



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FITOTECNIA

DETECÇÃO DE INFESTAÇÃO POR *Ceratitis capitata*
(DIPTERA: TEPHRITIDAE) EM FRUTOS DE MANGA
‘PALMER’ UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)

MAIARA COSTA SILVA

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
2025

MAIARA COSTA SILVA

**DETECÇÃO DE INFESTAÇÃO POR *Ceratitis capitata* (DIPTERA:
TEPHRITIDAE) EM FRUTOS DE MANGA ‘PALMER’ UTILIZANDO
ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Martins Veloso
Coorientadora: Dr^a. Daniela Ribeiro da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Leandro Soares Santos

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
2025

S581d

Silva, Maiara Costa.

Detecção de infestação por *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) em frutos de manga ‘Palmer’ utilizando espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) / Maiara Costa Silva, 2025.

46f. ; il.

Orientador (a): Dr.^a Cristiane Martins Veloso.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referência F. 40 – 46

1. *Mangifera indica*. 2. Maturação. 3. Mosca-das-frutas. 4. *Near-Infrared spectroscopy*. I. Veloso, Cristiane Martins. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós – Graduação em Agronomia. III. T.

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB – Campus Vitória da Conquista – BA



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia
Campus de Vitória da Conquista, BA.**

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “DETECÇÃO DE INFESTAÇÃO POR *CERATITIS CAPITATA* (DIPTERA:TEPHRITIDAE) EM FRUTOS DE MANGA ‘PALMER’ UTILIZANDO ESPECTROSCOPIA POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR)”,

AUTOR (A): Maiara Costa Silva

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br **CRISTIANE MARTINS VELOSO**
Data: 06/08/2025 15:56:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cristiane Martins Veloso, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente
gov.br **MARIA APARECIDA CASTELLANI**
Data: 06/08/2025 12:34:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Aparecida Castellani, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente
gov.br **JOSANE CARDIM DE JESUS**
Data: 05/08/2025 17:09:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Josane Cardim de Jesus, D.Sc. (UESB)

Data de realização: 05 de agosto de 2025.

RESUMO

SILVA, M.C. **Detecção de infestação por *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) em frutos de manga ‘Palmer’ utilizando espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).** Vitória da Conquista, BA, UESB, 2025. 46 p. (Dissertação: Mestrado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia)*.

Um grande entrave na produção de manga (*Mangifera indica* L.) é sua suscetibilidade ao ataque da mosca-das-frutas, *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae). Nesse cenário, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR, *Near-Infrared spectroscopy*) surge como uma alternativa não destrutiva para a identificação da presença de infestação. Assume-se a hipótese de que a infestação pela mosca-das-frutas provoca alterações químicas nas frutas, o que possibilita a identificação da presença ou ausência de infestação pelo NIR. Diante disso, objetivou-se avaliar a eficiência do NIR, aliado à quimiometria, na detecção de infestação por *C. capitata* em frutos de manga cv. ‘Palmer’ nos estádios 2 e 3 de maturação. Foi adotado um delineamento em blocos casualizados (DBC), organizado em arranjo fatorial 2×2 , correspondente a duas condições de infestação (frutos não infestados e infestados) e dois estádios de maturação (2 e 3). Foram realizadas 40 repetições, compostas por três frutos cada, totalizando 120 frutos por tratamento e 480 frutos em todo o ensaio. As frutas foram coletadas em quatro municípios do Estado da Bahia para garantir variação de condições climáticas, topográficas e de cultivo. As avaliações físicas e químicas da qualidade das frutas incluíram: cor instrumental ($^{\circ}h$ e croma), teores de clorofilas totais e carotenoides, firmeza da casca e da polpa, sólidos solúveis, pH, acidez titulável e teor de ácido ascórbico. As análises multivariadas (Análise de Componentes Principais, Agrupamento e Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais) foram realizadas para possibilitar a validação quimiométrica. A exposição das frutas à infestação por *C. capitata* afetou o metabolismo desses, principalmente nos atributos de qualidade relacionados à maturação. A infestação reduziu os teores de clorofilas em 18,2%, firmeza de casca em 27,1%, firmeza de polpa em 32,6% e carotenoides, em frutos no terceiro estádio de maturação, que levou à redução dos valores de $^{\circ}h$ e aumento dos valores de croma, indicando uma antecipação da coloração típica de um fruto maduro. Esses atributos foram determinantes para a segregação das diferentes condições de infestação e maturação estabelecidas, podendo ser adotados como foco para a avaliação da infestação em frutos de manga cv. ‘Palmer’ em estudos futuros. Os resultados obtidos demonstraram o potencial de aplicação do NIR, aliado à quimiometria, para detecção rápida e não destrutiva da presença de infestação, representando uma alternativa viável para sistemas de monitoramento em pós-colheita.

Palavras-chave: *Mangifera indica*, maturação, mosca-das-frutas, *Near-Infrared spectroscopy*

***Orientadora:** Prof^ª. Dr^ª. Cristiane Martins Veloso, UESB.

ABSTRACT

SILVA, M.C. **Detection of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) infestation in ‘Palmer’ mango fruits using Near-Infrared spectroscopy (NIR).** Vitória da Conquista, BA, UESB, 2025. 46 p. (Dissertation: Master of Science in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science)*.

A major constraint in mango (*Mangifera indica* L.) production is its susceptibility to fruit fly attack, particularly *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). In this context, near-infrared (NIR) spectroscopy emerges as a non-destructive alternative for detecting infestation. The underlying hypothesis is that fruit fly infestation induces chemical changes in the fruit, enabling the identification of infestation status through NIR. Therefore, this study aimed to evaluate the efficiency of NIR spectroscopy, combined with chemometric tools, in detecting *C. capitata* infestation in ‘Palmer’ mangoes at ripening stages 2 and 3. The experimental design was a randomized block design (RBD) arranged in a 2×2 factorial scheme, consisting of two infestation conditions (non-infested and infested fruits) and two ripening stages (2 and 3). Forty replicates were performed, each consisting of three fruits, totaling 120 fruits per treatment and 480 fruits across the experiment. Fruits were collected from four municipalities in the state of Bahia, Brazil, to account for variability in climatic, topographic, and cultivation conditions. Physical and chemical quality assessments included instrumental color (hue angle and chroma), total chlorophyll and carotenoid contents, peel and pulp firmness, soluble solids, pH, titratable acidity, and ascorbic acid content. Multivariate analyses (Principal Component Analysis, Cluster Analysis, and Partial Least Squares Discriminant Analysis) were carried out to enable chemometric validation. Exposure to *C. capitata* infestation affected fruit metabolism, particularly quality attributes related to ripening. Infestation reduced chlorophyll content by 18.2%, peel firmness by 27.1%, pulp firmness by 32.6%, and carotenoid levels in fruits at ripening stage 3. These changes resulted in lower hue angle and higher chroma values, indicating an earlier development of the typical ripe fruit coloration. These attributes were decisive for the segregation of infestation and ripening conditions, and may serve as reference indicators for future studies on infestation detection in ‘Palmer’ mangoes. The results demonstrated the potential of NIR spectroscopy, combined with chemometrics, as a rapid and non-destructive tool for detecting fruit fly infestation, representing a viable alternative for postharvest monitoring systems.

Keywords: Fruit fly, *Mangifera indica*, Near-Infrared spectroscopy, ripening

***Advisor:** Prof^a. Dr^a. Cristiane Martins Veloso, UESB.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Adultos de <i>Ceratitis capitata</i> (Wiedemann, 1824) e galerias de podridão causadas pelo desenvolvimento das larvas na polpa | 06 |
| Figura 2 – Representação esquemática do arranjo fatorial 2 × 2: duas condições de infestação por <i>Ceratitis capitata</i> (controle e infestado) e dois estádios de maturação do fruto (estádio 2 e estágio 3). | 14 |
| Figura 3 – Distribuição geográfica dos municípios de coleta das mangas (Caraíbas, Ituaçu, Livramento de Nossa Senhora e Bom Jesus da Lapa) e dos municípios de análise (Vitória da Conquista e Itapetinga) | 15 |
| Figura 4 – Gaiolas de acrílico utilizadas para induzir a infestação, contendo frutos de manga cv. ‘Palmer’ e casais de <i>C. capitata</i> | 16 |
| Figura 5 – Pontos de leitura das frutas no NIR | 17 |
| Figura 6 – Espectros de absorvância no NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> , nos estádios 2 e 3 de maturação | 22 |
| Figura 7 – <i>Principal Component Analysis</i> (PCA) por PC1 e PC2 e <i>Principal Component Analysis Biplot</i> (PCA <i>Biplot</i>) dos picos de absorvância no NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> , nos estádios 2 e 3 de maturação | 25 |
| Figura 8 – Dendrograma de agrupamento dos picos de absorvância no NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> , nos estádios 2 e 3 de maturação | 26 |
| Figura 9 – Coeficientes de regressão em função dos comprimentos de onda do modelo <i>Partial least square-discriminant analysis</i> (PLS-DA), construído para classificar amostras de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> , nos estádios 2 e 3 de maturação | 28 |
| Figura 10 – %h, croma, clorofilas totais e carotenoides de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> (I), nos estádios 2 e 3 de maturação | 31 |
| Figura 11 – Firmeza da casca e Firmeza da polpa de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> (I), nos estádios 2 e 3 de maturação | 32 |
| Figura 12 – Sólidos solúveis, pH, acidez e ácido ascórbico (A.A.) de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> (I), nos estádios 2 e 3 de maturação | 34 |
| Figura 13 – Representação em <i>heatmap</i> , <i>Partial least square-discriminant analysis</i> (PLS-DA), <i>Variable Importance in Projection</i> (VIP) scores do modelo PLS-DA e principais parâmetros correlacionados com a firmeza da polpa de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por <i>Ceratitis capitata</i> , nos estádios 2 e 3 de maturação | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Desempenho dos modelos preditivos das amostras de treinamento e validação, com base no modelo PLS-DA | 27 |
| Tabela 2 – Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) de °h, cor, croma, clorofilas totais e carotenoides em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por <i>Ceratitidis capitata</i> (I), em dois estádios de maturação (E)..... | 29 |
| Tabela 3 – Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) da firmeza da casca (FC) e da firmeza da polpa (FP) em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por <i>Ceratitidis capitata</i> (I), em dois estádios de maturação (E)..... | 31 |
| Tabela 4 – Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) de sólidos solúveis (SS), pH, acidez e ácido ascórbico (AA) em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por <i>Ceratitidis capitata</i> (I), em dois estádios de maturação (E)..... | 33 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---|
| AA | ácido ascórbico |
| AG | análise de agrupamento |
| ATR–FTIR | Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier e Reflectância Total Atenuada |
| BA | Bahia |
| <i>C. capitata</i> | <i>Ceratitidis capitata</i> |
| CV | coeficiente de variação |
| cv. | cultivar |
| DBC | delineamento em blocos casualizados |
| DCFI | 2,6-diclorofenol indofenol sódico |
| DMSO | dimetilsulfóxido |
| E | estádios de maturação |
| Embrapa | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FC | firmeza da casca |
| FIR | <i>far infrared</i> |
| FP | firmeza da polpa |
| °h | ângulo Hue |
| I | condições de infestação |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| L:E | Luz:Escuro |
| LABMESC | Laboratório de Métodos e Separações Químicas |
| MAD | mosca/armadilha/dia |
| MIR | <i>middle infrared</i> |
| NIR | <i>near-infrared</i> |
| p/v | peso/volume |
| PC | <i>principal component</i> |
| PCA | <i>principal component analysis</i> |
| PLS-DA | <i>partial least square-discriminant analysis</i> |
| SAS | <i>Statistical Analysis System</i> |
| SNV | variação normal padrão |
| SS | sólidos solúveis |
| UESB | Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia |
| VIP | <i>variable importance in projection</i> |
| vis/NIRS | espectroscopia na região visível e no infravermelho próximo |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 01 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 04 |
| 2.1 Cultivo da manga no Brasil: aspectos socioeconômicos, botânica e manejo | 04 |
| 2.2 Perdas causadas por mosca-das-frutas..... | 05 |
| 2.2.1 Métodos de controle de mosca-das-frutas | 07 |
| 2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR, <i>Near-Infrared Spectroscopy</i>) | 09 |
| 2.3.1 Quimiometria..... | 11 |
| 2.4 Parâmetros de qualidade de frutos de manga | 12 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 14 |
| 3.1 Local e período experimental | 14 |
| 3.2 Delineamento experimental..... | 14 |
| 3.3 Coleta das frutas | 14 |
| 3.4 Criação dos insetos | 16 |
| 3.5 Infestação..... | 16 |
| 3.6 Medidas espectrais na região do infravermelho próximo (NIR)..... | 17 |
| 3.7 Avaliações físico-químicas das frutas de manga | 17 |
| 3.8 Tratamento dos espectros e análises estatísticas | 19 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 22 |
| 4.1 Detecção de infestação nas mangas por infravermelho próximo (NIR)..... | 22 |
| 4.2 Análises Quimiométricas..... | 24 |
| 4.3 Avaliações das propriedades físicas e químicas relacionadas aos atributos de qualidade pós-colheita | 29 |
| 4.3.1 Análises multivariadas das avaliações das propriedades físicas e químicas | 35 |
| 5 CONCLUSÕES | 38 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

1 INTRODUÇÃO

A mangueira (*Mangifera indica* L.) é uma frutífera arbórea, pertencente à família Anacardiaceae. Nativa da Índia, a espécie teve seu cultivo consolidado em diversas regiões tropicais e subtropicais (Lebaka et al., 2021). O Brasil é o sexto maior produtor mundial de manga, responsável por uma produção média anual de 1,2 milhão de toneladas do fruto (Embrapa, 2024). A Bahia destaca-se como a maior produtora de manga no país, com 40,05% da produção nacional (IBGE, 2023).

Além da relevância econômica, seus frutos apresentam um perfil sensorial marcante, sendo um alimento de alto valor nutritivo e funcional, rico em carboidratos, ácidos orgânicos, fibra alimentar, oligoelementos, antioxidantes (ácido ascórbico) e polifenóis (carotenos) (Farina et al., 2020). Diferenças edafoclimáticas entre regiões, a escolha da cultivar e o estágio de maturação no momento da colheita são fatores que influenciam as características físico-químicas da manga, bem como seus atributos sensoriais (Lebaka et al., 2021). Dentre os genótipos cultivados, a cultivar ‘Palmer’ destaca-se por apresentar maior resistência a danos durante a colheita e o transporte, além de elevada qualidade sensorial e atributos nutricionais e funcionais adequados (Modesto et al., 2016).

Um dos principais entraves no cultivo de manga no Brasil é a sua suscetibilidade ao ataque da mosca-das-frutas, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), que dificulta sua comercialização para o mercado externo, em razão das barreiras quarentenárias impostas pelos países importadores, bem como pela inviabilização do consumo devido à oviposição na casca e ao conseqüente desenvolvimento larval na polpa das frutas (Shoba et al., 2024). As moscas-das-frutas adaptam-se a diversas regiões, apresentam elevada polifagia e rápida reprodução, sendo consideradas pragas invasoras em todo o mundo (Dias et al., 2018). No Brasil, a espécie *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) está entre as de maior relevância agrícola, por provocar maiores perdas econômicas, uma vez que está amplamente distribuída no país (Araujo et al., 2022) e possui 117 espécies hospedeiras (Zucchi e Moraes, 2025). As fêmeas de *C. capitata* apresentam preferência por frutos mais maduros e depositam de um a dez ovos por oviposição (Silva et al., 2021).

Infestações induzidas por insetos-praga, como a *C. capitata*, provocam danos mecânicos aos tecidos das frutas, os quais desencadeiam diversas respostas metabólicas. Dentre elas, destacam-se: alterações nos pigmentos das frutas, decorrentes do estresse oxidativo, que induz a degradação de clorofilas e carotenoides, alterando a coloração do

fruto (Othmen et al., 2022); aumento da produção de etileno, que induz a senescência das frutas e reduz a firmeza da casca e da polpa, também afetadas pela alimentação larval (Sakin, 2022); e intensificação da degradação da parede celular, que aumenta o teor de açúcares livres e, conseqüentemente, o teor de sólidos solúveis (Littler et al., 2022).

Existem práticas de controle de pragas realizadas para evitar prejuízos econômicos aos pomares. As estratégias mais comuns para mosca-das-frutas são: controle cultural, biológico, químico, autocida e resistência de plantas (Raga e Souza-Filho, 2021). Ainda assim, a infestação por mosca-das-frutas permanece como um problema recorrente e preocupante. Na exportação de frutos de manga para os mercados americano e japonês, diversos protocolos devem ser seguidos, abrangendo desde o monitoramento populacional no campo, para obtenção dos índices MAD (mosca/armadilha/dia) e definição da necessidade de pulverização em cobertura total, até métodos de quarentena pós-colheita, como fumigação, radiação, imersão em inseticida, tratamentos a frio, a quente e hidrotérmicos (Mwando et al., 2021). Esses métodos têm ação inseticida e efeito fungicida; contudo, provocam alterações nos atributos sensoriais das frutas.

Durante a etapa de inspeção, a detecção de oviposição ou da presença de larvas da mosca-das-frutas em um lote para exportação torna-o totalmente inviável, acarretando sua devolução ainda no porto de exportação. As frutas com evidências de oviposição são abertos para exposição da polpa, a fim de se observar a presença ou ausência de larvas, o que leva a perdas e desperdício das frutas (Shoba et al., 2024).

Embora existam métodos para a identificação da infestação por mosca-das-frutas, estes são destrutivos, evidenciando uma lacuna que demanda estudos mais aprofundados para o desenvolvimento de uma tecnologia não destrutiva de monitoramento no contexto pós-colheita, com o objetivo de reduzir o desperdício e oferecer maior rapidez e confiabilidade. Nesse cenário, a *Near-Infrared spectroscopy* (NIR, espectroscopia por infravermelho próximo) surge como uma alternativa para a identificação de infestação por insetos-praga em frutos de manga (Munawar et al., 2019). A espectroscopia NIR gera o espectro pela diferença de energia emitida pelo aparelho e a energia refletida pela amostra. Visto que a maioria dos alimentos apresentam ligações O–H, N–H e C–H, a tecnologia fornece informações acerca da composição química e estrutural das amostras avaliadas. Dessa forma, água, proteínas, ácidos orgânicos, amido, lipídeos, dentre outros, podem ser identificados e quantificados (O’Brien et al., 2024). Os espectômetros NIR permitem a leitura rápida de múltiplos componentes simultaneamente. Além disso, a amostra não necessita de pré-preparo, não demanda o uso de reagentes químicos e não

provoca alterações nas características das frutas durante o processo (Mancini et al., 2023).

No entanto, para viabilizar o uso dessa técnica, é necessária a associação entre dados químicos e estatísticos, ou seja, o uso de métodos quimiométricos e análises multivariadas (Mishra e Passos, 2021). A quimiometria possibilita a extração do máximo de informações químicas essenciais, eliminando a interferência de fatores irrelevantes por meio da análise estatística multivariada. Dessa forma, a estatística multivariada permite classificar e discriminar os dados em grupos, além de associar variáveis categóricas (Ferreira et al., 2019).

Considerando a demanda por métodos não destrutivos para detectar a infestação por mosca-das-frutas (Diptera: Tephritidae), torna-se necessário explorar o potencial dessas técnicas para identificar alterações de atributos de qualidade pós-colheita em frutos de manga cv. ‘Palmer’ (*Mangifera indica* L.) causadas pela presença da infestação. Desse modo, objetiva-se avaliar a capacidade e eficiência da espectroscopia NIR, aliada à quimiometria, na detecção de infestação por *C. capitata*, por meio da mensuração de atributos de qualidade pós-colheita de frutos de manga cv. ‘Palmer’, nos estádios 2 e 3 de maturação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultivo da manga no Brasil: aspectos socioeconômicos, botânica e manejo

A mangueira (*Mangifera indica* L.) é uma árvore frutífera pertencente à família Anacardiaceae. Nativa da Índia, a espécie teve seu cultivo consolidado em diversas regiões tropicais e subtropicais (Lebaka et al., 2021). O Brasil é o sexto maior produtor mundial de manga, com uma produção superior a 1,2 milhão de toneladas da fruta em 2023 (Embrapa, 2024). No mesmo ano, foram exportadas 266 mil toneladas, com faturamento de US\$ 315 milhões, sendo uma cultura de elevado valor socioeconômico para o país. O Nordeste ocupa posição de destaque no cenário nacional, com geração de mais de 11,5 mil empregos (IBGE, 2023).

Perene, de crescimento rápido e elevada longevidade, a mangueira destaca-se entre as frutíferas, apresentando copa ampla, com projeção quase circular. Seus frutos são carnosos, do tipo drupa, e cada cultivar apresenta sabor, formato e tamanho característicos (Bhadauria e Tripathi, 2023). Por apresentar uma mescla entre o adocicado e a acidez, o fruto possui sabor e aroma marcantes, além de ser um alimento de alto valor nutritivo e funcional, rico em carboidratos, ácidos orgânicos, fibra alimentar, oligoelementos, antioxidantes (como o ácido ascórbico) e polifenóis (como os carotenos) (Farina et al., 2020).

Vários fatores influenciam a aparência, qualidade e sabor da manga, dentre os quais temperatura é o fator ambiental de maior relevância. A diferença climática entre regiões e a cultivar também influenciam as características físicas e químicas e os atributos sensoriais da manga, os quais são importantes para a aceitação das frutas no mercado consumidor, que tende a preferir frutos com baixa acidez, alto teor de sólidos solúveis e baixo teor de fibras (Farina et al., 2020). Temperaturas elevadas geram efeitos positivos no crescimento e maturação das frutas, além de influenciar a síntese de metabólitos secundários, como os ácidos fenólicos. Além da temperatura, outros fatores ambientais, como chuva e umidade, podem influenciar no crescimento das árvores, a floração, o desenvolvimento, bem como a cor e o tamanho das frutas, influenciando diretamente a renda do produtor (Thao et al., 2024).

Da mesma forma, a escolha da cultivar influencia as características de qualidade das frutas e, também, no escoamento da produção. Para atender ao mercado externo, as principais cultivares plantadas no Brasil são: ‘Tommy Atkins’, ‘Palmer’, ‘Kent’, ‘Keitt’ e ‘Haden’. Para o mercado interno, as principais cultivares são: ‘Palmer’, ‘Rosa’ e

‘Espada’. A cultivar ‘Tommy’ está entre as mais resistentes, por possuir uma polpa mais firme e consistente, o que facilita sua exportação. Contudo, a cultivar ‘Palmer’ vem ganhando espaço no mercado internacional e nas indústrias de processamento. As cultivares ‘Rosa’ e ‘Espada’ possuem produtividade inferior em relação às demais, sendo mais utilizadas como porta-enxertos (Liu et al., 2024).

As frutas da cultivar ‘Palmer’ são adequadas tanto para o consumo *in natura* quanto para a industrialização alimentícia, destinada à produção de sucos, polpas, néctares e doces. Isso se deve ao fato de apresentarem firmeza de polpa superior às outras variedades e altos valores de rendimento de polpa. Quanto à composição química, destaca-se a elevada concentração de antioxidantes, sólidos solúveis, flavonoides, polifenóis e vitamina C, bem como o baixo teor de fibras. Por serem mais resistentes aos danos de colheita e transporte, além de atributos sensoriais, nutricionais e funcionais benéficos à saúde humana, as mangas da cultivar ‘Palmer’ são preferíveis para comercialização. É uma cultivar tardia, com capacidade de conservação de até 28 dias, sob refrigeração a 12,8 °C e em atmosfera controlada, com 1 a 10% de oxigênio, o que possibilita sua exportação (Modesto et al., 2016).

No entanto, com a expansão do seu cultivo, também surgiram os problemas fitossanitários. A manga ‘Palmer’ é suscetível ao ataque da mosca-das-frutas (Diptera: Tephritidae), o que acarreta prejuízos econômicos decorrentes da depreciação e inviabilidade de comercialização das frutas nos mercados interno e externo, limitando a expansão do mercado brasileiro da manga (Feitosa et al., 2008; Souza e Lima, 2023).

2.2 Perdas causadas por moscas-das-frutas

O Brasil, apesar de se destacar no setor da mangicultura global, enfrenta problemas fitossanitários causados, principalmente, por insetos-praga. As moscas-das-frutas pertencem à Ordem Diptera e à família Tephritidae (Feitosa et al., 2008) e estão entre as principais pragas de importância econômica mundial, pois se adaptam a diversas regiões, apresentando elevada polifagia e rápida reprodução. A infestação por esses insetos-praga reduz o lucro dos produtores, devido ao aumento dos custos com controle, além de limitar a exportação da fruta *in natura* em razão das barreiras fitossanitárias e das restrições quarentenárias adotadas pelos países importadores (Dias et al., 2018). Existem diversas pesquisas que associam os índices de infestação à região, à disponibilidade de hospedeiros e aos fatores ambientais (Sá et al., 2008; Dias et al., 2018; Araujo et al., 2022).

O Brasil é um dos países com maior diversidade de espécies de mosca-das-frutas, sendo a espécie *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Figura 1A) a de maior relevância agrícola, por provocar maiores perdas econômicas, uma vez que está amplamente distribuída no país e possui mais de um tipo de hospedeiro (Araujo et al., 2022). Apesar da espécie apresentar preferência por plantas exóticas, também ataca plantas nativas, sendo encontrada em 117 espécies hospedeiras (Zucchi e Moraes, 2025). A *C. capitata* foi introduzida no Brasil em 1901 e, atualmente, já foi detectada em 22 dos 26 estados brasileiros, incluindo o Distrito Federal. O ataque desses insetos causa danos diretos às frutas, devido à deposição de ovos nas cascas e ao desenvolvimento de larvas na polpa, o que resulta na formação de galerias de podridão (Figura 1B) e torna as frutas inviáveis para consumo (Silva et al., 2021).

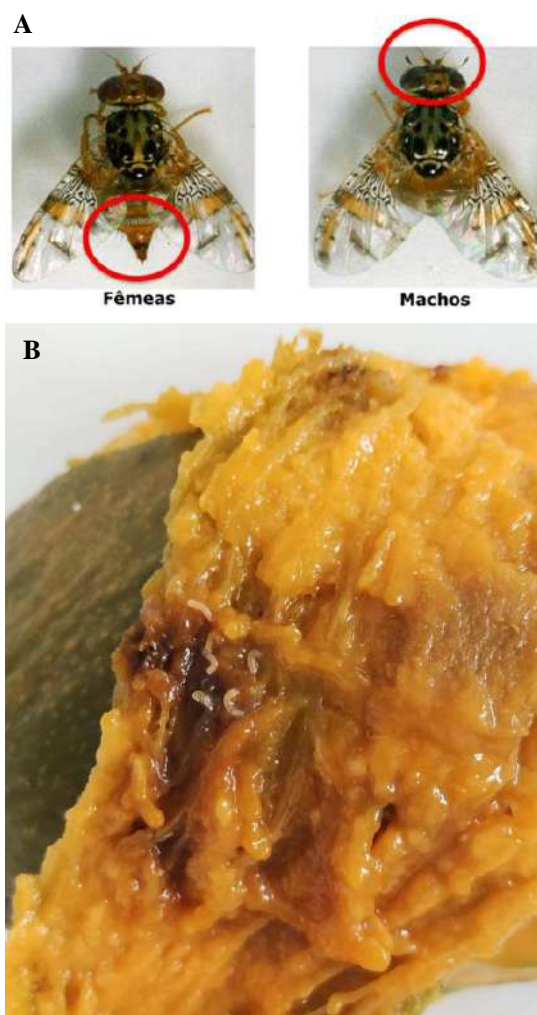


Figura 1. (A) Adultos de *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Pimentel, 2010) e (B) Galerias de podridão causadas pelo desenvolvimento das larvas na polpa.

As fêmeas de *C. capitata* apresentam preferência por frutos mais maduros e depositam de um a dez ovos por oviposição. Inicialmente, a fêmea procura o local mais

adequado para ovipositar, por meio do toque no fruto com a parte anterior da cabeça, o aparelho bucal e o ovipositor. Em seguida, insere o acúleo na polpa do fruto, podendo ocorrer a postura de ovos ou não. Por fim, arrasta o acúleo sobre a superfície do fruto, liberando um feromônio marcador do hospedeiro (Silva et al., 2021).

O ataque e a alimentação larval na polpa das frutas provocam alterações nos parâmetros físicos e químicos, possibilitando a identificação da presença de infestação. Sakin (2022) observou que o ataque larval causado pelas moscas-das-frutas em frutos de azeitona resultou na perda de propriedades físicas, como peso e firmeza. Saranwong et al. (2010) observaram que a presença de larvas de mosca-das-frutas em frutos de manga aumenta o teor de proteína e gordura na polpa de frutos infestados, devido à composição dos tecidos larvais, os quais apresentam elevada quantidade de proteínas e gorduras, que se misturam à polpa. Além disso, foram observadas mudanças no teor de água, sendo que frutos com larvas apresentaram menor teor de umidade em comparação à polpa das frutas não infestadas, em razão do consumo da umidade disponível durante o desenvolvimento das larvas.

Alterações na textura de frutos de manga foram observadas por Grechi et al. (2021) ao avaliarem os efeitos de níveis de infestação de mosca-das-frutas na firmeza das frutas, a qual diminui com o avanço da infestação, resultando na degradação enzimática da estrutura dos tecidos da casca e da polpa, visto que as fêmeas adultas ovipositam na casca e as larvas alimentam-se da polpa.

2.2.1 Métodos de controle de mosca-das-frutas

A infestação por mosca-das-frutas, gera uma limitação ao acesso a mercados internacionais mais lucrativos, em função das restrições de quarentena (Mwando et al., 2021). Apesar do emprego de diferentes métodos de controle, as larvas e pupas de moscas-das-frutas são de difícil manejo, visto que larvas de terceiro ínstar deixam as frutas em decomposição e caem no solo, onde se transformam em pupas, dificultando ainda mais o controle da praga (Dias et al., 2018). Além disso, facilitam a entrada de pragas secundárias e patógenos (Feitosa et al., 2008).

Existem práticas de controle de pragas adotadas a fim de evitar prejuízos econômicos aos pomares. As estratégias mais comuns para o manejo de mosca-das-frutas são: controle cultural, biológico, químico, autocida e resistência de plantas (Raga e Souza-Filho, 2021). O controle cultural é realizado por meio de modificações no ambiente, com o propósito de reduzir a presença dos insetos indesejáveis no local. Isso pode ser realizado

através da limpeza do pomar e da área ao redor, como a retirada e destruição das frutas caídas e a antecipação da colheita, diminuindo a exposição das frutas ao ataque dos insetos adultos. O controle biológico é realizado por meio da utilização de inimigos naturais, como parasitoides, fungos e nematóides entomopatogênicos. Os parasitoides agem sobre os ovos, larvas e pupas no solo, e os outros agem no controle de pré-pupas e pupas. (Gotti et al., 2019).

O controle químico, por sua vez, é realizado mediante o uso de produtos fitossanitários que atuam sobre os insetos adultos, por contato ou ingestão. Essa estratégia é realizada por meio de iscas tóxicas contendo um atrativo alimentar e um agente letal (molécula inseticida com amplo espectro e ação sistêmica), ou por pulverização em cobertura total. O uso inadequado dos inseticidas pode resultar na presença de resíduos químicos nos alimentos em níveis superiores aos limites permitidos e por isso, esses produtos passaram a ser retirados do mercado, em razão da instabilidade na segurança dos alimentos e da necessidade de adequação às exigências do mercado consumidor. Além disso, alguns dos países importadores de alimentos têm imposto cada vez mais barreiras fitossanitárias em relação ao uso de determinados princípios ativos (Arioli et al., 2018; Dias et al., 2018; Ourique et al., 2022). Há técnicas alternativas para a substituição de inseticidas sintéticos, como a aplicação de filmes que funcionam como barreiras físicas. Contudo, essas técnicas não podem interferir nas características físicas, químicas e nos parâmetros nutricionais e sensoriais das frutas (Ourique et al., 2022).

Para determinar a inexistência de pragas durante a comercialização para mercados externos, na etapa de inspeção é avaliado um lote com o objetivo de atestar a ausência de infestação por mosca-das-frutas. O responsável pelo recebimento e avaliação do lote realiza a amostragem das frutas, dando preferência àquelas com amolecimento, manchas ou outros danos que remetem à infestação por mosca-das-frutas. As frutas com evidência de infestação são cortadas para exposição da polpa, a fim de se observar a presença ou ausência de larvas vivas (Shoba et al., 2024). A detecção de infestação, seja pela presença de ovos ou de larvas de mosca-das-frutas, inviabiliza todo o lote, às custas do exportador, acarretando sua devolução ainda dentro do *packing house* ou porto de exportação, podendo inclusive resultar em proibição das próximas remessas de exportação (Mwando et al., 2021).

Na sequência, as frutas são lavadas, classificadas e passam por tratamento, com o objetivo de prevenir e impedir a disseminação de *C. capitata* (Shoba et al., 2024). Fumigação, radiação, imersão em inseticida, tratamentos a frio, a quente e hidrotérmicos

são os métodos de quarentena pós-colheita mais utilizados (Mwando et al., 2021). Esses métodos apresentam ação inseticida e efeito fungicida; contudo, provocam alterações nos atributos sensoriais das frutas.

Ainda assim, a infestação por mosca-das-frutas permanece como um problema recorrente e preocupante. As metodologias para identificar a presença de infestação por mosca-das-frutas são, em geral, de caráter destrutivo, o que inviabiliza as frutas para a comercialização. Portanto, faz-se necessária a busca por técnicas não destrutivas eficazes na identificação de infestação, como a espectroscopia NIR (Tassembédo et al., 2024).

2.3 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR, *Near-Infrared Spectroscopy*)

A técnica espectrofotométrica consiste no estudo da interação entre determinadas formas de energia, como radiação, ondas acústicas e feixes de partículas, e a matéria. Dessa forma, avalia-se a interação entre a energia e as espécies atômicas e moleculares (Munawar et al., 2024).

A espectroscopia NIR envolve o comprimento de onda da região de 750-2500 nm, podendo ser avaliada por meio de medidas de absorção e reflectância. O Japão, no final da década de 1980, foi pioneiro na aplicação comercial da espectroscopia NIR para avaliação da qualidade pós-colheita, com foco inicial no teor de sólidos solúveis. A partir dessa iniciativa, outros países começaram a viabilizar estudos nesse segmento, além de surgirem novos mercados para os equipamentos que operam nessa faixa de comprimento de onda (Walsh et al., 2020).

A espectroscopia NIR apresenta bandas largas, harmônicas ou combinações de bandas, menos intensas e mais sobrepostas, em relação ao *Middle Infrared* (MIR, infravermelho médio) e ao *Far Infrared* (FIR, infravermelho distante), que se relacionam com as combinações das ligações que contêm o átomo de hidrogênio. Essas informações são obtidas através dos espectros de absorção, emissão e reflexão no infravermelho, formados pelas variações de energia. Com base nesses dados, podem ser aplicados modelos de correlação entre as intensidades de absorção em determinados comprimentos de onda e os atributos de qualidade a serem analisados (Skoog et al., 2002). Dessa forma, é possível gerar o espectro pela diferença entre a energia emitida pelo aparelho e a energia refletida pela amostra, visto que a maioria dos alimentos possui ligações O–H, N–H e C–H, fornecendo informações estruturais provenientes da transição entre dois ou mais níveis de energia. Portanto, água, proteínas, ácidos orgânicos, amido, lipídeos, entre outros, podem ser identificados e determinados de forma quantitativa (Silva, 2021).

Os espectrômetros NIR permitem a leitura rápida de múltiplos componentes simultaneamente. No setor da pós-colheita, essa tecnologia pode ser aplicada em todas as etapas da cadeia de produção. Outras vantagens incluem o fato de a amostra não necessitar de pré-preparo, tratar-se de uma técnica não destrutiva, não utilizar reagentes químicos e não causar alterações nas qualidades das frutas durante o processo (Silva, 2021; Mancini et al., 2023).

O método espectrofotométrico necessita de calibração, sendo necessários ajustes de correção ou atualização conforme o uso e o que se deseja avaliar, a fim de garantir maior precisão e exatidão dos dados (Posom et al., 2020; Walsh et al., 2020). Durante a calibração, é necessário o uso de diversas amostras do material escolhido, cujas reflectâncias devem ser medidas em mais de um ponto. A partir dessas medições, são realizadas análises estatísticas que correlacionam os dados de reflectância com o objetivo de análise. Por fim, o modelo é validado e pode ser utilizado em diversas amostras (Raghavendra et al., 2021).

Considerando as características deste método, a técnica de infravermelho próximo tem sido amplamente utilizada na avaliação de atributos de qualidade pós-colheita. Posom et al. (2020) utilizaram um modelo portátil de espectroscopia NIR em ameixas para estimar o teor de sólidos solúveis, acidez titulável e pH das frutas sob diferentes condições de temperatura. Em diferentes cultivares de morango, Mancini et al. (2023) detectaram os teores de sólidos solúveis, acidez, vitamina C, antocianina e ácido fenólico com uso da espectroscopia NIR. Em manga, destacam-se os estudos de Munawar et al. (2019), que avaliaram atributos de qualidade de quatro cultivares ('Kweni', 'Cengkir', 'Palmer' e 'Kent') avaliando a vitamina C, teor de sólidos solúveis e acidez total, com dados espectrais de infravermelho próximo.

A técnica de espectroscopia também tem sido aplicada à detecção de algumas espécies de dípteros. Fischnaller et al. (2012) utilizaram a espectroscopia NIR para discriminar espécimes vivos de *Drosophila obscura* (Fallén, 1823) e *D. Subobscura* (Collin, 1936) (Drosophilidae). Saranwong et al. (2010) investigaram o potencial da espectroscopia NIR para a detecção de ovos e larvas de *Bactrocera dorsalis* (Hendel) em frutos de manga cv. 'Nam Dok Mai'. Esses estudos demonstram que a aplicação da técnica tem ganhado destaque na área de detecção de insetos. Contudo, para uma compreensão completa dos dados obtidos, faz-se necessária a associação entre dados estatísticos e químicos, como o uso da estatística multivariada, que constitui uma ferramenta dos métodos quimiométricos (Mishra e Passos, 2021).

2.3.1 Quimiometria

A quimiometria tem o objetivo de otimizar as diversas variáveis e informações complexas e correlacionadas, distribuídas ao longo de um espectro, extraindo o máximo de informações químicas essenciais e eliminando a interferência de fatores irrelevantes, por meio da análise estatística multivariada (Pereira, 2017; Ferreira et al., 2019). Dessa forma, a estatística multivariada apresenta a possibilidade de construir índices que quantifiquem as propriedades da amostra, classificar e discriminar os dados em grupos, associar variáveis categóricas, identificar possíveis relações de dependência, e criar testes de hipóteses para comparação ou validação de métodos (Mingoti, 2005).

Diversos métodos espectroscópicos, como a espectroscopia NIR, imagens hiperespectrais no visível e infravermelho próximo (*vis/NIRS*) e a espectroscopia com transformada de Fourier no infravermelho com reflexão total atenuada (*ATR-FTIR*), podem fazer uso da quimiometria para analisar os dados espectrais. Para as análises com espectroscopia NIR, essas metodologias envolvem as etapas de preparação das amostras, obtenção dos espectros no aparelho, processamento e tratamento dos espectros para obtenção de dados relevantes e realização da análise multivariada para identificação e correlação entre as variáveis (Dong et al., 2025).

Os espectros gerados pelo espectrofotômetro apresentam várias bandas de absorção, das quais muitas não são relevantes para a construção de um modelo de calibração. Inicialmente, deve ser feito o pré-processamento para correção das unidades de dados que estiverem diferentes. Em seguida, são realizadas as análises multivariadas, otimizando os modelos de calibração por meio de métodos qualitativos de classificação e reconhecimento de padrões, e de métodos quantitativos, como a regressão. Os métodos qualitativos ainda se dividem em métodos de aprendizado supervisionado e não supervisionado (Silva, 2021).

A *Principal Component Analysis* (PCA, Análise de Componentes Principais) é um método não supervisionado cujo objetivo é explicar a estrutura de variância e covariância de um conjunto de dados, por meio da redução da dimensionalidade dos dados e da verificação de dispersão dos mesmos (Mingoti, 2005; Silva, 2021).

A PCA atua reduzindo a complexidade do conjunto de dados e permitindo transformação em um conjunto menor, por meio de combinações lineares das variáveis originais, por variância ou correlação. Essas combinações lineares são os *Principal Component* (PC, Componentes Principais), que contêm a máxima variação dos dados

originais e não são correlacionados entre si. Além de correlacionar os dados, a PCA permite identificar variáveis importantes e descartar aquelas com pouca distribuição, possibilitando o uso de um número reduzido de variáveis, com perda mínima de informações (Silva, 2021).

A regressão por *Partial Least Squares* (PLS, mínimos quadrados parciais) relaciona variáveis de resposta com variáveis independentes. Esse método tem como objetivo encontrar uma relação linear entre as projeções dos dados espectrais e as propriedades físicas ou químicas, sendo utilizado quando o número de variáveis pode ser maior que o de observações e quando essas variáveis estiverem muito correlacionadas. Uma das vias de realização da PLS é a *Partial Least Squares Discriminant Analysis* (PLS-DA, Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais), que objetiva a construção de um modelo discriminatório, visando reduzir o erro de previsão, por meio da categorização e eleição de marcadores (Silva, 2021).

Os modelos de calibração precisam ser criados para designar um valor de referência frente ao modelo quantitativo. Ao analisar frutos, é importante que seja criada uma variedade de condições ambientais, climáticas e de manejo, para que o modelo tenha boas predições. Dessa forma, o processo de calibração visa minimizar o máximo possível de erros, por meio de treinamento que relaciona o resultado espectral com a concentração da substância. O modelo é validado para testar sua capacidade de avaliar amostras distintas, verificando sua precisão e robustez (Ali et al., 2025).

2.4 Efeito da infestação nos parâmetros de qualidade de frutos de manga

A manga é um fruto com padrão de respiração climatérico, que continua a passar pela maturação após a colheita, mantendo o metabolismo fisiológico e bioquímico ativados (Liu et al., 2022). A escala Protrade (1992) traz os estádios de maturação das frutas de manga de 1 a 5, padronizados por tamanho, peso e coloração, sendo o estágio 2 o ponto ideal de colheita para comercialização nos mercados interno e externo. Essa escala tem como objetivo garantir os padrões específicos de qualidade das frutas até o consumidor final.

Durante o processo de maturação, acontece um pico climatérico, com aumento repentino na síntese de etileno e elevação da respiração. Nesse período, o sabor, aos nutrientes e as substâncias ativas passam por processos fisiológicos, desencadeados pela utilização e conversão de substratos respiratórios, formação de intermediários energéticos e regulação da biomassa (Goyal et al., 2023). Ao longo do amadurecimento, ocorre o

aumento de sólidos solúveis totais, do pH, da relação açúcar/ácido e dos carotenoides, bem como a diminuição da acidez, da vitamina C e do amido. A produção de açúcares, a redução da acidez e a biossíntese de compostos voláteis responsáveis pelo sabor acontecem de forma gradual com o avanço da maturação (Zhou et al., 2025).

A infestação por mosca-das-frutas gera alterações na estrutura interna das frutas e nas propriedades bioquímicas no local da oviposição, expandindo-se para o restante do fruto conforme o desenvolvimento larval, o que acelera o processo de amadurecimento dos tecidos (Shoba et al., 2024).

A coloração é um indicador químico inicial para a determinação da maturidade, sendo os principais pigmentos relacionados a esse processo as clorofilas e os carotenoides. Durante a infestação, os danos mecânicos decorrentes da oviposição aceleram as mudanças fisiológicas locais, resultando na degradação das clorofilas e na hidrólise dos constituintes proteicos e lipídicos das membranas. Com isso, os pigmentos carotenoides tornam-se mais visíveis, tendo seu teor aumentado conforme o avanço da infestação (Othmen et al., 2022; Wang et al., 2023).

No estágio 2 de maturação, a manga apresenta elevada quantidade de ácidos, os quais conferem sabor azedo. Os ácidos orgânicos mais presentes nos tecidos vegetais são: cítrico, málico, succínico e oxálico. A partir do terceiro estágio, esses ácidos têm suas concentrações reduzidas de duas formas: pela utilização nos processos respiratórios (como substratos para fornecimento de carbono e produção de energia) ou pela transformação em açúcares. Dessa forma, a manga passa a ter um sabor mais adocicado, devido à junção dos açúcares redutores e do ácido málico (Lebaka et al., 2021). A infestação intensifica esse processo por meio do aumento da taxa respiratória e do consumo de ácidos (Cheng et al., 2024).

A infestação, também, altera os processos que envolvem o amido, o principal carboidrato presente na manga verde é o amido, que funciona como material de reserva energética e estrutural. Durante o amadurecimento, o amido é degradado em açúcares mais simples, como sacarose, glicose e frutose, os quais são importantes para garantir a doçura das frutas. A infestação gera um estímulo do metabolismo ao redor da oviposição e das larvas, aumentando a atividade de enzimas que degradam o amido em açúcares solúveis, como a amilase. Dentre os polissacarídeos estruturais presentes nas frutas, como celulose, pectina e hemicelulose, as pectinas são as mais afetadas pela infestação, sendo hidrolisadas e solubilizadas, o que ocasiona o amolecimento dos tecidos (Liu et al., 2022; Sakin, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e período experimental

O experimento foi conduzido nos Laboratórios de Química III e de Mosca-das-Frutas, ambos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), *campus* de Vitória da Conquista, BA, e no Laboratório de Métodos de Separações Químicas (LABMESC), da UESB, *campus* de Itapetinga, BA, durante o período compreendido entre abril e maio de 2025.

3.2 Delineamento experimental

Foi adotado um delineamento em blocos casualizados (DBC), arranjado em esquema fatorial 2×2 , correspondente a duas condições de infestação: fruto não infestado (controle) e fruto infestado; e dois estádios de maturação das frutas: estádios 2 e 3 (Figura 2). Foram realizadas 40 repetições, sendo cada uma composta por três frutos, totalizando 120 frutos por tratamento e 480 frutos em todo o ensaio.

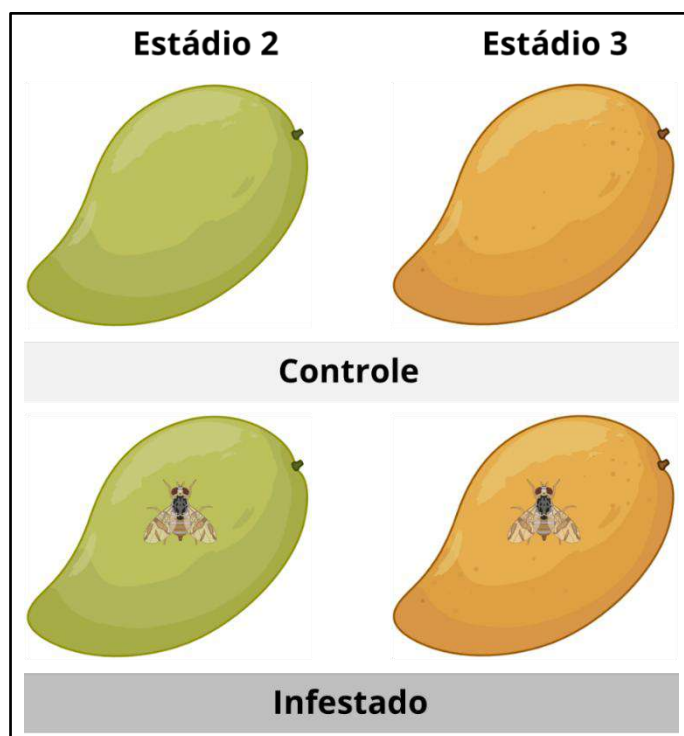


Figura 2. Representação esquemática do arranjo fatorial 2×2 : duas condições de infestação por *Ceratitidis capitata* (controle e infestado) e dois estádios de maturação do fruto (estádios 2 e 3).

3.3 Coleta das frutas

Frutos de manga cv. ‘Palmer’ foram colhidos no estágio 2 de maturação, conforme

a escala Protrade (1992), sendo este considerado o ponto ideal de colheita para comercialização. As frutas foram coletadas em quatro municípios no Estado da Bahia, para que houvesse variação de condições climáticas e topografia, além de diferentes condições de cultivo (Figura 3). Os municípios foram: Caraíbas (14°36'00''S, 41°20'06''O), Ituaçu (13°48'46''S, 41°17'49''O), Livramento de Nossa Senhora (13°38'34''S, 41°50'27''O) e Bom Jesus da Lapa (13°15'18''S, 43°25'04''O). Foram colhidos 120 frutos em cada município, totalizando 480 frutos coletados nas quatro cidades.

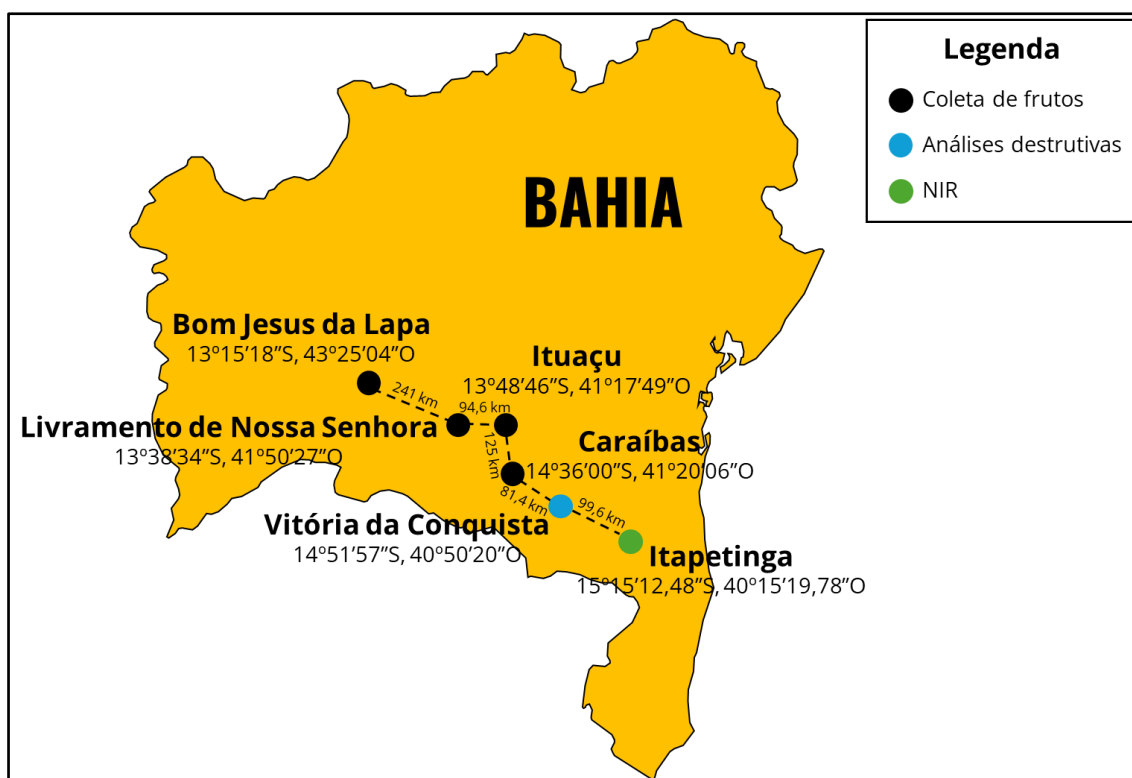


Figura 3. Distribuição geográfica dos municípios de coleta das frutas (Caraíbas, Ituaçu, Livramento de Nossa Senhora e Bom Jesus da Lapa) e dos municípios das análises (Vitória da Conquista e Itapetinga).

Após colhidos, as mangas foram transportadas para o laboratório e higienizadas. Dos 120 frutos colhidos em cada município, metade (60 frutos) foi destinada à etapa de infestação, enquanto a outra metade foi armazenada em sala climatizada (23 °C) até que as frutas atingissem o estágio 3 de maturação. Dos 60 frutos de cada estágio, 30 foram utilizados como controle (não infestados) e os outros 30 foram submetidos à infestação por *C. capitata*, em laboratório.

3.4 Criação dos insetos

Foram utilizadas moscas-das-frutas pertencentes à espécie *Ceratitis capitata*, fornecidas pelo Laboratório de Mosca-das-Frutas, da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *campus* de Vitória da Conquista, BA. A criação foi mantida em sala climatizada com temperatura de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, umidade relativa de $70\% \pm 10\%$ e fotoperíodo de 12:12 (L:E).

Os adultos foram mantidos em gaiolas de madeira (40 x 45 x 40 cm), teladas com tecido voil, para oviposição. Os ovos com 24 horas de idade foram coletados e transferidos para potes de plástico com dieta larval artificial adaptada de Zucoloto (1987). Após 10 dias, larvas de terceiro ínstar foram colocadas em potes plásticos contendo uma fina camada de vermiculita e fechados com papel-toalha, visando à emergência do adulto. Em seguida, casais de *C. capitata* foram transferidos para gaiolas de acrílico (30 x 30 x 30 cm), sendo alimentados com dieta artificial à base de açúcar e levedo de cerveja e água contida em algodão umedecido.

3.5 Infestação

Para induzir a infestação, as frutas foram alocadas em gaiolas de acrílico (30 x 30 x 30 cm), contendo 20 casais de *C. capitata* com 10 dias de idade, alimentados com dieta artificial à base de açúcar e levedo de cerveja e algodão umedecido com água (Figura 4). Em cada gaiola, foram dispostos dois frutos, de modo que a proporção casais:fruto foi de 10:1. As frutas foram expostas às moscas por um período de 48 horas, sob condições controladas de temperatura ($25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) e umidade ($70\% \pm 10\%$).



Figura 4. Gaiolas de acrílico utilizadas para induzir a infestação, contendo frutos de manga cv.

‘Palmer’ e casais de *C. capitata*.

Após o período de exposição às moscas, as frutas foram mantidas no escuro por 48 horas para desenvolvimento da infestação. As frutas controle (não infestadas) foram mantidas no mesmo ambiente dos infestados, de forma protegida, para garantir condições de temperatura e luminosidade idênticas.

3.6 Medidas espectrais na região do infravermelho próximo (NIR)

As análises não destrutivas foram realizadas com o uso de um espectrômetro NIR de bancada (SpectraStar 2500XL, Unity Scientific, Brookfield, CT, EUA). Para as medidas espectrais no NIR, foram obtidos os espectros de absorvância em quatro pontos distintos de cada fruto (Figura 5).

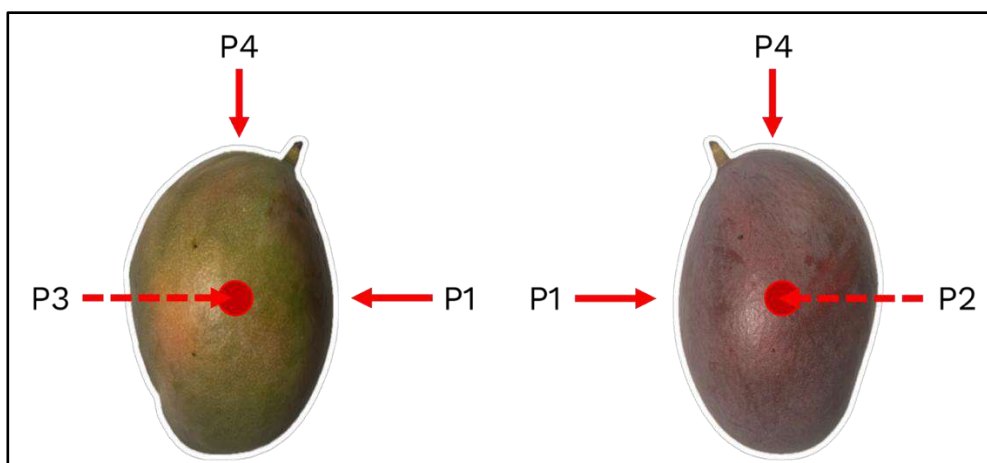


Figura 5. Pontos de leitura das frutas no NIR.

As medições foram realizadas em espectros de absorvância no intervalo de 1100–2500 nm (infravermelho próximo) em intervalos de 1 nm, em temperatura controlada de 22 °C Cada ponto é a pontuação média de 64 *scans*, com 1400 pontos. Para a configuração, controle e aquisição dos dados do espectrômetro foi utilizado o *software Unity InfoStar V3.11.3*.

3.7 Avaliações física e químicas das frutas de manga

Após as medições no NIR, foram conduzidas as análises destrutivas das frutas. As avaliações dos parâmetros de qualidade das frutas abrangeram: cor instrumental (hue e croma), teores de clorofilas totais e carotenoides, firmeza da casca e firmeza da polpa, sólidos solúveis, pH, acidez titulável, e teor de ácido ascórbico.

A cor da polpa das frutas foi medida a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando um colorímetro portátil (CR400, Konica Minolta, Osaka, Japão). Foi utilizado o sistema CIElab para medir a luminosidade (L^* , 0: escuro; 100: branco), a^* (valor negativo: verde; valor positivo: vermelho) e b^* (valor negativo: azul; valor positivo: amarelo). Os valores de L^* , a^* e b^* foram obtidos com três leituras, em regiões equidistantes da polpa, e utilizados para calcular os valores de ângulo Hue ($^{\circ}\text{h}$) e croma (Hernández-Guerrero et al., 2020).

Para a determinação dos teores de pigmentos presentes na casca das frutas, doze discos das cascas ($1,12\text{ cm}^2$ de área) foram colocados em um tubo de vidro contendo 12 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), saturado com CaCO_3 (5% p/v), por 48 h, em ambiente escuro (Hiscox e Israelstam, 1979). Os teores de clorofilas *a* e *b* e carotenoides foram quantificados usando um espectrofotômetro, tendo como referência os comprimentos de onda 665, 649 e 480 nm, respectivamente. Os resultados foram expressos em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (Lee et al., 1987).

Para determinar a firmeza das mangas, foi utilizada uma metodologia adaptada de Li et al. (2017) usando um penetrômetro (TR Turani, Itália). As medições foram realizadas em três pontos diferentes da casca e da polpa. Os resultados foram expressos como força, em newton (N).

O teor de sólidos solúveis totais foi medido com um refratômetro digital Soonda (Official Store, Xangai, China) e expresso como $^{\circ}\text{Brix}$, conforme o método 932.12, da AOAC (AOAC, 2016). Para a determinação dos sólidos solúveis, uma porção da polpa das mangas foi triturada em mixer, e, em seguida, três gotas do filtrado foram colocadas no aparelho. O refratômetro foi zerado com água destilada como padrão.

Para a determinação do pH das amostras, o extrato da polpa triturada foi separado em recipientes menores e medido com um potenciômetro digital, conforme o método 981.12 (AOAC, 2016).

A acidez titulável foi determinada pelo método titulométrico, utilizando solução de NaOH ($0,1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) como agente titulante. Foram pesados 5 g de extrato de polpa triturada e adicionados 40 mL de água destilada. Utilizou-se fenolftaleína a 1% (w/v) como indicador ácido-base. Os resultados foram expressos em g equivalente de ácido cítrico por 100 g de fruto (Oliveira, 2010).

Para a determinação do conteúdo de ácido ascórbico, utilizou-se a metodologia proposta por Oliveira (2010), baseada na reação do ácido ascórbico com o 2,6-diclorofenol indofenol sódico (DCFI), seguida de detecção espectrofotométrica. A reação ocorre por meio da redução do DCFI, com alteração para uma coloração azul, quando

oxidado, ou para uma coloração rosa-arroxeadada, quando reduzido. A solução de DCFI foi preparada na concentração de $0,03 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ do reagente P.A., com aquecimento da água destilada a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, seguido de filtragem. Também foi utilizado ácido oxálico P.A. a 0,4%.

Para essa etapa, 7 g da amostra triturada foram diluídos em solução de ácido oxálico a 0,4% e avolumados para 100 mL. Em seguida, a solução foi filtrada em papel de filtro quantitativo e o filtrado recolhido e armazenado para posterior análise. Uma alíquota de 1 mL do filtrado foi adicionada a dois tubos de ensaio. Em um dos tubos, foram adicionados 9 mL de água destilada para o branco da amostra, e, no outro, 9 mL de DCFI. As análises foram realizadas em duplicata. Os tubos foram agitados em agitador vortex, para posterior leitura da absorbância no comprimento de onda de 520 nm.

O branco geral foi preparado em um tubo com 1 mL de ácido oxálico a 0,4% e 9 mL de água destilada. Esse branco foi utilizado para zerar o espectrofotômetro. Após as leituras das amostras de ácido oxálico com DCFI, adicionou-se uma pequena porção de ácido ascórbico P.A. aos tubos contendo amostra, os quais foram agitados até que as amostras ficassem incolores. Posteriormente, as leituras foram realizadas no espectrofotômetro (IL-593-S-São Paulo, SP). Uma curva de calibração de ácido ascórbico foi preparada para a quantificação da vitamina C, e os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico por 100g de polpa.

3.8 Tratamento dos espectros e análises estatísticas

As amostras foram organizadas de acordo com os quatro tratamentos (controle estádio 2, controle estádio 3, infestado estádio 2 e infestado estádio 3). Em seguida, calculou-se a média dos dados espectrais para cada repetição, considerando que uma repetição gerou doze medidas espectrais, por ser composta por três frutos, dos quais foram realizadas quatro leituras por fruto. Após a obtenção das médias, os dados foram pré-tratados pelo método de Variação Normal Padrão (SNV) utilizando o programa Chemoface versão 1.71. Em seguida, os gráficos foram plotados para uma seleção dos possíveis principais comprimentos de onda, com base nos picos formados nos gráficos, utilizando o *OriginPro*, versão 2025b.

Nas análises quimiométricas foi determinada a relação qualitativa entre as medidas instrumentais e os tratamentos. Análises multivariadas foram realizadas para possibilitar a validação quimiométrica. A partir dos dados tratados foi realizada inicialmente uma análise exploratória por meio da aplicação da PCA, com o objetivo de trabalhar a estrutura dos dados, escolher as variáveis mais importantes e reduzir a

dimensionalidade por meio da remoção de *outliers*. Para realização da análise, foi organizada uma matriz $m \times n$ (linhas e colunas), em que m representa a quantidade de amostras de frutos e n representa as variáveis avaliadas, correspondentes às principais absorvâncias responsáveis pelos comprimentos de onda do espectro. Foi obtida a matriz de variância e covariância, e a seleção do número de componentes principais (PC foi realizada com base na avaliação do gráfico *scree plot*.

A análise de agrupamento (AG) foi realizada por meio do método de agrupamento de mínima variância (*Ward*). Esse método combina dois conglomerados que resultam no menor valor da soma de quadrados entre todos os grupos. A determinação do número de grupos foi feita com base nos valores de R^2 e de Pseudo-F. Os dados foram organizados conforme a matriz descrita para a PCA. Essa análise baseia-se na associação de variáveis similares ou distintas, em que a distância entre grupos seja a máxima possível e, dentro de cada grupo, a menor possível.

Com o objetivo de determinar o melhor modelo para classificar as frutas infestadas e não infestadas, foi realizada a PLS-DA, utilizando todos os dados de absorvância, os quais foram separados em dois subconjuntos para treinamento e validação do teste, por meio do algoritmo de Kennard-Stone, no programa *Chemoface*, versão 1.71, para que fossem uniformemente distribuídos. Das amostras, 30% foram utilizadas para validação e 70% para treinamento (calibração). As frutas infestadas receberam o valor de 1, e as sem infestação, o valor de -1. Para avaliar a eficiência do modelo, foram utilizadas a acurácia, a precisão, a sensibilidade e a especificidade como figuras de mérito.

Os dados das análises pontuais (estatística paramétrica) foram avaliados quanto à homogeneidade, por meio do teste de Bartlett, e quanto à distribuição normal dos resíduos, por meio do teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste Tukey ($p < 0,05$). Por fim, os dados foram submetidos a análises multivariadas para melhor interpretação. Foi realizada uma representação em *heatmap*, que permite a organização das amostras e variáveis em um gráfico de cores, com base em padrões de similaridade e diferença. Foi realizada a análise PLS-DA, seguida do cálculo do índice de *Variable Importance in Projection* (VIP, Importância da Variável na Projeção) do modelo PLS-DA, para identificar as variáveis que mais contribuíram para a discriminação entre os tratamentos analisados, determinando, assim, o parâmetro de maior influência. A partir disso, foi realizado uma análise para correlacionar e associar todas as variáveis àquelas de maior influência, visando compreender as relações diretas e inversas.

O processamento dos dados foi conduzido com o uso dos programas *Statistical Analysis System* (SAS, Sistema de Análise Estatística), *Chemoface*, versão 1.71, *OriginPro*, versão 2025b e *MetaboAnalyst*, versão 6.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Detecção da infestação nas frutas por infravermelho próximo (NIR)

Os espectros de absorvância no NIR das amostras de frutos de manga cv. ‘Palmer’, não infestados (controle) e infestados por *C. capitata* nos estádios 2 e 3 de maturação, são apresentados na Figura 6. Os espectros foram coletados na faixa de 1100 a 2500 nm e pré-tratados para comparação entre os tratamentos. Observa-se um comportamento semelhante entre os perfis espectrais das diferentes amostras para todos os comprimentos de onda, com sobreposição dos espectros e sem variação aparente entre absorvâncias.

Os picos de absorção que mais se destacaram estão localizados nas regiões compreendidas entre 1150–1230 nm, 1400–1450 nm e 1900–2000 nm, relacionadas à presença de ligações O–H, e nas regiões entre 1700–1800 nm e 2300–2500 nm, que representam ligações C–H e N–H.

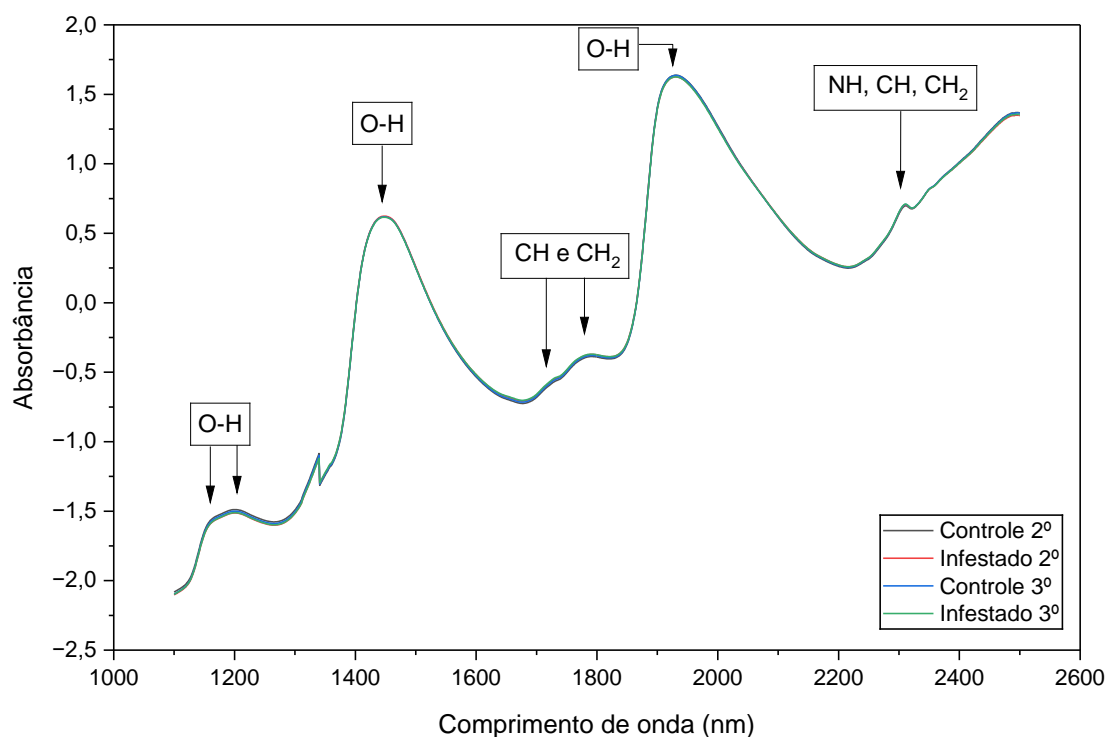


Figura 6. Espectros médios de absorvância na NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por *Ceratitits capitata*, nos estádios 2 e 3 de maturação.

Durante o amadurecimento, a fruta passa por reações de síntese e degradação que alteram sua composição química (Liu et al., 2022). Como as mangas avaliadas encontravam-se nos estádios 2 e 3 de maturação (Protrade, 1992), as diferenças nos teores das substâncias presentes nos dois estádios de maturação não provocaram alterações

suficientes na superfície das frutas que fossem diferenciadas pela espectroscopia NIR, apenas através dos métodos destrutivos convencionais. Assim, os espectros permitiram apenas a identificação das bandas associadas aos constituintes das frutas.

Os espectros apresentaram bandas de absorvância intensas em três regiões que podem indicar a presença de amido: as faixas de 1400–1450 nm, 1900–2000 nm (ligações O–H) e 2280–2340 nm (grupo C–H). Outro composto que pode ser associado à absorvância na faixa de 1400 nm são os ácidos orgânicos (Cevoli et al., 2015; Chakravartula et al., 2019; Nordey et al., 2019). O amido é o principal carboidrato presente na manga verde, funcionando como material de reserva energética e estrutural. Durante o amadurecimento, no entanto, o amido é degradado em açúcares mais simples, como sacarose, glicose e frutose, garantindo o aumento da doçura das frutas (Zhou et al., 2025).

Clorofilas e carotenoides são pigmentos fotossintéticos relacionados à coloração, sendo indicadores importantes do grau de maturação (Othmen et al., 2022). Os carotenoides apresentam absorção na faixa de 1750 nm, atribuída aos grupos C–H e C–H₂. As clorofilas, por sua vez, são relacionadas à região do espectro próximo a 800 nm (Nordey et al., 2019), fora da faixa apresentada no gráfico. Durante o amadurecimento, os cloroplastos, organelas que contêm as clorofilas, sofrem desintegração das membranas dos tilacoides. Esse processo resulta na degradação da clorofila e na hidrólise dos constituintes proteicos e lipídicos das membranas, com melhor visualização dos pigmentos carotenoides (Wang et al., 2023). Com relação a este pigmento, no espectro é possível observar um pico de absorvância em 1750 nm.

A presença de larvas de mosca-das-frutas aumenta o teor de proteínas e gordura em frutos infestados, conforme avaliado por métodos de espectroscopia (Mancini et al., 2023). Contudo, como a avaliação foi conduzida durante estágios iniciais da infestação, cerca de dois a três dias após a infestação, foi possível observar apenas a presença de pontos de punctura, mas não de larvas desenvolvidas. Como proteínas e lipídeos estão presentes em menor quantidade na polpa de manga, não houve picos de absorvância intensos no espectro nas faixas indicadas para ambos os compostos (1730 nm, 1779 nm, 2310 nm e entre 2280–2340 nm). No entanto, houve formação de bandas de absorvância nas amostras na região de 2350 nm, associadas ao grupo N–H das amidas, fortemente relacionadas à presença de proteínas (Cevoli et al., 2015; Chakravartula et al., 2019). No estudo foi avaliado a fruta intacta, com leitura em diferentes pontos, o que pode ter dificultado a observação de alterações tão sutis pela espectroscopia NIR.

4.2 Análises Quimiométricas

Diante do elevado número de variáveis (comprimentos de onda) obtidas e visando classificar as condições de infestação de acordo com as modificações químicas causadas pela infestação, foram realizadas as análises estatísticas multivariadas. A PCA foi conduzida com o objetivo de identificar associações entre os tratamentos e os espectros. Além disso, a AG e a PLS-DA foram empregadas para segregar os grupos quanto ao comportamento das variáveis frente aos tratamentos adotados.

Na PCA das avaliações por espectroscopia NIR, o primeiro componente principal explica 58,2% da variância total dos dados e, junto ao segundo componente, explica 86,2% da variabilidade (Figura 7A). Os gráficos evidenciam elevada dispersão entre as amostras, indicando diferenças sutis entre os tratamentos, o que explica a sobreposição observada nos espectros.

Os comprimentos de onda nas faixas 1400–1450 nm e 1714–1763 nm apresentaram maior correlação com o componente principal 2 (PC 2), sendo os demais comprimentos de onda mais bem correlacionados ao PC 1 (Figura 7B). Os comprimentos de onda da faixa de 1400–1500 nm apresentaram uma alta associação às frutas controle e infestadas do estágio 2. Essa faixa está relacionada à presença de ligações O–H, que podem indicar maior teor de água nas amostras de estágio 2. Sabe-se que frutos de manga mais verdes têm maior umidade em relação aos mais maduros, visto que a perda de água ocorre por meio dos processos de respiração e transpiração durante o amadurecimento (Gidado et al., 2024).

De forma semelhante, os comprimentos de onda compreendidos na faixa de 1900–1950 nm também se associam às ligações O–H. Porém, além de indicar a presença de água, essa faixa também está relacionada à presença de amido. Como evidenciado, o amido está presente em maior teor em frutos mais verdes, diminuindo gradativamente com o amadurecimento (Megha et al., 2022).

As frutas infestadas no estágio 3 têm alta correlação com os comprimentos de onda na faixa de 1700–1806 nm, atribuída aos grupos C–H, N–H e N–H₂. Já os comprimentos na faixa de 1150–1200 nm, associada a ligações O–H, tiveram alta correlação com as frutas infestados em ambos os estádios. As duas faixas espectrais demonstram a formação de bandas de absorvâncias pequenas. A primeira faixa se refere à presença de proteínas, lipídeos e carotenoides; a segunda, a compostos fenólicos e peróxidos. Essas correlações podem ser explicadas pela ocorrência de dano mecânico

causado pela infestação, decorrente da perfuração do tecido da casca durante a oviposição, gerando estresse no fruto e estimulando respostas de defesa. Os fenóis e peróxidos são compostos de defesa antioxidante, que agem protegendo os tecidos danificados (Prasad et al., 2024). Além dos compostos fenólicos, os teores de proteínas e lipídeos também são aumentados em frutos infestados (Saranwong et al., 2010).

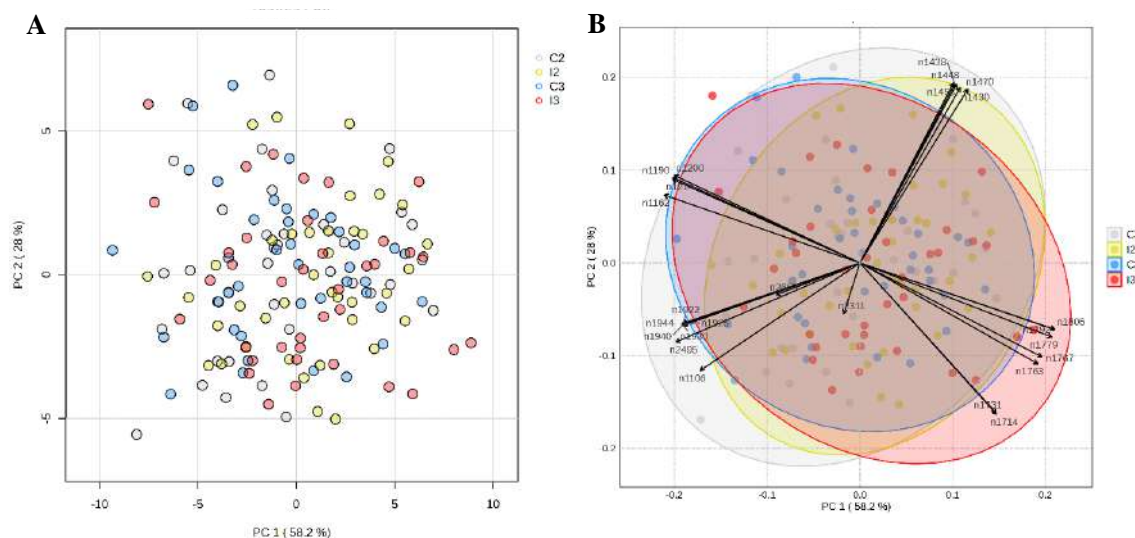


Figura 7. (A) *Principal Component Analysis* (PCA) por PC1 e PC2, e (B) *Principal Component Analysis Biplot* (PCA Biplot) dos picos de absorvância na NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por *Ceratitidis capitata*, nos estádios 2 e 3 de maturação ($n = 40$). C2 = frutos controle no estádio 2; I2 = frutos infestados no estádio 2; C3 = frutos controle no estádio 3; I3 = frutos infestados no estádio 3.

O dendrograma representa o agrupamento das amostras com base na similaridade espectral dos dados observados por espectroscopia NIR (Figura 8). Observa-se a formação de dois grandes grupos principais, evidenciando uma clara distinção entre eles: o primeiro grupo é composto por amostras que apresentaram absorvâncias intermediárias nas bandas selecionadas, e o segundo grupo, por amostras com absorvâncias maiores, principalmente nas faixas de 1430–1767 nm, associadas ao grupo O–H da água e aos grupos C–H e C–H₂ de lipídeos e carotenoides. Isso sugere que as amostras do segundo grupo dispõem de maiores concentrações desses compostos, podendo, assim, corresponder a frutos em estádio de maturação mais avançado ou com maior índice de infestação.

Como esse agrupamento teve como base a separação espectral das amostras em função das mudanças químicas entre elas, é possível demonstrar a sensibilidade da espectroscopia NIR para distinguir padrões de similaridade. Contudo, a técnica funciona melhor para explorar os dados, não sendo recomendada para seleção de amostras

(Kartakoullis et al., 2025).

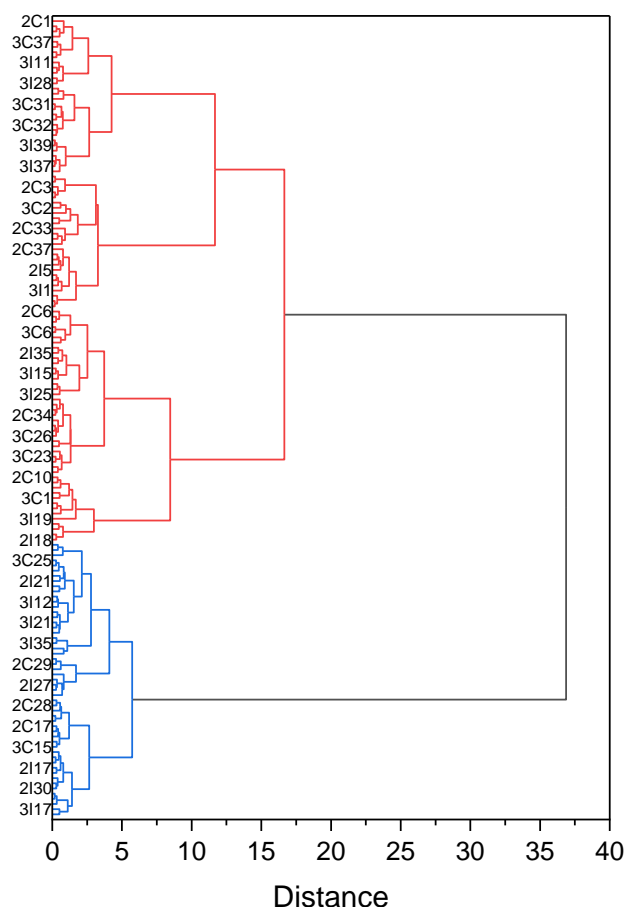


Figura 8. Dendrograma de agrupamento dos picos de absorvância na NIR de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por *Ceratitidis capitata*, nos estádios 2 e 3 de maturação.

Nas análises de componentes principais e agrupamento, não foi possível visualizar uma dispersão clara das amostras com base nas variáveis de comprimento de onda. Contudo, na PCA, observa-se uma separação parcial entre os estádios, o que pode indicar que a maturação teve maior efeito do que a infestação nos dados espectrais. As variáveis espectrais são altamente correlacionadas entre si. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhu et al. (2018), com elevada sobreposição entre as amostras, que também apresentaram características químicas semelhantes, sendo necessário o uso de modelos supervisionados. Apesar da formação de dois grupos com diferenças sutis e muito distribuídas, não houve separação dos tratamentos por infestação ou estágio de maturação.

Considerando a sobreposição espectral das amostras, modelos supervisionados foram criados usando PLS-DA, com o objetivo de classificar as amostras de manga não infestadas e infestadas, sendo possível observar a eficiência da classificação por meio de

métricas de desempenho.

Na Tabela 1, apresentam-se as métricas de desempenho do modelo. Na fase de validação, observou-se melhora nos resultados em relação aos dados de treinamento. O indicador de sensibilidade foi o único com alta capacidade, acima de 70%, para classificar as amostras do grupo de treinamento. Os indicadores de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade apresentaram alta capacidade de classificar as amostras no grupo de validação.

Tabela 1. Desempenho dos modelos preditivos das amostras de treinamento e validação baseada no modelo PLS-DA.

| | | |
|--------------------|--------------------|-----|
| Treinamento | Acurácia (%) | 65% |
| | Precisão (%) | 64% |
| | Sensibilidade (%) | 74% |
| | Especificidade (%) | 56% |
| Validação | Acurácia (%) | 79% |
| | Precisão (%) | 75% |
| | Sensibilidade (%) | 82% |
| | Especificidade (%) | 76% |

Apesar da sobreposição dos espectros, os Coeficientes de Regressão obtidos pelo modelo PLS-DA contribuíram para uma classificação por discriminação entre os tratamentos quanto à presença de infestação, utilizando todos os comprimentos de onda medidos no espectro, no intervalo de 1100–2500 nm (Figura 9).

As bandas entre 1450–1500 nm, 1850–1950 nm e 2350–2500 nm destacaram-se como possíveis faixas de grupos funcionais capazes de discriminar frutos infestados. As regiões do espectro que melhor discriminam as amostras por infestação estão relacionadas às ligações O–H, C–H e C–H₂. Dessa forma, os principais compostos influenciados são aqueles que absorvem nessas faixas, ou seja, os mais suscetíveis a alterações metabólicas durante o processo de infestação: água, amido, proteínas e lipídeos. Amostras de manga infestadas tendem a ter os teores de água e amido reduzidos, devido ao fato de a infestação acelerar o processo de maturação por meio do consumo do amido para formação de açúcares mais simples, o que provoca aumento no metabolismo dos frutos e consequente perda de umidade (Megha et al., 2022; Gidado et al., 2024; Zhou et al., 2025). Além disso, os teores de proteínas e lipídeos aumentam devido à composição química do tecido larval (Saranwong et al., 2010).

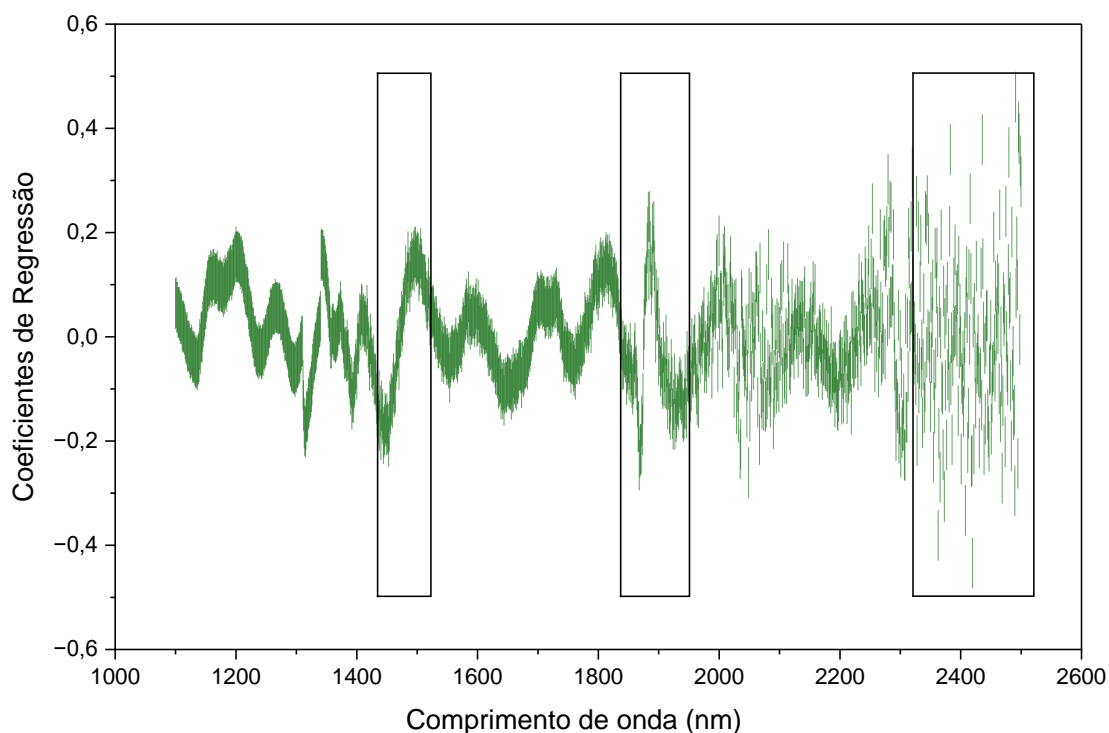


Figura 9. Coeficientes de Regressão em função dos comprimentos de onda do modelo *Partial least square-discriminant analysis* (PLS-DA), construído para classificar amostras de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por *Ceratitis capitata*, nos estádios 2 e 3 de maturação.

Um método supervisionado, como a PLS-DA, funciona melhor para trabalhar com conjuntos de dados amplos e não agrupados, permitindo discriminação completa. Nesse caso, a coleta de frutos em diferentes áreas produtoras gerou uma quantidade de amostras elevada, formando um conjunto de dados abrangente. De modo geral, a PLS-DA foi um método estatístico eficiente em classificar o conjunto de dados entre infestados e não infestados, com base nas alterações químicas causadas pela oviposição das moscas na superfície da manga. Por esse motivo, o modelo apresenta boa capacidade de generalização e estabilidade diante de novos dados. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da aplicação da espectroscopia NIR associada à quimiometria, bem como a robustez do modelo para detecção de infestação por *C. capitata*.

4.3 Avaliações das propriedades físicas e químicas relacionadas aos atributos de qualidade pós-colheita

A fim de entender melhor as modificações identificadas por NIR foram realizadas análises destrutivas, comumente empregadas para avaliação das alterações químicas associadas a processos fisiológicos ou patológicos causados pelo efeito da infestação.

Houve efeito significativo da infestação para °h, croma, carotenoides e clorofilas da polpa. No entanto, o estágio de maturação não influenciou os valores de carotenoides (Tabela 2). A interação entre infestação e estágio de maturação foi significativa para °h, croma e clorofilas, indicando que os efeitos de uma condição dependem da outra.

Tabela 2. Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) de °h, croma, clorofilas totais e carotenoides em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por *Ceratitis capitata* (I), em dois estágios de maturação (E).

| Fontes de variação | GL | Quadrados médios | | | |
|--------------------|-----|------------------|----------|------------|------------------------|
| | | °h | Croma | Clorofilas | Carotenoides |
| I | 1 | 133,96* | 870,36* | 2,33* | 0,000884* |
| E | 1 | 293,31* | 363,26* | 1,51* | 0,000015 ^{ns} |
| I × E | 1 | 2,19* | 16,06* | 0,011* | 0,000002 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 1283,81* | 8425,33* | 16,41* | 0,00785* |
| Resíduo | 153 | 5,47 | 26,07 | 0,18 | 0,000092 |
| CV (%) | | 2,53 | 12,05 | 34,66 | 38,18 |

ns não significativo

*Significativo ($p < 0.05$)

Os parâmetros relacionados à cor (°h e croma) e aos pigmentos (clorofilas totais e carotenoides) são amplamente utilizados como indicadores da qualidade visual e do estado fisiológico de frutos durante o amadurecimento (Singh et al., 2023). Em estudos voltados à detecção de distúrbios ou infestações, como a provocada por *C. capitata*, esses parâmetros ganham relevância adicional, uma vez que alterações induzidas por insetos-praga podem modificar o metabolismo normal dos pigmentos, comprometendo a aparência externa das frutas e, conseqüentemente, sua aceitação comercial (Othmen et al., 2022). Além disso, por estarem diretamente associadas a compostos coloridos e quimicamente ativos, essas variáveis são potencialmente detectáveis por espectroscopia no infravermelho próximo, servindo como base para a discriminação entre frutos sadios e infestados (Gonzalez-Gonzalez et al., 2021).

Durante o amadurecimento de frutos climatéricos, a degradação das clorofilas resulta na alteração da coloração verde para tons amarelados ou alaranjados, aumentando a intensidade e a uniformidade na coloração superficial das frutas. Essas alterações refletem-se em uma redução dos valores de °h e em um aumento dos valores de croma, em função de uma maior saturação da cor (Gupta et al., 2021).

Estresses bióticos, como a infestação por *C. capitata*, podem acelerar a senescência e desorganizar o metabolismo do fruto ao longo da maturação (Grechi et al., 2021). A redução dos valores de °h e o aumento de croma em frutos infestados (Figuras 10A e 10B) indicam uma antecipação da coloração típica de frutos maduros, mesmo no

estádio 2, sugerindo uma possível aceleração do amadurecimento induzida pela infestação.

Em frutas não infestadas, não foi observada variação no teor de clorofilas entre os estádios 2 e 3 (Figura 10C). A maturação natural envolve uma degradação mais regulada das clorofilas, de modo que essa degradação dos pigmentos verdes ocorre de forma mais lenta e gradual (Wang et al., 2023). Por outro lado, em frutos infestados, a ação enzimática e oxidativa intensificada pela infestação acentuou a degradação de clorofilas, evidenciando uma queda de 18,2% entre os estádios (Figura 10C).

Além de intensificar a degradação de clorofilas em função da maturação, a infestação também reduziu os teores de clorofilas e carotenoides em ambos os estádios de maturação das frutas (Figuras 10C e 10D). A intensificação da degradação das clorofilas está associada à ativação de vias enzimáticas clorofilolíticas, estimuladas pelo aumento de etileno, que acelera a senescência dos tecidos vegetais, e pelo estresse oxidativo gerado pelos danos mecânicos causados pela infestação (Chen et al., 2022). A ação dessas enzimas clorofilolíticas, como a clorofilase, promove a degradação precoce da molécula de clorofila, mesmo em frutos fisiologicamente imaturos. De forma semelhante, a redução do teor de carotenoides pode ser atribuída tanto à sua degradação oxidativa, em função do aumento da síntese de espécies reativas de oxigênio, quanto à inibição de suas rotas biossintéticas (Li et al., 2024).

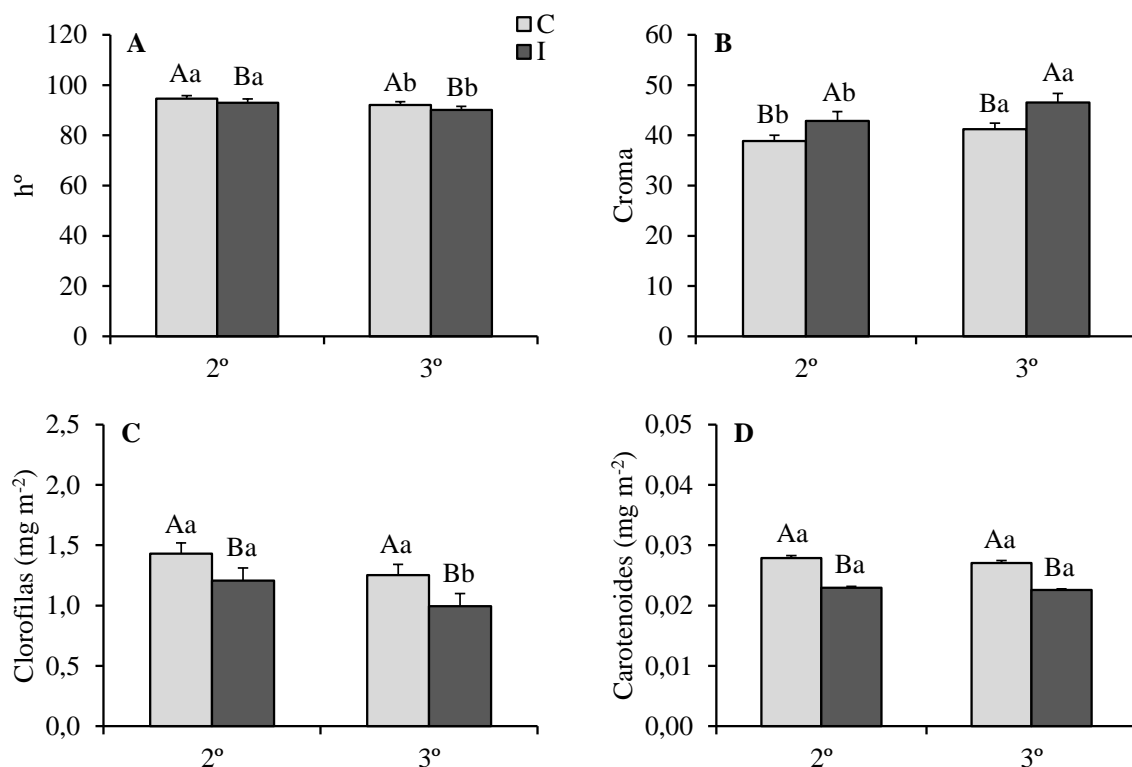


Figura 10. (A) °h, (B) croma, (C) clorofilas totais e (D) carotenoides de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por *Ceratitidis capitata* (I), nos estádios 2 e 3 de maturação. Barras em cada coluna indicam o erro padrão de médias ($n = 40$). Letras maiúsculas comparam as condições de infestação em cada estágio de maturação, enquanto letras minúsculas comparam os estádios de maturação em cada condição de infestação, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A infestação por *C. capitata* influenciou significativamente as firmezas da casca e da polpa em frutos no terceiro estágio de maturação. No entanto, os parâmetros de firmeza não foram influenciados pela infestação em frutos no segundo estágio. A maturação, por sua vez, reduziu a firmeza da casca e da polpa, tanto em frutos infestados quanto em frutos controle (Tabela 3).

Durante o amadurecimento das frutas, a firmeza da casca e da polpa é reduzida progressivamente, como consequência da desestruturação da parede celular mediada por enzimas pectinolíticas e celulolíticas, que causam a solubilização da lamela média e a perda da adesão entre as células (Su et al., 2022). Essas enzimas degradam a matriz polimérica (pectina, celulose e hemicelulose), que confere sustentação e rigidez aos tecidos do fruto, resultando no processo chamado despolimerização, que afeta tanto a casca, mais estruturada e lignificada, quanto a polpa, tornando-as mais macias e menos coesas (Jiang et al., 2024).

Tabela 3. Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) da firmeza da casca (FC) e da firmeza da polpa (FP) em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por

Ceratitidis capitata (I), em dois estádios de maturação (E).

| Fontes de variação | GL | Quadrados médios | |
|--------------------|-----|------------------|---------|
| | | FC | FP |
| I | 1 | 952,95* | 147,49* |
| E | 1 | 4903,90* | 951,34* |
| I × E | 1 | 419,00* | 25,33* |
| Bloco | 3 | 2933,75* | 539,92* |
| Resíduo | 153 | 63,19 | 6,95 |
| CV (%) | | 25,30 | 27,99 |

ns não significativo

*Significativo ($p < 0.05$)

Devido aos danos mecânicos e fisiológicos causados pela infestação, a redução da firmeza do fruto é intensificada. A perfuração para oviposição e a posterior alimentação larval danificam mecanicamente os tecidos do fruto, levando ao aumento da produção de etileno e à aceleração da senescência, o que acelera o amolecimento (Sakin, 2022). No entanto, o efeito da infestação por *C. capitata* sobre a firmeza foi dependente do estágio de maturação. A ocorrência da infestação reduziu a firmeza da casca em 27,1% e firmeza da polpa em 32,6% apenas em frutos no terceiro estágio de maturação, mas não em frutos no segundo estágio (Figura 11). Isso pode ter ocorrido, pois, no terceiro estágio, o fruto já apresenta maior produção de etileno, o que resulta em uma maior atividade enzimática, levando à redução natural da firmeza dos tecidos do fruto. A polpa mais amolecida no estágio 3 torna o tecido mais suscetível aos danos da infestação, facilitando o deslocamento e a alimentação das larvas (Roohigohar et al., 2022). No estágio 2, por outro lado, o tecido está mais firme e coeso, o que dificulta a penetração da larva e retarda a infestação.

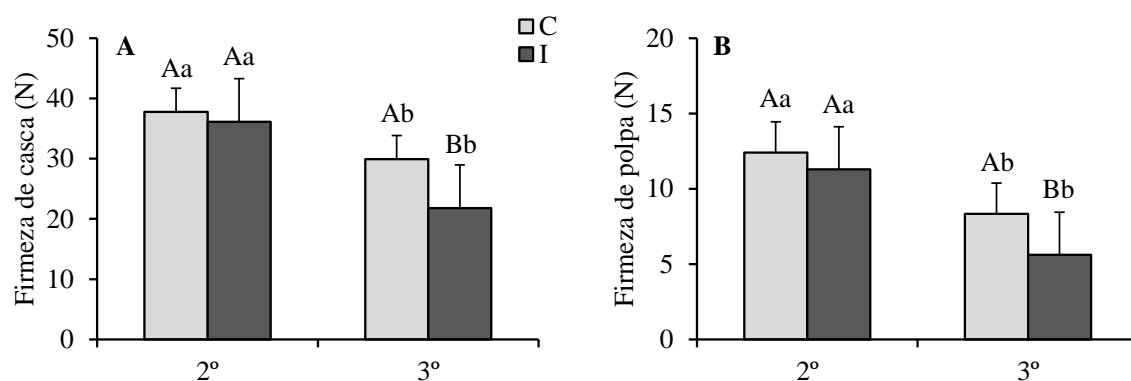


Figura 11. (A) Firmeza da casca e (B) Firmeza da polpa de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por *Ceratitidis capitata* (I), nos estádios 2 e 3 de maturação. Barras em cada coluna indicam o erro padrão de médias ($n = 40$). Letras maiúsculas comparam as condições de infestação em cada estágio de maturação, enquanto letras minúsculas comparam os estádios de maturação em cada condição de infestação, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A infestação influenciou significativamente o teor de sólidos solúveis em frutos nos estádios 2 e 3 de maturação. No entanto, o pH, a acidez e o teor de ácido ascórbico não foram influenciados pela infestação em nenhum dos estádios. A maturação, por sua vez, aumentou o teor de sólidos solúveis e o pH em frutos infestados e não infestados. Por outro lado, os níveis de ácido ascórbico não foram afetados pela maturação independentemente da condição de infestação (Tabela 4).

Tabela 4. Sumário da análise de variância (ANOVA) e coeficiente de variação (CV) de sólidos solúveis (SS), pH, acidez e ácido ascórbico (AA) em frutos de manga cv. ‘Palmer’ sob infestação por *Ceratitits capitata* (I), em dois estádios de maturação (E).

| Fontes de variação | GL | Quadrados médios | | | |
|--------------------|-----|------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | | SS | pH | Acidez | AA |
| I | 1 | 59,65* | 0,053 ^{ns} | 0,055 ^{ns} | 701,05* |
| E | 1 | 208,54* | 20,09* | 0,78* | 610,10 ^{ns} |
| I × E | 1 | 0,11* | 0,027 ^{ns} | 0,101 ^{ns} | 5,08 ^{ns} |
| Bloco | 3 | 384,39* | 80,21* | 8,50* | 513,83* |
| Resíduo | 153 | 2,18 | 0,65 | 0,065 | 178,27 |
| CV (%) | | 13,87 | 20,68 | 22,06 | 29,45 |

ns não significativo

*Significativo ($p < 0.05$)

Esses parâmetros químicos assim como os parâmetros analisados anteriormente estão intimamente relacionados aos processos de amadurecimento e à resposta ao estresse biótico. Os sólidos solúveis refletem o acúmulo de açúcares, enquanto a acidez titulável indica o teor de ácidos orgânicos, ambos modulando o sabor do fruto (Xiao et al., 2024). Com o amadurecimento, o amido (insolúvel) é convertido em açúcares solúveis (sacarose, glicose e frutose), aumentando o sabor doce ao longo da maturação (Zhou et al., 2025). Além disso, a degradação dos polissacarídeos da parede celular, promovida pelo aumento da ação enzimática em resposta ao amadurecimento, também contribui para o aumento de açúcares livres (Kaur et al., 2024). Os sólidos solúveis aumentaram com a maturação das frutas refletindo o acúmulo de açúcares solúveis resultante da conversão de reservas e da degradação da parede celular. A infestação também causou o aumento do teor de sólidos solúveis, possivelmente como resultado da degradação acelerada da parede celular e da liberação de açúcares estruturais (Littler et al., 2022). Esse aumento observado no teor de sólidos solúveis (Figura 12A) pode indicar uma redução no teor de amido, o que corrobora o uso desse composto como indicador da diferenciação de frutos saudáveis e infestados, com base nos coeficientes de regressão da análise de PLS-DA.

A acidez titulável está relacionada ao sabor ácido e representa a quantidade total de ácidos orgânicos presentes no fruto (principalmente ácido cítrico, málico e oxálico) e

sua redução é refletida no aumento do valor de pH (Figura 12B). A acidez tende a diminuir com o amadurecimento, pois muitos ácidos orgânicos são convertidos em outros compostos ou usados como fonte de energia no ciclo de Krebs (Jiang et al., 2023). A maturação promoveu a redução de 7,1% na acidez apenas em frutos infestados (Figura 12C), provavelmente devido ao aumento da respiração e do uso de ácidos como substrato energético em resposta ao estresse causado pela praga. Em frutos infestados, há maior demanda energética para respostas de defesa, o que pode levar a uma maior oxidação dos ácidos orgânicos no ciclo de Krebs (Cheng et al., 2024). Com esse maior consumo dos ácidos, há uma menor liberação de íons H^+ livres e aumento do pH (Goyal et al., 2023).

O ácido ascórbico é um composto antioxidante (vitamina C), que atua na defesa do fruto e participa do metabolismo redox, regulando reações de oxidação e redução (Arabia et al., 2024). Sob condições de estresse biótico, o ácido ascórbico pode ser consumido em maior quantidade para neutralizar o excesso de espécies reativas de oxigênio e mitigar o estresse oxidativo (Singh et al., 2024). Os teores de ácido ascórbico mantiveram-se estáveis durante o amadurecimento e sob infestação (Figura 12D), sugerindo equilíbrio entre os processos de síntese e degradação desse composto.

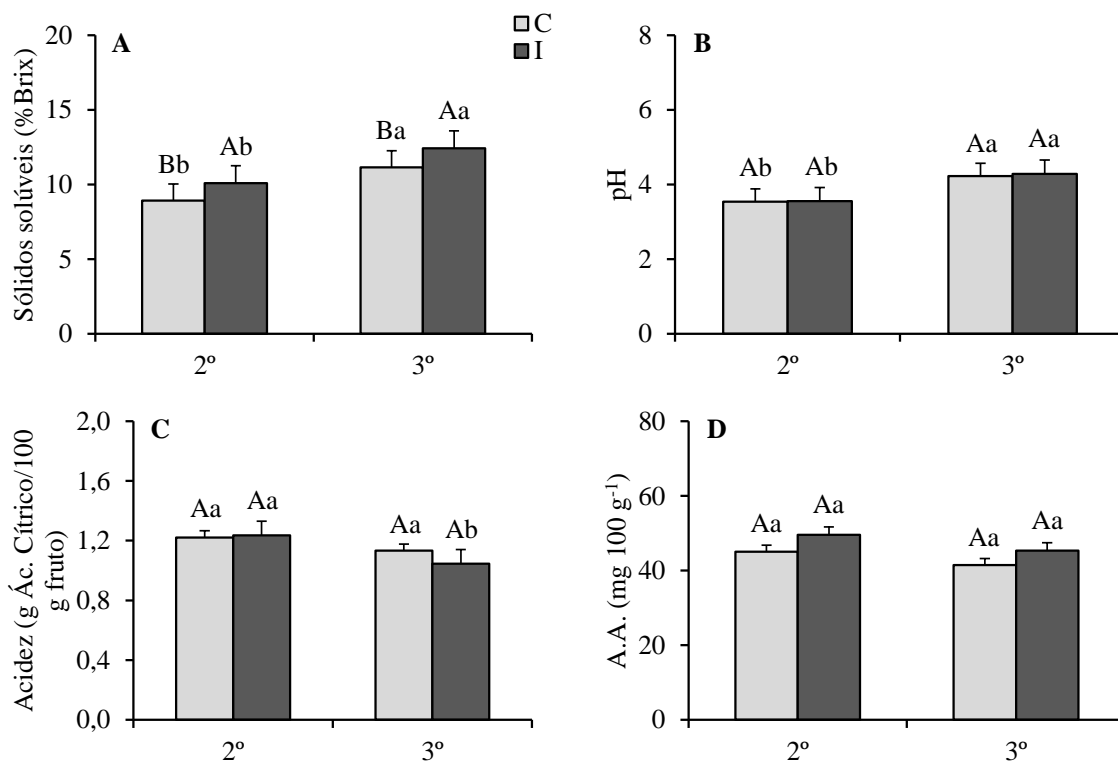


Figura 12. (A) Sólidos solúveis, (B) pH, (C) acidez e (D) ácido ascórbico (A.A.) de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (C) e infestados por *Ceratitís capitata* (I), nos estádios 2 e 3 de maturação. Barras em cada coluna indicam o erro padrão de médias ($n = 40$). Letras maiúsculas comparam as condições de infestação em cada estágio de maturação, enquanto letras minúsculas

comparam os estádios de maturação em cada condição de infestação, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

4.3.1 Análises multivariadas das avaliações das propriedades físicas e químicas

Análises multivariadas foram realizadas com o objetivo de possibilitar uma interpretação conjunta dos padrões de dados observados a partir das análises pontuais. Como destacado anteriormente, a infestação por *C. capitata* reduziu os valores de °h, os teores de clorofilas e de carotenoides, e aumentou os valores de croma e de sólidos solúveis em frutos nos estádios 2 e 3 de maturação (Figura 13A). A maturação das frutas, por sua vez, levou à redução dos valores de °h e das firmezas da casca e da polpa e ao aumento dos valores de croma, de sólidos solúveis e de pH, tanto nas frutas infestadas quanto nas não infestadas.

Para classificar os tratamentos com base nos atributos químicos avaliados, foi utilizada a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) das avaliações pontuais. O primeiro componente discriminou de forma mais eficiente os diferentes estádios de maturação, evidenciando um maior distanciamento entre as frutas infestadas em terceiro estágio e os demais tratamentos (Figura 13B). Os parâmetros de croma, sólidos solúveis e pH foram altamente associados às mangas infestadas no estágio 3 de maturação, refletindo elevada correlação positiva entre esses parâmetros. Por outro lado, os valores de °h, da firmeza da polpa e da casca e da acidez foram mais relacionados às frutas no segundo estágio.

Os atributos de qualidade mais afetados pelos diferentes tratamentos e mais determinantes para a segregação das condições de infestação e maturação estabelecidas neste estudo foram a firmeza da polpa, a firmeza da casca, os sólidos solúveis e o °h, os quais apresentaram um índice VIP superior a 1 (Figura 13C). A identificação desses parâmetros auxilia estudos posteriores, que podem adotá-los como foco na avaliação da deterioração pós-colheita em função da maturação e da infestação.

A variável firmeza da polpa foi positivamente correlacionada às variáveis firmeza da casca, °h, acidez e teor de clorofilas, e negativamente correlacionada a sólidos solúveis, pH e croma (Figura 13D), demonstrando que alterações nesses parâmetros afetam fortemente ou são indiretamente relacionadas à firmeza da polpa sob maturação e/ou infestação.

De acordo com a análise PLS-DA, os atributos de qualidade das frutas infestadas no estágio 3 de maturação diferenciaram-se dos demais tratamentos. A infestação intensifica os processos fisiológicos de maturação, resultando em uma degradação mais

acelerada dos atributos de qualidade (Grechi et al., 2021). Os parâmetros de croma, sólidos solúveis e pH, que tendem a aumentar com o amadurecimento, foram altamente associados às frutas no estágio 3 de maturação. Em contrapartida, o °h, a firmeza da polpa e da casca e a acidez, que são atributos característicos de frutos imaturos, foram mais relacionados às frutas no segundo estágio. Estudos com frutos de manga infestados por mosca-das-frutas da espécie *Bactrocera dorsalis* (Shivashankar e Sumathi, 2022) e com frutos de laranja infestados por cochonilha (Grafton-Cardwell et al., 2022) também identificaram que a ocorrência de infestação intensificou o processo de maturação, resultando em uma degradação mais acentuada dos parâmetros de qualidade pós-colheita.

Os resultados obtidos pela espectroscopia NIR detectam as alterações químicas ligadas aos grupos funcionais, que se relacionam aos atributos de qualidade pós-colheita obtidos. As bandas espectrais associadas à água foram muito expressivas e podem ser associadas ao parâmetro de firmeza das frutas, indicando a presença de frutos mais verdes e sem presença de infestação nos tratamentos, o que corrobora os resultados obtidos em que as frutas do segundo estágio de maturação e os não infestados apresentaram maiores teores de firmeza.

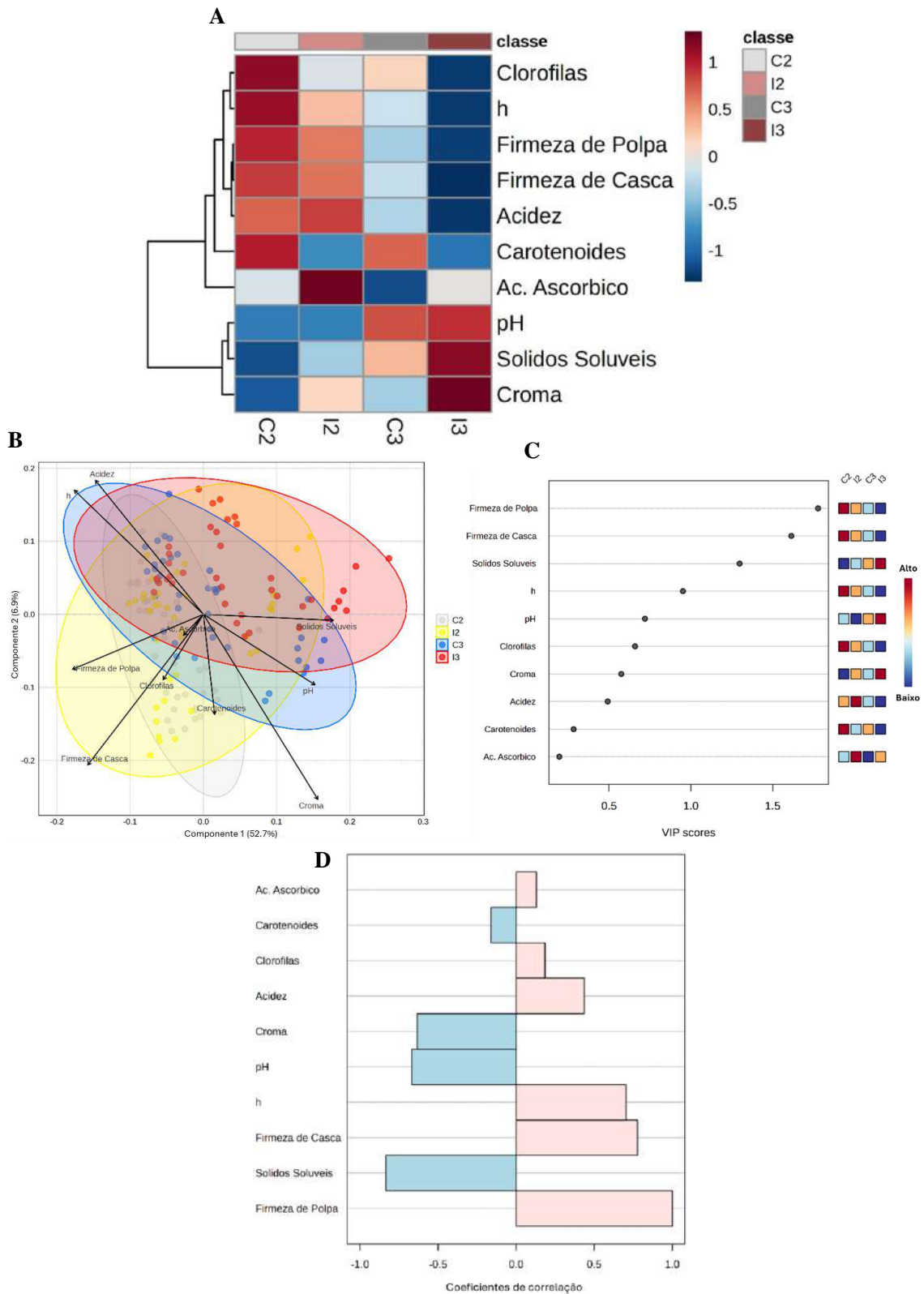


Figura 13. (A) Representação em *heatmap*, (B) *Partial least square-discriminant analysis* (PLS-DA), (C) *Variable Importance in Projection* (VIP) scores do modelo PLS-DA e (D) Principais parâmetros correlacionados com a firmeza da polpa de frutos de manga cv. ‘Palmer’ não infestados (controle) e infestados por *Ceratitis capitata*, nos estádios 2 e 3 de maturação ($n = 40$).

Da mesma maneira, as absorvâncias em regiões que indicam a presença de amido

se correlacionam com os teores de sólidos solúveis. Nas amostras analisadas foi possível observar que as frutas mais maduras e aqueles com presença de infestação apresentaram maior teor de sólidos solúveis, conseqüentemente, menor teor de amido, visto que a degradação do amido durante o amadurecimento ou por meio de um estresse oxidativo causa o aumento de açúcares livres. Além disso, o espectro tem uma faixa de comprimento de onda que se associa à presença dos pigmentos carotenoides, melhor visualizados em frutas maduras ou infestadas, nos resultados é possível observar que os teores de carotenoides foram reduzidos pela presença da infestação, independentemente do grau de amadurecimento das frutas.

Esses achados reforçam a aplicabilidade da espectroscopia NIR, junto à quimiometria, como uma ferramenta rápida, não destrutiva e capaz de fornecer informações detalhadas sobre as condições fitossanitárias das frutas, constituindo-se como um método promissor para identificação de insetos-praga.

5 CONCLUSÕES

A análise multivariada exploratória por *PCA* e agrupamento foi satisfatória para compreensão do conjunto de dados, sendo a análise de agrupamento eficiente em demonstrar a sensibilidade do *NIR* ao agrupar amostras por similaridade química. De maneira complementar, os modelos supervisionados desenvolvidos com base em *PLS-DA* para classificar as amostras de manga não infestadas e infestadas confirmam que a espectroscopia no infravermelho próximo, com auxílio de quimiometria, foi eficiente para realizar uma boa discriminação das amostras com base nas alterações químicas causadas pela *C. capitata*.

A exposição de frutos de manga cv. ‘Palmer’ à infestação por *Ceratitidis capitata* afetou o metabolismo das frutas, acelerando o processo de amadurecimento por meio de modificações intensificadas dos atributos de qualidade relacionados à maturação. Essas alterações geraram mudanças espectrais possíveis de serem identificadas nos tecidos das frutas por meio da espectroscopia no infravermelho próximo, resultando em espectros que possibilitaram a interpretação dos padrões químicos e, conseqüentemente, permitiram a classificação das amostras com o auxílio da quimiometria.

A associação entre a espectroscopia *NIR* e a quimiometria como ferramenta rápida e não destrutiva para a triagem de frutos potencialmente infestados, representa uma alternativa viável para sistemas de monitoramento em pós-colheita. Além disso, possibilitam que as avaliações sejam conduzidas com espectrômetros portáteis nas áreas de produção. Para o avanço dessa pesquisa, a coleta de diversos conjuntos de dados com outras variedades de manga é importante para comprovar a precisão do método.

6 REFERÊNCIAS

- Ali, M.Z.; Seehanam, P.; Theanjumol, P.; Sonthiya, K.; Suksai, K.; Maniwara, P. Utilization of near infrared spectroscopy coupled with chemometrics for non-destructive detection of mold in sweet tamarind. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101241>.
- AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International. **In Association of Official Analysis Chemists International**, 2016.
- Arabia, A.; Munné-Bosch, S.; Muñoz, P. Ascorbic acid as a master redox regulator of fruit ripening. **Postharvest Biology and Technology**, v. 207, n. 112614, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112614>.
- Araujo, M.R.; Martins, D.S.; Fornazier, M.J.; Uramoto, K.; Ferreira, P.S.F.; Zucchi, R.A.; Godoy, W.A.C. Aggregation and spatio-temporal dynamics of fruit flies (Diptera, Tephritidae) in papaya orchards associated with different area delimitations in Brazil. **Agronomy**, v. 44, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53466>
- Arioli, C.J.; Botton, M.; Machota Junior, R.; Nunes, M.Z.; Rosa, J.M. Novas ferramentas para monitoramento e controle massal de mosca-dasfrutas. **Synergismus Scientifica UTFPR**, v. 13, n. 1, p. 15-20, 2018. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1091678>> Acesso em: 18 de março de 2025.
- Bhadauria, A.S.; Tripathi, V.K. Fruit characteristics and yield of mango cv. Amrapali as influenced by bio-enhancers and bio-fertilizers. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 13, n. 10, p. 1973-1981, 2023. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102855>.
- Cevoli, C.; Gianotti, A.; Troncoso, R.; Fabbri, A. Quality evaluation by physical tests of a traditional Italian flat bread *Piadina* during storage and shelf-life improvement with sourdough and enzymes. **European Food Research and Technology**, v. 240, p. 1081–1089, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2429-7>
- Chakravartula, S.S.N.; Cevoli, C.; Balestra, F.; Fabbri, A.; Rosa, M.D. Evaluation of drying of edible coating on bread using NIR spectroscopy. **Journal of Food Engineering**, v. 240, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.009>
- Chen, H.; Lai, X.; Wang, L.; Li, X.; Chen, W.; Zhu, X.; Song, Z. Ethylene response factor *MaERF012* modulates fruit ripening by regulating chlorophyll degradation and softening in banana. **Foods**, v. 11, n. 23, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11233882>
- Cheng, Y.; Liu, Z.; Yang, J.; Zhao, H.; Chao, Z. Metabolomics analysis of physicochemical properties associated with quality deterioration in insect-infested hawthorn berries. **Food Chemistry**, v. 459, n. 140374, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140374>.
- Dias, N.O.; Zotti, M.J.; Montoya, P.; Carvalho, I.R.; Nava, D.E. Fruit fly management research: A systematic review of monitoring and control tactics in the world. **Crop Protection**, v. 112, p. 187-200, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.019>

Dong, X.; Dong, Y.; Liu, J.; Wu, S. Combined use of near infrared spectroscopy and chemometrics for the simultaneous detection of multiple illicit additions in wheat flour. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101263>

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Observatório do Mercado da Manga**. 2024. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/en/observatorio-da-manga>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2025.

Farina, V.; Gentile, C.; Sortino, G.; Gianguzzi, G.; Palazzolo, E.; Mazzaglia, A. Tree-Ripe mango fruit: physicochemical characterization, antioxidant properties and sensory profile of six mediterranean-grown cultivars. **Agronomy**, v. 10, p. 884-890, 2020. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10060884>

Feitosa, S.S.; Silva, P.R.R.; Pádua, L.E.M.; Carvalho, E.M.S.; Paz, J.K.S.; Paiva, D.R. Flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) associadas a variedades de manga no município de José de Freitas-Piauí. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 1, p. 112–117, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000100021>

Ferreira, S.L.C.; Silva Junior, M.M.; Felix, C.S.A.; Silva, D.L.F.; Santos, A.S.; Santos Neto, J.H.; Souza, C.T.; Cruz Junior, R.A.; Souza, A.S. Multivariate optimization techniques in food analysis - A review. **Food Chemistry**, v. 273, p. 3-8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.114>

Fischnaller, S.; Dowell, F.E.; Lusser, A.; Schlick-Steiner, B.C.; Steiner, F.M. Nondestructive species identification of *Drosophila obscura* and *D. subobscura* (Diptera) using near-infrared spectroscopy. **Fly (Austin)**, v. 6, n. 4, p. 284-289, 2012. <https://doi.org/10.4161/fly.21535>

Gonzalez-Gonzalez, M.G.; Blasco, J.; Cubero, S.; Chueca, P. Automated detection of *Tetranychus urticae* Koch in citrus leaves based on colour and VIS/NIR Hyperspectral Imaging. **Agronomy**, v. 11, n. 5, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051002>

Gotti, I.A.; Saldanha, C.B.; Marra, S.O.D.O. **Entomologia aplicada à agronomia**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 192 p.

Goyal, H.; Gill, M.S.; Gill, P.S.; Jawandha, S.K.; Singh, N. Changes in physicochemical and enzymatic activities of mango hybrids during fruit ripening. **Erwerbs-Obstbau**, v. 65, p. 355–362, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10341-022-00810-7>

Grafton-Cardwell, E.E.; Gu, P.; Daugherty, M.P. Impact of *Icerya purchasi* (Hemiptera: Monophlebidae) on navel orange, *Citrus sinensis*, production and fruit quality. **Journal of Economic Entomology**, v. 115, n. 5, p. 1627-1636, 2022. <https://doi.org/10.1093/jee/toac129>

Grechi, I.; Preterre, A.; Caillat, A.; Chiroleu, F.; Ratnadass, A. Linking mango infestation by fruit flies to fruit maturity and fly pressure: A prerequisite to improve fruit fly damage management via harvest timing optimization. **Crop Protection**, v. 146, n. 105663, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105663>

Gupta, A.K.; Pathak, U.; Tongbram, T.; Medhi, M.; Terdwongworakul, A.; Magwaza,

L.S.; Mdtishwa, A.; Chen, T.; Mishra, P. Emerging approaches to determine maturity of citrus fruit. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 19, p. 5245–5266, 2021. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1883547>

Hernández-Guerrero, S.E.; Balois-Morales, R.; Palomino-Hermosillo, Y.A.; López-Guzmán, G.G.; Berumen-Varela, G.; Bautista-Rosales, P.U.; Alejo-Santiago, G. Novel edible coating of starch-based stenopermocarpic mango prolongs the shelf life of mango “ataulfo” fruit. **Journal of Food Quality**, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1320357>

Hiscox, J.D., Israelstam, G.F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**, v. 57, p. 1332–1334, 1979. <https://doi.org/10.1139/b79-163>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Agrícola Municipal (PAM)**. 2023. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/manga/br> > Acesso em: 19 de janeiro de 2025.

Jiang, Y.; Qi, Y.; Chen, X.; Yan, Q.; Chen, J.; Liu, H.; Shi, F.; Wen, Y.; Cai, C.; Ou, L. Combined metabolome and transcriptome analyses unveil the molecular mechanisms of fruit acidity variation in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijms24031871>

Jiang, Y.; Ye, J.; Zhou, L.; Chen, M.; Wei, Y.; Jiang, S.; Chen, Y.; Shao, X. Cell wall metabolism during the growth of peach fruit: Association of hardness with cell wall pectins. **Scientia Horticulturae**, v. 330, n. 113058, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113058>

Kartakoullis, A.; Caporaso, N.; Whitworth, M.B.; Fisk, I.D. Gaussian mixture model clustering allows accurate semantic image segmentation of wheat kernels from near-infrared hyperspectral images. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 259, n. 105341, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105341>

Kaur, J.; Singh, Z.; Mazhar, M.S.; Shah, H.M.S.; Woodward, A. Changes in physical attributes, activities of fruit softening enzymes, cell wall polysaccharides and fruit quality of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) as influenced by maturation and ripening. **Horticulturae**, v. 10, n. 12, 2024. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121264>

Lebaka, V.R.; Wee, Y.J.; Ye, W.; Korivi, M. Nutritional composition and bioactive compounds in three different parts of mango fruit. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 2, p. 1-20, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020741>

Lee, D.W.; Brammeier, S.; Smith, A.P. The selective advantages of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, n. 1, p. 40–49, 1987. <https://doi.org/10.2307/2388458>

Li, L., Sun, J., Gao, H., Shen, Y., Li, C., Yi, P., He, X., Ling, D., Sheng, J., Li, J., Liu, G., Zheng, F., Xin, M., Li, Z., Tang, Y. Effects of polysaccharide-based edible coatings on quality and antioxidant enzyme system of strawberry during cold storage. **International Journal of Polymer Science**, n. 1, 2017.

<https://doi.org/10.1155/2017/9746174>.

Li, X.; Zhang, D.; Pan, X.; Kakar, K.U.; Nawaz, Z. Regulation of carotenoid metabolism and ABA biosynthesis during blueberry fruit ripening. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 206, n. 108232, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108232>

Littler, A.; Pandey, P.; O'Dell, K.L.; Syed, Z. Chemical ecology of oviposition dynamics in *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 115, n. 4, p. 1029–1035, 2022. <https://doi.org/10.1093/jee/toac028>

Liu, B.; Xin, Q.; Zhang, M.; Chen, J.; Lu, Q.; Zhou, X.; Li, X.; Zhang, W.; Feng, W.; Pei, H.; Sun, J. Research progress on mango post-harvest ripening physiology and the regulatory technologies. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 1-25, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods12010173>

Liu, X.; Crane, J.; Wu, X.; Wang, Y. Integrated metabolomics and proteomics analysis provides insights into the formation of volatile compounds in three different polyembryonic mango cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72, n. 36, p. 20171-20181, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c04363>

Mancini, M.; Mazzoni, L.; Leoni, E.; Tonanni, V.; Gagliardi, F.; Qaderi, R.; Capocasa, F.; Toscano, G.; Mezzetti, B. Application of Near Infrared Spectroscopy for the rapid assessment of nutritional quality of different strawberry cultivars. **Foods**, v. 12, n. 17, p. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12173253>

Mingoti, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2 ed. 2005. 297 p.

Mishra, P.; Passos, D. A synergistic use of chemometrics and deep learning improved the predictive performance of near-infrared spectroscopy models for dry matter prediction in mango fruit. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 212, n. 104287, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104287>

Modesto, J.H.; Leonel, S.; Segantini, D.M.; Souza, J.M.A.; Ferraz, R.A. Qualitative attributes of some mango cultivars fruits. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, p. 565-570, 2016. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.04.p7388x>

Munawar, A.A.; Kusumiyati; Wahyuni, D. Near infrared spectroscopic data for rapid and simultaneous prediction of quality attributes in intact mango fruits. **Data Brief**, v. 27, p. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104789>.

Munawar, A.A.; Hizir; Erika, C.; Pawelzik, E. Fast and simultaneous prediction of inner quality parameters on intact mangos by near infrared spectroscopy: Impact of spectra pre-processing on prediction accuracy. **Future Foods**, v. 10, n. 100463, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100463>

Mwando, N.L.; Ndelela, S.; Meyhöfer, R.; Subramanian, S.; Mohamed, S.A. Hot water treatment for post-harvest disinfestation of *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) and its effect on cv. Tommy Atkins mango. **Insects**, v. 12, n. 12, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.3390/insects12121070>

Nordey, T.; Davrieux, F.; Léchaudel, M. Predictions of fruit shelf life and quality after ripening: Are quality traits measured at harvest reliable indicators? **Postharvest Biology and Technology**, v. 153, p. 52-60, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.011>

O'Brien, C.; Falagán, N.; Kourmpetli, S.; Landahl, S.; Terry, L.A.; Alamar, M.C. Non-destructive methods for mango ripening prediction: Visible and near-infrared spectroscopy (visNIRS) and laser Doppler vibrometry (LDV). **Postharvest Biology and Technology**, v. 212, n. 112878, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112878>

Oliveira, L. A. **Manual de laboratório: análises físico-químicas de frutas e mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 248p.

Othmen, S.B.; Boussaa, F.; Hajji-Hedfi, L.; Abbess, K.; Dbara, S.; Chermiti, B. Effects of nymphal density (*Bactericera trigonica*) and feeding on photosynthetic pigments, proline content and phenolic compounds in carrot plants. **European Journal of Plant Pathology**, v. 163, p. 51–59, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02456-9>

Ourique, C.B.; Redaelli, L.R.; Efrom, C.F.S.; Gonzatto, M.P.; Schwarz, S.F. Use of mineral particle film to protect 'Okitsu' tangerine and 'Valencia' orange against *Anastrepha fraterculus* and the effect on fruit quality. **Revista Ceres**, v. 69, n. 5, p. 559–770, 2022. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269050009>

Pimentel, R.M.S. **Contributo para o conhecimento da mosca-doMediterrâneo (Ceratitis capitata Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) na Ilha Terceira**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza). Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias. Angra do Heroísmo.

Posom, J.; Klprachan, J.; Rattanasopa, K.; Sirisomboon, P.; Saengprachatanarug, K.; Wongpichet, S. Predicting marian plum fruit quality without environmental condition impact by handheld visible-Near-Infrared Spectroscopy. **ACS Omega**, v. 5, n. 43, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03203>

Protrade. **Mango - Manual de exportacion: frutas tropicales y hortalizas**. Eschborn: GTZ, 1992. 34 p.

Raga, A.; Souza-Filho, M.F. **Manual de moscas-das-frutas: medidas para o controle sustentável**. Araraquara: Fundecitrus, 2021. 33 p.

Raghavendra, A.; Guru, D.S.; Rao, M.K. Mango internal defect detection based on optimal wavelength selection method using NIR spectroscopy. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 5, p. 43-51, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.01.005>

Roohigohar, S.; Clarke, A.R.; Strutt, F.; van der Burg, C.A.; Prentis, P.J. Fruit fly larval survival in picked and unpicked tomato fruit of differing ripeness and associated gene expression patterns. **Insects**, v. 13, n. 5, 2022. <https://doi.org/10.3390/insects13050451>

Sá, R. F.; Castellani, M.A.; Nascimento, A.S.; Brandão, M.H.S.T.; Silva, A.N.; Pérez-Maluf, R. Índice de infestação e diversidade de moscas-das-frutas em hospedeiros exóticos e nativos no pólo de fruticultura de Anagé, BA. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 401–411, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000200016>

Sakin, G.V. The estimation of optimal harvesting period for olives, based on losses in the physical and mechanical properties caused by olive fruit fly infestation at different orchard altitudes. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 42, p. 1943–1957, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00724-z>

Saranwong, S.; Thanapase, W.; Suttiwijitpukdee, N.; Rittiron, R.; Kasemsumran, S.; Kawano, S. Applying near infrared spectroscopy to the detection of fruit fly eggs and larvae in intact fruit. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 18, n. 4, p. 271-280, 2010. <https://opg.optica.org/jnirs/abstract.cfm?URI=jnirs-18-4-271>

Shivashankar, S.; Sumathi, M. Gallic acid induces constitutive resistance against *Bactrocera dorsalis* infestation in mango fruit by its dual action. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 188, n. 105268, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105268>

Shoba, S.; Pandiyarajan, T.; Shashidhar, K.C. Nondestructive detection of fruit fly (*Bactrocera dorsalis*) infestation in Alphonso and Totapuri varieties of mango fruits by thermal imaging technique. **Journal of Food Process Engineering**, v. 47, n. 4, p. 1-7, 2024. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14610>

Silva, D.R.B.; Roriz, A.K.P.; Petitinga, C.S.C.D.A.; Lima, I.V.G.; Nascimento, A.S.; Joachim-Bravo, I.S. Competitive interactions and partial displacement of *Anastrepha obliqua* by *Ceratitis capitata* in the occupation of host mangoes (*Mangifera indica*). **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, p. 70–78, 2021. <https://doi.org/10.1111/AFE.12406>

Singh, J.; Chahal, T.S.; Gill, P.S.; Jawandha, S.K. Comparison of fruit color and quality changes during fruit development in ‘Kinnow’ and ‘W. Murcott’ mandarins. **Erwerbs-Obstbau**, v. 65, p. 369–377, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10341-022-00818-z>

Singh, K.; Gupta, R.; Shokat, S.; Iqbal, N.; Kocsy, G.; Pérez-Pérez, J.M.; Riyazuddin, R. Ascorbate, plant hormones and their interactions during plant responses to biotic stress. **Physiologia Plantarum**, v. 176, n. 4, 2024. <https://doi.org/10.1111/ppl.14388>

Skoog, D.A.; Holler, F.J.; Nieman, T.A. **Princípios de Análise Instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 5 ed. 836 p.

Souza, A.C.F.; Lima, J.R.F. Comportamento dos preços de manga Palmer ao produtor do Vale do Submédio São Francisco. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 1, p. 1-20, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.250161>

Su, Q.; Li, X.; Wang, L.; Wang, B.; Feng, Y.; Yang, H.; Zhao, Z. Variation in cell wall metabolism and flesh firmness of four apple cultivars during fruit development. **Foods**, v. 11, n. 21, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11213518>

Tassembédo, B.; Ouédraogo, M.; Nébié, K.; Sinzogan, A.A.C.; Toé, P. Willingness to pay for a new biopesticide to control mango fruit flies. **Agricultural and Resource Economics: International Scientific**, v. 10, n. 4, p. 156–178, 2024. <https://doi.org/10.51599/are.2024.10.04.07>

Thao, B.T.T.; Hung, P.T.; Lai, N.D.; Tran, T.Y.N.; Nguyen, N.Q.; Pham, T.N.; Tran, T.T.; Bach, G.L.; Dao, T.P. Application of heat pump drying technology to produce

dried mango products from Tu Quy mango (*Mangifera indica* L.), Vietnam, on a pilot scale. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, n. 1204303, 2024. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1204303>

Walsh, K.B.; McGlone, V.A.; Han, D.H. The uses of near infra-red spectroscopy in postharvest decision support: A review. **Postharvest Biology and Technology**, v. 163, p. 1- 12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111139>

Wang, M.; Li, C.; Liu, J.; Zhang, S.; Guo, Y.; Jin, Y.; Ge, Y. Phenylalanine maintains the postharvest quality of ‘Jinfeng’ pear fruit by modulating the tricarboxylic acid cycle and chlorophyll catabolism. **Postharvest Biology and Technology**, v. 204, n. 112479, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112479>

Workman Junior, J. **The Handbook of Organic Compounds**. v. 3. Academic Press: Neena, Estados Unidos, 2000. 1493 p.

Xiao, Q.; Ye, S.; Wang, H.; Xing, S.; Zhu, W.; Zhang, H.; Zhu, J.; Pu, C.; Zhao, D.; Zhou, Q.; Wang, J.; Lin, L.; Liang, D.; Lv, X. Soluble sugar, organic acid and phenolic composition and flavor evaluation of plum fruits. **Food Chemistry: X**, v. 24, n. 101790, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101790>

Zhou, Z.; Li, B.; Lin, Z.; Zhong, W.; Wei, W.; Shan, W.; Chen, J.; Lu, W.; Wu, C.; Kuang, J. Mango *MiEIL4* modulates starch degradation during fruit ripening by upregulating the expression of β -amylase and α -amylase genes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 229, n. 113721, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113721>

Zhu, L.; Chang, H.; Zhou, Q.; Wang, Z. Improving the classification accuracy for Near-Infrared Spectroscopy of chinese *Salvia miltiorrhiza* using local variable selection. **Journal Analytical Methods in Chemistry**, v. 2018, n. 1, p. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5237308>

Zucchi, R.A.; Moraes, R.C.B. **Fruit flies in Brazil** - Hosts and parasitoids of the Mediterranean fruit fly. 2025. Disponível em: < <http://www.lea.esalq.usp.br/ceratitidis> > Acesso em: 02 de setembro de 2025.

Zucoloto, F.S. Feeding habits of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae): Can larvae recognize a nutritionally effective diet? **Journal of Insect Physiology**, Oxford, v. 33, n. 5, p. 349-353, 1987. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(87\)90123-5](https://doi.org/10.1016/0022-1910(87)90123-5)