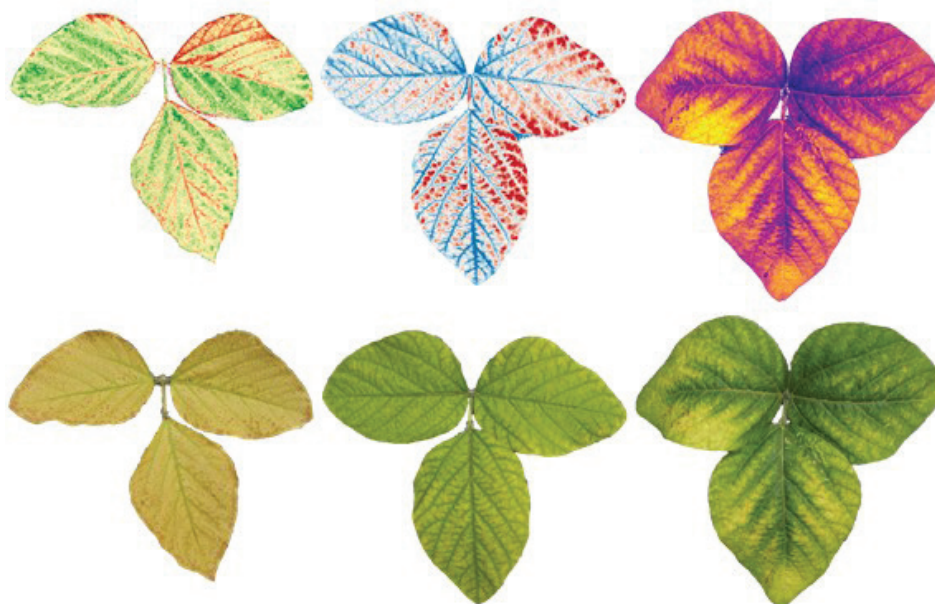


Documentos

Londrina, PR / Abril, 2024

Conceitos e definições de sensoriamento remoto para monitoramento da soja



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

ISSN 2176-2937

Documentos 461

Abril, 2024

Conceitos e definições de sensoriamento remoto para monitoramento da soja

*Luís Guilherme Teixeira Crusiol
Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli
Marcos Rafael Nanni
Julio Cezar Franchini
José Renato Bouças Farias*

***Embrapa Soja
Londrina, PR
2024***

Embrapa Soja	Publicação digital: PDF
Rod. Carlos João Strass, s/n	
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta	Edição executiva
CEP 86065-981	<i>Vanessa Fuzinato Dall'Agnol</i>
Caixa Postal 4006	
Londrina, PR	Revisão de texto
Fone: (43) 3371 6000	<i>Regina Maria Villas Bôas de Campos</i>
www.embrapa.br/soja	<i>Leite</i>
www.embrapa.br/fale-conosco/sac	
Comitê Local de Publicações da Embrapa	Normalização
Soja	<i>Valéria de Fátima Cardoso</i>
	(CRB-9/1188)
Presidente	Projeto gráfico
<i>Adeney de Freitas Bueno</i>	<i>Leandro Sousa Fazio</i>
Secretária-executiva	Diagramação
<i>Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite</i>	<i>Marisa Yuri Horikawa</i>
	Foto da capa
Membros	<i>Luís Guilherme Teixeira Crusiol</i>
<i>Claudine Dinali Santos Seixas, Clara Beatriz</i>	
<i>Hoffmann-Campo, Fernando Augusto</i>	
<i>Henning, Ivani de Oliveira Negrão Lopes,</i>	
<i>Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Maria</i>	
<i>Cristina Neves de Oliveira, Mônica Juliani</i>	
<i>Zavaglia Pereira e Norman Neumaier</i>	

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)

Nome-síntese da Unidade catalogadora

Conceitos e definições de sensoriamento remoto para monitoramento da soja / Luís Guilherme Teixeira Crusiol ... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2024.
42 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2 937 ; n. 461).

1. Sensoriamento remoto. 2. Georreferenciamento. I. Crusiol, Luís Guilherme Teixeira. II. Sibaldelli, Rubson Natal Ribeiro. III. Nanni, Marcos Rafael. IV. Franchini, Julio Cezar. V. Farias, José Renato Bouças. VI. 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

Marcos Rafael Nanni

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

Julio Cezar Franchini

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

José Renato Bouças Farias

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

Apresentação

O Brasil tem apresentando inserção cada vez maior no mercado agrícola mundial. Com isso, a busca por informações que levem a decisões assertivas e rápidas no meio agrícola, promovendo maior sustentabilidade dos sistemas de produção, tem se mostrado presente e urgente. Na última década o Brasil se consolidou entre os maiores produtores e exportadores de alimentos, fibras e bioenergia, desempenhando papel relevante na segurança alimentar no planeta. Em 2023, as exportações do agronegócio brasileiro somaram US\$ 166 bilhões, ou 49% do total exportado, sendo o complexo soja responsável por 40% das exportações do setor.

O sensoriamento remoto tem atraído a atenção da cadeia produtiva da soja pela possibilidade de facilitar a mensuração e avaliação de parâmetros biofísicos e bioquímicos, através da coleta rápida de informações em larga escala, que permitam essa correta e sustentável tomada de decisões. Esta técnica permite a obtenção, através de sensores, de informações na superfície terrestre em alvos como a soja.

O emprego de ferramentas digitais com o uso de imagens, obtidas por VANTs, satélites e sensores proximais, tem expandido o horizonte de tais ferramentas para subsidiar a tomada de decisões, porém se faz necessária a avaliação das condições das plantas e o entendimento das condições as quais estas estão submetidas, para que a interpretação e definição das decisões sejam assertivas e estratégicas.

Este uso pode ir além de uma visão sinótica, uma análise visual das imagens coletadas, partindo-se para uma análise dos fatores bióticos e abióticos que possam interferir, ou mesmo caracterizar, na resposta da soja a diferentes fatores que impactam a sua produção.

Considerando a expressividade da produção nacional e mundial de soja, com reflexos diretos na produção de alimentos e dinâmica econômica, é importante conferir ao sensoriamento remoto um olhar pautado no conhecimento científico, buscando o desenvolvimento e validação de tecnologias, produtos e serviços que, ao serem

disponibilizados à sociedade brasileira, possam contribuir para o efetivo monitoramento dos diferentes sistemas de produção de soja.

Face a isto, a Embrapa Soja vem, através deste documento, entregar à sociedade brasileira uma conceituação e definição técnico-científica do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da soja, com a esperança de que as imagens coletadas pelos diversos níveis de sensores (terrestres, aéreos e orbitais) sejam transformadas ou convertidas em informações fidedignas e relevantes à agricultura nacional.

Alexandre Lima Nepomuceno

Chefe-geral
Embrapa Soja

Sumário

Introdução	9
Sensoriamento remoto	10
Comportamento espectral da cultura da soja	14
Alterações espectrais na soja em função de estresses fisiológicos	16
Comportamento espectraltemporal da cultura da soja	19
Processo de formação de uma imagem	23
Classificação dos sensores remotos	25
Quanto à fonte de radiação eletromagnética	25
Quanto ao produto disponibilizado	26
Quanto ao número de bandas espectrais	26
Quanto ao nível de aquisição de dados	28
Resoluções dos sensores remotos	29
Resolução espacial	29
Resolução temporal	31
Resolução espectral	32
Resolução radiométrica	34
<i>Trade-off</i> entre as resoluções espacial, temporal e espectral	35
Uso de índices de vegetação	36
Considerações finais	39
Referências	40

Introdução

A produção de soja no Brasil mostra-se, dia após dia, mais dinâmica, buscando informações que levem à rápida e correta tomada de decisões para maior sustentabilidade dos sistemas agrícolas e maximização da produtividade. Dados consolidados para a safra 2022/2023 mostram que a soja foi plantada em 44 milhões de ha, com produção total de 154 milhões de toneladas (Conab, 2023).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem atraído olhares de diversos setores ligados à cadeia de produção da soja pois viabiliza a aquisição de informações sobre as condições de desenvolvimento das lavouras em tempo hábil para a tomada de decisões em relação às práticas culturais e políticas públicas.

Na era da agricultura digital o uso de imagens aéreas obtidas por VANTs (veículo aéreo não tripulado), comumente chamados de drones, expandiu o horizonte de aplicações de sensoriamento remoto na agricultura. Entretanto, para descrever as condições às quais as plantas em campo estão submetidas, é preciso que os dados coletados sejam convertidos em informação.

Tendo em vista a difusão do sensoriamento remoto para o monitoramento de sistemas de produção agrícolas, a presente publicação tem o objetivo de interpretar os conceitos e definições técnico-científicas do sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento da soja. Dessa forma, espera-se contribuir com produtores, agentes de assistência técnica e extensão, professores, pesquisadores e estudantes para fomentar a aplicabilidade dos sensores e técnicas utilizados, permitindo a aquisição de informações estratégicas para a agricultura brasileira.

Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é definido como a área do conhecimento dedicada à obtenção, por intermédio de um sensor, de informações dispostas na superfície terrestre por meio da interação da radiação eletromagnética com alvos de interesse sem a exigência do contato direto com as plantas (culturas agrícolas), conforme ilustrado na Figura 1. A principal fonte de radiação eletromagnética (REM) é a luz solar. Fontes artificiais de REM também são utilizadas em equipamentos operados sobretudo em campo e laboratório.

O termo sensoriamento remoto foi cunhado, pela primeira vez, pela pesquisadora em geografia da Marinha Americana, Evelyn L. Pruitt, nos anos 1950.

Para facilitar a compreensão dos conceitos de sensoriamento remoto para monitoramento da soja, iremos nos referir às folhas ou plantas de soja como ‘alvo’. A resposta espectral diferencial entre folha e dossel vegetal será discutida nas seções seguintes.

Quando incide sobre um alvo, a REM apresenta três formas de interação: absorção, reflexão e transmissão. Ou seja, o fluxo de energia incidente sobre um alvo, chamado de irradiância, pode ser absorvido pela planta, refletido ou ainda transmitido.

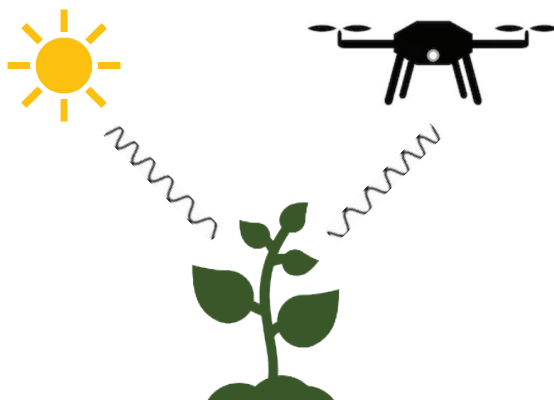


Figura 1. Representação da interação entre Radiação Eletromagnética ↔ Planta ↔ Sensor.

Considerando que a avaliação da soja ocorre com uso de sensores posicionados acima do dossel da vegetação, como drones, VANTs (veículo aéreo não tripulado) ou satélites, o estudo do fluxo refletido da REM torna-se mais viável, visto que o estudo da absorção e transmissão demandaria o uso de sensores posicionados abaixo do dossel vegetal, situação que implicaria no aumento do tempo de coleta de dados e dificultaria a utilização do sensoriamento remoto em larga escala. Assim, atenção especial será dada ao fluxo de REM refletido por plantas de soja, denominado de radiância.

A radiância de um alvo é diretamente proporcional à intensidade de energia incidente sobre ele (irradiância). Logo, com exceção de ambientes controlados, como laboratórios, a radiância de um alvo é dependente das condições de iluminação, podendo ser alterada ao longo do dia e também ao longo dos dias, por exemplo durante a safra agrícola. Tal variação limita o estudo do comportamento espectral da soja.

Assim, com o objetivo de normalizar as interferências oriundas das condições de iluminação, os valores de radiância são rotineiramente convertidos em reflectância. A reflectância é resultado da razão da radiância do alvo (dossel vegetal ou folha), pela radiância de uma superfície de referência, e é expressa em porcentagem. Essa normalização pode ser também aplicada aos fluxos de energia absorvidos e transmitidos pelas plantas (ainda que inviável para o monitoramento da soja em larga escala), permitindo a aquisição de grandezas denominadas respectivamente de absortância e transmitância, conforme ilustrado na Figura 2. Enquanto valores de radiância são dependentes das condições de iluminação, a reflectância (expressa em porcentagem, ou fator de reflectância escalonado de 0 a 1) é invariável, sendo, portanto inerente aos objetos de estudo (como vegetação, solos, corpos hídricos).

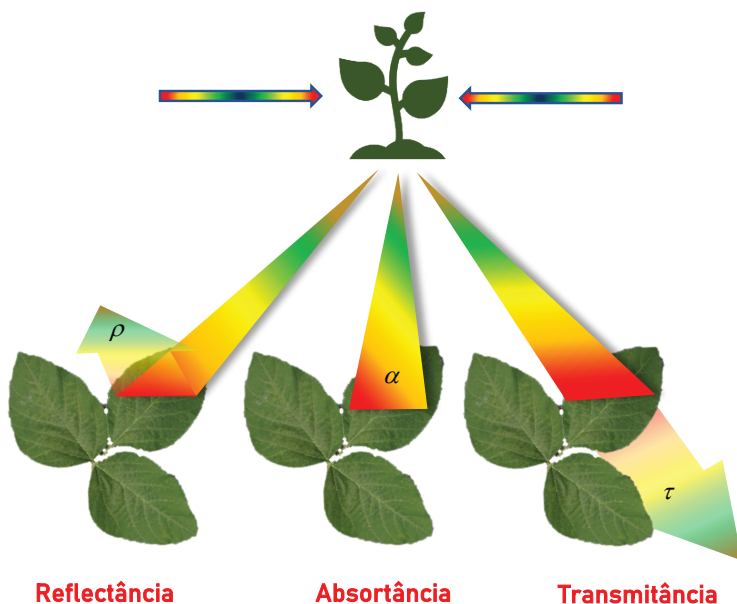


Figura 2. Representação dos fluxos de energia da interação da Radiação Eletromagnética com a planta.

Compreendida a definição de sensoriamento remoto e as formas de interação da radiação eletromagnética com as plantas, faz-se necessário compreender as características de propagação da REM.

A radiação eletromagnética se propaga em diferentes comprimentos de onda, sendo que cada um deles interage com a vegetação com características singulares de absorção, reflexão e transmissão. Essas interações, para cada comprimento de onda, permitem o estudo do comportamento espectral de alvos, como a soja, e possibilitam a obtenção de informações sobre suas condições de desenvolvimento.

Todos os comprimentos de onda da REM compõem o chamado espectro eletromagnético (Figura 3), 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 estrutura celular (Jensen, 2009).

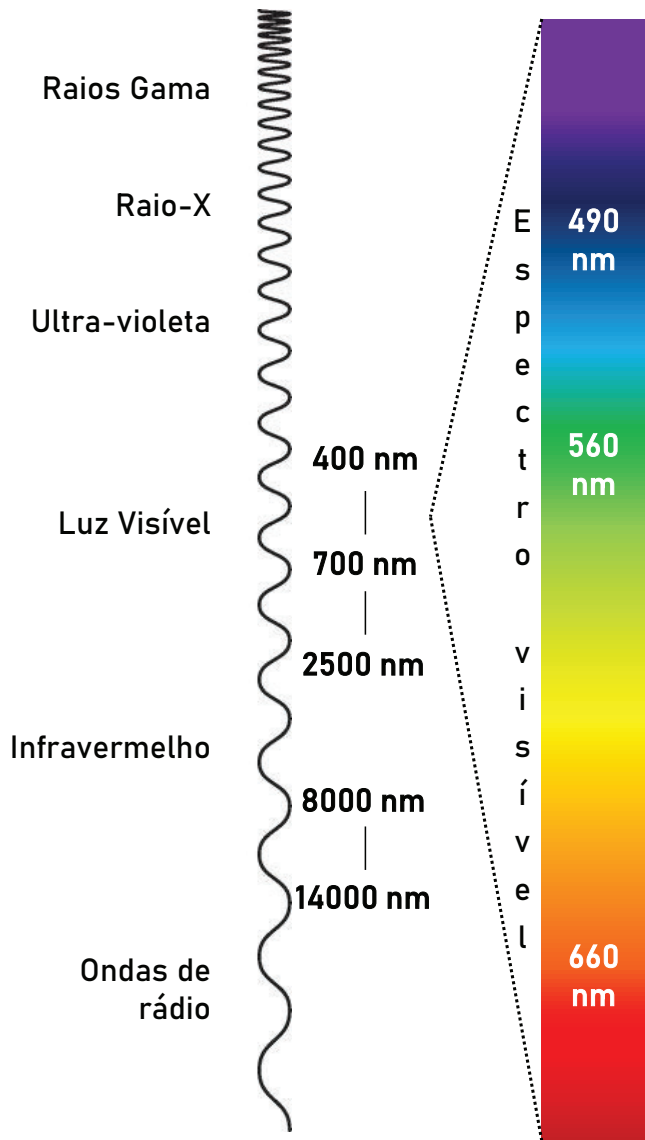


Figura 3. Espectro eletromagnético com destaque no espectro visível de 400 a 700 nm.

Comportamento espectral da cultura da soja

O comportamento espectral característico da cultura da soja em condições de campo está apresentado na Figura 4. Embora não existam limites rígidos definidos sobre o início e término de uma banda ou faixa espectral, estabelece-se que o espectro visível se estende de 400 a 700 nm, o espectro infravermelho próximo de 720 a 1300 nm e o infravermelho de ondas curtas de 1300 a 2500 nm. A faixa espectral localizada na transição do espectro visível e infravermelho próximo é denominada de vermelho limítrofe. Há ainda o infravermelho termal, de 8000 a 14000 nm.

O espectro visível (Vis), compreendido entre 400 nm e 700 nm, é fortemente associado ao processo de fotossíntese. Nessa faixa espectral ocorre forte absorção da REM, o que resulta em baixos valores de reflectância. No espectro visível, os intervalos espectrais entre 450 nm e 520 nm (banda azul) e entre os 630 nm a 690 nm (banda vermelho) apresentam maiores inflexões de reflectância devido à absorção da REM pela clorofila (Jensen, 2009). Dada à maior absorção das bandas azul e vermelho em relação à banda verde (próximo aos 550 nm), tem-se a coloração esverdeada da vegetação.

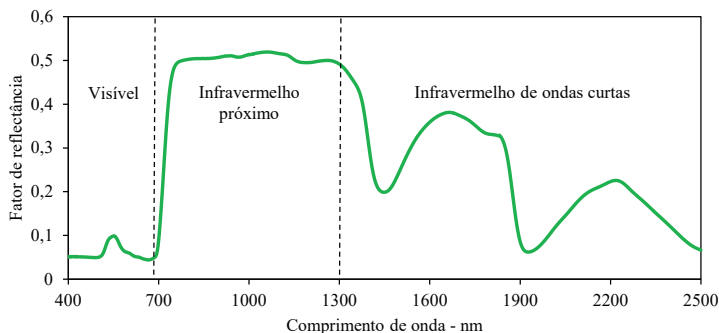


Figura 4. Comportamento espectral da face adaxial de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3 em condições de campo sem restrições de crescimento e desenvolvimento. Dados obtidos por espectrorradiômetro em nível foliar.

Em plantas de soja, e outros tipos de vegetação, o espectro infravermelho próximo (NIR - do inglês *near-infrared*), composto por comprimentos de onda entre 720 nm e 1300 nm, apresenta alta e constante reflectância da vegetação (em torno de 50%). Nessa faixa espectral, o comportamento da reflectância se dá majoritariamente pela interação da REM com às estruturas celulares foliares, resultando em elevado espalhamento interno da radiação, o que contribui para alta reflectância. Assim, a espessura do mesófilo pode interferir diretamente nos valores de reflectância. Além disso, a reflectância no NIR é quase constante devido a maior energia contida nesses comprimentos de onda que, se absorvidos, poderiam resultar no aquecimento das folhas, levando ao seu colapso. Assim, a transmissão e reflexão desses comprimentos de ondas permitem melhor balanço térmico das folhas (Jensen, 2009).

Os comprimentos de onda entre 1300 nm e 2500 nm são denominados de infravermelho de ondas curtas (SWIR, do inglês *shortwave infrared*). A interação da REM com a soja nessa faixa espectral é marcada, principalmente, pelo conteúdo de água na folha. Logo, folhas mais túrgidas, com maior volume de água, apresentam menores valores de reflectância, enquanto aquelas com aspecto murcho apresentam valores mais elevados de reflectância.

Um intervalo espectral que merece destaque no estudo de culturas agrícolas é o infravermelho termal. Compreendendo comprimentos de onda entre 8000 nm e 14000 nm, sua interação com a vegetação não se dá pelo fluxo incidente e refletido, mas sim pela sua emissividade. A faixa de comprimentos de onda do infravermelho termal utilizada em estudos de vegetação depende do nível de aquisição de imagens, sendo que imagens orbitais (obtidas por sensores a bordo de satélites) captam a emissividade entre 10500 nm e 12500 nm e imagens adquiridas por plataformas próximas à superfície (sensores portáteis de campo ou a bordo de VANTs) captam a emissividade entre 8000 nm e 14000 nm (Lorenzetti, 2015).

Alterações espectrais na soja em função de estresses fisiológicos

Em condições de estresses fisiológicos o comportamento espectral da soja tende a ser alterado, expressando maiores valores de reflectância sobretudo na porção visível do espectro eletromagnético. A Figura 5 apresenta o acréscimo percentual na reflectância de folhas de soja sob deficiência hídrica, nutricional, ataque de doença e inseto em relação à planta sem estresse fisiológico.

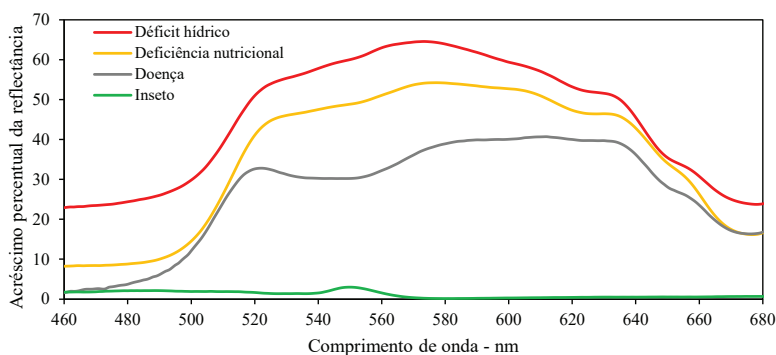


Figura 5. Acréscimo percentual na reflectância da face adaxial de folhas de soja sob deficiência hídrica, nutricional, ataque de doença e inseto em relação à planta sem restrições fisiológicas. Dados obtidos por espectrorradiômetro em nível foliar.

Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2021), Fazam (2018), Furlanetto et al. (2021, 2023).

Isso ocorre devido ao fato de que os principais estresses bióticos e abióticos impactam negativamente a atividade fotossintética. Uma vez que as taxas fotossintéticas sofrem diminuição, ocorre, concomitantemente, a diminuição da absorção dos comprimentos de onda das bandas entre o azul e o vermelho (radiação fotossinteticamente ativa - RFA), resultando em maior reflectância. O vermelho limítrofe (*red-edge*) refere-se à transição da faixa espectral do vermelho para o infravermelho-próximo e, assim como o espectro visível, sofre ampla

influência do fotossistema I, centro de reação com absorção de comprimentos de onda de 700 nm, o qual desempenha papel de destaque no transporte de elétrons da fotossíntese. O NIR apresenta mínima variação espectral em função de diferentes estresses fisiológicos e o comportamento espectral no SWIR é impactado somente se houver alterações no status hídrico da vegetação.

O infravermelho termal constitui-se, assim como o espectro Vis-NIR-SWIR como importante ferramenta no monitoramento da soja uma vez que, sob estresse fisiológico e com alterações na atividade fotossintética, tem-se alterações na transpiração foliar e, consequentemente, no balanço térmico com o ambiente. Logo, a temperatura foliar em condições de estresse tende a ser maior do que em plantas sem restrições fotossintéticas. A Figura 6 apresenta uma imagem termal obtida por câmera infravermelho termal acoplada a VANT em área experimental com a cultura da soja submetida a diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

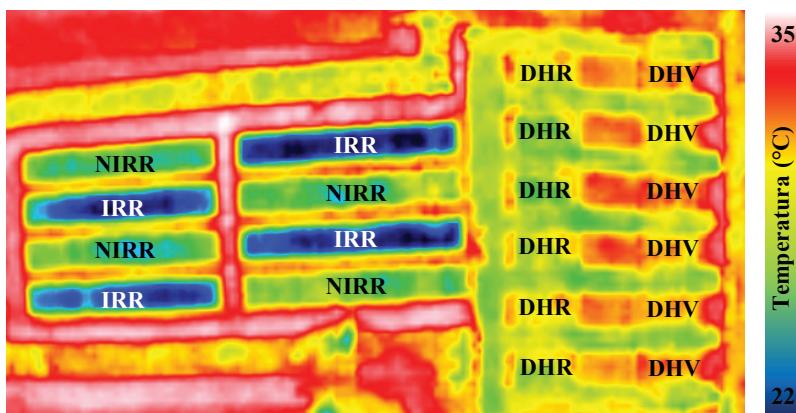


Figura 6. Imagem termal obtida por câmera infravermelho termal acoplada a VANT em área experimental com a cultura da soja submetida a diferentes níveis de disponibilidade hídrica: irrigado (IRR), não irrigado (NIRR), déficit hídrico no período vegetativo (DHV) e déficit hídrico no período reprodutivo (DHR).

Fonte: adaptado de Crusiol et al. (2020).

Nesta imagem, os tratamentos experimentais estão assim representados: irrigado (IRR), não irrigado (NIRR), déficit hídrico no período vegetativo (DHV) e déficit hídrico no período reprodutivo (DHR). Os tratamentos não irrigado (NIRR) e déficit hídrico no período reprodutivo (DHR) estavam sob a mesma condição de disponibilidade hídrica, apresentando valores intermediários de temperatura média do dossel: 29,6 e 30,3 °C respectivamente, representados em coloração verde na imagem. O tratamento irrigado (IRR) havia recebido 14,4 mm de irrigação, apresentando os menores valores de temperaturas médias do dossel (25,5 °C, representados em coloração azul). Tais valores de temperatura do dossel são 6,4 °C inferiores que os 31,9 °C observados nas parcelas do tratamento déficit hídrico no período vegetativo (DHV), o qual encontrava-se em condição simulada de seca, deixando de receber 46,1 mm de precipitação pluviométrica.

Comportamento espectrotemporal da cultura da soja

Ao longo dos estádios fenológicos da soja (Neumaier et al., 2020), a reflectância das plantas de soja tende a apresentar alterações. Dessa forma, são apresentados a seguir o comportamento espectral da soja no espectro Vis-NIR nos estádios vegetativos de desenvolvimento (Figura 7) e estádios reprodutivos de desenvolvimento (Figuras 8 e 9).

No espectro NIR a reflectância demonstra ser constante tanto ao longo de seus comprimentos de onda quanto em relação à fenologia da soja. Alterações mais pronunciadas nessa faixa espectral são observadas apenas quando a planta atinge o estágio R8 de desenvolvimento, com folhas secas e aspecto de palha.

É no espectro visível, entretanto, que alterações espectrais mais pronunciadas são observadas ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja. Desde a emissão da folha unifoliolada (estádio V1) e, avançando ao longo dos estádios vegetativos, há clara diminuição dos valores de reflectância (Figura 7). Esse comportamento espectrotemporal está associado à absorção da radiação fotossinteticamente ativa pelas folhas. Dessa forma, conforme a planta cresce e se desenvolve, aumenta a absorção de RFA para atender as demandas fisiológicas da lavoura e, portanto, diminui-se a reflectância nesse intervalo espectral.

Essa intensificação na absorção da RFA e consequentemente menor reflectância ocorre também ao longo dos estádios reprodutivos (Figura 8). Contudo, quando as plantas de soja se aproximam do pleno enchimento de grãos (estádio R5.5, com granação entre 75 e 100%), diminui-se a demanda fotossintética das plantas e, por consequência, diminui-se a absorção da RFA. Esse processo ocorre pois, após o completo enchimento de grãos, iniciar-se-á o processo de senescência vegetal. Como resultado, tem-se, a partir dessa fase, o aumento da reflectância no espectro visível.

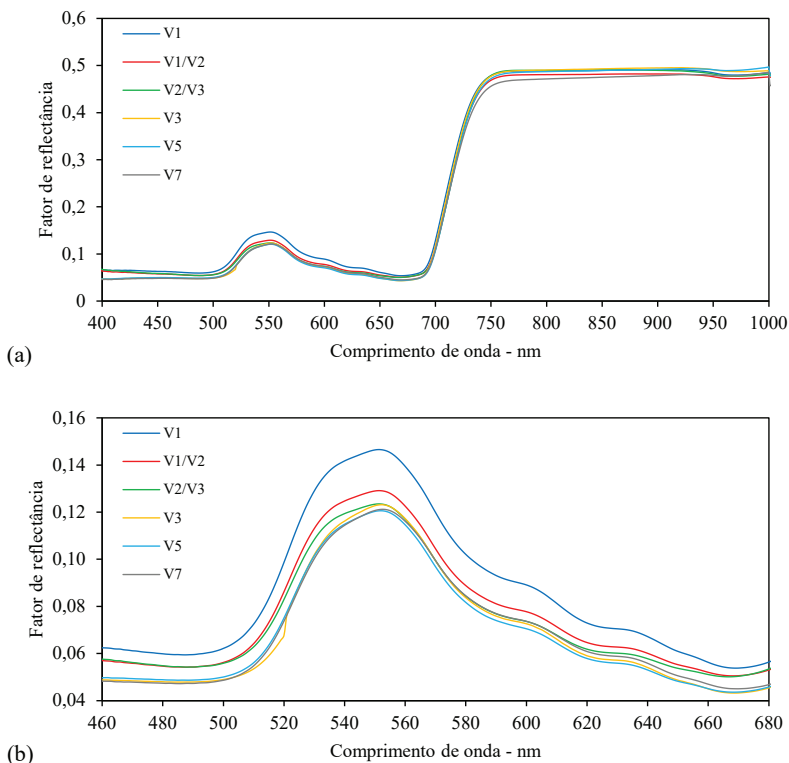


Figura 7. Comportamento espectral da cultura da soja nos espectros visível e infravermelho próximo (a), e com detalhe do espectro visível (b) em função dos estádios vegetativos de desenvolvimento. Dados obtidos por espectrorradiômetro na face adaxial das folhas de soja.

Esse aumento da reflectância foliar no espectro visível durante a senescência vegetal acentua-se à medida que as atividades celulares cessam (Figura 9). Do estágio fenológico R5.5 a R6 ocorre amplo aumento nos valores de reflectância mas mantém-se, ainda, o comportamento espectral típico da vegetação (Figura 4). Já em R7 ocorre ligeira inflexão nos valores de reflectância na faixa do vermelho, próximos aos 670 nm, indicando a diminuição das atividades fisiológicas.

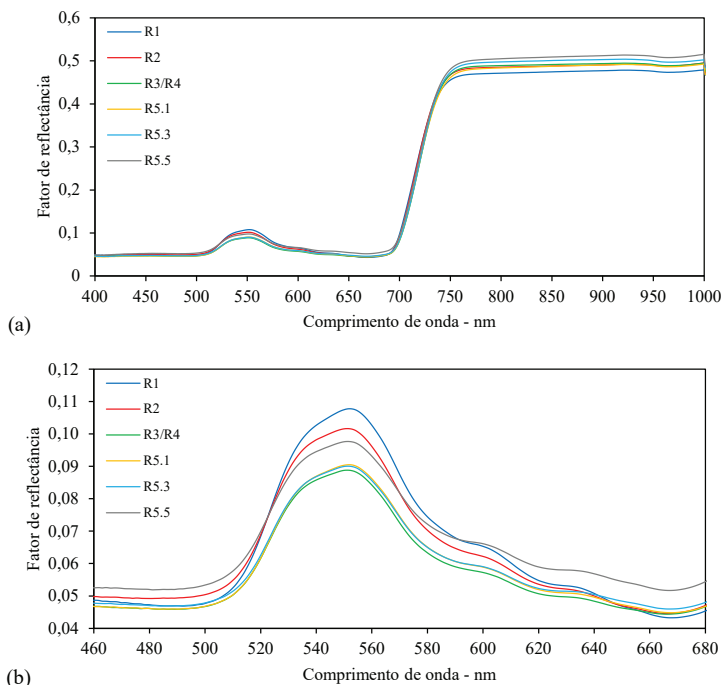


Figura 8. Comportamento espectral da cultura da soja nos espectros visível e infravermelho próximo (a), e com detalhe do espectro visível (b) em função dos estádios reprodutivos de desenvolvimento. Dados obtidos por espectrorradiômetro na face adaxial das folhas de soja.

Por fim, em R8, com a folha seca, já com aspecto de palha, tem-se a completa alteração no padrão de reflectância. Sinclair et al. (1971) atribui à senescência de plantas de soja o aumento da reflectância em toda a faixa espectral de 500 nm a 2600 nm. Esse aumento da reflectância no espectro visível está associado à degradação da clorofila.

Na porção NIR alterações no padrão de reflectância devem-se às mudanças na estrutura foliar e perda de umidade. Esta perda de umidade reflete, também, no comportamento espectral do SWIR nos diferentes estádios de desenvolvimento, conforme apresentado na Figura 10.

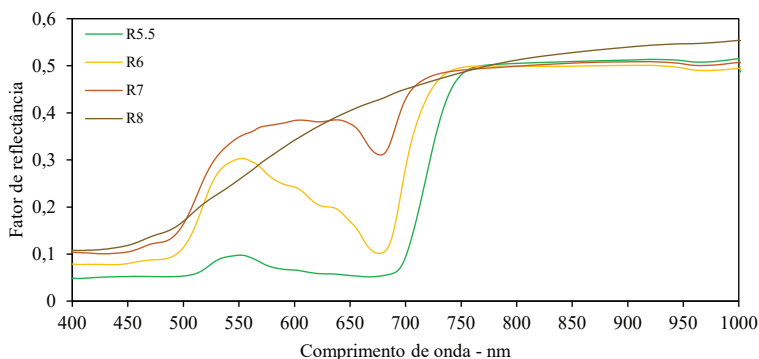


Figura 9. Resposta espectral da soja no espectro visível e infravermelho próximo nos estádios reprodutivos de desenvolvimento, do completo enchimento de grãos nas vagens à maturação.

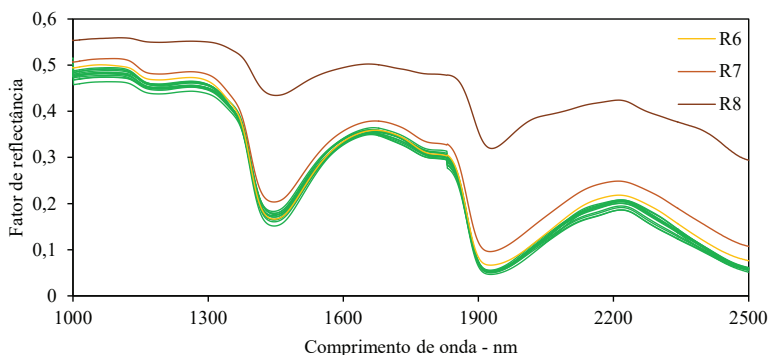


Figura 10. Resposta espectral da soja no espectro infravermelho de ondas curtas nos estádios de desenvolvimento R6, R7 e R8 em relação aos demais estádios reprodutivos e vegetativos, representados pelas linhas verdes.

Considerando o monitoramento de lavouras de soja, a compreensão de seu comportamento espectrotemporal é importante pois demonstra a existência de variações a campo, as quais não podem ser ignoradas, sobretudo em ampla escala territorial. Caso ignoradas, podem haver interpretações errôneas na comparação de diferentes áreas de produção.

Processo de formação de uma imagem

A imagem digital é composta por uma matriz de pixels, dispostos em linhas e colunas. Cada pixel contém a informação radiométrica de cada banda espectral, individualmente. Imagens RGB são compostas por uma banda vermelho (R), uma banda verde (G) e uma banda azul (B). Adicionalmente, sensores mais robustos podem ter número maior de bandas espectrais específicas. A Figura 11 apresenta o comportamento espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3, obtido com uso de sensor hiperespectral com dados espectrais em intervalo de 1 nm, e o posicionamento das bandas espectrais RGB captadas por sensores acoplados a VANTs.

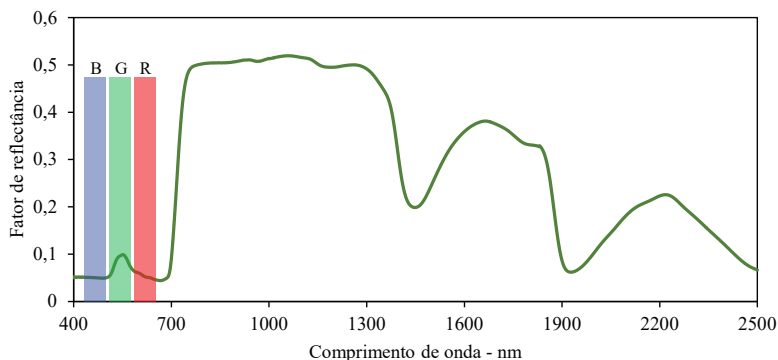


Figura 11. Comportamento espectral da soja e representação das bandas vermelho (R), verde (G) e azul (B).

A quase totalidade das câmeras acopladas ou embutidas em VANTs, além de alguns satélites, é equipada por um detector CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) ou CCD (*Charge-Coupled Device*). Esses detectores são sensíveis aos comprimentos de onda do espectro visível e infravermelho próximo. Sobre tais detectores, utiliza-se um filtro Bayer para a aquisição seletiva dos

comprimentos de onda da banda vermelho, verde e azul. A saída (*output*) dos dados ocorre em três bandas espectrais, possibilitando a formação de uma imagem RGB.

Contudo, a separabilidade dos comprimentos de onda nas bandas R, G e B não é perfeita, podendo haver interferência de comprimentos R e G na banda B; B e R na banda G; e B e G na banda R. Para minimizar tais interferências, alguns sensores possuem detectores específicos para cada banda espectral, utilizando, para tanto, sensores óticos posicionados sobre a lente para garantir a incidência exclusiva dos comprimentos de onda de interesse. Essa mesma metodologia é usualmente adotada nos sensores que possuem bandas espectrais *red-edge* e/ou NIR.

Para cada banda espectral, a radiação incidente é distribuída nos pixels da imagem e convertida em sinal elétrico. Esse sinal elétrico, proporcional à intensidade da radiação incidente, é então convertido em número digital (ND). Entretanto, a resposta em ND apresenta variações conforme as condições atmosféricas e de iluminação no momento da aquisição da imagem. Logo, a calibração radiométrica do sensor utilizado é de máxima importância.

Atualmente, as plataformas de fornecimento de imagens orbitais disponibilizam diferentes níveis de processamento de dados, o que satisfaz as exigências de calibração. Dados de VANTs, contudo, necessitam de calibração, com a conversão do ND para reflectância, em todos os voos realizados.

A calibração de câmeras a bordo de VANTs é necessária pois, buscando flexibilizar o monitoramento das lavouras, a aquisição de imagens digitais pode ser realizada em diferentes altitudes, horários do dia e em diferentes épocas. O aumento na altitude de voo permite o imageamento de uma área territorial maior em uma única imagem; as variações do horário do dia são decorrentes da necessidade de otimização do tempo para imageamento de amplas áreas; por fim, diferentes épocas de imageamento são resultado do acompanhamento periódico da cultura da soja ao longo do seu ciclo de desenvolvimento. Tais variações podem chegar a 25% da resposta espectral, sendo que

a condição ideal de aquisição de imagens é com céu livre da cobertura de nuvens e em altitude padronizada. Voos com cobertura parcial por nuvens representam a condição mais limitante de aquisição de imagens, uma vez que partes da área de monitoramento podem ficar expostas ao sol e outras sombreadas, interferindo na radiação incidente e refletida. Portanto deve-se avaliar as condições de voo para que sejam o mais uniforme possível.

Após a calibração, tem-se dados radiometricamente calibrados, passíveis de serem comparados em diferentes áreas, diferentes datas e horários ao longo da safra, além da integração de diferentes sensores.

Classificação dos sensores remotos

Os sensores remotos são classificados de acordo com a fonte de radiação eletromagnética, o produto disponibilizado, o número de bandas espectrais e o nível de aquisição de dados.

Quanto à fonte de radiação eletromagnética

Sensores remotos podem ser classificados como ativos, aqueles que possuem fonte própria de REM, e passivos, aqueles dependentes de fonte de REM externa.

Para avaliação de áreas agrícolas, a maior parte dos sensores são passivos, como aqueles a bordo de plataformas orbitais ou aerotransportados por aviões ou veículos aéreos não tripulados. Existem ainda sensores proximais, operados em campo e laboratório, que podem emitir sua própria REM, permitindo que a avaliação espectral seja feita independente da intensidade luminosa, controlando as interferências da luminosidade na aquisição de dados espectrais.

Quanto ao produto disponibilizado

Nos sensores imageadores, como sensores a bordo de satélites e VANTs, o produto disponibilizado é uma imagem, sendo que as informações estão contidas nas bandas espectrais de cada pixel. Já os sensores não imageadores fornecem um gráfico ou tabela contendo as informações espectrais do alvo de interesse, como por exemplo os espectrorradiômetros, *GreenSeeker* e *CropCircle*.

Para o monitoramento da cultura da soja em ampla escala territorial, sensores imageadores são mais vantajosos, uma vez que permitem obter informações espectrais sobre as lavouras dispostas na imagem. Essas imagens são, na maioria das vezes, georreferenciadas (possuem coordenada geográfica), o que permite melhor espacialização das informações obtidas.

Sensores não imageadores são comumente utilizados em laboratório e campo e possuem restrições quanto à espacialização das informações obtidas pois, comumente, fazem leituras pontuais e não são acoplados a um sistema de localização geográfica. Contudo, tais sensores, como espectrorradiômetros, tendem a apresentar maior número de bandas espectrais quando comparado às câmeras a bordo de satélites e VANTs.

Quanto ao número de bandas espectrais

Os sensores podem ser classificados em multiespectrais e hiperespectrais. Essas nomenclaturas estão relacionadas ao número de bandas espectrais do sensor, sendo que os hiperespectrais possuem um número de bandas muito superior aos multiespectrais.

A Figura 12 apresenta o comportamento espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3 obtido com uso de sensor hiperespectral, com dados espectrais em intervalo de 1 nm, e o posicionamento das bandas espectrais do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2, representado, nesta situação, 9 bandas espectrais no espectro Vis-NIR-SWIR.

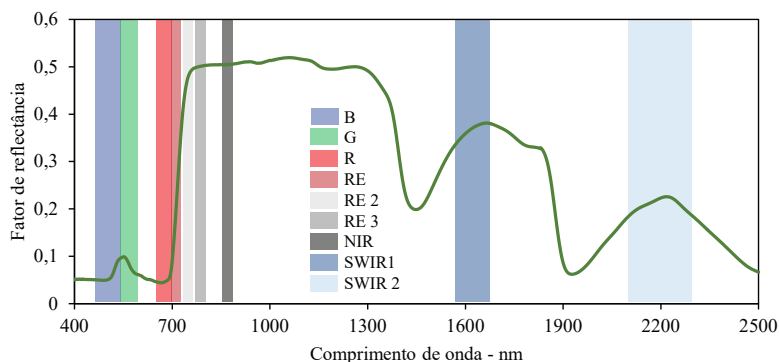


Figura 12. Comportamento espectral de uma folha de soja em estágio R5 de desenvolvimento obtido com uso de sensor hiperespectral e o posicionamento das bandas espectrais do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2.

Sensores hiperespectrais registram a radiação incidente em pequenos intervalos (bandas) fornecendo uma assinatura espectral mais detalhada. Já nos sensores multiespectrais, a mesma radiação incidente seria registrada em apenas 9 faixas espectrais.

Em avaliações de plantas de soja, a grande diferença entre sensores multi e hiperespectrais é o detalhamento espectral da vegetação. Em um sensor multiespectral os comprimentos de onda do espectro visível, compreendidos entre 400 e 700 nm, são comumente representados por bandas vermelho (R), verde (G) e azul (B), e fornecem, portanto, apenas três informações espectrais. Já em um sensor hiperespectral, essa mesma faixa espectral pode ser representada por até 100 bandas, fato que garante melhor detalhamento espectral das plantas.

De modo geral, sensores multiespectrais apresentam menor número de bandas e cada uma dessas bandas abrange um amplo intervalo de comprimentos de onda, ao passo que sensores hiperespectrais apresentam maior número de bandas e cada uma delas abrange um pequeno intervalo de comprimentos de onda, o que permite melhor detalhamento espectral das folhas.

Quanto ao nível de aquisição de dados

Os sensores remotos podem ser operados em nível terrestre, com sensores em condições de laboratório e campo; nível aéreo / suborbital, com sensores acoplados a aeronaves e, recentemente, acoplados a VANTs; e orbital, por meio de sensores a bordo de satélites, conforme ilustrado na Figura 13. Enquanto VANTs operam a dezenas e poucas centenas de metros de altura, os satélites operam a centenas de quilômetros distantes da Terra.



Figura 13. Níveis de aquisição de dados em sensoriamento remoto.

¹Fonte: NASA (2011).

Cada nível de aquisição de dados apresenta vantagens e desvantagens, sendo que sensores devidamente calibrados podem ser utilizados de forma conjunta e possibilitar melhor monitoramento das condições de cultivo da soja. Sensores aerotransportados e orbitais possibilitam a avaliação de áreas mais extensas, sendo que sensores operados em nível de solo ou acoplados a VANTs permitem a

avaliação de áreas com menor extensão territorial, o que pode possibilitar maior controle das condições ambientais.

Logo, seria possível que modelos com o objetivo de avaliar e prever as condições de desenvolvimento das lavouras de soja pudessem ser gerados e calibrados com sensores operados próximo ao nível do solo e, posteriormente, extrapolados para sensores a bordo de aeronaves e satélites, garantindo a fidedignidade das informações obtidas e sua aplicabilidade em ampla escala territorial.

Resoluções dos sensores remotos

Resolução espacial

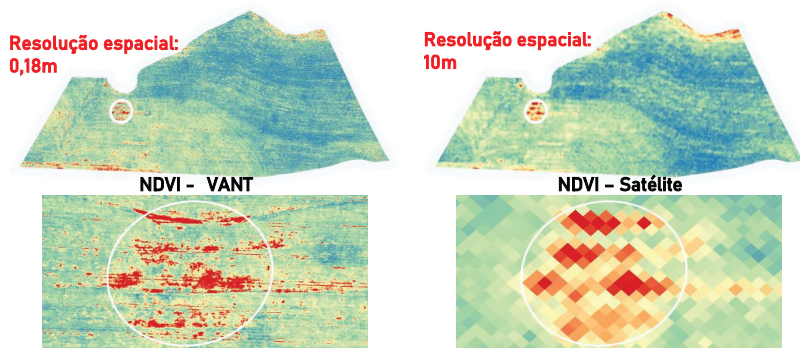
Refere-se à área do terreno, em unidade métrica, que o pixel de uma imagem representa. Quanto maior a resolução espacial, menor o tamanho do pixel e maior o detalhamento dos alvos imageados. A informação espectral registrada em um pixel será a resposta da mistura espectral de todos os objetos imageados por esse pixel. Em alguns VANTs e sistemas de processamento de imagem, a resolução espacial pode ser representada pela sigla GSD (*ground sample distance*), que representa o tamanho de uma amostra imageada na superfície.

Essa resolução é fundamental em estudos agrícolas pois quanto maior o tamanho do pixel, maior a variedade dos alvos nele imageados, sendo que seu valor será resultado da média dos valores de radiação de cada um desses alvos (diferentes plantas, solo e palhada expostos, sombra). Assim, a visualização de um objeto em uma área de estudo somente é possível se esse objeto tiver dimensões superiores à resolução espacial.

A Figura 14 apresenta duas imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de uma mesma área, uma obtida por câmera espectral acoplada a VANT, com resolução espacial de 0,18 m, e outra obtida pelo satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 m. Nesta figura (Figura 14), em uma escala menor, abrangendo toda a área

imageada, existe pouca diferença entre os dois sensores. Contudo, em uma análise detalhada, em escala maior, nota-se que o sensor com menor resolução espacial (Sentinel-2) apresenta uma imagem ‘quadriculada’, com perda de informação quando comparados com o sensor de maior resolução espacial, como a câmera acoplada ao VANT.

Assim, em estádios iniciais da cultura da soja, enquanto não houver o fechamento do dossel nas entrelinhas, pixels com tamanho mais elevados poderão representar a mistura espectral de plantas de soja, solo e palhada. Logo, imagens com elevada resolução espacial possibilitam a avaliação espectral somente das plantas de interesse. Quando ocorre o completo fechamento do dossel nas entrelinhas, o tamanho do pixel passa a ser importante para a identificação de anomalias no interior da lavoura, como aquelas associadas à fertilidade do solo, à ocorrência de doenças, e ao ataque de pragas, entre outros, sendo que pixels muito grandes (baixa resolução espacial) inviabilizam sua identificação.



Um pixel do Sentinel-2 (10 m) equivale a aproximadamente 3025 pixels do VANT

Figura 14. Imagens NDVI obtidas por câmera acoplada a VANT e pelo satélite Sentinel-2. Imagens obtidas da cultura da soja durante a safra 2019/2020, na Fazenda Indaiá, Campo Mourão, PR. Embrapa Soja/Coamo Cooperativa Agroindustrial.

Ressalta-se que a resolução espacial é inversamente proporcional à distância do alvo imageado. Satélites possuem altitude e órbitas definidos. VANTs, porém, são flexíveis quanto à altura de voo o que torna, também, a resolução espacial flexível.

A compreensão dessa relação inversamente proporcional é importante pois à medida que amplia a altura de voo, torna-se possível imagear maior área em menor espaço de tempo comprometendo, porém, a resolução espacial (que torna-se menor). Do contrário, se existe a necessidade de resolução espacial elevada (1 cm por exemplo), a altura de voo deve ser menor, o que aumenta consideravelmente o tempo de voo para imagear a área de interesse. Outro aspecto importante a ser considerado é a capacidade computacional para processamento de imagens. À medida que a resolução espacial aumenta, aumenta-se o número de pixels de uma imagem, exigindo maior a capacidade de processamento.

Resolução temporal

Refere-se ao intervalo de tempo em que informações espectrais da mesma área são passíveis de serem adquiridas, ou tempo de revisita do sensor, conforme ilustrado na Figura 15. Quanto menor o tempo de revisita, maior a resolução espacial.

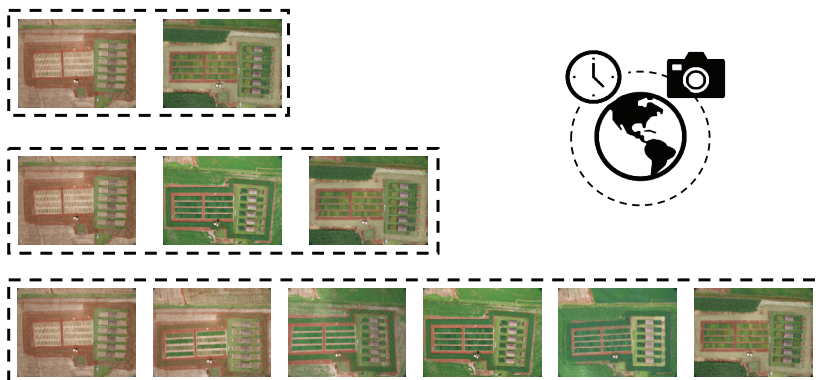


Figura 15. Representação de uma área experimental com a cultura da soja com diferentes números de imagens ao longo da safra.

Essa resolução tem maior aplicabilidade nos dados obtidos em nível orbital, uma vez que é fixa para cada satélite. VANTs, por sua vez, apresentam a vantagem de poder obter informações de lavouras sempre que as condições de voo sejam favoráveis, o que constitui, juntamente com a resolução espacial, uma das vantagens do uso de VANTs em relação ao satélite. Especificamente em nível orbital, em uma lavoura de soja com ciclo de 120 dias desde a emergência até a maturação, sensores com tempo de revisita de 16 dias, como é o caso do Landsat, poderiam fornecer em torno de 8 imagens ao longo da safra. A resolução temporal varia de acordo com o satélite e pode ser inferior a 5 dias, como é o caso do Sentinel-2. O acesso às imagens do Landsat e Sentinel-2 é gratuito, mas existem, por exemplo, satélites com resolução temporal diária, com acesso pago às imagens.

Atenção especial deve ser dada ao uso de imagens de satélite para o monitoramento da safra de verão, como a soja, devido à alta nebulosidade. Eberhardt et al. (2016) demonstraram que até 70% das imagens orbitais na safra de verão na região norte do Estado do Paraná tem sua utilização inviabilizada pela cobertura por nuvens.

Resolução espectral

Muito associada à classificação entre sensores multi e hiperespectrais, a resolução espectral refere-se aos comprimentos de onda passíveis de serem captados pelo sensor e em quantas bandas a REM incidente será agrupada. Quanto maior o número de bandas espectrais, maior a resolução espectral.

Como exemplo, pode-se comparar um conjunto de câmeras Vis-NIR acopladas a um VANT e um espectrorradiômetro operado em nível de campo. Embora ambos captem a REM incidente entre 400 nm e 1000 nm, as câmeras disponibilizam apenas 4 informações espectrais, referentes à média dos comprimentos de onda do espectro azul (460 a 525 nm), verde (542 a 577 nm), vermelho (649 a 680 nm) e infravermelho próximo (780 a 884 nm), ao passo que o espectrorradiômetro disponibiliza, nessas mesmas faixas espectrais, 234 bandas

espectrais de um total coletado de 601 bandas espectrais (400 a 1000 nm), com intervalo de 1 nm entre elas.

A Figura 16 apresenta a curva espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3, com resolução espectral de 1 nm e a representação de nove bandas espectrais do satélite Sentinel-2.

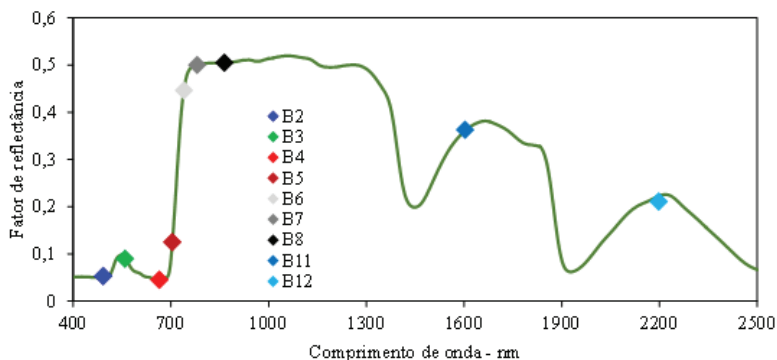


Figura 16. Resposta espectral de uma folha de soja em estágio de desenvolvimento R5.3, com resolução espectral de 1 nm, e a representação de nove bandas multiespectrais do satélite Sentinel-2.

O maior número de informações (bandas espectrais) em lavouras de soja possibilita a aquisição da assinatura espectral das condições de cultivo às quais as plantas estão submetidas. A obtenção dessa assinatura espectral é dificultada ou até mesmo inviabilizada quando o número de bandas espectrais é muito restrito.

Com o aumento da 'largura' das bandas espectrais (maior faixa espectral captada por uma mesma banda), ocorre gradativa perda de informações espectrais. Isso porque todas as informações contidas em uma banda espectral representam a média dos comprimentos de onda nela contidos.

Resolução radiométrica

Expressa em 'bit', a resolução radiométrica representa os níveis nos quais a REM incidente em uma determinada banda espectral será distribuída. Esses níveis são chamados de números digitais (ND) ou níveis de cinza (NC). Quanto maior a resolução radiométrica, maior a quantidade de NDs para uma banda espectral. Essa resolução possibilita maior ou menor refinamento da informação (REM) incidente e afeta, consequentemente, a caracterização espectral das lavouras imageadas.

A Figura 17 apresenta os possíveis números digitais em diferentes resoluções radiométricas e também o número de possíveis cores em uma imagem visível (RGB), obtidas pela combinação fatorial entre os números digitais da banda R, G e B.

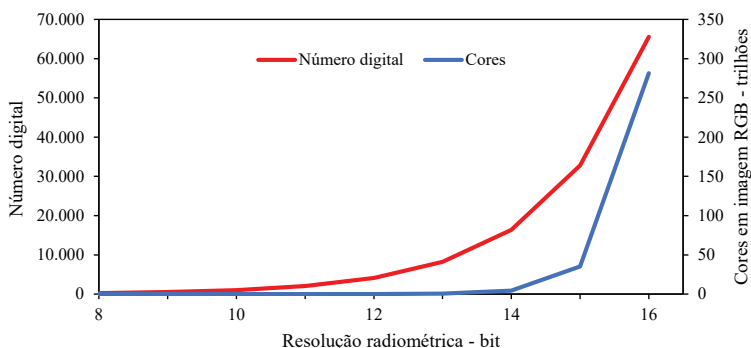


Figura 17. Números digitais em diferentes resoluções radiométricas e número de possíveis cores de uma imagem visível (RGB).

Como exemplo, um sensor com resolução radiométrica de 1-bit apresenta apenas dois níveis de cinza, sendo que a imagem final seria em preto e branco. Já um sensor 2-bit apresenta 4 ND, com imagem em preto, branco e dois tons de cinza. Um sensor 3-bit possui 8 ND; 4-bit, 16 ND e, assim, sucessivamente, conforme equação 1:

$$ND=2^{bit}$$

Equação 1

Atualmente, muitos sensores, sobretudo câmeras RGB acopladas a VANTs, apresentam resolução radiométrica de 8-bit, portanto 256 ND. Nessa imagem, existem 16.777.216 possíveis cores para cada pixel, que seriam as cores RGB, dos 256 ND, multiplicadas entre si, conforme Equação 2. Sensores mais robustos e projetados especificamente para avaliações espectrais podem apresentar maior resolução radiométrica, como é o caso de algumas câmeras Vis-NIR acopladas a VANTs que possuem resolução 16-bit. Nessas imagens, a REM incidente em uma banda espectral pode ser distribuída em 65536 ND (valor muito superior aos 256 de uma imagem 8-bit), com trilhões de cores para um mesmo pixel em imagem RGB.

$$\text{Quantidade de Cores} = ND^3 \text{ (Bandas RGB)} \quad \text{Equação 2}$$

Em avaliação de culturas agrí colas, como a soja, a importância da resolução radiométrica se dá no fato de que o detalhamento do comportamento espectral em cada banda é diretamente proporcional aos seus números digitais. Logo, quanto maior essa resolução, maior a possibilidade de diferenciação do comportamento espectral da vegetação em cada banda o que contribui para melhor avaliação das condições da lavoura.

Trade-off entre as resoluções espacial, temporal e espectral

Dentre as resoluções discutidas anteriormente, o tamanho do pixel, tempo de revisita do sensor e número de bandas espectrais impactam diretamente a qualidade do monitoramento de lavouras de soja. Logo, no equilíbrio entre essas resoluções está o sucesso para a obtenção de informações fidedignas.

Embora o uso de VANTs para imageamento apresente maior flexibilidade quanto à quantidade de imagens ao longo da safra e maior resolução espacial em relação ao satélite, o satélite possibilita o monitoramento em nível regional, enquanto que o VANT se limita a áreas específicas. Além disso, satélites possuem, comumente, maior

resolução espectral em comparação com VANTs, usualmente equipados com câmeras RGB.

Atualmente a oferta de imagens, tanto por VANTs quanto por satélites, se dá quase que totalmente por sensores multiespectrais. Sensores de campo, como espectrorradiômetros, embora tenham sua operacionalidade restrita à pontos amostrais em uma lavoura, possibilitam a obtenção de dados hiperespectrais das plantas de soja. A curto prazo, os dados hiperespectrais coletados em campo podem auxiliar na definição de bandas espectrais mais responsivas para o monitoramento de estresses específicos da soja e estimativa de seus parâmetros de crescimento e produtividade. Essas bandas podem ser posteriormente transferidas para sensores desenvolvidos especificamente para tais finalidade e acoplados a VANTs. Em um futuro com ampla oferta de dados hiperespectrais por VANTs e satélites, os dados hoje coletados em campo poderão servir de fundamentação técnico-científica para o monitoramento hiperespectral em larga escala.

Uso de índices de vegetação

Índices de vegetação (IVs) são obtidos por operações aritméticas entre bandas espectrais. A grande maioria dos IVs são compostos por duas bandas espectrais e obtidos pela razão, produto, soma ou subtração entre elas. Como resultados dessas operações aritméticas, os IVs são expressos em medidas radiométricas adimensionais.

A Figura 18 apresenta imagens orbitais RGB das diferentes bandas do satélite Sentinel-2 separadamente obtidas em diferentes fases do desenvolvimento de uma lavoura de soja. A Figura 19 apresenta, para essas mesmas imagens, índices de vegetação calculados a partir das bandas espectrais.

Na era digital, 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 e bioquímicos da vegetação, servindo como importante ferramenta de diagnóstico das condições limitantes à altas produtividades.

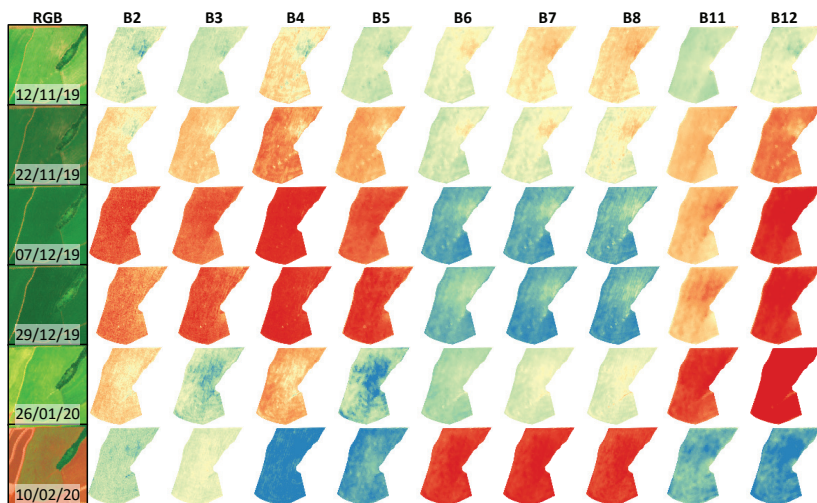


Figura 18. Imagens RGB do satélite Sentinel-2 e a representação individual das bandas espectrais Vis-NIR-SWIR. Imagens obtidas da cultura da soja durante a safra 2019/2020, na Fazenda Indaiá, Campo Mourão, PR. Embrapa Soja/Coamo Cooperativa Agroindustrial.

Embora IVs sejam um dos indicadores mais importantes para caracterizar a variabilidade espacial de áreas de produção, não permitem identificar diretamente o fator limitante responsável pela variabilidade. Tais índices devem ser usados em conjunto com outras informações, como o mapa de colheita, os mapas de fertilidade e textura do solo, para que decisões mais assertivas sejam tomadas. Este conjunto de informações, pode ser utilizado para definir zonas de manejo com uso diferenciado de insumos, com impactos diretos na produtividade e nos custos de produção.

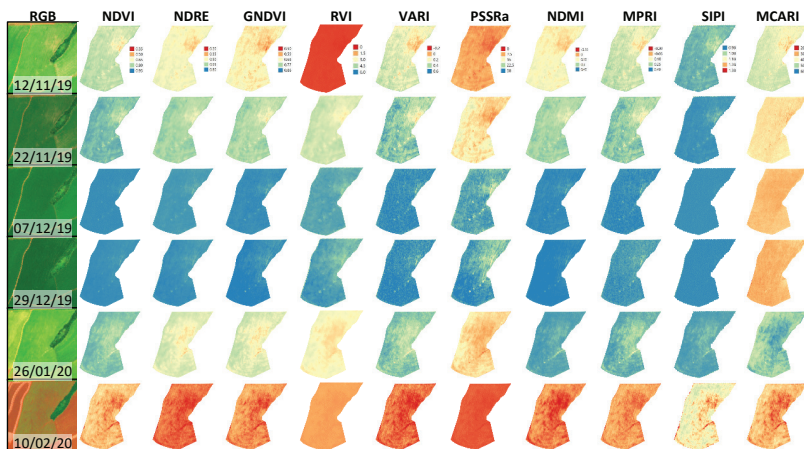


Figura 19. Imagens RGB do satélite Sentinel-2 e índices de vegetação calculados a partir das bandas espectrais Vis-NIR-SWIR. Imagens obtidas da cultura da soja durante a safra 2019/2020, na Fazenda Indaiá, Campo Mourão, PR. Embrapa Soja/Coamo Cooperativa Agroindustrial.

Existem centenas de índices de vegetação (IVs) formulados para diferentes aplicações, sobretudo os que se utilizam das bandas do espectro visível e infravermelho próximo, como o NDVI, proposto por Rouse et al. (1973). Ressalta-se, porém, que muitos dos IVs propostos são redundantes, resultando em informações similares. Destaca-se, ainda, que existem índices com diferentes nomes obtidos pela mesma equação; ou ainda a utilização de diferentes equações para obtenção de índices com mesmo nome, o que requer cautela no momento da escolha do IV adequado para o monitoramento da soja.

Salienta-se que, anteriormente à aplicação de IVs para o monitoramento agrícola, deve-se ter conhecimento da interação da REM com os fatores bióticos e abióticos da área em avaliação, compreendendo de que forma tais estresses interferem no comportamento espectral da cultura da soja. Esse conhecimento prévio é importante para a obtenção de indicadores (IVs) mais fidedignos com a realidade a campo, visto que IVs são representados sempre por um único valor

numérico, impõe dificuldades ao diagnóstico dos fatores atuantes na lavoura.

O que se observa atualmente, sobretudo em avaliação com sensores imageadores, a bordo de VANTs ou satélites, é a associação entre a resposta espectral da vegetação (IVs) e as condições de desenvolvimento das lavouras. Contudo, a interpretação dos IVs de uma área agrícola requer cuidado para que esses índices não sejam meros indicativos da variabilidade da cobertura vegetal daquela área, uma vez que em condições limitantes ao pleno desenvolvimento da lavoura tem-se a diminuição da biomassa e, conseqüentemente, menor cobertura do solo. Logo, um único valor de IV é muitas vezes a resposta diferencial do solo ou palhadas expostos, limitando o diagnóstico, com elevada assertividade, do fator limitante da área em avaliação.

Considerações finais

O uso efetivo do sensoriamento remoto no monitoramento da cultura da soja, como suporte à tomada de decisões em relação às práticas culturais, vai além da utilização de imagens aéreas apenas como recurso visual. Embora essas imagens possibilitem a visão sinótica das lavouras, elas não traduzem, enquanto produto visual, a atuação dos diferentes fatores bióticos e abióticos que afetam a produção da soja.

Logo, é importante que se conheça, inicialmente, a resposta espectral da cultura da soja sob a atuação desses fatores. Da mesma forma, o conhecimento das características de cada sensor garantirá maior viabilidade à aquisição de dados espectrais, disponibilizando, por fim, informações que possam indicar com maior assertividade a realidade observada em campo.

A escolha do sensor a ser utilizado deve estar em concordância com as necessidades de cada área agrícola, observando sempre a

dimensão territorial das lavouras, a periodicidade na aquisição de novas informações e a qualidade e detalhamento espectral dos dados coletados.

Atenção especial merece ser dada ao uso indiscriminado de imagens aéreas obtidas por câmeras visível e infravermelho próximo acopladas a VANTs, tendo em vista as inúmeras interferências metodológicas às quais estão sujeitas. Da mesma forma, deve-se avaliar as contribuições e limitações de índices de vegetação para o monitoramento agrícola.

Considerando a expressividade da produção nacional e mundial de soja, com impactos diretos na produção de alimentos e dinâmica econômica, é importante conferir ao sensoriamento remoto um olhar pautado no conhecimento científico, buscando o desenvolvimento e validação de tecnologias, produtos e serviços que, ao serem disponibilizados à sociedade brasileira, possam contribuir para o efetivo monitoramento dos diferentes sistemas de produção de soja.

Referências

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: boletim da safra de grãos, 12º levantamento - safra 2022/23. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 6 set. 2023.

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. 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, 2021. DOI: 10.3390/rs13050977.

EBERHARDT, I. D. R.; SCHULTZ, B.; RIZZI, R.; SANCHES, I. D. A.; FORMAGGIO, A. R.; ATZBERGER, C.; MELLO, M. P.; IMMITZER, M.; TRABAQUINI, K.; FOSCHIERA, W.; LUIZ, A. J. B. Cloud cover assessment for operational crop monitoring systems in tropical areas. **Remote Sensing**, v. 8, 219, 2016. 14 p.

FAZAM, J. C. **Comportamento espectral de plantas de soja submetidas a diferentes níveis de infestação do percevejo-marrom *Euschistus heros* (Fabricius) (Hemiptera: Pentatomidae)**. 2018. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

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.; DA SILVA, C. R. Identification and classification of Asian soybean rust using leaf-based hyperspectral reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, p. 4177-4198, 2021.

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

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos do sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015. 292 p.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **Landsat 8 (aka LDCM) Spacecraft Animations and Still Images**. 2011. Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/10812/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; MERTZ-HENNING, L. M.; FOLONI, J. S. S.; MORAES, L. A. C.; GONCALVES, S. L. Ecofisiologia da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.).

Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2020.
(Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17). p. 33-54.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v.1, p. 309-317.

SINCLAIR, T. R.; HOFFER, R. M.; SCHREIBER, M. M. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. **Agronomy Journal**, v. 63, p. 864-868, 1971.

