

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Utilização de sensores hiperespectrais na cultura da cana-de-açúcar
(*Saccharum officinarum L.*) para fins fitossanitários**

Natália Correr Ré

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2023**

Natália Correr Ré
Bacharela em Gestão Ambiental

Utilização de sensores hiperespectrais na cultura da cana-de-açúcar
(*Saccharum officinarum L.*) para fins fitossanitários
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2023

ados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Ré, Natália Correr

Utilização de sensores hiperespectrais na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) para fins fitossanitários / Natália Correr Ré - -- versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011.- - Piracicaba, 2023.

54 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Sensoriamento remoto 2. Espectroscopia 3. *Diatraea saccharalis* I. Título

DEDICATÓRIA

Hugo Fukuzava,
Desejo uma rápida e tranquila recuperação
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço... A Deus

Aos meus pais, Irani e Marcos, pelo amor e estímulo constante

Ao Prof. Dr. Peterson Ricardo Fiorio pelo zelo, dedicação e amizade. Serei eternamente grata por todas as oportunidades concedidas durante a vida acadêmica. Obrigada por acreditar

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, minha segunda casa

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ao Departamento de Engenharia de Biosistemas e a todos os professores e funcionários que fizeram parte desta trajetória

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos

Ao Grupo de Pesquisa e Extensão em Topografia e Geoprocessamento – TopoGeo pela contribuição no trabalho de campo e laboratorial. Obrigada por todo o empenho, parceria e amizade: Ana Karla, Hugo Fukuzava, Matheus Caron, Matheus Nilsson e Pedro Roel

Ao Centro de Tecnologia Canavieira – CTC por ceder a área experimental, além de toda a ajuda por parte do Daniel Duft, da Luara Meirelles e da Rayane Ambrósio na coleta dos dados

Às minhas amigas de longa data Larissa, Flávia, Milena, Beatriz, Lívia, Laura, Victoria, Isabela, Barbara, pelo acolhimento e sororidade

À Erica Nakai por ser minha grande inspiração de mulher na ciência

Ao Abner por todo apoio e encorajamento durante a pós-graduação

Ao Jonas Inácio, meu grande companheiro de curso

Aos meus padrinhos, Luci e Paulo, pela confiança e amparo

À Gleice e ao Eduardo pela sensibilidade e gentileza

EPÍGRAFE

*“Hoje o tempo escorre dos dedos da nossa mão
Ele não devolve o tempo perdido em vão
É um mensageiro das almas dos que virão ao mundo
Depois de nós”*

Engenheiros do Hawaii

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	13
2.2. ORGANISMOS GENETICAMENTE MODIFICADOS (OGMs).....	14
2.3. TECNOLOGIA BT (<i>BACILLUS THURINGIENSIS</i>) E A BROCA DA CANA (<i>DIATRAEA SACCHARALIS</i>).....	15
2.4. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DA VEGETAÇÃO.....	17
2.5. UTILIZAÇÃO DE SENSORES REMOTOS NO MONITORAMENTO FITOSSANITÁRIO E NA QUANTIFICAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.2. OBTENÇÃO DE DADOS HIPERESPECTRAIS (FOLHA E DOSSEL).....	24
3.3. DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA (CRA).....	26
3.4. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO COM DIFERENÇA NORMALIZADA DE “BORDA VERMELHA” (<i>RED-EDGE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX – NDVI 705</i>).....	27
3.5. ÍNDICE DE ABSORÇÃO PELA CLOROFILA: MODIFICADO (MCARI).....	28
3.6. AVALIAÇÃO DA INFESTAÇÃO E COLHEITA.....	28
3.7. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP).....	29
3.8. ANÁLISE DISCRIMINANTE.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP).....	31
4.2. ANÁLISE DESCRITIVA DAS CURVAS ESPECTRAIS.....	34
4.3. NDVI (705) E ÍNDICE DE ABSORÇÃO PELA CLOROFILA: MODIFICADO (MCARI).....	37
4.4. RESPOSTA DA FOLHA AO CONTEÚDO DE ÁGUA, ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE E DA INTENSIDADE DE INFESTAÇÃO.....	41
5. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	45

RESUMO

Utilização de sensores hiperespectrais na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) para fins fitossanitários

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem crescido no agronegócio brasileiro impulsionada pelo aumento da demanda por energia renovável. À medida que as áreas de cultivo se expandem, surgem desafios relacionados à infestação de pragas e doenças, acarretando em perdas econômicas. Entre as principais causas desses prejuízos está a espécie *Diatraea saccharalis*, também conhecida por broca da cana. Com o intuito de otimizar a produção e garantir a segurança alimentar, os investimentos em melhoramento genético aumentaram nos últimos anos, especialmente com a disseminação da tecnologia Bt (*Bacillus thuringiensis*), responsável por reduzir custos de produção, preservar a biodiversidade nas áreas tratadas e obter resistência a insetos que são pragas nos sistemas agrícolas. Além do gene Bt, o sensoriamento remoto é uma estratégia que pode ajudar no monitoramento, controle e diagnóstico de infestações de *Diatraea saccharalis* nos canaviais. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi analisar a resposta espectral das variedades de cana: CTC9003BT (geneticamente modificada), CTC4 e RB966928 em diferentes estádios fenológicos (tanto nas folhas quanto no dossel) sob condições de disponibilidade hídrica e danos da broca. Os índices extraídos dos dados hiperespectrais do dossel: NDVI (705) e MCARI possibilitaram a separação entre as parcelas mais e menos vigorosas. A influência da região *red-edge* se dá, principalmente, na viabilidade em detectar mudanças estruturais ou fisiológicas das plantas. Logo, as análises realizadas sob as condições descritas podem trazer indícios de vigorosidade no dossel da cultura, visto que plantas afetadas pela broca apresentam colmos danificados e, conseqüenteente, redução da translocação de seiva.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Espectroscopia, *Diatraea saccharalis*

ABSTRACT

Use of hyperspectral sensors in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) for phytosanitary purposes

The sugarcane production chain has been growing in Brazilian agribusiness driven by increased demand for renewable energy. As growing areas expand, challenges arise in connection with pest and disease infestation, leading to economic losses. Among the main causes of this damage is the species *Diatraea saccharalis*, also known as the sugarcane borer. With the aim of optimizing production and guaranteeing food security, investments in genetic improvement have increased in recent years, especially with the dissemination of Bt (*Bacillus thuringiensis*) technology, responsible for reducing production costs, preserving biodiversity in the treated areas and obtaining resistance to insects that are pests in agricultural systems. Besides the Bt gene, remote sensing is a strategy that may help in the monitoring, control and diagnosis of infestations of *Diatraea saccharalis* in sugarcane plantations. Accordingly, the objective of the work was to analyze the viability of the use of hyperspectral sensors to obtain a spectral response of the varieties of sugarcane: CTC9003BT (genetically modified), CTC4 and RB966928 at different phenological stages (both in the leaves and in the canopy) under conditions of water availability and sugar cane borer damage. The indices extracted from the hyperspectral data of the canopy: NDVI (705) and MCARI made it possible to separate the more and less vigorous plots. The influence of the red-edge region was mainly due to the viability of detecting structural or physiological changes in plants. Therefore, analyzes carried out under the conditions described may cause damage to the crop's canopy, as plants affected by the borer have damaged stems and, consequently, reduced sap translocation.

Keywords: Remote sensing, Spectroscopy, *Diatraea saccharalis*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamento espectral de um alvo de vegetação e principais fatores que influenciam na reflectância (FORMAGGIO E SANCHES, 2017).....	18
Figura 2. Localização da área de estudo.....	21
Figura 3. Croqui do ensaio (número da parcela em vermelho).....	22
Figura 4. Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar (adaptado GASCHO E SHIH, 1983) e as datas de coletas	23
Figura 5. Primeira coleta 03/12/21 (a); Segunda coleta 21/01/2022 (b); Terceira coleta 22/03/22 (c); Quarta e última coleta 28/04/2022 (d)	23
Figura 6. Coleta das folhas +1 (a); armazenamento das amostras em caixa térmica com gelo (b).....	24
Figura 7. Leafclip do espectrorradiômetro Fieldspec® (a); leitura da folha e computador com o software RS3 (b); folha “+1” (c)	25
Figura 8. Obtenção das curvas espectrais do dossel com o espectrorradiômetro HandHeld 2 acoplado em uma régua (a); placa branca de sulfato de bário (BaSO ₄) para calibração do sensor (b)	25
Figura 9. Folha cortada com a ajuda de um furador tipo scrapbook circular de 25mm de diâmetro (a); balança de precisão utilizada nas pesagens (b); separação dos sacos plásticos para iniciar a etapa da medição do peso túrgido (c); amostras submersas em água destilada (d); amostras armazenadas em sacos furados prontas para secagem (e); temperatura da estufa a 70 C° (f); disposição das amostras dentro da estufa (g); folha seca pós 72h (h)	27
Figura 10. Identificação da ocorrência de broca (a); colmo atacado pela broca (b); fita azul amarrada no colmo para facilitar a identificação (c).....	29
Figura 11. Variância das componentes principais 1, 2 e 3	31
Figura 12. Comportamento dos loadings na primeira coleta (a); comportamento dos loadings na segunda coleta (b); comportamento dos loadings na terceira coleta (c); comportamento dos loadings na quarta coleta (folha) (d);	33
Figura 13. Comportamento dos loadings na quarta coleta (dossel)	33
Figura 14. Assinaturas do espectrorradiômetro Fieldspec (folha) – primeira coleta 03/12/21 (a); segunda coleta 21/01/2022 (b); terceira coleta 22/03/22 (c); quarta e última coleta 28/04/2022 (d)	35
Figura 15. Assinaturas do espectrorradiômetro HandHeld 2 (dossel) – quarta coleta 28/04/2022.....	36
Figura 16. Análise multivariada discriminante (dossel) – quarta coleta 28/04/2022.....	37
Figura 17. Box Plot NDVI (705) dados dossel.....	38
Figura 18. Gráfico de dispersão (NDVI x MCARI) – todos os dados (a); por variedade (b).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios dos índices hiperespectrais calculados	39
Tabela 2. Descrição estatística dos parâmetros conteúdo relativa de água (CRA)	41
Tabela 3. Dados de produtividade e avaliação da intensidade de infestação (<i>Diatraea saccharalis</i>).....	42

1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar vem ganhando espaço no agronegócio brasileiro juntamente com a ampliação da demanda por energia renovável. Com o aumento das áreas cultivadas, a produção dobrou nos últimos dez anos (UNICA, 2018). Dessa forma, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis (produção de etanol e seus subprodutos).

Concomitante a expansão de áreas com cultivares de cana-de-açúcar, problemas relacionados ao ataque de pragas podem acarretar prejuízos ao setor. Uma das principais pragas responsáveis por parte deste prejuízo econômico é a espécie *Diatraea saccharalis*, também conhecida por broca da cana. A broca é um inseto que apresenta desenvolvimento holometabólico, isto é, sofre metamorfose completa durante o seu desenvolvimento ao passar pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto (LIMA FILHO e LIMA, 2001). O ataque desta espécie ocorre durante a fase larval, o que resulta em redução no peso do colmo, diminuição do teor de sacarose, aumento de perfilhos, quebra do colmo pelo vento e enraizamento aéreo (CARBOGNIN, 2019). No geral, as perdas causadas pela broca chegam a 5 bilhões de reais ao ano, devido à redução da produtividade agrícola e industrial, da qualidade do açúcar e pelos custos com inseticidas (CTC, 2021).

Visando maximizar a produtividade da cana-de-açúcar e garantir a segurança alimentar, nos últimos anos os investimentos em melhoramento genético têm crescido, principalmente com a difusão da tecnologia Bt (*Bacillus thuringiensis*). Tal tecnologia pretende reduzir custos de produção, preservar a biodiversidade nas áreas tratadas e obter resistência a insetos que são pragas nos sistemas agrícolas. Na região Centro-Sul do país, o gene Bt já vem sendo empregado a fim de conter a *Diatraea saccharalis*.

Além do gene Bt, o controle à broca envolve estratégias de monitoramento e previsão da ocorrência das fases-alvo. Todavia, há dificuldades em se amostrar ovos e larvas recém-ecloídas, além de adversidades no exercício de monitoramento em campo (CARBOGNIN, 2019). Neste cenário, o sensoriamento remoto é uma estratégia que pode ajudar no monitoramento e no diagnóstico de infestações de *Diatraea saccharalis* nos canaviais, por exemplo.

O sensoriamento remoto pode ser definido pela utilização conjunta de sensores e diversos equipamentos de transmissão e processamento de dados acoplados a plataformas aéreas, ou outras plataformas, capazes de estudar eventos, fenômenos e processos que manifestam-se na superfície terrestre a partir da interação entre a radiação eletromagnética (REM) e a matéria

(NOVO, 2010). A captação da energia eletromagnética refletida pela vegetação ou dossel auxiliam identificar as alterações no comportamento fisiológico da planta e, conseqüentemente analisar o vigor da vegetação.

O estudo do comportamento espectral dos alvos é realizado em experimentos laboratoriais e de campo, sendo que a grandeza radiométrica utilizada para expressar este comportamento é dado por uma medida capaz de estimar a sua reflectância. No caso da vegetação, tem-se que a curva média da vegetação fotossinteticamente ativa é separada em três regiões espectrais (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio) em função dos fatores que condicionam seu comportamento (NOVO, 2010).

Neste sentido, seria possível a utilização de sensores hiperespectrais na cultura da cana-de-açúcar para aferir a capacidade discriminatória da resposta espectral entre variedades com base no conteúdo relativo de água? A partir desta questão, o objetivo desta pesquisa é analisar a resposta espectral das variedades de cana: CTC9003BT (geneticamente modificada), CTC4 e RB966928 em diferentes estádios fenológicos (tanto nas folhas quanto no dossel) sob condições de disponibilidade hídrica e danos da broca.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar foi descrita primeiramente por Linneu em 1753, que a denominou genericamente de *Saccharum* (SZMRECSÁNYI, 1979). Caracterizada por ser uma gramínea tropical do tipo C4, a cana-de-açúcar dispõe de uma grande taxa fotossintética e alta produtividade biológica (IRVINE, 1975) e, por conta de sua fácil adaptação, o cultivo comercial de cana-de-açúcar e de suas variedades ocorre em mais de 70 países, incluindo o Brasil, a Índia e a China.

No Brasil ela é a base para a produção de açúcar, álcool e outros subprodutos, sendo que o etanol de cana-de-açúcar é amplamente utilizado no setor de transportes desde a década de 1970 após o surgimento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), o qual prospectava diminuir a dependência das importações de petróleo no país (KOHLHEPP, 2010). O Proálcool foi imprescindível na introdução do álcool combustível na matriz energética do país e hoje o Brasil é considerado referência mundial nesse setor.

Dessa forma, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar vem ganhando espaço no agronegócio brasileiro juntamente com a ampliação da demanda por energia renovável. O plantio de cana-de-açúcar concentra-se fortemente no estado de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Porém, para a safra 2021/22, a produção de cana-de-açúcar foi de 585,2 milhões de toneladas, cerca de 10,6% a menos em relação ao volume de matéria-prima da safra 2020/21 devido a diminuição de 3,5% na área cultivada, bem como efeitos climáticos adversos durante o ciclo produtivo (CONAB, 2022).

Em contrapartida, em relação a produção total de etanol no Brasil proveniente da cana-de-açúcar, a estimativa de produção é de 26,78 bilhões de litros (CONAB, 2022). Tais dados alinhados a repartição da oferta interna de energia do Balanço Energético Nacional (BEN, 2022) em que a biomassa da cana-de-açúcar representa 16,4% das fontes renováveis do país, ocupando o primeiro lugar neste segmento, evidenciam a grande importância da cana na participação da matriz energética do Brasil.

No ano de 2016, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou em o Programa RenovaBio, sancionado na forma da Lei Federal nº 13.576, em 26 de dezembro de 2017. Esta política de Estado traça uma estratégia para reconhecer o papel dos biocombustíveis na matriz energética brasileira (BRASIL, 2017).

Assim sendo, os biocombustíveis produzidos a partir de biomassa são projetados para serem um componente importante dos sistemas de energia futuros com o objetivo de atingir metas de estabilização da temperatura global em níveis baixos (DAIOGLOU et al., 2019). Sob a ótica ambiental, a utilização de etanol como alternativa à gasolina traz benefícios como a redução na extração de petróleo e, conseqüentemente, diminuição da emissão de poluentes na atmosfera.

2.2. Organismos geneticamente modificados (OGMs)

A partir do progresso da ciência e da tecnologia foi possível introduzir a biotecnologia nos setores fármacos, agroquímicos e alimentícios. Para Faleiro e Andrade (2009), o conceito de biotecnologia está ligado à união da biologia com a tecnologia, sendo que este conjunto de técnicas emprega os seres vivos no desenvolvimento de processos e produtos, visando gerar uma função econômica e/ou social.

Com o advento da tecnologia do DNA recombinante, tornou-se possível a alteração em trecho(s) do genoma de qualquer organismo de modo a favorecer características desejadas (ARANTES, 2003). Dessa forma, os objetivos do melhoramento genético voltado à indústria agrícola estão ligados à resistência a doenças e a insetos; à adaptação aos estresses ambientais e à melhoria da qualidade nutricional. Destaca-se, portanto, que a principal finalidade é aumentar a segurança no cultivo de plantas, à medida que há maior probabilidade de sucesso em uma colheita (FALEIRO E ANDRADE, 2009).

Considerando os benefícios da inserção dos Organismos Geneticamente Modificados (OGMs) no âmbito agrícola, durante década de 90, as empresas tradicionalmente implantadas nos ramos químico e farmacêutico começaram a incorporar esta tecnologia às sementes. Salienta-se que a empresa *Monsanto* foi pioneira neste segmento de mercado ao desenvolver uma linha de sementes transgênicas com maior resistência ao principal herbicida da empresa (PELAEZ e SCHMIDT, 2000). No Brasil, conforme Albrecht et al. (2021), os produtos transgênicos aprovados totalizam 111 produtos, em número atualizado para 2020.

Atualmente as tecnologias de tolerância a herbicidas, além de facilitar o manejo de plantas daninhas, proporcionam economia no uso de defensivos (pelo aumento na eficiência de controle das plantas daninhas); menor uso de água (redução do número de aplicações/pulverizações); maior comodidade em práticas agrícola (facilidade no manejo); maior segurança alimentar; aumento da produtividade; e preservação do meio ambiente (com

o uso de menos agroquímicos, bem como o aumento na produção por unidade de área, tem-se a diminuição de abertura de novas áreas) (ALBRECHT et al., 2021).

No Brasil a Lei de Biossegurança (Lei 11.105/2005), em vigor, traz em seu art. 3º, inciso V, a definição de OGM sendo um “organismo cujo material genético – ADN/ARN tenha sido modificado por qualquer técnica de engenharia genética”. Além disso, no art. 3º, inciso 1º a definição de organismo é tratada por “toda entidade biológica capaz de reproduzir ou transferir material genético, inclusive vírus e outras classes que venham a ser conhecidas” (BRASIL, 2005). Em suma, a Lei de Biossegurança regula as atividades de pesquisa e as atividades de uso comercial que envolvam organismos geneticamente modificados e seus derivados.

2.3. Tecnologia Bt (*Bacillus thuringiensis*) e a broca da cana (*Diatraea saccharalis*)

O controle de insetos-praga nas lavouras, por meio dos inseticidas químicos, teve seu início na década de 40. Estuda-se, todavia, que estes químicos têm potencial de gerar problemas de poluição ambiental, serem tóxicos e sem especificidade ao atingirem insetos benéficos, e podem até induzirem casos de resistência nos insetos-praga (CAPALBO et al., 2005).

Para preservar a biodiversidade nas áreas tratadas e obter resistência a insetos que são pragas nos sistemas agrícolas, foi desenvolvida a bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt). O gene Bt é capaz de produzir diferentes proteínas tóxicas, denominadas cristais, altamente específicas para os insetos das ordens Lepidoptera, Coleoptera e Diptera e que não afetam o homem, os animais e as plantas (SOUZA et al., 1999). Na prática, as plantas Bt expressam proteínas inseticidas da bactéria *Bacillus thuringiensis*, naturalmente encontrada no solo. Tais proteínas são ingeridas pela broca, se ligam a receptores específicos no intestino da praga, formam poros e as levam à morte (CTC, 2017).

Assim, o uso da tecnologia Bt vem ganhando espaço nas culturas de milho, algodão e batata. Entretanto, também está sendo avaliado e introduzido em outras culturas como, por exemplo, álamo, alfafa, arroz, cana-de-açúcar, maçã, soja, tomate e uva (ARAGÃO, 2009).

No caso da cultura de cana-de-açúcar, o gene Bt está sendo empregado para combater a *Diatraea saccharalis*, conhecida popularmente por broca da cana-de-açúcar, uma praga da ordem Lepidoptera. Conforme BOX (1931), esta praga é considerada a espécie mais distribuída do gênero, além de ser muito variável tanto na cor quanto no tamanho, em toda sua área de distribuição.

A broca é um inseto que apresenta desenvolvimento holometabólico, isto é, sofre metamorfose completa durante o seu desenvolvimento ao passar pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto (LIMA FILHO e LIMA, 2001). O ciclo total dura de 59 a 90 dias, cerca de 4-5 gerações/ano (CTC, 2017). O ataque desta espécie ocorre durante a fase larval, o que resulta em redução no peso do colmo, diminuição do teor de sacarose, aumento de perfilhos, quebra do colmo pelo vento e enraizamento aéreo (CARBOGNIN, 2019).

De acordo com OLIVEIRA (2022), as lagartas de *Diatraea saccharalis* causam danos diretos e indiretos às lavouras, consideram-se diretos aqueles que sucedem das abertura de galerias no interior do colmo da planta pela lagarta, resultando na redução da translocação de seiva e a quebra e perda de peso de colmos. Já de forma indireta, tem-se os danos causados pela entrada de microrganismos fitopatogênicos no interior da planta, o qual ocasiona podridão vermelha do colmo, prejudicando a fabricação de açúcar e álcool. Portanto, é uma das mais importantes pragas da cana-de-açúcar no Brasil, por reduzir significativamente a produtividade em campo e a qualidade da matéria-prima (DINARDO-MIRANDA, 2008).

Conforme um estudo realizado por Arrigoni (2002), a cada 1% de intensidade de infestação da broca, as perdas referentes a broca da cana podem chegar a 1,50% na produtividade de colmos, 0,49% na produtividade de açúcar e 0,28% na produtividade de álcool, dados que demonstram a os efeitos nocivos da praga para a cultura. Outro estudo realizado por Gallo et al. (2002) estimou que os danos provocados por esta praga aproximam-se de 10% no Brasil.

Sendo assim, quanto aos prejuízos da broca às usinas e aos fornecedores de cana, os principais danos agrônômicos, conforme o CTC (2017), estão atreladas a perda de peso e morte dos brotos, perfilhos e plantas; ao enfraquecimento das plantas, favorecendo o tombamento; secamento dos ponteiros de plantas novas, em sintoma conhecido como coração morto; ao enraizamento aéreo e brotações laterais; e às infecções por micro-organismos oportunistas na lesão causada pela broca. Já para as usinas, o dispêndio se dá pela inversão da sacarose, com formação de ácidos orgânicos e outras substâncias prejudiciais à produção do açúcar; pela inibição do processo fermentativo e aumento na incidência de floculação do fermento; por conta da presença de compostos no caldo, que provocam interferência na coloração do açúcar produzido, interferindo negativamente em seu valor comercial e, por fim, pelo aumento do teor de fibra, dificultando a extração do caldo pelas moendas. Em suma, as perdas causadas pela broca chegam a 5 bilhões de reais ao ano, devido à redução da produtividade agrícola e industrial, da qualidade do açúcar e pelos custos com inseticidas.

2.4. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação

O sensoriamento remoto é dado pela utilização conjunta de sensores e diversos equipamentos de transmissão e processamento de dados acoplados a plataformas aéreas, ou outras plataformas, capazes de estudar eventos, fenômenos e processos que manifestam-se na superfície terrestre a partir da interação entre a radiação eletromagnética (REM) e a matéria (NOVO, 2010).

A REM é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto ao sensor, podendo ser definida como uma forma dinâmica de energia que manifesta-se através da sua interação com a matéria. A origem da REM varia ao longo do espectro eletromagnético e é emitida por todo corpo com temperatura superior a 0 K. Para o sensoriamento remoto da superfície terrestre, a principal fonte de REM é o sol (NOVO, 2010).

Além disso, a incidência da REM pode ser descrita em três processos de interação: a reflexão, a transmissão e a absorção. De modo geral, as frações espectrais da radiação incidente que serão refletidas, transmitidas e absorvidas dependem das características físico-químicas de um objeto (PONZONI et al., 2012).

As regiões do espectro eletromagnético possuem diferentes nomenclaturas e abrangem desde os raios gama até as ondas de rádio. No sensoriamento remoto, os sensores utilizados registram a REM em um diferentes intervalo de comprimentos de onda, todavia, devidos a interferências atmosféricas e aspectos tecnológicos, consideram-se apenas três regiões espectrais de maior interesse: espectro óptico (400 nm a 2.500 nm); termal (8.000 nm e 14.000 nm); e micro-ondas (radar), baseadas na REM entre 1 mm e 1 m (FORMAGGIO e SANCHES, 2017).

Considerando as propriedades refletivas de uma folha verde normal no intervalo de 400 nm a 2.500 nm (Figura 1.) é possível subdividir em três regiões espectrais: visível (400 a 700 nm), infravermelho próximo (700 a 1.300 nm) e infravermelho médio (1.300 a 2.500 nm).

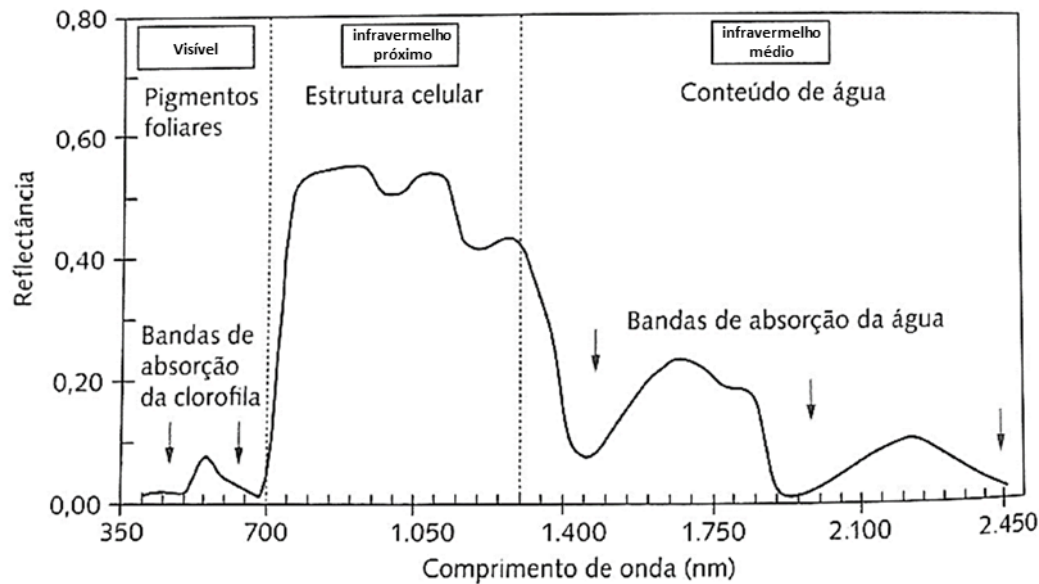


Figura 1. Comportamento espectral de um alvo de vegetação e principais fatores que influenciam na reflectância (adaptado FORMAGGIO E SANCHES, 2017)

Com base no comportamento espectral de um alvo de vegetação é possível constatar que na região do visível (entre 400 e 700 nm) a reflectância é muito baixa, enquanto que em 550 nm observa-se um pico e uma diminuição relativa de absorção, esclarecendo o porquê da vegetação ser vista na cor verde. Nota-se que este pico é causado por duas bandas de absorção de pigmentos do grupo da clorofila centradas em aproximadamente 450 nm (azul) e 650 nm (vermelho) (FORMAGGIO e SANCHES, 2017 APUD HOFFER, 1978). Estes pigmentos normalmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%) (PONZONI et al., 2012), sendo que a pigmentação das folhas altera a resposta espectral apenas na região do visível. Por isso, quanto maior a energia absorvida pelos pigmentos, menor será o fator de reflectância na região do visível (MULLA, 2013).

Para o intervalo de 700 a 1.300 nm temos uma região dominada pela alta reflectância da vegetação (aproximadamente 40%) devido à interferência da estrutura celular (estrutura do mesófilo). Para Moreira (2011), fatores como a disponibilidade de água podem alterar a estrutura do mesófilo, por exemplo, e elevar o espalhamento da radiação incidente, bem como os valores de reflectância. Além disso, há a região do *red-edge* (680-750 nm) localizada entre a região do visível e do infravermelho próximo. Esta zona é um eficiente indicador de estresses em plantas, já que possui maior sensibilidade às mudanças ocorridas na vegetação (GITELSON et al., 2011; SHAFRI & HAMDAN, 2009; VOGELMANN et al., 1993).

Por fim, entre 1.300 e 2.500 nm, a reflectância da vegetação é dominada pelo conteúdo de água das folhas. Nessa faixa encontram-se os três máximos de absorção pela

água; em 1.400 nm, 1.950 nm e 2.450 nm (FORMAGGIO E SANCHES, 2017; NOVO, 2010). Dessa forma, condições de seca reduzem a absorção da luz nos máximos de absorção pela água, enquanto que a senescência restringe a absorção da luz na região do visível (ECARNOT et al., 2013).

2.5. Utilização de sensores remotos no monitoramento fitossanitário e na quantificação do conteúdo de água

Os sensores remotos são considerados importantes aliados quando o assunto é segurança alimentar e/ou energética, visto que possibilitam a detecção e, até mesmo, o monitoramento de pragas. Graças às tecnologias de agricultura de precisão é possível um melhor gerenciamento da irrigação das culturas, fertilização e infecções por pragas e doenças, por exemplo (WEISS et AL., 2020; ZHANG et AL., 2019a).

No que diz respeito a aquisição de dados, Formaggio e Sanches (2017) abordam a existência de diferentes níveis de coleta de dados no sensoriamento remoto: orbital; aéreo (alta, média e baixa altitudes); e de campo/laboratório, o nível varia em função da distância entre o sensor e os objetos. Destaca-se que a escolha do nível a ser trabalhado depende dos objetivos para qual os dados serão obtidos. Logo, é necessário levar em consideração a resolução espacial, a resolução espectral e a resolução radiométrica dos dados (NOVO, 2010).

Dentro das ferramentas de aquisição de dados é possível estudar a relação entre diferentes problemas fitossanitários com a resposta espectral registrada em sensores multi ou hiperespectrais (BARROS et al., 2021). Os sensores multiespectrais medem bandas largas de comprimento de onda separadas por segmentos espectrais, enquanto a maioria dos sensores hiperespectrais adquire dezenas a centenas de bandas espectrais estreitas contíguas (LAUDIEN et al., 2003; SHIPPERT, 2004).

O sensoriamento remoto multiespectral tem sido usado efetivamente para monitorar a incidência de vários patógenos nas lavouras (DHAU et al., 2018a; DHAU et al., 2018b; GONGORA-CANUL et al., 2020), no entanto, há também diversos estudos hiperespectrais para a detecção de doenças em plantas (ABDULRIDHA et al., 2020; JUNGES et al., 2020; ZHANG et al., 2019b).

O trabalho dos autores Moshou et al. (2004) separou copas de trigo saudáveis e infectadas pela ferrugem amarela através de imagens capturadas por um espectrógrafo. Estas imagens foram transformadas em refletância e quatro comprimentos de onda centrados em

543 ± 10, 630 ± 10, 750 ± 10 e 861 ± 10 nm foram selecionados como variáveis discriminantes.

Apan et al. (2004) conduziram estudo sobre o mapeamento de doenças da ferrugem na cultura da cana-de-açúcar na Austrália, e avaliaram diversos índices de bandas estreitas de imagens do EO-1 Hyperion. O resultado foi de que áreas com ferrugem alaranjada da cana apresentaram diferenças na assinatura de refletância espectral, podendo ser discriminadas das áreas sem doenças quando combinado bandas de ondas no visível e infravermelho próximo.

Como abordado nos estudos acima, a produtividade das culturas pode ser severamente limitada em condições estressantes, como escassez de água ou disponibilidade de nutrientes. Especificamente sobre o déficit hídrico, os principais sintomas, conforme Jaleel et al. (2009), são a redução do teor de água nas folhas, o efeito de enrolamento e murchamento das folhas, a alteração do teor de clorofila e redução do índice de área foliar. Portanto, o estresse hídrico afeta a refletância da vegetação ao achatar a sua assinatura espectral (LASSALLE, 2021).

Dessa forma, o uso do sensoriamento remoto na quantificação do conteúdo de água da vegetação é uma excelente ferramenta para determinar o estado hídrico da vegetação. Isso porque que a energia eletromagnética refletida pela vegetação ou dossel pode ser alterada por mudanças ocasionadas por pragas, seja nos pigmentos, concentrações químicas, estrutura celular, nutrientes, troca gasosa e conteúdo de água que influenciam na coloração e temperatura da vegetação (JENSEN, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização da área de estudo

Este estudo foi conduzido com o apoio do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) em uma de suas áreas experimentais na fazenda Santa Maria, localizada no município de Cesário Lange-SP, Brasil (coordenadas geográficas 23°11'20" latitude sul e 47°51'34" longitude oeste de Greenwich, considerando o Datum WGS84), conforme figura abaixo.

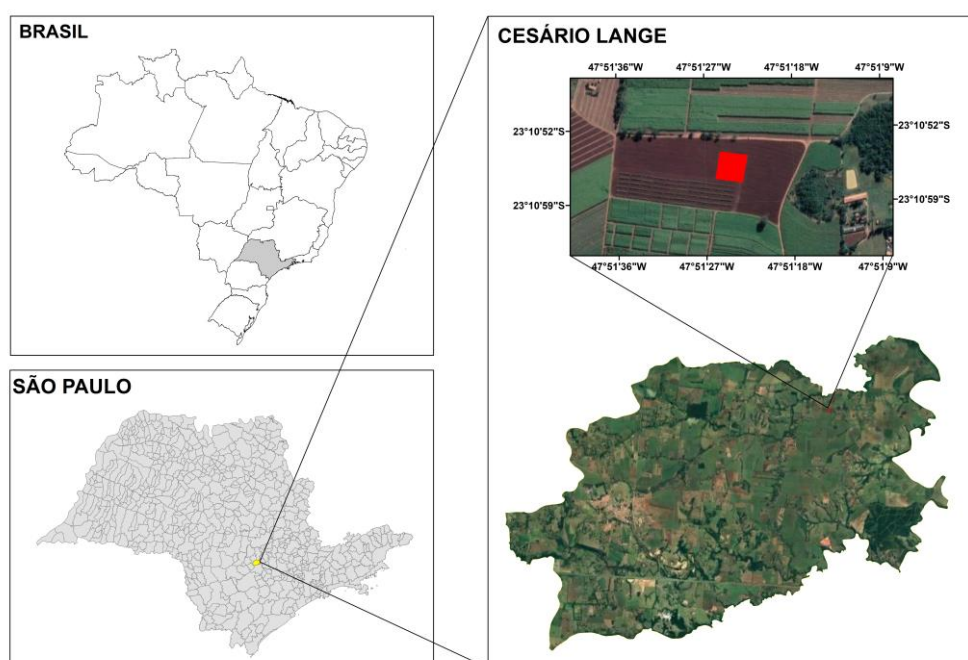


Figura 2. Localização da área de estudo

O clima da região segundo a classificação de Köppen é o subtropical úmido (Cfa), com uma temperatura média anual de 14° C, com máxima de 34°C e mínima de 3°C, com possibilidade de geadas fracas. A precipitação média anual é de 1.200 mm a 1.250 mm, e a média do mês mais seco é de 70 mm (Conselho Municipal de Desenvolvimento Rural, 2009).

O experimento foi instalado em novembro de 2021 com parcelas diferenciadas pelas variedades. Também foi utilizado, em metade das parcelas, o inseticida Altacor® para o controle de pragas. Este trabalho foi realizado na safra 2021/2022, sendo a primeira colheita do ensaio no mês de outubro de 2022. O estudo contou com três variedades de cana-de-açúcar: CTC9003BT (geneticamente modificada), CTC4 e RB966928.

	1	2
1	CTC9003BT TESTEMUNHA 1	CTC4 ALTACOR-0 8
2	RB966928 TESTEMUNHA 9	CTC9003BT ALTACOR-0 4
3	CTC4 TESTEMUNHA 5	RB966928 ALTACOR-0 12
4	CTC9003BT ALTACOR-0 3	CTC4 TESTEMUNHA 6
5	RB966928 ALTACOR-0 11	CTC9003BT TESTEMUNHA 2
6	CTC4 ALTACOR-0 7	RB966928 TESTEMUNHA 10

Figura 3. Croqui do ensaio (número da parcela em vermelho)

Conforme a Bula Técnica, a CTC9003BT é indicada para ser plantada em ambientes de produção tipo A, B e C e, normalmente, é colhida entre abril e setembro. Alguns pontos de destaque da variedade envolvem a resistência à *Diatraea saccharalis* (broca), a adaptabilidade à colheita mecanizada, florescimento raro, TCH (toneladas de cana por hectare) e ATR (kg de açúcar por tonelada de cana) elevados e PUI (período de utilização industrial) longo (CTC, 2021).

Recomenda-se a variedade CTC4 em ambientes de produção tipo A, B, C e D com destaque a TCH elevado, adaptabilidade à colheita mecanizada e perfilhamento elevado. Quanto aos pontos de observação para obter maior tolerância à ferrugem marrom em cana-planta, sugere-se não plantar em janeiro e fevereiro e, para cana-soca, sugere-se não estender a colheita a partir de setembro (CTC, 2021).

Já a variedade RB966928 apresenta excelente germinação em cana-planta, brotação em soqueiras muito boa, alto perfilhamento em cana-planta e em cana-soca, com excelente fechamento de entrelinhas, produção agrícola alta, PUI médio e maturação precoce a média (RIDESA, 2010).

As datas de coleta dos dados foram: 03/12/21; 21/01/2022; 22/03/22 e 28/04/2022. Os momentos foram escolhidos com o intuito de abranger as fases do desenvolvimento da cana-

de-açúcar: brotação e emergência; perfilhamento; crescimento dos colmos; início maturação dos colmos (GASCHO E SHIH, 1983).

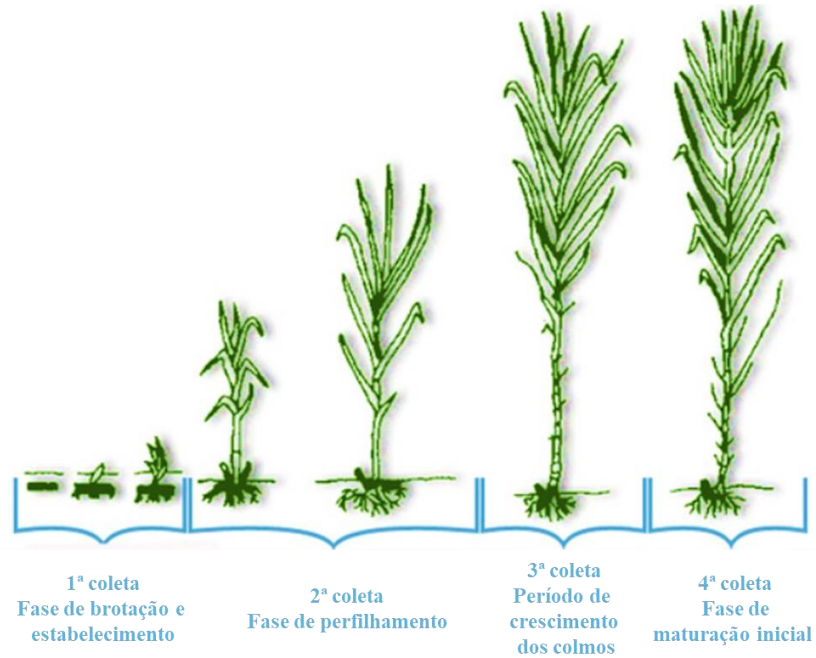


Figura 4. Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar (adaptado GASCHO E SHIH, 1983) e as datas de coletas

Para imagens aéreas (Figura 5.), estas foram obtidas pelo *RPA DJI Phantom4*, enquanto que as fotos dos estádio fenológicos foram feitas com celular comum.

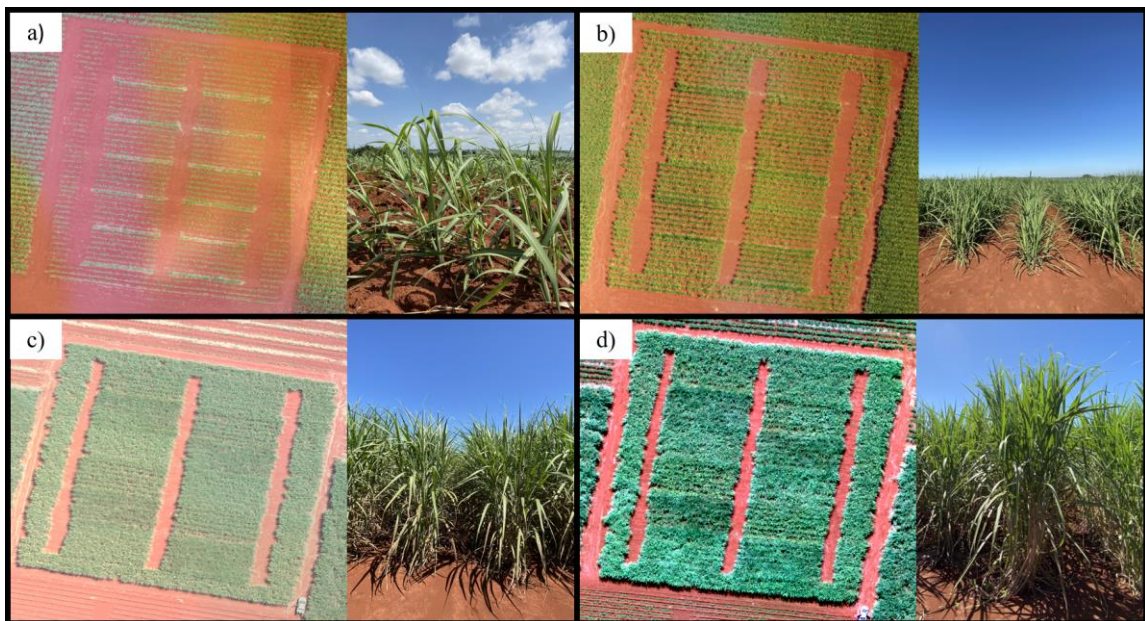


Figura 5. Primeira coleta 03/12/21 (a); Segunda coleta 21/01/2022 (b); Terceira coleta 22/03/22 (c); Quarta e última coleta 28/04/2022 (d)

3.2. Obtenção de dados hiperespectrais (folha e dossel)

Para a obtenção das curvas espectrais, foram coletadas 20 folhas por parcela para cada uma das variedades. Este procedimento estendeu-se por 4 datas durante o ciclo da cultura. Para fins de padronização na coleta, as folhas escolhidas para a análise foliar foram as folhas “+1” descritas na literatura como folha diagnóstico para a cana-de-açúcar e, que de acordo com o sistema Kuijper, ela é a primeira folha com o ponto de separação entre a lâmina foliar e a bainha.

Após a coleta, as folhas foram colocadas em sacos plásticos com suas respectivas identificações em uma caixa térmica com gelo, para manter a turgidez da folha, até serem levadas ao laboratório na ESALQ-USP em Piracicaba-SP. O percurso da área experimental até o laboratório durou, em média, 1 hora.



Figura 6. Coleta das folhas +1 (a); armazenamento das amostras em caixa térmica com gelo (b)

No laboratório, a leitura espectral das folhas foi obtida por meio do espectrorradiômetro *Fieldspec*® (ASD - Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, EUA), capaz de obter reflectância medida entre 350 e 2500 nm, com resolução espectral de 1 nm de 350 a 1000 nm e 2 nm de 1000 a 2500 nm, com campo de visada de 25°. Antes das leituras, o espectrorradiômetro ficou ligado 30 minutos com o objetivo de aquecer e estabilizar a lâmpada de halogêneo presente no equipamento. Além disso, foi realizada a calibração com a placa *lambertiana* presente no próprio *leafclip* do sensor. Para garantir uniformização dos dados, o procedimento de calibração repetiu-se a cada 5 leituras.

Posteriormente a leitura de todas as 240 folhas, os dados espectrais foram exportados para o software *ViewSpec Pro* (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA), responsável por convertê-los em refletância. Ademais, para a suprimir os ruídos, os dados

foram pré tratados no *Microsoft Excel*® e os comprimentos de onda de 350 a 449 nm, removidos. Portanto, a curva final abrangeu os comprimentos de 450 a 2450 nm.

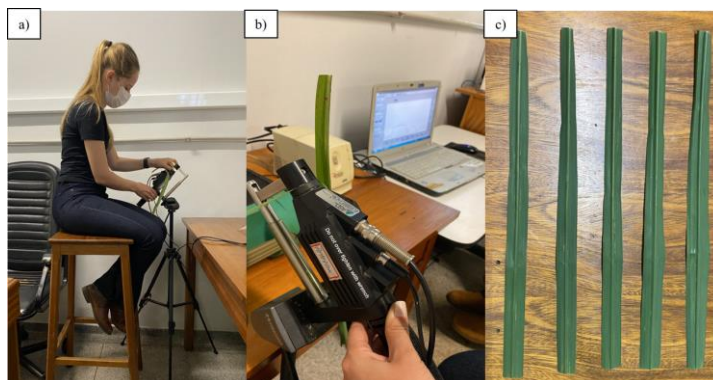


Figura 7. Leafclip do espectrorradiômetro Fieldspec® (a); leitura da folha e computador com o software RS3 (b); folha “+1” (c)

Para o sensoriamento do dossel de plantas, foi utilizado em campo, no final do experimento e apenas na quarta coleta (28/04/2022), o espectrorradiômetro *HandHeld 2* (ASD – *Analytical Spectral Devices, Boulder, EUA*) que é um sensor hiperespectral passivo e portátil que trabalha com comprimentos de onda do espectro visível ao infravermelho próximo (325 a 1075 nm), com resolução espectral de 3 nm. O instrumento foi acoplado em uma régua acima do dossel da vegetação. A cada 5 leituras, o sensor foi calibrado com a placa branca de sulfato de bário (BaSO_4), a qual correspondente a 100% de reflectância.

Igualmente feito com os dados obtidos no Fieldspec®, todas as 240 leituras foram exportados para o software *ViewSpec Pro* (ASD – *Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA*) e convertidas em refletância. Para a diminuição dos ruídos, os dados foram pré tratados no *Microsoft Excel*® e os comprimentos de onda de 325 a 399 nm removidos, bem como valores pós 800nm. Portanto, a curva final contemplou os comprimentos de 400 a 800 nm.



Figura 8. Obtenção das curvas espectrais do dossel com o espectrorradiômetro *HandHeld 2* acoplado em uma régua (a); placa branca de sulfato de bário (BaSO_4) para calibração do sensor (b)

3.3. Determinação do conteúdo relativo de água (CRA)

A disponibilidade de água é um fator determinante da produtividade das plantas em todo o mundo (LASSALLE, 2021), logo, o conteúdo relativo de água (CRA) pode ser um dos parâmetros utilizados para estimar a quantidade de água em uma folha (STRABELI ET AL., 2023) e traçar estratégias para amenizar os danos da escassez hídrica no campo.

Previamente a pesagem das amostras, todas as folhas foram cortadas com a ajuda de um furador tipo *scrapbook* circular de 25mm de diâmetro para padronizar o processo. Seguindo a metodologia Dhopte e Manuel (2002), para a determinação do conteúdo relativo de água (CRA) foi realizada a medição do peso fresco das amostras foliares (PF em gramas). Finalizada esta etapa, as folhas foram armazenadas dentro de um saco plástico contendo água destilada, em que permaneceram por 24h, e no final do processo foram submetidas a medição do peso turgido (PT em gramas). Por fim, a última etapa foi secar todas as amostras, dentro de um saco de papel previamente furado, a uma temperatura 70 °C em uma estufa por 72h e pesá-las novamente para obter o peso seco (PS em gramas). O cálculo do conteúdo relativo de água (CRA) seguiu a equação 1.

$$CRA = \frac{PF - PS}{PT + PS} \times 100$$

Equação 1

Sendo:

CRA (%) o conteúdo relativo de água

PF o peso fresco da folha (g)

PT o peso turgido (g)

PS o peso seco (g)

A figura abaixo retrata o passo a passo da obtenção do conteúdo relativo de água (CRA). Destaca-se que esta metodologia só foi empregada na quarta coleta (28/04/2022) para os dados foliares.



Figura 9. Folha cortada com a ajuda de um furador tipo *scrapbook* circular de 25mm de diâmetro (a); balança de precisão utilizada nas pesagens (b); separação dos sacos plásticos para iniciar a etapa da medição do peso túrgido (c); amostras submersas em água destilada (d); amostras armazenadas em sacos furados prontas para secagem (e); temperatura da estufa a 70 C° (f); disposição das amostras dentro da estufa (g); folha seca após 72h (h)

3.4. Índice de vegetação com diferença normalizada de “borda vermelha” (*Red-edge Normalized Difference Vegetation Index – NDVI₇₀₅*)

O Índice de Vegetação com Diferença Normalizada de “Borda Vermelha” (NDVI₇₀₅), calculado como uma combinação linear de refletância espectral em 750 nm e 705 nm, foi projetado para dados hiperespectrais. O NDVI₍₇₀₅₎ utiliza as faixas ao longo da borda vermelha e é sensível às mudanças no conteúdo de clorofila, bem como na estrutura da folha. Ademais, o NDVI detecta variações sutis de respostas bio-ópticas causadas pela copa doente (KUNDU et al., 2021). As aplicações mais comuns incluem agricultura de precisão, monitoramento florestal, incêndios florestais e detecção de estresse vegetal (CUNDILL et al., 2015). O NDVI₍₇₀₅₎ é determinado pela Equação 2 abaixo e é semelhante ao NDVI. O valor deste índice varia de -1 a 1. Esta etapa só foi aplicada aos dados hiperespectrais de dossel referentes a quarta coleta.

$$NDVI(705) = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}$$

Equação 2

Em que

R = refletância espectral e subscritos representam a banda espectral específica

3.5. Índice de Absorção pela Clorofila: Modificado (MCARI)

O índice espectral de Absorção pela Clorofila: Modificado (MCARI) (Equação 3) foi desenvolvido por Daughtry et al. (2000) com o objetivo de quantificar pequenas mudanças na escala de dossel na clorofila para diferentes níveis de estresse em diferentes locais de danos ((MULLA, 2013; ZHAO et al., 2023). Valores baixos de MCARI são atribuídos a alta concentração de clorofila foliar (WU et al., 2008). Esta etapa só foi aplicada aos dados hiperespectrais de dossel referentes a quarta coleta.

$$MCARI (670, 700) = [(R700 + R670) - 0,2 * (R700 - R500)] / \left(\frac{R700}{R670}\right)$$

Equação 3

Em que

R = reflectância espectral e subscritos representam a banda espectral específica

3.6. Avaliação da infestação e colheita

A avaliação final da infestação da *Diatraea saccharalis* (broca) no ensaio foi realizada pela própria equipe do CTC no dia 03/09/2022. Conforme Gallo et al. (2002) é possível estimar a intensidade de infestação da broca através da coleta e avaliação de 100 colmos (ou mais) por talhão com o intuito de aferir a quantidade total de internódios e de internódios brocados.

$$\text{Intensidade de infestação (II)} = \frac{100 * (n^{\circ} \text{ de internódios brocados})}{n^{\circ} \text{ total de internódios}}$$

Equação 4

Ao longo das quatro coletas também foi possível reconhecer de forma visual a ocorrência de infestação e, nestes casos, uma fita azul foi amarrada no colmo para facilitar identificação.

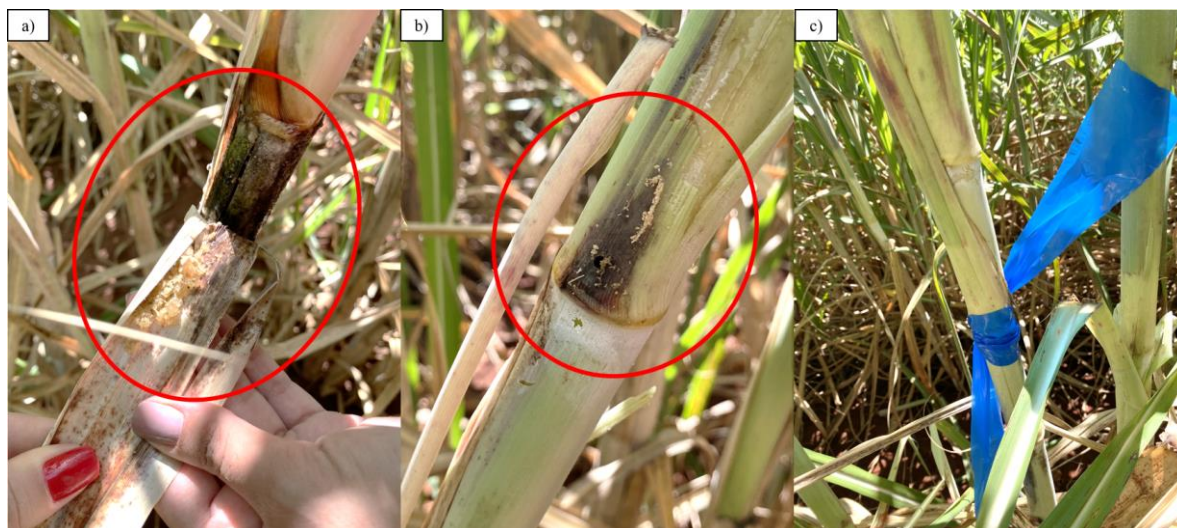


Figura 10. Identificação da ocorrência de broca (a); colmo atacado pela broca (b); fita azul amarrada no colmo para facilitar a identificação (c)

A colheita foi realizada pela equipe do CTC, de forma mecanizada no dia 19/10/22, e foi possível obter dados de TCH (toneladas de cana por hectare) e ATR (kg de açúcar por tonelada de cana), usados neste estudo.

3.7. Análise de Componentes principais (ACP)

Análises de natureza qualitativa são conduzidas com o objetivo de detectar nuances ao longo do espectro eletromagnético. Isso abrange aspectos como variações nas intensidades de reflectância (albedo) e detecção de padrões de absorção. Essas análises fornecem avaliações que permitem discernir entre diferentes coberturas vegetais, além de descrever qualitativamente as variações nos atributos físico-químicos das amostras (TAVARES, 2017).

Para o estudo dos dados dos sensores hiperespectrais, as análises mais comuns são do tipo multivariada e análise dos componentes principais (BARROS et al., 2021; LU et al., 2018). Em relação às análises qualitativas multivariadas, neste estudo foi empregada a Análise de Componentes Principais (ACP), método já conhecido e adotado em pesquisas na área do sensoriamento remoto hiperespectral (OLIVEIRA, 2023; SANTOS, 2023; SILVA, 2022; TAVARES, 2017).

A ACP é uma transformação ortogonal linear, que modifica o conjunto de dados original em um conjunto de dados compactado de variáveis não correlacionadas, conhecidas como componentes principais (CPs) (SILVA JUNIOR e PACHECO, 2021). Portanto, a ACP

é uma técnica utilizada para reduzir a dimensionalidade dos conjuntos de dados e aumentar a interpretabilidade sem perder informação.

3.8. Análise Discriminante

A análise discriminante é utilizada para escolher variáveis que diferenciam determinados grupos a fim de conhecer suas características e, conseqüentemente, prever a que grupo e perfil mais semelhante pertencem (PESTANA e GAGEIRO, 2005). De acordo com Barros (2016), a análise permite maximizar a variância interespecífica e minimizar a variância intraespecífica, reconhecendo que as classes possuem distribuição normal

Visando diferenciar as variedades com maior similaridade espectral, foi aplicada a análise discriminante múltipla com a ajuda do *software JMP PRO 14* (ferramenta de análise de dados) para obter centroides capazes de indicar o local mais típico de qualquer indivíduo de um grupo particular (BARROS, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise das Componentes Principais (ACP)

As componentes principais (CPs) 1, 2 e 3 representaram no mínimo 97% da variância da reflectância dos dados hiperespectrais. Para a CP1 temos: 73,10%, 71,00%, 74,40%, 84,00% e 85,80%; a CP2 apresentou valores de: 16,34%, 19,50%, 17,10%, 9,60% e 12,20%; enquanto que a CP3: 7,90%, 7,10%, 6,40%, 4,30% e 0,76% para a primeira, segunda, terceira, quarta-folha e quarta-dossel coletas, respectivamente.

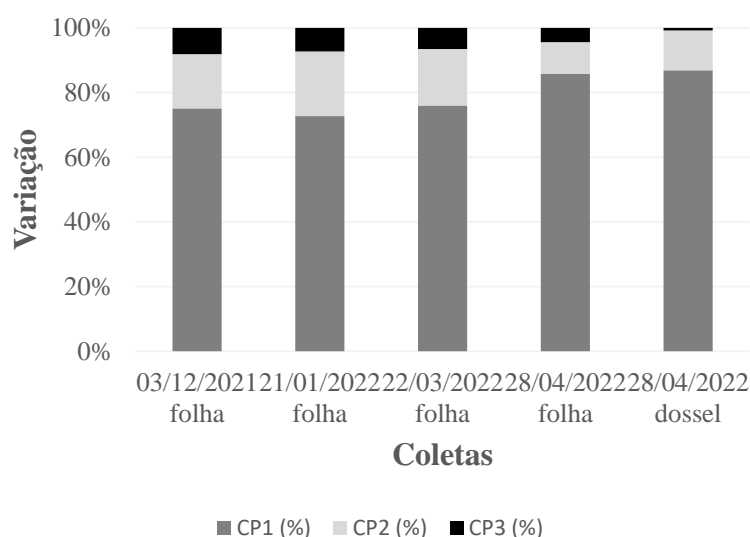


Figura 11. Variância das componentes principais 1, 2 e 3

Em estudo similar, Ribeiro (2022), ao trabalhar com as variedades IACSP 01-3127 e IACSP 95-5094, utilizou as componentes 1 e 2 (98,57% e 0,72% da variância observada, respectivamente) e conseguiu separar as variedades, porém os materiais se sobrepuseram entre si. Silva (2022) trabalhou com estresse nutricional de K na cana e encontrou em sua análise das componentes principais que as PC1 e PC2 explicaram 97% da variância da reflectância. Tavares (2017), que estudou a espectroscopia de reflectância em resposta da adubação nitrogenada na cana, obteve pelo menos 99% de variação na ACP com apenas as PC1 e PC2. Já para a avaliação da textura do solo por espectroscopia de reflectância, Franceschini et al. (2013) obtiveram um resultado de 75,8% da variabilidade espectral na PC1, em que parte dos dados radiométricos estava fortemente relacionada aos teores de argila e areia.

A figura 12 (a, b, c e d) exhibe os gráficos de dispersão dos *scores* e o comportamento dos *loadings* nas componentes 1, 2 e 3 obtidos das curvas espectrais, para as 4 coletas realizadas dos dados hiperespectrais das folhas. Considerando o estágio fenológico da primeira coleta (brotação e emergência) e que a área foliar ainda estava muito estreita, na CP1 os *loadings* apresentaram influência em todo o espectro, com picos próximos a 1.400 nm, na primeira máxima de absorção pela água do infravermelho médio. Na CP2 também há picos próximos ao infravermelho médio e próximo as bandas de absorção de água no infravermelho médio (1.950 nm e 2.450 nm). Já para a CP3, os *loadings* de maior influência ocorreram na região do visível (450 – 700 nm), com picos próximo 670 e 680, início da região do *red-edge*, bem como participação nas três máximos de absorção pela água (1.400 nm, 1.950 nm e 2.450 nm) (Figura 12a).

Na segunda coleta (Figura 12b), a CP1 se comportou de forma semelhante a anterior, visto que os *loadings* também apresentaram predomínio em todo o espectro, com extremidades próximas a 1.400 nm e em torno de 1.700 nm, e vales em 1.450 e 1.950 (nas bandas de absorção de água) praticamente em todo o infravermelho médio, sendo que as faixas de menor influência foram observadas no visível (450 – 700 nm). Em relação a CP2 foi possível constatar as máximas perto dos 900 nm no infravermelho próximo e em torno de 2.000nm no infravermelho médio. Na CP3 o comportamento foi o mesmo identificado na primeira coleta, mas dessa vez com um pouco mais de influência nas três máximos de absorção pela água (1.400 nm, 1.950 nm e 2.450 nm) e *loadings* influentes na região do visível (450 – 700 nm), com picos próximo 670 e 680, início da região do *red-edge*.

Para a terceira coleta foi possível observar, mais uma vez, a tendência da CP1 em todo o espectro. A CP2 se manifestou um pouco mais, mesmo que de forma ínfima, na região do visível, com picos em torno de 900 nm no infravermelho próximo e vales em 1.400 nm em uma das bandas de absorção de água. Todavia, voltou a se manifestar próximo dos 2.000 nm no infravermelho médio. A tendência da CP3 foi praticamente idêntica a segunda coleta na região do visível (450 – 700 nm), com picos nos *loadings* próximos a 670 e 680, início da região do *red-edge*, mas com baixa influencia na primeira banda de absorção de água em 1.400 nm (Figura 12c),

Por fim, para a quarta coleta – folha (Figura 12d), os *loadings* da CP1 apresentaram influência em todo o espectro de forma ainda mais regular, quando comparado com as demais coletas. Dessa vez, a CP2 retratou picos na região do *red-edge* (750 nm) localizada entre a região do visível e do infravermelho próximo, além de certa influência na primeira banda de absorção de água em 1.400 nm. No mais, a CP3 apresentou vales em 450 nm e 670, enquanto

houve um salto no *red-edge*, especificamente em 710 nm e uma maior influência no infravermelho próximo, em comparação com as outras coletas.

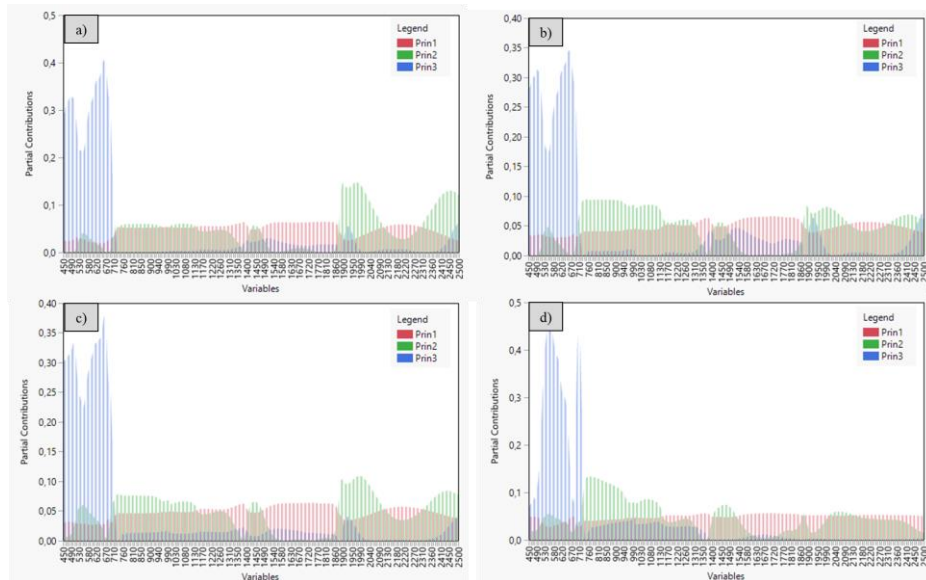


Figura 12. Comportamento dos *loadings* na primeira coleta (a); comportamento dos *loadings* na segunda coleta (b); comportamento dos *loadings* na terceira coleta (c); comportamento dos *loadings* na quarta coleta (folha) (d);

No que diz respeito a quarta coleta – dossel, o comportamento dos *loadings* foi estudado de forma separada, visto que o comprimento de onda que o sensor trabalha é menor e o intervalado analisado foi de 400 a 900 nm. Como observado abaixo (Figura 13), os *loadings* da CP1 e CP2 apresentaram influência em todo o espectro de forma regular, correspondendo a 98% da variabilidade espectral. Foi possível observar certo pico da CP1 em torno de 730 nm na faixa do *red-edge* a medida que a CP2 apresentou vale nesta mesma região do infravermelho próximo. Ademais, para a CP3, equivalente a apenas 0,76% de variação, a maior influência foi na região do visível (com picos nos 400nm) e em torno dos 670 nm (infravermelho próximo).

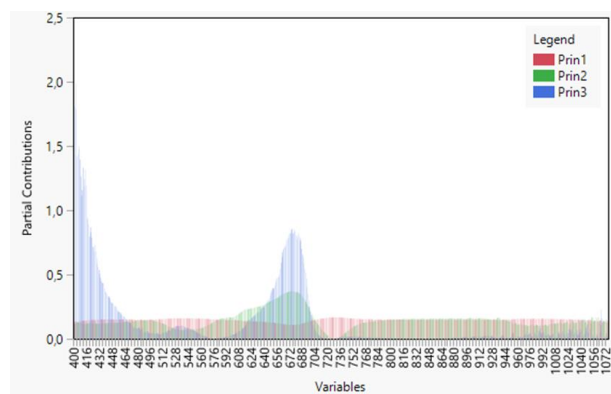


Figura 13. Comportamento dos *loadings* na quarta coleta (dossel)

4.2. Análise descritiva das curvas espectrais

A Figura 14 (a, b, c e d) demonstra o comportamento espectral foliar das quatro coletas. Para a primeira coleta 03/12/21 (Figura 14a), os valores de reflectância na região do visível (400 a 700 nm) não divergiram muito, já no intervalo de 700 a 1.300 nm (infravermelho próximo) observou-se a maior discrepância entre as parcelas. Todavia, nesta primeira coleta as folhas ainda estavam estreias e a nervura central dificultou as leituras, o que pode ter corroborado com a falta de uniformidade dos dados, uma vez que as plantas estavam em estágio de brotação/emergência, nas mesmas condições hídricas e sem presença da broca da cana.

Em relação a segunda coleta 21/01/2022 (Figura 14b), os valores de reflectância na região do visível (400 a 700 nm) foram mais díspares quando comparados com a primeira coleta. Nota-se que as parcelas 1 e 2 (ambas CTC9003BT) foram as que menos refletiram na região do visível, indícios de folhas mais saudáveis, uma vez que a quantidade de radiação refletida pelas plantas está inversamente relacionada à radiação absorvida pelos pigmentos vegetais e varia com o comprimento de onda da radiação incidente (MULLA, 2013). Pigmentos vegetais, como a clorofila, absorvem fortemente a radiação no espectro visível de 400 a 700 nm (PINTER et al., 2003). Percebe-se, ainda, que a parcela 2 registrou menor fator de reflectância no comprimento de onda 1950 nm, isto é, à medida que a água absorve a radiação eletromagnética, as plantas com maior conteúdo de água na folha apontam menor fator de reflectância neste comprimento (PONZONI et al., 2012).

Para a terceira coleta 22/03/22 (Figura 14c), as parcelas 1 e 2 (CTC9003BT) absorveram mais que as demais parcelas na região do visível, em contrapartida, a parcela 6 (CTC4) foi a que mais refletiu na mesma região. Na faixa do infravermelho próximo (700 nm a 1300 nm), região influenciada pela estrutura interna da folha (MOREIRA, 2011), percebe-se alterações na intensidade de reflectância entre as parcelas. Para as parcelas 4 e 11, a diminuições de absorção da energia eletromagnética localizadas em 970 nm e 1200 nm é notória neste comprimentos de onda associados ao conteúdo de água na folha (ZHANG et al., 2010). No infravermelho médio, especificamente na região em que se encontram os máximos de absorção pela água (1.400 nm, 1.950 nm), as parcelas 3 e 9 foram as que apresentaram maior absortância, indicando maior concentração de água na folha, isso porque um forte aumento de reflectância em torno de 1450 e 1950 nm simboliza modificação do estado hídrico de plantas estressadas (DE JONG et al., 2012).

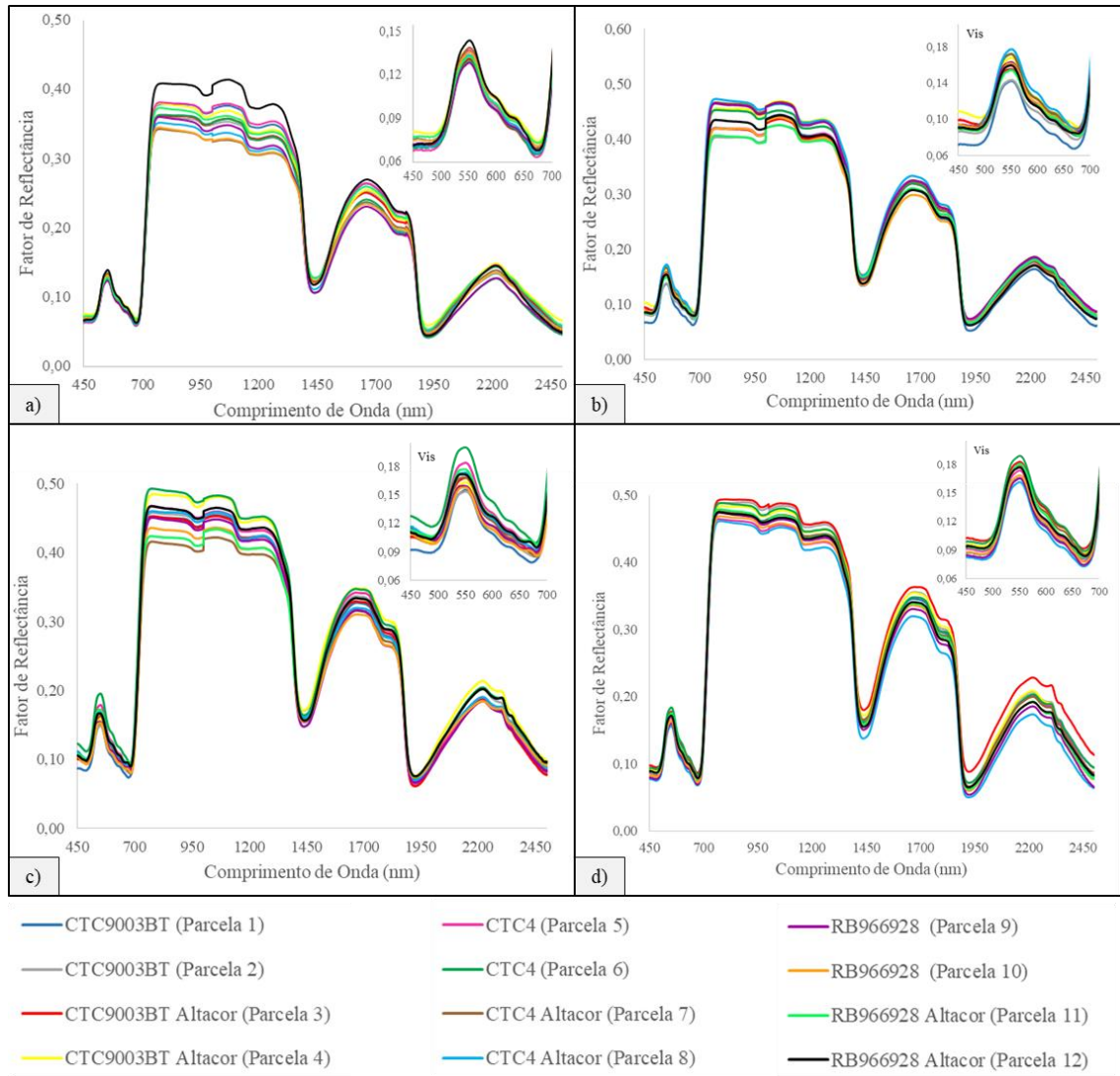


Figura 14. Assinaturas do espectrorradiômetro Fieldspec (folha) – primeira coleta 03/12/21 (a); segunda coleta 21/01/2022 (b); terceira coleta 22/03/22 (c); quarta e última coleta 28/04/2022 (d)

Na quarta e última coleta de folhas (Figura 14d), as parcelas se comportaram de forma semelhante na região do visível (400 a 700 nm) em comparação com as demais coletas. Já na região do infravermelho próximo, as parcelas 1, 2 (CTC9003BT), 3 e 4 (CTC9003BT altacor) e a parcela 6 (CTC4) apresentaram taxas de refletância próximas a 50%. Quanto ao infravermelho médio, destaca-se que as folhas foram coletadas na parte da manhã perto das 9h00, enquanto que a leitura do dossel foi realizada, no mesmo dia, às 12h a fim de diminuir a incidência de sombra no sensor. Nestas condições, as folhas passaram muito tempo na caixa térmica e, provavelmente, não conseguiram manter umidade total até o laboratório.

Para os dados de dossel (Figura 15), na faixa do *red-edge* (680-750 nm), região de transição de rápida mudança na reflectância foliar causada pela forte absorção de pigmentos no espectro vermelho e dispersão foliar no infravermelho próximo, descrito como

sensível à clorofila da copa das culturas (CLEVERS et al., 2002; HATFIELD et al., 2008), foi possível constatar que as parcelas 1, 2 (CTC9003BT) e 3, 4 (CTC9003BT altacor) foram as que mais se deslocaram para a direita, ou seja, possivelmente apresentam maiores concentrações de clorofila e, conseqüentemente, maior absorção de energia e menos estresse. A ausência de clorofila acarreta a diminuição de energia na região espectral do visível, com maior reflectância no verde e no vermelho, passando a ter aparência amarelada ou clorótica (CARTER, 1993; CHO et al., 2006) e a tendência da curva é deslocar-se para a esquerda.

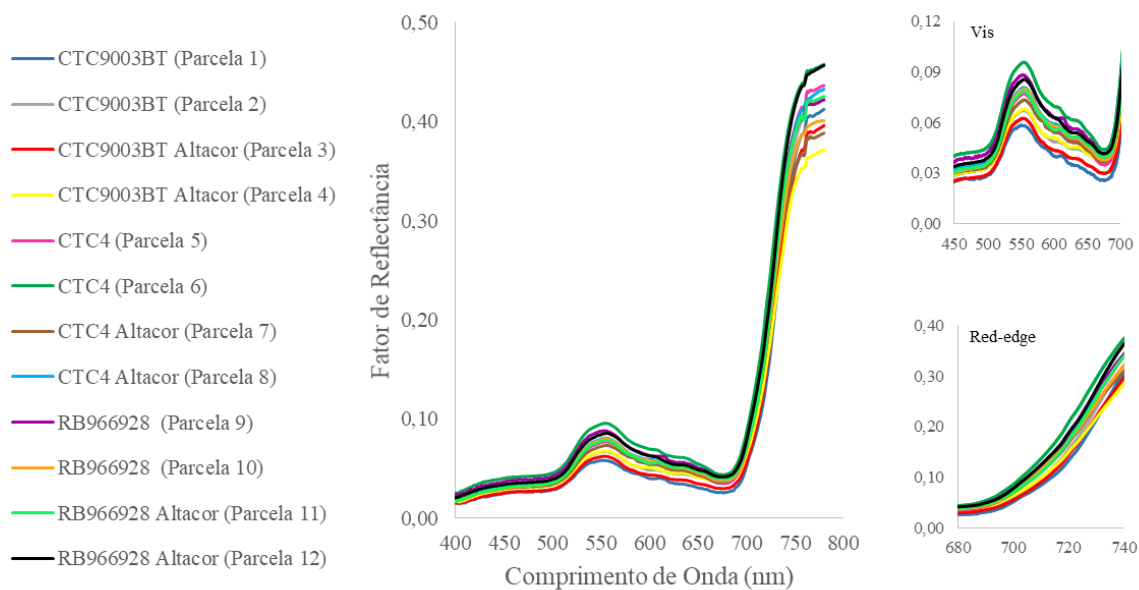


Figura 15. Assinaturas do espectrorradiômetro *HandHeld 2* (dossel) – quarta coleta 28/04/2022

Em estudo similar, Martins (2013) caracterizou espectralmente cana-de-açúcar sadia e a infectada por nematoides e *Migdolus fryanus*. As medidas espectrorradiométricas foram realizadas *in situ* e a análise das curvas espectrais permitiu avaliar o potencial da determinação da posição da borda do vermelho (*Red Edge Position Determination – REPD*) e de diferentes índices hiperespectrais sensíveis à variação de clorofila na discriminação entre a cultura sadia e infectada, como o NDVI e o MCARI.

Os autores Abdel-Rahman et al. (2010) estudaram duas variedades populares de cana-de-açúcar cultivadas na África do Sul (N19 e a N12) em diferentes níveis de dano do inseto *Sugarcane thrips (Fulmekiola Serrata Kobus)*. As leituras espectrais revelaram diferenças significativas na região do red-edge que permitiram discriminar os diferentes níveis de dano.

Ainda para os dados de dossel foi realizada uma análise multivariada discriminante (Figura 16), em que cada ponto representa uma curva espectral obtida nas parcelas. A primeira função explica 64,52% da variabilidade dos dados e a segunda função 35,48%. Nesta análise é possível observar a separação entre as variedades. Barros (2016) também trabalhou com dados hiperespectrais de cana e constatou que a primeira função explicou 62,2% da variabilidade dos dados e a segunda função 25,4%, em que as quatro doses de nitrogênio se separaram

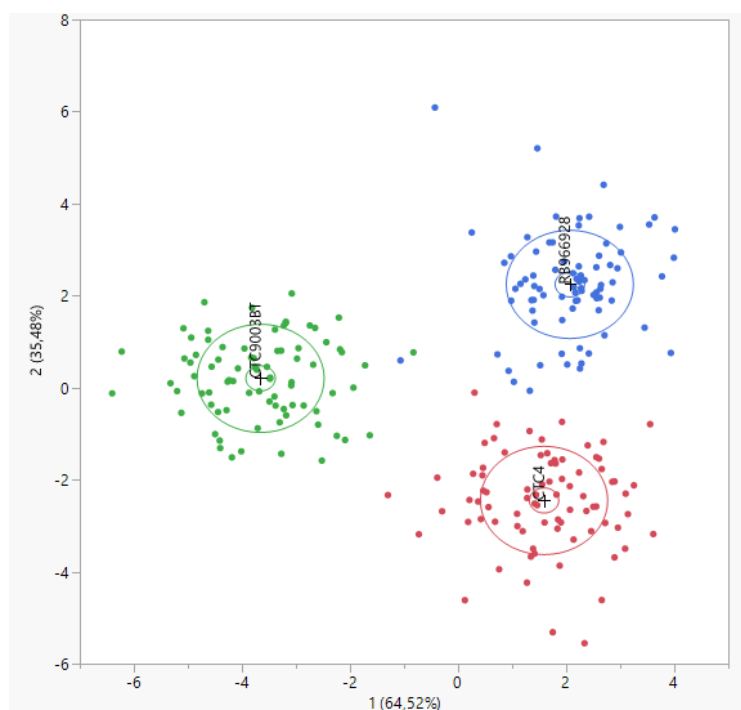


Figura 16. Análise multivariada discriminante (dossel) – quarta coleta 28/04/2022

4.3. NDVI (705) e Índice de Absorção pela Clorofila: Modificado (MCARI)

A representação dos dados de NDVI (705) por meio de *Box Plot* possibilitou melhor visualização e interpretação do conjunto de dados. As parcelas foram agrupadas por variedades, como demonstrado na Figura 16. A variedade com maior média é a CTC9003BT, para esta variedade o NDVI (705) médio foi de 0,66 com mediana de 0,66, sendo que a mínima informação coletada foi de 0,63 e o máximo 0,75. O primeiro quartil das informações coletadas é de 0,63 e o terceiro quartil é 0,69.

A variedade CTC9003BT altacor é a segunda melhor variedade através do NDVI com média e mediana em 0,64, sendo o primeiro quartil em 0,60 e o terceiro quartil em 0,67 e

o máximo 0,72. As variedades CTC4 e CTC4 altacor apresentaram comportamento igual no índice, com média e mediana de 0,61, primeiro quartil em 0,58 e terceiro quartil em 0,63. A informação máxima entre as variedades destoam, sendo 0,67 para a variedade CTC4 e 0,72 para a variedade CTC4 altacor.

As variedades RB966928 e RB966928 altacor também tiveram desempenho próximo quanto a mediana (0,60), mas a média da primeira foi menor, 0,59 frente 0,60, contudo a mínima informação da variedade RB966928 foi de 0,42 enquanto da variedade RB966928 altacor foi de 0,50, com máxima em 0,70 frente a 0,66 da primeira.

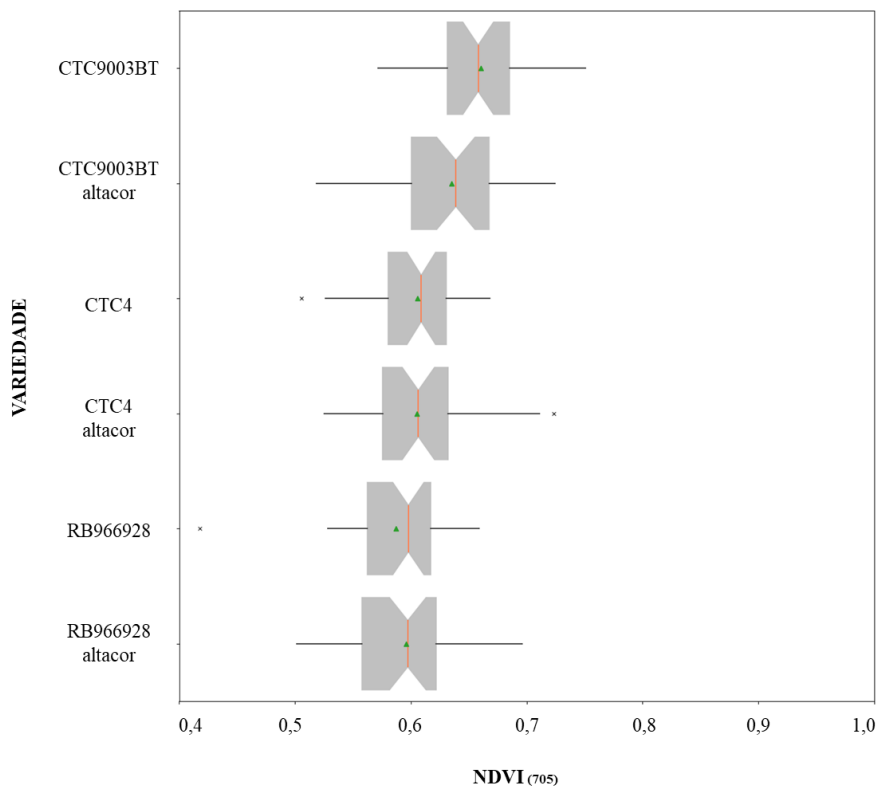


Figura 17. Box Plot NDVI (705) dados dossel

O trabalho de Kundu et al. (2021) monitorou a gravidade da doença da requeima da batata usando dados hiperespectral e, para o NDVI (705), constatou-se a diminuição de 0,61 de plantas saudáveis para 0,3 à medida que a severidade da doença atingiu o seu nível mais alto. Assim, o uso do NDVI (705), detectou variações sutis de respostas bio-ópticas causadas pela copa doente.

Em estudo com imagens de ARP Phantom 4 RTK – câmera multiespectral para mapeamento de NDVI, Silva (2023) realizou um levantamento populacional de pragas e identificou *Diatraea saccharalis* em sua área experimental. O autor concluiu que o local que apresentou os menores valores do índice de vegetação apresentava alta taxa de infestação de

broca e que, neste caso, os menores valores de NDVI possuíram relação com a alta infestação da praga.

A respeito do Índice de Absorção pela Clorofila: Modificado (MCARI), a Tabela 1 traz os índices hiperespectrais calculados para cada parcela. Martins (2013) sugere trabalhar os índices juntos (NDVI e MCARI).

Tabela 1. Valores médios dos índices hiperespectrais calculados

Parâmetros hiperespectrais calculados			
Parcela	Variedade	Índices	
		NDVI (705)	MCARI
1	CTC9003BT	0,6820	0,0428
2	CTC9003BT	0,6391	0,0589
3	CTC9003BT altacor	0,6579	0,0484
4	CTC9003BT altacor	0,6126	0,0612
5	CTC4	0,6136	0,0580
6	CTC4	0,5979	0,0669
7	CTC4 altacor	0,5882	0,0598
8	CTC4 altacor	0,6225	0,0615
9	RB966928	0,5899	0,0664
10	RB966928	0,5844	0,0656
11	RB966928 altacor	0,5936	0,0642
12	RB966928 altacor	0,5979	0,0694

Como já discutido nas assinaturas espectrais do dossel, as parcelas 1 e 3 (variedade CTC9003BT) manifestaram os índices mais baixos de MCARI que, conforme WU et al. (2008), valores inferiores deste índice estão atribuídos a alta concentração de clorofila foliar. Conseqüentemente, os valores de NDVI (705) foram os maiores para as mesmas parcelas, significando plantas mais saudáveis. Em contrapartida, a parcela 12 apresentou o maior valor para o índice MCARI e um dos NDVIs mais baixo das parcelas. No estudo de Martins (2013), o autor encontrou menores valores de MCARI na cana sadia em comparação com as infestadas *Migdolus fryanus* e nematoides, e menores valores de NDVI na vegetação parasitada pela larva do besouro *Migdolus fryanus*.

Para facilitar a visualização dos dados foi elaborado gráficos de dispersão (NDVI x MCARI), como mostra a figura abaixo (Figura 17).

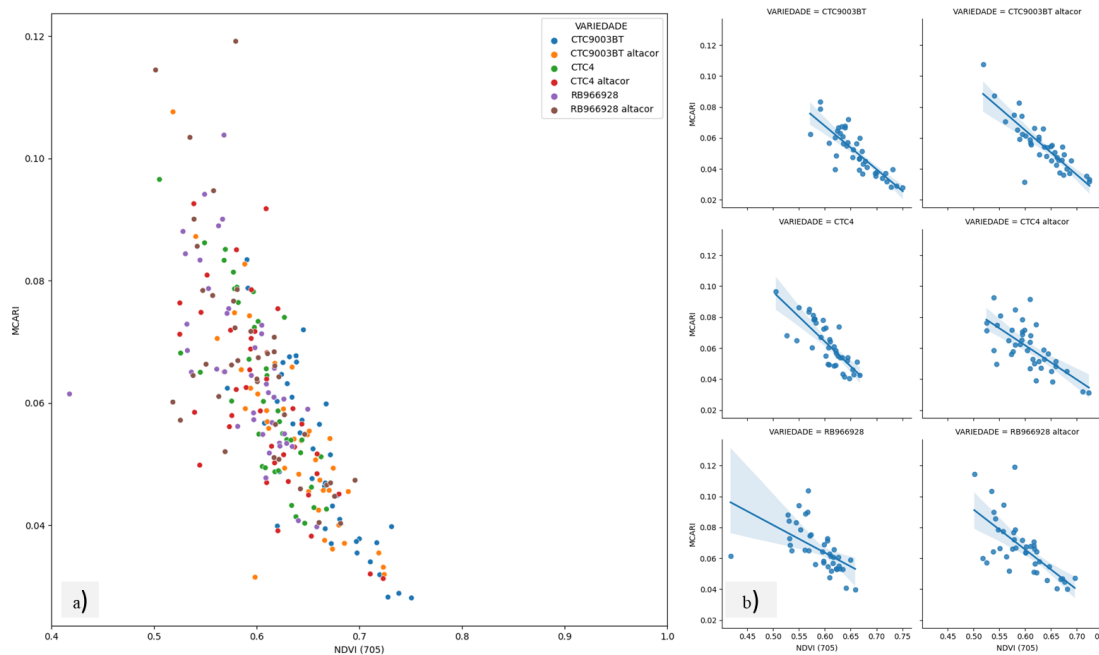


Figura 18. Gráfico de dispersão (NDVI x MCARI) – todos os dados (a); por variedade (b)

A Figura 18a ($R^2 = 0,58$) demonstra que, quanto maior o NDVI, menor o valor de MCARI. Com o intuito de analisar separadamente e de forma mais detalhada, a Figura 18b traz a análise por variedade. As parcelas que continham a CTC9003BT apresentaram um $R^2 = 0,70$, enquanto que as parcelas com CTC9003BT altacor geraram um $R^2 = 0,72$. Para as parcelas com CTC4 o R^2 foi de 0,64 e para a CTC4 altacor $R^2 = 0,47$. Por último, a RB966928 gerou um $R^2 = 0,31$ e a RB966928 altacor um $R^2 = 0,46$. Dessa forma, foi importante o uso dos dois índices para compreender melhor os valores obtidos, uma vez que a variedade CTC9003BT (com ou sem altacor) apresentou resultados satisfatórios, enquanto que a variedade RB966928 (com ou sem altacor) resultou em um coeficiente de determinação mais baixo.

No geral, as informações obtidas por meio dos dois índices avaliados possibilitou uma previsão, mesmo que sutil, de quais parcelas proporcionariam melhores ou piores resultados de produtividade ou intensidade da infestação, por exemplo. O tópico a seguir detalhou estes prognósticos.

4.4. Resposta da folha ao conteúdo de água, análise da produtividade e da intensidade de infestação

O estado hídrico das parcelas foi avaliado através do conteúdo de água (CRA), porém o teste ANOVA mostrou que não existe diferença estatística a nível de 1% entre os CRAs das parcelas ($R^2= 0,16$). Apesar de o CRA não ter apresentado diferença estatística, foi possível observar que a parcela 1 apresentou a maior porcentagem (63,6%), enquanto que a parcela 10 o menor valor (54%) (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição estatística dos parâmetros conteúdo relativa de água (CRA)

	Parcela	Variedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Máximo	Mínimo
CRA (%)	1	CTC9003BT	63,6	6,9	1,5	76,8	52,3
	2	CTC9003BT	56,7	5,0	1,1	68,1	46,3
	3	CTC9003BT Altacor	57,7	5,1	1,1	69,4	43,6
	4	CTC9003BT Altacor	60,3	8,6	1,9	87,6	48,3
	5	CTC4 (Parcela 5)	58,4	3,8	0,9	65,5	50,4
	6	CTC4 (Parcela 6)	54,1	6,6	1,5	63,3	40,4
	7	CTC4 Altacor	57,1	6,8	1,5	66,9	34,8
	8	CTC4 Altacor	56,4	4,7	1,1	64,2	44,1
	9	RB966928	55,9	4,4	1,0	63,8	48,9
	10	RB966928	54,0	5,7	1,3	73,6	45,5
	11	RB966928 Altacor	56,9	4,4	1,0	64,8	49,8
	12	RB966928 Altacor	57,4	4,4	1,0	65,4	49,3

Em estudo com cana-de-açúcar, Bonilla (2015) trabalhou com plantas de 7 meses de idade submetidas a déficit hídrico durante 10 dias. Como resultado, a autora concluiu que houve uma queda na umidade da folha através dos dias avaliados, ou seja, no primeiro dia de avaliação a média do CRA foi de 96,4%, enquanto que no último dia foi de 68%.

Quanto aos dados de produtividade e avaliação da intensidade de infestação (Tabela 3), percebe-se que as parcelas 1 e 10, citadas anteriormente com os CRAs extremos, foram as mesmas parcelas que tiveram o TAH (toneladas de ATR por Hectare) mais elevado e o mais baixo (18 e 13,7 respectivamente).

A variedade CTC9003BT (com e sem altacor) apresentou intensidade de infestação zero e, conseqüentemente, os melhores resultados de TAH, visto que não foi constatado consumo da massa do colmo das plantas, infecções por micro-organismos oportunistas e /ou tombamento.

As parcelas 9 e 5 apresentaram os maiores índices de infestação (7,63 e 6,87%, nesta ordem) e, mesmo com a aplicação de altacor, em algumas parcelas também foi encontrado internódios broqueado, mas em porcentagens baixas. Em seu estudo, Campidelli (2005) relatou índices médios de intensidade de infestação final da broca entre 11,2 e 35%. Rossato Júnior (2012) avaliou que níveis elevados de infestação (19,01 e 25,77%) impactam negativamente a qualidade da matéria-prima, pois a broca aumenta a fibra da cana-de-açúcar e os teores de compostos fenólicos no caldo extraído. Dessa forma, Gallo et al. (2002) alegam que o controle da broca deve começar assim que os índices de intensidade de infestação final estiverem acima de 3%.

Tabela 3. Dados de produtividade e avaliação da intensidade de infestação (*Diatraea saccharalis*)

Parcela	Variedade	Nº total de internódios	Nº internódios broqueados	%	Ton/ha	Pureza	ATR	TAH
1	CTC9003BT	113	0	0	123,6	88,0	152,5	18,8
2	CTC9003BT	103	0	0	119,3	88,3	151,2	18,0
3	CTC9003BT altacor	119	0	0	111,9	87,8	160,6	18,0
4	CTC9003BT altacor	108	0	0	111,9	89,3	157,4	17,6
5	CTC4	131	9	6,87	107,1	89,0	150,5	16,1
6	CTC4	116	8	6,90	97,4	87,3	143,4	14,0
7	CTC4 altacor	112	6	5,36	101,4	86,8	151,9	15,4
8	CTC4 altacor	118	5	4,24	110,5	87,7	150,0	16,6
9	RB966928	118	9	7,63	90,0	89,2	152,7	13,7
10	RB966928	115	7	6,09	99,3	89,3	148,3	14,7
11	RB966928 altacor	129	4	3,10	91,9	89,2	154,0	14,1
12	RB966928 altacor	126	1	0,79	99,8	88,8	160,6	16,0

5. CONCLUSÃO

A Análise das Componentes Principais (ACP) para a quarta coleta – dossel (28/04/2022) foi a que melhor se comportou em relação as demais, correspondendo a 98% da variabilidade espectral. A uniformidade dos dados desta coleta possibilitou a escolha dos índices de vegetação que foram utilizados ao longo do estudo, além de suscitar a influência e a importância da região *red-edge*.

Para a análise descritiva das curvas espectrais, a primeira coleta (03/12/21) não foi significativa, uma vez que as folhas estavam estreias e a nervura central dificultou as leituras. Portanto, a escolha das fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar é extremamente importante para a precisão das leituras. O mesmo vale para o tempo de deslocamento das folhas do campo até o laboratório, a quarta coleta – folha (28/04/2022) ficou alocada por muito tempo na caixa térmica e, provavelmente, não conseguiu manter a umidade esperada até o laboratório. Neste contexto, a análise do conteúdo relativo de água (CRA) também não foi significativo.

Os índices extraídos dos dados hiperespectrais do dossel: NDVI₍₇₀₅₎ e MCARI possibilitaram a separação entre as parcelas mais e menos vigorosas. A influência da região *red-edge* se dá, principalmente, na viabilidade de detectar mudanças estruturais ou fisiológicas nas plantas.

Dessa forma, a análise da resposta espectral das variedades em diferentes estádios fenológicos sob condições de disponibilidade hídrica e possíveis danos da broca pode trazer indícios de vigorosidade no dossel da cultura, visto que plantas afetadas pela broca apresentam colmos danificados e, conseqüenteente, redução da translocação de seiva.

Ainda assim, a dificuldade em diagnosticar antecipadamente a ocorrência de *Diatraea saccharalis*, ou outras pragas, é grande, mas pode ser atenuada com a escolha certa das ferramentas que o sensoriamento remoto oferece, principalmente quando falamos de dados e sensores hiperespectrais.

REFERÊNCIAS

ABDULRIDHA J., AMPATZIDIS Y., ROBERTS P., KAKARLA S.C. Detecting powdery mildew disease in squash at different stages using UAV-based hyperspectral imaging and artificial intelligence. **Biosyst. Eng.**, 197, pp. 135-148, 10.1016/j.biosystemseng.2020.07.001, 2020.

Abdel-Rahman, Elfatih M., Ahmed, Fethi B., van den Berg, Maurits & Mike J. Way. Potential of spectroscopic data sets for sugarcane thrips (*Fulmekiola serrata* Kobus) damage detection, **International Journal of Remote Sensing**, 31:15, 4199-4216, DOI: 10.1080/01431160903241981, 2010.

ALBRECHT L. P.; ALBRECHT A. J. P.; SILVA A. F. M.; BARROSO A. A. M. Manejo de organismos geneticamente modificados tolerantes a herbicidas. In: **Matologia: Estudos Sobre Plantas Daninhas**, pp:506–547. Barroso AAM, T Murata (Eds). Fábrica da Palavra, Jaboticabal, SP, Brazil, 2021.

ARAGÃO, F. J. L. **Engenharia genética – Estado da arte**. In: FALEIRO, F. G. e ANDRADE, S. R. M. **Biotecnologia, transgênicos e biossegurança**. Embrapa Cerrados, 2009.

ARANTES, O. M. N. **O que é preciso saber sobre clonagem e transgênicos**. São Paulo: Loyola, 97 p., 2003.

ARRIGONI, E. B. Broca da cana-de-açúcar: Importância econômica e situação atual. In: ARRIGONI, E.B.; DINARDO-MIRANDA, L.L.; ROSSETTO, R. **Pragas da Cana-de-Açúcar - Importância Econômica e Enfoques Atuais**. Piracicaba: STAB, 2002.

BARROS, P. P. da S.; ROSALEN, D. L.; IOST FILHO, F. H.; MARTINS, G. D.; DI LEO, N. Monitoramento Fitossanitário Utilizando Sensoriamento Remoto: Avanços e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 73, n. 2, p. 489–515, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n2-56597. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/56597>. Acesso em: 6 ago. 2022.

BEM - **Balço Energético Nacional, Relatório Síntese 2022 – ano base 2021**, Rio de Janeiro: EPE, 67p., 2022.

BOX, H. E. The crambine genera *Diatraea* and *Xantoperne* (Lep., Pyral.). **Bulletin of Entomological Research**, London, v. 22, p.1-50, 1931.

BRASIL. **Lei nº 11.105, de 24 de Março de 2005. Disponível em:** <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/lei/L11105.htm>. Acesso em: 16 mai 2021.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017.** Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm>. Acesso em: 24 jun 2021.

CARTER, GREGORY A. Primary and Secondary effects of the water content of the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, v.74, n.7, p.916-924, 1993.

CAMPIDELLI, C. A. Aumento das infestações de broca na região sul do estado de São Paulo e uma nova arma de controle: o inseticida fisiológico. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE CONTROLE DE PRAGAS DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1, 2005, Ribeirão Preto: IDEA, 2005.

CAPALBO, D.M.F.; VILAS-BÔAS, G.T.; SUZUKI, M.T. *Bacillus thuringiensis*. **Embrapa Meio Ambiente: Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**, Uberlândia, v. 8, n. 34, p. 76-83, 2005.

CARBOGNIN, Éllen Rimkevicius. **Modelagem de previsão de *Diatraea Saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2019. Tese (Doutora em Agronomia - Entomologia Agrícola) - Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/138060>>. Acesso em: 21 jun 2021.

CLEVERS, J.G.P.W., JONG, S.M. DE, EPEMA, G.F., VAN DER MEER, F., BAKKER, W.H., SKIDMORE, A.K., SCHOLTE, K.H. Derivation of the red edge index using MERIS standard band setting. **International Journal of Remote Sensing**, 23, pp. 3169-3184, 2002.

CHO, M. A.; SKIDMORE, A. K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 2, p. 181–193, 2006.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 8, n. 4 abril, 2022.

CONSELHO MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO RURAL. **Plano municipal de Desenvolvimento Rural sustentável – Município de Cesário Lange 2010- 2013**. Disponível em: https://www.cati.sp.gov.br/conselhos/arquivos_mun/132_15_03_2013_Plano%20Municipal%20-%20PMDRS%20-%20Cesario%20Lange.pdf. Acesso em: 1 ago. 2022.

CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (2017). Bula Técnica CTC 20 BT. Centro de Tecnologia Canavieira, 20 p. **Disponível em:** <https://ctc.com.br/produtos/wp-content/uploads/2017/10/BULA-T%C3%89CNICA-CTC_20BT_v2.pdf>. **Acesso em:** 18 mai 2021.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira (2021). Bula Técnica CTC 9003 BT. Centro de Tecnologia Canavieira, 9 p. **Disponível em:** < https://ctc.com.br/produtos/wp-content/uploads/2021/07/Bula-CTC9003BT-2021-_.pdf>. **Acesso em:** 20 jun 2021.

CUNDILL, S., WERFF, H. VAN DER, M. MEIJDE, VAN DER. **Adjusting spectral indices for spectral response function differences of very high spatial resolution sensors simulated from field spectra** *Sensors*, 15 (3), pp. 6221-6240, 2015.

DAIOGLOU V., DOELMAN J. C., WICKE B., FAAIJ A., VAN VUUREN D. P. Integrated assessment of biomass supply and demand in climate change mitigation scenarios, **Global Environmental Change**, v. 54, p. 88-101, 2019.

DAUGHTRY, C.S.T., WALTHALL, C.K., KIM, M.S., COSTOUN, E. BROWN DE, MCMURTREY, J.E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 74 pp. 229-239, 2000.

DE JONG, S.M., ADDINK, E.A., HOOGENBOOM, P., NIJLAND, W. The spectral response of *Buxus sempervirens* to different types of environmental stress - a laboratory experiment. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.** 74, 56–65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.08.005>, 2012.

DHAU, E. ADAM, K.K. AYISI, O. Mutanga **Detection and mapping of maize streak virus using RapidEye satellite imagery**. *Geocarto Int.* pp. 1-11, 2018a.

DHAU, E. ADAM, O. MUTANGA, K. AYISI, E.M. ABDEL-RAHMAN, J. ODINDI, M. MASOCHA. **Testing the capability of spectral resolution of the new multispectral sensors on detecting the severity of grey leaf spot disease in maize crop**. *Geocarto Int.*, 33 (11) pp. 1223-1236, 2018b.

DHOPTÉ A.M., MANUEL L.M. **Principles and Techniques for Plant Scientists** (first ed.), Updesh Purohit for Agribios (India), Odhpur, 2002.

DINARDO-MIRANDA, L.L. **Pragas**. In: DINARDOMIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agronômico, p.349-404, 2008.

ECARNOT, M.; COMPAN, F.; ROUMET, P. Assessing leaf nitrogen content and leaf mass per unit area of wheat in the field throughout plant cycle with a portable spectrometer. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 140, p. 44–50, 2013.

ELACHI, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**, New York, Wiley, 1987.

FALEIRO, F. G. e ANDRADE, S. R. M. **Biotecnologia, transgênicos e biossegurança**. **Embrapa Cerrados**. 2009.

FORMAGGIO A. R., SANCHES I. D.. **Sensoriamento Remoto em Agricultura**. Oficina de Textos, SP, 2017.

FRANCESCHINI MHD, DEMATTÊ JAM, SATO MV, VICENTE LE, GREGO CR. Abordagens semiquantitativa e quantitativa na avaliação da textura do solo por espectroscopia de reflectância bidirecional no vis-NIR-SWIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 48(12): 1569-1582, 2013.

GALLO, D., NAKANO, O., SILVEIRA NETO, S., CARVALHO, R. P. L., BAPTISTA, G. C. DE., BERTI FILHO, E., PARRA, J. R. P., ZUCCHI, R. A., ALVES, S. B., VENDRAMIM, J. D., MARCHINI, L. C., LOPES, J. R. S., OMOTO, C. **Entomologia agrícola**. Piracicaba: FEALQ, Biblioteca de Ciências Agrárias Luiz de Queiroz, 2002.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, p. 445-479, 1983.

GITELSON, A.A.; THENKABAIL, P.S.; LYON, J.G.; HUETE, A. Remote sensing estimation of crop biophysical characteristics at various scales. **Hyperspectral remote sensing of vegetation**. CRC Press, p. 329–358, New York, 2011.

GONGORA-CANUL C., SALGADO J.D., SINGH D., CRUZ A.P., COTROZZI L., COUTURE J., RIVADENEIRA M.G., CRUPPE G., VALENT B., TODD T., POLAND J. Temporal dynamics of wheat blast epidemics and disease measurements using multispectral imagery. **Phytopathology**, 110, pp. 393-405, 2020.

HATFIELD, J.L., GITELSON, A.A., SCHEPERS, J.S., C.L. Walthall Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agron. J.**, 100 pp. 117-131, 2008.

IRVINE, J.E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. **Crop Science**, Madison, v. 15, n. 5, p. 671-676, 1975.

JALEEL C.A., MANIVANNAN P., WAHID A., FAROOQ M., AL-JUBURI H.J., SOMASUNDARAM R., PANNEERSELVAM R. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol.*, 11, pp. 100-105, 2009.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE). In: EPIPHANIO, J. C. N. (coordenador); FORMAGGIO, A. R.; SANTOS, A. R.; RUDORFF, B. F. T.; ALMEIDA, C. M.; GALVÃO, L. S. São José dos Campos: Parêntese. 672 p., 2009.

JUNGES, A.H., ALMANÇA, M.A.K., FAJARDO, T.V.M., DUCATI, J.R., Leaf hyperspectral reflectance as a potential tool to detect diseases associated with vineyard decline. *Trop. Plant Pathol.* 45, 522–533. doi: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00387-0>, 2020.

KOHLHEPP, G. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

KUNDU, R., DUTTA, D., NANDA, M. K., CHAKRABARTY, A. **Near Real Time Monitoring of Potato Late Blight Disease Severity using Field Based Hyperspectral Observation, Smart Agricultural Technology**, Volume 1, 100019, ISSN 2772-3755, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100019>, 2021.

LASSALLE, G.. **Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review**, *Sci. Total Environ.*, vol. 788, Art. no. 147758, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147758, 2021.

LIMA FILHO, M. & J.O. G. LIMA. Massa de ovos de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Pyralidae) em cana-de-açúcar: número de ovos e porcentagem de parasitismo por *Trichogramma* spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) em condições de campo. Apud PARRA, J.R.P.; BOTELHO P.S.M.; CORRÊA-FERREIRA B.S. BENTO J.M.S. **Controle Biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. Ed. Manole, SP. 609p. 2001.

MARTINS, GEORGE DEROCO. **Caracterização espectral e espacial de áreas infestadas por nematóides e *Migdolus fryanusem* em cultura canavieira**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/86821>, 2013.

MOSHOU, D., BRAVO, C., WEST, J., WAHLEN, S., MCCARTNEY, A.; RAMON, H. Automatic detection of ‘yellow rust’ in wheat using reflectance measurements and neural networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, 44: 173–188, 2004.

MOREIRA, M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 422 p., 2011.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, .2013.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, ANA KARLA DA SILVA. **Diagnóstico do nitrogênio foliar do milho (*Zea mays L.*) a partir de dados hiperespectrais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023. Doi:10.11606/D.11.2023.tde-04052023-164223. Acesso em: 2023-01-13, 2023.

OLIVEIRA, H. N. de. Cotesia no controle da Broca-da-cana. **Revista Campo & Negócios: Grãos**, ano 20, ed. 231, p. 44-45, jun. 2022.

PINTER, P. J., J. L. HATFIELD, J. S. SCHEPERS, E. M. BARNES, M. S. MORAN, C. S. T. DAUGHTRY, AND D. R. UPCHURCH. Remote sensing for crop management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 69 (6): 647–664. doi:10.14358/PERS.69.6.647, 2003.

PELAEZ, V.; SCHMIDT, W. “A difusão dos OGM no Brasil: imposição e resistências”, **Estudo Sociedade e Agricultura**, v.13, n. 14, pp. 05-31, 2000.

PESTANA, M.H.; GAGEIRO, J.N. **Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS**. 4 ed. Lisboa: Silabo, 2005. 690p.

RIBEIRO, L. A. L. **Utilização de dados hiperespectrais para diferenciação de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) L.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. doi:10.11606/D.11.2022.tde-11082022-095930. Acesso em: 2023-01-19, 2022.

RIDESIA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro – Curitiba, 136 p., 2010.

ROSSATO JÚNIOR, J. A. S. ***Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) e *Mahanarva fimbriolata* (Stal) (Hemiptera: Cercopidae) em cana-de-açúcar: impacto na qualidade da matéria-prima, açúcar e etanol**. Tese (Doutorado em Entomologia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Jaboticabal-SP, 2012.

SANTOS, JAMILE DO NASCIMENTO. **Resposta espectral: análise de componentes principais para a diferenciação de arranjos espaciais na soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 51 p., 2023.

SHAFRI, H. Z. M.; HAMDAN N. Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. **American Journal of Applied Sciences**, v.6, p.1031- 1035, 2009.

SILVA, ALLEF DE SOUZA. **Sensoriamento remoto suborbital de alta resolução no monitoramento do desenvolvimento vegetativo em cana-soca irrigada**. TCC - Medicina Veterinária. Areia: UFPB/CCA, 2023.

SILVA JUNIOR, J. A., & PACHECO, A. DA P. Avaliação de incêndio em ambiente de Caatinga a partir de imagens Landsat-8, índice de vegetação realçado e análise por

componentes principais. **Ciência Florestal**, 31(1), 417–439. <https://doi.org/10.5902/1980509843818>, 2021.

SILVA, CARLOS AUGUSTO ALVES CARDOSO. **Efeitos da aplicação de calcário nos parâmetros nutricionais, produtivos e na resposta hiperespectral foliar da cana-de-açúcar em solo de baixa fertilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. doi:10.11606/D.11.2022.tde-14102022-151024. Acesso em: 2023-01-13, 2022.

SOUZA, M.T. de; LIMA, M.I.; SILVA-WERNECK, J.O.; DIAS, J.C.S.; RIBEIRO, B.M. Ultrastructural and molecular characterization of the parasporal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis* subsp. kurstaki S93 active against *Spodoptera frugiperda*. **Biocell**, v.23, p.43-49, 1999.

STRABELI, T. F., FIORIO, P. R., RÉ, N. C., ALVARES, C. A., LUCIANO, A. C. S., & NAKAI, E. S. Modelos espectrais para a estimativa do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, 51, e3941. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.49>, 2023.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930-1975)**. Campinas, Hucitec, 1979.

TAVARES, T. R. **Espectroscopia de reflectância in situ na avaliação da resposta da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. Doi:10.11606/D.11.2017.tde-09082017-164610. Acesso em: 2023-01-13, 2017.

UNICA, (2018). UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR-BRASIL. **Union of the Brazilian sugarcane industry**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em: 25 jun 2021.

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, 14:8, 1563-1575, DOI: 10.1080/01431169308953986, 1993.

WEISS, M., JACOB, F., DUVEILLER, G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. **Remote Sens. Environ.** 236, 111402. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>, 2020.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W.; Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices. **Modeling and validation agricultural and forest meteorology**. 14 8, 1230–1241, 2008.

ZHAO, X., QI J., XU H., YU Z., YUAN L., CHEN Y., HUANG H., Evaluating the potential of airborne hyperspectral LiDAR for assessing forest insects and diseases with 3D radiative transfer modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 297, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113759>, 2023.

ZHANG, J., HUANG, Y., REDDY, K.N., WANG, B. Assessing crop damage from dicamba on non-dicamba-tolerant soybean by hyperspectral imaging through machine learning. **Pest Manag. Sci.** 75, 3260–3272. doi: <https://doi.org/10.1002/ps.5448>, 2019b.

ZHANG, J.; HUANG, Y.; PU, R.; GONZALEZ-MORENO, P.; YUAN, L.; WU, K.; HUANG, W. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 165, p. 104943, 2019. DOI. 10.1016/j.compedu.2014.10.027, 2019a.

ZHANG, J.; XU, Y.; YAO, F.; WANG, P.; GUO, W.; LI, L.; YANG, L. Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques. **Science China Technological Sciences**, Beijing, v. 53, n. 5, p. 1159-1167, 2010