UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA-UNESP

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: ENTOMOLOGIA AGRÍCOLA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FASES DE VIDA E DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DAS LARVAS DE *Diatraea saccharalis* FABRICIUS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) PARASITADAS POR *Cotesia flavipes* CAMERON (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

Souradji Idrissou Bachirou

Agrônomo (Entomologista)

Jaboticabal, SP

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA–UNESP

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: ENTOMOLOGIA AGRÍCOLA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FASES DE VIDA E DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DAS LARVAS DE *Diatraea saccharalis* FABRICIUS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) PARASITADAS POR *Cotesia flavipes* CAMERON (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

Discente: Souradji Idrissou Bachirou
Orientador: Prof. Dr. David Luciano Rosalen
Coorientador: Prof. Dr. Sergio Antonio De Bortoli

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Entomologia Agrícola).

Jaboticabal, SP

2025

I21c

Idrissou Bachirou, Souradji
Caracterização espectral das fases de vida e das respostas fisiológicas das larvas de Diatraea saccharalis Fabricius (Lepidoptera: Crambidae) parasitadas por Cotesia flavipes Cameron (Hymenoptera: Braconidae) / Souradji Idrissou Bachirou. -- Jaboticabal, 2026
105 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: David Luciano Rosalen
Coorientadora: Sergio Antonio De Bortoli

1. Sensoriamento Remoto Hiperespectral. 2. Reflectância espectra. 3. Entomologia. 4. Diatraea saccharalis - Cotesia flavipes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FASES DE VIDA E DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DAS LARVAS DE Diatraea saccharalis FABRICIUS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) PARASITADAS POR Cotesia flavipes CAMERON (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

AUTOR: SOURADJI IDRISSOU BACHIROU
ORIENTADOR: DAVID LUCIANO ROSALEN
COORIENTADOR: SERGIO ANTONIO DE BORTOLI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Entomologia Agrícola), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
DAVID LUCIANO ROSALEN
Data: 17/12/2025 07:32:06-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br
HOMERO FONSECA FILHO
Data: 18/12/2025 16:30:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Doutor HOMERO FONSECA FILHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Gestão Ambiental / EACH USP São Paulo/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br
ARLINDO LEAL BOICA JUNIOR
Data: 22/12/2025 11:47:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. ARLINDO LEAL BOIÇA JUNIOR (Participaçao Virtual)
Departamento de Fitossanidade / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 16 de dezembro de 2025.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Souradji Idrissou Bachirou, filho de Idrissou Bachirou e de Mkouligneman Adama, nativo do Benin, África Ocidental, nascido em 1º de janeiro de 1992. Bacharelado em Ciências Naturais/Entomologia Agrícola/Biologia e Ecologia Animal em 2015 pela Faculdade da Agronomia-Biologia-Geologia-Química (A-CBG) da Universidade de Abomey-Calavi/Benin (UAC). Meus estágios de graduação foram realizados em laboratório de Entomoligia Aplicada na UAC. O Trabalho de Conclusão de Curso, intitulado "Eficácia de nematóide mermitídeo *Romanomermis iyengari* (Welch) (Nematoda: Mermithidae) no controle do mosquito *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) (Diptera: Culicidae) no sul do Benin", foi realizado sob a orientação do Prof. Dr. Thiery B. Alavo e coorientação da Dra. Sita Abagli. De 2016 a 2023, fui técnico, pesquisador associado, chefe da divisão Entomologia no Laboratório de Defesa e Poteção das Culturas (LDC) de Instituto Nacional de Pesquisa Agrícola do Benin (INRAB). Durante este período, efetuei as criações de insetos e seus inimigos naturais no laboratório (que foram liberados nos campos para o controle biológico); conduzi varios experimentos no laboratório, em casa de vegetação e no campo; formei estagiários, técnicos e produtores nos métodos de controle biológico, químico e MIP. No agosto de 2023, iniciou no curso de Mestrado em Agronomia (Entomologia Agrícola no Programa de Pós-Graduação), pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – FCAV, sob orientação do Prof. Dr. David Luciano Rosalen, coorientação do Prof. Dr. Sergio Antonio De Bortoli, trabalhando na linha de pesquisa com Sensoriamento Remoto proximal hiperespectral no controle de insetos pragas, sendo bolsisto fomentado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. De 2024 a 2025, participei nos eventos, congressos e simpósios com varios trabalhos de pesquisa relacionados ao uso de Sensoriamento Remoto Hiperespectral na Entomologia Agrícola no âmbito da Agricultura Digital. Além disso, fui coorientador do trabalho de pesquisa de uma aluna de graduação em Engenharia Agronômica e, também, atuei como membro examinador em bancas de defesa de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e sou revisor de periódicos como *Journal of Research in Agriculture and Food Sciences*, *Journal of Engineering Research and Reviews* e *Open Veterinary Journal.* E-mail: ib.souradji@unesp.br.

Só o trabalho garante a independência.
Tem que trabalhar, porque o trabalho é a
única garantia de independência.

“Jean-Jacques Rousseau”

Aos meus pais, Idrissou Bachirou e Mkouligneman Adama, por me dar verdadeiros exemplos de força, coragem e determinação para atingir meus objetivos, dedicação e valores que me guiaram nesta jornada, tornando esta conquista também deles. À minha esposa pelo apoio constante.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter saúde e força para superar as dificuldades.

A UNESP/PPG-EA por me selecionar e pela qualidade do ensino.

A CAPES pela a bolsa.

A CEPENFITO (FAPESP 2017/25258-1) pelo apoio na pesquisa.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. David Luciano Rosalen, pelo ensino, dedicação, confiança, apoio, conselhos, correções, validação do trabalho e paciência para o desenvolvimento deste estudo; ao meu coorientador Prof. Dr. Sergio Antonio De Bortoli, pela dedicação, acompanhamento, ensino, correções e validação do meu trabalho, e a todos os professores do PPG-EA, pelas excelentes aulas.

Agradeço também ao Laboratório de Biologia e Criação de Insetos (LBCI), ao Núcleo de Geomática e Agricultura de Precisão (NGAP) e aos colaboradores da Usina da Unidade São Martinho (USM), pelo fornecimento de equipamentos, apoio logístico, criação de insetos e coleta de dados.

Gostaria de agradecer ao doutorando, Pedro Gomes Peixoto, pelo acompanhamento e conselho; a todos os meus amigos no NGAP e no LBCI pelo acompanhamento e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Também, agradeço a Samanta Regina Santos de Lúcio, Auxiliar de Laboratório da Unidade de São Martinho - USM, pela sua colaboração e participação na realização dos experimentos.

Por fim, agradeço a minha esposa, filhos, pais e irmãos pelo apoio e incentivo.

A todos, o meu muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO ---- I

ABSTRACT ---- II

LISTA DE FIGURAS ---- III

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS ---- V

1. INTRODUÇÃO ---- 1

2. REVISÃO DE LITERATURA ---- 5

2.1. SENSORIAMENTO REMOTO ---- 5
2.2. TIPOS DE SENSORES E APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO ---- 8
2.2.1. Sensores de imagens RGB (cor padrão) ---- 9
2.2.2. Sensores multiespectrais ---- 10
2.2.3. Sensores hiperespectrais ---- 13
2.2.4. Sensores térmicos ---- 15
2.2.5. Sensores LiDAR e RADAR ---- 17
2.3. IMPORTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL NA ENTOMOLOGIA AGRÍCOLA ---- 19
2.4. CANA-DE-AÇUCAR ---- 23
2.4.1. Ciclo de desenvolvimento ---- 23
2.4.2. Importância econômica ---- 23
2.4.3. Importância nutricional ---- 25
2.5. BROCA DA CANA-DE-AÇÚCAR, *DIATRAEA SACCHARALIS* ---- 27
2.5.1. Ciclo de vida ---- 27
2.5.2. Danos de *Diatraea saccharalis* na cana-de-açúcar ---- 30
2.6. METODOS DE CONTROLE ---- 33
2.6.1. Controle químico ---- 33
2.6.2. Controle biológico ---- 33
2.6.3. Controle cultural ---- 35
2.7. PARASITOIDE *COTESIA FLAVIPES* ---- 35
2.7.1. Ciclo de vida ---- 35
2.7.2. Importância de *Cotesia flavipes* no biocontrole ---- 36

3. MATERIAL E MÉTODOS ---- 38

3.1. LOCAIS DE DESENVOLVIMENTO ---- 38
3.2. CRIAÇÃO DE INSETOS ---- 38
3.3. BIOENSAIO ---- 39
3.4. SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL ---- 39
3.5. PROCEDIMENTO E COLETA DE DADOS ---- 40
3.5.1. Primeira série: ---- 41
3.5.2. Segunda série: ---- 41
3.5.3. Terceira série: ---- 42
3.6. PROCESSAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA ---- 43

4. RESULTADOS ---- 45

4.1. ASSINATURA ESPECTRAL DOS OVOS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* ---- 45
4.2. ASSINATURA ESPECTRAL DAS LARVAS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* ---- 46
4.3. ASSINATURA ESPECTRAL DAS PUPAS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* ---- 49
4.4. ASSINATURA ESPECTRAL DE ADULTOS DE *DIATRAEA. SACCHARALIS* ---- 50
4.5. ASSINATURA ESPECTRAL DAS LARVAS MORTAS E VIVAS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* ---- 52
4.6. ASSINATURA ESPECTRAL DAS LARVAS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* PARASITADAS POR *C. FLAVIPES* ---- 55

4.7. ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS ESPECTRAIS DE ESTADIOS LARVAIS DE *DIATRAEA SACCHARALIS*----------58
4.8. ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS ESPECTRAIS DE ESTÁGIOS DE *DIATRAEA SACCHARALIS* ----------60
4.9. ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS ESPECTRAIS DAS LARVAS MORTAS, VIVAS E PARASITADAS DE *DIATRAEA SACCHARALIS*----------62
5. DISCUSSÃO----------65
6. CONCLUSÕES----------72
7. REFERÊNCIAS----------74

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FASES DE VIDA E DAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS DAS LARVAS DE *Diatraea saccharalis* FABRICIUS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) PARASITADAS POR *Cotesia flavipes* CAMERON (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

RESUMO - O Sensoriamento Remoto proximal hiperespectral permite a análise precisa dos estágios de desenvolvimento de insetos e suas interações com agentes de biocontrole. Este estudo caracteriza espectralmente os estágios de vida de *Diatraea saccharalis* e avalia as respostas fisiológicas das larvas parasitadas por *Cotesia flavipes*. Para isso, foram obtidos dados de reflectância espectral com sensores de alta precisão. Os experimentos ocorreram em laboratório sob condições controladas para garantir a reprodutibilidade. As medições abrangeram ovos, larvas, pupas e adultos, com ênfase em larvas parasitadas. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para identificar variações hiperespectrais significativas relevantes e distinguir grupos biológicos. Os resultados mostraram diferenças significativas nas reflectâncias espectrais entre os estágios de desenvolvimento e o estado fisiológico das larvas de pós-parasitismo. Ovos recém-postos e pupas recém-formadas apresentaram maior reflectância do que ovos pré-eclosão e pupas velhas. As larvas do primeiro instar foram significativamente distintas das demais fases larvais por sua alta reflectância. Nos adultos, as superfícies dorsais de machos e fêmeas foram semelhantes, mas a superfície ventral das fêmeas exibiu padrões distintos. As larvas parasitadas por *C. flavipes* apresentaram assinaturas espectrais diferentes, especialmente nas bandas do infravermelho próximo (NIR), refletindo alterações bioquímicas e fisiológicas causadas pelo parasitismo. Entre 8 e 10 dias após o parasitismo, a reflectância das larvas tornou-se semelhante à de larvas mortas e diferente daquelas vivas ou recém-parasitadas. A PCA confirmou a eficácia da reflectância espectral na discriminação dos estágios de *D. saccharalis*. Os dados gerados neste estudo podem integrar e contribuir para um banco espectral para futuras aplicações em entomologia, criação massal e controle biológico. Essa tecnologia pode integrar sistemas de agricultura de precisão, otimizando para a caracteiszação, integração no manejo de pragas e reforçando o uso sustentável dos recursos agrícolas.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, broca-da-cana, espectrorradiômetro, parasitismo, reflectância, Sensoriamento Remoto proximal

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF THE LIFE STAGES AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF *Diatraea saccharalis* FABRICIUS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) LARVAE PARASITIZED BY *Cotesia flavipes* CAMERON (HYMENOPTERA: BRACONIDAE)

ABSTRACT - Hyperspectral Remote Sensing allows for precise analysis of insect developmental stages and their interactions with biocontrol agents. This study spectrally characterizes the life stages of *Diatraea saccharalis* and evaluates the physiological responses of larvae parasitized by *Cotesia flavipes*. For this purpose, spectral reflectance data were obtained using high-precision sensors. The experiments were conducted in the laboratory under controlled conditions to ensure reproducibility. Measurements covered eggs, larvae, pupae, and adults, with emphasis on parasitized larvae. Principal Component Analysis (PCA) was applied to identify significant relevant hyperspectral variations and distinguish biological groups. The results showed significant differences in spectral reflectance between developmental stages and the physiological state of larvae after parasitism. Newly laid eggs and newly formed pupae showed higher reflectance than pre-hatching eggs and old pupae. First instar larvae were significantly distinct from other larval phases due to their high reflectance. In adults, the dorsal surfaces of males and females were similar, but the ventral surface of females displayed distinct patterns. Larvae parasitized by *C. flavipes* exhibited differentiated spectral signatures, especially in the near-infrared (NIR) bands, reflecting biochemical and physiological changes caused by parasitism. Between 8 and 10 days after parasitism, larval reflectance became similar to that of dead larvae and different from that of live or newly parasitized ones. PCA confirmed the effectiveness of hyperspectral reflectance in discriminating the stages of *D. saccharalis*. The data generated in this study can be integrated into a spectral database for future applications in entomology, mass rearing and biological control. This technology can be integrated into precision agriculture systems, optimizing pest management characterization and integration, and reinforcing the sustainable use of agricultural resources.

Keywords: Sugarcane, sugarcane borer, spectroradiometer, parasitismo, reflectance, Proximal Remote Sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de sensores---------- 6
Figura 2. Sensores e técnicas para monitoramento de plantas ---------- 7
Figura 3. (A) Asa rotativa (Inspired Flight IF1200A); (B) Asa fixa (senseFly eBee SQ); (C) Híbrido (DeltaQuad Evo); (D) Câmera RGB (Sony); (E) Sensor Puck LITE LiDAR (Velodyne); (F) Câmera multiespectral (Micasense); (G) Câmera hiperespectral VIS-NIR (Optosky); e (H) Câmera térmica (DJI Zenmuse XT V2 640). Fontes: Gano et al., 2024; Bongomin et al. (2024).---------- 8
Figura 4. Espectro eletromagnético. ---------- 10
Figura 5. Formas de representação de dados e diferenças de sensitividade ou reflectância das cores azul, verde e vermelha multiespectrais (λ é o comprimento de onda). Fonte: Adaptado de Meneses e Almeida (2012).---------- 13
Figura 6. Diferença das bandas entre sensores multi e hiperespectrais. ---------- 15
Figura 7. Espectro eletromagnético. ---------- 17
Figura 8. Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar com duração de cada estádio. Fonte : Soares Filho et al. (2025). ---------- 23
Figura 9. Ciclo de vida de *Diatraea saccharalis*. ---------- 27
Figura 10. Os ovos novos et velhos de *Diatarea saccharalis*. ---------- 28
Figura 11. Larvas de 5° estádio de *Diatraea saccharalis*. ---------- 29
Figura 12. Pupas velhas de *Diatraea saccharalis*.---------- 29
Figura 13. Mariposas (macho e fêmea) de *Diatraea saccharalis*. ---------- 30
Figura 14. Ovos e buraco causado pela larva de *D. saccharalis* na cana-de-açúcar (A); larvas dentro das galerias (B); pupa formada e caule com uma larva (C); adultos e caules danificados (D). Fonte: Alves et al. (2024). ---------- 32
Figura 15. Ciclo de vida de *Cotesia flavipes*. ---------- 36
Figura 16. Cotesia flavipes parasitando larvas de *Diatraea saccharalis*. ---------- 37
Figura 17. Camera e o dispositivo do sensor hiperespectral.---------- 40
Figura 18. Amostras. ovos-novos (a), ovos-velhos (b), larvas vivas (come 20 dias) (c), pupas novas (d) e pupas velhas (e). Fonte: Souradji (2025). ---------- 41
Figura 19. Processo de obtenção das larvas mortas (a,b,c,d), pupas mortas (e), pupas vivas (f) e adultos asfixiados no copo descartável (g). Fonte: Souradji (2025). ---------- 42
Figura 20. Larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes* com replicas das larvas nas caixas de Petri (a); larvas parasitadas em dieta (b); formação das pupas de *C. flavipes* (c). Fonte: Souradji (2025). ---------- 43
Figura 21. Processo de coleta dos dados da reflectância espectral das amostras.---------- 44
Figura 22. Reflectância espectral dos ovos de *D. saccharalis*. a (ovos-novos); b (ovos-velhos); c (ovos-novos vs ovos-velhos); d (comparação das médias da reflectância de todos comprimentos de onda). *IC (Intervalo de confiânça 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).---------- 46
Figura 23. Reflectância espectral dos estádios larvais de *D. Saccharalis* (a,b,c,d,e,f).). (larva 1: 7 DAE; larva2: 15 DAE; larva3: 20 DAE; larva4: 30 DAE; larva5: 40 DAE , em que DAE é dias após eclosão dos ovos). *IC (Intervalo de confiânça 95%).---------- 48
Figura 24. Comparação das médias (g) das fases larvais de *D. saccharalis*. (larva 1: 7 DAE; larva2: 15 DAE; larva3: 20 DAE; larva4: 30 DAE; larva5: 40 DAE, em que DAE é dias após eclosão dos ovos). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05). --- 48
Figura 25. Reflectância espectral (a, b, c) e comparação das médias (d) da resposta hiperespectral das diferentes fases das pupas de *D. saccharalis*. (Pupa-nova: pupa de 2 dias após formação; pupa-velha; pupa de 9 dias após formação). *IC (Intervalo de confiança de 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).---------- 50
Figura 26. Reflectância espectral (a,b,c) e comparação das médias (d) da resposta hiperespectral da parte dorsal e ventral de adultos (fêmas e machos) de *D. saccharalis*. *IC (Intervalo de confiança de 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05). 52
Figura 27. Reflectância espectral das larvas vivas (a) e mortas (b) de ---------- 54
Figura 28. Reflectância espectral médias das larvas de *D. saccharalis*, 3-6-8-10 dias após o parasitismo por *C. flavipes* (a,b,c,d,e) e comparação das médias das reflectâncias dos dias pós-

parasitismo (f). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05). ---------- 58
Figura 29. Análise de Componentes Principais em 2D dos estádios das larvas de *D. saccharalis*. --- 60
Figura 30. Análise de Componentes Principais em 3D de estágios de *D. saccharalis*. Porcentagem de variância explicada: PC1 (97,75%), PC2 (1,52%), PC3 (0,66%). ---------- 62
Figura 31. Análise de Componentes Principais em 3D das larvas mortas, vivas e larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes*. *Lp: larva parasitada. ---------- 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SR	Sensoriamento Remoto
RADAR	*Radio Detection And Ranging* - Detecção e alcance por rádio
LiDAR	Light Detection and Ranging - Detecção e Medição de Luz
IVs	Índices de Vegetação
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
NIR	Near Infra-Red - Infravermelho Próximo
RGB	Red Green Blue - Vermelho Verde Azul
RPA	Aeronaves Remotamente Pilotadas
REM	Radiação Eletromagnética
PCR	Reação em Cadeia da Polimerase
MS	Sensores Multiespectrais
HS	Sensores Hiperespectrais
CAD	Dispositivo de Carga Acoplada
CMOS	Semicondutor de Óxido Metálico Complementar
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
SWIR	Infravermelho de Ondas Curtas
nm	Nanômetro
µm	Micrômetro
LAI	Índice de Área Foliar
IGR	Inibidores de Crescimento de Insetos
LNGAP	Laboratório de Núcleo de Geomática e Agricultura de Precisão
LBCI	Laboratório de Biologia e Criação de Insetos
USM	Unidade de São Martinho
SAS	Sistema de Análise Estatística
SNK	Student Newman Keuls
PCA	Análise de Componentes Principais
IC	Intervalo de Confiança
DAE	Dias após eclosão
P	Probabilidade
X	Média
Lviva	Larva viva
Lmorta	Larva morta
Lp	Larva parasitada

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das principais fontes de açúcar processado e bioetanol. O Brasil é o maior produtor mundial, com mais de 10 milhões de hectares cultivados (Alves et al., 2021; Dias et al., 2021; Silva et al., 2022) e é responsável por 40% da produção global de cana-de-açúcar, 20% do consumo mundial de açúcar e 90% da produção global de bioetanol (Oliveira, 2019). A produção brasileira de cana-de-açúcar responde por mais da metade do mercado mundial e é uma cultura de grande importância econômica para o país (Lopes et al., 2022; Carvalho et al., 2023).

A cada ano, a produção agrícola aumenta para atender às necessidades crescentes da população global (Silva et al., 2022). No entanto, o cultivo da cana-de-açúcar enfrenta desafios significativos devido ao ataque de doenças e pragas, destacando-se espécies das ordens Lepidoptera, como *Hyponeuma taltula* (Schaus, 1904) (Erebidae), *Diatraea* spp. (Crambidae) e Coleoptera como *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Curculionidae) e *Leucothyreus* sp. (Scarabaeidae)) (Bellotti, 1992; Mora, 2024).

A broca da cana-de-açúcar, *D. saccharalis* Fabricius, 1794 (Lepidoptera: Crambidae) é a principal praga enfrentada por produtores, causando perdas de produtividade (qualidade dos colmos e rendimento). Ela está presente em quase todas as regiões produtoras da cana, gerando prejuízos anuais estimados em R$ 5 bilhões (Lopes et al., 2022; Urach Ferreira e Ferreira, 2023).

Diversos métodos de controle estão sendo utilizados para combater essa praga, incluindo o uso de inseticidas químicos e biológicos. No Brasil, o controle biológico por inimigos naturais, como parasitoides e predadores, tem crescido rapidamente, substituindo os métodos químicos, cujos efeitos nocivos à saúde humana e a resistência da praga apresentam desafios (Santos-Cividanes et al., 2022).

Cotesia flavipes Cameron, 1891 (Hymenoptera: Braconidae) é um dos parasitoides mais eficazes contra lepidópteros, reduzindo consideravelmente as populações de *D. saccharalis* (Abreu et al., 2024). Esse parasitoide atua na fase larval do hospedeiro, com altas taxas de parasitismo, embora influenciadas por fatores ambientais e pela idade do parasitoide (Santos e Mihsfeldt, 2014). A habilidade de *C.*

flavipes em localizar e parasitar larvas de *D. saccharalis* o torna uma escolha estratégica para o controle biológico (Merlin e Cônsoli, 2019; Arboleda e Vargas, 2019). Esse potencial tem incentivado a produção massiva de *C. flavipes* em laboratórios e biofabricas, não apenas para estudar seu comportamento e eficiência de parasitismo, mas também para distribuição em larga escala em áreas infestadas (Pinto, 2022).

Atualmente, mais de 3 milhões de hectares da cana-de-açúcar no Brasil estão sob controle biológico por *C. flavipes*, tornando-o o parasitoide mais amplamente liberado no país (Silva et al., 2022; Silva et al., 2024; Santos-Cividanes et al., 2022). Mas, ainda faltam informações espectrais sobre os estágios de desenvolvimento desse parasitoide dentro das larvas hospedeiras. O uso eficiente de *C. flavipes* contra *D. saccharalis* exige um conhecimento amplo e monitoramento preciso.

Os métodos atualmente utilizados para caracterizar e identificar insetos em seus diferentes estágios de desenvolvimento incluem PCR (Reação em Cadeia da Polimerase) e análise de transcrição gênica. No entanto, esses processos frequentemente destroem as amostras, demandam biólogos moleculares qualificados, demorados e equipamentos caros (Warren et al., 2017; Nansen et al., 2019; Pinto, 2022; Holman et al., 2024). Dada essa limitação, torna-se essencial adotar métodos inovadores, rápidos e precisos, como o Sensoriamento Remoto hiperespectral aplicado na entomologia (Warren et al., 2017). Essa técnica representa uma ferramenta promissora e indispensável na agricultura de precisão (agricultura moderna), contribuindo significativamente para a detecção, monitoramento e caracterização de insetos (Machado, 2024).

O Sensoriamento Remoto proximal refere-se à aquisição e análise de dados espectrais (reflectância ou transmitância) de objetos posicionados a menos de 1 metro do sensor de imagem (Warren et al., 2017). Trata-se de uma técnica de imagem rápida e não invasiva, na qual objetos-alvo, como insetos, são posicionados muito próximos à lente de uma câmera por alguns segundos, e os dados de reflectância ou transmitância são coletados utilizando um sensor de imagem (Nansen et al., 2019; Iost Filho et al., 2022; Pinto, 2022).

O sensor de imagem opera em bandas espectrais distintas: luz visível (azul, verde e vermelho), multiespectral (5 a 12 bandas) e hiperespectral (mais de 50

bandas) (Barros et al., 2021). Os sistemas modernos de Sensoriamento Remoto Proximal utilizam dispositivos multiespectrais e hiperespectrais, que permitem uma visão sinótica de alta precisão sobre áreas de cobertura ou ataque de insetos e doenças, superando os métodos convencionais de monitoramento e a coleta de dados (Nansen e Strand, 2018).

Essa tecnologia representa uma nova abordagem para a detecção, previsão e controle de pragas agrícolas (Abd El-Ghany et al., 2020; Rhodes et al., 2022). Suas aplicações na agricultura consistem, geralmente, em analisar e interpretar sinais eletromagnéticos refletidos pelo corpo dos insetos ou pela vegetação. Esses sinais fornecem informações valiosas, permitindo decisões mais informadas. O uso da faixa do infravermelho próximo (NIR) na espectroradiomêtro tem viabilizado a obtenção de dados estruturais e composicionais dos tecidos de insetos. Essa metodologia tem demonstrado eficácia em estudos sobre as respostas de hospedeiros ao parasitismo (Nansen e Strand, 2018).

Vários estudos ilustraram as aplicações do Sensoriamento Remoto proximal hiperespectral, destacando-se: parasitismo de insetos, como a distinção de espécies imaturas de *Trichogramma* spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae), desenvolvendo-se no interior dos ovos do hospedeiro (Nansen et al., 2014), classificação etária de mosquitos (*Anopheles* spp.) e espécies de moscas-das-frutas, *Drosophila melanogaster* Meigen, 1830 e *D. simulans* Sturtevant, 1919 (Diptera: Drosophilidae) (Warren et al., 2017), respostas ao estresse terminal causado pela exposição de gorgulhos do milho, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky, 1855) (Coleoptera: Curculionidae), a extratos aquosos de plantas e infecção de larvas de farinha, *Cynaeus angustus* (LeConte, 1851) (Coleoptera: Tenebrionidae), por nematoides entomopatogênicos (Nansen e Strand, 2018), estimativas de crescimento inicial e biomassa de ervilha (Tefera et al., 2022), avaliação de danos a telhados após desastres climáticos (Radhika et al., 2018), comparação de medidas fisiológicas e agronômicas em folhas de tomateiros, identificando genótipos resistentes ao estresse hídrico (Fullana-Pericàs et al., 2022). Este último estudo por exemplo, descreveu como o Sensoriamento Remoto proximal pode contribuir para otimizar os processos de fenotipagem fisiológica e agronômica do tomateiro. Além disso, ao nível do delta do rio Mississippi, o Sensoriamento Remoto proximal tem sido aplicado na

determinação dos danos causados pelo espécies de pulgões e para a detecção das áreas mais prováveis onde os insetos poderiam atacar a cultura do trigo (Abd El-Ghany et al., 2020). As aplicações entomológicas do Sensoriamento Remoto proximal se materializam na identificação de insetos e/ou nas respostas de plantas atacadas por insetos pragas (Song et al., 2020). Esses estudos evidenciam que, embora certos danos em plantas ou espécies de insetos sejam indistinguíveis a olho nu, mudanças fisiológicas internas e alterações metabólicas podem ser detectadas por meio de características de reflectância corporal (Nansen et al., 2019; Yin et al., 2021).

Além disso, o uso de dados (imagens) da reflectância hiperespectral para diagnóstico de insetos-alvo sugere que essa tecnologia poderia ser aplicada na caracterização dos estágios de desenvolvimento tanto de parasitoides quanto de insetos-praga associados à cana-de-açúcar (Silva et al., 2022).

Este estudo parte da hipótese de que o Sensoriamento Remoto hiperespectral pode ser utilizado para adquirir e analisar características de refletância corporal (fisiologia) de insetos, permitindo diferenciar com precisão, os estágios de ovos, larvas, pupas e adultos de *D. saccharalis*.

O presente trabalho teve como objetivo geral realizar a caracterização espectral das fases de vida de *Diatraea saccharalis* e das respostas fisiológicas das larvas parasitadas por *Cotesia flavipes*, utilizando o Sensoriamento Remoto Proximal Hiperespectral (SRHP), visando contribuir para o monitoramento não invasivo e para a automação de processos aplicados ao controle biológico. Especificamente, buscou-se: i) caracterizar por meio do SRHP as assinaturas de reflectância espectral dos diferentes estágios de desenvolvimento de *D. saccharalis*, incluindo ovos, larvas, pupas e adultos; ii) obter e analisar as assinaturas espectrais das larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes* em comparação com larvas não parasitadas; iii) determinar com base na reflectância espectral o período mínimo após o parasitismo em que ocorre o comprometimento severo da atividade fisiológica das larvas hospedeiras, evidenciado pela incapacidade de alimentação normal e pela progressão do estádio do parasitismo e iv) contribuir a criação de um banco de dados espectrais das fases de vida de *D. saccharalis* e das respostas fisiológicas associadas ao parasitismo por *C. flavipes*, com potencial aplicação em estudos futuros e em sistemas automatizados de criação massal e monitoramento de insetos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) envolve a aquisição das informações em escala múltipla, sobre objetos, áreas ou fenômenos, por meio de radiação eletromagnética (REM), sem contato físico direto. Esse processo é realizado por meio de sensores instalados em plataformas aéreas e/ou espaciais, como satélites e drones. Os sensores captam à REM refletida ou emitida pela superfície terrestre, permitindo a obtenção de dados sobre características de interesse, promovendo alterações fisiológicas e bioquímicas devido à ocorrência dos estresses bióticos e abióticos. A REM pode ser gerada por fontes naturais (sol ou terra) ou por fontes artificiais (Schiavo, 2016; Sishodia et al., 2020; Barros et al., 2021).

Os sensores podem ser classificados em ativos ou passivos (Figura 1), em função da fonte de REM, os quais permitem a obtenção de informação além da faixa do visível, que inclui os infravermelhos próximo, térmico e micro-ondas. Os sensores passivos captam a REM natural refletida ou emitida por objetos na superfície terrestre. Não obstante, os sensores ativos não dependem de fontes de REM, pois apresentam sua própria fonte de energia (Schiavo, 2016; Novais, 2017). Também, os sensores são classificados em imageadores e não-imageadores. Os imageadores produzem uma imagem bidimensional da REM da superfície observada, enquanto os não-imageadores medem a intensidade de energia de um objeto, mas não necessariamente produzem uma imagem (Leda, 2016).

Conforme Barros (2021), os dados do SR em escala múltipla para culturas agrícolas podem ser coletados em diferentes condições ambientais, o que pode causar variações nos resultados das classificações e levar a níveis de precisão abaixo do desejado. Portanto, a qualidade da informação produzida também depende dos processamentos aplicados aos dados de diferentes sensores. Assim, os sensores podem estar embarcados em plataformas orbitais, aéreas ou terrestres. As plataformas orbitais incluem missões espaciais como satélites de observação terrestre. As plataformas aéreas podem ser aeronaves tripuladas ou não tripuladas, conhecidas como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), que são bastante populares devido à sua acessibilidade de operação e custo reduzido. Plataformas

terrestres na agricultura podem ser tratores, máquinas agrícolas, quadriciclos ou veículos terrestres não tripulados, projetados especificamente para esse fim (Freitas, 2008;Teixeira, 2012; Bernardi et al*.,* 2014; Iost Filho et al., 2022).

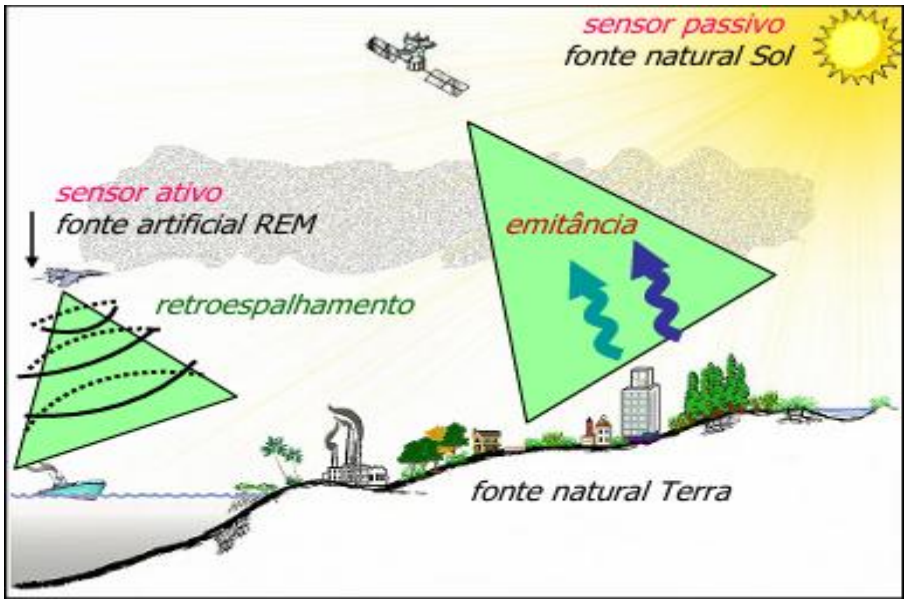


Figura 1. Tipos de sensores
Fonte : Teixeira (2012).

Atualmente, as técnicas para monitoramento de plantas incluem sensores de fluorescência, infravermelho térmico, visíveis (RGB), multiespectrais, hiperespectrais, além de sensores ativos como RADAR (Rádio Detection And Ranging) e LiDAR (Light Detection and Ranging) (Figura 2). A imagem visível é usada para medir aspectos da arquitetura da planta, como biomassa, área foliar, cor, crescimento, vigor de mudas, morfologia de sementes, arquitetura radicular, severidade de doenças foliares, rendimento, e distribuição de frutos. A imagem de fluorescência detecta doenças relacionadas à resistência genética. A imagem térmica infravermelha caracteriza a temperatura da planta para detectar variações na condutância estomática, indicando resposta ao estado hídrico e à taxa de transpiração, ajudando na adaptação ao estresse abiótico. A espectroscopia de imagem fornece dados sobre padrões de crescimento, índices de vegetação, teor de água, composição de sementes e pigmentos, auxiliando em estudos de potencial de rendimento (Pithan, 2019; Meneses e Almeida, 2020; Carmo, 2021).

Além disso, vários índices de vegetação (IVs) são usados para avaliar processos específicos de interesse. Os IVs são medidas calculadas a partir das reflectâncias das bandas espectrais capturadas por sensores para monitoramento de culturas, permitindo a tomada de decisões baseadas em dados para aumentar a eficiência e a sustentabilidade das práticas agrícolas (Rissini et al., 2015; Shi et al., 2016; Santos, 2024). Estudos de combinações de bandas verde, vermelha e NIR para monitorar biomassa, teor de água foliar e clorofila foram realizados (Francisco et al*.,* 2020). Assim, o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) proposto por Lourenço e Landim (2004), amplamente utilizado no monitoramento agrícola devido à sua forte correlação com o crescimento das culturas, foi validado. Além disso, a razão simples entre NIR e vermelho, mostrou forte correlação com o desenvolvimento das plantas e seus estágios de crescimento, sendo um dos primeiros índices de vegetação estudados (Gano et al., 2024; Bongomin et al*.,* 2020; Ramos, 2021; Cattani, 2018; Almeida et al., 2007).

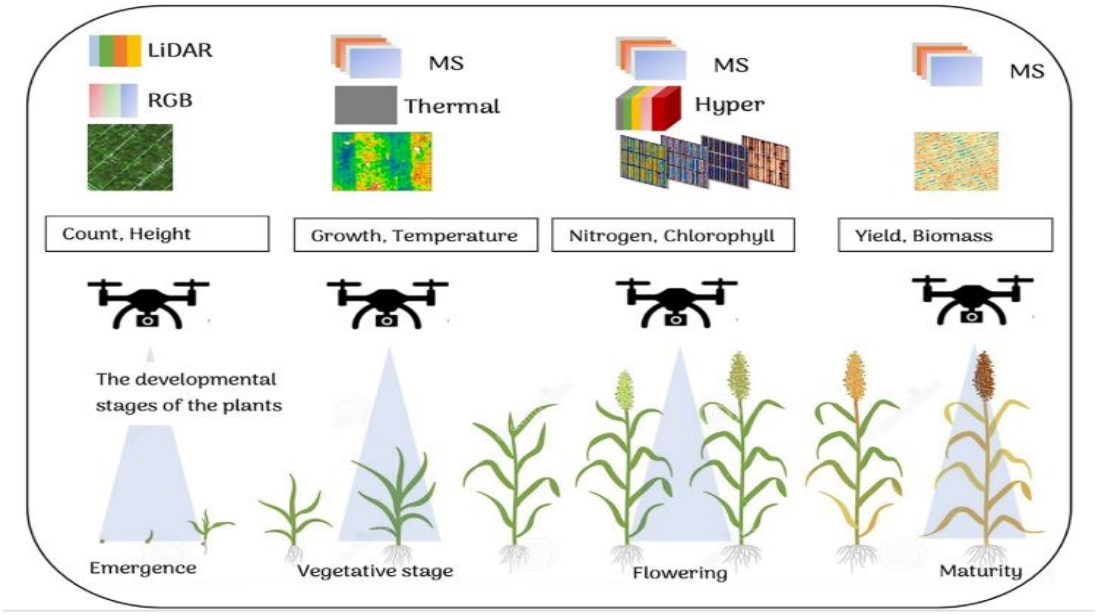


Figura 2. Sensores e técnicas para monitoramento de plantas
Fonte: Gano et al. (2024).

2.2. Tipos de sensores e aplicações do Sensoriamento Remoto

As tecnologias de Sensoriamento Remoto (SR) como aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) e satélites aumentam a eficiência ao capturar os dados rapidamente, permitindo a medição de alvo (plantas ou insectos) em larga escala de maneira eficiente e com diferentes custos e benefícios (Rosalen et al., 2017)

Os sensores de imagem são fundamentais para que as RPAs coletem dados valiosos em várias aplicações. Eles vêm em diferentes tipos, como sensores do espectro de luz visível (RGB), térmicos, multiespectrais, hiperespectrais, e sensores ativos (RADAR, LiDAR), cada um projetado para coletar informações específicas (Lopes et al., 2022; Almeida et al., 2007).

Sensores RGB capturam imagens na luz visível e são adequados para usos gerais. Sensores multiespectrais e hiperespectrais ampliam o espectro, úteis em agricultura para dados além do visível. Infravermelho térmico detecta radiação infravermelha, útil em busca e salvamento ou inspeções. Sensores LiDAR usam laser para mapear precisamente o terreno em 3D (Granemann e Silva-Bueno, 2020; Bongomin et al., 2024; Sweet et al., 2022). Portanto, RPAs equipados com sensores RGB, multiespectrais e hiperespectrais, permitem a coleta de dados de múltiplas fontes, promovendo conceitos agrícolas inovadores e contribuindo para uma agricultura sustentável em meio às mudanças climáticas (Tao et al., 2022; Oliveira, 2024; Silva-Barros et al., 2021; Holler et al., 2022; Bongomin et al*.,* 2024; Gano et al., 2024).

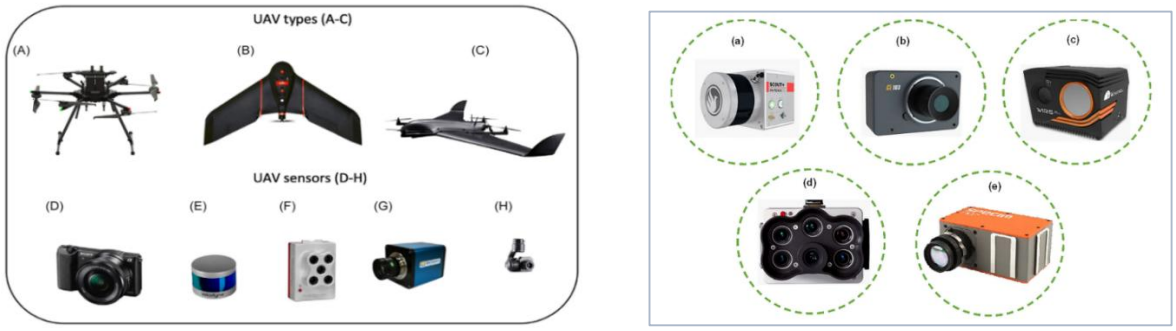


Figura 3. (A) Asa rotativa (Inspired Flight IF1200A); (B) Asa fixa (senseFly eBee SQ); (C) Híbrido (DeltaQuad Evo); (D) Câmera RGB (Sony); (E) Sensor Puck LITE LiDAR (Velodyne); (F) Câmera multiespectral (Micasense); (G) Câmera hiperespectral VIS-

NIR (Optosky); e (H) Câmera térmica (DJI Zenmuse XT V2 640). Fontes: Bongomin et al. (2024); Gano et al. (2024).

2.2.1. Sensores de imagens RGB (cor padrão)

As imagens RGB, capturadas por sensores de luz visível como os dispositivo de carga acoplada (CAD) e semicondutor de óxido metálico complementar (CMOS), são amplamente usadas devido à sua relação custo-benefício e maior resolução espacial (Holler et al., 2022; Tedesco et al*.,* 2021; Sweet et al., 2022). Cada comprimento de onda possui energia e frequência diferentes. O espectro eletromagnético é dividido em bandas ou regiões: radiação gama, raios X, radiação ultravioleta, visível, infravermelha, micro-ondas e ondas de rádio (Figura 4). Elas fornecem detalhes sobre cor, tamanho e forma dos objetos avos e são fáceis de usar em comparação com imagens multiespectrais e hiperespectrais (Gonzalez et al., 2018; Bongomin et al., 2024; Roel et al*.,* 2023; Vanegas et al*.,* 2018). Leves e adaptáveis a diferentes condições climáticas, são adequadas para calcular índices de vegetação (IVs), gerar modelos digitais de elevação, ortomosaicos e mapas de altura de vegetação (Barbosa et al., 2021; Esposito et al*.,* 2021). Entretanto, para analisar parâmetros que exigem informações espectrais além do visível, são combinadas com sensores modificados, como NIR-RGB, que oferecem sensibilidade NIR sem o alto custo dos sensores multiespectrais (Tuan, 2025).

Os sensores RGB têm limitações, capturam características importantes da planta como respostas ao estresse, são afetados por condições variáveis de iluminação e sombras e não conseguem capturar imagens de alta resolução espectral (Rosalen et al*.*, 2017; Bongomin et al., 2024; Heinemann et al., 2025). Processar imagens visíveis para obter dados fenotípicos, como biomassa, número de folhas e área foliar enfrenta desafios, especialmente na segmentação para evitar sobreposição de folhas. Além disso, aplicações em campo são limitadas por pouca diferença de brilho e cor entre folhas e fundo, necessidade de remover sombras das plantas, preenchimento automático para áreas onde terra ou insetos foram removidos das folhas e influência da luz no processamento automático de imagens. Esses fatores prejudicam a aplicação de imagens visíveis na fenotipagem de plantas em campo, exigindo técnicas adicionais para resolvê-los (Bongomin et al., 2020; Li et al*.,* 2022).

Os sensores RGB podem capturar detalhes fenotípicos como altura da planta (Lu et al., 2021; Acharya et al., 2025), taxa de crescimento, modelos de dossel e cobertura vegetal, índice de área foliar e a interceptação luminosa, detecção de doenças (Hoed e Ladeira, 2016), senescência da colheita e estimativas de biomassa e rendimento (Johansen et al., 2020). Embora limitados pela resolução espectral, os dados RGB podem fornecer informações estruturais importantes e alguns índices de vegetação valiosos como o Excesso Verde-Vermelho, Índice de Vegetação Verde-Vermelho, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Pereira, 2022) e Índice de Diferença Verde-Vermelho Normalizado (Souza, 2018).

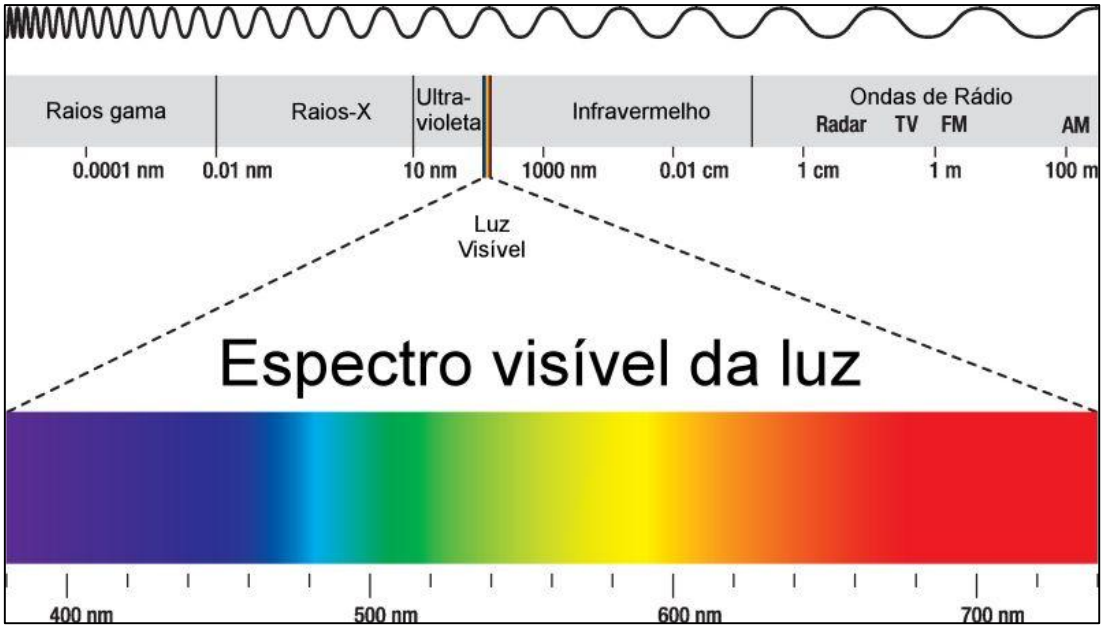


Figura 4. Espectro eletromagnético.
Fonte : Oliveira et al. (2024).

2.2.2. Sensores multiespectrais

Sensores multiespectrais (MS) operam de maneira semelhante aos sensores RGB, porém fornecem resolução espectral mais ampla. São dispositivos passivos que captam imagens na faixa óptica e térmica do espectro eletromagnético, podendo ser imageadores ou não, e são geralmente compostos por CAD ou CMOS (Barros et al., 2021). Não há um número específico de bandas para definir um sensor como MS,

mas geralmente, se ele tiver entre quatro e 15 bandas, é considerado MS. Acima disso, é classificado como hiperespectral (Roque, 2024; Siansi, 2024).

Bandas espectrais adicionais permitem extrair informações mais detalhadas sobre a composição química dos alvos. Sensores MS se beneficiam de sensores de luz descendente (DLS) para gerenciar variações de ângulo solar e luz ambiente durante o voo, devido à sua maior sensibilidade espectral (Almeida et al., 2007).

A aplicação da espectroscopia de imagens em plantas surgiu com pesquisas sobre SR de vegetação, usando a interação da radiação solar com as plantas. Os sensores MS são frequentemente usados para calcular índices de vegetação, como o NDVI, para estimar biomassa e identificar áreas estressadas nas culturas, mas exigem pré-processamento, aumentando o tempo e o custo computacional (Souza, 2018; Godoy, 2022).

Embora mais caros que os sensores RGB, os sensores MS fornecem informações detalhadas sobre características das plantas, como fisiologia, respostas ao estresse e crescimento, além de detectar sinais de estresse antes de se tornarem visíveis. No entanto, os sensores multiespectrais são impactados por condições ambientais variáveis, como cobertura de nuvens, umidade e temperatura, e exigem equipamentos especializados e experiência para a aquisição e processamento de imagens. Além disso, eles têm uma capacidade limitada de capturar imagens de alta resolução devido a restrições técnicas em termos de resolução espacial e espectral, se comparados aos sensores hiperespectrais (Bongomin et al., 2024).

De acordo com Barros et al. (2021), a potencialidade dos sensores MS digitais é que eles registram simultaneamente uma mesma imagem em várias regiões do espectro eletromagnético. Isso permite capturar aspectos da resposta espectral de diferentes alvos em comprimentos de onda específicos.

No espectro visível (400 - 700 nm), as folhas têm baixa reflectância devido à absorção pelos pigmentos foliares, como a clorofila, com um pico de refletância em torno de 550 nm. A transição para o infravermelho próximo (NIR) traz um aumento acentuado na reflectância, conhecido como “borda vermelha”. No NIR (700 - 1200 nm), a radiação é amplamente refletida devido à dispersão dentro do mesofilo foliar. A radiação NIR pode atravessar as folhas da copa superior para a inferior e ser refletida de volta para a parte superior, influenciando o padrão de reflectância. A

arquitetura das folhas e do dossel, como espessura das folhas e padrão de crescimento, influencia a reflectância nessa parte do espectro. À medida que os comprimentos de onda aumentam até 2500 nm, a reflectância diminui devido à absorção crescente pela água nas folhas (Rego, 2024; Gano et al., 2021; Arruda, 2015).

As informações de resolução espectral de folhas ou copas, especialmente no infravermelho próximo (NIR), permitem a geração de vários IVs, que são simples operações entre dados de reflectância em determinados comprimentos de onda. Essa descoberta levou ao desenvolvimento do NDVI e outros índices relacionados, que estão ligados a características como biomassa, pigmentação e estado hídrico das plantas. A análise de dados de sensores MS em sistemas UAV tem sido bem-sucedida na determinação do conteúdo de água, detecção de doenças, previsão de rendimento, biomassa e absorção de nutrientes (Yang et al., 2021; Gano et al., 2021).

Os limites tabulados apresentados na literatura são apenas teóricos, para fins didáticos. Este fato é bem ilustrado na Figura 5, onde se percebe claramente que a transição entre duas cores é difusa. O espectro visível pode ser subdividido de acordo com a cor. Para os comprimentos de onda mais curtos, cor violeta e para os comprimentos de onda longos, cor vermelha conforme ilustrado, esquematicamente na Figura 5. A região do visível é importante para o SR, pois imagens obtidas nesta faixa, geralmente, apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete (Santos, 2005; Gonçalves, 2009; Meneses e Almeida, 2012).

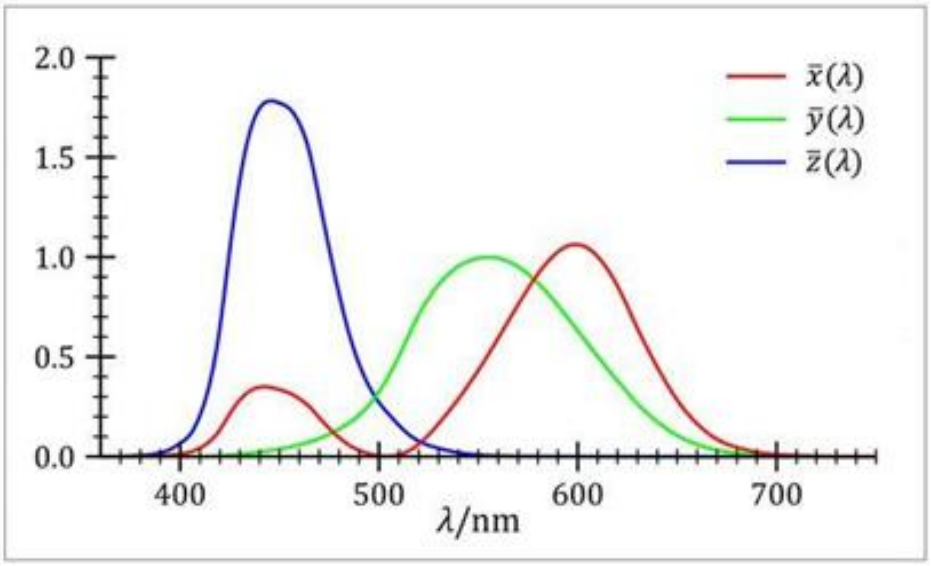


Figura 5. Formas de representação de dados e diferenças de sensitividade ou reflectância das cores azul, verde e vermelha multiespectrais (λ é o comprimento de onda). Fonte: Adaptado de Meneses e Almeida (2012).

2.2.3. Sensores hiperespectrais

Sensores hiperespectrais capturam imagens em um espectro mais amplo de luz, permitindo estimativas mais precisas dos parâmetros avaliados. Ao contrário dos sensores MS, eles capturam uma vasta gama de comprimentos de onda, o que aumenta a resolução espectral dos dados. Eles operam continuamente do visível ao NIR e, deste ao infravermelho de ondas curtas (SWIR), utilizando centenas ou milhares de larguras de banda estreitas. No entanto, a complexidade no seu pré-processamento requer mais recursos, o que resulta em custos e tempo computacionais mais elevados (Iost Filho et al*.,* 2020; Rudorff et al., 2007).

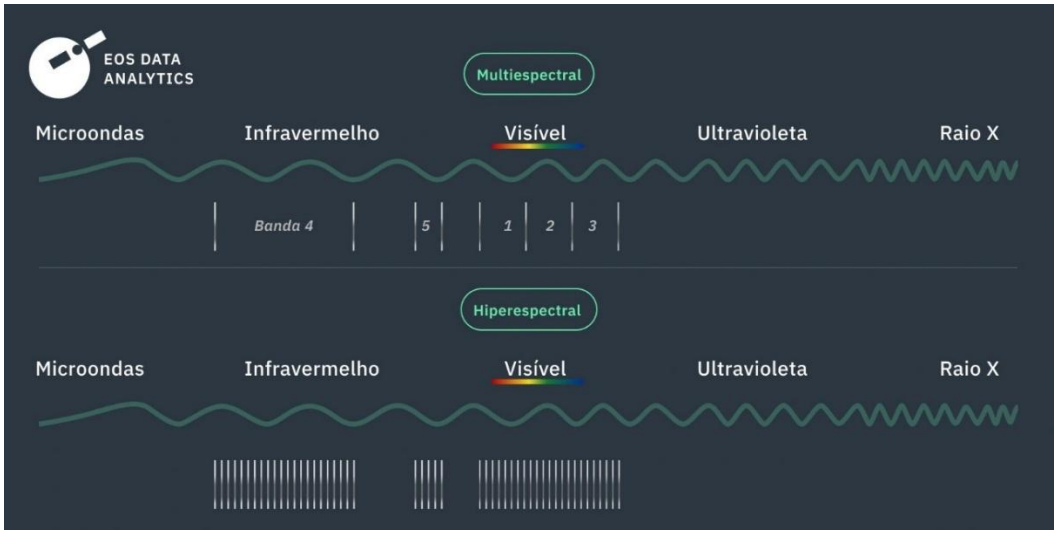
Os sensores hiperespectrais são os mais caros entre os sensores de imagem (Gonzalez et al., 2018). Além disso, as imagens hiperespectrais, com suas amplas bandas espectrais que fornecem detalhes precisos, exigem mais capacidade de armazenamento do que as imagens RGB tradicionais. Gerenciar os dados de forma eficiente é crucial devido ao aumento no volume de dados das imagens hiperespectrais (Bongomin et al., 2024).

Contrariamente à maioria dos geradores de imagens RGB e MS, que capturam instantâneos, os geradores de imagens hiperespectrais funcionam como scanners

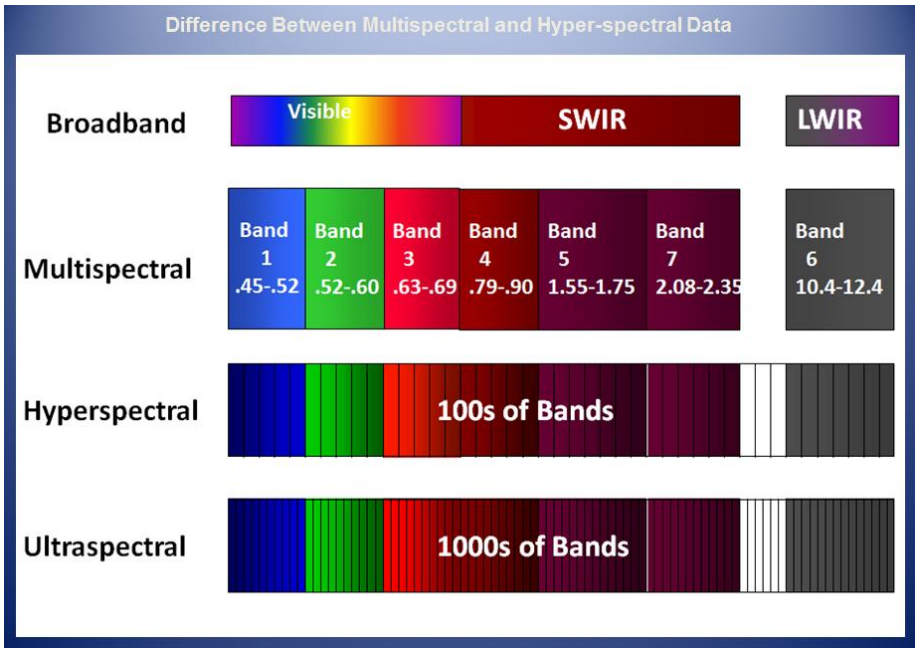
que capturam dados em forma de cubos ao longo de uma linha de varredura. Esses cubos de dados, também chamados de hipercubos, possuem três dimensões, incluindo uma dimensão espectral e duas dimensões espaciais (Datt et al*.,* 2003; Liu et al., 2020).

Os pesquisadores têm vindo a desenvolver técnicas avançadas de modelagem preditiva usando algoritmos de aprendizado de máquina (Zhu et al., 2023). Assim, os dados hiperespectrais têm sido especialmente eficazes na diferenciação da composição material dos alvos (Iost Filho et al*.,* 2022).

Na fenotipagem de plantas, a espectroscopia hiperespectral tem sido bem-sucedida na obtenção de informações sobre estrutura e fisiologia (LI et al., 2021; Pinto et al., 2020), na detecção de doenças, na criação de novos índices sensíveis a componentes específicos (Zhu et al*.,* 2023) e no monitoramento do estresse e saúde das plantas (Iost Filho et al*.,* 2022). Ao decidir entre imagens multiespectrais e hiperespectrais, avalie qual é mais relevante para sua tarefa: maior detalhe espectral ou eficiência operacional. Sensores hiperespectrais, que detectam numerosas bandas estreitas, fornecem informações extensas sobre as assinaturas espectrais distintas de diferentes materiais. No entanto, uma resolução espectral tão alta exige capacidades computacionais superiores, processamento de dados complexos e conhecimento especializado para interpretar os resultados. As imagens hiperespectrais captura detalhes espectrais ultrafinos em centenas de bandas de onda estreitas, permitindo a análise complexa de materiais e a detecção de alvos. Embora poderosa, essa abordagem exige processamento de dados complexo e interpretação especializada (Feng et al., 2020). A diferença entre as imagens multiespectrais e hiperespectrais é a diversidade das bandas (Awad, 2018; Rauber et al., 2018) (Figura 6).



Fonte : https://eos.com/pt/blog/imagens-hiperespectrais-e-multiespectrais/



Fonte : https://altigator.com/en/multispectral-and-hyperspectral-drone-imagery/

Figura 6. Diferença das bandas entre sensores multi e hiperespectrais.

2.2.4. Sensores térmicos

As imagens térmicas, capturadas por sensores infravermelhos e lentes ópticas, visualizam as temperaturas dos objetos sem depender de propriedades visíveis (Vertamatti, 2011). Entre os comprimentos de onda espectrais de 3 e 14 μm reside na

faixa de imagem térmica da radiação infravermelha, com transmissão atmosférica máxima ocorrendo entre 3-5 e 7-14 μm (Gano et al., 2024).

As imagens térmicas são essenciais para monitorar a temperatura da superfície e detectar estresses ambientais, mostrando objetos mais quentes em amarelo e mais frios em azul. Elas fornecem dados sobre a temperatura das plantas e suas respostas ao estresse, sendo valiosas para estudar como as plantas reagem a secas ou doenças (Tsouros et al., 2019).

As imagens térmicas são úteis para entender a temperatura da superfície foliar, relacionada à condutância estomática e à taxa de transpiração (Li et al., 2014). Mudanças na temperatura das folhas indicam o estado fisiológico da planta em resposta a estresses ambientais. Isso é importante para a fenotipagem, pois o estresse hídrico faz os estômatos se fecharem para reduzir a transpiração, diminuindo o crescimento e a produção das plantas. Essas medições térmicas podem ser vinculadas ao desempenho e rendimento da planta (Nascimento, 2022; Soares, 2020; Souza-Soares, 2011).

As imagens térmicas detectam os primeiros sinais de estresse nas plantas antes dos sintomas visíveis. No entanto, são sensíveis a fatores como características do sensor, condições meteorológicas (vento e umidade) e radiação térmica ambiental, exigindo um projeto de campo cuidadoso e calibração dos painéis de referência. Elas fornecem apenas informações de temperatura, sem dados visuais detalhados, e geralmente são mais caras que câmeras RGB ou multiespectrais (Bongomin et al., 2024).

A temperatura da copa tem sido usada com sucesso em programas de melhoramento para ambientes propensos à seca. Por exemplo, na fenotipagem de plantas, a imagem térmica mede a temperatura da copa para detectar diferenças na condutância estomática, indicando a resposta da planta ao estado da água e à taxa de transpiração, tanto no campo quanto na estufa. As imagens térmicas foram usadas no dossel do milho durante o estresse hídrico no estágio reprodutivo (Santos et al*.,* 2025). A imagem térmica mostrou ser uma ferramenta promissora para acelerar a fenotipagem e a seleção em programas de melhoramento de milho sob estresse hídrico (Farias, 2015; Vicari, 2015)

Os sensores ativos emitem sua própria energia eletromagnética, a qual é transmitida para a superfície do terreno, interage com os objetos e retorna ao sensor, sendo pouco afetada pela atmosfera. Esses sensores se destacam por realizar medições a qualquer momento, independentemente da hora do dia ou da estação do ano. Eles estudam a interação de objetos usando radiação em comprimentos de onda não afetados pela energia solar, como as micro-ondas, ou controlam melhor a iluminação de um objeto. No entanto, precisam gerar muita energia para iluminar adequadamente os alvos (Barros et al., 2021; Lowe et al., 2017).

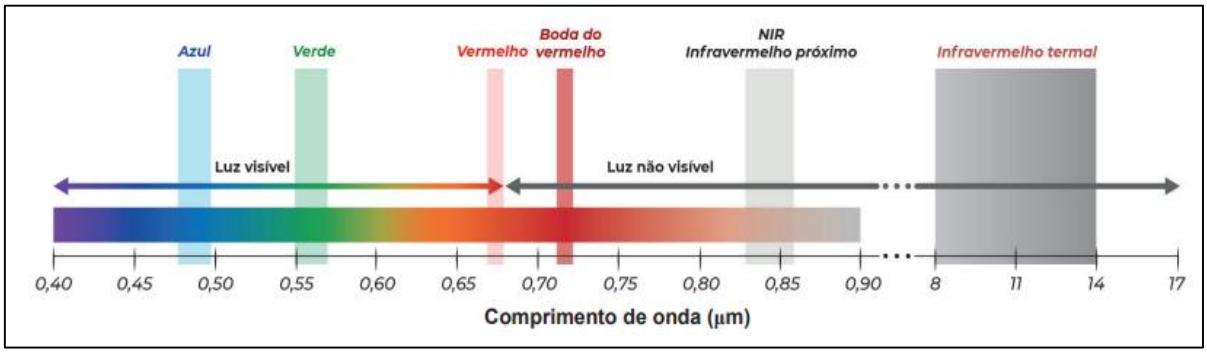


Figura 7. Espectro eletromagnético.
Fonte : Adaptado de Lowe et al. (2017).

2.2.5. Sensores LiDAR e RADAR

O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma técnica que mede diretamente a distribuição 3D das copas das plantas, criando modelos detalhados utilizando luz estruturada e scanners de laser. Ele funciona emitindo e recebendo ondas electromagnéticas que correspondem ao espectro visível e infravermelho próximo e calcula o tempo que a luz leva para refletir de volta de um objecto (Gano et al., 2024; Barros et al., 2021). Após o processamento, fornece mapas topográficos de alta resolução e estimativas precisas da vegetação. Quando combinado com a fluorescência, a varredura a laser permite avaliar o desempenho fotossintético (Lins, 2009).

O sensor LiDAR é amplamente utilizado devido à sua robustez, precisão e alta resolução, embora possa ser caro e exigir equipamento especializado e experiência para adquirir e processar imagens (Kamienski et al., 2016; Bongomin et al., 2024). Scanners a laser também medem rapidamente o Índice de Área Foliar (LAI) e estimam

a densidade de vegetação de uma copa (Locks, 2017; Manzato, 2023). Os sensores LiDAR também são usados na agricultura de precisão, pois os pulsos de laser enviados pelo sensor podem ser usados para medir distâncias. A distância é dada pela medição do atraso entre a emissão de um pulso e a detecção de um pulso refletido. Esse sensor pode ser usado para calcular modelos digitais precisos de altitude e superfície. Esses modelos digitais podem ser usados para planejar o nivelamento de parcelas agrícolas e estimar a altura da vegetação, por exemplo (Estrada et al., 2017). As câmeras digitais também são usadas, pois permitem a aquisição de uma resolução espacial muito alta a um custo muito acessível em comparação com outros sensores de sensoriamento remoto (Liu et al., 2020).

O RADAR (Rádio Detection And Ranging) é um sistema ativo de sensoriamento remoto que opera no espectro de micro-ondas (0,3-300 GHz), semelhante ao LiDAR, mas usando ondas de rádio. RADAR emite ondas de rádio que refletem nos objetos e retornam ao sensor, permitindo detectar, localizar e medir a distância de objetos através da análise dessas ondas refletidas. Os retornos do radar, chamados de sinais retroespalhados, são medidos em amplitude e fase. Eles estão relacionados às propriedades físicas (geometria, rugosidade) e elétricas (permissividade) do alvo (Locks, 2017; Monteiro et al., 2021).

Além de detectar objetos a longo alcance e medir com precisão a velocidade de objetos em movimento, o RADAR não é influenciado por condições ambientais, como chuva, neblina e escuridão. Ele pode atravessar materiais como vegetação densa e solo seco, sendo útil para mapeamento subterrâneo. No entanto, o RADAR é suscetível a interferências de outras fontes de rádio, pode ter resolução inferior a sistemas ópticos para detectar pequenos detalhes, seus equipamentos avançados são caros de adquirir e manter, e exige processamento complexo de sinais para interpretar os dados corretamente. Sensores de micro-ondas ativos (RADAR) são também usados para varias aplicações na agricultura, como estimativa de umidade do solo, classificação de culturas, índice de área foliar e estimativa de biomassa (Liu et al., 2019).

Para a fenotipagem de plantas, o radar é uma nova fronteira ainda pouco explorada. A maioria das aplicações de radar nessa área vem de satélites, aeronaves

remotamente pilotadas e Radar de Penetração no Solo (Sousa, 2014; Hung et al., 2018; Abram, 2019).

2.3. Importância de Sensoriamento Remoto hiperespectral na entomologia agrícola

O Sensoriamento Remoto proximal é uma técnica de imagem rápida e não invasiva na qual os objetos-alvo, como insetos, são colocados a curta distância sob a lente de uma câmera por alguns segundos e os dados de reflectância ou transmitância são adquiridos usando um sensor de imagem equipado com bandas espectrais (divididas em três regiões: vermelho, verde e azul), multiespectrais ou hiperespectrais (Nansen e Strand, 2018).

O Sensoriamento Remoto hiperespectral é uma técnica geográfica inovadora que aplica a ciência do espectro eletromagnético e tem sido usada em outros campos científicos, como a ciência forense. Os sensores remotos medem a reflexão, a transmissão, a emissão e a absorção da radiação de uma superfície-alvo. O Sensoriamento Remoto hiperespectral é não invasivo, não destrutivo para a amostra e pode ser usado para identificar características de superfície em profundidades penetráveis rasas e expressá-las como assinaturas espectrais. Ele tem sido usado em entomologia para monitorar culturas danificadas por insetos e pragas, bem como para monitorar insetos vetores de doenças. Além de monitorar grupos populacionais de insetos, métodos não invasivos têm sido usados para examinar as respostas ao estresse em besouros adultos expostos a agentes destrutivos e usados em ovos de insetos para determinar se eles foram parasitados por vespas *Trichogramma* spp. Os entomologistas forenses fornecem intervalos mínimos post-mortem (minPMI) com base no estágio atingido pelos primeiros insetos que crescem nos restos mortais. Os entomologistas forenses usam o SR hiperespectral não apenas para fornecer estimativas precisas da idade mínima dos insetos, mas também para buscar maior precisão nessas estimativas (Wang et al., 2024; Warren et al., 2017; Nansen et al., 2014).

Os métodos tradicionais de amostragem dos insetos geralmente são trabalhosos e demorados. Iost Filho et al. (2022) demonstraram em sua pesquisa que o SR hiperespectral é uma ferramenta para estabelecer padrões de reflectância de

plantas de soja infestadas com densidades de espécies de percevejos (*Euschistus heros* e *Diceraeus melacanthus* -Hemiptera : Pentatomidae) e espécies de lagartas de *Spodoptera eridania* e *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) que são pragas das culturas de soja, a fim de tomar as decisões necessárias para possíveis medidas de controle

Estudos recentes descrevem as aplicações do Sensoriamento Remoto proximal nos insetos. Embora a maioria das aplicações do Sensoriamento Remoto proximal em entomologia se concentre na identificação de insetos ou nas respostas das plantas ao ataque de insetos, o Sensoriamento Remoto proximal da reflectância do corpo do inseto é feito em estudos fisiológicos (Nansen et al., 2019).

O Sensoriamento Remoto multiespectral pode ser usado para detectar infestações precoces de insetos em campos de diferentes culturas por meio de mudanças de cor e mudanças na aparência da copa dos insetos-alvo. Ele pode ser usado para identificar áreas em risco de infestação ou áreas infestadas, de modo que um mapa possa ser elaborado para verificar a dinâmica das populações de insetos. Também pode ser usado para distinguir regiões específicos de culturas que provavelmente precisarão de tratamento com pesticidas ou medidas preventivas. Agora uma ferramenta importante para o gerenciamento agrícola sustentável, o Sensoriamento Remoto pode fornecer informações valiosas para o gerenciamento integrado de pragas em diferentes abordagens agrícolas. Daí o surgimento da agricultura de precisão. A agricultura de precisão possibilita a compreensão das complexidades espaciais dos ambientes bióticos e abióticos, demonstrando os benefícios de alterações precisas no solo e aplicações eficazes de produtos fitossanitários (pesticidas). Dessa forma, é possível demonstrar uma redução no uso de produtos químicos e manter a lucratividade das culturas (Abd El-Ghany et al., 2020).

Em comparação com as câmeras RGB e multiespectrais, as câmeras hiperespectrais fornecem mais informações de banda de onda e, portanto, podem refletir melhor as informações fisiológicas e bioquímicas de insetos, plantações ou qualquer outro organismo. Por exemplo, a reflectância da superfície dos insetos varia em diferentes faixas de banda de onda, dependendo de sua fisiologia e composição interna. Para as plantações, por outro lado, devido à absorção da clorofila e à

dispersão pelas folhas e pelo dossel, a reflectância espectral da vegetação aumenta rapidamente de um valor baixo para um valor alto na faixa de 670 a 750 nm, conhecida como a banda da “borda vermelha”. O comportamento da reflectância na banda vermelha é muito diferente do comportamento nas outras bandas (Pinto Dos Santos et al., 2018; Arantes et al*.,* 2019; Bárbara Neto, 2021). Além disso, como essa banda contém uma grande quantidade de informações sobre insetos ou culturas, ela pode ser usada para estimar parâmetros de crescimento, cor e estresse de insetos ou culturas (Tao et al., 2020).

No lado agrícola, osvanços mais recentes em SR abriram caminho para o desenvolvimento de sensores hiperespectrais e o processamento de volumes maiores de dados. A vantagem do SR é sua capacidade de fornecer informações periódicas sem amostragem destrutiva da cultura, que pode ser usada para fornecer informações sobre dosséis agrícolas usando vários parâmetros agronômicos (Wallace et al*.,* 2017 ; Yan et al., 2017 ; Oliveira et al., 2020).

Dependendo da especificidade das informações necessárias, a Sensoriamento Remoto é uma alternativa competitiva para a aquisição de dados em grandes áreas geográficas, pois fornece dados rápidos e confiáveis por uma fração do custo do método tradicional e, como Yendrek et al. (2017) apontam, com uma coleta de dados menos complexa. Combinado com os sistemas de informações geográficas, o sensoriamento remoto é altamente benéfico para a criação de camadas de informações ao longo do tempo e do espaço que podem ser aplicadas com sucesso a uma variedade de desafios agrícolas, incluindo mapeamento de planícies terrestres, modelagem hidrológica, mudança no uso da terra, monitoramento do crescimento das culturas e detecção de estresse (Kingra et al., 2016 ; Oliveira et al., 2020).

O surgimento da agricultura de precisão como meio de agricultura sustentável e ecologicamente correta deve-se ao desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto. As aplicações de sensoriamento remoto na agricultura geralmente envolvem a análise e a interpretação do sinal eletromagnético refletido pela vegetação em crescimento. Esse sinal fornece uma fonte valiosa de informações e permite a tomada de decisões fundamentadas. As plataformas usadas no sensoriamento remoto geralmente são satélites, aeronaves tripuladas e não tripuladas e balões de ar. Os sensores usados na agricultura podem abranger o espectro eletromagnético, do

ultravioleta ao micro-ondas. Alguns sensores ópticos medem o brilho do alvo, bem como a iluminação incidente, para calcular a refletância. A refletância é, de fato, a razão entre a luminosidade e a iluminância para um determinado comprimento de onda. Esses sistemas demonstraram seu potencial na agricultura de precisão por meio de sua eficácia no monitoramento do crescimento (Vega et al*.,* 2015), fenotipagem (Sugiura et al., 2016), previsão de rendimento (Yu et al., 2016; Zhou et al*.*, 2017), detecção de estresse hídrico (Santesteban et al., 2017), detecção de ervas daninhas e detecção de doenças e pragas de insetos para diferentes culturas (Vanegas et al., 2018).

Os sistemas de Sensoriamento Remoto aéreo não tripulado (UAS), comumente conhecidos como drones, estão entre as soluções mais promissoras na agricultura de precisão para o monitoramento de culturas. Esses sistemas são vantajosos porque sua implantação é flexível, eles podem suportar uma variedade de sensores, há pouquíssimas limitações de resolução espacial, é possível reconstruir mosaicos de imagens ortorretificadas a partir dos dados adquiridos, os dados podem ser visualizados imediatamente após um voo e seu custo de uso é relativamente baixo (Liu Changan et al., 2019).

No ambiente controlado (laboratorio ou biofabricas), o Sensoriamento Remoto hiperespectral é muito importante para a sistemática, o comportamento e a fisiologia dos insetos. Ele pode ser usado para distinguir e classificar com precisão (usando a reflectância hiperespectral) os estágios de desenvolvimento de insetos ou espécies de insetos intimamente relacionadas, bem como insetos criogênicos, integrando vários dados taxonômicos com base em características genéticas, ecológicas e morfológicas. A aplicação do Sensoriamento Remoto hiperespectral para a caraterização de diferentes fases de desenvolvimento e do parasitismo numa fase imatura dos insectos pode proporcionar uma maior precisão à entomologia agrícola, em vez de se utilizar uma fase de desenvolvimento fixa, e não é invasiva nem destrutiva para o amostra (Holman et al., 2024; Nansen e Strand, 2018). O SR hiperespectral introduzida na caraterização e identificação de insectos proporciona uma alternativa com precisão à genética molecular, que é realizada através da transcrição de genes para fornecer uma linha temporal precisa, em que as amostras analisadas são destruídas num processo moroso e requer um biólogo molecular

treinado e equipamento extenso para realizar a sequenciação de genes (Warren et al*.,* 2017).

2.4. Cana-de-açúcar

2.4.1. Ciclo de desenvolvimento

A cana-da-açúcar (*Saccharum officinarum* L., Poaceae) é uma planta com metabolismo C4 (quatro fases de desenvolvimento, são elas: brotação, perfilhamento, período de crescimento e alongamento dos colmos, maturação e, em alguns casos, florescimento (Figura 8) (Campos et al*.,* 2014 ; Silva et al., 2022; Dantas, 2024; Soares Filho et al., 2025).

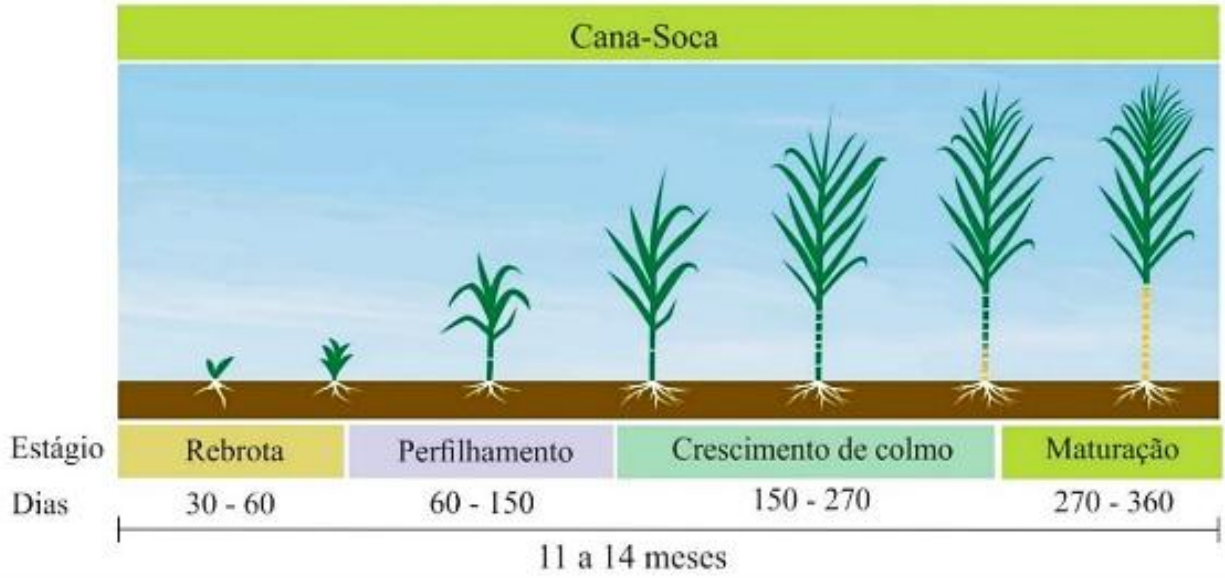


Figura 8. Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar com duração de cada estádio. Fonte : Soares Filho et al. (2025).

2.4.2. Importância econômica

A cana-de-açúcar, amplamente cultivada em regiões tropicais ao redor do mundo, é uma importante matéria-prima para a indústria, sendo utilizada principalmente na produção de açúcar refinado e etanol. Durante esse processo, é gerada uma quantidade significativa de biomassa residual (bagaço), rica em lignocelulose, com grande potencial para usos sustentáveis. Nas últimas décadas, a importância econômica da cana-de-açúcar cresceu significativamente devido à

crescente demanda global por energia renovável e sustentável (Silva et al., 2024; Medeiros, 2024). Essa dinâmica reforça o papel estratégico da cana-de-açúcar na economia mundial, especialmente em países produtores, que têm diversificado as cadeias de valor associadas a essa cultura.

Além de servir como base para a produção de açúcar, essencial na alimentação humana e amplamente comercializado, a cana-de-açúcar também é utilizada na fabricação de álcool, componente-chave de bebidas como cerveja, vinho e cachaça. Ainda, destaca-se sua relevância como fonte de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, com o etanol ganhando espaço como uma alternativa limpa e amplamente comercializada (Silva, 2020).

No Brasil, durante a safra de 2019-2020, a produção da cana-de-açúcar foi estimada em 622,3 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 8,38 milhões de hectares. Essa colheita resultou na produção de 30,3 bilhões de litros de etanol e 31,8 milhões de toneladas de açúcar (Dantas, 2024 ; Alves et al., 2021).

Na safra de 2022-2023, a produção de açúcar atingiu 37 milhões de toneladas, refletindo uma mudança estratégica na destinação da cana-de-açúcar, motivada principalmente por fatores mercadológicos e tributários. Essa alteração tornou a produção de açúcar mais rentável em diversas regiões produtoras. Em relação ao etanol, houve um aumento de 14% na produção de etanol anidro, totalizando 11,65 bilhões de litros, enquanto o etanol hidratado registrou uma queda de 7,1%, com produção de 15,72 bilhões de litros. No total, a produção de etanol derivado da cana-de-açúcar foi de 27,37 bilhões de litros (Milanez et al., 2014).

Na safra de 2023-2024, com o mercado ainda mais favorável ao açúcar, a maior parte da cana foi destinada à sua produção, que alcançou 45,68 milhões de toneladas, representando um crescimento de 24,1% em relação à safra anterior. Apesar da prioridade dada ao açúcar, o aumento na colheita de cana também possibilitou um crescimento na produção de etanol. O etanol hidratado foi o principal destaque, com uma produção de 17,64 bilhões de litros, registrando um aumento de 16%. Já o etanol anidro alcançou 12,05 bilhões de litros, elevando a produção total de etanol derivado da cana-de-açúcar para 29,69 bilhões de litros (Santos-Cividanes et al., 2022; Criado et al., 2024 ; Batista et al., 2024).

Esses dados mostram como as decisões econômicas e tributárias influenciam a destinação da cana-de-açúcar, alternando entre a produção de açúcar e etanol conforme as condições de mercado. Ao mesmo tempo, o aumento geral na produção da matéria-prima tem garantido suporte tanto para o setor de adoçantes quanto para o de biocombustíveis (Morais et al., 2024).

2.4.3. Importância nutricional

A cana-de-açúcar, uma das maiores fontes de açúcar processado e bioetanol, faz do Brasil o maior produtor mundial, com mais de 10 milhões de hectares cultivados, fornecendo 40% da produção total da cana-de-açúcar do mundo, 20% do consumo mundial de açúcar e 90% da produção mundial de bioetanol (Alves et al., 2021; Sanflorian et al*.,* 2025). Isso classifica o país como o maior produtor e o maior exportador mundial de açúcar (Dias et al., 2021).

O cultivo ocupa mais de 16% das terras agrícolas do Brasil, principalmente na região Centro-Sul (90%) e ao longo da costa no Nordeste e no Norte (10%) (Batista et al., 2024). A rápida expansão da área cultivada aumentou significativamente a produção total de colmos de cana-de-açúcar de 90 Tg para 620 Tg em 1975 e 2019, respectivamente (Alves et al., 2021). As exportações de açúcar e o uso de bioetanol contribuem com cerca de 10% da economia agrícola do Brasil, e espera-se que a expansão dessa importante cultura atenda à crescente demanda global por açúcar e bioetanol. Assumindo os níveis atuais de expansão da cultura e melhoria da produtividade, a área dedicada à cana-de-açúcar será de 18,8 milhões de hectares em 2050, produzindo uma produtividade total de 1.937 Tg (Batista et al., 2024).

Apesar da importância da cana-de-açúcar, seu cultivo está sujeito a fatores abióticos e bióticos. Esse último fator, que inclui o grupo de insetos-praga, é a verdadeira fonte de destruição da produção de cana-de-açúcar. Os principais insetos-praga são Coleoptera, Lepidoptera e Hemiptera (Silva, 2020).

No campo, as lagartas de *D. saccharalis* se alimentam do tecido foliar das plantas do primeiro ao terceiro instar, cavando galerias que lhes permitem penetrar nos colmos da cana-de-açúcar. Isso favorece o aparecimento de lesões diretas nos colmos, resultando em perda de peso e morte de gemas, derrubada pelo vento das mudas da planta, dessecação das pontas das plantas jovens (conhecida como

coração morto), enraizamento aéreo e germinação lateral (Araujo Júnior, 2008; Araujo Júnior, 2016). Os furos feitos pela broca nas galerias permitem a entrada de microrganismos como *Fusarium moniliforme* e *Colletotrichum falcatum*, causando o sintoma da podridão vermelha do caule (Gallan, 2019), a inversão da sacarose e a redução da pureza do suco, o que afeta negativamente o rendimento agrícola e industrial da cultura (Rodrigues, 2015). Níveis mais altos de brocas levam ao aumento dos níveis de fibra e açúcares redutores, bem como à redução da pureza (Freitas, 2016 ; Abreu et al., 2024).

As vastas áreas de produção de cana-de-açúcar provavelmente estão sob grande ameaça de ataque de pragas, como a broca-peluda *Hyponeuma taltula* (Schaus, 1904) (Lepidoptera: Noctuidae); *Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1854) (Hemiptera: Cercopidae) a cigarrinha; cupins, *Heterotermes tenuis* (Hagen, 1858) (Isoptera: Rhinotermitidae); lagarta de elasmus, *Elasmopalpus lignosellus* (Zeller, 1848) (Lepidoptera: Pyralidae); a broca-gigante, *Telchin licus* (Drury, 1773) (Lepidoptera: Castniidae); formigas cortadeiras (Atta spp. e Acromyrmex spp) (Hymenoptera: Formicidae); e nematóides como *Meloidogyne javanica* (Chitwood, 1949) e *Meloidogyne incognita* (Chitwood, 1949) (Nematoda: Heteroderidae) (Seleghim, 2020; Freitas, 2016; Mônaco et al*.,* 2009).

Atualmente, os insetos de grande importância dependentes do cultivo da cana-de-açúcar estão entre *D. saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepitoptera: Crambididae) e *Sphenopholus levis* (Coleoptera : Scarabaeidae) devido aos danos que as larvas e as pupas dessas duas brocas causam aos colmos da cana-de-açúcar, afetando direta e indiretamente a produtividade agrícola e industrial. os trabalhos de Rossato Junior (2012) e Freitas (2016) que considerandos que para cada 1% de índice de intensidade de infestação (entrenós atacados), há uma redução de 0,42% de açúcar, 0,21% de álcool e 1,14% de produção de matéria-prima. O ataque afeta a qualidade do açúcar produzido, aumentando ainda mais os danos causados (Abreu et al., 2024; Rossato Junior, 2012).

2.5. Broca da cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis*

2.5.1. Ciclo de vida

O ciclo de vida de *D. saccharalis*, comumente chamada de broca da cana-de-açúcar, inclui quatro estágios principais: ovo, larva, pupa e adulto.

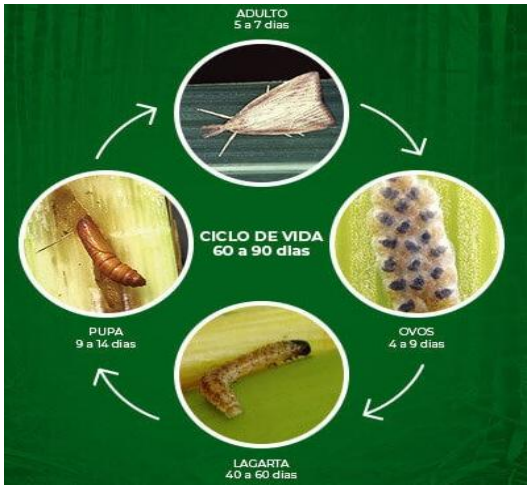


Figura 9. Ciclo de vida de *Diatraea saccharalis.*
Fonte: PROMIP (2019).

Ovo: Os ovos são achatados, de forma oval, medindo aproximadamente 1,16 mm de comprimento e 0,75 mm de largura. Eles são depositados em grupos (em massas) nas superfícies superior e inferior das folhas ou no colmo, sobrepostos como escamas de peixe. Cada grupo pode conter de 2 a 50 ovos. Inicialmente brancos, tornam-se alaranjados com o tempo e adquirem uma coloração enegrecida pouco antes da eclosão. A duração do estágio de ovos varia de 4 à 8 dias. A fecundidade média é de cerca de 700 ovos quando as brocas são criadas em milho ou cana-de-açúcar (Zafar, 2024 ; Solis et al., 2021 ; Jesus, 2019).

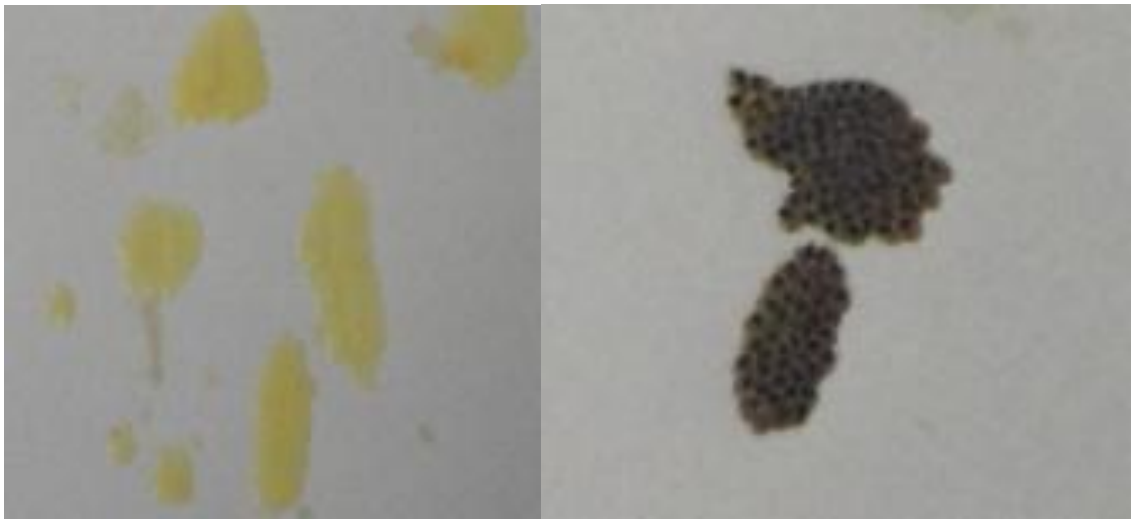


Figura 10. Os ovos novos et velhos de *Diatarea saccharalis*.
Fonte: Souradji (2025.)

Larva: Após a eclosão, as larvas se reúnem na região do colmo da planta hospedeira e começam a se alimentar quase imediatamente. Elas podem se alimentar através do tecido foliar ou perfurar a nervura central, penetrando no colmo após a primeira ou segunda muda. As larvas são esbranquiçadas com a cabeça de cor marrom. O número de ínstares (estágios larvais) geralmente varia entre cinco e seis. A duração do desenvolvimento larval é normalmente de 25 a 30 dias em temperaturas quentes e de 30 a 50 dias em temperaturas mais frias. As larvas maduras geralmente medem entre 20 e 30 mm de comprimento, mas essa medida pode variar dependendo das condições ambientais e da qualidade da planta hospedeira ou da dieta. Os colmos de cana-de-açúcar e de gramíneas são os mais adequados e preferidos pelas larvas (Zafar, 2024 ; Solis et al*.,* 2021 ; Jesus, 2019).



Figura 11. Larvas de 5° estádio de *Diatraea saccharalis.*
Fonte: Souradji (2025).

Pupa: A pupação ocorre geralmente no interior do colmo da planta hospedeira, em um túnel criado pela larva. A larva limpa e alarga o túnel (galeria) antes da pupação, deixando uma fina camada de tecido vegetal para que a mariposa consiga perfurar e emergir. De cor marrom-amarelada a marrom-acaju, a pupa tem uma forma alongada e fina. Mede entre 16 e 20 mm de comprimento e possui uma ponta proeminente com tubérculos nos segmentos distais. A duração do estágio pupal é geralmente de oito a dez dias, mas em condições frias pode se estender até 22 dias (Zafar, 2024 ; Solis et al., 2021 ; Jesus, 2019).



Figura 12. Pupas velhas de *Diatraea saccharalis.*
Fonte: Souradji (2025).

Adulto: Os adultos são mariposas noturnas de cor palha, amarelada ou marrom-amarelada. A envergadura varia de 18 a 28 mm nos machos e de 27 a 39 mm nas fêmeas. As asas posteriores das fêmeas são brancas, enquanto nos machos elas apresentam uma coloração mais escura. Os adultos têm hábitos noturnos, permanecendo escondidos durante o dia. A postura dos ovos começa ao entardecer e continua durante toda a noite. As fêmeas podem depositar ovos por até quatro dias, embora frequentemente esse período seja menor. A duração da fase adulta é de três a oito dias. Os adultos tornam-se ativos na primavera, com uma longevidade que varia de 5 a 10 dias. O ciclo de vida completo pode ser concluído em cerca de seis semanas, permitindo a ocorrência de até três gerações sobrepostas por ano (Zafar, 2024 ; Solis et al., 2021 ; Jesus, 2019 ; Capinera, 2004).

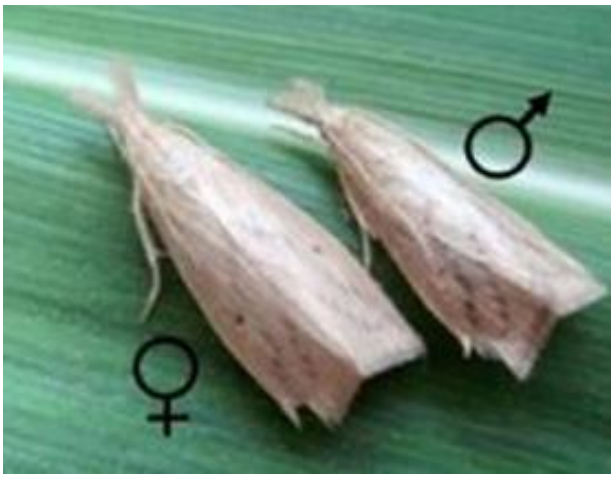


Figura 13. Mariposas (macho e fêmea) de *Diatraea saccharalis.*
Fonte: Alves et al. (2024).

2.5.2. Danos de *Diatraea saccharalis* na cana-de-açúcar

Diatraea saccharalis, é uma praga responsável por perdas econômicas significativas na produção da cultura da cana-de-açúcar (Alves et al., 2024). Os danos causados são atribuídos às lagartas: as larvas recém-eclodidas alimentam-se do parênquima das folhas antes de penetrarem nos colmos, resultando na perda de peso da planta e, frequentemente, em sua queda (Bordonal et al., 2018). Além disso, esses danos facilitam a invasão de fungos na base dos colmos, causando doenças como a podridão vermelha e a podridão fusariana, devido às galerias abertas pelas lagartas (Macedo et al., 2022 ; Latha e Bautista, 2020).

Os danos causados por essa praga podem ser diretos ou indiretos. Os danos diretos incluem a abertura de galerias nos colmos, levando à perda de peso, ao secamento das extremidades, ao surgimento de raízes aéreas, à germinação lateral, à morte da gema apical e à quebra dos colmos ao redor das galerias (Sandoval e Senô, 2010; Mancini et al., 2021; Batista et al., 2024). Já os danos indiretos resultam da infecção pelos fungos *Colletotrichum falcatum* e *Fusarium moniliforme*, que provocam a inversão da sacarose e o aumento do teor de fibras. Essas alterações reduzem a pureza do caldo extraído, comprometendo a fermentação alcoólica e diminuindo, assim, o rendimento do açúcar recuperável, tanto em qualidade quanto em quantidade (Portela et al., 2010; Macedo et al., 2022).

Diatraea saccharalis e *Diatraea flavipennella*, causa um dano à cultura que prejudica sua produtividade. Na Louisiana e no sul da Flórida, os danos causados pela broca da cana-de-açúcar foram estimados entre 10% e 20%, conforme relatado por Ingram et al. (1951). Em análises realizadas em Houma, Louisiana, com diferentes variedades de cana, foi constatado que uma infestação de 20% resultava em uma perda de aproximadamente 10% na sacarose. Entre os anos de 1912 e 1950, os prejuízos causados por essas pragas variaram anualmente de 4% a 30%. Em 1950, as perdas foram avaliadas em 630.000 toneladas de cana, o equivalente a 5,7 milhões de dólares. Os mesmos autores também estimaram que o impacto total da *D. saccharalis* tanto na cana-de-açúcar quanto em outras plantas hospedeiras, como milho, arroz, sorgo e outras gramíneas alcançava aproximadamente 10 milhões de dólares por ano nos Estados Unidos (Chaves, 1973; Reis, 2008; Dörr, 2015).

No Brasil, *D. saccharalis* se constitui como uma das pragas mais importantes da cana-de-açúcar. Seus ataques influenciam os parâmetros tecnológicos dos colmos, que são utilizados como matéria-prima na indústria do açúcar e do etanol.

Os trabalhos de Dinardo-Miranda et al. (2012, 2013) mostraram que, se em média, as parcelas infestadas por *D. saccharalis* contêm 10% de entrenós nos colmos da cana-de-açúcar para uma produtividade de 118 t ha^{-1}, enquanto as parcelas não infestadas contêm 6,5% de entrenós e 131 t ha^{-1} de produtividade, pode-se deduzir que 3,5% dos entrenós nos colmos da cana-de-açúcar resultaram em uma redução de 10% na produtividade dos colmos. Dessa forma, cada 1% de entrenós nos colmos levou a uma redução de 2,9% na produtividade. Além disso, esses autores

demonstraram que os teores de açúcar mais elevados nos colmos foram observados nas parcelas não infestadas e que, em média, houve uma redução de 11,5% no teor de açúcar nos colmos das parcelas infestadas por *D. saccharalis* em comparação com as parcelas não infestadas.

No noroeste da Argentina, os estudos realizados por Pérez et al. (2023) analisaram a distribuição dos danos e as perdas de açúcar causados por *D. saccharalis* durante as safras de 2016 a 2020. Os resultados indicam que, nesse período, o nível médio de danos foi de 5,97 % na província de Tucumán e 5,06 % na província de Jujuy, resultando em perdas totais de açúcar estimadas em 58105 toneladas e 9869 toneladas, respectivamente.

O comportamento reprodutivo e alimentar da Diatraea descrito indica uma estreita relação entre seu ciclo de vida e o estágio de desenvolvimento da planta hospedeira. As fêmeas depositam os ovos preferencialmente em folhas verdes e plantas jovens, o que garante que as lagartas recém-eclodidas encontrem um ambiente favorável para se alimentar e se abrigar. Ao migrar para o cartucho da planta, elas encontram proteção e uma fonte de alimento, inicialmente raspando a folha ou a casca do entrenó em desenvolvimento. A perfuração da casca do colmo pode levar à morte da gema apical, resultando no sintoma conhecido como coração morto, que impacta significativamente o desenvolvimento da planta (Silva et al., 2022; Latha e Bautista, 2020).



Figura 14. Ovos e buraco causado pela larva de *D. saccharalis* na cana-de-açúcar (A); larvas dentro das galerias (B); pupa formada e caule com uma larva (C); adultos e caules danificados (D). Fonte: Alves et al. (2024).

2.6. Métodos de controle

2.6.1. Controle químico

Atualmente existem 39 produtos registrados, para controle de Diatraea na cana-de-açúcar, distribuídos entre os grupos químicos antranilamida, piretroide, benzoilureia, diamida, neonicotinoide, pirazol, espinosina, organofosforados, carbamatos, organoclorados, inibidores de crescimento de insetos (IGR), fenilpirazóis, espinosinas, avermectinas e diacilhidrazina (Santos et al., 2020; Silva, 2020).

O controle químico é eficaz, com efeitos nagativos e, às vezes, tem dificuldade para atingir a broca quando ela já está dentro do colmo. No entanto, os inseticidas podem reduzir a população de lagartas neonatas (recém eclodidas). O controle ocorre, pois, as lagartas neonatas se alimentam das folhas por raspagem por um período de 2-6 dias, sendo possível entrar com controle químico neste momento (Sabino, 2021 ; Oliveira et al., 2022 ; Silva, 2024).

2.6.2. Controle biológico

O controle biológico é usado na agricultura para substituir as formulações químicas (inseticidas e pesticidas). De acordo com Capinera (2004), o controle biológico visa a manter as espécies nocivas em níveis aceitáveis (níveis econômicos), introduzindo um predador natural, parasitoide ou microrganismo que enfraquece ou causa doença ou morte ao hospedeiro. Ocorre que todas as espécies de animais têm inimigos naturais que atacam seus vários estágios de vida. Essa controle pode ser considerado de duas formas: controle biológico natural (que ocorre sem a ajuda do homem) ou artificial (ou seja, os inimigos naturais são criados em laboratório e liberados no campo). A última forma de controle biológico aplicado envolve a intervenção humana, em que os inimigos naturais são produzidos em laboratórios ou fábricas e depois liberados nas culturas atacadas (Sandoval e Senô, 2010 ; Silva, 2020).

Desde há vários anos, os mecanismos de resistência desenvolvidos por *D. saccharalis*, combinados aos impactos negativos associados ao uso de pesticidas químicos de síntese, tornaram os métodos de controle biológico indispensáveis. Em escala global, e especialmente nas regiões tropicais da América do Sul, predadores e

parasitoides são amplamente utilizados no controle de *D. saccharalis* (Sandoval e Senô, 2010).

Diversas espécies têm sido objeto de pesquisas aprofundadas. Por exemplo, *Agathis stigmatera* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae) foi importada com sucesso da Argentina e do Peru para introdução na Flórida e na Louisiana. Da mesma forma, a mosca *Lixophaga diatraeae* (Townsend) (Diptera: Tachinidae) foi importada e liberada repetidamente no Caribe e no Brasil. *Apanteles flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) também foi introduzida com sucesso no Texas para o controle da broca-da-cana. Vários estudos também demonstraram a eficácia de Trichogramma spp. (Hymenoptera: Trichogrammatidae) no controle de *D. saccharalis* (Inácio, 2014; Santos et al., 2020; Alves et al., 2024; Zafar, 2024).

Entre os predadores, *Zelus renardii* (Hemiptera: Reduviidae) e *Xylocoris sordidus* (Coleoptera: Tenebrionidae) destacam-se como bons candidatos para atacar, respectivamente, as larvas e os ovos de *D. saccharalis* (Nunes, 2023; Picciotti et al., 2024).

Além dos Trichogramma, amplamente utilizados, parasitoides como Telenomus spp. (Hymenoptera), que atacam ovos, e *C. flavipes*, especializados em larvas, são frequentemente empregados contra *D. saccharalis*. Seus altos níveis de parasitismo sobre esta praga da cana-de-açúcar justificam seu cultivo em massa em laboratórios e usinas para liberação em campo (Dias-Pini et al., 2012; Dias, 2020; Ferrer Wurs, 2021; Lacerda, 2022; Salamanca et al*.,* 2023; Orellana Valdivia, 2024).

No Brasil, o principal modo de controle é realizado através das ferramentas biológicas, com ênfase na cultura da cana-de-açúcar, pois, mais 50% das áreas brasileiras da cultura usam a tecnologia com controle biológico. Além disso, possui alta eficiência e bons resultados a nível de campo. O procedimento ocorre com liberação de vespas parasitoides de larvas *C. flavipes* e parasitoide de ovos *Trichogramma galloi*. A associação destes inimigos naturais é uma estratégia eficaz dentro do Manajo Integrdo de Pragras (MIP) no controle da broca da cana-de-açúcar (Alves et al., 2024).

2.6.3. Controle cultural

Além do controle químico e biológico, pode-se utilizar de técnicas de controle cultural para prevenir que se atinja o nível de controle. As técnicas comuns para esse controle são a eliminação das plantas hospedeiras, o corte da cana sem desponte e a moagem rápida da cana-de-açúcar (Reagan e Mulcahy, 2019).

2.7. Parasitoide *Cotesia flavipes*

2.7.1. Ciclo de vida

O parasitoide *C. flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) é um inseto endoparasita de 2 a 3 mm de comprimento, de coloração escura (preta), gregário, com ciclo de vida de 15 a 20 dias, dependendo das condições climáticas (Pinto, 2022). Esse inseto, originário do sul da Ásia, da Índia e do Paquistão, foi introduzido no Brasil em 1971, 1974 e 1978 pela ESALQ/USP e pela Copersucar para implementar um programa de controle biológico contra a broca da cana-de-açúcar. Conforme relatado por Pontes (2022) e Carvalho (2017), a criação em massa de *C. flavipes* no Brasil começou com 200 pupas trazidas de Trinidad e Tobago, que, por sua vez, foram trazidas da Índia. Conforme apontado por Latha; Bautista (2020), a introdução do parasitoide *C. flavipes* fortaleceu o controle biológico de Saccharalis no Brasil (Santos-Cividanes et al., 2022 ; Abreu et al., 2024).

A *Cotesia falvipes* se reproduz por partenogênese arrenótica (os machos são produzidos a partir de ovos não fertilizados e as fêmeas a partir de ovos fertilizados). As fêmeas podem ser distinguidas por suas antenas menores do que as dos machos. Equipado com asas, o que lhe permite voar, *C. flavipes* procura seu hospedeiro por meio de seu ovipositor, seja na superfície ou no interior dos caules (Capinera, 2004; Jesus, 2019). Após localizar seu hospedeiro, o parasitoide introduz o ovipositor no hospedeiro e deposita entre 60 e 65 ovos. O terceiro estágio de desenvolvimento de *D. saccharalis* é o preferido pelas fêmeas do parasitoide (Smaniotto et al., 2019; Silva et al., 2024).

Os ovos depositados na hemocele do hospedeiro eclodem em larvas três a quatro dias depois. As larvas se desenvolvem por cerca de doze dias, passando por três estágios (Silva et al*.,* 2024). O amadurecimento, elas perfuram o tegumento do

hospedeiro para emergir e pupar junto à lagarta hospedeira (*D. saccharalis*), resultando na morte do hospedeiro (Veiga et al., 2013). Os casulos das pupas são de cor branca (Pinto, 2022). Os adultos vivem em média de três a cinco dias se alimentados em condições de temperatura média de 25°C em laboratórios de criação em massa (Hernández, 2010; Viel, 2011; Silva et al., 2022).

O ciclo de vida da *Cotesia flavipes*, um parasitoide importante no controle biológico, compreende vários estágios importantes. Ele começa com a oviposição, em que a fêmea põe ovos dentro do hospedeiro, geralmente um inseto praga, como uma lagarta. Após a eclosão, as larvas de Cotesia se desenvolvem dentro do hospedeiro, alimentando-se dos tecidos sem matar imediatamente o inseto. Em seguida, elas passam por vários estágios larvais antes de emergir do hospedeiro para formar uma crisálida, transformando-se em um adulto (Volpe, 2014; Astola e Narrea, 2019).



Figura 15. Ciclo de vida de *Cotesia flavipes*.
Fonte : Adaptado de Assis e Oliveira (2020).

2.7.2. Importância de *Cotesia flavipes* no biocontrole

O parasitoide larval *Cotesia flavipes*, um agente de controle biológico, é amplamente utilizado contra vários lepidópteros, incluindo a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) e a broca-do-colmo (*D. saccharalis*) no milho e na cana-de-açúcar, respectivamente. Esse parasitoide é criado em massa em laboratórios e fábricas para liberação nos campos, devido ao seu índice de parasitismo muito alto (Smaniotto et al., 2019; Freitas, 2016).

Os trabalhos de Santos; Mihsfeldt (2014) e Carvalho (2017) mostraram que *Cotesia flavipes* tem a possibilidade de vagar até 40 m de distância durante sua atividade de parasitismo. Para um controle eficaz, são essenciais as liberações de 6.000 indivíduos de Cotesia em oito pontos (30 m de distância) por hectare (Costa, 2013; Volpe, 2014). Outras pesquisas mostraram que para faixas de dispersão entre 15 e 25 m, as taxas de parasitismo de *C. flavipes* variaram entre 13% e 43% (Carvalho, 2017; Ramos, 2020; Silva et al., 2024 ; Salamanca et al., 2023; Pinto, 2024).



Figura 16. *Cotesia flavipes* parasitando larvas de *Diatraea saccharalis*.
Fonte : Assis e Oliveira (2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Locais de desenvolvimento

O estudo foi realizado no Laboratório de Núcleo de Geomática e Agricultura de Precisão (L-NGAP) do Departamento de Engenharia da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP; no Laboratório de Biologia e Criação de Insetos (LBCI) do Departamento de Fitossanidade da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP e na Usina São Martinho (USM) de Pradópolis, SP.

3.2. Criação de insetos

Os insetos (*D. saccharalis* e *C. flavipes*) foram criados na biofábrica da Usina São Martinho (USM) sob condições controladas de temperatura (25 ± 2°C), umidade relativa (70 ± 10%) e com 14 horas de luz e 10 horas de escuro. A criação das larvas de *D. saccharalis* foi realizada nos tubos de ensaio de fundo chato de 20 ml, contendo a dieta artificial, de acordo com o protocolo de criação da USM, com dieta modificada para criação (Veiga et al., 2013) e Sá (2010) (Tabela 1).

Tabela 1. Dieta modificada para criação de lagartas de *Diatraea saccharalis*

Igredientes	Quantidade	Finalidade
Farelo de soja	450 g	Proteína
Germe de trigo	200 g	Proteína
Levedura de cerveja	800 g	Para a fermentação
Nipagin	11 g	Anticontaminante
Açúcar cristal	85 g	Carboidrato
Ácido ascórbico	20 g	Vitamina C
Ácido sórbico	10 g	Conservante de dieta
Metilparahidroxibenzoato	35 g	Conservante antimicrobiano
Sais de Wesson	20 g	Sais minerais
Cloreto de colina	4 g	Vitamina
Caragenato	106 g	Espessante
Soluçao Vitamínica*	15 mL	Complexo vitamínico
Vita Gold	1 mL	Complexo vitamínico
Formol	2,5 mL	Tratamentos de ovos
Binotal	250 mg	Anticontaminante (antibiótico)
Agua destilada	7,1 L	Solvente

*Solução vitamínica composta por 500 mL de água destilada, 1 frasco de vitaminas via seca e 1 frasco de vitamina via úmida. Fonte: Sá (2010).

A postura foi realizada em tubos de PVC com 20 cm de altura e 15 cm de diâmetro. Esses tubos foram forrados com folhas de papel A4, sobre as quais as fêmeas depositaram seus ovos. Vinte e quatro horas após a postura, as folhas de papel A4 contendo as massas de ovos foram retiradas, tratadas com solução de sulfato de cobre 10% e colocadas em badeijas plásticas para acompanhamento até o estádio de pré-eclosão. Nesse estádio, cada massa de ovos foi cortada e transferida para tubos contendo dieta artificial, permitindo que as larvas se alimentassem após a eclosão. As larvas foram então acompanhadas por 20 dias, com trocas de substrato realizadas conforme necessário, quando foram utilizadas nos bioensaios.

Cotesia flavipes foi criada em larvas de *D. saccharalis*. Cada larva, com 20 dias de idade após a eclosão, foi submetida a uma fêmea adulta de Cotesia e, após o parasitismo as larva foram acondicionadas em placas de Petri (7,0 cm x 1,5 cm) contendo dieta artificial e 4 indivíduos por placa.

3.3. Bioensaio

Os bioensaios foram conduzidos no laboratório na USM. Da criação mantida no laboratório, foram retirados para análise: (i) 4 massas de ovos (repetições) com 24 horas e com 6 dias de incubação; (ii) 4 larvas (repetições) dos diferentes estádios (1 a 5) (larva 1: 7 DAE, larva2: 15 DAE, larva3: 20 DAE, larva4: 30 DAE, larva5: 40 DAE, em que DAE é dias após eclosão dos ovos); (iii) 4 grupos (A, B, C, D) de 4 lagartas com 20 dias de desenvolvimento foram parasitadas por *C. flavipes*; (iv) 2 grupos de 4 pupas pelo cada grupo (pupas novas com 2 dias após formação e pupas velhas com 9 dias após formação); e (vi) adultos, 4 machos e 4 fêmeas (repetições) com 5 dias de longevidade. Todos essas análises foram realizadas em duplicata.

3.4. Sensoriamento Remoto Hiperespectral

A coleta de dados de sensoriamento Remoto proximal hiperespectral foi realizada com base nos métodos descritos por Nansen; Strand (2018) e Nansen et al. (2019). Utilizou-se a câmera hiperespectral, tipo *pushbroom*, modelo PIKA L (RESONON Inc., Bozeman, MT, EUA) com as seguintes especificações: que coleta 160 bandas espectrais no intervalo de 300 a 1000 nm (espectro visível e NIR). A objetiva da câmera possui uma distância focal de 35 mm (abertura máxima de F1.4)

e possui as seguintes especificações: interface Firewire (IEEE 1394b); saída digital (12 bits); campo de visão angular de 7 graus; resolução espectral é 3,3 nm.

Todos os dados hiperespectrais foram coletados em laboratório utilizando uma iluminação específica para o sensor. Um estabilizador de tensão (Tripp-Lite, PR-7b, www.radioreference.com) foi usado para manter a iluminação estável. Uma calibração no escuro foi realizada mantendo a tampa da câmera fechada. Em seguida, a tampa foi removida e uma placa de Teflon branco (K-Mac Plastics) foi utilizada para a calibração do branco no suporte da amostra. A "reflectância relativa" foi referida como a reflectância proporcional comparada à obtida no Teflon. Para a aquisição dos dados das amostras em laboratório, a câmera hiperespectral foi posicionada a uma altura de 20 cm acima das amostras. Um notebook com o software SpectrononPro, versão 4.0, foi usado para coletar e registrar os dados.



Figura 17. Camera e o dispositivo do sensor hiperespectral.

Fonte: Bongomin et al. (2024).

3.5. Procedimento e coleta de dados

A aquisição dos dados de reflectância espectral foi realizada em três séries, de acordo com os métodos descritos por Nansen et al. (2014) e Warren et al. (2017):

3.5.1. Primeira série:

Ela consistiu na aquisição de dados de reflectância hiperespectral dos ovos (recentemente postos ou ovos-novos e em pré-eclosão ou ovos-velhos), larvas vivas (estádios 1 a 5 que formam separadas de acordo de dias após eclosão dos ovos e conforme dos dias médias de desenvolvimento de cada estádio larval na literatura) e pupas (recém formada, com 2 dias após formação e próxima da emergência do adulto, com 9 dias após formação) de *D. saccharalis* (Figura 18).

Quatro (4) indivíduos (repetições) de cada estádio foram analisados isoladamente. Foi colocado cada amostra isoladamente sobre a platina de sensor de cor preta (permitindo eliminar qualquer reflectância relacionada ao suporte) sob a câmera hiperespectral durante alguns segundos (10 à 20 s) para coletar os dados da reflectância. As amostras foram analizadas, cada 24 horas durante 5 dias consecutivos.



Figura 18. Amostras. ovos-novos (a), ovos-velhos (b), larvas vivas (come 20 dias) (c), pupas novas (d) e pupas velhas (e). Fonte: Souradji (2025).

3.5.2. Segunda série:

Ela consistiu em sacrificar larvas (estádio 3) com uma gota de etanol a 70% (aplicação tópica); após o tratamento foram colocadas sobre papel filtro para secagem durante 15 min sob condições do laboratório (25-27 °C: UR 70-80% e fotofase 12 horas). As pupas sacrificadas e vivas formaram quatro repetições em cada caso.

Cada adulto (macho e fêmea), previamente colocado em copo plástico, foi imobolizado por asfixia com etanol a 70%, levemente embebido em algodão Hidrofílico colocado na tampa em um pequeno orifício até que seus movimentos estivesses cessados. Este método de sacrificar os insetos não tem influência negativa nas avaliações das amostras porque o etanol a 70% é uma solução que evapora muito rapidamente e não deixa nenhuma gota que altere a refletância das amostras. Em

cada caso, quatro repetições foram realizadas, sendo as amostras submetidos à aquisição de dados espectrais, cada 24 horas durante 5 dias consecutivos (Figura 19).



Figura 19. Processo de obtenção das larvas mortas (a,b,c,d), pupas mortas (e), pupas vivas (f) e adultos asfixiados no copo descartável (g). Fonte: Souradji (2025)

3.5.3. Terceira série:

Larvas do 3° estádio (20 dias após eclosão) de desenvolvimento foram submetidas ao parasitismo por *C. flavipes*. As larvas parasitadas foram divididas em quatro grupos (A, B, C e D) em placas de Petri, sendo cada grupo composto por quatro larvas: A)- 4 larvas de 20 dias parasitadas; B)- 4 larvas de 20 dias parasitadas; C)- 4 larvas de 20 dias parasitadas; e D)- 4 larvas de 20 dias parasitadas. 72 horas após foram

analisadas, durante 10 dias a cada 72 horas (3° e 6° dias após o parasitismo) e a cada 48 horas (8° e 10° dias após o parasitismo) para A, B, C e D. As larvas parasitadas e o desenvolvimento do parasitoide foram monitoradas até sua emergência e formação das pupas (Figura 20).



Figura 20. Larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes* com replicas das larvas nas caixas de Petri (a); larvas parasitadas em dieta (b); formação das pupas de *C. flavipes* (c). Fonte: Souradji (2025).

3.6. Processamento dos dados e análise estatística

Os parâmetros avaliados foram as reflectâncias hiperespectrais dos diferentes estágios de vida da *D. saccharalis* (ovo, larva, pupa e adultos), de larvas vivas e mortas e de diferentes fases de desenvolvimento das larvas parasitadas por *C. flavipes*.

Os dados de reflectância espectrais obtidos com o software ViewSpecPro foram pré-processados para eliminar o ruído (baixa relação sinal/ruído) (Figura 21), sendo os dados brutos convertidos em formato BIL e arquivos txt usando o SpectrononPro, versão 4.0 (Hyperspectral Imaging System Software). Os dados foram importados e submetidos o processamento e análise usando o software SAS versão 9.4 (SAS® OnDemand for Academics - SAS Institute, 2024) com os pacotes PROC MEANS, PROC ANOVA e PROC GLM. Filtros radiométricos apropriados foram aplicados às imagens hiperespectrais de amostras para respeitar os perfis de reflectância. Todas as análises estatísticas foram baseadas nos perfis médios de reflectância da cutícula e na composição físico-químicas de amostras dos insetos (ovos, larvas vivas, larvas mortas, pupas vivas, adultos e larvas parasitadas) (Figura 21).

Os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov foram aplicados para verificar a normalidade dos resíduos, enquanto os testes de Bartlett e Leven foram usados para verificar a homogeneidade de variâncias. As médias das reflectâncias

hiperespectrais foram discriminadas usando o teste Student Newman Keuls (SNK) no limite de 5%.

A classificação dos diferentes estágios de desenvolvimento, larvas mortas, larvas vivas e larvas parasitadas por *C. flavipes* foi realizada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA) com variâncias explicadas no “Google Colab in Pandas DataFrame with Python package upgrades and inclusions (statsmodels and scipy.stats)”.

Essas etapas buscam garantir resultados confiáveis e reprodutíveis para o estudo das propriedades espectrais dos diferentes estágios de desenvolvimento dos insetos e os hospedeiros (larvas parasitadas).

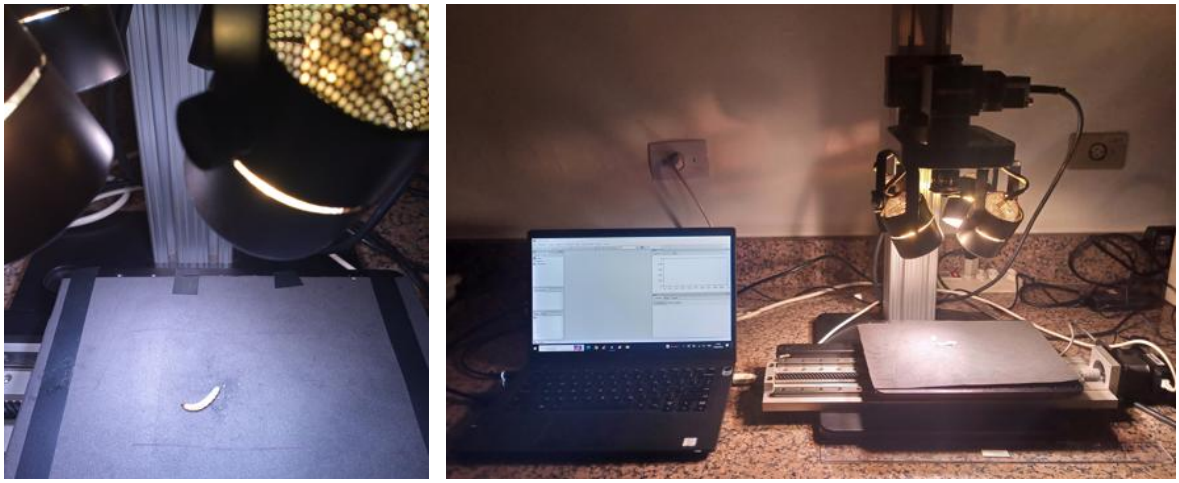


Figura 21. Processo de coleta dos dados da reflectância espectral das amostras.
Fonte: Souradji (2025).

4. RESULTADOS

4.1. Assinatura espectral dos ovos de *Diatraea saccharalis*

A Figura 22 apresenta os resultados da análise dos perfis de reflectância hiperespectral dos ovos de *D. saccharalis*, com comparação aqueles de 24 horas após a postura (ovos-novos) e aqueles em pré-eclosão (ovos-velhos), de acordo com os comprimentos de onda (400-1000 nm).

A reflectância média dos ovos-novos, com intervalo de confiança (IC), indica a variabilidade dos dados e mostra tendências específicas dependendo de cada comprimento de onda (Figura 22a). As altas reflectâncias foram observadas no infravermelho próximo (NIR, 700-950 nm) e as baixas no espectro visível (450-600 nm). O IC estreito sugere boa precisão das medições de reflectância, enquanto um IC amplo refletido maior variabilidade. Esses resultados revelam uma assinatura espectral distinta. Além disso, os resultados da reflectância média dos ovos-velhos, também mostram variações de acordo com os comprimentos de onda, provavelmente devido a alterações físico-químicas como desidratação, coloração (devido à formação de larvas) ou degradação de componentes internos. Essa assinatura espectral distinta, diferente daquela dos ovos-novos, permite diferenciar as duas fases dos ovos de *D. saccharalis* (Figura 22b).

A comparação direta das refletâncias destaca os comprimentos de onda, onde as diferenças da reflectância foram mais marcantes. Foi observada similaridade de reflectância nos comprimentos de onda (400-430 nm) entre as duas fases dos ovos, enquanto entre 450 e 1000 nm (região visível e NIR), observa-se diferença significativa na reflectância (Figura 22c). Essas diferenças espectrais indicam a possibilidade de detecção e classificação de ovos de acordo com a idade do desenvolvimento embrionário. Os resultados da comparação, apresentados no histograma (Figura 22d) mostram diferenças estatisticamente significativas ($F = 9,70$; $P < 0,05$), indicando que as propriedades espectrais dos ovos-novos e pré-eclodidos de *D. saccharalis* são distintas, demonstrando que ovos-novos e em fase de pré-eclosão apresentam assinaturas espectrais diferentes.

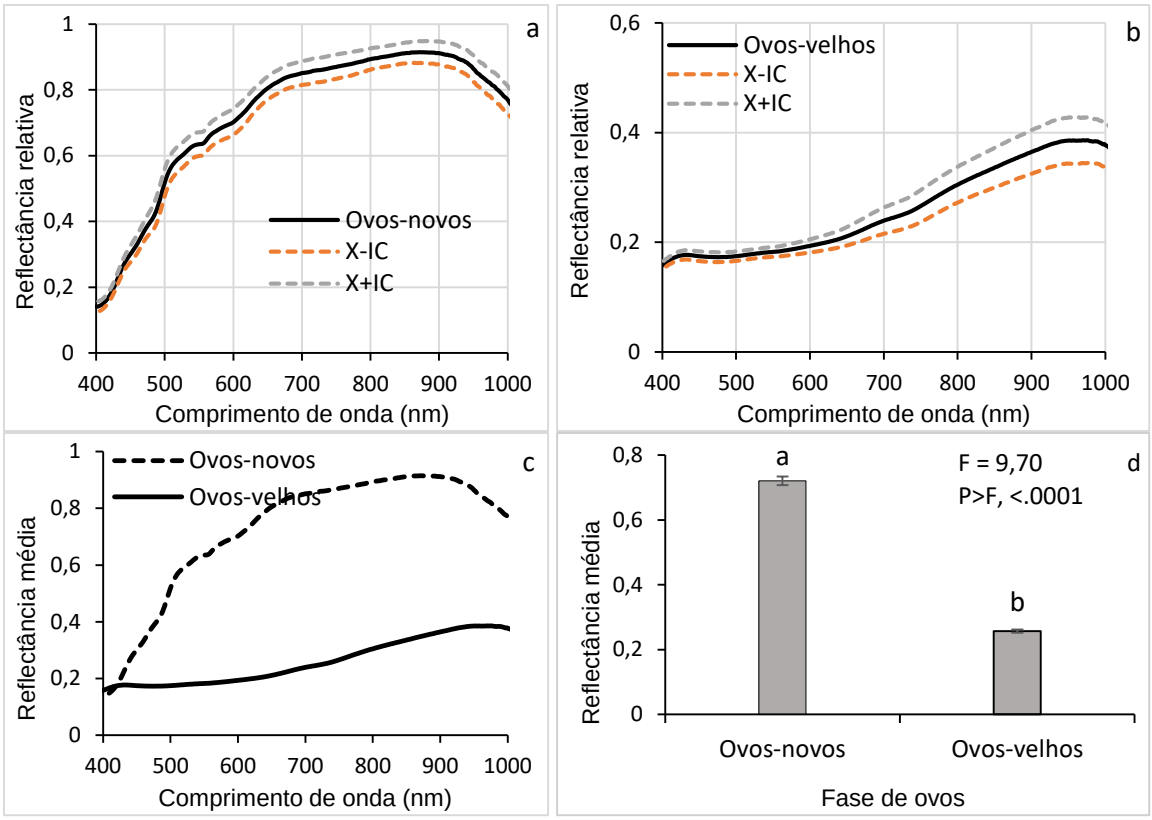


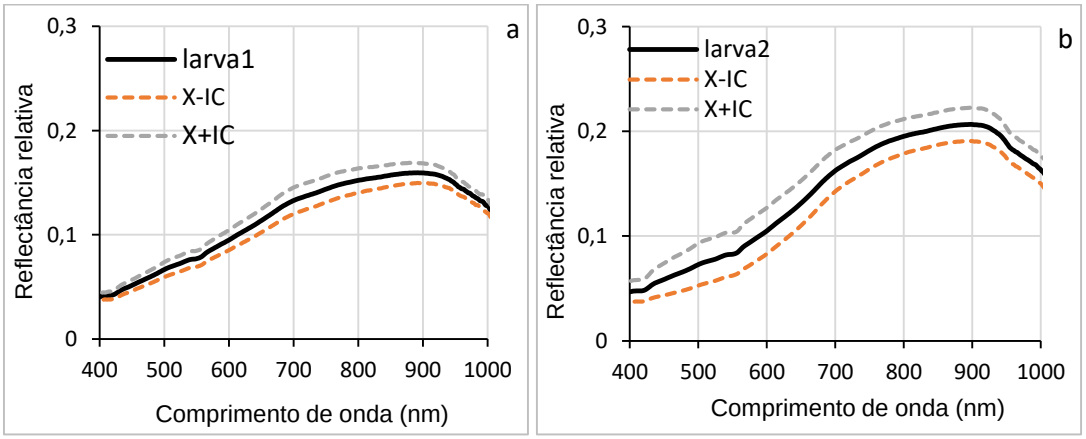
Figura 22. Reflectância espectral dos ovos de *D. saccharalis*. a (ovos-novos); b (ovos-velhos); **c** (ovos-novos vs ovos-velhos); d (comparação das médias da reflectância de todos comprimentos de onda). *****IC (Intervalo de confiança 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.2. Assinatura espectral das larvas de *Diatraea saccharalis*

As curvas da Figura 23 (a, b, c, d, e, f) ilustram as variações da reflectância hiperespectral, acompanhadas dos intervalos de confiança, para os diferentes estádios larvais de *D. saccharalis* em faixa de comprimentos de onda variando de 400 a 1000 nm. Os intervalos de confiança permitem estimar a precisão dos resultados e compreender a evolução da reflectância ao longo do desenvolvimento larval. As curvas indicam maior reflectância entre 550 e 900 nm (regiões do espectro visível e NIR), enquanto as menores reflectâncias são observadas entre 400 e 550 nm. Essas variações podem ser atribuídas a alterações morfológicas, fisiológicas ou bioquímicas que ocorrem durante o desenvolvimento larval, como espessamento da cutícula ou alterações em sua composição, que influenciam a maneira como a luz foi refletida.

A Figura 23f apresenta sobreposição das curvas da reflectância média dos cinco estádios larvais, permitindo comparação direta entre eles. Entre 400 e 650 nm, as curvas montram que os estádios larvais apresentam reflectâncias semelhantes nessa faixa de comprimento de onda. Em contraste, entre 650 e 900 nm, as curvas divergem, revelando diferenças significativas na reflectância entre os estágios, com as larvas de primeiro ínstar (estádio 1) apresentando maior reflectância hiperespectral, permitindo sua distinção em relação aos demais estádios larvais, de larva 2 a larva 5.

O histograma associado (Figura 24g) mostra a comparaçáo das médias de reflectância para cada estádio de todos comprimentos de onda, acompanhadas de letras de discriminação do teste estatístico SNK (no limite de 5%). Essas letras indicam diferenças altamente significativas ($p < 0,0001$), especialmente entre o estádio 1 e os demais. Essas diferenças podem ser explicadas por alterações (morfológicas, fisiológicas ou bioquímicas) que ocorrem durante o desenvolvimento larval, como espessamento da cutícula ou variações no conteúdo de pigmento. Esses resultados mostram que a reflectância hiperespectral pode ser usada como uma ferramenta eficaz para identificar e distinguir diferentes estádios larvais de *D. saccharalis*.



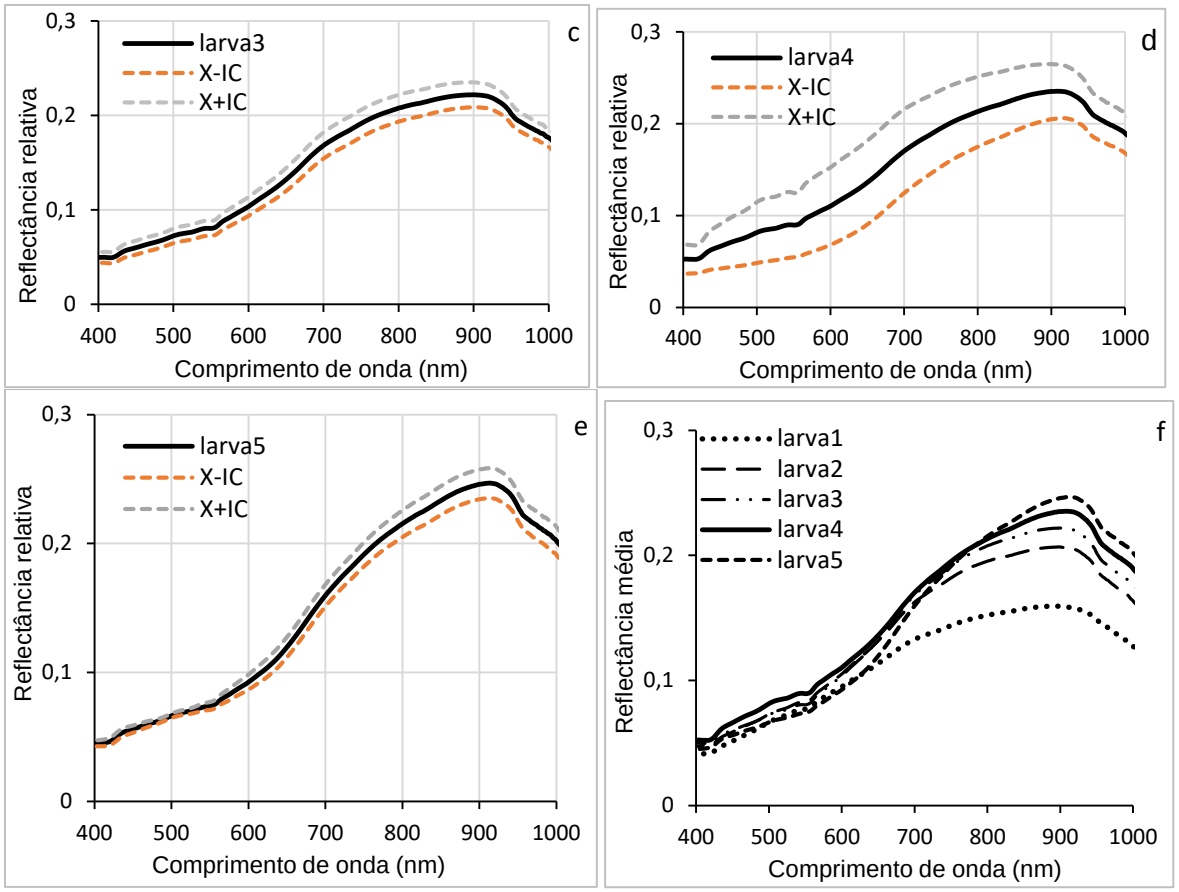


Figura 23. Reflectância espectral dos estádios larvais de *D. Saccharalis (*a,b,c,d,e,f). (larva 1: 7 DAE; larva2: 15 DAE; larva3: 20 DAE; larva4: 30 DAE; larva5: 40 DAE , em que DAE é dias após eclosão dos ovos). *IC (Intervalo de confiança 95%).

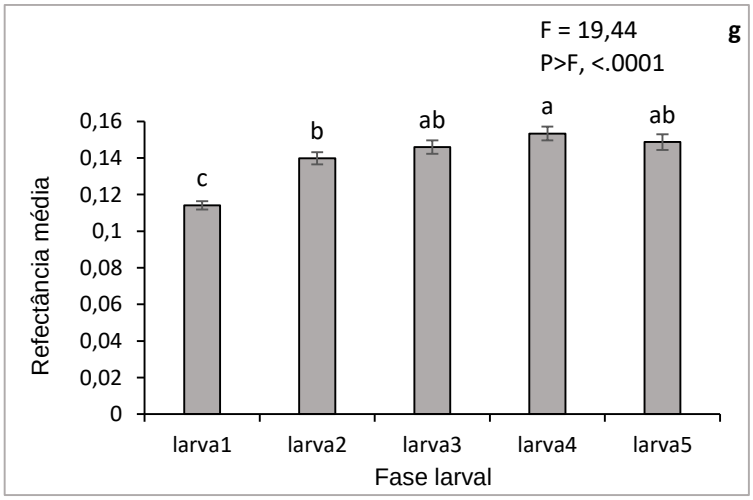


Figura 24. Comparação das médias (g) das fases larvais de *D. saccharalis*. (larva 1: 7 DAE; larva2: 15 DAE; larva3: 20 DAE; larva4: 30 DAE; larva5: 40 DAE, em que DAE é dias após eclosão dos ovos). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.3. Assinatura espectral das pupas de *Diatraea saccharalis*

A Figura 25 (a, b, c) mostra as curvas de reflectância média de pupas jovens (recém-formadas) e pupas velhas. Para as jovens (pupa-nova), a curva de reflectância aumentou gradualmente de 0,05 para mais de 0,4, especialmente nos comprimentos de onda visível (500-700 nm) e no NIR (700-1000 nm). Essa maior reflectância se deve à estrutura física e química das pupas jovens, que têm uma cutícula mais fina e menos pigmentada, refletindo mais luz. Em contraste, pupas mais velhas (pupa-velha) apresentaram menor reflectância, especialmente em comprimentos de onda visíveis (450-650 nm). Essa baixa reflectância pode ser explicada por alterações fisiológicas e bioquímicas relacionadas à quitina, como espessamento da cutícula, acúmulo de pigmentos ou degradação do tecido. Os intervalos de confiança mostram que as medições de reflectância foram relativamente precisas, com variabilidade moderada em torno das médias, o que sugere ser as diferenças observadas entre as duas fases das pupas significativas ($p < 0,05$).

A Figura 25d apresenta a comparação das reflectâncias médias de todos os comprimentos de onda, mostrando a comparação das distribuições dos valores médios de reflectância entre pupas jovens e velhas. Para pupas jovens, a mediana de reflectância foi maior, confirmando as observações da Figura 25c, com a dispersão dos dados relativamente baixa, indicando homogeneidade nas propriedades espectrais das pupas jovens. Em contraste, a reflectância media das pupas mais velhas foi menor, e a dispersão dos dados foi ligeiramente maior, refletindo maior variabilidade nas propriedades espectrais, com essa variabilidade podendo ser devida a diferenças no processo de modificação ou degradação de proteínas para permitir a reorganização dos tecidos (renovação de proteínas sintetizadas para garantir a metamorfose). Além disso, a quitina presente na cutícula que garante a proteção da pupa e a formação do futuro exoesqueleto do adulto também pode estar na origem da redução da reflectância espectral.

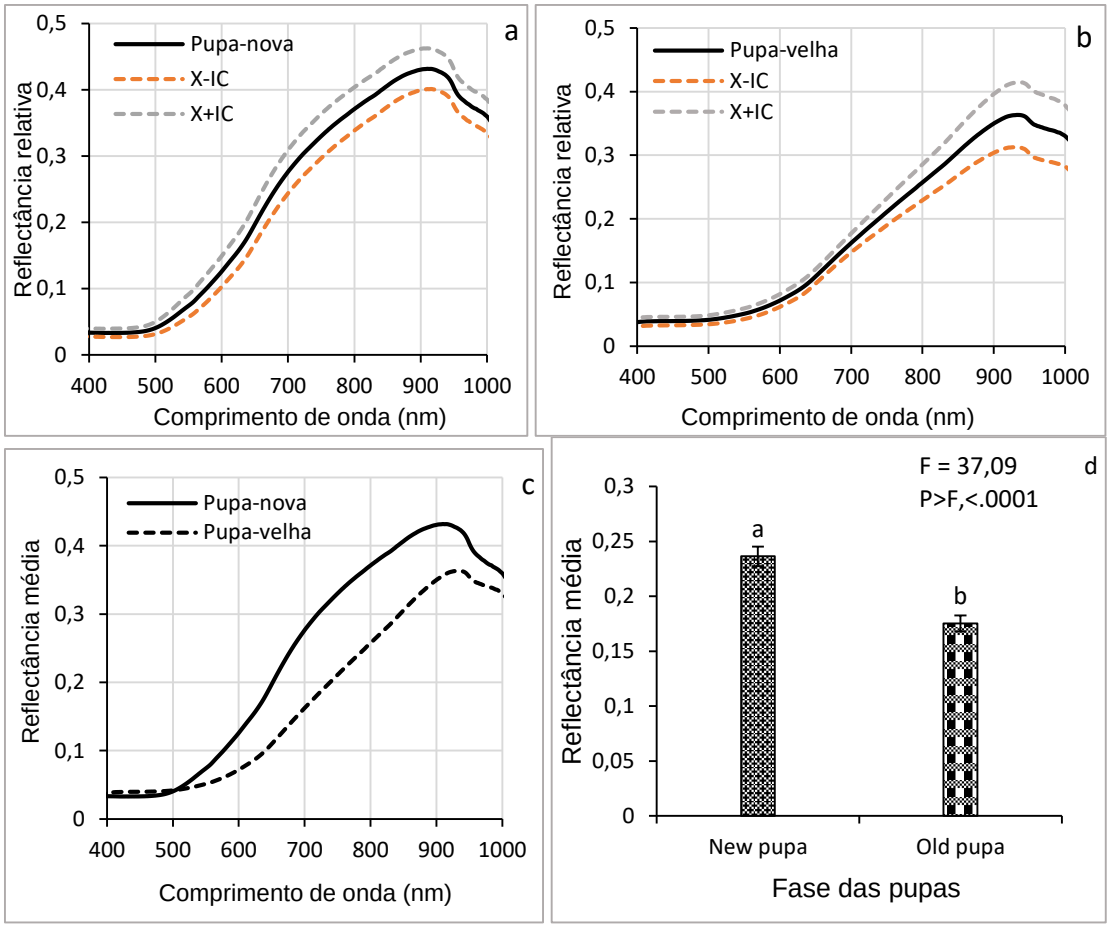


Figura 25. Reflectância espectral (a, b, c) e comparação das médias (d) da resposta hiperespectral das diferentes fases das pupas de *D. saccharalis*. (Pupa-nova: pupa de 2 dias após formação; pupa-velha; pupa de 9 dias após formação). *IC (Intervalo de confiança de 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.4. Assinatura espectral de adultos de *Diatraea. saccharalis*

A Figura 26 ilustra as curvas da reflectância hiperespectral média das faces dorsal e ventral de adultos de *D. saccharalis* em faixa de comprimento de onda de 400-1000 nm (Figura 26 a, b, c), com o histograma (Figura 26 d) permitindo comparar visualmente as médias da reflectância entre os diferentes grupos (machos vs. fêmeas e dorsal vs. ventral). O lado ventral das fêmeas adultas apresenta maior reflectância na região do espectro visível (400-700 nm), enquanto o lado dorsal mostra menor reflectância. Em machos, a reflectância da superfície dorsal foi ligeiramente maior entre 400 e 550 nm, porém sem diferença significativa entre 600 e 950 nm.

A análise comparativa das médias de reflectância entre as faces dorsal e ventral, bem como entre os sexos, revela que a reflectância da face ventral das fêmeas é geralmente maior do que das faces ventral e dorsal de ambos os sexos entre 400 e 750 nm. Estatisticamente não foram observadas diferenças significativas entre as faces dorsal das fêmeas e aquelas dorsal e ventral dos machos, sendo que apenas a reflectância média da face ventral das fêmeas foi significativamente diferente ($p< 0,05$) entre os diferentes grupos (machos vs Fêmeas; dorsal vs ventral).

Embora os adultos sejam cobertos de escamas, a diferença na reflectância da face ventral das fêmeas e dos outras faces pode estar relacionada ao seu papel reprodutivo, mais pêlos, exigindo baixa absorção de luz para fornecer melhor proteção contra a luz ou termorregulação mais eficiente para o sucesso reprodutivo.

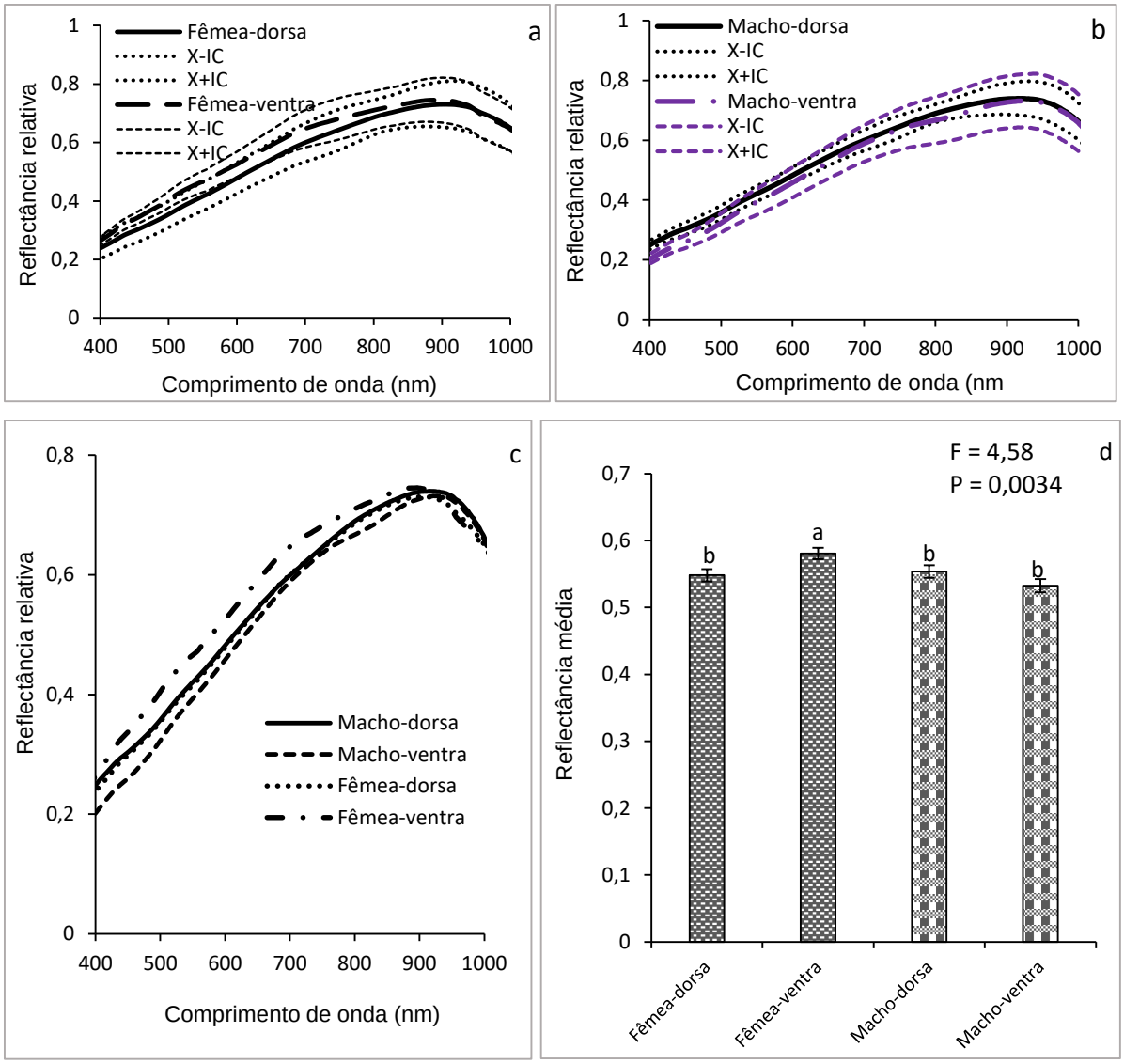


Figura 26. Reflectância espectral (a,b,c) e comparação das médias (d) da resposta hiperespectral da parte dorsal e ventral de adultos (fêmas e machos) de *D. saccharalis*. *IC (Intervalo de confiança de 95%). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.5. Assinatura espectral das larvas mortas e vivas de *Diatraea saccharalis*

A análise das curvas da reflectância hiperespectral das larvas vivas (Lviva-dia1 a Lviva-dia4) e larvas mortas (Lmorta-dia1 a Lmorta-dia4) de *D. saccharalis* destacou diferenças assinaturas espectrais significativas entre esses dois grupos ao longo de quatro dias. Essas medidas das reflectâncias hiperespectrais, realizadas em uma faixa de comprimento de onda (400-1000 nm), sugerem a mudança fisiológica das

larvas ao longo de quatro dias consecutivos e identificar os fatores responsáveis pelas variações na reflectância (Figura 27).

Larvas vivas exibiram reflectância relativamente baixa no espectro visível (400-600 nm), o que é característico de organismos hidratados e metabolicamente ativos. Entretanto, um ligeiro aumento na reflectância foi observado, especialmente na região do infravermelho próximo (700-900 nm). No geral, a reflectância hiperespectral média registada no dia 1 (Lviva-dia1) foi mais elevada em todo o intervalo de comprimento de onda (450-900 nm), enquanto as reflectâncias registadas durante os dias 2, 3 e 4 (Lviva-dia2 a Lviva-dia4) foram baixas com semelhança (sem distinção entre eles). Esse desenvolvimento possivelmente possa ser atribuído a mudanças progressivas na cutícula, que engrossa ou muda de composição com o crescimento, bem como a uma ligeira perda de água que influencia a difusão da luz. As variações na pigmentação relacionadas à dieta e aos processos fisiológicos também podem desempenhar importante papel na evolução das propriedades espectrais (Figura 27a).

Em contraste, as larvas mortas se distinguem desde o primeiro dia (Lmorta-dia1) por uma reflectância significativamente maior em todo o espectro (400-900 nm), com uma diminuição progressiva na reflectância observada durante os dias 2, 3 e 4 (Lmorta-da2, Lmorta-dia3 e Lmorta-dia4). Essa diminuição acentuada na reflectância se deve principal e possivelmente devido à desidratação (perda de água, ligada à decomposição das larvas), um fenômeno natural após a morte e que modifica consideravelmente a maneira como a luz é absorvida e refletida. A degradação das estruturas celulares altera a dispersão da luz, enquanto as alterações bioquímicas associadas à decomposição levam a modificações espectrais. A proliferação de microrganismos e os processos de putrefação também podem influenciar as propriedades ópticas das larvas mortas, diminuindo sua reflectância em diferentes regiões do espectro (Figura 27b).

A comparação entre larvas vivas e mortas revelou uma dinâmica de reflectância distinta (27c): as larvas vivas mantiveram uma tendência de reflectância relativamente estável com ligeira diminuição ao longo dos dias devido provavelmente a alterações fisiológicas, enquanto as larvas mortas exibiram, exceto no primeiro dia, baixas reflectâncias, devido aos processos de desidratação e decomposição (putrefação).

Esta análise hiperespectral destaca o potencial da Sensoriamento Remoto para diferenciar o estado fisiológico dos insetos com base em sua reflectância, fornecendo assim uma ferramenta relevante para o estudo de suas transformações de mortalidade e pós-mortalidade.

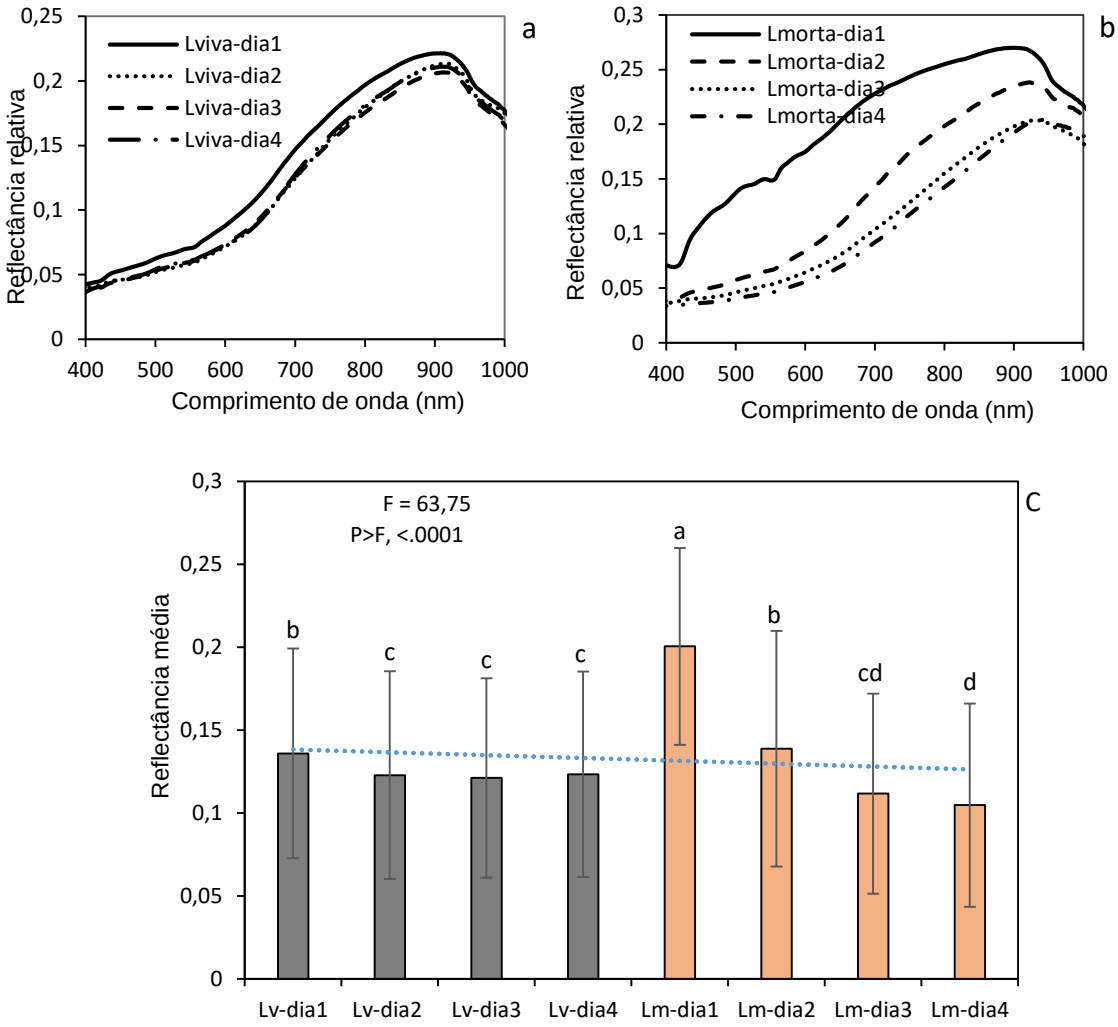


Figura 27. Reflectância espectral das larvas vivas (a) e mortas (b) e das médias comparativas (c) de *D. saccharalis*. Larva viva dia1 (Lv-dia1), Larva viva dia2 (Lv-dia2), Larva viva dia3 (Lv-dia3), Larva viva dia4 (Lv-dia4), Larva morta dia1(Lm-dia1), Larva morta dia2 (Lm-dia2), Larva morta dia3 (Lm-dia3), Larva morta dia4 (Lm-dia4). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.6. Assinatura espectral das larvas de *Diatraea saccharalis* parasitadas por *C. flavipes*

A a A análise Figura 28 destaca as variações na reflectância hiperespectral de larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes* em diferentes estádios de pós-parasitismo em uma faixa de comprimento de onda (400 a 1000 nm). Esses resultatos das reflectâncias médias foram adquiridos 3, 6, 8 e 10 dias após o parasitismo das larvas de 20 dias de idade e foram representados por curvas individuais (Figura 28 a, b, c, d). O gráfico comparativo (Figura 28 e) e o histograma (Figura 28 f) foram feitos para discriminar as médias das reflectâncias, com as curvas a; b; c; e d em cada gráfico constituindo as reflectâncias hiperespectrais médias das repetições das larvas parasitadas.

Aos 3 dias após o parasitismo, as curvas apresentaram valores da reflectância moderados, indicando alterações fisiológicas ainda pouco pronunciadas (Figura 28 a). Em contraste, 6 dias depois, foi observado um ligeiro aumento na reflectância, refletindo alterações teciduais incipientes causadas pelo desenvolvimento do parasitoide (Figura 28 b). Esta tendência foi mais acentuada 8 dias após o parasitismo, com diferenças na reflectância, particularmente no espectro visível (550-700 nm) e no infravermelho próximo (700-900 nm), onde a reflectância apresentou alterações mais significativas na estrutura dos tecidos internos das larvas. Aos 10 dias após, as curvas mostraram reflectâncias máximas (mais altas), indicando possivelmente a degradação avançada dos tecidos internos e alterações metabólicos significativas (morfológicos, fisiológicos) das larvas (Figura 28 c).

Embora as reflectâncias hiperespectrais tenham sido maiores em todos os comprimentos de onda (400-900 nm) a partir do 8º dia pós-parasitismo, não foram observadas diferenças significativas entre os diferentes grupos nas reflectâncias médias (a; b; c; e d) dos períodos pós-parasitismo (Dia-3, Dia-6, Dia-8 e Dia-10).

A Figura 28e mostra diferenças significativas e permite comparação direta entre as diferentes curvas da reflectância dos quatro períodos pós-parasitismo (Dia-3, Dia-6, Dia-8 e Dia-10), com essas diferenças nas reflectâncias hiperespectrais registradas entre 500 e 900 nm refletindo o crescente impacto do parasitismo na integridade celular e na composição dos tecidos das larvas. As reflectâncias médias das larvas parasitadas 10 dias depois foram significativamente maiores, sendo que essas

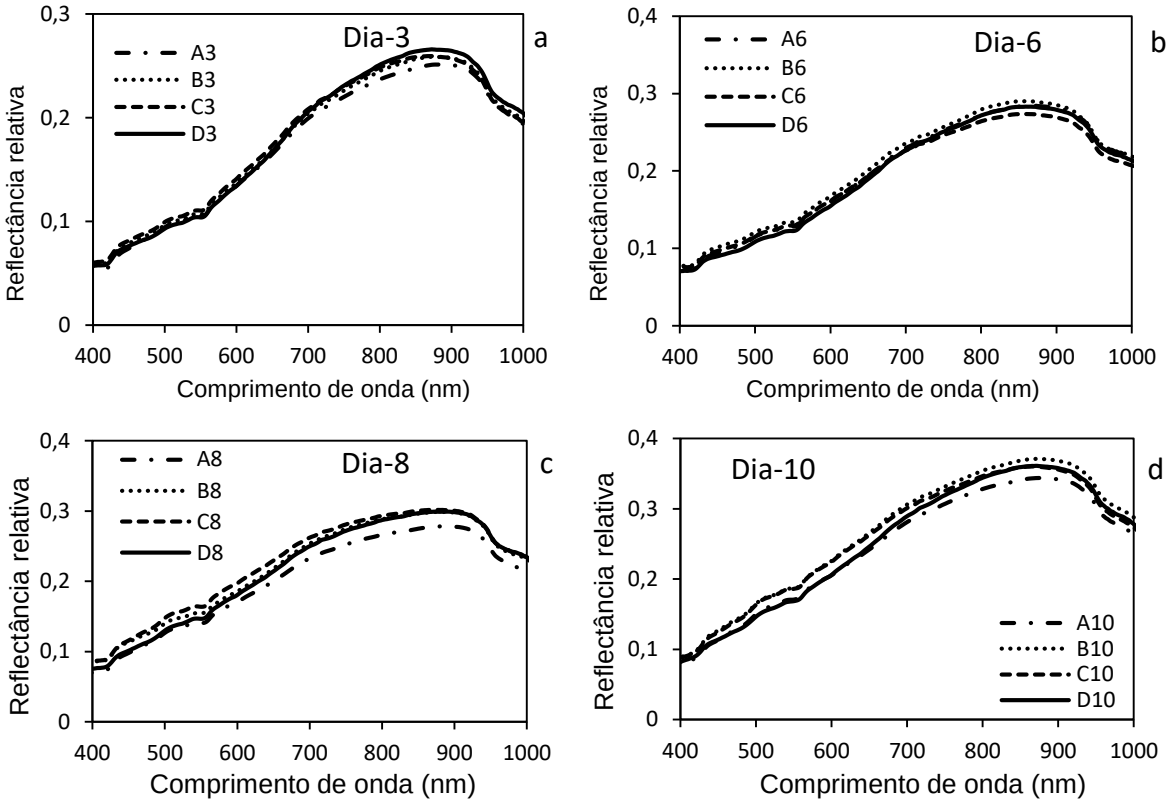
diferenças mostram a evolução progressiva dos danos fisiológicos, morfológicos, metabólicos e estruturais causados pelo desenvolvimento do parasitoide no interior das larvas.

O histograma das reflectâncias espectrais médias (Figura 28f) apresentou diferenças estatísticas, conforme o teste SNK ($p < 0,05$), entre os períodos pós-parasitismo, confirmando assim a significância das variações observadas, demonstrando que a reflectância média aumentou significativamente ($F = 59,81$; $P < 0,0001$) à medida que o parasitoide se desenvolveu no interior das larvas.

O histograma das reflectâncias espectrais médias (Figura 28g) apresentou diferenças estatísticas, conforme o teste SNK ($p < 0,0001$), entre as larvas de 3° estádio não parasitadas e as larvas de pós-parasitismo, confirmando assim a diferências fisiologicas das larvas não parasitadas e aquelas parasitadas.

As diferenças nas reflectâncias espectrais médias observadas nessas análises foram diretamente relacionadas aos efeitos fisiológicos e metabólicos induzidos pelo parasitismo. O desenvolvimento de *C. flavipes* no interior das larvas de *D. saccharalis* causa alterações nos tecidos, mudanças no conteúdo de água, reduções na densidade celular e alterações nos pigmentos da cutícula, com essas mudanças influenciando significativamente a maneira como a luz foi refletida, particularmente no infravermelho próximo, uma região sensível a variações na estrutura celular e na hidratação dos tecidos.

Esses resultados mostraram que a reflectância hiperespectral pode ser usada como uma ferramenta para monitorar alterações fisiológicas causadas pelo parasitismo, bem como a possibilidade de utiização para monitoramento não destrutivo das larvas em estudos de controle biológico.


Dia-3
a
A3
B3
C3
D3
Reflectância relativa
Comprimento de onda (nm)
Dia-6
b
A6
B6
C6
D6
Reflectância relativa
Comprimento de onda (nm)
Dia-8
c
A8
B8
C8
D8
Reflectância relativa
Comprimento de onda (nm)
Dia-10
d
A10
B10
C10
D10
Reflectância relativa
Comprimento de onda (nm)

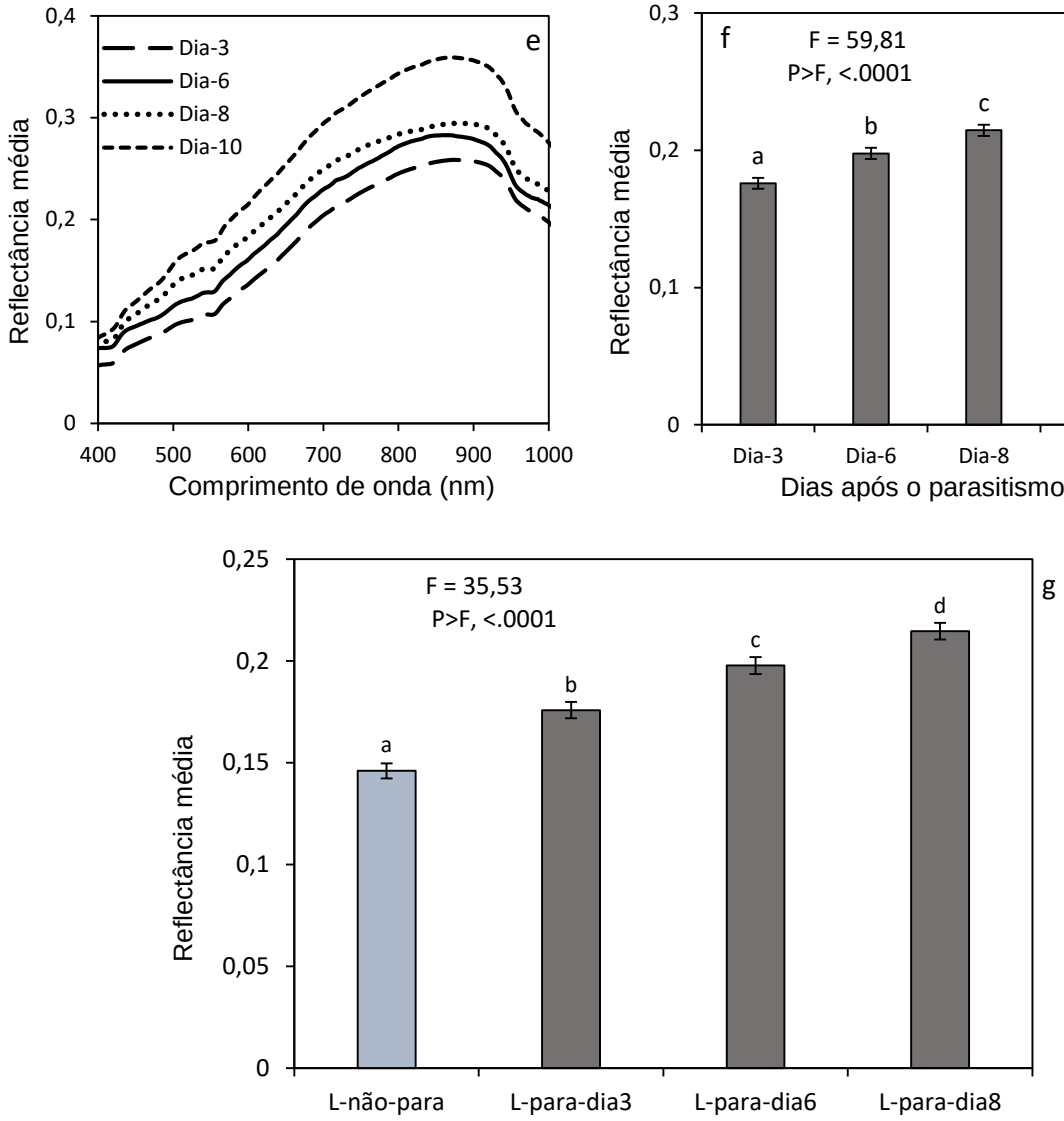


Figura 28. Reflectância espectral médias das larvas de *D. saccharalis*, 3-6-8-10 dias após o parasitismo por *C. flavipes* (a,b,c,d,e) e comparação das médias das reflectâncias dos dias pós-parasitismo (f) e das larvas não parasitadas (g). Larva não parasitada (L-não-para), Larva parasitada dia3 (L-para-dia3), Larva parasitada dia6 (L-para-dia6), Larva parasitada dia8 (L-para-dia8). *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de SNK (p<0,05).

4.7. Análise por Componentes Principais espectrais de estadios larvais de *Diatraea saccharalis*

A Figura 29 mostra o resultado da Análise de Componentes Principais (PCA) dos estádios larvais com uma projeção dos dados da reflectância hiperespectral em um espaço reduzido bidimensional (x,y), definido pelos dois primeiros componentes principais: PC1 e PC2. Esta visualização permite explorar as semelhanças e

diferenças entre os estádios larvais com base em medições da reflectância em diferentes comprimentos de onda (400-1000 nm). Os pontos foram distribuídos ao longo dos eixos PC1 e PC2, refletindo as variações na reflectância média entre diferentes estádios larvais. O PC1 capturado a principal tendência de mudança entre os estágios, enquanto o PC2 descrita variações adicionais não explicadas pelo PC1. O PC1 explicou 86,39% da variância total nos dados, tornando-se o principal eixo de variação. Isso significa que a maioria das diferenças observadas nas medições da reflectância hiperespectral foram devidas a variações relacionadas ao comprimento de onda. O PC2 explicou 13,27% da variância e a variação adicional capturada, permitindo melhor diferenciação dos estágios larvais, revelando informações importantes que, provavelmente estão relacionadas a características fisiológicas, morfológicas e bioquímicas do inseto.

Os pontos dos estádios larvais (Larva1, Larva2, Larva3, Larva4, Larva5) foram coloridos, de acordo com o comprimento de onda, permitindo visualizar agrupamentos ou separações entre esses estágios. A Larva1, como primeiro estádio larval, foi associada a uma área do gráfico onde os valores de PC1 foram menores, com reflectância mais distinta devido a diferenças estruturais ou fisiológicas iniciais. Larva 4, relativament próxima de Larva1, destacou-se dos outros estádios, com uma posição específica (intermediário) no espaço PCA. Em contraste, Larva2, Larva3 e Larva5 mostraram sobreposição, sugerindo que seus perfis da reflectância sejam mais semelhantes, reafirmando que possivelmente essas diferenças estejam relacionadas a mudanças fisiológicas ou estruturais durante o desenvolvimento larval.

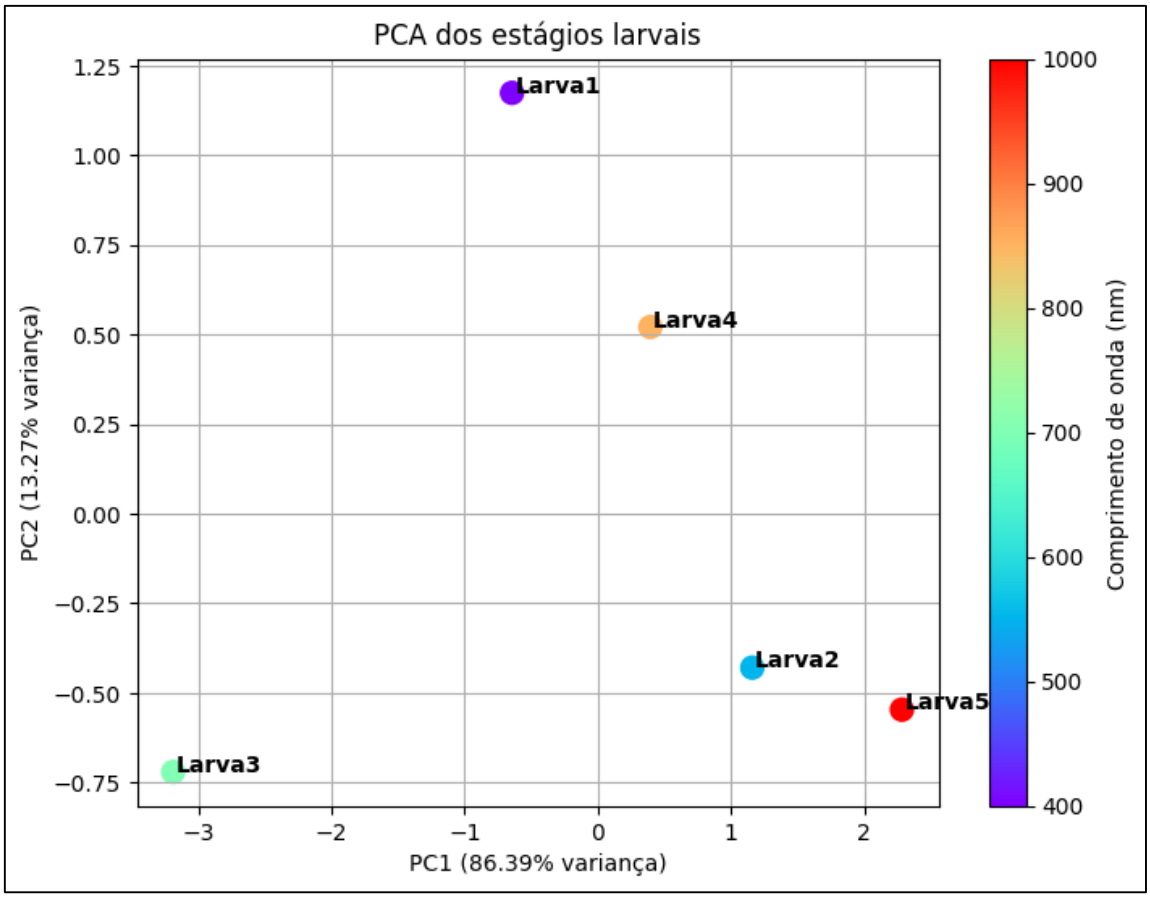


Figura 29. Análise de Componentes Principais em 2D dos estádios das larvas de *D. saccharalis*.

4.8. Análise por Componentes Principais espectrais de estágios de *Diatraea saccharalis*

A Análise de Componentes Principais realizada nos perfis da reflectância média dos diferentes estágios de *D. saccharalis* permitiu visualizar sua distribuição em um espaço espectro multidimensional (x,y,z) representado por PC1, PC2 e PC3. Este método estatístico reduziu a complexidade dos dados extraindo os eixos principais que explicam a maior parte da variância observada. Assim, a análise de PCA mostrou uma organização estruturada dos diferentes estágios e a disposição dos pontos no gráfico refletido as semelhanças e diferenças espectrais de acordo com os estágios de desenvolvimento de *D. saccharalis* (Figura 30).

Os estádios "ovo-novo" e "ovo-velho" apresentaram posicionamentos diferenciados devido a variações espectrais ligadas à composição, fisiologia, bioquímica e às cores ou estágio evolutivo do seu envoltório externo (córion). A

transição entre os estádios larvais (larva1 para larva 5) foi observada por um arranjo progressivo de naneira crescente, refletindo as modificações da cutícula e dos pigmentos à medida que cresciam.

As pupas (pupa-nova e pupa-velha) formavam um grupo distinto, separado das larvas e adultos. Esse posicionamento foi influenciado pelas importantes transformações sofridas durante a metamorfose, notadamente o espessamento e o endurecimento da cutícula, modificando assim suas propriedades ópticas e estruturais.

Os adultos foram categorizados de acordo com seu sexo e as faces (dorsal e ventral) de observação. Essa distinção foi explicada por diferenças morfológicas e pigmentares que influenciam a reflectância hiperespectral. A separação entre machos e fêmeas, bem como entre as faces dorsal e ventral, sugeriu uma variabilidade acentuada na estrutura e composição de seu tegumento.

Vários fatores podem explicar a distribuição dos pontos na PCA: a composição da cutícula e a pigmentação, que evoluem em cada estágio de desenvolvimento, com o envelhecimento dos organismos, perceptível na distinção entre formas jovens e velhas (novo vs velho), e diferenças entre sexos e feições corporais em adultos. A análise mostrou que a reflectância hiperespectral pode ser um critério relevante para diferenciar os estágios de *D. saccharalis*, e que essa característica evolui de acordo com as transformações biológicas durante o ciclo de vida de *D. saccharalis*.

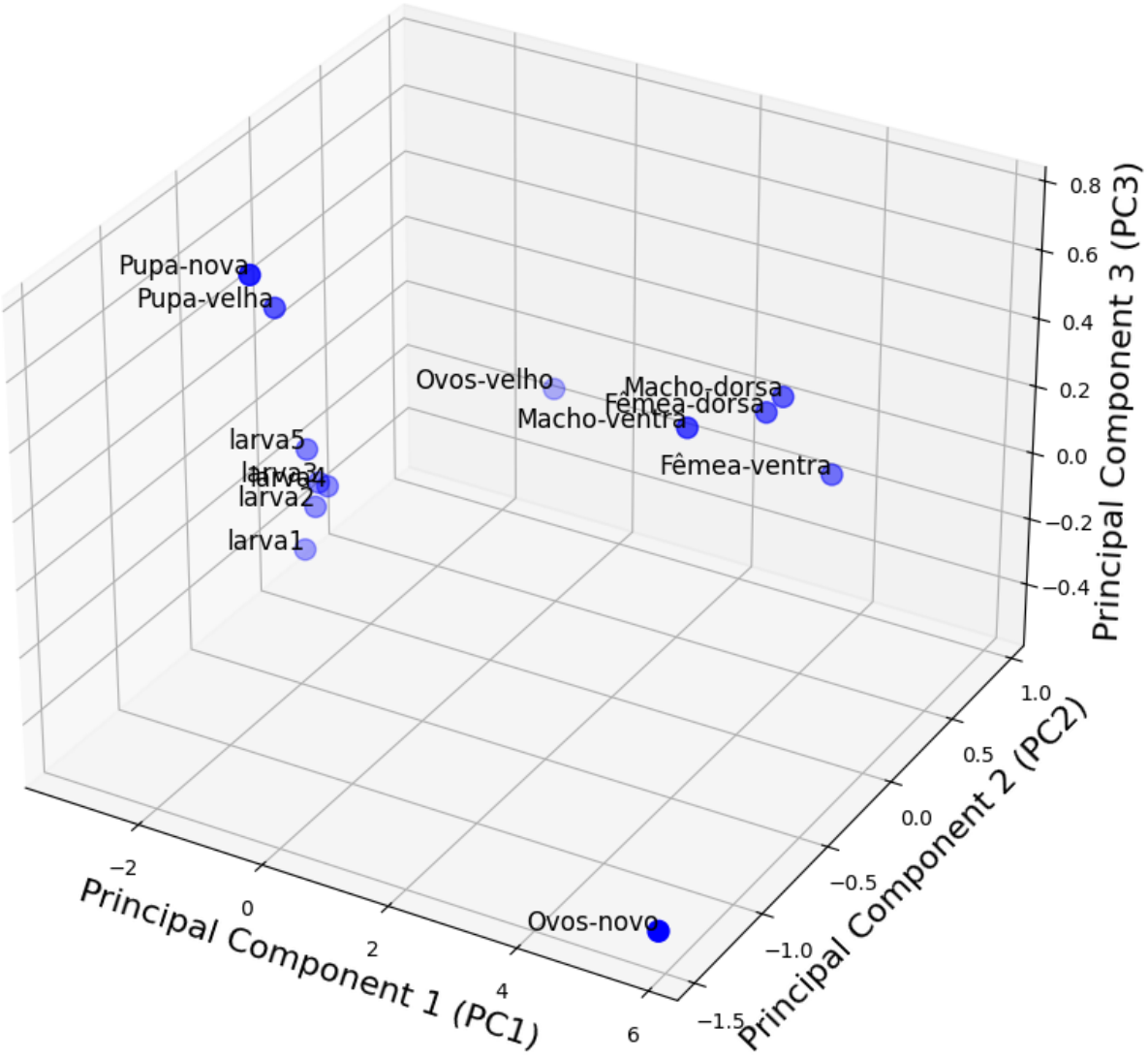


Figura 30. Análise de Componentes Principais em 3D de estágios de *D. saccharalis*. Porcentagem de variância explicada: PC1 (97,75%), PC2 (1,52%), PC3 (0,66%).

4.9. Análise por Componentes Principais espectrais das larvas mortas, vivas e parasitadas de *Diatraea saccharalis*

A análise de Componentes Principais (PCA) realizada nos perfis da reflectância média das larvas vivas (Larva-viva), larvas mortas (Larva-morta) e larvas parasitadas (Lp-dia3, Lp-dia6, Lp-dia8, Lp-dia10) de *D. saccharalis* permitiu visualizar sua distribuição em um espaço tridimensional (x,y,z). Este método estatístico destacou as diferenças espectrais entre os diferentes estados fisiológicos e revelou o impacto do parasitismo na evolução das propriedades fisiológicas, morfológicas e bioquímicas das larvas (Figura 31).

A análise hiperespectral do PCA mostra uma estruturação clara dos grupos da reflectância, com as larvas vivas formando um grupo distinto, caracterizado por uma reflectância moderadamente baixa (próxima a PC3 0,08%), principalmente devido ao seu baixo teor de água (relacionado à realização das mudas fisiológicas) e à integridade de seus tecidos biológicos. Em contraste, as larvas mortas estão localizadas em uma zona claramente separada, refletindo baixa reflectância. Essa diferença na reflectância é explicada provavelmente pela degradação celular e transformações bioquímicas pós-mortalidade.

Entre os dois grupos (larvas vivas e mortas), as larvas parasitadas por *C. flavipes* ocuparam posições intermediárias (mas distintas entre si), ilustrando assim uma transição progressiva das suas propriedades espectrais de acordo com os dias evolutivos do parasitismo. As larvas “Lp-dia3”, correspondentes ao terceiro dia após o parasitismo, permaneceram relativamente próximas das larvas vivas, sugerindo que os efeitos do parasitoide na estrutura e composição do tecido ainda foram limitados. Entretanto, a medida que o parasitismo progrediu (Lp-dia6, Lp-dia8), uma modificação mais acentuada das características espectrais foi observada, refletindo alterações fisiológicas e aumento do consumo dos recursos internos larvais pelo parasitoide.

As larvas no 10º dia após o parasitismo (Lp-dia10) cituaram-se muito perto do grupo das larvas mortas e próximo de PC1 (98,54%), indicando uma deterioração avançada da sua condição biológica. Essa evolução pode ser atribuída à destruição do tecido pelo parasitoide e à interrupção das funções metabólicas, levando a alterações nas reflectâncias espectrais semelhantes às das larvas observadas após a morte.

A análise hiperespectral do PCA destacou um “continuum” entre larvas vivas, parasitadas e mortas, refletindo as mudanças progressivas nas propriedades biológicas induzidas pelo parasitismo. Essa abordagem permitiu não apenas diferenciar estados fisiológicos, mas também avaliar a evolução dos efeitos do parasitoide (*C. flavipes*) sobre as larvas ao longo do tempo (dias).

A Sensoriamento Remoto hiperespectral aliada à PCA se destaca como uma ferramenta promissora para monitorar e caracterizar os impactos do parasitismo em *D. saccharalis*, oferecendo perspectivas interessantes para a detecção e o

gerenciamento do controle biológico.

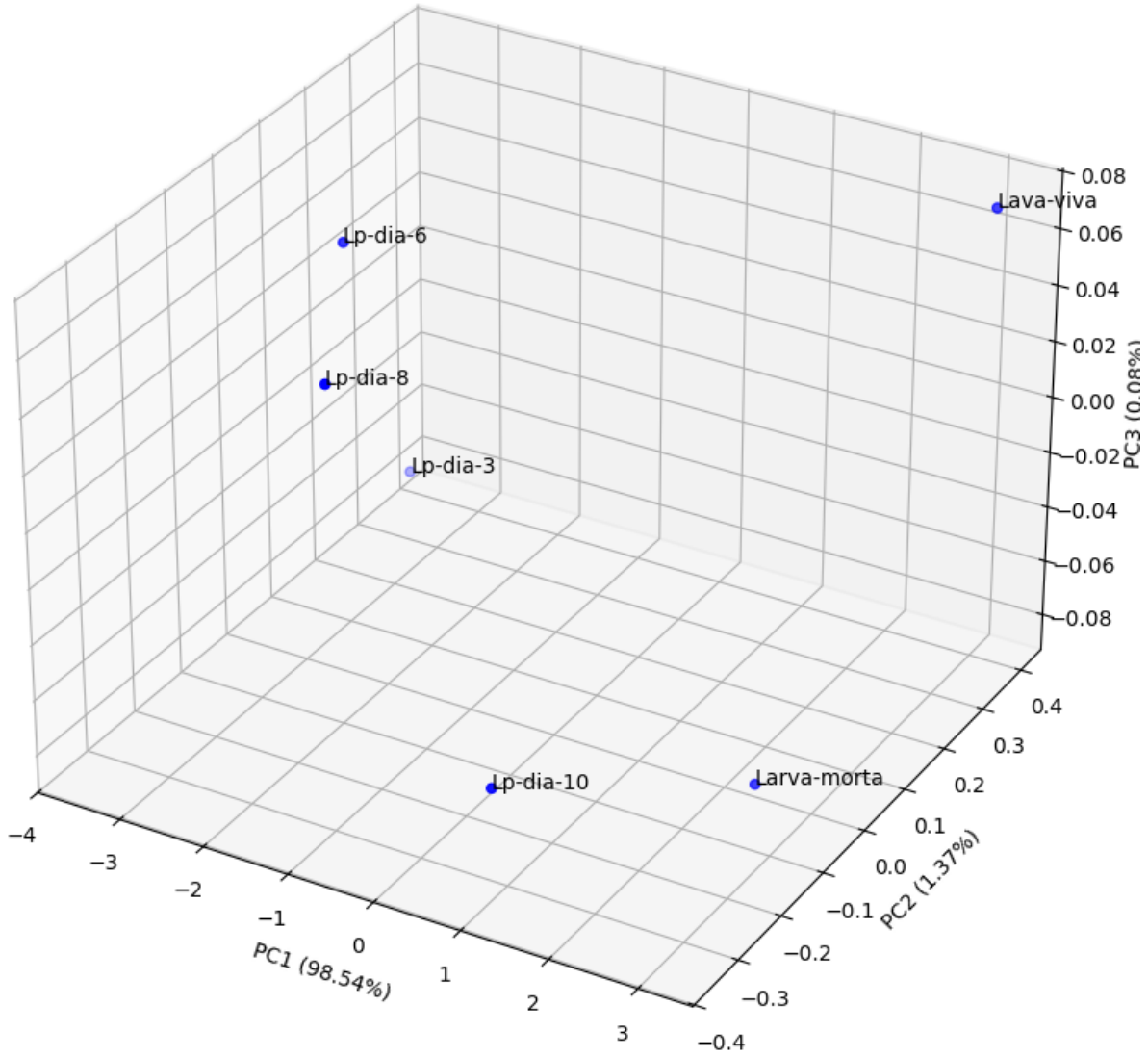


Figura 31. Análise de Componentes Principais em 3D das larvas mortas, vivas e larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes*. *Lp: larva parasitada.

5. DISCUSSÃO

O objetivo principal do presente estudo foi caracterizar, por meio de uma abordagem hiperespectral, os diferentes estágios de desenvolvimento de *D. saccharalis* e as fases pós-parasitismo de suas larvas parasitadas por *C. flavipes*. Os resultados mostraram variações acentuadas nas reflectâncias espectrais, atribuídas às interações entre fatores fisiológicos, morfológicos e metabólicos. As transições entre os estágios de desenvolvimento (ovo, larva, pupa e adulto) alteram a forma como a luz é absorvida, refletida ou transmitida, gerando assinaturas hiperespectrais distintas. Ao mesmo tempo, a composição físico-química e molecular de *D. saccharalis* varia de acordo com as necessidades energéticas e processos biológicos específicos de cada estágio. Por exemplo, os ovos têm uma composição rica em proteínas, lipídios, carboidratos, ácidos nucléicos, quitina, minerais e água, otimizada para a proteção, estrutura e nutrição do embrião. Nesta fase, as proteínas e a quitina desempenham um papel fundamental na resistência aos estresses ambientais e na coloração do cutícula. Essas variações refletem a adaptação dinâmica dos componentes biológicos aos requisitos do ciclo de vida do inseto, ao mesmo tempo em que ilustram a relação entre as reflectâncias hiperespectrais e as transformações metabólicas ou estruturais subjacentes (Eddin et al., 2019; Rezende et al., 2016).

As variações na reflectância hiperespectral observadas entre os ovos recém-postos (24 horas após a postura) e aqueles na fase de pré-eclosão de *D. saccharalis* revelaram provavelmente alterações físico-químicas significativas, durante o desenvolvimento embrionário. Os ovos recém-postos tiveram uma maior reflectância no espectro visível e particularmente no infravermelho próximo (NIR, 700-950 nm), refletindo possivelmente por um maior teor de água. Esse conteúdo diminui gradualmente à medida que o embrião se desenvolve, levando a mudanças estruturais no córion. Além disso, os ovos pré-eclodidos apresentaram uma menor reflectância, provavelmente devido a modificações bioquímicas, em particular o acúmulo de pigmentos relacionados à formação de estruturas larvais. Quando postos, os ovos de *D. saccharalis* são claros, geralmente translúcidos e carecem de pigmentos significativos (Kannan et al., 2021). No entanto, à medida que o desenvolvimento embrionário progride, sua coloração evolui para tons de marrom escuro e depois para preto na fase de pré-eclosão. Essa mudança de cor é atribuída

à formação do embrião, cuja cabeça geralmente aparece preta, bem como aos processos de desidratação e pigmentação que influenciaram as refletâncias hiperespectrais (Moriyama, 2021). Essas observações são consistentes com estudos anteriores sobre a identificação dos ovos hospedeiros e seus estágios de desenvolvimento de *Trichogramma galloi* Zucchi, 1988, *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 e *Trichogramma atopovirilia* Oatman & Platner, 1983 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) por reflectância hiperespectral (Nansen et al., 2014). As diferenças nas assinaturas hiperespectrais constituem um método não destrutivo para avaliar a maturidade dos ovos e essencial para o manejo de populações de pragas em ambientes agrícolas (Voss et al., 2017; Pechal et al., 2014; Pickering et al., 2015).

As variações das reflectâncias hiperespectrais ao longo dos diferentes estágios larvais (L1 a L5) permitiram analisar as alterações relacionadas com o seu crescimento, nomeadamente ao nível do tamanho, espessamento da cutícula (reforço da sua densidade) e modificações da pigmentação (alterações da composição bioquímica). A composição das larvas é dominada principalmente por proteínas, gorduras, água e carboidratos, essenciais para seu rápido crescimento. Sua cutícula, por outro lado, é composta principalmente de quitina e proteínas (Abdelwahab; Taha; Mariod, 2025). Os resultados também mostraram que a variabilidade das reflectâncias hiperespectrais entre os estádios larvais é fortemente influenciada por fatores fisiológicos, como muda ou preparação para pupação, bem como por modificações bioquímicas, incluindo variação no conteúdo de proteínas, lipídios e pigmentos. Além disso, o crescimento do tecido interno e as alterações morfológicas, como espessamento da cutícula ou tamanho larval, também influenciaram essas variações de reflectância hiperespectral (Voss et al*.,* 2017; Warren et al., 20217).

As larvas utilizadas neste estudo foram alimentadas com uma dieta artificial, método comumente utilizado em laboratório para garantir o controle preciso dos nutrientes ingeridos. A composição dessas dietas influencia vários aspectos fisiológicos, incluindo pigmentação, crescimento, duração dos estágios de desenvolvimento e sobrevivência (Ottocento et al., 2024; Vacari et al., 2012). Em *D. saccharalis,* como nos lepidópteros em geral, a pigmentação da cutícula é determinada pela presença de melaninas, carotenoides e ommocromos, cuja expressão é modulada por fatores genéticos, nutricionais e ambientais (Francois,

2020; François e Davidowitz, 2020). Isso explica em parte as diferenças na refletância hiperespectral, observadas entre o primeiro estádio larval e os estádios subsequentes (L2 a L5) em diferentes comprimentos de onda.

Essa capacidade de diferenciar com precisão por meio da reflectância hiperespectral é essencial para a rápida identificação de estádios larvais e o monitoramento de populações de *D. saccharalis*. Esses resultados estão de acordo com os de Warren et al. (2017), que caracterizaram as assinaturas hiperespectrais dos estágios imaturos de *Lucilia sericata* Meigen, 1826) (Diptera: Calliphoridae). Além disso, um outro estudo foi conduzido para identificar as larvas de primeiro ínstar (estádio) de três espécies de moscas de carne forenses importantes (*L. sericata*, *Calliphora vicina* Robineau-Desvoidy, 1830 e *Calliphora vomitoria* (L., 1758) (Diptera: Calliphoridae) analisando seus hidrocarbonetos cuticulares por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) (Moore Adam e Drijfhout, 2014).

As análises da reflectância hiperespectral no estágio de crisálida revelaram que as pupas jovens tinham maior reflectância do que as pupas maduras (pupas velhas). Essa diferença pode ser atribuída à condensação progressiva da quitina e aos processos de pigmentação associados à maturação das pupas. Variações na reflectância entre essas duas fases também podem ser influenciadas pela reorganização dos tecidos internos, um fenômeno chave da holometamorfose, como a cutícula das pupas jovens é geralmente mais fina e menos pigmentada que reflete mais luz (Frere et al., 2014). Em contraste, a baixa reflectância observada em pupas maduras (velhas) entre 550 e 900 nm pode resultar do acúmulo de pigmentos protetores, densificação da cutícula, bem como degradação de proteínas e lipídios, resultando em aumento da absorção de luz. Essas transformações são essenciais para preparar o inseto para sua vida adulta. Resultados obtidos, estão semelhantes a de trabalhos anteriores, que usaram reflectância hiperespectral para determinar a idade das pupas e identificar espécies de moscas como, *Calliphora dubia* (Macquart, 1855) e *Chrysomya rufifacies* (Macquart, 1843) (Diptera: Calliphoridae) (Voss et al*.,* 2017), com esse estudo fornecendo prova de conceito, demonstrando uma relação direta entre a idade das pupas (número de dias desde o início da pupação), características da reflectância externa e seu desenvolvimento morfológico interno. Essa abordagem fornece um método não invasivo e não destrutivo para estimar a

idade e o estágio de desenvolvimento dos insetos. Os trabalhos anteriores também determinaram a idade das pupas de *Chrysomya megacephala* (Fabricius, 1794) (Diptera: Calliphoridae) combinando análise de refletância hiperespectral e aprendizado de máquina, confirmando o potencial dessa técnica para o estudo do desenvolvimento de insetos (Zhang et al., 2024).

Diferenças significativas na reflectância hiperespectral observadas entre machos e fêmeas, bem como entre as superfícies dorsal e ventral, particularmente em fêmeas de *D. saccharalis*, sugeriram dimorfismo sexual na composição e pigmentação da cutícula. A maior reflectância na face ventral das fêmeas pode ser relacionada às adaptações reprodutivas e à estrutura específica de sua cutícula. Em adultos, a presença de pelos, a coloração de seu tegumento e a composição multicamadas da cutícula influenciam essas variações espectrais (Chauhan et al., 2021). Essas diferenças podem portanto, ser interpretadas como estratégias de adaptação ao seu ambiente e biologia (Loof et al., 2010). Além disso, a variabilidade na refletância, de acordo com o sexo e a região do corpo, pode desempenhar um papel na seleção e reprodução sexual. Estudos semelhantes conduzidos, analisaram os perfis da reflectância hiperespectral de três espécies de insetos, diferenciando entre machos e fêmeas {*Frankliniella occidentalis* Pergande 1895 (Thysanoptera: Thripidae), *Nilaparvata lugens* Stäl, 1854 (Hemiptera: Delphacidae) e *Bothrogonia ferruginea* (Fabricius, 1877) (Hemiptera: Cicadellidae)} (Li et al., 2017). Outros trabalhos de pesquisa anteriro usaram imagens hiperespectrais proximais para avaliar quatro das principais pragas da soja {*Euschistus heros* (Fabricius, 1798) (Hemiptera: Pentatomidae), *Diceraeus melacanthus* (Dallas, 1851) (Hemiptera: Pentatomidae), *Spodoptera eridania* Pedra, 1871 (Lepidoptera: Noctuidae) e *Chrysodeixis includens*) (Walker, 1858) (Lepidoptera: Noctuidae), bem como os danos que causam às lavouras (Iost Filho et al., 2022). Nossos resultados também corroboram os trabalhos anteriores, que utilizaram uma abordagem integrativa combinando morfologia, DNA mitocondrial e perfil hiperespectral de reflectância para identificar sete espécies de cigarrinhas do gênero Bundera Distant, 1908 (Hemiptera: Cicadellidae) (Wang e Zhang, 2016). Este estudo destaca o potencial da espectroscopia hiperespectral como ferramenta taxonômica e ecológica para classificação e identificação de insetos.

A análise de componentes principais em 3D permitiu diferenciar eficientemente os diferentes estágios de desenvolvimento de *D. saccharalis*, destacando variações hiperespectrais associadas a alterações fisiológicas e morfológicas. O agrupamento distinto de larvas, pupas e adultos reflete grandes transformações bioquímicas durante a metamorfose. Essa abordagem multivariada revelou padrões de transição contínua entre os estágios, ilustrando a dinâmica do ciclo de vida de *D. saccharalis*. A integração da PCA com métodos de classificação supervisionados pode melhorar a precisão diagnóstica para aplicações na agricultura de precisão. Esses resultados estão de acordo com os trabalhos anteriores, que identificaram os estágios de desenvolvimento de *Metisa plana* Walker, 1883 (Lepidoptera: Psychidae) usando imagens hiperespectrais acopladas a algoritmos de aprendizado de máquina (Johari et al., 2022). Outros estudos também destacaram a crescente importância do Sensoriamento Remoto espectral na sistemática de insetos e no estudo fenômico do comportamento e fisiologia dos insetos (Nansen e Elliott, 2016). Também, foi analisada a morfologia interna de moscas (Diptera: Calliphoridae) para estimar a idade dos estágios de desenvolvimento e refinar a avaliação do intervalo “post-mortem” (Davies e Harvey, 2013).

Além disso, as diferenças hiperespectrais entre larvas vivas e mortas refletem alterações fisiológicas, incluindo perda de água e degradação tecidual progressiva. A diminuição gradual da reflectância herperespectral após a morte de larvas de *D. saccharalis* é consistente com estudos de alterações espectrais “post-mortem” em tecidos biológicos (Frere et al., 2014; Pérez-Martínez et al., 2017; Martín et al., 2019; Ortiz-Herrero et al., 2021; Ku et al., 2023). Esses resultados destacam o potencial da imagem hiperespectral como uma ferramenta para a detecção rápida da mortalidade de insetos, fornecendo assim um recurso valioso para estudos ecológicos e monitoramento populacional em ambientes naturais ou em laboratório.

O aumento progressivo da reflectância hiperespectral em larvas parasitadas de *D. saccharalis* revelou a degradação dos tecidos internos e alterações metabólicas induzidas por *C. flavipes*. A criação das larvas de *D. saccharalis* foi realizada em laboratório, com dieta artificial à base de farelo de soja e germe de trigo. A duração média da fase larval foi entre 46 e 50 dias antes do início da fase de pupa. As larvas foram parasitadas por *C. flavipes* no dia 20 de seu ciclo de vida, e o parasitoide se

desenvolveu por 13 dias no interior do hospedeiro antes de emergir e formar suas pupas. Foram necessários apenas 12 dias para que o parasitoide causasse a morte de seu hospedeiro. Três dias após o parasitismo, as larvas apresentaram baixa reflectância hiperespectral, comparável à das larvas não parasitadas, indicando que os efeitos do parasitoide ainda não eram perceptíveis.

No entanto, entre 8 e 10 dias após o parasitismo, a fisiologia das larvas mudou, com uma cutícula gradualmente se tornando transparente, levando a um aumento da reflectância hiperespectral. A evolução das reflectâncias hiperespectrais ao longo dos dias pós-parasitismo destacou alterações progressivas das estruturas internas, em relação à atividade do parasitoide. Esses resultados corroboram os de Salamanca et al. (2023), Assis Gomes e Oliveira (2020), que demonstraram a eficácia de *C. flavipes* como endoparasita para o controle biológico de lepidópteros-praga.

Esta abordagem é um método não destrutivo para avaliar o impacto do controle biológico nas populações de *D. saccharalis* e outras pragas. Confirma a eficácia da imagem hiperespectral no monitoramento dos efeitos do parasitismo, conforme demonstrado por estudos sobre interações parasitoide-hospedeiro (Nansen et al., 2015; Nansen et al., 2019). Os resultados da Análise de Componentes Principais (PCA) permitiram compreender um claro “continuum” entre o estado vivo, o estado parasitado e a morte das larvas, ilustrando assim a destruição progressiva de suas propriedades fisiológicas. Esses resultados destacam a sensibilidade da imagem hiperespectral para monitorar os impactos parasitários, avaliar o estado de saúde das larvas e detectar mudanças sutis em suas condições fisiológicas. Este avanço abre caminho para aplicações inovadoras e não invasivas em entomologia aplicada, agrcola e ecologia de interação (Banas et al*.,* 2021; Vänninen, 2022).

Além das contribuições científicas para a caracterização espectral de *Diatraea saccharalis* e das respostas fisiológicas induzidas pelo parasitismo por *Cotesia flavipes*, os resultados deste estudo apresentam elevado potencial de aplicação em processos de automação da criação massal de insetos em biofábricas. A possibilidade de discriminar, de forma rápida, não invasiva e precisa, os estágios de desenvolvimento do hospedeiro, bem como identificar o progresso do parasitismo por meio da reflectância hiperespectral representa um avanço significativo para o monitoramento automatizado da qualidade biológica dos insetos criados. Sistemas

baseados em Sensoriamento Remoto Proximal Hiperespectral podem ser integrados a plataformas de aquisição contínua de dados e algoritmos de classificação, permitindo a detecção precoce de falhas no parasitismo, a identificação do momento fisiológico ideal para manejo das larvas e a padronização dos lotes produzidos. Dessa forma, a tecnologia contribui para a redução da dependência de avaliações visuais subjetivas, diminuição de perdas operacionais e aumento da eficiência e escalabilidade da criação massal de parasitoides, fortalecendo programas de controle biológico em larga escala. Resultados semelhantes quanto ao potencial do Sensoriamento Remoto hiperespectral para automação, classificação biológica e monitoramento fisiológico de insetos têm sido relatados por Nansen et al. (2019), Warren et al. (2017) e Holman et al. (2024), reforçando a relevância desta abordagem para aplicações industriais e comerciais em entomologia agrícola.

6. CONCLUSÕES

O Sensoriamento Remoto proximal piperespectral demonsta elevada eficiência na caracterização espectral dos diferentes estágios de desenvolvimento de *Diatraea saccharalis*, bem como na identificação das alterações fisiológicas decorrentes do parasitismo por *Cotesia flavipes*. De forma integrada, os resultados obtidos atendem plenamente aos objetivos específicos propostos neste estudo.

Foi possível obter e diferenciar, por meio da reflectância espectral, os estágios de ovos, larvas, pupas e adultos de *D. saccharalis*, evidenciando padrões espectrais próprios para cada fase de desenvolvimento. As diferenças observadas, sobretudo nas regiões do visível e do infravermelho próximo (NIR), refletem variações morfológicas, estruturais e fisiológicas ao longo do ciclo de vida *D. saccharalis*, confirmando o potencial do Sensoriamento Remoto Proximal Hiperespectral como ferramenta não invasiva para a discriminação de estágios ontogenéticos.

O Sensoriamento Remoto Proximal Hiperespectral também permite a obtenção de assinaturas espectrais específicas das larvas de *D. saccharalis* parasitadas por *C. flavipes*. As larvas parasitadas apresentam respostas espectrais distintas das larvas vivas não parasitadas, com alterações progressivas na reflectância, especialmente no NIR, associadas às mudanças fisiológicas, morfológicas e bioquímicas induzidas pelo desenvolvimento do parasitoide no interior do hospedeiro.

Com base na análise da reflectância espectral, foi possível determinar que, entre 8 e 10 dias após o parasitismo, as larvas parasitadas passam a apresentar um padrão espectral semelhante ao de larvas mortas, indicando um comprometimento severo da atividade fisiológica e consequentemente da capacidade de alimentação normal do hospedeiro. Esse intervalo representa o número mínimo de dias após o parasitismo em que a larva de *D. saccharalis* não consegue mais se alimentar de forma eficiente.

Além disso, os dados espectrais indicam que o décimo dia após o parasitismo é o período em que a larva hospedeira é afetada mais severamente. Os resultados também indicam que o período intermediário a tardio do parasitismo é caracterizado por mudanças espectrais marcantes, refletindo o colapso fisiológico das larvas de *D. saccharalis*, o que reforça a eficiência de *C. flavipes* como agente de controle biológico.

Os dados gerados neste estudo permitem contribuir para a criação de um banco de assinaturas espectrais (na faixa de 400 a 1000 nm) das fases de vida de, instares e gênero de *D. saccharalis* e do parasitismo por *C. flavipes*. Esse repositorio espectral de dados e assinaturas constituem uma base sólida para aplicações futuras em entomologia agrícola, especialmente na otimização de programas de criação massal de parasitoides e seus hopedeiros, no monitoramento de pragas e no fortalecimento de estratégias de manejo integrado de pragas.

O Sensoriamento Remoto Proximal Hiperespectral se consolida como uma ferramenta promissora, precisa e não destrutiva para a caracterização espectral de insetos-praga e seus inimigos naturais, contribuindo significativamente para a agricultura de precisão e para o uso sustentável do controle biológico em sistemas agrícolas.

Investigações futuras devem concentrar-se na análise da composição, nos efeitos da dieta artificial sobre as reflectâncias espectrais de cada estádio de *D. saccharalis*, comparando esses resultados com os indivíduos provenientes do ambiente natural e a caracterização das culturas atacadas ou não, no campo.

Destaca-se, por fim, que a exploração desse banco de dados espectrais tem o potencial de aprimorar as práticas de monitoramento e controle biológico de *D. saccharalis*, fortalecendo a integração do Sensoriamento Remoto à proteção de culturas contra pragas.

7. REFERÊNCIAS

Abd El-Ghany NM, Abd El-Aziz SE, Marei SS (2020) A review: application of remote sensing as a promising strategy for insect pests and diseases management. **Environmental Science and Pollution Research** 27(27):33503-33515.

Abdelwahab SI, Taha MME, Mariod AA (2025) Structural characterization: physicochemical properties, thermal stability, and quality characteristics of insect oils. **Insect Oil as a Source of Nutraceuticals**. p. 115-125.

Abreu JAS, Caleffe RRT, et al. (2024) Effects of dietary palm oil on nutritional indices of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) for *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) production. **Acta Scientiarum Agronomy** 46:e63410.

Acharya B, Dodla S, et al. (2025) Characterizing optimum N rate in waterlogged maize (Zea mays L.) with unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing. **Agronomy** 15(2):434.

Almeida TS, Fonseca EL, Fontana DC (2007) Avaliação da influência da largura e posicionamento das bandas espectrais sobre o valor do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil INPE, Brasil, p. 27-33.

Alves LQ, Franco PN, Zanetti WAL, Góes BC (2021) Desempenho da produção da cultura de cana-de-açúcar nos principais estados produtores. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** 15(2):303-317.

Alves RB de O, Tomasiello DB, et al. (2024) Agent-Based Spatial Dynamic Modeling of *Diatraea saccharalis* and the Natural Parasites *Cotesia flavipes* and *Trichogramma galloi* in Sugarcane Crops. **Remote Sensing** 16(15):2693.

Arantes BHT, Martins GD, Carvalho ER, Nogueira LCA (2019) Identificação de ferrugem na soja por meio de imagens de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Geografia Física** 12(3):1003-1016.

Araújo Júnior, JV (2008) **Avaliação de variedades RB (República do Brasil) em relação ao ataque das principais pragas da cana-de-açúcar**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

Araujo Júnior JVDE (2016) **Nutrição mineral de cana-de-açúcar e uso de Metarhizium anisopliae (METSCH) Sorok no manejo de *Diatraea saccharalis* (FABR., 1974)(Lepidoptera: crambidae)**. 81 f. Dissertação (Doutorado em Proteção de Plantas) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

Arboleda B, Vargas G (2019) Efficacy of *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) in reducing *Diatraea tabernella* (Lepidoptera: Crambidae) injury in sugar cane. **Florida Entomologist** 102(3):520-525.

Arruda LB (2015) **Nanotubos óxidos aplicados a resinas compostas fotoativadas**. 137 f. Dissertação (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru.

Assis Gomes J, Oliveira AL (2020) Eficácia para o combate da broca da cana-de-açúcar. **Revista Interface Tecnológica** 17(1):467-478.

Astola Mariscal SZ, Narrea Cango M (2019) Biología y comportamiento de *Cotesia flavipes* Cameron (Braconidae) parasitoide de *Diatraea saccharalis* Fabricius (Crambidae). **Ecología aplicada** 18(1):77-83.

Awad MM (2018) Forest mapping: a comparison between hyperspectral and multispectral images and technologies. **Journal of Forestry Research** 29(5):1395-1405.

Banas AM, Banas K, et al. (2021) Comparing infrared spectroscopic methods for the characterization of *Plasmodium falciparum* infected human erythrocytes. **Communications Chemistry** 4(1):129.

Barbosa BDS, Silva Ferraz G, et al. (2021) Application of RGB images obtained by uav in coffee farming. **Remote Sensing** 13(12):2397.

Barros AC (2021) **Estimativa da produção agrícola por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 179 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia: Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, Botucatu.

Batista AMA, Silva JHB, et al. (2024) Influência da adubação foliar na cultura da cana-de-açúcar no Brejo Paraibano. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente** 17(1):e11596-e11596.

BellottI A (1992) Controle biológico no contexto da agricultura sustentável. Palestra proferida no III Simpósio de Controle Biológico (1992: Águas de Lindóia). **Anais... Jaguariúna: EMBRAPA-CNPDA**, p. 2-5.

Bernardi ADC, Naime JDM, et al. (2014) Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1002959.

Bongomin O, Gilibrays OG, et al. (2020) Exponential disruptive technologies and the required skills of industry 4.0. **Journal of Engineering** 2020(1):4280156.

Bongomin O, Lamo J, et al. (2024) UAV image acquisition and processing for high-throughput phenotyping in agricultural research and breeding programs. **The Plant Phenome Journal** 7(1), p. e20096.

Bordonal R de O, Carvalho JLN, et al. (2018) Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for sustainable development** 38(2):13.

Campos PF, Alves Júnior J, et al. (2014) Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. **Engenharia Agrícola** 34:1139-1149.

Capinera JL (2004) Sugarcane Borer, *Diatraea saccharalis* (Fabricius)(Insecta: Lepidoptera: Pyralidae): EENY217/IN374, 7/2001. **EDIS** 2004(6). https://doi.org/10.32473/edis-in374-2001.

Carmo GJS (2021) **Detecção de podridão mole em alface por *Pectobacterium carotovorum* subsp. carotovorum por algoritmos de aprendizado de máquina a partir de imagens multiespectrais**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais.

Carvalho TR, Cavichioli FA, Nascimento DD, Soares NM (2023) Fitonematoides de importância para a cultura da cana-de-açúcar no brasil. **Revista Interface Tecnológica** 20(2):837-848.

Carvalho VFP (2017) **Qualidade de *Cotesia flavipes* Cameron, 1891 (Hymenoptera: Braconidae) produzida por biofábricas do estado de São Paulo**. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Entomologia Agrícola) - UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabla.

Cattani CEV (2018) **Dinâmica espectro-temporal do trigo e do feijão por meio de dados espectrais multisensor**. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

Chauhan V, Kumar PG, et al. (2021) Chapter-8 Remote Sensing and Reflectance Profiling in Entomology. **Chief Editor Dr RK Naresh** 61:133.

Chaves MM (1973) Tecnologia moderna para agricultura: defensivos vegetais. Instituto de Planejamento Econômico e Social. Instituto d de Planejamento. **Setor de Agricultura - IPEA,** Brasília, 1:136.

Costa AR (2022) **A transferência de tecnologia em controle biológico pelo PROBIO do Instituto Biológico**. Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) – Instituto Biológico, São Paulo.

Costa DP (2013) **Interações biológicas entre *Tetrastichus howardi* (Hymenoptera: eulophidae) e *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: braconidae) no parasitismo de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: crambidae) em cana-de-açúcar**. 82 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

Criado TC, Vicentini AH, et al. (2024) Uso sustentável da Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC) em pavimentos inter-travados de concreto. **Matéria** (29(4):e20240546.

Dantas JIO (2024). **Desempenho vegetativo e produtividade da cana-de-açúcar em função da aplicação de diferentes doses de nitrogênio no brejo paraibano**. Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC - Agronomia) - UFPB - Campus II - Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal da Paraíba, Areia.

Datt B, McVicar TR, et al. (2003) Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 41(6):1246-1259.

Davies K, Harvey ML (2013) Internal morphological analysis for age estimation of blow fly pupae (Diptera: Calliphoridae) in postmortem interval estimation. **Journal of forensic sciences** 58(1):79-84.

Dias HB, Sentelhas PC, Inman-Bamber G, Everingham Y (2021) Sugarcane yield future scenarios in Brazil as projected by the APSIM-Sugar model. **Industrial Crops and Products** 171:113918.

Dias HB (2020) **Sugarcane variety trait modelling: evaluating and improving the APSIM-Sugar model for simulating crop performance under current and future climates across Brazil**. Thesis (Doctor in Science in Agricultural Systems Engineering). USP/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

Dias-Pini NS, Broglio SMF, et al. (2012) Biological characteristics of *Telenomus alecto* and *Trichogramma galloi* reared on eggs of the sugarcane borer *Diatraea flavipennella*. **Revista Brasileira de Entomologia** 56:515-518.

Dörr F (2015) **Efeito do herbicida glifosato sobre o crescimento e produção de metabólitos secundários em *Microcystis aeruginosa* e *Cylindrospermopsis raciborskii***. 104 f. Dissertação (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo.

Eddin AS, Ibrahim SA, Tahergorabi R (2019) Egg quality and safety with an overview of edible coating application for egg preservation. **Food chemistry** 296:29-39.

Esposito M, Crimaldi M, et al. (2021) Drone and sensor technology for sustainable weed management: A review. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture** 8(1):18.

Estrada J, Sánchez H, et al. (2017) Enabling the use of Sentinel-2 and LiDAR data for common agriculture policy funds assignment. **ISPRS International Journal of Geo-Information** 6(8):255.

Farias GFDE (2015) **Conhecimentos geográficos e técnicos na educação agrícola: um estudo sobre o cultivo de milho no CODAI/UFRPE**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Educação Agrícola). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Feng X, He L, et al. (2020) Hyperspectral and multispectral remote sensing image fusion based on endmember spatial information. **Remote Sensing** 12(6):1009.

Ferrer Wurs F (2021) Biological control of agricultural pests in Venezuela: Historical achievements of Servicio Biológico (SERVBIO). **Revista de Ciencias Ambientales** 55(1):327344.

Francisco CN, Ruiz P, et al. (2020) Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. **Revista Brasileira de Geografia Física** 13(1):076-086.

Francois C, Davidowitz G (2020) Genetic color polymorphism of the whitelined sphinx moth larva (Lepidoptera: Sphingidae). **Journal of Insect Science** 20(4):19.

Francois CL (2020) **Morphology and Physiology of Larval Color Variation in the White-Lined Sphinx Moth, *Hyles lineata***. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Arizona in the Graduate College, Arizona.

Freitas FC (2016) **Caracterização e comparação de *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: braconidae) em situação de criação massal utilizando microssatélites e morfologia**. 37 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia: Entomologia Agrícola) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Freitas RR (2008) **Estudo de uma estrutura em pórtico para utilização em um veículo agrícola autônomo**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Universitdade de São Paulo, São Carlos.

Frere B, Suchaud F, et al. (2014) GC-MS analysis of cuticular lipids in recent and older scavenger insect puparia. An approach to estimate the postmortem interval (PMI). **Analytical and Bioanalytical Chemistry** 406(4):1081-1088.

Fullana-Pericàs M, Conesa MA, Gago J, et al (2022) High-throughput phenotyping of a large tomato collection under water deficit: Combining UAVs' remote sensing with conventional leaf-level physiologic and agronomic measurements. **Agricultural Water Management** 260:107283.

Gallan DZ (2019) **Estudo da interação entre a broca da cana-de-açúcar *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) e fungos oportunistas *Colletotrichum falcatum* e *Fusarium verticillioides*.** 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Genética e Melhoramento de Plantas)- Universitdade de São Paulo, Piracicaba.

Gano B, Bhadra S, et al. (2024) Drone-based imaging sensors, techniques, and applications in plant phenotyping for crop breeding: A comprehensive review. **The Plant Phenome Journal** 7(1):e20100.

Gano B, Dembele JSB, et al. (2021) Using UAV borne, multi-spectral imaging for the field phenotyping of shoot biomass, leaf area index and height of West African sorghum varieties under two contrasted water conditions. **Agronomy** 11(5):850.

Godoy FO (2022) **Índices de vegetação na avaliação agronômica da aveia preta (Avena strigosa Screb) irrigada com efluente tratado de abatedouro**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agricultural System Engineering)- Universitdade de São Paulo¸Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

Gonçalves ML (2009) **Métodos de classificação não-supervisionada de imagens de sensoriamento remoto usando mapas auto-organizaveis de Kohonen**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Milanez AYM, Nyko D, et al. (2014) A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **Revista do BNDES** 147-208.

Gonzalez F, Mcfadyen A, Puig E (2018) Advances in unmanned aerial systems and payload technologies for precision agriculture. Em: **Advances in agricultural machinery and technologies**. CRC Press. p. 133-155.

Granemann V, Silva BL (2020) Tecnologia rpa na análise de áreas passíveis de desastres naturais: rpa technology in the analysis of areas natural disasters. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, p. 108-128.

Heinemann P, Prey L, et al. (2025) Enhancing model performance through date fusion in multispectral and RGB image-based field phenotyping of wheat grain yield. **Precision Agriculture** 26:20.

Hernández D (2011) Estudio de algunos aspectos biológicos de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) parasitoide de *Diatraea saccharalis* Fabricius (Lepidoptera: Crambidae). **Entomotropica** 25(2):69-81.

Hoed RM, Ladeira M (2016) Análise de evasão nos cursos superiores de computação: uma abordagem usando análise de sobrevivência e algoritmo apriori. **WWW/INTERNET 2016**, p. 229.

Holler WA, Vasconcellos B, Gemignani B, et al (2022) Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: **Enfoque para estudos da vegetação**. Embrapa Florestas Colombo. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1145351.

Holman AP, Pickett DN, et al. (2024) A nondestructive technique for the sex identification of third instar *Cochliomyia macellaria* larvae. **Journal of Forensic Sciences** 69(6):2075-2081.

Hung MNWB, Moreira Sampaio TV, et al. (2018) Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Ra'e Ga** 43:215-231.

Inácio S (2014) **Principais parasitóides para o controle da *Diatraea saccharallis* na cultura da cana-de-açúcar. Trabalhos** de Conclusão de Curso (Técnologo em Biocombustíveis), Fatec Araçatuba - Prof. Fernando Amaral de Almeida Prado. São Paulo.

Ingram JW (1951) Pests of sugarcane and their control. US Department of Agriculture. In: J.W. Ingram, E.K. Bynum, Ralph Mathes, W.E. Haley And L.J. **Charpentier**. Washington, D.C. Circular 878, p. 38.

Iost Filho FH, Bastos Pazini J, et al. (2022a) Assessment of injury by four major pests in soybean plants using hyperspectral proximal imaging. **Agronomy** 12(7):1516.

Iost Filho FH, Nakai ES, et al. (2020) Comparação de sensores hiperespectrais para análise do comportamento espectral de folhas de soja. **Brazilian Journal of Development** 6(6):33563-33574.

Iost Filho FH, Pazini JB, et al. (2022b) How does the digital transformation of agriculture affect the implementation of Integrated Pest Management? **Frontiers in Sustainable Food Systems** 6:972213.

Jesus I (2019) **Equações de lotka-volterra aplicadas ao controle biológico da broca da cana-de-açúcar**. Dissertação (Dotourado em Engenharia Química)- Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE), Uberaba.

Johansen K, Morton MJ, et al. (2020) Predicting biomass and yield in a tomato phenotyping experiment using UAV imagery and random forest. **Frontiers in Artificial Intelligence** 3:28.

Johari SNAM, Khairunniza-Bejo S, et al. (2022) Identification of bagworm (Metisa plana) instar stages using hyperspectral imaging and machine learning techniques. **Computers and Electronics in Agriculture** 194:106739.

Kamienski C, Biondi GO, et al. (2016) Computaçao urbana: Tecnologias e aplicaçoes para cidades inteligentes. **Minicursos** SBRC, 26p.

Kannan M, Elango K, Kalyanasundaram M, Govindaraju K (2021) Ultra-structural and physico-chemical characterization of eggs and egg hairs (setae) of the new invasive pest, fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) in India: a first report. **Microscopy Research and Technique** 84:1422-1430.

Kingra PK, Majumder D, Singh SP (2016) Application of Remote Sensing and Gis in Agriculture and Natural Resource Management Under Changing Climatic Conditions. **Agricultural Research Journal** 53(3): 295-302.

Ku KB, Mansoor S, et al. (2023) Identification of new cold tolerant Zoysia grass species using high-resolution RGB and multi-spectral imaging. **Scientific Reports** 13:13209.

Lacerda LF (2022) **Potencial de controle de *Spodoptera frugiperda* (JE Smith, 1797)(Lepidoptera: Noctuidae) em milho por *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) e isolinhagem de *Telenomus remus* Nixon, 1937 (Hymenoptera: Scelionidae), isolados ou associados, em laboratório e semi-campo**. 66 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia)- Universitdade de São Paulo, Piracicaba.

Latha T, Bautista K (2020) Preliminary investigation on insect pests of sugarcane in the northern sugar belt region of Belize. **Journal of Entomology and Zoology Studies** 8:1334-1340.

Leda VC (2016) **Modelagem da produtividade de cana-de-açúcar utilizando índices de vegetação**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Energia na Agricultura)- UNESP – Câmpus de Botucatu, Botucatu.

Li L, Mu X, et al. (2022) Ultrahigh-resolution boreal forest canopy mapping: Combining UAV imagery and photogrammetric point clouds in a deep-learning-based approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 107:102686.

Li W, Zheng T, et al. (2021) Classification and detection of insects from field images using deep learning for smart pest management: A systematic review. **Ecological Informatics** 66:101460.

Li X, Xu H, et al. (2017) Using proximal remote sensing in non-invasive phenotyping of invertebrates. **PLoS One** 12(5):e0176392.

Lins ECCC (2009) **Espectroscopia da fluorescência na citricultura**. 116f. Dissertação (Doutorado em Ciências)- Universidade de São Paulo. Instituto de Físcica de São Carlos. São Carlos.

Liu ChangAn LC, Chen ZhongXin CZ, et al. (2019) Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: a review. **Journal of integrative agriculture** 18(3): 506-525.

Liu N, Xing Z, et al. (2020) Analysis of chlorophyll concentration in potato crop by coupling continuous wavelet transform and spectral variable optimization. **Remote Sensing** 12:2826.

Locks CJ (2017) **Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.

Loof A, Huybrechts J, et al. (2010) Sexual differentiation in adult insects: male-specific cuticular yellowing in Schistocerca gregaria as a model for reevaluating some current (neuro) endocrine concepts. **Journal of insect physiology** 56:919-925.

Lopes AB, Sousa BB, et al. (2022) Avaliação tecnológica de quatro cultivares de cana-de-açúcar em função da infestação de *Diatraea saccharalis* em Pedro Afonso, TO-estudo de caso. **Research, Society and Development** 11:e340111335388–e340111335388.

Lourenço RW, Landim PMB (2004) Estudo da variabilidade do" índice de vegetação por diferença normalizada/NDVI" utilizando krigagem indicativa. **Holos environment** 4:38-55.

Lowe A, Harrison N, French AP (2017) Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. **Plant methods** 13(1):80.

Lu J, Cheng D, et al. (2021) Combining plant height, canopy coverage and vegetation index from UAV-based RGB images to estimate leaf nitrogen concentration of summer maize. **Biosystems Engineering** 202:42-54.

Macedo AF (2023) Métodos de monitoramento de pragas na agricultura moderna. Desenvolvimento Rural e Sustentabilidade: energia, produção e novos mercados - Volume 2. 1. ed. **Editora Científica Digital**. p. 107-117.

Mancini SD, de Medeiros GA, et al. (2021) Circular economy and solid waste management: challenges and opportunities in Brazil. **Circular Economy and Sustainability** 1:261-282.

Manzato BL (2023) **Predição de níveis de nitrogênio em mudas de Eucalyptus spp. por meio de espectrorradiometria**. 90 f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Martín RDD, Camacho-Martínez Z, Hernández JRA, Valencia-Caballero L (2019) Proteomics as a new tool in forensic sciences. **Spanish Journal of Legal Medicine** 45(3):114-122.

Medeiros JK (2024) Cana-de-açúcar no Brasil. **Revista de Educação a Distância do IFSC** 1(5):40-54.

Meneses PR, Almeida T (2012) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. CNPq, 276 p. Universidade de Brasília, Brasília.

Merlin BL, Cônsoli FL (2019) Regulation of the larval transcriptome of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) by maternal and other factors of the parasitoid *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae). **Frontiers in Physiology** 10:1106.

Mônaco APA, Carneiro RG, et al. (2009) Reação de espécies de plantas daninhas a *Meloidogyne incognita* raças 1 e 3, a *M. javanica* e *M. paranaensis*. **Nematologia Brasileira** 33(3):235-242.

Monteiro A, Santos S, Gonçalves P (2021) Precision agriculture for crop and livestock farming-Brief review. **Animals** 11(8):2345.

Moore HE, Adam CD, Drijfhout FP (2014) Identifying 1st instar larvae for three forensically important blowfly species using “fingerprint” cuticular hydrocarbon analysis. **Forensic Science International** 240:48-53.

Mora SFE (2024) **Prospecção de bactérias entomopatogênicas para o controle do percevejo-marrom *Euschistus heros* (Fabricius, 1798)**. 55 f. Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) –Instituto Biológico, São Paulo.

Moriyama M (2021) Physiological and Biochemical Mechanisms of Insect Color Change Towards Understanding Molecular Links. In: Pigments, Pigment Cells and Pigment Patterns. **Springer**, p. 451-472.

Nansen C, Coelho Jr A, Vieira JM, Parra JRP (2014) Reflectance-based identification of parasitized host eggs and adult *Trichogramma* specimens. **Journal of Experimental Biology** 217:1187-1192.

Nansen C, Elliott N (2016) Remote sensing and reflectance profiling in entomology. **Annual Review of Entomology** 61:139-158.

Nansen C, Ribeiro LP, Dadour I, Roberts JD (2015) Detection of temporal changes in insect body reflectance in response to killing agents. **PLoS One** 10:e0124866.

Nansen C, Stewart AN, Gutierrez T, et al (2019) Proximal remote sensing to differentiate nonviruliferous and viruliferous insect vectors-proof of concept and importance of input data robustness. **Plant Pathology** 68:746-754.

Nansen C, Strand MR (2018) Proximal remote sensing to non-destructively detect and diagnose physiological responses by host insect larvae to parasitism. **Frontiers in Physiology** 9:1716.

Nascimento AF (2022) **Sensoriamento remoto orbital e suborbital para análise de déficit hídrico em cana-de-açúcar**. 50 f. Trabalho de Conclução do Curso (Engenheiro Agrônomo)- Universidade Federal da Paraíba, Areia.

Novais JJ (2017) **Mapeamento digital de solos da microbacia do Ribeirão Extrema, DF, a partir de imagens multitemporais ASTER e biblioteca espectral**. 193 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade de Brasília, Brasília.

Nunes LS (2023) **Comportamento de predação de Xylocoris sordidus com ovos de *Diatraea saccharalis* e *Corcyra cephalonica* parasitados e não parasitados por *Trichogramma galloi***. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bióloga)- Unesp, Jaboticabal.

Oliveira MHR (2019) **Produção de mudas pré-brotadas de cana-de açúcar sob irrigação localizada**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado)- Instituto Federal Goiano, Ceres.

Oliveira RK (2024) **Avaliação de cultivos por meio de índices de vegetação obtidos por câmera multiespectral**. 131 f. Dissertação (Doutorado em Ciências: Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

Oliveira HN, Glaeser DF, Mota TA, Silva IF (2022) Impact of insecticide application used on sugarcane crop on egg predation in the field. **BioAssay** 16:ba16001–ba16001.

Oliveira MRR, Ribeiro SG, Mas J-F, Teixeira AS (2020) Advances in hyperspectral sensing in agriculture: a review. **Revista Ciência Agronômica** 51:e20207739.

Oliveira NC, Castro AGG, Silva JC, Rebouças GOG (2024) Caixa de cores: produto educacional para o ensino da física da luz e cor, uma introdução a mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física** 46:e20240007.

Ortiz-Herrero L, Uribe B, et al. (2021) Estimation of the post-mortem interval of human skeletal remains using Raman spectroscopy and chemometrics. **Forensic science international** 329:111087.

Ottocento C, Rojas B, et al. (2024) Diet influences resource allocation in chemical defence but not melanin synthesis in an aposematic moth. **Journal of Experimental Biology** 227:jeb245946.

Pechal JL, Moore H, Drijfhout F, Benbow ME (2014) Hydrocarbon profiles throughout adult Calliphoridae aging: A promising tool for forensic entomology. **Forensic Science Internationa**l 245:65-71.

Pereira AJ (2022) **Relação entre índices de vegetação e atributos biofísicos do solo e da planta em vinhedo irrigado**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Irrigação e Drenagem)- Unesp, Botucatu.

Pérez MLl P, Easdale C, et al. (2023) Damage distribution and yield losses caused by the stem borer *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) in Northwestern Argentina. **Sugar Tech** 25(3):610-618

Pérez-Martínez C, Pérez-Cárceles MD, et al. (2017) Quantification of nitrogenous bases, DNA and Collagen type I for the estimation of the postmortem interval in bone remains. **Forensic science international** 281:106-112.

Picciotti U, Valverde-Urrea M, Sefa V, et al (2024) Performance of Artificial Diets for *Zelus renardii* (Hemiptera: Reduviidae) Rearing. **Insects** 15(8):607.

Pickering CL, Hands JR, et al. (2015) Rapid discrimination of maggots utilising ATR-FTIR spectroscopy. **Forensic science international** 249:189-196.

Pinto dos Santos E, Bomfim de Jesus T, et al. (2018) Imagens Sentinel-2A e Espectrorradiometria Aplicada a Estudo de Pastagens Degradadas. **Anuário do Instituto de Geociências** 41:2.

Pinto J, Powell S, et al. (2020) Detection of defoliation injury in peanut with hyperspectral proximal remote sensing. **Remote Sensing** 12:3828.

Pinto JRL (2022) **Peanut plant response to lepidopterous pest defoliation and determination of the economic injury level**. 137 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - UNESP, Jaboticabal.

Pinto NL (2024) **Aprimoramento da liberação de *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) para o controle de *Diatraea sccharalis* (Lipidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar**. 34 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia e Grãos)- Instituto Federal Goiano, Rio Verde.

Pithan PA (2019) **Dados hiperespectrais aplicados na avaliação de videiras da cultivar *Cabernet sauvignon* infectadas com alguns patógenos**. 60 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Pontes DPSA (2022) **Relatos e percepção sobre a introdução de *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)(Hymenoptera: Braconidae) no estado de Alagoas**. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia)–Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

Portela GL, Pádua LEM, et al. (2010) Flutuação populacional de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794)(Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar no município de União-PI. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 5(3):303-307.

Radhika S, Tamura Y, Matsui M (2018) Determination of degree of damage on building roofs due to wind disaster from close range remote sensing images using texture wavelet analysis. **IEEE**, p. 3366-3369.

Ramos GS (2020) **Capacidade de dispersão e parâmetros biológicos inerentes à criação massal de *Telenomus podisi* Ashmead (Hymenoptera: Platygastridae) para o controle de pentatomídeos-praga em soja**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - UNESP, Botucatu.

Ramos NO (2021) **Estimativa e modelagem da biomassa florestal acima do solo a partir do uso do sensoriamento remoto: 20 anos de monitoramento da vegetação**. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Universidade de Brasília, Brasília.

Rauber ER, Bordin F, et al. (2018) Análise bibliográfica sobre as potencialidades da aquisição de imagens multi e hiperespectrais por VANTs no auxílio à inspeção de obras de arte especiais. **Revista Brasileira de Geomática** 6(1):44-61.

Rego CHQ (2024) **Fenotipagem de alto rendimento durante o desenvolvimento de plantas e produção de sementes de soja sob deficiência hídrica**. 141 f. Dissertação (Doutorado em Ciências: Fitotecnia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Reagan TE, Mulcahy MM (2019) Interaction of cultural, biological, and varietal controls for management of stalk borers in Louisiana sugarcane. **Insects** 10(9):305.

Reis EJ (2008) **Educação Agrícola em bases agroecológicas-Uma proposta de programa de qualificação para extensionistas rurais**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Educação Agrícola) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

Rezende GL, Vargas HCM, Moussian B, Cohen E (2016) Composite eggshell matrices: chorionic layers and sub-chorionic cuticular envelopes. In: Extracellular composite matrices in arthropods. **Springer**, p. 325-366

Rhodes MW, Bennie JJ, et al. (2022) Recent advances in the remote sensing of insects. **Biological Reviews** 97(1):343-360.

Rissini ALL, Kawakami J, Genú AM (2015) Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39(6):1703-1713.

Rodrigues VM (2015) **Agrosilício como indutor de resistência: interações entre a cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794)(Lepidoptera: Crambidae) e *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)(Hymenoptera: Braconidae**). 95 f. Dissertação (Doutorado em Proteção de Plantas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

Roel PM, Fiorio PR, et al. (2023) Comparação entre sensor hiperespectral e câmera multiespectral relacionado a diferentes doses de nitrogênio no milho. **Anais (XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Disponível em: https://proceedings.science/p/164169?lang=pt-br.

Roque VHM (2024) **Sistema microcontrolado para monitoramento de índice de vegetação (NDVI) em áreas de pastagem**. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Rosalen DL, Goes M, Pinhal C, Silva I (2017) Caracterização altimétrica através de sensor multiespectral embarcado em aeronave remotamente pilotada. Unesp, Jaboticabal, Brasil. **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta.** p. 679-683.

Rossato Junior JAS (2012) ***Diatraea saccharalis* (Fabr.)(Lepidoptera: Crambidae) e *Mahanarva fimbriolata* (Stal)(Hemiptera: Cercopidae) em cana-de-açúcar: impacto na qualidade da matéria-prima, açúcar e etanol**. 96 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Rudorff CM, Novo EM, Galvão LS, Pereira Filho W (2007) Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica** 37(1):269-280.

Sabino AR (2022) **Efeitos letais e subletais de inseticidas químicos e biológicos sobre *Euscepes postfasciatus* (Fairmaire, 1849)(Coleoptera: Curculionidae) em batata-doce**. 60 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

Salamanca L, Echeverri-Rubiano C, et al. (2023) Divergent life histories between wild and commercially-sourced *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) parasitizing four species of Diatraea (Lepidoptera: Crambidae). **Biological Control** 178:105144.

Sá OR (2010) Biologia da broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*)(Lepidoptera: Crambidae) em dieta artificial. **Ciência et Praxis** 3(5):13–16.

Sandoval SS, Senô KCA (2010) Comportamento e controle da Diatraea saccharalis na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus** 7(1):1–16.

Sanflorian A, Seviriano ER, et al. Eletricidade como tecnologia motora na indústria automotiva: oportunidade ou ameaça para o setor sucroenergético? **Revista Competitividade e Sustentabilidade** 11(2):83–105.

Santesteban L, Di Gennaro S, et al. (2017) High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. **Agricultural Water Management** 183:49–59.

Santos DO (2024) **Influência das métricas de complexidade baseadas em entropia sobre índice de vegetação**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

Santos JM (2024). **Otimização do processo de vacinação por meio de Machine Learning e dispositivos IoT: monitoramento de doses aplicadas e recomendações baseadas em dados**. 73 f. Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Santos EF, Santos MS, Henkes JA (2020) Estudo de caso: *Trichogramma galloi* no manejo de *Diatraea saccharalis* na cultura de *Saccharum officinarum* em Ulianópolis-PA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental** 9:617-634.

Santos LAO, Mihsfeldt LH (2014) Capacidade de Busca e de Parasitismo de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) em Lagartas de *Diatraea saccharalis* (Fabricius)(Lepidoptera: Crambidae). **EntomoBrasilis** 7(2):106-109.

Santos-Cividanes TM, Cividanes FJ, et al. (2022) Silicon induces resistance to *Diatraea saccharalis* in sugarcane and it is compatible with the biological control agent *Cotesia flavipes*. **Journal of Pest Science** 95(2):783-795.

Santos Moreira A, Ramalho JC, et al. (2025) Foliar Application of Sugarcane Molasses Can Alleviate Stressful Condition In Glycine Max (L.) Merr. Crop Under Field Conditions. **ARACÊ** 7:641-660.

Santos RL (2005) **O uso de processamento digital de imagens do sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) na identificação de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros da Bahia**. 195 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia)- Universidade de São Paulo, São Paulo.

Schiavo BNV (2016) **Métodos para estimativa do índice de área foliar em um fragmento de floresta ombrófila mista montana no Estado do Paraná**. 122 f. Dissertação (Mestrado em em Engenharia Florestal)- Universidade Federal do Paraná, Paraná.

Seleghim AR (2020) **Estratégias para o controle da broca peluda, *Hyponeuma taltula* (Schaus, 1904)(Lepidoptera, Erebidae), em cana-de-açúcar**. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Entomologia Agrícola) - Unesp, Jaboticabal.

Shi Y, Thomasson JA, Murray SC, et al (2016) Unmanned aerial vehicles for high-throughput phenotyping and agronomic research. **PloS one** 11(7):e0159781.

Siansi FL (2024) **Emissão de CO2 do solo e indicadores de produtividade e suas relações com características espectrais da cana-de-açúcar sob diferentes épocas de plantio**. 96 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Jaboticabal.

Silva TSS (2020) **Interação entre *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)(Hymenoptera: Braconidae) e *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, 1976 (Rhabditida: Heterorhabditidae) no parasitismo de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1974)(Lepidoptera: Crambidae)**. 50 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

Silva MSO (2020) **Steinernema rarum para o controle de *Sphenophorus levis*, *Hyponeuma taltula* e *Leucothyreus* sp. na cultura da cana-de-açucar e sua compatibilidade com vinhaça**. 60 f. Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio)- Instituto Biológico, São Paulo.

Silva TSS, Santos PS, et al. (2024) Within-host competition between *Cotesia flavipes* and Heterorhabditis bacteriophora in *Diatraea saccharalis*. **BioControl** 69(6):603-610.

Silva AA, Silva FCS, et al. (2024) Spectral indices with different spatial resolutions in recognizing soybean phenology. **Plos one** 19(9):e0305610.

Silva Barros PP, Rosalen DL, et al. (2021a) Monitoramento Fitossanitário Utilizando Sensoriamento Remoto: Avanços e Desafios. **Rev Bras Cartogr** 73(2): 603-610.

Silva JF, Brito CH, et al. (2022) Influência de Dietas e Temperaturas Na Biologia de *Diatraea saccharalis* Fabricius 1794 e *Diatraea flavipennella* Box 1931. **Research, Society and Development** 11(16):e145111637612–e145111637612.

Sishodia RP, Ray RL, Singh SK (2020) Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. **Remote sensing** 12(19):3136.

Smaniotto G, Borges Filho RC, Bernardi D, et al (2019) Biology of *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) strains at different temperatures. **Environmental Entomology** 48(3):649-654.

Soares Filho JN, Perez Pereira DE, Regis Noronha AS (2025) Estimativa do conteúdo de nitrogênio na cana-de-açúcar baseado em índices de vegetação derivados de dados Sentinel-2. **Scientia Agropecuaria** 16(1):61-70.

Soares GF (2020) **Fenotipagem para tolerância à seca e validação de sensores hiperespectrais e de fluorescência em genótipos de trigo**. 135 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia)- Universidade de Brasília, Brasília.

Solis MA, Scheffer SJ, Lewis ML, Rendon P (2021) Identity and host plant of *Diatraea postlineella* Schaus (Lepidoptera: Crambidae), the Guatemalan sugarcane borer. **Proceedings of the Entomological Society of Washington** 123(3):638-651.

Song Z, Zhang B, et al. (2020) Application of lidar remote sensing of insects in agricultural entomology on the Chinese scene. **Journal of Applied Entomology** 144(3):161-169.

Sousa C, Sousa CAF (2014) Fenotipagem de plantas: uma nova abordagem para um velho problema. Brasília, **Embrapa. Agroenergia**. Comunicado técnico, 06. 9p.

souza MRQ (2018) **Estimativa de biomassa de trigo usando imagens de alta resolução espacial a partir de veículo aéreo não tripulado**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Sugiura R, Tsuda S, et al. (2016) Field phenotyping system for the assessment of potato late blight resistance using RGB imagery from an unmanned aerial vehicle. **Biosystems engineering** 148:1-10

Sweet DD, Tirado SB, et al. (2022) Opportunities and challenges in phenotyping row crops using drone-based RGB imaging. **The Plant Phenome Journal** 5(1):e20044.

Tao H, Feng H, et al. (2020) Estimation of crop growth parameters using UAV-based hyperspectral remote sensing data. **Sensors** 20(5):1296.

Tedesco D, Oliveira MF, et al. (2021) Use of remote sensing to characterize the phenological development and to predict sweet potato yield in two growing seasons. **European Journal of Agronomy** 129:126337.

Tefera AT, Banerjee BP, et al. (2022) Estimating early season growth and biomass of field pea for selection of divergent ideotypes using proximal sensing. **Field Crops Research** 277:108407.

Teixeira, RA (2012) **Avaliação espectral de depósitos de fosfatos utilizando imagens ASTER das regiões de Campos Belos e Catalão (GO**). 97 f. Dissertação (Mestrado em em Geociências Aplicadas)-Universidade de Brasília, Brasília.

Tsouros DC, Bibi S, Sarigiannidis PG (2019) A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information** 10(11):349.

Tuan PM (2025) Regional Applications of Drone Data Processing Technology in Vietnamese Coffee Plantations. **Innovation in Science and Technology** 4(1):28-30.

Urach Ferreira PH, Ferreira MC (2023) *Sphenophorus levis* behavior studies: evaluating insect attractiveness or repellency to one insecticide treatment and assessing nocturnal insect activity and location pattern. **Insects** 14(2):205.

Vacari AM, Genovez GS, Laurentis VL, Bortoli SAD (2012) Fonte proteica na criação de *Diatraea saccharalis* e seu reflexo na produção e no controle de qualidade de *Cotesia flavipes*. **Bragantia** 71:355-361.

Vanegas F, Bratanov D, et al. (2018) A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV-based hyperspectral and spatial data. **Sensors** 18(1):260.

Vänninen I (2022) Advances in insect pest and disease monitoring and forecasting in horticulture. **Burleigh Dodds Series in Agricultural Science**, Cambridge, UK, 66p.

Vega FA, Ramirez FC, Saiz MP, Rosua FO (2015) Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. Biosystems **Engineering** 132:19-27.

Veiga A C, Vacari AM, Volpe HX, Laurentis VL, Bortoli SA (2013) Quality control of *Cotesia flavipes* (Cameron)(Hymenoptera: Braconidae) from different Brazilian bio-factories. **Biocontrol Science and Technology** 23(6), 665-673.

VertamattI R (2011) **Assimetria humana no reconhecimento multibiométrico**. 134 f. Dissertação (Doutorado em Ciências)- Universidade de São Paulo, São Paulo.

Vicari MB (2015) **Estimativas de variáveis biofísicas da canola com dados espectrais multisensor**. 148 f. Disesertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Viel SR (2011) **Avaliação da qualidade de produção e de busca pelo hospedeiro de *Cotesia flavipes* (Cameron)(Hymenoptera: Braconidae) em laboratório**. 109 f. Disesertação (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Jaboticabal.

Voss SC, Magni P, Dadour I, Nansen C (2017) Reflectance-based determination of age and species of blowfly puparia. **International Journal of Legal Medicine** 131:263-274.

Wallace L, Hillman S, Reinke K, Hally B (2017) Non-destructive estimation of above-ground surface and near-surface biomass using 3D terrestrial remote sensing techniques. **Methods in Ecology and Evolution** 8(11):1607-1616.

Wang J, Tao J, Dong Z, Zhu J (2024) Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry: An Innovative Tool for Rapid Identification of Hylurgus ligniperda, an Invasive Pest. **Forests** 15(4):729.

Wang Y, Nansen C, Zhang Y (2016) Integrative insect taxonomy based on morphology, mitochondrial DNA, and hyperspectral reflectance profiling. **Zoological Journal of the Linnean Society** 177(2):378-394.

Warren J-A, Ratnasekera TP, Campbell DA, Anderson GS (2017) Spectral signatures of immature *Lucilia sericata* (Meigen)(Diptera: Calliphoridae). **Insects** 8(2):34

Yan X, Hu Y, et al. (2017) Monitoring wetland changes both outside and inside reclamation areas for coastal management of the Northern Liaodong Bay, China. **Wetlands** 37:885-897.

Yang X, Yang R, et al. (2021) Winter wheat SPAD estimation from UAV hyperspectral data using cluster-regression methods. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 105:102618.

Yendrek CR, Tomaz T, Montes CM, et al (2017) High-throughput phenotyping of maize leaf physiological and biochemical traits using hyperspectral reflectance. **Plant physiology** 173(1):614-626.

Yin H, Cao Y, et al. (2021) Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. **Advanced Materials** 33(20):2007764.

Yu N, Li L, et al. (2016) Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment** 187:91-101.

Zafar M (2024) Impact of IPM strategies for control of borer pest and influence on yield and quality of sugarcane crop. **Life Science Journal** 21(7):1-13.

Zhang X, Qu H, et al. (2024) Age determination of *chrysomya megacephala* pupae through reflectance and machine learning analysis. **Insects** 15(3):184.

Zhou X, Zheng H, et al. (2017) Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 130:246-255.

Zhu W, Rezaei EE, et al. (2023) UAV flight height impacts on wheat biomass estimation via machine and deep learning. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing** 16:7471-7485.