fatores limitantes ao pleno desenvolvimento da soja, como estresses bióticos e abióticos que afetam o estande da lavoura. De tal variabilidade, pode-se, ainda, fazer inferências para a delimitação de zonas de manejo com uso diferenciado de insumos.

Já no final do ciclo, o decréscimo nos valores de NDVI no nível do dossel indica a senescência da lavoura de soja. Essa senescência

pode sofrer antecipação quando ocorrem estresses ao longo da safra. Logo, a variabilidade espacial no decréscimo do NDVI no nível do dossel pode, novamente, fornecer subsídios para o monitoramento da variabilidade e inferências sobre a delimitação de zonas de manejo, tanto em avaliações específicas quanto em avaliações para monitoramento da estabilidade de áreas de produção ao longo do tempo.

Ou seja, sempre que houver limitações ao pleno crescimento da vegetação, com impactos na biomassa e na cobertura do solo, o NDVI no nível do dossel tende a apresentar diminuição. Essa diminuição poderá, então, apresentar uma associação com a fonte de estresse limitante, não tendo, porém, eficiência para a identificação e o diagnóstico do fator limitante.

Outra importante aplicação dos valores de NDVI do dossel obtidos por VANT é o mapeamento de plantas daninhas antes da semeadura da soja, subsidiando a elaboração de mapas de aplicação localizada de herbicidas, o que garante redução de custos e passivos ambientais.

Atenção merece ser dada ainda à associação entre o NDVI no nível do dossel e valores de produtividade da soja. Muitos estresses bióticos e abióticos podem causar a diminuição tanto da biomassa quanto da produtividade; enquanto que outros estresses fisiológicos não apresentam resposta direta entre produtividade e biomassa. Logo, associações entre NDVI no nível do dossel e os valores de produtividade podem incorrer em grandes erros, fornecendo informações inconclusivas para a tomada de decisão em relação às práticas culturais.

## Considerações finais

---

A presente publicação é derivada da reunião de dados espectrais coletados em diferentes experimentos conduzidos na Embrapa Soja, na Universidade Estadual de Maringá e em áreas de parceiros entre as safras 2010/2011 e 2023/2024 com o objetivo de demonstrar que variações nos valores de NDVI da soja, coletados no nível do dossel ocorrem, de forma majoritária, em função do percentual de cobertura do solo, da biomassa e da área foliar, e com magnitude diminuta em função de estresses fisiológicos, como deficiência hídrica e nutricional, ocorrência de doenças e presença de insetos.

Dessa forma, o nível de aquisição de NDVI desempenha um papel fundamental para o monitoramento da soja. Isso porque sensores no nível do dossel, como aqueles a bordo de satélites, VANTs e plataformas em campo, sofrem ampla influência da exposição do solo e da palhada, impactando as informações obtidas. Dados obtidos por VANT apresentam a vantagem de possibilidade de remoção dos pixels de solo, palhada e sombra da imagem, traduzindo o real comportamento espectral das plantas de soja.

Muito embora a presente publicação seja dedicada a ponderar a utilização do NDVI para o monitoramento da soja, o determinante papel da cobertura do solo deve ser sempre considerado na utilização dos mais diversos índices de vegetação, ponderando sempre se a resposta espectral obtida é inerente às plantas de soja ou à mistura espectral com solo, palhada e demais objetos que possam estar dispostos na área de interesse.

Hoje, cinquenta anos após sua formulação, o NDVI permanece como um dos mais importantes indicadores da variabilidade espacial em culturas agrícolas, porém, com interpretação muitas vezes enviesadas em relação às reais informações extraídas das lavouras de soja, uma vez que seus valores são diretamente dependentes da cobertura do solo e não necessariamente das condições às quais as plantas estão submetidas.

Quase 50 anos depois do texto escrito por Landgrebe (1976) e assim como ele fez uma avaliação sobre os avanços tecnológicos obtidos na década anterior ao seu escrito, demonstra-se agora os amplos avanços técnico-científicos obtidos, em que sensores multiespectrais são, atualmente, realidade na aquisição de dados nos níveis orbital, aéreo e de campo. Os dados apresentados na presente publicação permitem que nos perguntemos de que forma os conhecimentos gerados décadas atrás estão sendo aplicados às atuais características dos sistemas de produção de soja e como serão aplicados nos próximos anos.

Espera-se, assim, que a presente publicação contribua para disciplinar o uso do NDVI para o monitoramento agrícola para que o índice não caia em descrença pelos setores ligados à cadeia produtiva da soja. Disciplinar o uso do NDVI para o monitoramento da soja na era digital contribuirá para fornecer à agricultura brasileira uma ferramenta digital eficiente para o monitoramento da cobertura do solo nos sistemas de produção de soja. Disciplinar o uso do NDVI permite, ainda, expandir o horizonte da pesquisa agrícola para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de novas ferramentas e técnicas espectrais que possam conferir maior assertividade à estimativa de variáveis de interesse agrônomo e ao diagnóstico em campo.

## Referências

---

5 REASONS to Love 'Mad Mens's' New Star: The IBM 360. NBC News, 9 May 2014. Disponível em: <https://www.nbcnews.com/tech/gadgets/5-reasons-love-mad-mens-new-star-ibm-360-n101716>. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRAGA, P.; CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; CARANHATO, A. L. H.; FUHRMANN, M. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; KOLTUN, A.; GONÇALVES, L. S. A.; MERTZ-HENNING, L. M. Vegetation indices and NIR-SWIR spectral bands as a phenotyping tool for water status determination in soybean. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 249-266, 2021.

CARVALHO, J. de F. C.; CRUSIOL, L. G. T.; PERINI, L. J.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, L. C.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Phenotyping soybeans for drought responses using remote sensing techniques and non-destructive physiological analysis. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 2, p. 1-16, 2015.

COLWELL, J. E. Grass canopy bidirectional spectral reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9., 1974, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: ERIM, University of Michigan, 1974. p. 1061-1085.

CRUSIOL, L. G. T.; BRAGA, P.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Using leaf-based hyperspectral reflectance for genotype classification within a soybean germplasm collection assessed under different levels of water availability. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 21, p. 8165-8184, 2021a.

CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. de F. C.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEIVERTH, W.; RIO, A. do; FERREIRA, L. C.; PROCOPIO, S. de O.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. NDVI variation according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 4. p. 470-490, 2017.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. UAV-based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 9, p. 3243-3265, 2020.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Classification of soybean genotypes assessed under different water availability and at different phenological stages using leaf-based hyperspectral reflectance. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, 172, 2021b. 24 p.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; CEZAR, E.; SUN, L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Yield prediction in soybean crop grown under different levels of water availability using reflectance spectroscopy and partial least squares regression. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, 977, 2021c. 20 p.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SIBALDELLI, R. N. R.; SUN, L.; GONCALVES, S. L.; FOLONI, J. S. S.; MERTZ-HENNING, L. M.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Assessing the sensitive spectral bands for soybean water status monitoring and soil moisture prediction using leaf-based hyperspectral reflectance. **Agricultural Water Management**, v. 277, 108089, 2023. 17 p.

CRUSIOL, L. G. T.; SIBALDELLI, R. N. R.; NANNI, M. R.; FRANCHINI, J. C.; FARIAS, J. R. B. **Conceitos e definições de sensoriamento remoto para monitoramento da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2024. 42 p. (Embrapa Soja. Documentos, 461).

CRUSIOL, L. G. T.; SUN, L.; CHEN, R.; SUN, Z.; ZHANG, D.; CHEN, Z.; WUYUN, D.; NANNI, M. R.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Assessing the potential of using high spatial resolution daily NDVI-time-series from planet CubeSat images for crop monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 18, p. 7114-7142, 2021d.

CRUSIOL, L. G. T.; SUN, L.; SIBALDELLI, R. N. R.; FELIPE JUNIOR, V.; FURLANETI, W. X.; CHEN, R.; SUN, Z.; WUYUN, D.; CHEN, Z.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; CEZAR, E.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Strategies for monitoring within-feld soybean yield using Sentinel-2 Vis-NIR-SWIR spectral bands and machine learning regression methods. **Precision Agriculture**, v. 23, p. 1093-1123, 2022.

FAZAM, J. C. **Comportamento espectral de plantas de soja submetidas a diferentes níveis de infestação do percevejo-marrom *Euschistus heros* (Fabricius) (Hemiptera: Pentatomidae)**. 2018. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80).

FINCH JR, W. A. NASA - EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1: **Symposium Proceedings**, 1972. Greenbelt: NASA, 1973.

FIRMANO R. F.; MELO, V. de F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Soybean and soil potassium pools responses to long-term potassium fertilization and deprivation under no-till nutrient management & soil & plant analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, p. 1819-1829, 2019.

FIRMANO, R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Potassium rates on the cationic balance of an Oxisol and soybean nutritional status after 8 years of K deprivation. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 293-311, 2020.

FIRMANO, R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. Potassium management over 60 crops: a long-term study on an Oxisol under no-till. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 478-489, 2021.

FURLANETTO, R. H.; CRUSIOL, L. G. T.; GONÇALVES, J. V. F.; NANNI, M. R.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; OLIVEIRA, F. A. de; SIBALDELLI, R. N. R. Machine learning as a tool to predict potassium concentration in soybean leaf using hyperspectral data. **Precision Agriculture**, v. 24, p. 2264-2292, 2023.

FURLANETTO, R. H.; NANNI, M. R.; MIZUNO, M. S.; CRUSIOL, L. G. T.; SILVA, C. R. da. Identification and classification of Asian soybean rust using leaf-based hyperspectral reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 11, p. 4177-4198, 2021.

GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; CANTERI, M. G. Escala diagramática para avaliação da severidade da ferrugem da soja. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, p. 63-68, 2006.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

LANDGREBE, D. Computer-based remote sensing technology-a look to the future. **Remote Sensing of Environment**, v. 5, p. 229-246, 1976.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. da S. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja**. Paiçandu: Fortgreen; Londrina: Embrapa Soja, 2016. 1 cartaz, color., 70 cm x 100 cm.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

RODRIGUES, L. V.; ROGGIA, S.; CRUSIOL, L. G.; CAVALLARI, L. S.; PEREIRA, J. P. V.; FERRARI, F. Teor de clorofila e NDVI de soja em resposta ao ataque do percevejo-marrom, *Euschistus heros*. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 8., 2013, Londrina. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2013. p. 129-132. (Embrapa Soja. Documentos, 339).

ROUSE JR, J. W.; HAAS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt: NASA, 1973. 120 p. (Progress Report RSC 1978-1, NASA-CR-132982).

ROUSE JR, J. W.; HAAS, R. H.; DEERING, D. W.; SCHELL, J. A.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt: NASA, 1974b. 390 p. (Progress Report RSC 1978-4, NASA-CR-144661).

ROUSE JR, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. NASA Special Publication, v. 351, n. 1, p. 309-317, 1974a.

SAKAMOTO, T. Incorporating environmental variables into a MODIS-based crop yield estimation method for United States corn and soybeans through the use of a random forest regression algorithm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 160, p. 208-228, 2020.

SANTOS, G. L. A. A. dos; REIS, A. S.; BESEN, M. R.; FURLANETTO, R. H.; RODRIGUES, M.; CRUSIOL, L. G. T.; OLIVEIRA, K. M. de; FALCIONI, R.; OLIVEIRA, R. B. de; BATISTA, M. A.; NANNI, M. R. Spectral method for macro and micronutrient prediction in soybean leaves using interval partial least squares regression. **European Journal of Agronomy**, v. 143, 126717, 2023.

TUCKER, C. J. A spectral method for determining the percentage of green herbage material in clipped samples. **Remote Sensing of Environment**, v. 9, n. 2, p. 175-181, 1980.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

TUCKER, C. J. Spectral estimation of grass canopy variables. **Remote Sensing of Environment**, v. 6, n. 1, p. 11-26, 1977.

TUCKER, C. J.; ELGIN JR, J. H.; MCMURTREY III, J. E.; FAN, C. J. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 3, p. 237-248, 1979.

USGS - United States Geological Survey. **Landsat missions: Landsat 1.** : Washington, 2024. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1>. Acesso em: 24 abr. 2024.

