



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**CAMPUS JUVINO OLIVEIRA - ITAPETINGA – BA**

Área de Concentração: Ciência de Alimentos

**Desenvolvimento de filmes ativos à base de Polivinil Álcool incorporados com carvão ativado funcionalizado com extrato de clitoria ternatea para aplicação na conservação pós-colheita de banana tipo prata**

Autora: Miriam Santos Pachêco de Lima

Orientadora: Dsc. Cristiane Martins Veloso

Coorientador: Dsc. Evaldo Cardozo de Souza Junior

ITAPETINGA

BAHIA – BRASIL

Fevereiro de 2026

**MIRIAM SANTOS PACHÊCO DE LIMA**

**Desenvolvimento de filmes ativos à base de Polivinil Álcool incorporados com carvão ativado funcionalizado com extrato de clitoria ternatea para aplicação na conservação pós-colheita de banana tipo prata**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Ciência de Alimentos para a obtenção do Título de Mestre.

Orientadora: D.Sc. Cristiane Martins Veloso

ITAPETINGA

BAHIA – BRASIL

Fevereiro de 2026

664.8 Lima, Miriam Santos Pachêco de.  
L699d Desenvolvimento de filmes ativos à base de Polivinil Álcool incorporados com carvão ativado funcionalizado com extrato de *Clitoria ternatea* para aplicação na conservação pós-colheita de banana tipo prata. / Miriam Santos Pachêco de Lima. – Itapetinga, BA: UESB, 2026.  
72f.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Ciência de Alimentos, para a obtenção do Título de Mestre. Sob a orientação da profª D.Sc. Cristiane Martins Veloso e Co-orientador profº Dsc. Evaldo Cardozo de Souza Junior.

1. Conservação de bananas – Resíduos agroindustriais. 2. Malte cervejeiro – Compostos bioativos. 3. Filmes ativos – Álcool polivinílico. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* de Itapetinga, BA. II. Veloso, Cristiane Martins (Orient.). III. Souza Júnior, Evaldo Cardoso de (Co-orient.). IV. Título.

**CDD (21): 664.8**

**Catálogo na fonte:**

Rogério Pinto de Paula – CRB/5-1654  
Bibliotecário Coordenador – Biblioteca UESB – Campus de Itapetinga-BA

**Índice Sistemático para Desdobramento por**

**Assunto:**

1. Conservação de bananas – Resíduos agroindustriais;
2. Malte cervejeiro – Compostos bioativos;
3. Filmes ativos – Álcool polivinílico.

## DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**Título:** “DESENVOLVIMENTO DE FILMES ATIVOS À BASE DE POLIVINIL ÁLCOOL INCORPORADOS COM CARVÃO ATIVADO FUNCIONALIZADO COM EXTRATO DE CLITORIA TERNATEA PARA APLICAÇÃO NA CONSERVAÇÃO PÓS-COLHEITA DE BANANA TIPO PRATA.”

**Autor (a): MIRIAM SANTOS PACHÊCO DE LIMA**

**Orientador(a):** Prof. Dr.<sup>a</sup> Cristiane Martins Veloso

Aprovada como parte das exigências para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente  
 **MATEUS PEREIRA FLORES SANTOS**  
Data: 15/04/2026 20:01:45-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
 **NORMANE MIRELE CHAVES DA SILVA**  
Data: 17/04/2026 12:23:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Pereira Flores Santos  
(UFS)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Normane Mirele Chaves da Silva  
(IFBAIANO)

Documento assinado digitalmente  
 **CRISTIANE MARTINS VELOSO**  
Data: 24/04/2026 08:23:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane Martins Veloso  
Orientadora - UESB Presidente da Banca

**Itapetinga-BA, 27 de fevereiro de 2026.**

*Dedico esta conquista primeiramente a Deus, o autor e consumidor da minha história. Porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. Aos meus pais, Marli e Zenildo, que sob muito sol e incontáveis sacrifícios, me fizeram chegar até aqui pela sombra. Este trabalho é fruto do amor e da força que sempre me transmitiram.*

*"Ora, àquele que é poderoso para fazer tudo muito mais abundantemente além daquilo que pedimos ou pensamos, segundo o poder que em nós opera."*

*Efésios 3:20*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus. Ele me sustentou em minhas fraquezas e me fortaleceu quando eu já não acreditava que conseguiria continuar.

Ao meu pai, Zenildo, que, debaixo do sol e com as mãos calejadas, nunca me deixou faltar nada, vencendo, dia após dia, lutas que nós nem imaginamos. Sem seu esforço, meu pai, eu não teria chegado até aqui.

À minha mãe, que, em um momento desta caminhada, pensei que perderia. Louvado seja Deus por tudo o que fez! Tê-la viva para ler esta mensagem é, para mim, a maior representação do amor e do cuidado de Deus para conosco.

Aos meus irmãos, Moisés, Raonir e Renan, por serem meus companheiros, dádivas de Deus em minha vida, e por entenderem a minha ausência em tantos momentos desta jornada.

Aos meus avós, Marinalva, Maria e Joaquim (*in memoriam*), pois sei que sou fruto das orações de vocês.

A toda a minha família! Em especial aos meus irmãos de alma, Deivid e José Cláudio (*in memoriam*), que já não estão mais entre nós, mas cujo legado de amor e cuidado permanece vivo em meu coração e ecoa até hoje.

Aos meus amigos de longa data, que me sustentaram emocionalmente nos dias difíceis, lembrando-me sempre de que havia vida além da pesquisa.

A todos os meus colegas e amigos do Mestrado, por compartilharem comigo esta jornada e por estarem ao meu lado não apenas nos desafios da pesquisa, mas também nos desafios da vida. Vocês foram fundamentais e tornaram essa caminhada mais leve. Em especial, Renata, Camilly e Mário, meu eterno agradecimento.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos (PPGECAL), em especial aos professores Dr. Léo, Dr.<sup>a</sup> Sibelli, Dr. Rafael e Dr.<sup>a</sup> Renata, que demonstraram que o compromisso com seus alunos vai muito além dos muros da UESB. Obrigada pela compreensão, pela escuta e por terem contribuído para que eu não desistisse quando achei que não seria mais possível continuar. Estendo minha gratidão a todos os professores que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane, agradeço, de forma especial, por ter ido além da orientação acadêmica. Em um período marcado pela incerteza, pela luta pela vida da minha mãe e pela dor da perda de pessoas que amava, encontrei em sua compreensão, sensibilidade e humanidade o apoio necessário para seguir em frente. Levarei comigo não apenas os conhecimentos científicos compartilhados, mas também o exemplo da profissional ética, competente e humana que representa para mim.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, pela oportunidade concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão da bolsa de estudos.

Que Deus abençoe a todos. Muito obrigada!

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Estrutura química do monômero do álcool polivinílico. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 17 |
| <b>Figura 2.</b> Representação esquemática da estrutura dos poros e grupos funcionais superficiais do carvão ativado. Fonte: (Sultana et al., 2022). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 20 |
| <b>Figura 3.</b> Ciclo de Yang. Fonte: Adaptado Salinas (2024). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22 |
| <b>Figura 4.</b> Espectros de absorção no infravermelho do resíduo casca de malte (RM) e do Carvão ativado produzido a partir do malte (CM). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 42 |
| <b>Figura 5.</b> Espectros de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos filmes de PVA: PVA controle (PVA-C), PVA contendo emulsão (PVA-E), PVA com carvão ativado (PVA-CA) e PVA contendo compostos bioativos de <i>Clitoria ternatea</i> adsorvido no carvão ativado (PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15), obtidos na região espectral de 4000–500 cm <sup>-1</sup> . ....                                             | 45 |
| <b>Figura 6.</b> Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície (100×; barra = 100 µm) e da seção transversal (100×; barra = 50 µm) dos filmes de álcool polivinílico (PVA) produzidos com diferentes formulações: PVA-C (controle), PVA-E (emulsão), PVA-CA (carvão ativado) e PVA-CA-CT5, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 (carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de <i>Clitoria ternatea</i> ). .... | 52 |
| <b>Figura 7.</b> Fotografias representativas de bananas acondicionadas em filmes à base de PVA no dia 0 e após 10 dias de armazenamento, incluindo o controle sem embalagem no décimo dia. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1 .</b> Avaliação da imobilização de compostos fenólicos do extrato de <i>Clitoria ternatea</i> em carvão ativado em função da concentração de folhas utilizadas e do tempo de contato.....                                  | 44 |
| <b>Tabela 2.</b> Propriedades físicas, ópticas e de barreira de filmes de PVA contendo carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de <i>Clitoria ternatea</i> .....                                                         | 48 |
| <b>Tabela 3.</b> Propriedades mecânicas dos filmes de PVA contendo carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de <i>Clitoria ternatea</i> . ....                                                                            | 50 |
| <b>Tabela 4.</b> Capacidade antioxidante determinada pelo método FRAP (mg SF/mL) dos extratos aquosos de <i>Clitoria ternatea</i> , do filme controle de PVA e dos filmes de PVA contendo carvão ativado com extrato imobilizado. .... | 54 |
| <b>Tabela 5.</b> Atributos de qualidade das bananas após 11 dias de armazenamento dos diferentes sistemas de embalagem. ....                                                                                                           | 56 |
| <b>Tabela 6.</b> Parâmetros colorimétricos ( $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ ) da banana ao longo do período de armazenamento – Dia 0.....                                                                                                       | 60 |
| <b>Tabela 7.</b> Parâmetros colorimétricos ( $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ ) da banana ao longo do período de armazenamento - Dia 11.....                                                                                                      | 61 |
| <b>Tabela 8.</b> Valores médios de pH e sólidos solúveis totais (°Brix) da banana no Dia 0 e após 11 dias de armazenamento em diferentes sistemas de embalagem. ....                                                                   | 64 |

## Sumário

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMO GERAL.....                                                                                | 11 |
| ABSTRACT.....                                                                                    | 12 |
| CAPÍTULO I.....                                                                                  | 13 |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL.....                                                                         | 14 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                                     | 16 |
| 2.1 Embalagens ativas.....                                                                       | 16 |
| 2.2 Polímeros biodegradáveis utilizados no desenvolvimento de embalagens para alimentos .....    | 16 |
| 2.3 Carvão ativado: aspectos importantes.....                                                    | 18 |
| 2.4 Utilização de extratos vegetais para obtenção de embalagens ativas .....                     | 20 |
| 2.5 Conservação pós-colheita de frutas: aspectos fisiológicos e produção de etileno.....         | 21 |
| 2.6 Banana ( <i>Musa spp</i> ): produção, fisiologia e desafios na conservação pós-colheita .... | 23 |
| 3. OBJETIVO .....                                                                                | 24 |
| 3.1 Objetivo geral.....                                                                          | 24 |
| 3.2 Objetivos Específicos.....                                                                   | 24 |
| 4. REFERÊNCIAS.....                                                                              | 25 |
| CAPÍTULO II .....                                                                                | 29 |
| RESUMO .....                                                                                     | 30 |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                              | 31 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                      | 34 |
| 2.1 Material e métodos.....                                                                      | 34 |
| 2.2 Síntese do carvão ativado .....                                                              | 34 |
| 2.3 Caracterização do material precursor e carvão ativado.....                                   | 34 |
| 2.4 Adsorção dos compostos fenólicos extraídos da <i>Clitória ternatea</i> .....                 | 35 |
| 2.5 Obtenção dos filmes à base de PVA .....                                                      | 36 |
| 2.6 Caracterização dos filmes obtidos.....                                                       | 36 |

|       |                                                                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.1 | <i>Propriedades de barreira dos filmes</i> .....                                                                       | 37 |
| 2.6.2 | <i>Propriedades Mecânicas</i> .....                                                                                    | 38 |
| 2.6.3 | <i>Biodegradabilidade</i> .....                                                                                        | 38 |
| 2.5.  | 5 Atividade antioxidante dos extratos e dos filmes .....                                                               | 38 |
| 2.7   | Aplicação dos filmes: avaliações de qualidade pós-colheita de banana-prata .....                                       | 39 |
| 2.8   | Planejamento e análise estatística .....                                                                               | 40 |
| 3.    | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                            | 40 |
| 3.1   | Preparação, caracterização e adsorção de compostos bioativos de um sistema<br>carreador à base de carvão ativado ..... | 41 |
| 3.1.1 | <i>Caracterização do material precursor e do carvão ativado</i> .....                                                  | 41 |
| 3.1.2 | <i>Ensaio de imobilização de compostos fenólicos da Clitoria Ternatea em carvão<br/>ativado</i> .....                  | 43 |
| 3.3   | Caracterização dos filmes.....                                                                                         | 44 |
| 3.3.1 | <i>Caracterização estrutural dos filmes por espectroscopia no infravermelho com<br/>Transformada de Fourier</i> .....  | 44 |
| 3.2.2 | <i>Propriedades físicas, mecânicas, ópticas e de barreira dos filmes</i> .....                                         | 45 |
| 3.3.3 | Caracterização textural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                                            | 51 |
| 3.2.4 | <i>Biodegradabilidade dos filmes</i> .....                                                                             | 53 |
| 3.2.5 | <i>Capacidade antioxidante dos extratos e dos filmes de PVA</i> .....                                                  | 54 |
| 3.3   | Mudanças de atributos de qualidade pós-colheita de bananas durante o<br>armazenamento .....                            | 55 |
| 3.3.1 | Perda de massa e firmeza da polpa e da casca .....                                                                     | 55 |
| 3.3.2 | <i>Efeito das embalagens na cor instrumental dos frutos</i> .....                                                      | 58 |
| 3.3.3 | <i>pH e sólidos solúveis</i> .....                                                                                     | 63 |
| 4.    | CONCLUSÕES .....                                                                                                       | 65 |
| 5.    | REFERÊNCIAS .....                                                                                                      | 66 |

## RESUMO GERAL

As perdas pós-colheita de frutas climatéricas, como a banana prata (*Musa spp.*), ainda são elevadas, principalmente devido à ação do etileno e às limitações das embalagens tradicionais. O uso de materiais ativos e sustentáveis incorporados a matrizes poliméricas biodegradáveis surge como alternativa para melhorar a conservação dos alimentos e reduzir perdas. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de carvão ativado obtido a partir de subproduto de malte em filmes à base de álcool polivinílico (PVA). O carvão ativado foi empregado tanto como agente de reforço estrutural quanto como suporte para compostos bioativos extraídos de *Clitoria ternatea* (fada azul), visando ao desenvolvimento de embalagens ativas destinadas à conservação pós-colheita de bananas-prata. O adsorvente carbonáceo foi obtido por ativação química com ácido fosfórico seguida de carbonização sob atmosfera de nitrogênio, sendo posteriormente caracterizado quanto às propriedades físico-químicas e texturais. Compostos bioativos extraídos de *Clitoria ternatea* foram adsorvidos ao carvão ativado em diferentes concentrações e tempos de contato. Os filmes foram produzidos pelo método de casting e incorporados com emulsão lipídica contendo carvão ativado e carvão funcionalizado com compostos bioativos, sendo caracterizados quanto às propriedades estruturais, mecânicas, de barreira, de biodegradabilidade e atividade antioxidante. Posteriormente, as embalagens foram aplicadas na conservação pós-colheita de bananas armazenadas por 11 dias a 24 °C, sendo avaliados parâmetros físicos e físico-químicos relacionados ao amadurecimento dos frutos. O rendimento em carvão foi de 41,34%, e o mesmo apresentou área superficial específica de 836 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, diâmetro médio de poros de 4,07 nm e pH do ponto de carga zero de 4,56, caracterizando estrutura predominantemente mesoporosa. A adsorção dos compostos fenólicos atingiu eficiência máxima de 88,26%, com tempo de equilíbrio de 60 minutos. Em relação ao filme controle (PVA-C), a incorporação do carvão ativado e do extrato promoveu aumento da permeabilidade ao vapor d'água, com valores variando de 0,3747 a 0,5171 g·mm·m<sup>-2</sup>·dia<sup>-1</sup>·mmHg<sup>-1</sup>, indicando menor eficiência como barreira à umidade. Em contrapartida, o módulo de Young aumentou de 27,37 MPa para até 46,39 MPa, evidenciando maior rigidez estrutural dos filmes contendo carvão ativado e extrato. Além disso, os filmes incorporados com compostos bioativos apresentaram elevada atividade antioxidante, alcançando 6477,56 mg SF·mL<sup>-1</sup> pelo método FRAP. Na aplicação pós-colheita, os filmes reduziram a perda de massa das bananas (7,53-10,20%) em comparação ao controle (14,10%), promoveram maior manutenção da firmeza da polpa (até 0,697 N), e da coloração da casca (a\* em torno de -7,61) dos frutos, além de retardarem o amadurecimento dos frutos evidenciado pelos menores teores de sólidos solúveis totais (6,6–7,6 °Brix frente a 25,6 °Brix no controle). Os resultados demonstram o potencial da valorização de resíduos agroindustriais como fonte de materiais carbonáceos para incorporação e liberação de compostos bioativos em filmes ativos biodegradáveis, destacando-se como uma abordagem inovadora e sustentável para o desenvolvimento de embalagens com aplicação na conservação pós-colheita de frutas climatéricas.

**Palavras-chave:** Carvão ativado; Funcionalização; *Clitoria ternatea*; Frutos climatéricos; Amadurecimento.

## ABSTRACT

Postharvest losses of climacteric fruits, such as silver banana (*Musa* spp.), remain high, mainly due to the action of ethylene and the limitations of conventional packaging. The use of active and sustainable materials incorporated into biodegradable polymer matrices has emerged as an alternative to improve food preservation and reduce losses. Therefore, this study aimed to evaluate the effect of incorporating activated carbon obtained from malt by-products into polyvinyl alcohol (PVA)-based films. The activated carbon was used both as a structural reinforcement agent and as a support for bioactive compounds extracted from *Clitoria ternatea* (butterfly pea flower), aiming at the development of active packaging for the postharvest preservation of silver bananas. The carbonaceous adsorbent was obtained through chemical activation with phosphoric acid followed by carbonization under a nitrogen atmosphere and was subsequently characterized regarding its physicochemical and textural properties. Bioactive compounds extracted from *Clitoria ternatea* were adsorbed onto the activated carbon under different concentrations and contact times. The films were produced using the casting method and incorporated with a lipid emulsion containing activated carbon and activated carbon functionalized with bioactive compounds. The films were characterized in terms of their structural, mechanical, barrier, biodegradability, and antioxidant properties. Subsequently, the packaging materials were applied to the postharvest preservation of bananas stored for 11 days at 24 °C, and physical and physicochemical parameters related to fruit ripening were evaluated. The activated carbon yield was 41.34%, presenting a specific surface area of 836 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, an average pore diameter of 4.07 nm, and a point of zero charge (pH<sub>pzc</sub>) of 4.56, indicating a predominantly mesoporous structure. Adsorption of phenolic compounds reached a maximum efficiency of 88.26%, with an equilibrium time of 60 minutes. Compared with the control film (PVA-C), the incorporation of activated carbon and extract increased water vapor permeability, with values ranging from 0.3747 to 0.5171 g·mm·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>·mmHg<sup>-1</sup>, indicating lower efficiency as a moisture barrier. In contrast, Young's modulus increased from 27.37 MPa to as much as 46.39 MPa, demonstrating greater structural rigidity in films containing activated carbon and extract. Furthermore, films incorporated with bioactive compounds exhibited high antioxidant activity, reaching 6477.56 mg GAE·mL<sup>-1</sup> by the FRAP method. In the postharvest application, the films reduced banana weight loss (7.53–10.20%) compared with the control (14.10%), promoted greater maintenance of pulp firmness (up to 0.697 N) and peel color (a\* values around -7.61), and delayed fruit ripening, as evidenced by lower total soluble solids contents (6.6–7.6 °Brix compared with 25.6 °Brix in the control). The results demonstrate the potential of valorizing agro-industrial residues as a source of carbonaceous materials for the incorporation and release of bioactive compounds in biodegradable active films. This approach stands out as an innovative and sustainable strategy for the development of packaging materials with applications in the postharvest preservation of climacteric fruits.

**Keywords:** Activated carbon; Functionalization; *Clitoria ternatea*; Climacteric fruits; Ripening.

## **CAPÍTULO I**

---

**INTRODUÇÃO GERAL  
REFERÊNCIAL TEÓRICO  
OBJETIVOS**

---

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O uso de polímeros sintéticos convencionais na indústria de embalagens tem sido questionado devido ao longo tempo que esses materiais permanecem no ambiente após o descarte, podendo persistir no solo por centenas de anos e contribuir para o acúmulo de resíduos sólidos (Ferraz et al, 2025). Nesse contexto, a substituição de plásticos tradicionais por materiais biodegradáveis tem sido apontada como uma estratégia promissora para a redução de impactos ambientais associados ao setor de embalagens, especialmente diante das pressões regulatórias e sociais voltadas à redução de resíduos plásticos (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Pesquisas conduzidas por Chen et al. (2022) e Ge et al. (2024) avaliaram a biodegradação desses polímeros em solo, observando elevadas taxas de degradação sob condições controladas, o que demonstra o potencial desses materiais para aplicações ambientalmente responsáveis. Esses resultados reforçam que os filmes biodegradáveis podem apresentar desempenho compatível com exigências tecnológicas, ao mesmo tempo em que oferecem vantagens ambientais (Chen et al., 2022; Ge et al., 2024).

O polivinil álcool (PVA) é um dos polímeros que se destaca por possuir boa capacidade de biodegradação (Merz et al., 2020), isto porque quando exposto à ação de microrganismos presentes no solo e em ambientes aquáticos, pode ser degradado em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Essas características reforçam sua adequação para aplicações sustentáveis. Bacha et al. (2022), estudando filmes a base de PVA obtiveram 70,7% de degradação após 90 dias de enterramento em solo, evidenciando seu potencial para reduzir impactos ambientais em comparação aos polímeros convencionais, consolidando essa matriz como promissora para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis destinados ao setor de embalagens.

Apesar dos avanços no desenvolvimento de embalagens ativas biodegradáveis, filmes poliméricos à base de PVA podem apresentar limitações mecânicas e de barreira, especialmente em relação à resistência estrutural e à permeabilidade, o que pode comprometer seu desempenho em aplicações reais de armazenamento. Uma alternativa para minimizar essas fragilidades é a incorporação de agentes de reforço estrutural, que atuam melhorando a rigidez, resistência e estabilidade (Chen et al., 2022; He et al., 2022; Cho et al., 2006).

Dentre os agentes de reforço, destacam-se os materiais carbonáceos, como o carvão ativado (CA), que tem se mostrado particularmente promissor na elaboração de filmes ativos biodegradáveis, em razão de sua elevada área superficial e estrutura porosa, que favorecem tanto o reforço estrutural da matriz quanto a adsorção e o carregamento de moléculas com potencial bioativo (Santos et al., 2019; Santos et al., 2020). Essas características permitem sua

atuação não apenas na melhoria das propriedades mecânicas, mas também como suporte para a imobilização e liberação controlada de compostos antioxidantes, ampliando a funcionalidade dos materiais desenvolvidos (Yim & Kim, 2023). Além disso, quando obtido a partir de resíduos agroindustriais, o CA associa desempenho estrutural à sustentabilidade (Borges et al., 2024).

Outro aspecto muito importante no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com desempenho estrutural adequado, tem sido o avanço das tecnologias de embalagens ativas como estratégia complementar para ampliar a funcionalidade desses materiais. As embalagens ativas diferenciam-se dos sistemas convencionais por incorporarem, em sua matriz polimérica, compostos capazes de desempenhar funções específicas que conferem interação direta com o alimento ou com o microambiente interno (Chawla et al., 2021). Essa funcionalidade é geralmente conferida pela incorporação de extratos vegetais ricos em compostos bioativos, nanopartículas ou materiais adsorventes, os quais podem liberar ou sequestrar moléculas como O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etileno, odores e radicais oxidativos, promovendo alterações positivas no ambiente interno da embalagem (Versino et al., 2023; Cazon et al., 2025). Uma das aplicações em que esses sistemas demonstram eficácia é como embalagem para conservação pós-colheita de frutas, como a banana, atuando no retardo do amadurecimento e da senescência, além da restrição do crescimento microbiano, configurando-se como alternativa promissora às embalagens sintéticas tradicionais (Kalita et al., 2026).

Diante da necessidade de desenvolver embalagens ativas sustentáveis e estruturalmente eficientes para a conservação pós-colheita de frutas, este estudo propõe a utilização de carvão ativado, obtido a partir de subprodutos do malte, como agente de reforço estrutural e carreador de biocompostos antioxidantes extraídos de *Clitoria ternatea* para aplicação em filmes ativos. A integração dessas funções em uma matriz de polivinil álcool (PVA) representa uma abordagem inovadora, ao associar melhoria das propriedades mecânicas e de barreira à liberação controlada de compostos bioativos, agregando valor a resíduos agroindustriais e contribuindo para soluções tecnologicamente avançadas e ambientalmente responsáveis na indústria de embalagens alimentícias. Além disso, a proposta alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente aos ODS 2, 9, 12 e 13, ao promover a redução de perdas pós-colheita, a inovação industrial sustentável, o consumo e a produção responsáveis e a redução dos impactos ambientais na cadeia agroalimentar.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Embalagens ativas**

As embalagens ativas podem ser definidas como sistemas de acondicionamento que, além de atuarem como barreiras físicas, interagem com o alimento e com a atmosfera interna da embalagem, promovendo alterações controladas com o objetivo de prolongar a vida útil e preservar a qualidade microbiológica e sensorial dos produtos (Ahmed et al., 2022; Yildirim et al., 2018; Cazon et al., 2025). Essa funcionalidade é conferida pela incorporação, na matriz polimérica, de compostos capazes de desempenhar funções específicas, diferindo das embalagens convencionais, que atuam apenas como barreiras passivas (Chawla et al., 2021).

Esses sistemas, consolidados desde a década de 1980 e aprimorados pela ciência dos materiais, representam uma evolução importante no setor de embalagens por exercerem função ativa na conservação dos alimentos. As embalagens ativas podem atuar por mecanismos não migratórios, como removedores de oxigênio, umidade e etileno, ou por sistemas de liberação controlada, como emissores de CO<sub>2</sub>, agentes antimicrobianos e antioxidantes, contribuindo para a manutenção da estabilidade físico-química e microbiológica dos produtos, dentre os quais destacam-se compostos fenólicos, óleos essenciais e outros metabólitos secundários com atividade antioxidante e antimicrobiana. (Ahmed et al., 2022; Yildirim et al., 2018).

Para aplicação na conservação pós-colheita de frutas climatéricas, como a banana, a incorporação desses compostos às formulações permite controlar o microambiente interno da embalagem, por meio da absorção ou liberação seletiva de gases e outras substâncias, contribuindo diretamente para o controle dos processos fisiológicos, a redução de perdas e a extensão da vida útil, com preservação das características sensoriais e nutricionais (Versino et al., 2023).

### **2.2 Polímeros biodegradáveis utilizados no desenvolvimento de embalagens para alimentos**

Polímeros biodegradáveis podem ser definidos como materiais que no meio ambiente estão suscetíveis a biodegradação através da ação de fungos, bactérias e outros organismos. Normalmente, eles são derivados de fontes renováveis, o que facilita sua decomposição no ambiente. Suas aplicações incluem a produção de produtos com apelo ecológico como materiais de construção e embalagens, tornando-se uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pelos polímeros derivados do petróleo (Dallaev, et al., 2025).

Com base em sua origem os polímeros biodegradáveis podem ser divididos em três categorias: (i) polímeros naturais obtidos a partir de polissacarídeos como amido, celulose e seus derivados; (ii) polímeros de origem microbiana, como os polihidroxicarboxilatos; e (iii) polímeros sintéticos biodegradáveis, como o álcool polivinílico (PVA) (Garavand, et al., 2017).

O álcool polivinílico (PVA) é um polímero sintético biodegradável muito utilizado na produção de filmes para embalagens alimentícias em razão de sua atoxicidade, solubilidade em água e capacidade de formação de filmes. Sua estrutura química é caracterizada por cadeias com elevada densidade de grupos hidroxila, resultantes do processo de hidrólise parcial ou total do poli(acetato de vinila) (Figura 1), o que confere ao material caráter hidrofílico e capacidade de estabelecer ligações de hidrogênio intermoleculares (Liu et al., 2021).

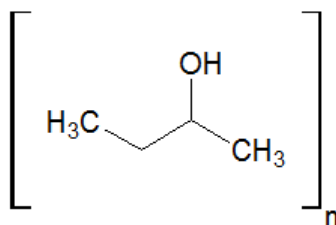


**Figura 1.** Estrutura química do monômero do álcool polivinílico.

Fonte: Google Imagens (2025).

Essas interações contribuem para seu comportamento viscoelástico,  $G'$  (módulo elástico)  $> G''$  (módulo viscoso), favorecendo a formação de filmes com elevada resistência mecânica, boa flexibilidade e maior integridade estrutural. Liu et al. (2021) reportaram resistência à tração de 54,485 MPa em filmes de PVA adequadamente dispersos. Além disso, o PVA apresenta caráter biodegradável, podendo ser completamente degradado em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sob ação de microrganismos presentes no solo e em ambientes aquáticos, o que reforça sua aplicabilidade em sistemas sustentáveis de embalagem (Qi et al., 2018).

Apesar de suas vantagens, filmes produzidos exclusivamente com PVA apresentam limitações importantes relacionadas à sua elevada afinidade por água. Chen et al. (2022) observaram alta solubilidade (76,77%), teor de umidade de 11,95% e elevada permeabilidade ao vapor de água ( $3,03 \pm 0,12 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) em filmes de PVA puro. Esses resultados evidenciam que a polaridade, devido a presença de grupos hidroxila, aumenta a interação com moléculas de água, comprometendo as propriedades de barreira e a estabilidade do material em ambientes úmidos (Chen et al., 2022).

Cho et al. (2006) demonstraram que a redução do tamanho das partículas para a escala nanométrica promove aumento do módulo de Young e da resistência à tração, especialmente em baixas concentrações (1% em volume), evidenciando que partículas menores apresentam maior eficiência como reforço estrutural devido à maior área interfacial disponível para interação com a matriz o que tem os tornados investigados como estratégia para melhorar o desempenho mecânico, térmico e de barreira de compósitos.

O carvão ativado, especialmente quando obtido a partir de subprodutos agroindustriais, destaca-se como uma carga promissora em compósitos poliméricos devido à sua elevada área superficial e estrutura porosa, que favorecem interações com a matriz polimérica e contribuem para o aprimoramento das propriedades estruturais do material (Yim & Kim, 2023).

Um resíduo lignocelulósico que pode ser utilizado na produção de carvão ativado é o produzido pela indústria cervejeira (malte). Esse material destaca-se por sua abundância, baixo custo e elevado teor de carbono, tornando-o um precursor promissor para a produção de carvões ativados com propriedades adequadas para aplicação em embalagens. Além disso, sua valorização contribui diretamente para a redução de resíduos agroindustriais e para estratégias de economia circular (Borges et al., 2024). A estrutura porosa do CA confere elevada capacidade de adsorção de moléculas líquidas e/ou gasosas, ampliando sua aplicação não apenas como agente de reforço estrutural, mas também como suporte para imobilização de compostos bioativos (Santos et al., 2019; Santos et al., 2020).

### **2.3 Carvão ativado: aspectos importantes**

O carvão ativado (CA) pode ser definido como um material de carbono caracterizado por apresentar uma estrutura porosa altamente desenvolvida e uma elevada área superficial específica. Em sua superfície, podem ser encontrados heteroátomos, como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (O, N, H), ligados aos átomos de carbono, o que o torna reconhecido como um material de elevada resistência mecânica, alta estabilidade química e com capacidade de adsorver gases, líquidos ou impurezas dentro de seus poros, o que permite sua utilização em processos para clarificação, desodorização e purificação de líquidos e gases (Borges et al., 2024; Santos et al., 2020; Santos et al., 2019).

A produção de carvões envolve duas etapas principais: a ativação e a carbonização, que podem ocorrer simultaneamente ou de forma separada. A ativação é uma etapa importante na síntese de carvões, isto porque é nesta etapa que ocorre a formação ou aumento da porosidade do carvão ativado (CA), do seu volume de microporos, bem como a criação de novos poros no

material precursor. Esse processo pode ser conduzido por dois métodos principais: ativação física e ativação química (Borges et al., 2024; Santos et al., 2020).

Na ativação física, o precursor é submetido a temperaturas elevadas (700-900°C) em uma atmosfera inerte para evitar a combustão. Nessa etapa do processo ocorre a remoção de heteroátomos e substâncias voláteis, resultando em um material com alto teor de carbono e com poros na faixa de microporos (Abuelnoor et al., 2021).

A ativação química ocorre em três etapas bem definidas: inicialmente, o precursor é impregnado com um agente ativante desidratante, que penetra em sua estrutura e promove modificações químicas; em seguida, o material impregnado é submetido a tratamento térmico sob atmosfera inerte, no qual a carbonização e a ativação acontecem simultaneamente, resultando na degradação da matéria orgânica e no desenvolvimento da estrutura porosa; na última etapa o carvão obtido é lavado para remover resíduos do agente químico e subprodutos formados, sendo posteriormente seco, o que garante a obtenção de um material com elevada área superficial e porosidade desenvolvida (Fischer et al, 2017).

O carvão ativado, independentemente do método de síntese empregado, apresenta vários grupos funcionais superficiais, como carboxila, carbonila, fenóis e quinonas, além de uma estrutura altamente porosa composta por poros de diferentes tamanhos, classificados em macroporos ( $> 50$  nm), mesoporos (2–50 nm) e microporos ( $< 2$  nm) (Figura 2) (Sultana et al., 2022). Os microporos são os principais responsáveis pelo processo de adsorção, por concentrarem a maior parte da área superficial e atuarem como sítios ativos para a retenção das moléculas adsorvidas, enquanto os mesoporos facilitam o acesso das moléculas aos microporos internos. Já os macroporos contribuem para a eficiência global do processo adsorptivo, especialmente no transporte e na adsorção de moléculas de maior tamanho, otimizando o desempenho do material (Fischer et al., 2017; Wang et al., 2022).

A utilização de subprodutos agroindustriais ricos em carbono, como resíduos do processamento de frutas e cascas de grãos, tem sido amplamente investigada como alternativa para a produção de carvões ativados de baixo custo e alta qualidade. Além de apresentarem grande disponibilidade, esses precursores contribuem para a sustentabilidade do processo produtivo, ao reduzir o descarte de resíduos e agregar valor a materiais que seriam descartados, promovendo maior eficiência econômica e ambiental na obtenção de materiais adsorventes (Santos et al., 2019; Santos et al., 2020). Devido a sua elevada capacidade adsorptiva o carvão ativado tem sido utilizado em embalagens ativas como absorvedor de gases e umidade, porém, em geral, esses materiais não são produzidos a partir de subprodutos agroindustriais, evidenciando uma oportunidade para soluções mais sustentáveis (Wei et al., 2021). Além de

sua aplicação consolidada como adsorvente de gases, líquidos e contaminantes, as propriedades estruturais do carvão ativado, favorecem a sua utilização como suporte para a imobilização de compostos bioativos, sem comprometer sua estabilidade estrutural, o que pode possibilitar a liberação gradual desses compostos (Borges et al., 2024).

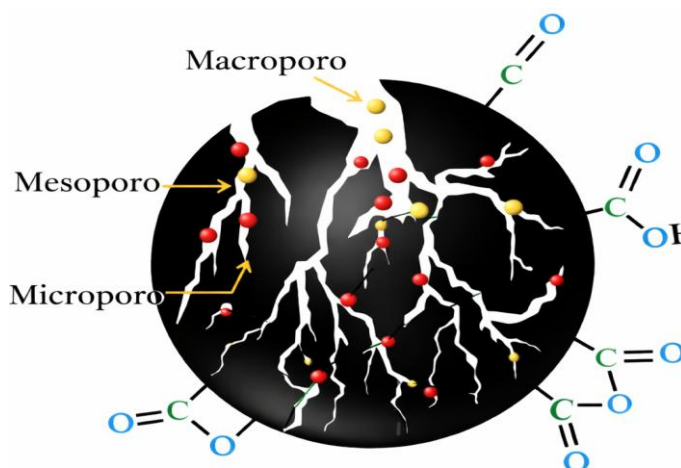


**Figura 2.** Representação esquemática da estrutura dos poros e grupos funcionais superficiais do carvão ativado. Fonte: (Sultana et al., 2022).

## 2.4 Utilização de extratos vegetais para obtenção de embalagens ativas

Extratos vegetais destacam-se como fontes naturais de compostos bioativos com reconhecida atividade antioxidante e antimicrobiana, cuja eficácia está associada à presença de metabólitos secundários capazes de interagir com componentes da membrana celular de microrganismos, comprometendo sua integridade e inibindo seu crescimento, o que os torna promissores para aplicação em embalagens ativas voltadas à conservação de alimentos perecíveis (Kamau et al., 2025).

Entre os extratos vegetais, aqueles obtidos de *Clitoria ternatea* apresentam potencial tecnológico, pois suas flores são ricas em flavonoides, como rutina, kaempferol, delphinidinas e seus glicosídeos, compostos associados a importantes propriedades bioativas (Chusak et al., 2019). Estudos como o de Nascimento et al. (2024), que incorporaram extrato de *Clitoria ternatea* em filmes biodegradáveis à base de amido-PVA, demonstraram que a atividade antioxidante é dependente da concentração do extrato, que sua presença pode influenciar propriedades mecânicas e que a liberação de polifenóis é favorecida em meios aquosos devido ao intumescimento da matriz polimérica.

O desenvolvimento de embalagens ativas à base de polímeros biodegradáveis, a partir da incorporação de extratos de *C. ternatea* previamente adsorvidos em carvão ativado obtido a partir de subprodutos agroindustriais, constitui uma abordagem alinhada à valorização de resíduos e à obtenção de materiais com funcionalidade tecnológica e com potencial para aplicação na conservação pós-colheita de frutas. A iniciativa também se relaciona ao ODS 9, Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao fomentar pesquisa aplicada e o desenvolvimento de materiais biodegradáveis com funcionalidade ativa, alinhados aos princípios da bioeconomia e à valorização de subprodutos agroindustriais. No âmbito do ODS 12, Consumo e Produção Responsáveis, destaca-se o uso de polímeros biodegradáveis e o reaproveitamento de resíduos agroindustriais para obtenção de carvão ativado, o que favorece a circularidade de materiais e a redução de impactos ambientais associados às embalagens convencionais (UNEP, 2020).

## **2.5 Conservação pós-colheita de frutas: aspectos fisiológicos e produção de etileno**

As perdas pós-colheita de frutas representam um sério problema no mercado de frutas mundial. Danos causados nas frutas durante o transporte e armazenamento, principalmente de frutas climatéricas (como banana, manga, tomate) levam ao aumento da produção de etileno, elevando a atividade metabólica o que contribui para perdas pós-colheita, que podem ser consideradas normais quando resultantes de processos internos, mas tornam-se anormais sob condições de estresse como armazenamento inadequado (Chitarra, 2005). Em países em desenvolvimento como o Brasil, falhas estruturais, transporte inadequado, manipulação incorreta, interrupções na cadeia do frio e uso de embalagens ineficientes intensificam os efeitos do etileno, favorecendo o amadurecimento acelerado e a senescência precoce e perdas ao longo da cadeia produtiva (Yahia, 2019).

O etileno é um fitormônio cuja aplicação exógena é empregada para acelerar o amadurecimento, sendo conhecido desde a antiguidade, podendo ser classificado em etileno endógeno, sintetizado pela própria fruta, e exógeno, oriundo de fontes externas, como a combustão de biomassa ou outros frutos próximos que, mesmo em baixíssimas concentrações (inferiores a 0,001  $\mu\text{L/L}$ ), exerce efeitos importantes: no início do amadurecimento, pode ser benéfico ao estimular processos como síntese de pigmentos (licopeno e antocianina) e degradação da clorofila, mas, em excesso, acelera a senescência, prejudicando a qualidade e reduzindo a vida útil dos produtos, uma vez que atua ativando enzimas como amilase e poligalacturonase que degradam a parede celular, o que leva ao amolecimento do tecido, perda

de firmeza e maior suscetibilidade a danos físicos e microbiológicos (Salinas et al, 2024; Tucker et al, 2017).

O precursor-chave do etileno nas plantas superiores é a metionina, que se converte em S-adenosilmetionina (AdoMet ou SAM). Esta substância é utilizada em duas vias: uma parte é reciclada, regenerando a metionina, e a outra é convertida em Ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), que, em condições aeróbicas, forma o etileno. Esse processo é representado através do ciclo de Yang (Chitarra, 2005) (Figura 3).

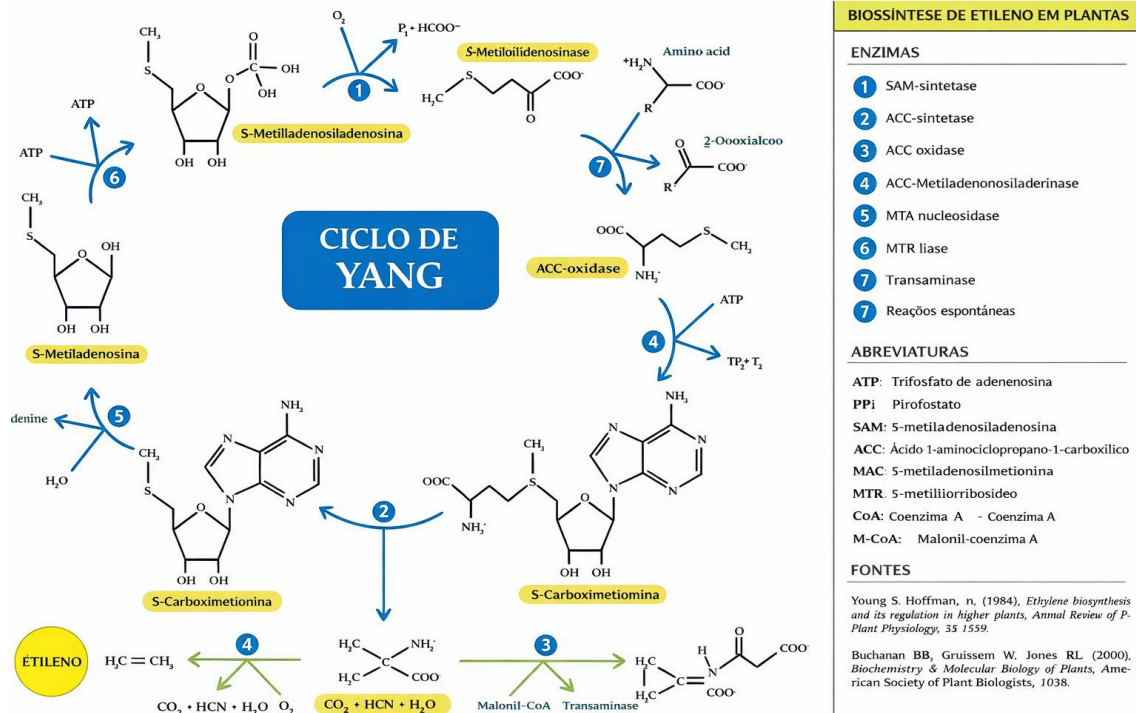


**Figura 3.** Ciclo de Yang. Fonte: Adaptado Salinas (2024).

Durante o amadurecimento de frutas climatéricas, ocorre um aumento da enzima ACC sintase e no teor de ACC, o que acelera a produção de etileno e consequentemente o amadurecimento do fruto (Chitarra, 2005). Portanto, o controle da exposição ao etileno e a adoção de estratégias que inibam sua síntese ou ação são fundamentais para preservar a integridade e o valor comercial dos frutos ao longo da cadeia de distribuição, dentre as quais destacam-se o uso de inibidores da síntese de etileno, como o 1-MCP, uso de revestimentos comestíveis, emprego de atmosfera modificada e de embalagens com propriedades ativas (Salinas et al., 2024). A aplicação de embalagens biodegradáveis associadas a ingredientes ativos apresenta resultados promissores no retardo do amadurecimento, da senescência e na restrição do ataque microbiano em frutas como manga, banana, caqui e morango, configurando-se como alternativa às embalagens sintéticas tradicionalmente utilizadas (Kalita et al., 2026).

## 2.6 Banana (*Musa spp*): produção, fisiologia e desafios na conservação pós-colheita

A banana (*Musa spp.*), pertencente à família Musaceae, é uma das frutas tropicais mais importantes no mercado mundial, amplamente consumida devido ao seu baixo custo e elevado valor nutricional (Shinga, 2025). Constitui fonte importante de carboidratos, fibras, vitaminas, compostos fenólicos e, especialmente, potássio, sendo reconhecida como alimento de fácil digestão e importante fonte de energia na dieta humana (Al-Dairi, 2023). Além do consumo *in natura*, é utilizada na forma processada, incluindo chips, frutas secas, farinhas, pães, sorvetes, smoothies e ingredientes para alimentos funcionais, podendo ainda ser empregada na alimentação infantil devido ao seu perfil nutricional (Al-Dairi, 2023). Em termos produtivos, a banana ocupa posição de destaque no cenário agrícola global, com a Índia liderando tanto o consumo quanto a produção mundial, representando aproximadamente 34,5% da produção total, enquanto a Ásia se consolida como a principal região produtora (Kalita et al., 2026).

Do ponto de vista fisiológico, a banana é classificada como fruto climatérico, caracterizado pela continuidade do amadurecimento após a colheita, processo regulado pela produção de etileno (Wang, 2024). Esse hormônio vegetal desencadeia alterações bioquímicas e estruturais, como amolecimento da polpa, mudança de coloração da casca e modificação do perfil aromático. Embora o etileno seja essencial para o amadurecimento normal, o aumento de sua produção durante armazenamento afeta a qualidade interna (acidez, textura, aroma e sabor), a aparência externa e o valor comercial da banana, resultando perdas pós-colheita significativas (Wang, 2024; Chitarra, 2005).

Estratégias de conservação como atmosfera controlada e embalagem a vácuo auxiliam no controle de temperatura e gases, contribuindo para a redução de perdas e o prolongamento da vida útil. Diferentes sistemas de embalagem têm sido empregados, incluindo filmes de polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila, revestimentos comestíveis, filmes nanocompósitos, além de materiais compostáveis e biodegradáveis (Kalita et al., 2026). Entre as abordagens mais promissoras, destacam-se embalagens ativas, que vêm despertando crescente interesse por sua eficácia na redução das perdas pós-colheita em frutos sensíveis a esse gás, superando limitações de tecnologias convencionais de armazenamento (Öztürk & Ayhan, 2023).

### 3. OBJETIVO

#### 3.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da incorporação de carvão ativado obtido a partir de subproduto de malte em filmes à base de álcool polivinílico (PVA), utilizando-o como agente de reforço estrutural e suporte para compostos bioativos extraídos de *Clitoria ternatea*, visando ao desenvolvimento de embalagens ativas para a conservação pós-colheita de banana-prata (*Musa spp.*)..

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o subproduto de malte quanto à sua composição química e estrutural, avaliando seu potencial como precursor para a produção de carvão ativado;
- Produzir e caracterizar o carvão ativado obtido a partir do subproduto de malte, determinando suas propriedades texturais, químicas e superficiais;
- Extrair e determinar o teor de compostos fenólicos e a atividade antioxidante dos extratos de *Clitoria ternatea*;
- Adsorve os biocompostos de *Clitoria ternatea* no carvão ativado, avaliando a eficiência de adsorção para diferentes concentrações do extrato;
- Desenvolver filmes à base de polivinil álcool (PVA) incorporados com carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos;
- Caracterizar os filmes obtidos quanto às propriedades mecânicas, estruturais, ópticas, de barreira, solubilidade e biodegradabilidade;
- Determinar a atividade antioxidante dos filmes desenvolvidos;
- Investigar a eficiência das embalagens ativas na conservação pós-colheita de banana, por meio da avaliação de parâmetros físicos e químicos durante o armazenamento.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Abuelnoor, N., AlHajaj, A., Khaleel, M., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. M. (2021). Activated carbons from biomass-based sources for CO<sub>2</sub> capture applications. *Chemosphere*, 282, 131111. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>
- Ahmed, M. W., Haque, M. A., Mohibbullah, M., Khan, M. S. I., Islam, M. A., Mondal, M. H. T., & Ahmmed, R. (2022). A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100913. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100913>
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2023). Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.003>
- Bacha, E. G., Demsash, H. D., Shumi, L. D., & Debesa, B. E. (2022). Investigation on reinforcement effects of nanocellulose on the mechanical properties, water absorption capacity, biodegradability, optical properties, and thermal stability of a polyvinyl alcohol nanocomposite film. *Advances in Polymer Technology*, 2022, 6947591. <https://doi.org/10.1155/2022/6947591>
- Borges, J. F., Nascimento, P. A., Alves, A. N., Santos, M. P. F., Brito, M. J. P., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2024). Laccase immobilization on activated carbon from hydrothermal carbonization of corn cob. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 501–520. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02160-1>
- Cazón, P., Mateus, A. R., & Sanches Silva, A. (2025). Advances in active packaging using natural biopolymers and fruit by-products for enhanced food preservation. *Food Research International*, 213, 116439. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116439>
- Chawla, R., Sivakumar, S., & Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements – A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024>
- Chen, J., Zheng, M., Tan, K. B., Lin, J., Chen, M., & Zhu, Y. (2022). Polyvinyl alcohol/xanthan gum composite film with excellent food packaging, storage and biodegradation capability as potential environmentally-friendly alternative to commercial plastic bag. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.119>
- Chitarra, M. I. F., & Chitarra, A. B. (2005). *Pós-colheita de frutas e hortaliças: Fisiologia e manuseio* (2<sup>a</sup> ed. rev. amp.). Universidade Federal de Lavras.
- Cho, J., Joshi, M. S., & Sun, C. T. (2006). Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles. *Composites Science and Technology*, 66(13), 1941–1952. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.12.028>
- Chusak, C., Ying, J. A. Y., Zhien, J. L., Pasukamonset, P., Henry, C. J., Ngamukote, S., & Adisakwattana, S. (2019). Impact of *Clitoria ternatea* (butterfly pea) flower on in vitro starch digestibility, texture and sensory attributes of cooked rice using domestic cooking methods. *Food Chemistry*, 295, 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.157>

- Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M. M., & Holcman, V. (2025). Biodegradable polymers: Properties, applications, and environmental impact. *Polymers*, 17(14), 1981. <https://doi.org/10.3390/polym17141981>
- Ferraz, J. B. S., Oliveira, J. S., Oliveira, E. L., & Oliveira, C. P. (2025). Development and characterization of biodegradable films based on carboxymethylcellulose with incorporated eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) nanocellulose. *Food Chemistry*, 495(Part 3), 146532. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146532>
- Fischer, C., Oschatz, M., Nickel, W., Leistenschneider, D., Kaskel, S., & Brunner, E. (2017). Bioinspired carbide-derived carbons with hierarchical pore structure for the adsorptive removal of mercury from aqueous solution. *Chemical Communications*, 53, 4845–4848. <https://doi.org/10.1039/C6CC08041C>
- Garavand, F., Rouhi, M., Razavi, S. H., Cacciotti, I., & Mohammadi, R. (2017). Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 687–707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.093>
- Ge, J., Lu, W., Zhang, H., Gong, Y., Wang, J., Xie, Y., Chang, Q., & Deng, X. (2024). Exploring sustainable food packaging: Nanocellulose composite films with enhanced mechanical strength, antibacterial performance, and biodegradability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259(Part 2), 129200. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129200>
- Gonçalves, G. C. P., Rosas, A. L. G., Sousa, R. C., Vieira, T. R. R., Sousa, T. C. A., Ramires, T., Silveira, T. F. F., Barros, L., Silva, W. P., Dias, Á. R. G., Zavareze, E. R., & Meinhart, A. D. (2024). A green method for anthocyanin extraction from *Clitoria ternatea* flowers cultivated in southern Brazil: Characterization, in vivo toxicity, and biological activity. *Food Chemistry*, 435, 137575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137575>
- He, Y., Lu, L., Lin, Y., Li, R., Yuan, Y., Lu, X., Zou, Y., Zhou, W., Wang, Z., & Li, J. (2022). Intelligent pH-sensing film based on polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystal with purple cabbage anthocyanins for visually monitoring shrimp freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 218, 900–908. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.194>
- Kalita, P., Goswami, A., Bhattacharjee, B., Nath, D., & Roy, S. (2026). Recent advances in biodegradable polymer-based packaging film/coatings on shelf-life extension of banana. *Food Chemistry*, 507, 148206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.148206>
- Kamau, P. G., Cruz-Romero, M. C., Alzate, P. C., Morris, M. A., & Kerry, J. P. (2025). Active packaging containing natural antimicrobials as a potential and innovative technology to extend shelf-life of fish products – A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 49, 101500. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101500>
- Liu, D., Cui, Z., & Zhong, Y. (2021). A colorimetric film based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose incorporated with red cabbage anthocyanin for monitoring pork freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100641>
- Merz, B., Capello, C., Leandro, G. C., Moritz, D. E., Monteiro, A. R., & Valencia, G. A. (2020). A novel colorimetric indicator film based on chitosan, polyvinyl alcohol and anthocyanins from jambolan (*Syzygium cumini*) fruit for monitoring shrimp freshness.

*International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 625–632.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.048>

Nascimento, J. V. do, Silva, K. A., Giuliangeli, V. C., Mendes, A. L. D., Piai, L. P., Michels, R. N., Dal Bosco, T. C., Ströher, G. R., & Shirai, M. A. (2024). Starch-PVA based films with *Clitoria ternatea* flower extract: Characterization, phenolic compounds release and compostability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 255, 128232.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128232>

Nilsen-Nygaard, J., Fernández, E. N., Radusin, T., Rotabakk, B. T., Sarfraz, J., Sharmin, N., Sivertsvik, M., Sone, I., & Pettersen, M. K. (2021). Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1333–1380. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12715>

Öztürk, M., & Ayhan, Z. (2023). Combined effects of ethylene scavenging-active packaging system and modified atmosphere to reduce postharvest losses of ethylene sensitive produce: Banana and kiwifruit. *Packaging Technology and Science*, 36(11), 951–967.  
<https://doi.org/10.1002/pts.2764>

Qi, J., Zhang, H., Wang, Y., Mani, M. P., & Jaganathan, S. K. (2018). Development and blood compatibility assessment of electrospun polyvinyl alcohol blended with metallocene polyethylene and plectranthus amboinicus (PVA/mPE/PA) for bone tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 2777–2788. <https://doi.org/10.2147/IJN.S151242>

Salinas, R. A., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., & Acosta-Motos, J. R. (2024). Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality. *Horticulturae*, 10(8), 840.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae10080840>

Santos, M. P. F., Brito, M. J. P., Júnior, V. C. S., Bonomo, R. C. F., & Veloso, C. M. (2019). Pepsin immobilization on biochar by adsorption and covalent binding, and its application for hydrolysis of bovine casein. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(6), 1982–1990. <https://doi.org/10.1002/jctb.5981>

Santos, M. P. F., Silva, J. F., Fontan, R. C. I., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2020). New insight about the relationship between the main characteristics of precursor materials and activated carbon properties using multivariate analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(7), 1501–1511. <https://doi.org/10.1002/cjce.23721>

Shinga, M. H., Silue, Y., & Fawole, O. A. (2025). Recent advancements and trends in postharvest application of edible coatings on bananas: A comprehensive review. *Plants*, 14(4), 581. <https://doi.org/10.3390/plants14040581>

Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H., & Alam, S. M. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100382.  
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100382>

Trajkovska Petkoska, A., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International*, 140, 109981. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>

Tucker, G., Yin, X., Zhang, A., Wang, M., Zhu, Q., Liu, X., Xie, X., Chen, K., & Grierson, D. (2017). Ethylene and fruit softening. *Food Quality and Safety*, 1(4), 253–267. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx024>

UNEP (2020). *Sustainability and circularity in the textile value chain: Global stocktaking*. United Nations Environment Programme.

Versino, F., Ortega, F., Monroy, Y., Rivero, S., López, O. V., & García, M. A. (2023). Sustainable and bio-based food packaging: A review on past and current design innovations. *Foods*, 12(5), 1057. <https://doi.org/10.3390/foods12051057>

Wang, T., Song, Y., Lai, L., Fang, D., Li, W., Cao, F., & Su, E. (2024). Sustaining freshness: Critical review of physiological and biochemical transformations and storage techniques in postharvest bananas. *Food Packaging and Shelf Life*, 46, 101386. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101386>

Wang, X., Cheng, H., Ye, G., Fan, J., Yao, F., Wang, Y., Jiao, Y., Zhu, W., Huang, H., & Ye, D. (2022). Key factors and primary modification methods of activated carbon and their application in adsorption of carbon-based gases: A review. *Chemosphere*, 287(Pt 2), 131995. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995>

Yahia, E. M., Fonseca, J. M., & Kitinoja, L. (2019). Postharvest losses and waste. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest technology of perishable horticultural commodities* (pp. 43–69). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00002-X>

Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2018). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165–199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

Yim, Y. J., & Kim, B. J. (2023). Preparation and characterization of activated carbon/polymer composites: A review. *Polymers*, 15(16), 3472. <https://doi.org/10.3390/polym15163472>

## CAPÍTULO II

---

**ARTIGO 1**

**Sistema carreador híbrido à base de emulsão e carvão ativado derivado de resíduo de malte cervejeiro para incorporação de compostos bioativos de *Clitoria ternatea* em filmes ativos de álcool polivinílico destinados à conservação pós-colheita de bananas**

---

## RESUMO

As embalagens ativas biodegradáveis têm se destacado como uma estratégia promissora para reduzir as perdas pós-colheita de frutas frescas. Neste estudo, foi desenvolvido um filme ativo à base de álcool polivinílico (PVA), incorporando carvão ativado obtido a partir do subproduto agroindustrial de malte, como sistema carreador de compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, visando à conservação pós-colheita de bananas. O carvão ativado apresentou elevada área superficial específica ( $804,29 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), estrutura predominantemente micro-mesoporosa e eficiência de adsorção superior a 80% para compostos fenólicos, demonstrando boa capacidade de imobilização de compostos bioativos. Os filmes preservaram a estrutura química da matriz de PVA e apresentaram elevada biodegradabilidade, com atividade antioxidante aproximadamente 6,5 vezes superior à do filme controle. Durante o armazenamento, os filmes contendo a emulsão e o sistema carreador reduziram a perda de massa para valores entre 7,59-11,49%, em comparação com 15,26% no controle sem embalagem, preservaram a firmeza da polpa (0,37-0,61 N versus 0,19 N) e da casca (1,25-1,54 N versus 0,75 N) e mantiveram os sólidos solúveis entre 6,6 e 7,6 °Brix, enquanto o filme de PVA sem compostos bioativos e o controle sem embalagem apresentaram 23,3 e 25,6 °Brix, respectivamente, indicando controle do amadurecimento. Os resultados demonstram que o carvão ativado produzido a partir de resíduo de malte constitui um sistema carreador eficiente para compostos bioativos em filmes ativos de PVA e representa uma estratégia sustentável para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis destinadas à conservação pós-colheita de bananas.

**Palavras-chave:** Embalagens ativas; Emulsão; Subproduto agroindustrial; Adsorção; Controle no amadurecimento.

## 1. INTRODUÇÃO

As perdas pós-colheita de frutas e hortaliças representam um dos principais desafios para a cadeia produtiva, comprometendo a disponibilidade de alimentos, a rentabilidade econômica e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Em diversos países, essas perdas podem superar 50% da produção de produtos frescos, decorrentes de alterações fisiológicas naturais, infecções por microrganismos, ataque de insetos, danos mecânicos e condições inadequadas de transporte e armazenamento (Kaur et al., 2024; Devi, 2026). Como consequência, têm-se buscado alternativas tecnológicas para aplicação na conservação pós-colheita, a fim de controlar os processos fisiológicos dos frutos e preservar sua qualidade durante a comercialização.

O uso de embalagens continua sendo uma das principais alternativas para reduzir perdas pós-colheita, uma vez que esses materiais são capazes de reduzir a perda de água, controlar as trocas gasosas e proteger os produtos contra agentes deteriorantes (Aljabary et al., 2025). Atualmente, polímeros sintéticos derivados do petróleo, como polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e tereftalato de polietileno (PET), são os mais empregados em embalagens para frutas e hortaliças devido à sua elevada resistência mecânica, baixa permeabilidade e baixo custo de produção (Trajkovska Petkoska et al., 2021). Entretanto, a elevada estabilidade química desses materiais dificulta sua degradação após o descarte, o que contribui para o acúmulo persistente de resíduos plásticos no ambiente e reforça a necessidade de alternativas mais sustentáveis (Trajkovska Petkoska et al., 2021; Law & Narayan, 2022). Em resposta a essa demanda, os filmes biodegradáveis têm recebido atenção crescente devido ao menor impacto ambiental e ao potencial de aplicação em embalagens pós-colheita.

Entre os polímeros empregados na produção de filmes biodegradáveis, o álcool polivinílico (PVA) destaca-se por sua capacidade de formar filmes, transparência, biocompatibilidade, baixa toxicidade, boas propriedades mecânicas e reduzida permeabilidade ao oxigênio, características que favorecem sua aplicação em embalagens para conservação de alimentos (Abedi-Firoozjah et al., 2023; Shirdel & Zeinali, 2026). A alta densidade de grupos hidroxila em sua estrutura molecular favorece a formação de ligações de hidrogênio e confere alta compatibilidade com outros polímeros, nanopartículas e compostos bioativos, permitindo o desenvolvimento de materiais com propriedades estruturais e funcionais ajustáveis. Além disso, o PVA apresenta potencial de biodegradação em condições ambientais, sendo degradado pela ação de microrganismos, o que amplia seu interesse como alternativa aos polímeros convencionais derivados do petróleo (Shirdel & Zeinali, 2026).

Apesar dessas vantagens, a elevada hidrofilicidade do PVA favorece a absorção de água, o intumescimento da matriz e o aumento da permeabilidade ao vapor de água, o que reduz a estabilidade e a eficiência do material como embalagem para produtos com elevada atividade de água, como frutas e hortaliças frescas. Por essa razão, diferentes estratégias têm sido propostas para minimizar essas limitações, incluindo a combinação com outros polímeros, a incorporação de agentes de reforço e a adição de compostos bioativos, resultando em filmes com propriedades mecânicas, de barreira e funcionais superiores às do PVA puro (Gaaz et al., 2015; Shirdel & Zeinali, 2026).

A boa compatibilidade do PVA com compostos bioativos tem favorecido o desenvolvimento de embalagens ativas, nas quais a matriz polimérica deixa de atuar apenas como uma barreira física e passa a desempenhar funções capazes de modificar o ambiente ao redor do alimento (Abedi-Firoozjah et al., 2023; Shirdel & Zeinali, 2026). A incorporação de compostos funcionais permite sua liberação controlada ou sua atuação por meio de mecanismos de adsorção e sequestro de moléculas específicas, contribuindo para reduzir processos oxidativos, inibir o crescimento microbiano, controlar as trocas gasosas da embalagem e retardar alterações fisiológicas associadas ao amadurecimento e à senescência dos produtos hortifrutícolas (Yildirim et al., 2018; Versino et al., 2023; Cazón et al., 2025). Em comparação com a incorporação direta desses compostos ao alimento, sua imobilização na matriz polimérica proporciona maior estabilidade, proteção contra degradação e liberação mais gradual, aumentando sua eficiência durante o armazenamento (Versino et al., 2023; Cazón et al., 2025).

Essa técnica é particularmente importante para frutas e hortaliças frescas, cuja atividade metabólica após a colheita favorece processos como respiração, produção de etileno, perda de água, oxidação e crescimento microbiano, fatores diretamente relacionados à redução da vida útil (Yildirim et al., 2018; Versino et al., 2023). Entre esses produtos, as bananas (*Musa spp.*), que estão entre os frutos climatéricos mais comercializados mundialmente, apresentam alta perecibilidade após a colheita, em decorrência da intensa atividade respiratória e da produção autocatalítica de etileno, que desencadeiam uma série de alterações fisiológicas e bioquímicas, incluindo a degradação da clorofila, o amolecimento da polpa, a conversão de amido em açúcares, o escurecimento e a maior suscetibilidade ao ataque microbiano. Esses processos reduzem a vida útil do fruto durante o armazenamento, o transporte e a comercialização, resultando em perdas econômicas significativas ao longo da cadeia produtiva (Al-Dairi et al., 2023; Wang et al., 2024).

As embalagens ativas têm se destacado como uma estratégia promissora para retardar essas alterações, por meio da incorporação de compostos bioativos capazes de exercer atividade

antioxidante e antimicrobiana ou de controlar o microambiente ao redor do alimento, contribuindo para a preservação da qualidade e o prolongamento da vida útil de frutos climatéricos (Kalita et al., 2026; Papoutsis et al., 2025). Entre as fontes vegetais de compostos bioativos, *Clitoria ternatea* L., uma planta trepadeira tropical da família *Fabaceae*, destaca-se pelo elevado teor de antocianinas poliaciladas do grupo das ternatinas, pigmentos responsáveis por sua coloração azul característica e reconhecidos por apresentarem maior estabilidade estrutural em comparação às antocianinas não aciladas (Hasanah et al., 2023; Handayani et al., 2024). Além das ternatinas, as flores contêm flavonoides e outros compostos fenólicos que conferem elevada atividade antioxidante e antimicrobiana, contribuindo para reduzir processos oxidativos e retardar a deterioração dos alimentos. Essas propriedades tornam os extratos de *C. ternatea* uma alternativa promissora para aplicação em embalagens ativas destinadas à conservação de produtos perecíveis, como bananas (Grzebieniarz et al., 2023; Pasukamonset et al., 2018).

Apesar do potencial dos extratos vegetais para aplicação em embalagens ativas, muitos compostos bioativos são sensíveis à luz, ao oxigênio, à umidade e às variações de temperatura, o que compromete sua estabilidade e reduz sua eficiência durante o armazenamento. Além disso, sua incorporação direta em matrizes poliméricas pode alterar as propriedades estruturais e mecânicas dos filmes (Ahmed et al., 2022; Versino et al., 2023). Buscando contornar essas dificuldades, sistemas carreadores têm sido investigados por protegerem os compostos bioativos contra a degradação, aumentarem sua estabilidade e possibilitarem sua liberação controlada, o que amplia a eficiência dos materiais destinados à conservação pós-colheita. Entre os diferentes materiais disponíveis, o carvão ativado destaca-se pela elevada área superficial, estrutura porosa e presença de grupos funcionais superficiais, características que favorecem a adsorção de moléculas orgânicas e a interação com matrizes poliméricas (Santos et al., 2020; Borges et al., 2024). Além de atuar como sistema carreador de compostos bioativos, esse material pode contribuir para o reforço estrutural dos filmes e, quando produzido a partir de resíduos agroindustriais, agregar valor aos coprodutos de baixo aproveitamento, em consonância com os princípios da economia circular (Yim & Kim, 2023; Viana et al., 2025).

Embora diferentes estratégias tenham sido propostas para o desenvolvimento de embalagens ativas contendo extratos vegetais, ainda persistem desafios relacionados à proteção dos compostos bioativos durante o processamento e o armazenamento, bem como ao controle de sua disponibilidade na matriz polimérica. Estudos que integrem sistemas carreadores produzidos a partir de resíduos agroindustriais e compostos bioativos naturais para aplicação em embalagens destinadas à conservação pós-colheita ainda são limitados. A combinação

dessas abordagens pode reunir, em um único sistema, proteção e liberação controlada de compostos bioativos, reforço estrutural da matriz polimérica e valorização de resíduos agroindustriais. Considerando o potencial desse sistema, este estudo teve como objetivo desenvolver filmes ativos à base de álcool polivinílico incorporando compostos bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvidos em carvão ativado produzido a partir de resíduo de malte, caracterizar suas propriedades estruturais, físico-químicas, mecânicas, antioxidantes e de biodegradação, e avaliar sua eficiência na conservação pós-colheita de bananas (*Musa spp.*).

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material e métodos**

Para a produção de carvão ativado, foi utilizado resíduo do processamento do malte, proveniente da fabricação de cerveja de uma indústria localizada no município de Vitória da Conquista-BA, Brasil. As flores secas de *Clitoria ternatea* L. foram adquiridas de Flor da Fada Azul, Mato Grosso do Sul, Brasil. O material vegetal foi fornecido na forma desidratada, próprio para o preparo de infusão, e armazenado ao abrigo da luz e da umidade até o momento da extração. O álcool polivinílico (PVA - Neon Comercial Ltda., São Paulo, Brasil), com peso molecular médio de  $104.500 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  e grau de hidrólise entre 87 e 89%, foi utilizado na obtenção dos filmes.

### **2.2 Síntese do carvão ativado**

O carvão ativado foi produzido a partir de resíduo de malte previamente seco em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 h, triturado e peneirado até a granulometria de 20 mesh. A ativação química foi realizada com ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 85%, P.A.) na razão de impregnação de 1,5:1 (massa de ativante/massa do precursor), conforme Santos et al. (2020). Após 48 h de impregnação, o material foi carbonizado em forno mufla a  $500^\circ\text{C}$  por 2 h sob fluxo de nitrogênio ( $50 \text{ mL min}^{-1}$ ), lavado com água destilada e com solução de NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  até atingir pH neutro e seco em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 24 h.

### **2.3 Caracterização do material precursor e carvão ativado**

O material precursor foi caracterizado quanto aos teores de umidade e de cinzas pelos métodos 925.45 e 920.03 da AOAC (2023), respectivamente. Os teores de lignina, celulose e hemicelulose foram determinados pelos métodos de fibra em detergente neutro e em detergente

ácido (Van Soest et al., 1991), enquanto o teor de cinzas do carvão ativado foi determinado segundo a AOAC (2023).

Os grupos funcionais do material precursor e do carvão ativado foram avaliados por FTIR no espectrômetro Cary 630 FTIR (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, EUA), equipado com acessório ATR. Os espectros foram obtidos entre 650 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e média de 20 varreduras. O ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) foi determinado pelo método dos 11 pontos descrito por Kuśmierk et al. (2016), utilizando 50 mg de carvão em 50 mL de solução de NaCl 0,10  $\text{mol L}^{-1}$  com pH inicial ajustado entre 1 e 11. As propriedades texturais foram determinadas por adsorção e dessorção de  $\text{N}_2$  a 77 K em um analisador Micromeritics ASAP 2420 (Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, GA, EUA). A área superficial específica ( $S_{\text{BET}}$ ), a distribuição do tamanho de poros e o volume de microporos foram determinados pelos métodos BET (Brunauer et al., 1938), BJH (Barrett et al., 1951) e  $t$ -plot (Lippens & de Boer, 1965), respectivamente.

## 2.4 Adsorção dos compostos fenólicos extraídos da *Clitória ternatea*

A adsorção dos compostos bioativos de *Clitória ternatea* foi realizada utilizando o carvão ativado produzido como adsorvente. Extratos aquosos foram preparados por infusão das flores previamente secas, nas concentrações de 5, 10 e 15  $\text{g L}^{-1}$ , em água destilada, a aproximadamente 80 °C, por 5 min. Aliquotas de 5,0 mL de cada extrato foram adicionadas a tubos de centrifugação contendo 20 mg de carvão ativado e mantidas sob agitação orbital (25 rpm) à temperatura ambiente (25 °C) por 30, 60, 90 e 120 min, para determinação da cinética de adsorção dos compostos presentes nos extratos e do tempo de equilíbrio do sistema.

Após cada período, as suspensões foram centrifugadas a 3500 rpm por 5 min, e o sobrenadante foi utilizado para determinação dos compostos fenólicos totais pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme Xiong et al. (2019). Para a análise, 120  $\mu\text{L}$  da amostra foram misturados a 750  $\mu\text{L}$  do reagente de Folin-Ciocalteu a 10% (v/v). Após 2 min de reação, foram adicionados 600  $\mu\text{L}$  de solução de carbonato de sódio a 7,5% (m/v), seguidos de incubação a 50 °C por 20 min ao abrigo da luz. As leituras de absorbância foram realizadas a 760 nm em espectrofotômetro UV-Vis (K37, Brasil), utilizando a curva analítica do ácido gálico para a quantificação dos compostos fenólicos totais, expressos em mg de equivalentes de ácido gálico (EAG). A capacidade de adsorção foi calculada pela diferença entre as quantidades iniciais e finais de fenólicos totais, utilizando a Equação 1.

$$C_{\text{ads}} (\text{mg/g}) = \frac{V(C_i - C_f)}{m_s} \quad (1)$$

Em que:  $C_{ads}$  é a capacidade de adsorção ( $\text{mg.g}^{-1}$ );  $V$  é o volume de solução (mL);  $C_i$  é a concentração inicial de fenólicos na solução ( $\text{mg.L}^{-1}$ );  $C$  é a concentração de fenólicos totais da solução ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) no equilíbrio;  $m_s$  é a massa do suporte (g).

## 2.5 Obtenção dos filmes à base de PVA

Os filmes foram produzidos pelo método de *casting*, conforme metodologia descrita por Oliveira et al. (2025) e Viana et al. (2025), com adaptações. Inicialmente, foi preparada uma solução filmogênica de álcool polivinílico (PVA; grau de hidrólise de 87-89%) a 5% (m/v), utilizando água destilada como solvente e glicerol (5%, m/m, em relação à massa de PVA) como plastificante. A solução foi submetida à agitação magnética até a completa dissolução do polímero.

Para melhorar a dispersão do carvão ativado na matriz filmogênica, foi preparada uma emulsão composta por água destilada, Tween 80 e óleo de soja, na proporção de 28:1:1 (v/v/v), e carvão ativado na concentração previamente definida em ensaios preliminares, homogeneizada no Ultra-Turrax (modelo T-18, IKA, Alemanha) a 15.000 rpm por 15 min. Nos tratamentos contendo compostos bioativos, utilizou-se carvão ativado previamente funcionalizado com extrato de *Clitoria ternatea*. Em seguida, a emulsão foi incorporada à solução filmogênica de PVA, sob agitação contínua, até a completa homogeneização. Para o tratamento controle, a solução filmogênica foi preparada sem a adição da emulsão contendo carvão ativado.

As soluções foram então vertidas em placas de vidro, utilizando volume padronizado por placa, e secas em estufa com circulação de ar forçada (modelo SL-102, Solab, Brasil), a  $40 \pm 0,5$  °C, por 48 h. Após a secagem, os filmes foram cuidadosamente removidos das placas e acondicionados à temperatura ambiente em torno de  $24 \pm 2$  °C, até a realização das análises. Todas as formulações foram preparadas em três repetições independentes.

## 2.6 Caracterização dos filmes obtidos

Os grupos funcionais dos filmes foram analisados por FTIR no modo de transmissão utilizando o espectrômetro modelo Cary630 FTIR (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA), empregando a metodologia descrita no item 2.2.

A espessura foi determinada conforme o método proposto por Escobar et al. (2009), utilizando um micrômetro digital (PIK B-Pantec, Brasil), com resolução de 0,001 mm. As medições foram realizadas em 15 pontos distribuídos aleatoriamente ao longo da superfície dos

filmes, incluindo a região central, as laterais e as extremidades. Os resultados foram expressos como a média das determinações.

A análise instrumental da cor foi realizada a  $25 \pm 1$  °C com colorímetro portátil (LS173, China), utilizando o sistema CIElab de medida, no qual  $a^*$  é a coordenada colorimétrica que varia do eixo + (vermelho) ao - (verde),  $b^*$  é a coordenada colorimétrica que varia do eixo + (amarelo) ao - (azul) e  $L^*$  é a luminosidade. A cromaticidade ( $C^*$ ) e o ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) foram calculados de acordo com as Equações 3-5 (Hernández-Guerrero et al., 2020).

$$h^0 = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ se } a > 0 \text{ e } b \geq 0 \quad (2)$$

$$h^0 = 180 + \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ se } a < 0 \quad (3)$$

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (4)$$

A morfologia da superfície e da seção transversal dos filmes foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento JSM-6610 (JEOL, Japão), operado a 10 kV. As amostras foram montadas em suportes metálicos com fita condutora de dupla face e recobertas com uma fina camada de ouro, utilizando um metalizador Desk V (Denton Vacuum LLC, Moorestown, EUA), antes das análises.

### 2.6.1 Propriedades de barreira dos filmes

A solubilidade em água dos filmes foi determinada conforme a metodologia proposta por Pérez Córdoba et al. (2017). Amostras dos filmes ( $2 \times 2$  cm<sup>2</sup>) foram secas em estufa a 100 °C por 24 h e pesadas em balança analítica (ME204/A, Mettler Toledo, Suíça) para determinação da massa seca inicial. Em seguida, as amostras foram imersas em tubos de centrifugação contendo 50 mL de água destilada e mantidas sob agitação orbital a 25 °C por 24 h. Após esse período, foram retiradas da água, novamente secas em estufa até massa constante e pesadas para determinação da massa seca final. A solubilidade em água foi expressa como a porcentagem de massa seca solubilizada durante a imersão.

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes foi determinada de acordo com o método ASTM E96-92 (2005), com adaptações. Amostras circulares dos filmes (diâmetro de aproximadamente 3 cm) foram hermeticamente fixadas na abertura de frascos de permeação contendo sílica gel seca, estabelecendo um ambiente com 0% de umidade relativa no interior do sistema. Os conjuntos de permeação foram pesados em balança analítica e acondicionados em dessecador com água destilada, mantendo-se um ambiente com 100% de umidade relativa (pressão de vapor de 32,23 mmHg) a 20 °C. Os frascos foram pesados a cada 24 h até a obtenção

do regime estacionário. A permeabilidade ao vapor de água foi calculada conforme a Equação 5.

$$PVA = \frac{(G \times \delta)}{A \times T (P_1 - P_2)} \quad (5)$$

Onde: PVA = Permeabilidade do vapor d'água (g.mm/m<sup>2</sup>.dia.mmHg)<sup>-1</sup>; G = Ganho de massa em 24h (g);  $\delta$  = Espessura (mm); A = Área do filme (m<sup>2</sup>) ; T = Tempo (dia); P1 - P2 = Gradiente de Pressão (mmHg).

### 2.6.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes foram determinadas de acordo com a norma ASTM D882-12 (2012), com adaptações. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios (CT3, Brookfield, USA), equipada com célula de carga de 25 kg e garra TA-DGA Dual Grip Assembly. Foram analisados dez corpos de prova por tratamento, com dimensões de 10 cm x 2,5 cm, preparados conforme as dimensões preestabelecidas pela ASTM. As propriedades mecânicas avaliadas foram resistência à tração (MPa), alongamento na ruptura (%) e módulo de Young (MPa).

### 2.6.3 Biodegradabilidade

Para determinação da biodegradabilidade dos filmes, inicialmente, os filmes foram cortados em corpos de prova de 2 × 2 cm<sup>2</sup> e secos em estufa a 105 °C até massa constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas para determinação da massa inicial e acondicionadas em telas de mosquiteiro. Em seguida, foram enterradas em solo enriquecido com húmus de minhoca, a 4 cm de profundidade, em copos plásticos. A umidade do solo foi mantida em aproximadamente 40% por meio de irrigação a cada dois dias. As avaliações foram realizadas nos tempos de 0, 5, 10 e 15 dias, em triplicata. Ao final de cada tempo, os filmes foram removidos do solo, limpos para retirada das partículas aderidas, secos novamente em estufa a 105 °C até massa constante e pesados para determinação da massa final. A biodegradação foi determinada pela perda de massa dos filmes durante o período de enterro.

### 2.6.4 Atividade antioxidante dos extratos e dos filmes

A atividade antioxidante das amostras foi determinada pelo método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power). O reagente FRAP foi preparado a partir da mistura de tampão

acetato 0,3 mol L<sup>-1</sup> (pH 3,6), solução de TPTZ 10 mM em HCl 40 mM e solução de cloreto férrico 20 mM, sendo utilizado imediatamente após o preparo. Para a determinação da atividade antioxidante dos extratos de *Clitoria ternatea* em diferentes concentrações, 90 µL da amostra foram adicionados a 270 µL de água deionizada e a 2,7 mL do reagente FRAP, seguidos de homogeneização e incubação a 37 °C por 30 min. A absorbância foi medida a 595 nm em espectrofotômetro (K37, Brasil), utilizando o reagente FRAP como branco. Para a análise dos filmes, seguiu-se a mesma metodologia, utilizando 0,17 g de filme por tratamento.

## 2.7 Aplicação dos filmes: avaliações de qualidade pós-colheita de banana-prata

A aplicação dos filmes obtidos como embalagens ativas foi avaliada na conservação pós-colheita de bananas-prata (*Musa spp.*) em estágio uniforme de maturação, as quais foram distribuídas aleatoriamente entre os tratamentos. Os frutos foram distribuídos entre os diferentes tratamentos, com três bananas por tratamento, além de um grupo controle sem embalagem. Cada fruto foi acondicionado individualmente na respectiva embalagem, selada imediatamente após o acondicionamento. Todos os tratamentos foram armazenados a 24 ± 2 °C por 11 dias.

Os parâmetros de qualidade avaliados foram: perda de massa (diferença entre as massas inicial e final dos frutos), firmeza da polpa e da casca, sólidos solúveis totais, cor instrumental, pH e acidez titulável. A perda de massa foi determinada apenas ao final do armazenamento, enquanto as demais análises foram realizadas no início e ao final do período experimental.

Para a determinação da firmeza da polpa e da casca, utilizou-se um analisador de textura (CT3, Brookfield, USA), equipado com uma sonda cilíndrica de 2 mm de diâmetro (P/2). As determinações foram realizadas com profundidades de penetração de 2 mm para a casca e de 4 mm para a polpa, à velocidade de ensaio de 1,0 mm s<sup>-1</sup>, em três pontos equidistantes de cada fruto. Os resultados foram expressos em newtons (N).

A cor instrumental da casca foi determinada com um colorímetro portátil (LS173, China), segundo o sistema CIELAB. Os valores de L\*, a\* e b\* foram obtidos a partir de três leituras realizadas em regiões equidistantes da casca e da polpa e, posteriormente, utilizados para calcular a cromaticidade (C\*) e o ângulo de matiz (h°) de acordo com as Equações 3-5.

O teor de sólidos solúveis totais (SST) foi determinado conforme o método nº 932.12 da AOAC (2023), utilizando um refratômetro digital (Official Store, Shanghai, China), expresso em °Brix. Para essa análise, a polpa foi homogeneizada em mixer (BMX350P, China), filtrada, e o filtrado foi utilizado para as leituras após calibração do equipamento com água destilada.

O pH foi determinado conforme o método nº 981.12 da AOAC (2023), utilizando um pHmetro de bancada, a partir do extrato obtido da polpa homogeneizada. A acidez titulável foi determinada pelo método titulométrico, utilizando solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L<sup>-1</sup> como titulante e fenolftaleína a 1% como indicador. Aproximadamente 5 g da polpa homogeneizada foram diluídos em 50 mL de água destilada e titulados até o ponto de viragem. Os resultados foram expressos em gramas de ácido málico equivalente por 100 g de fruta.

## 2.8 Planejamento e análise estatística

O estudo foi conduzido em três etapas experimentais independentes. A primeira etapa, referente à adsorção dos compostos bioativos do extrato de *Clitoria ternatea* em carvão ativado, foi conduzida em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por três tratamentos correspondentes às concentrações do extrato (5, 10 e 15 g·L<sup>-1</sup>).

Na segunda etapa (preparo e caracterização dos filmes), adotou-se delineamento inteiramente casualizado, composto por seis tratamentos: PVA-C (filme controle à base de PVA), PVA-E (filme de PVA contendo emulsão), PVA-CA (filme de PVA contendo emulsão e carvão ativado), PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 (filmes contendo carvão ativado com os compostos de *Clitoria ternatea* previamente adsorvidos nas concentrações de 5, 10 e 15 g·L<sup>-1</sup>, respectivamente). Cada formulação foi produzida em três lotes independentes, e as análises de caracterização foram realizadas, no mínimo, em triplicata.

A terceira etapa, correspondente à avaliação dos filmes para a conservação pós-colheita de bananas-prata (*Musa spp.*), foi conduzida em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 7 × 2, com sete tratamentos (controle sem embalagem, PVA-C, PVA-E, PVA-CA, PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15) e dois tempos de avaliação (0 e 11 dias). Cada tratamento foi constituído por três repetições, sendo cada repetição representada por um fruto, totalizando 21 unidades experimentais.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando se verificou efeito significativo ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o software SAS® University Edition (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). O OriginPro 2018 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) foi utilizado para a geração dos gráficos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Preparação, caracterização e adsorção de compostos bioativos de um sistema carreador à base de carvão ativado

#### 3.1.1 Caracterização do material precursor e do carvão ativado

O resíduo de malte apresentou composição lignocelulósica típica de biomassas vegetais, com teores de lignina, celulose e hemicelulose de 24,89, 18,83 e 19,02%, respectivamente, além de baixo teor de cinzas (2,59%). O teor de lignina e a razão celulose/lignina inferior a 1 (0,76) indicam predominância da fração lignínica, o que é favorável à aplicação na produção de carvões ativados. Durante a pirólise, a lignina apresenta maior estabilidade térmica e maior rendimento em carbono fixo do que a celulose e a hemicelulose, o que favorece a formação de uma matriz carbonácea mais estável e o desenvolvimento da estrutura porosa do material (Oliveira, 2015; Santos et al., 2020; Borges et al., 2024).

O espectro de FTIR (Figura 1) do resíduo de malte confirma o caráter lignocelulósico da biomassa, evidenciado pela presença de bandas atribuídas aos grupos hidroxila ( $\text{-OH}$ ), ligações  $\text{C-H}$  alifáticas, grupos carbonila ( $\text{C=O}$ ) e ligações  $\text{C-O}$ , características da celulose, hemicelulose e lignina (Santos et al., 2020). Após a carbonização e a ativação química, observou-se a redução das bandas associadas aos grupos hidroxila e às cadeias alifáticas (Figura 1). As bandas observadas em aproximadamente  $1770\text{ cm}^{-1}$  e na região entre  $1250$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  indicam a presença de grupos funcionais oxigenados na superfície do carvão ativado. A banda em aproximadamente  $1770\text{ cm}^{-1}$  foi atribuída ao estiramento  $\text{C=O}$  de grupos carbonílicos superficiais, incluindo carboxilas, lactonas e ésteres, conforme descrito para carvões ativados por Figueiredo et al. (1999) e Marsh e Rodríguez-Reinoso (2006), enquanto as absorções entre  $1250$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas ao estiramento  $\text{C-O}$  de álcoois, fenóis, éteres e grupos carboxílicos. A banda próxima de  $1400\text{ cm}^{-1}$  pode resultar de vibrações de grupos carboxilato, deformações de  $\text{O-H}$  e  $\text{C-H}$  e de estruturas aromáticas residuais.

O carvão ativado apresentou rendimento de síntese de 41,34%, valor esperado para biomassas lignocelulósicas ativadas quimicamente com ácido fosfórico. Esse rendimento está diretamente relacionado à composição do resíduo de malte, caracterizado por maior teor de lignina e baixa razão celulose/lignina (0,76). Durante a carbonização, a lignina apresenta maior estabilidade térmica e maior formação de carbono fixo em comparação com a celulose e a hemicelulose, reduzindo as perdas por volatilização e favorecendo maiores rendimentos de carvão (Santos et al., 2020).

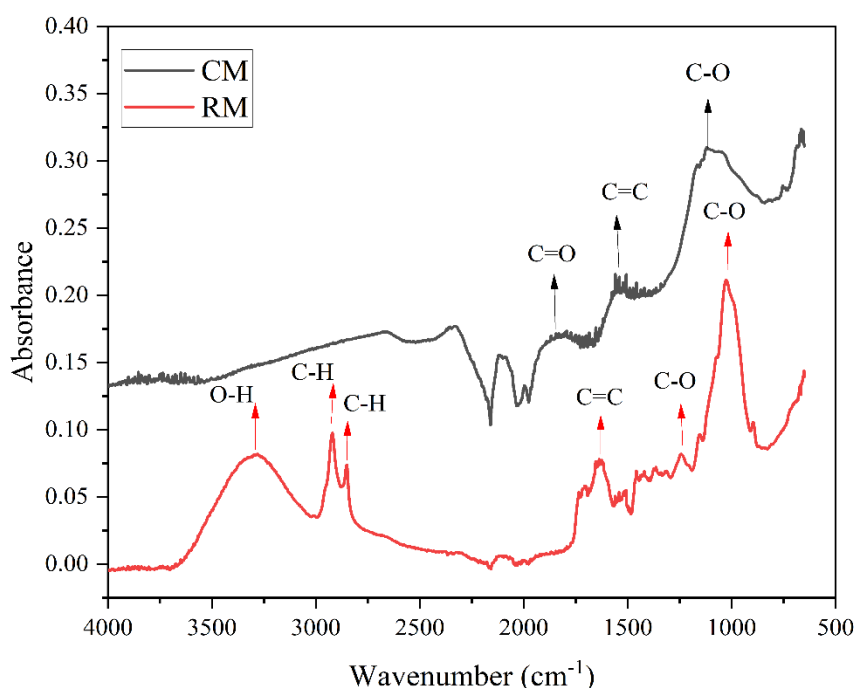


**Figura 1.** Espectros de absorção no infravermelho do resíduo casca de malte (RM) e do Carvão ativado produzido a partir do malte (CM).

Para a caracterização textural, os resultados obtidos foram: área superficial específica de  $804,29 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , diâmetro médio dos poros de  $3,03 \text{ nm}$ , volume de mesoporos de  $0,261 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  e volume de microporos de  $0,120 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , indicando uma estrutura predominantemente micro-mesoporosa. Essas características texturais são adequadas para aplicações que envolvem a adsorção de biomoléculas, uma vez que os microporos aumentam o número de sítios ativos disponíveis, enquanto os mesoporos favorecem o transporte de massa e a difusão de moléculas maiores até o interior da matriz carbonácea. Estudos sobre ativação química com ácido fosfórico mostram que a degradação preferencial da hemicelulose e da lignina promove inicialmente a formação de microporos, enquanto o aumento da temperatura e o alargamento desses poros resultam na geração de mesoporos, ampliando a acessibilidade da superfície adsorvente (Brito et al., 2020; Santos et al., 2020).

O  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  de 4,56 indica que a superfície do carvão ativado apresenta carga positiva em pH inferior a esse valor e carga negativa em pH superior (Brito et al., 2020). Dessa forma, a natureza das interações eletrostáticas entre o adsorvente e os compostos bioativos do extrato depende diretamente do pH do meio de adsorção. Entretanto, para compostos fenólicos, o processo adsorptivo normalmente não é governado apenas por interações eletrostáticas. A elevada área superficial, associada à presença de grupos oxigenados superficiais e à estrutura

aromática do carvão, favorece simultaneamente a formação de ligações de hidrogênio, interações  $\pi$ - $\pi$  entre os anéis aromáticos dos compostos fenólicos e a matriz carbonácea, além de interações hidrofóbicas e forças de van der Waals, que atuam de forma complementar na retenção das moléculas adsorvidas (Moreno-Castillo, 2004).

### 3.1.2 Ensaios de imobilização de compostos fenólicos da *Clitoria Ternatea* em carvão ativado

A concentração inicial de compostos fenólicos da *Clitoria ternatea* foi de 62,37 mg EAG/g, 66,71 mg EAG/g e 65,21 mg EAG/g para os extratos a 5 g/L, 10 g/L e 15 g/L, respectivamente, valores compatíveis com a faixa reportada na literatura para extratos aquosos da espécie, dependendo das condições de extração (Gonçalves et al., 2024). Confirmando que a espécie constitui uma fonte importante de compostos fenólicos com atividade antioxidante reconhecida. O conteúdo fenólico de extratos vegetais é influenciado pelas condições de extração, incluindo o solvente, a temperatura, o tempo e a origem do material vegetal, o que explica a variação dos valores descrita na literatura. Entretanto, independentemente dessas diferenças metodológicas, diversos estudos demonstram que os extratos aquosos da espécie apresentam potencial antioxidante, o que favorece sua aplicação em sistemas de embalagem ativa (Gonçalves et al., 2024).

A imobilização dos compostos fenólicos foi influenciada pela concentração do extrato e pelo tempo de contato (Tabela 1). O aumento da concentração promoveu maior incorporação de compostos bioativos ao carvão ativado, resultando em capacidade de adsorção de até 25,48 mg g<sup>-1</sup> e eficiência de adsorção de até 86,46%. Esses resultados demonstram a afinidade entre os compostos fenólicos e a superfície do carvão ativado e podem ser atribuídos à elevada área superficial específica e à presença de grupos funcionais oxigenados identificados por FTIR, capazes de favorecer interações por ligações de hidrogênio, interações  $\pi$ - $\pi$  e forças eletrostáticas com as moléculas fenólicas (Foo & Hameed, 2010; Duan et al., 2021).

Após 60 min, apenas pequenas variações foram observadas nos parâmetros de adsorção, indicando que o equilíbrio do processo foi rapidamente estabelecido. Considerando a estabilização da capacidade adsorptiva após 60 min, esse tempo foi escolhido para a funcionalização do carvão ativado. As concentrações de 5, 10 e 15 g L<sup>-1</sup> foram mantidas na etapa subsequente, possibilitando a investigação da influência de diferentes cargas de compostos bioativos adsorvidos no carvão.

A adsorção do extrato no carvão ativado favoreceu a incorporação dos compostos bioativos à matriz polimérica, contribuindo para sua retenção e para a obtenção de filmes ativos com atividade antioxidante e potencial de aplicação na conservação pós-colheita.

**Tabela 1 .** Avaliação da imobilização de compostos fenólicos do extrato de *Clitoria ternatea* em carvão ativado em função da concentração de folhas utilizadas e do tempo de contato.

| Concentração (g<br>L <sup>-1</sup> )       | Tempo (min)                |                            |                           |                           |
|--------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                            | 30                         | 60                         | 90                        | 120                       |
| <b>M<sub>CA</sub> (mg)</b>                 |                            |                            |                           |                           |
| 5                                          | 1,14 ± 0,10 <sup>c</sup>   | 1,27 ± 0,05 <sup>c</sup>   | 1,27 ± 0,05 <sup>c</sup>  | 1,27 ± 0,02 <sup>c</sup>  |
| 10                                         | 2,41 ± 0,04 <sup>b</sup>   | 2,69 ± 0,10 <sup>b</sup>   | 2,67 ± 0,04 <sup>b</sup>  | 2,74 ± 0,02 <sup>b</sup>  |
| 15                                         | 3,82 ± 0,13 <sup>a</sup>   | 3,60 ± 0,17 <sup>a</sup>   | 3,75 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 3,67 ± 0,04 <sup>a</sup>  |
| <b>C<sub>ads</sub> (mg g<sup>-1</sup>)</b> |                            |                            |                           |                           |
| 5                                          | 7,62 ± 1,24 <sup>c</sup>   | 8,43 ± 0,35 <sup>c</sup>   | 8,45 ± 0,05 <sup>c</sup>  | 8,51 ± 0,13 <sup>c</sup>  |
| 10                                         | 16,11 ± 0,32 <sup>b</sup>  | 17,98 ± 0,75 <sup>b</sup>  | 17,97 ± 0,26 <sup>b</sup> | 18,25 ± 1,25 <sup>b</sup> |
| 15                                         | 25,48 ± 0,91 <sup>a</sup>  | 24,02 ± 1,15 <sup>a</sup>  | 24,97 ± 0,18 <sup>a</sup> | 25,45 ± 0,26 <sup>a</sup> |
| <b>Eficiência (%)</b>                      |                            |                            |                           |                           |
| 5                                          | 75,47 ± 12,27 <sup>a</sup> | 83,58 ± 3,47 <sup>ab</sup> | 83,77 ± 0,53 <sup>a</sup> | 84,34 ± 1,33 <sup>a</sup> |
| 10                                         | 76,36 ± 1,53 <sup>a</sup>  | 85,19 ± 3,32 <sup>a</sup>  | 85,19 ± 0,89 <sup>a</sup> | 86,46 ± 0,76 <sup>a</sup> |
| 15                                         | 82,89 ± 3,01 <sup>a</sup>  | 78,13 ± 3,76 <sup>b</sup>  | 78,13 ± 0,61 <sup>b</sup> | 79,55 ± 0,87 <sup>b</sup> |

\* Massa de compostos adsorvidos (M<sub>Lig</sub>), Capacidade de Adsorção (C<sub>ads</sub>), Eficiência de adsorção (Efic). Letras minúsculas diferentes, na vertical, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

### 3.3 Caracterização dos filmes

#### 3.3.1 Caracterização estrutural dos filmes por espectroscopia no infravermelho com Transformada de Fourier

Os espectros de FTIR dos filmes apresentaram perfis semelhantes (Figura 2), evidenciando que a incorporação do carvão ativado funcionalizado promoveu apenas discretas variações na intensidade e sobreposição parcial de algumas bandas, sem o aparecimento de novos sinais de absorção. Esse comportamento indica que o sistema carreador foi incorporado predominantemente por meio de interações físicas, preservando a estrutura química da matriz de PVA.

As bandas características do PVA nas regiões de 3000–2850 cm<sup>-1</sup>, 1700–1600 cm<sup>-1</sup> e 1300–900 cm<sup>-1</sup> apresentaram apenas discretas variações de intensidade entre as formulações, sem o aparecimento de novas bandas ou deslocamentos consideráveis dos principais sinais de

absorção, indicando que a incorporação do carvão ativado funcionalizado não promoveu modificações importantes na estrutura química da matriz polimérica (Silverstein et al., 2014; Zor et. al, 2024)). De modo geral, os espectros comprovam que os filmes mantiveram as características estruturais do PVA, sugerindo que a incorporação do sistema carreador ocorreu predominantemente por meio de interações físicas entre os constituintes da matriz.

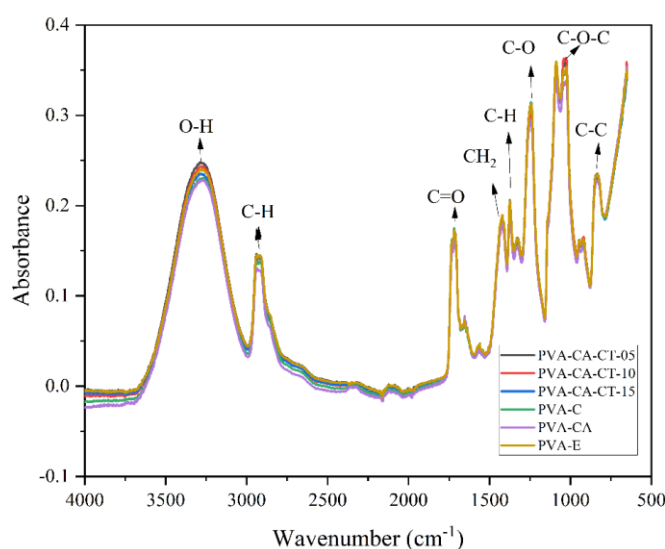


**Figura 2.** Espectros de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos filmes de PVA: PVA controle (PVA-C), PVA contendo emulsão (PVA-E), PVA com carvão ativado (PVA-CA) e PVA contendo compostos bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvido no carvão ativado (PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15), obtidos na região espectral de 4000–500  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.2.2 Propriedades físicas, mecânicas, ópticas e de barreira dos filmes

As propriedades ópticas e de barreira dos filmes foram influenciadas pela composição das formulações. Diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ) foram observadas nos parâmetros de cor e na permeabilidade ao vapor d'água, ao passo que a espessura permaneceu estatisticamente inalterada entre os tratamentos (Tabela 2).

Os filmes controle apresentaram elevada luminosidade, característica típica de matrizes constituídas predominantemente por PVA, material naturalmente transparente devido à sua homogeneidade estrutural e à reduzida dispersão da radiação luminosa (Oun et al., 2022; Yim & Kim, 2023). A incorporação de carvão ativado promoveu uma redução estatisticamente significativa de  $*L$ , efeito que se manteve nos filmes contendo carvão ativado funcionalizado, evidenciando o escurecimento da matriz polimérica. Esse comportamento pode ser atribuído à alta capacidade de absorção da radiação visível pelas partículas carbonáceas, associada ao

aumento da dispersão da luz na matriz polimérica, o que reduz a transmitância do material e aumenta sua opacidade (Shankar et al., 2015; Xie et al., 2021). Resultados semelhantes foram descritos por Yim e Kim (2023), que observaram diminuição da luminosidade em filmes de PVA modificados com aditivos funcionais, atribuindo esse efeito às alterações na interação entre a radiação luminosa e os componentes dispersos na matriz polimérica.

Os parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  também foram influenciados pela presença do sistema carreador. As variações observadas em  $a^*$  indicam alterações na contribuição da componente vermelho-verde da cor dos filmes após a adição do carvão ativado e de compostos bioativos adsorvidos. Por outro lado, observou-se aumento nos valores de  $b^*$  nos tratamentos com *Clitoria ternatea*, indicando maior contribuição da componente amarela para a coloração dos filmes. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos bioativos adsorvidos ao carvão ativado, incluindo os pigmentos naturais presentes no extrato, que modificam o padrão de absorção da radiação visível e, consequentemente, a resposta colorimétrica da matriz polimérica. Alterações semelhantes nas coordenadas colorimétricas têm sido relatadas em filmes biodegradáveis contendo extratos vegetais ricos em compostos bioativos, nos quais esses constituintes promovem absorção seletiva da radiação visível e modificam a coloração do material (Liu et al., 2024; Mondal et al., 2024).

Os valores de croma ( $C^*$ ) não apresentaram diferenças significativas entre as formulações, indicando que a saturação da cor permaneceu relativamente constante. Porém, o ângulo hue ( $h^\circ$ ) foi significativamente reduzido após a incorporação do sistema carreador. Enquanto os filmes controle apresentaram valores próximos de  $170^\circ$ , característicos de tonalidades situadas na região esverdeada do espaço CIELab, os filmes contendo carvão ativado e compostos bioativos apresentaram valores entre  $132$  e  $151^\circ$ , indicando um deslocamento da tonalidade em direção à região amarela. Esse comportamento está de acordo com o aumento observado nos valores de  $b^*$  e demonstra que a principal alteração promovida pela incorporação dos compostos bioativos ocorreu na tonalidade da matriz polimérica, sem aumento significativo da intensidade da cor.

Do ponto de vista tecnológico, a maior opacidade dos filmes pode representar uma vantagem para embalagens ativas destinadas à conservação de alimentos fotossensíveis, pois reduz a transmissão de radiação incidente e, consequentemente, pode minimizar reações foto-oxidativas responsáveis pela degradação de pigmentos, vitaminas e outros compostos sensíveis à luz (Mondal et al., 2024; Liu et al., 2024).

A espessura dos filmes variou entre 0,1088 e 0,1548 mm, sem diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ), indicando que a incorporação da emulsão, do carvão ativado e do carvão

funcionalizado não comprometeu a uniformidade da matriz polimérica nem a reprodutibilidade do processo de obtenção dos filmes. A manutenção da espessura entre as formulações demonstra que a incorporação dos aditivos ocorreu de forma homogênea, sem provocar alterações significativas na distribuição da solução filmogênica durante a etapa de secagem, comportamento frequentemente observado em filmes de PVA produzidos pelo método de casting (França et al., 2022; Yim & Kim, 2023).

A permeabilidade ao vapor de água aumentou com a incorporação do carvão ativado funcionalizado, diferindo estatisticamente em relação ao filme controle (PVA-C) e ao filme contendo emulsão (PVA-E), com os maiores valores observados nas formulações contendo compostos bioativos de *Clitoria ternatea*. Esse comportamento sugere que a incorporação do sistema carreador favoreceu o transporte de vapor por meio da matriz polimérica. O que pode ter ocorrido devido à presença de grupos oxigenados na superfície do carvão ativado e de compostos bioativos adsorvidos, que podem aumentar a afinidade do material pela água e facilitar os processos de sorção e difusão do vapor no interior do filme (Pop et al., 2024; Ren et al., 2024).

O efeito da incorporação de partículas sobre a permeabilidade ao vapor d'água depende da compatibilidade entre o carreador e a matriz polimérica, da distribuição das partículas e da microestrutura formada durante a secagem dos filmes (Shankar et al., 2015). Viana et al. (2025) observaram redução da permeabilidade em filmes à base de amido contendo carvão ativado, atribuída à elevada compatibilidade entre o carvão ativado e a matriz polissacarídica, enquanto Yim e Kim (2023) relataram aumento da permeabilidade em filmes de PVA modificados com aditivos bioativos, comportamento semelhante ao observado neste estudo. Esses resultados evidenciam que a resposta das propriedades de barreira depende da natureza da matriz polimérica e das características dos materiais incorporados, que determinam a interação com a água e o transporte de vapor através do filme (Shankar et al., 2015; Yim & Kim, 2023; Viana et al., 2025). Como a espessura dos filmes permaneceu estatisticamente constante entre as formulações, o aumento da permeabilidade não pode ser atribuído a diferenças na espessura da matriz, mas sim às características do sistema carreador incorporado.

**Tabela 2.** Propriedades físicas, ópticas e de barreira de filmes de PVA contendo carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea*.

| Filmes      | Espessura (mm)             | L*                        | a*                           | b*                          | C*                        | °h                           | WVP<br>(g·mm·m <sup>-2</sup> ·dia <sup>-1</sup> ·mmHg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| PVA-C       | 0,1113 ± 0,02 <sup>a</sup> | 96,61 ± 0,06 <sup>a</sup> | -0,5728 ± 0,01 <sup>ab</sup> | 0,0244 ± 0,01 <sup>c</sup>  | 0,536 ± 0,01 <sup>a</sup> | 169,40 ± 3,18 <sup>a</sup>   | 0,2430 ± 0,01 <sup>c</sup>                                            |
| PVA-E       | 0,1088 ± 0,01 <sup>a</sup> | 95,57 ± 0,36 <sup>a</sup> | -0,5311 ± 0,08 <sup>ab</sup> | 0,2789 ± 0,29 <sup>b</sup>  | 0,629 ± 0,20 <sup>a</sup> | 155,61 ± 18,08 <sup>ab</sup> | 0,2457 ± 0,04 <sup>c</sup>                                            |
| PVA-CA      | 0,1112 ± 0,01 <sup>a</sup> | 91,20 ± 0,89 <sup>b</sup> | -0,4078 ± 0,09 <sup>a</sup>  | 0,4478 ± 0,09 <sup>ab</sup> | 0,606 ± 0,05 <sup>a</sup> | 132,48 ± 7,01 <sup>c</sup>   | 0,3290 ± 0,02 <sup>bc</sup>                                           |
| PVA-CA-CT05 | 0,1340 ± 0,03 <sup>a</sup> | 88,72 ± 0,94 <sup>c</sup> | -0,5800 ± 0,08 <sup>b</sup>  | 0,3267 ± 0,06 <sup>ab</sup> | 0,664 ± 0,05 <sup>a</sup> | 151,17 ± 3,66 <sup>b</sup>   | 0,4091 ± 0,03 <sup>ab</sup>                                           |
| PVA-CA-CT10 | 0,1282 ± 0,01 <sup>a</sup> | 89,26 ± 1,07 <sup>c</sup> | -0,6522 ± 0,04 <sup>b</sup>  | 0,3744 ± 0,05 <sup>ab</sup> | 0,756 ± 0,02 <sup>a</sup> | 150,41 ± 3,70 <sup>b</sup>   | 0,4623 ± 0,02 <sup>a</sup>                                            |
| PVA-CA-CT15 | 0,1548 ± 0,03 <sup>a</sup> | 89,15 ± 1,44 <sup>c</sup> | -0,6533 ± 0,10 <sup>b</sup>  | 0,5000 ± 0,09 <sup>a</sup>  | 0,804 ± 0,14 <sup>a</sup> | 143,02 ± 2,73 <sup>bc</sup>  | 0,4624 ± 0,05 <sup>ab</sup>                                           |

\*Os valores são expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si, segundo pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05). PVA-C: filme controle; PVA-E: filme de PVA contendo emulsão; PVA-CA: filme de PVA contendo carvão ativado; PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15: filmes de PVA contendo carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, obtidos a partir de extratos nas concentrações de 5, 10 e 15 g L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Todos os filmes apresentaram solubilidade de 100% em água, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, indicando que a incorporação do carvão ativado funcionalizado não modificou a solubilidade da matriz de PVA. Esse comportamento está relacionado à elevada densidade de grupos hidroxila presentes nas cadeias do polímero, que favorecem a formação de ligações de hidrogênio com a água, promovendo a hidratação da matriz e a dissolução das cadeias poliméricas (Souza et al., 2024). O comportamento da solubilidade sugere que a incorporação do sistema carreador não foi suficiente para restringir a difusão de água ou estabelecer interações capazes de reduzir a dissolução da matriz polimérica, comportamento semelhante ao observado em outros filmes de PVA contendo partículas funcionais (Yim & Kim, 2023). Esse resultado está de acordo com os obtidos por FTIR, que indicaram a manutenção da estrutura química da matriz de PVA após a incorporação do sistema carreador. Dessa forma, as interações predominantemente físicas entre os componentes não foram suficientes para reduzir a afinidade da matriz pela água nem para limitar sua dissolução.

As propriedades mecânicas dos filmes são apresentadas na Tabela 3. A incorporação do carvão ativado e do carvão ativado funcionalizado influenciou significativamente o módulo de Young e a tensão máxima ( $p \leq 0,05$ ), enquanto o alongamento permaneceu estatisticamente semelhante entre as formulações. A ausência de diferenças no alongamento indica que a incorporação do sistema carreador não comprometeu a capacidade de deformação característica do PVA. Essa propriedade está associada à estrutura semicristalina do polímero e à elevada densidade de grupos hidroxila, que favorecem a reorganização reversível das ligações de hidrogênio durante a deformação, conferindo flexibilidade ao material (Qi et al., 2020; França et al., 2022). Esse comportamento também está de acordo com os resultados de FTIR, que mostraram apenas discretas alterações na intensidade das bandas, sem indícios de modificações significativas na estrutura química da matriz.

O módulo de Young apresentou comportamento distinto entre as formulações. A incorporação apenas do carvão ativado reduziu a rigidez do filme em relação ao controle, indicando que, nas condições avaliadas, a presença das partículas carbonáceas aumentou a capacidade de deformação elástica da matriz. Após a funcionalização com os compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, os valores do módulo aumentaram, ençasem diferindo estatística em relação ao filme controle nas formulações PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15. Esse comportamento sugere que a adsorção dos compostos bioativos modificou a interação entre o carvão ativado e a matriz de PVA, favorecendo maior coesão interfacial e restabelecendo parcialmente a rigidez do material.

A tensão máxima apresentou uma tendência distinta da observada para o módulo de Young. O filme contendo apenas carvão ativado apresentou a maior resistência mecânica entre as formulações, indicando que as partículas carbonáceas atuaram como reforço da matriz polimérica. Após a funcionalização, entretanto, os valores retornaram a níveis estatisticamente semelhantes aos observados no filme controle, sugerindo que a adsorção, na superfície do carvão, dos compostos bioativos reduziu parcialmente a contribuição reforçante das partículas. Ainda assim, a funcionalização não comprometeu a resistência mecânica dos filmes, uma vez que todas as formulações funcionalizadas apresentaram desempenho equivalente ao do PVA-C.

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas dos filmes de PVA contendo carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea*.

| Filmes      | Alongamento (%)             | Módulo de Young (MPa)      | Tensão máxima (MPa)       |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| PVA-C       | 171,05 ± 10,26 <sup>a</sup> | 37,79 ± 9,93 <sup>a</sup>  | 22,19 ± 5,40 <sup>b</sup> |
| PVA-E       | 176,05 ± 12,03 <sup>a</sup> | 23,86 ± 9,29 <sup>b</sup>  | 17,47 ± 5,83 <sup>b</sup> |
| PVA-CA      | 171,52 ± 7,05 <sup>a</sup>  | 13,35 ± 6,95 <sup>c</sup>  | 38,15 ± 4,68 <sup>a</sup> |
| PVA-CA-CT05 | 170,23 ± 15,62 <sup>a</sup> | 31,44 ± 4,29 <sup>ab</sup> | 16,02 ± 1,85 <sup>b</sup> |
| PVA-CA-CT10 | 177,33 ± 11,23 <sup>a</sup> | 38,86 ± 9,12 <sup>a</sup>  | 23,95 ± 4,66 <sup>b</sup> |
| PVA-CA-CT15 | 171,40 ± 13,28 <sup>a</sup> | 36,48 ± 5,05 <sup>a</sup>  | 26,62 ± 1,64 <sup>b</sup> |

\*Os valores são expressos como média ± desvio padrão (n = 3). Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si, de acordo com o teste de Tukey (p ≤ 0,05).

Os resultados indicam que a funcionalização do carvão ativado permitiu incorporar compostos bioativos sem comprometer o desempenho mecânico da matriz de PVA. Embora a incorporação do carvão ativado isoladamente tenha alterado o módulo de Young e a tensão máxima, a adsorção dos compostos bioativos restabeleceu essas propriedades a valores estatisticamente semelhantes aos do filme controle, preservando simultaneamente a flexibilidade característica do PVA. Esse comportamento é particularmente interessante para aplicações em embalagens ativas, pois demonstra que a incorporação do sistema carreador não compromete a integridade mecânica necessária ao processamento, manuseio e armazenamento de alimentos (Yim & Kim, 2023; Mondal et al., 2024).

### 3.2.3 Caracterização textural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura mostraram que todos os filmes apresentaram superfícies relativamente lisas, contínuas e livres de fissuras visíveis (Figura 3), indicando que o processo de casting produziu matrizes estruturalmente homogêneas. O filme controle (PVA-C) apresentou a superfície mais uniforme e um corte transversal compacto, características frequentemente associadas à elevada capacidade do PVA em formar filmes contínuos devido à grande rede de ligações de hidrogênio entre suas cadeias poliméricas (Qi et al., 2020; França et al., 2022).

As características morfológicas observadas por MEV ajudam a explicar os resultados mecânicos obtidos para os filmes. Apesar da incorporação da emulsão e do carvão ativado, as superfícies permaneceram contínuas e livres de fissuras, enquanto os cortes transversais mostraram matrizes compactas, com apenas pequenos orifícios distribuídos ao longo da espessura. A ausência de descontinuidades estruturais marcantes explica a manutenção do alongamento entre as formulações, indicando que a capacidade de deformação da matriz de PVA foi preservada mesmo após a incorporação do sistema carreador.

Os discretos poros observados nos filmes contendo emulsão são compatíveis com o colapso de bolhas de ar ou de gotículas da emulsão durante a evaporação do solvente, fenômeno frequentemente descrito em filmes obtidos por casting contendo sistemas emulsificados (Sapper & Chiralt, 2018), mas não ocorreram em quantidade suficiente para comprometer a continuidade estrutural do material. Da mesma forma, as pequenas partículas identificadas na superfície dos filmes contendo carvão ativado estavam distribuídas de maneira relativamente homogênea, sem evidências de grandes aglomerados ou de separação de fases. Essa distribuição sugere uma boa interação entre o material particulado e a matriz polimérica, favorecendo a transferência de tensões entre as fases (Rhim et al., 2013).

Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos para tensão máxima, com maior valor observada para o filme contendo apenas carvão ativado, uma vez que partículas bem dispersas podem atuar como pontos de reforço mecânico quando apresentam adequada adesão interfacial à matriz. Após a funcionalização do carvão com os compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, a resistência mecânica retornou aos valores do controle, sugerindo que a adsorção dessas moléculas na superfície do carvão modificou a eficiência da transferência de tensões entre as partículas e o PVA. Entretanto, como as micrografias não apresentaram consideráveis alterações morfológicas entre as formulações funcionalizadas, essa redução

parece estar mais relacionada às modificações nas interações intermoleculares da interface do que a mudanças na organização física da matriz.

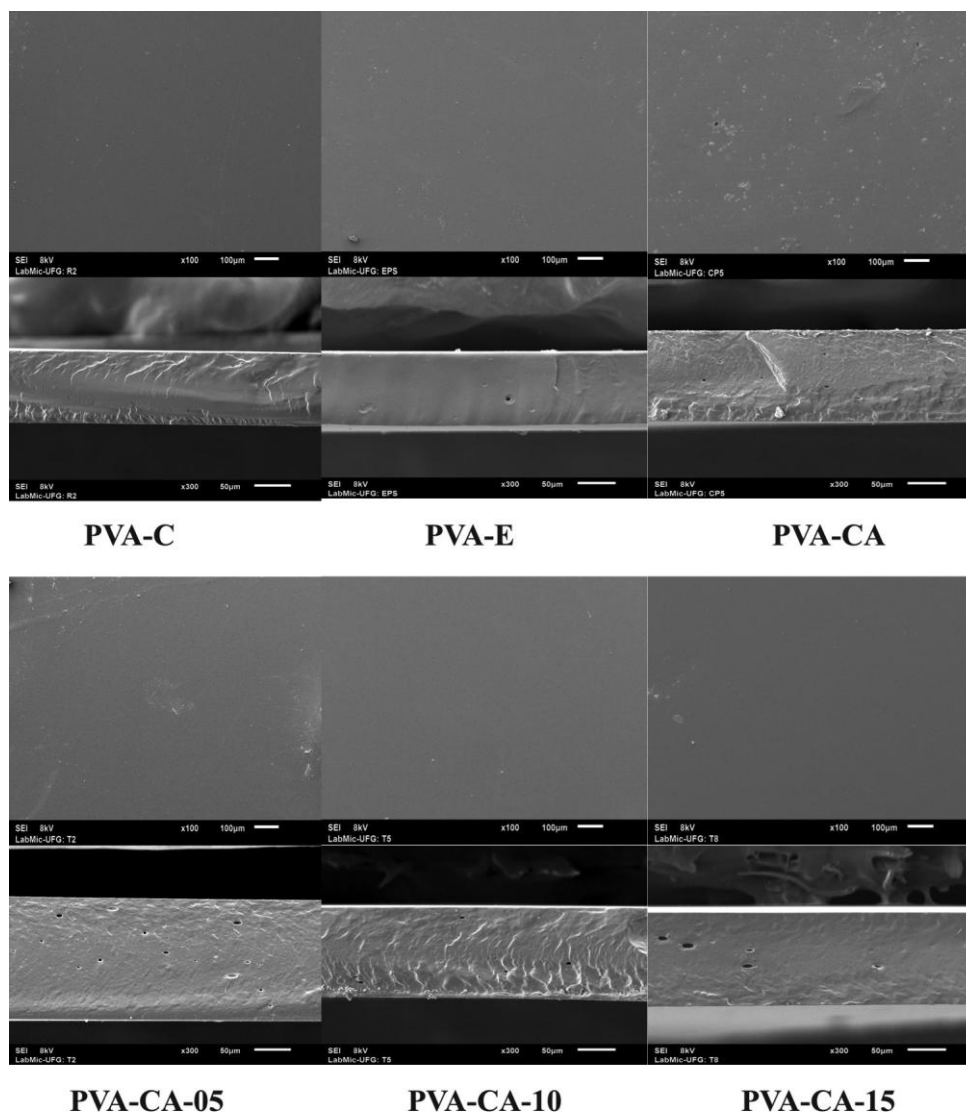


**Figura 3.** Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície (100×; barra = 100 μm) e da seção transversal (100×; barra = 50 μm) dos filmes de álcool polivinílico (PVA) produzidos com diferentes formulações: PVA-C (controle), PVA-E (emulsão), PVA-CA (carvão ativado) e PVA-CA-CT5, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 (carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea*).

O aumento do número de poros observado na formulação PVA-CA-15 também pode ter contribuído para limitar o aumento da rigidez e da resistência mecânica, uma vez que essas cavidades reduzem a continuidade da seção resistente e podem atuar como concentradores locais de tensão. Ainda assim, a ausência de fissuras e de separação de fases indica que a integridade estrutural dos filmes foi preservada, em concordância com os resultados de FTIR,

que demonstraram apenas discretas alterações nas interações químicas entre os componentes (Azeredo, 2009; Rhim et al., 2013).

#### 3.2.4 Biodegradabilidade dos filmes

Após 15 dias de enterro em solo, todos os filmes apresentaram elevada degradabilidade, com perdas de massa entre 73,54% e 93,52%. O filme controle (PVA-C) apresentou o maior percentual de perda de massa ( $93,52 \pm 3,84\%$ ), diferindo significativamente das demais formulações ( $p \leq 0,05$ ), enquanto não foram observadas diferenças estatísticas entre os filmes contendo emulsão, carvão ativado e carvão ativado funcionalizado (73,54-83,65%). A alta degradabilidade observada em todas as formulações está relacionada ao caráter hidrofílico do PVA, cuja densidade de grupos hidroxila favorece a absorção de água, o intumescimento da matriz e a posterior degradação por microrganismos presentes no solo (Qi et al., 2018; Liu et al., 2021; Chen et al., 2022). Como todas as formulações contendo emulsão apresentaram comportamento estatisticamente semelhante, independentemente da presença do carvão ativado ou de sua funcionalização, a redução inicial da perda de massa pode ser relacionada à incorporação da fase lipídica e não ao sistema carreador propriamente dito. A fase lipídica provavelmente reduziu a velocidade de hidratação da matriz polimérica nas etapas iniciais do ensaio, uma vez que domínios lipídicos dispersos tendem a dificultar o transporte de água em matrizes hidrofílicas (Galus & Kadzińska, 2015; Sapper & Chiralt, 2018). A incorporação posterior do carvão ativado e dos compostos bioativos não resultou em alterações estatisticamente significativas nesse comportamento.

Após 15 dias de ensaio, parte das amostras encontrava-se parcialmente desintegrada e aderida ao solo ou à tela de suporte, o que impossibilitou a continuidade das determinações gravimétricas. Essa limitação é inerente ao método de enterro em solo, uma vez que a perda de massa pode refletir simultaneamente processos de biodegradação, solubilização, lixiviação e fragmentação física da matriz polimérica (Chen et al., 2022). Assim, os resultados obtidos representam uma estimativa da degradabilidade inicial dos filmes nas condições avaliadas. Considerando os altos percentuais de perda de massa observados após apenas 15 dias, é provável que todas as formulações apresentem degradação praticamente completa em um período relativamente curto de exposição ao solo, reforçando seu potencial para aplicações em embalagens biodegradáveis.

### 3.2.5 Capacidade antioxidante dos extratos e dos filmes de PVA

A capacidade antioxidante dos extratos aquosos de *Clitoria ternatea*, do filme controle de PVA e dos filmes contendo carvão ativado funcionalizado foi determinada pelo método FRAP, com os resultados apresentados na Tabela 4. O filme controle apresentou capacidade antioxidante semelhante à do extrato aquoso de menor concentração (EB05) e significativamente inferior à dos filmes contendo carvão ativado funcionalizado, o que demonstra que a atividade antioxidante observada nas formulações funcionalizadas decorre predominantemente da incorporação dos compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, enquanto o PVA atua principalmente como matriz estrutural. Entre as formulações avaliadas, o tratamento PVA-CA-CT-05 apresentou a maior capacidade antioxidante, seguido pelos tratamentos PVA-CA-CT-10 e PVA-CA-CT-15.

**Tabela 4.** Capacidade antioxidante determinada pelo método FRAP (mg SF/mL) dos extratos aquosos de *Clitoria ternatea*, do filme controle de PVA e dos filmes de PVA contendo carvão ativado com extrato imobilizado.

| Tratamento   | Capacidade antioxidante (mg SF/mL) |
|--------------|------------------------------------|
| EB05         | 787,67 ± 2,50 <sup>d</sup>         |
| EB10         | 1511,00 ± 1,44 <sup>c</sup>        |
| EB15         | 2007,89 ± 5,00 <sup>c</sup>        |
| PVA-C        | 744,85 ± 8,65 <sup>d</sup>         |
| PVA-CA-CT-05 | 6477,56 ± 3,75 <sup>a</sup>        |
| PVA-CA-CT-10 | 4967,67 ± 87,50 <sup>ab</sup>      |
| PVA-CA-CT-15 | 3603,61 ± 3,75 <sup>b</sup>        |

\*Os valores são expressos como média ± desvio padrão (DP). Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A maior capacidade antioxidante observada nos filmes contendo carvão ativado funcionalizado está diretamente relacionada à incorporação de metabólitos bioativos presentes no extrato de *Clitoria ternatea*. Embora os compostos fenólicos representem a principal classe de metabólitos bioativos da *C. ternatea*, a atividade antioxidante e antimicrobiana do extrato resulta da ação conjunta de diferentes constituintes, incluindo antocianinas (ternatinas), flavonóis, flavonas, ácidos fenólicos, taninos condensados, além de pequenas quantidades de

saponinas, alcaloides e peptídeos cíclicos (ciclotídeos). A atuação sinérgica desses metabólitos aumenta a capacidade de neutralização de espécies reativas de oxigênio e pode comprometer a integridade das membranas celulares microbianas, o que favorece sua aplicação em sistemas de embalagem ativa (Mukherjee et al., 2008; Escher et al., 2020; Oguis et al., 2019).

A redução da capacidade antioxidante observada com o aumento da concentração do extrato não indica necessariamente perda da atividade antioxidante dos compostos bioativos, mas sugere alterações em sua disponibilidade para reagir nas condições do ensaio FRAP. O carvão ativado utilizado neste estudo apresentou elevada área superficial específica ( $836 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), estrutura micro-mesoporosa e superfície contendo grupos oxigenados, características que favorecem a adsorção de compostos fenólicos e de outros compostos bioativos (Duan et al., 2021). Em concentrações mais elevadas do extrato, o material pode ter atingido um estado próximo à saturação de seus sítios de adsorção. Nessa condição, o preenchimento progressivo dos microporos e mesoporos tende a aumentar a retenção de compostos no interior da estrutura porosa, reduzindo a fração disponível para participar da reação de redução do  $\text{Fe}^{3+}$  nas condições do ensaio FRAP.

Esse comportamento está de acordo com os resultados de adsorção obtidos neste estudo, que demonstraram alta eficiência de imobilização dos compostos bioativos (>80%) em todas as concentrações avaliadas. Embora concentrações mais elevadas do extrato tenham proporcionado maior quantidade de compostos adsorvidos, parte desses compostos pode ter permanecido mais fortemente retida na estrutura porosa do carvão ativado, reduzindo sua disponibilidade para reagir durante o ensaio antioxidante. Dessa forma, os resultados indicam que a capacidade antioxidante dos filmes depende não apenas da quantidade de compostos bioativos incorporados, mas também da forma como esses compostos se distribuem e permanecem acessíveis na superfície e no interior da estrutura porosa do sistema carreador.

### **3.3 Mudanças de atributos de qualidade pós-colheita de bananas durante o armazenamento**

#### *3.3.1 Perda de massa e firmeza da polpa e da casca*

Após 11 dias de armazenamento, todos os frutos apresentaram perda de massa e redução da firmeza da polpa e da casca em relação às condições iniciais. Entretanto, a magnitude dessas alterações foi influenciada pelo sistema de embalagem (Tabela 5). As bananas armazenadas sem embalagem (controle negativo) apresentaram a maior perda de massa e os menores valores de firmeza da polpa e da casca ( $p \leq 0,05$ ). Entre os sistemas avaliados, os filmes PVA-E e PVA-

CA apresentaram a menor perda de massa e a maior preservação da firmeza da polpa, enquanto os filmes contendo carvão ativado funcionalizado apresentaram desempenho intermediário, ainda superior ao do controle sem embalagem. Para a firmeza da casca, todas as embalagens reduziram significativamente a perda desse atributo em relação ao controle, sem diferenças estatisticamente significativas entre as formulações.

**Tabela 5.** Atributos de qualidade das bananas após 11 dias de armazenamento dos diferentes sistemas de embalagem.

| Amostras                          | Perda de Massa            | Firmeza da polpa (N)       | Firmeza da casca (N)      |
|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| PVA-C                             | 13,68 ± 1,58 <sup>b</sup> | 0,2817 ± 0,01 <sup>c</sup> | 1,64 ± 0,12 <sup>a</sup>  |
| PVA-E                             | 8,95 ± 0,75 <sup>c</sup>  | 0,6701 ± 0,01 <sup>a</sup> | 1,51 ± 0,13 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA                            | 7,59 ± 0,21 <sup>c</sup>  | 0,6095 ± 0,03 <sup>a</sup> | 1,29 ± 0,04 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT05                       | 11,49 ± 0,07 <sup>b</sup> | 0,3988 ± 0,02 <sup>b</sup> | 1,32 ± 0,07 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT-10                      | 9,19 ± 0,22 <sup>c</sup>  | 0,3737 ± 0,01 <sup>b</sup> | 1,25 ± 0,15 <sup>bc</sup> |
| PVA-CA-CT-15                      | 9,16 ± 0,16 <sup>c</sup>  | 0,3760 ± 0,01 <sup>b</sup> | 1,54 ± 0,21 <sup>b</sup>  |
| Controle- Sem embalagem (11 dias) | 15,26 ± 0,81 <sup>a</sup> | 0,1911 ± 0,01 <sup>d</sup> | 0,75 ± 0,04 <sup>d</sup>  |

\* Os valores estão expressos como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si, segundo o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). PVA-C: filme controle; PVA-E: filme contendo emulsão; PVA-CA: filme com carvão ativado; PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 referem-se aos filmes de PVA contendo carvão ativado com bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvidos nas concentrações de 5, 10 e 15 g L<sup>-1</sup>, respectivamente.

A perda de massa em bananas ocorre principalmente devido à transpiração, intensificando-se durante o amadurecimento, quando aumenta a atividade respiratória característica dos frutos climatéricos (Salinas et al., 2024). Como todas as amostras foram armazenadas sob as mesmas condições ambientais, as diferenças observadas podem ser atribuídas às propriedades de barreira das embalagens. O melhor desempenho dos filmes PVA-E e PVA-CA está de acordo com os resultados de permeabilidade ao vapor d'água obtidos neste estudo, indicando que a incorporação da emulsão reduziu a transferência de umidade através da matriz polimérica. A presença da fase lipídica provavelmente dificultou a difusão do vapor de

água, reduzindo a transpiração e contribuindo para a manutenção da hidratação dos frutos durante o armazenamento. Resultados semelhantes foram relatados por Salinas et al. (2024), Al-Yahyai et al. (2025) e Kalita et al. (2026), que associaram a menor perda de massa de bananas revestidas à redução da transpiração promovida pela barreira formada pelos filmes.

A manutenção da firmeza da polpa acompanhou a tendência observada na perda de massa. O maior amolecimento observado nos frutos sem embalagem reflete o avanço do amadurecimento, processo caracterizado pela degradação da parede celular, solubilização das pectinas e conversão do amido em açúcares solúveis, processos regulados pelo etileno em frutos climatéricos (Salinas et al., 2024). A maior firmeza observada nos tratamentos PVA-E e PVA-CA sugere que a menor desidratação dos frutos contribuiu para retardar essas alterações fisiológicas. Esse comportamento indica que a manutenção da textura esteve relacionada principalmente às propriedades físicas e de barreira da embalagem, enquanto a incorporação dos compostos bioativos de *Clitoria ternatea* não promoveu efeito adicional sobre esse atributo nas condições avaliadas.

É importante observar que os tratamentos PVA-CA-CT-10 e PVA-CA-CT-15 apresentaram perdas de massa semelhantes às observadas no tratamento PVA-E, mas exibiram menor firmeza da polpa. Esse comportamento indica que a manutenção da firmeza não depende exclusivamente da redução da perda de água. Embora a menor transpiração contribua para retardar o amolecimento, a textura dos frutos também é influenciada por alterações bioquímicas associadas ao amadurecimento, incluindo a degradação da parede celular e a conversão do amido em açúcares solúveis, processos regulados pelo etileno. Assim, embora a redução da perda de água tenha contribuído para a manutenção da textura, os resultados indicam que esse atributo também depende da intensidade das alterações fisiológicas e bioquímicas associadas ao amadurecimento, e não é explicado exclusivamente pelas propriedades de barreira das embalagens.

Comportamento semelhante foi observado para a firmeza da casca, uma vez que todos os tratamentos com embalagem apresentaram valores superiores aos do controle sem proteção. A ausência de diferenças significativas entre as formulações reforça a ideia de que a presença da embalagem foi suficiente para retardar o amolecimento superficial dos frutos, efeito atribuído principalmente à redução das perdas de água e à menor intensidade das alterações fisiológicas durante o armazenamento. Resultados semelhantes foram descritos por Al-Yahyai et al. (2025) e Kalita et al. (2026), que também observaram maior preservação da textura de bananas acondicionadas em sistemas biodegradáveis.

### 3.3.2 Efeito das embalagens na cor instrumental dos frutos

A avaliação colorimétrica realizada no início do armazenamento demonstrou uniformidade entre os tratamentos, especialmente nas coordenadas  $a^*$  e  $b^*$ , indicando que todos os frutos apresentavam estágio de maturação semelhante antes do armazenamento (Tabela 6). Os valores negativos de  $a^*$  confirmam a predominância da coloração verde da casca, característica de bananas colhidas antes do climatério, nas quais a concentração de clorofila ainda mascara os carotenoides presentes nos tecidos (Wang, 2024). Essa homogeneidade inicial assegura que as alterações observadas ao final do armazenamento estejam relacionadas ao efeito das embalagens e não a diferenças fisiológicas entre os frutos.

Após 11 dias de armazenamento, a coordenada  $a^*$  foi o parâmetro colorimétrico mais sensível para distinguir os tratamentos. O filme controle (PVA-C) apresentou valores positivos de  $a^*$ , indicando degradação avançada da clorofila e amarelecimento da casca, enquanto todos os filmes contendo emulsão, carvão ativado ou carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea* mantiveram valores negativos de  $a^*$ , demonstrando maior preservação da coloração verde da casca. Em bananas, o aumento progressivo dos valores de  $a^*$  de negativos para positivos está diretamente associado à degradação da clorofila induzida pelo etileno e representa um dos indicadores instrumentais mais precisos do amadurecimento da casca (Salinas et al., 2024).

Diferenças significativas também foram observadas entre os tratamentos embalados. O filme PVA-CA-CT10 apresentou o menor valor de  $a^*$ , enquanto o PVA-CA-CT05 exibiu valores ligeiramente mais elevados, e as demais formulações apresentaram respostas intermediárias. Apesar dessas diferenças, todos os filmes contendo emulsão e/ou carvão ativado mantiveram valores negativos de  $a^*$ , indicando que a incorporação desses componentes retardou a degradação da clorofila em relação ao filme controle. Como não foi observada uma tendência consistente entre as formulações contendo diferentes concentrações de compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, os resultados sugerem que a preservação da coloração verde da casca esteve associada principalmente à presença da emulsão e do sistema carreador à base de carvão ativado, e não à concentração dos compostos bioativos adsorvidos.

Diferentemente da coordenada  $a^*$ , o croma ( $C^*$ ) e o ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) foram menos eficazes para diferenciar os tratamentos após o armazenamento. Os valores de croma foram menores para o PVA-CA-CT05 em comparação ao filme controle, enquanto as demais formulações apresentaram valores intermediários, sem uma relação consistente com a composição dos filmes. Da mesma forma, não foram observadas diferenças significativas no ângulo de matiz entre os filmes contendo emulsão, carvão ativado ou carvão ativado

funcionalizado, indicando que a tonalidade predominante da casca permaneceu semelhante, apesar das diferenças na intensidade da degradação da clorofila detectadas pela coordenada  $a^*$ . Esses resultados confirmam que a coordenada  $a^*$  foi o parâmetro mais sensível para monitorar o efeito das embalagens sobre a coloração da casca das bananas durante o armazenamento.

**Tabela 6.** Parâmetros colorimétricos (L\*, a\* e b\*) da banana ao longo do período de armazenamento – Dia 0.

| Amostras     | L*                        | a*                        | b*                        | C*                        | h                           |
|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| PVA-C        | 51,01 ± 4,24 <sup>b</sup> | -6,02 ± 4,76 <sup>a</sup> | 27,30 ± 3,45 <sup>a</sup> | 28,67 ± 3,30 <sup>a</sup> | 107,58 ± 1,48 <sup>b</sup>  |
| PVA-E        | 56,13 ± 3,17 <sup>a</sup> | -7,27 ± 0,13 <sup>a</sup> | 29,37 ± 0,34 <sup>a</sup> | 29,27 ± 1,71 <sup>a</sup> | 155,61 ± 18,08 <sup>a</sup> |
| PVA-CA       | 55,78 ± 2,66 <sup>a</sup> | -7,14 ± 1,00 <sup>a</sup> | 29,81 ± 0,07 <sup>a</sup> | 30,80 ± 0,38 <sup>a</sup> | 103,82 ± 2,13 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT05  | 57,41 ± 1,29 <sup>a</sup> | -6,90 ± 0,99 <sup>a</sup> | 29,14 ± 0,47 <sup>a</sup> | 29,97 ± 0,69 <sup>a</sup> | 103,02 ± 1,90 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT-10 | 57,59 ± 1,60 <sup>a</sup> | -7,66 ± 0,42 <sup>a</sup> | 29,90 ± 0,51 <sup>a</sup> | 30,94 ± 0,45 <sup>a</sup> | 104,79 ± 0,98 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT-15 | 58,97 ± 2,59 <sup>a</sup> | -7,98 ± 0,48 <sup>a</sup> | 29,09 ± 1,27 <sup>a</sup> | 30,64 ± 1,09 <sup>a</sup> | 105,71 ± 0,48 <sup>b</sup>  |

\*Valores expressos como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). PVA-C: filme controle; PVA-E: filme contendo emulsão; PVA-CA: filme com carvão ativado; PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 referem-se aos filmes de PVA contendo carvão ativado com bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvidos a partir dos nas concentrações de 5, 10 e 15 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 7.** Parâmetros colorimétricos (L\*, a\* e b\*) da banana ao longo do período de armazenamento - Dia 11.

| Amostras     | L*                         | a*                         | b*                         | C*                         | h                           |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| PVA-C        | 55,95 ± 1,76 <sup>a</sup>  | 6,69 ± 0,30 <sup>a</sup>   | 34,23 ± 2,20 <sup>a</sup>  | 34,74 ± 3,36 <sup>a</sup>  | 81,05 ± 1,87 <sup>b</sup>   |
| PVA-E        | 50,39 ± 1,66 <sup>ab</sup> | -7,94 ± 0,57 <sup>bc</sup> | 28,95 ± 1,98 <sup>ab</sup> | 30,27 ± 2,58 <sup>ab</sup> | 105,08 ± 0,39 <sup>a</sup>  |
| PVA-CA       | 47,73 ± 2,31 <sup>ab</sup> | -7,54 ± 0,55 <sup>bc</sup> | 27,29 ± 0,89 <sup>ab</sup> | 27,95 ± 1,54 <sup>ab</sup> | 114,07 ± 10,37 <sup>a</sup> |
| PVA-CA-CT05  | 45,52 ± 1,85 <sup>b</sup>  | -6,66 ± 0,81 <sup>b</sup>  | 24,58 ± 1,98 <sup>b</sup>  | 25,16 ± 1,89 <sup>b</sup>  | 101,38 ± 0,49 <sup>a</sup>  |
| PVA-CA-CT-10 | 51,21 ± 2,86 <sup>ab</sup> | -8,53 ± 0,81 <sup>c</sup>  | 28,09 ± 0,45 <sup>ab</sup> | 29,35 ± 0,23 <sup>ab</sup> | 107,07 ± 1,61 <sup>a</sup>  |
| PVA-CA-CT-15 | 49,00 ± 0,38 <sup>ab</sup> | -7,17 ± 2,00 <sup>bc</sup> | 28,48 ± 1,21 <sup>a</sup>  | 29,43 ± 1,73 <sup>ab</sup> | 104,99 ± 2,71 <sup>a</sup>  |

Valores expressos como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). PVA-C: filme controle; PVA-E: filme contendo emulsão; PVA-CA: filme com carvão ativado; PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 referem-se aos filmes de PVA contendo carvão ativado com bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvidos a partir dos nas concentrações de 5, 10 e 15 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

O aspecto visual dos frutos (Figura 4) corroborou os resultados obtidos pelas análises instrumentais de cor. O controle sem embalagem apresentou estágio de amadurecimento mais avançado, caracterizado pela predominância da coloração amarela da casca, além de maior incidência de escurecimento e defeitos superficiais. Embora a inspeção visual tenha sugerido pequenas diferenças na aparência da casca entre os frutos embalados, essas observações foram, de modo geral, consistentes com as medições instrumentais. As bananas acondicionadas em filmes contendo emulsão, carvão ativado ou carvão ativado funcionalizado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea* preservaram uma coloração mais verde da casca em comparação às embaladas com o filme controle (PVA-C), que apresentou amarelecimento mais pronunciado. Entre as formulações funcionalizadas, os tratamentos PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 aparentaram preservar ligeiramente melhor a coloração verde da casca do que os demais filmes; entretanto, essas diferenças visuais foram discretas e apenas parcialmente confirmadas pelas análises instrumentais. Dessa forma, os registros fotográficos devem ser considerados como evidências qualitativas que complementam a análise colorimétrica, e não como base para distinguir o desempenho das diferentes formulações.



**Figura 4.** Fotografias representativas de bananas acondicionadas em filmes à base de PVA no dia 0 e após 10 dias de armazenamento, incluindo o controle sem embalagem no décimo dia.

Os resultados obtidos não permitem atribuir a manutenção da coloração verde a um efeito específico do carvão ativado, uma vez que os tratamentos com esse material não diferiram estatisticamente em relação às demais embalagens. Embora o carvão ativado apresente elevada área superficial e potencial de adsorção de pequenas moléculas gasosas, esse mecanismo não foi avaliado diretamente neste estudo. Da mesma forma, a incorporação dos compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, embora aumente a capacidade antioxidante dos filmes, não promoveu efeito adicional nos parâmetros colorimétricos. Assim, os resultados sugerem que o retardamento da degradação da clorofila esteve predominantemente relacionado às propriedades de barreira da embalagem, e não a um efeito específico dos materiais incorporados.

As coordenadas  $L^*$  e  $b^*$  não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ao final do armazenamento, indicando que a coordenada  $a^*$  foi o parâmetro de cor mais sensível para detectar o efeito das embalagens sobre o amadurecimento da casca.

#### 3.3.4 pH e sólidos solúveis

Após 11 dias de armazenamento, as alterações no pH, na acidez titulável e nos sólidos solúveis totais (SST) refletiram a progressão do amadurecimento das bananas, embora a magnitude dessas alterações tenha dependido do sistema de embalagem. O controle sem embalagem e os frutos acondicionados no filme controle de PVA (PVA-C) apresentaram os menores valores de pH, a maior acidez titulável e os maiores teores de SST, enquanto os filmes contendo emulsão, carvão ativado ou carvão ativado carregado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea* mantiveram valores de pH significativamente mais elevados, menor acidez titulável e teores de SST próximos aos observados no início do armazenamento.

A manutenção dos teores de SST próximos aos valores observados no Dia 0 constitui uma das evidências mais consistentes da eficácia dos sistemas de embalagem desenvolvidos. Da mesma forma, a menor acidez titulável e os maiores valores de pH observados nesses tratamentos indicam que as embalagens retardaram as alterações bioquímicas associadas ao amadurecimento. Essas respostas são coerentes com a menor perda de massa, a maior preservação da firmeza da polpa e a melhor manutenção da coloração verde da casca, indicando que os filmes modificados reduziram a velocidade de amadurecimento. Resultados semelhantes foram relatados por Kalita et al. (2026) e Al-Yahyai et al. (2025), que atribuíram o retardamento do amadurecimento de bananas ao efeito de barreira dos materiais de embalagem sobre as trocas gasosas entre o fruto e a atmosfera circundante. Embora a composição gasosa interna não tenha sido determinada no presente estudo, as propriedades de barreira dos filmes podem ter

favorecido o estabelecimento passivo de uma atmosfera modificada, com menor disponibilidade de O<sub>2</sub> e maiores concentrações de CO<sub>2</sub> em decorrência da respiração dos frutos. Essas condições são reconhecidas por reduzir a taxa respiratória e a produção de etileno, retardando as alterações bioquímicas associadas ao amadurecimento das bananas.

Embora o pH e a acidez titulável tenham refletido as alterações metabólicas ocorridas durante o armazenamento, ambos os parâmetros foram menos sensíveis do que os SST para discriminar a eficácia dos diferentes sistemas de embalagem. Em contraste, os sólidos solúveis totais distinguiram claramente os tratamentos, demonstrando que a incorporação da emulsão e do sistema carreador à base de carvão ativado retardou efetivamente a hidrólise do amido e, consequentemente, o amadurecimento dos frutos..

**Tabela 8.** Valores médios de pH e sólidos solúveis totais (°Brix) da banana no Dia 0 e após 11 dias de armazenamento em diferentes sistemas de embalagem.

| Amostras          | pH                      | Acidez titulável (g de ácido málico/100 g de fruto) | Brix                    |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|
| Dia 0             | 5,6 ± 0,05 <sup>a</sup> | 0,236 ± 0,048 <sup>b</sup>                          | 6,3 ± 2,89 <sup>b</sup> |
| PVA-C             | 4,5 ± 0,1 <sup>c</sup>  | 0,412 ± 0,009 <sup>a</sup>                          | 23,3 ± 1,2 <sup>a</sup> |
| PVA-E             | 5,0 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 0,257 ± 0,019 <sup>b</sup>                          | 7,3 ± 0,5 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA            | 4,9 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 0,277 ± 0,009 <sup>b</sup>                          | 6,6 ± 0,5 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT05       | 4,9 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 0,263 ± 0,010 <sup>b</sup>                          | 7,0 ± 0,0 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT-10      | 4,6 ± 0,3 <sup>c</sup>  | 0,263 ± 0,048 <sup>b</sup>                          | 7,6 ± 0,5 <sup>b</sup>  |
| PVA-CA-CT-15      | 5,0 ± 0,1 <sup>b</sup>  | 0,236 ± 0,010 <sup>b</sup>                          | 7,3 ± 0,6 <sup>b</sup>  |
| Controle (dia 11) | 4,5 ± 0,05 <sup>c</sup> | 0,432 ± 0,019 <sup>a</sup>                          | 25,6 ± 0,6 <sup>a</sup> |

\* Valores expressos como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente entre si, segundo o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). PVA-C: filme controle; PVA-E: filme contendo emulsão; PVA-CA: filme com carvão ativado; PVA-CA-CT05, PVA-CA-CT10 e PVA-CA-CT15 referem-se aos filmes de PVA contendo carvão ativado com bioativos de *Clitoria ternatea* adsorvidos nas concentrações de 5, 10 e 15 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Esse comportamento foi observado apenas no controle sem embalagem e no tratamento PVA-C, enquanto os filmes contendo emulsão e/ou o sistema carreador à base de carvão ativado mantiveram os teores de SST próximos aos valores determinados no início do armazenamento. Em conjunto com a menor acidez titulável observada nesses tratamentos, esses resultados indicam que os filmes modificados retardaram as alterações metabólicas associadas ao amadurecimento, especialmente a conversão do amido em açúcares solúveis, mantendo os frutos em um estágio menos avançado de amadurecimento.

#### 4. CONCLUSÕES

O resíduo de malte cervejeiro demonstrou ser um precursor sustentável e tecnicamente viável para a produção de carvão ativado com elevada área superficial específica e estrutura predominantemente micro-mesoporosa, características que favoreceram a adsorção de compostos bioativos provenientes de *Clitoria ternatea*. A incorporação desse material em filmes à base de poli(álcool vinílico) (PVA) possibilitou o desenvolvimento de embalagens ativas biodegradáveis com propriedades mecânicas, de barreira e antioxidantes adequadas.

Os filmes contendo carvão ativado carregado com compostos bioativos de *Clitoria ternatea* apresentaram maior capacidade antioxidante em relação ao filme controle, demonstrando que o sistema carreador incorporou e reteve esses compostos de forma eficiente na matriz polimérica. Durante o armazenamento das bananas, todos os sistemas de embalagem reduziram a perda de massa e preservaram a qualidade dos frutos em comparação ao controle sem embalagem. A manutenção de baixos teores de sólidos solúveis totais, associada à maior firmeza da polpa e à melhor preservação da coloração verde da casca, indicou o retardamento do amadurecimento dos frutos, refletindo o melhor desempenho de barreira dos filmes modificados.

Nas condições avaliadas, a incorporação de compostos bioativos de *Clitoria ternatea* não promoveu efeito adicional sobre os atributos de qualidade pós-colheita das bananas além daquele proporcionado pelos sistemas de embalagem modificados. Entretanto, esses resultados não descartam o potencial de aplicação dos compostos bioativos de *Clitoria ternatea*, uma vez que o período de armazenamento foi limitado e não foram avaliadas a incidência de doenças nem outros aspectos relacionados à deterioração microbiológica. Estudos futuros devem investigar a eficácia desses sistemas de embalagem em períodos de armazenamento mais prolongados e em frutos mais suscetíveis a doenças pós-colheita. Essas investigações permitirão uma avaliação mais abrangente da contribuição dos compostos bioativos adsorvidos ao carvão ativado, especialmente quanto ao seu potencial no controle da deterioração microbiológica e na ampliação da aplicação desses sistemas de embalagens ativas biodegradáveis para diferentes produtos hortícolas.

## 5. REFERÊNCIAS

Ahmed, M. W., Haque, M. A., Mohibullah, M., Khan, M. S. I., Islam, M. A., Mondal, M. H. T., & Ahmmed, R. (2022). A review on active packaging for quality and safety of foods: Current trends, applications, prospects and challenges. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100913. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100913>

Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2023). Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.003>

Al-Yahyai, L., Al-Yahyai, R., Janke, R., Al-Dairi, M., & Pathare, P. B. (2025). Effect of natural edible oil coatings and storage conditions on the postharvest quality of bananas. *AgriEngineering*, 7(7), 234. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7070234>

Aljabary, A. M. A. O., Awlqadr, F. H., Altemimi, A. B., Abdulrahman, A. B. M., Saeed, M. N., & Hesarinejad, M. A. (2025). Advances in oil-based edible coatings for postharvest preservation of fruits and vegetables: A comprehensive review of biopolymer types, functional plant oils, nanoemulsion systems, and application techniques. *Journal of Agriculture and Food Research*, 24, Article 102425. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102425>

Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2023). Official methods of analysis of AOAC International (23rd ed.). AOAC International.

ASTM International (2005). Standard test methods for water vapor transmission of materials (ASTM E96/E96M-05). ASTM International.

ASTM International (2012). Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting (ASTM D882-12). ASTM International.

Azeredo H.M.C. (2009). Nanocomposites for food packaging applications. *Food Research International* 42(9):1240–1253. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.019>

Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373–380. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>

Borges, J. F., Nascimento, P. A., Alves, A. N., Santos, M. P. F., Pinto Brito, M. J., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2024). Laccase immobilization on activated carbon from hydrothermal carbonization of corn cob. *Waste and Biomass Valorization*, 15(1), 501–520. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02160-1>

Brito, M. J. P., Bonomo, R. C. F., Veloso, C. M., et al. (2020). Development of activated carbon from pupunha palm heart sheaths: Effect of synthesis conditions and its application in lipase

immobilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), Article 104349. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104391>.

Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>

Cazón, P., Mateus, A. R., & Sanches Silva, A. (2025). Advances in active packaging using natural biopolymers and fruit by-products for enhanced food preservation. *Food Research International*, 213, Article 116439. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116439>

Chen, J., Zheng, M., Tan, K. B., Lin, J., Chen, M., & Zhu, Y. (2022). Polyvinyl alcohol/xanthan gum composite film with excellent food packaging, storage and biodegradation capability as potential environmentally-friendly alternative to commercial plastic bag. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.119>

Cruz, R. M. S., Krauter, V., Krauter, S., Agriopoulou, S., Weinrich, R., Herbes, C., Scholten, P. B. V., Uysal-Unalan, I., Sogut, E., Kopacic, S., Lahti, J., Rutkaite, R., & Varzakas, T. (2022). Bioplastics for food packaging: Environmental impact, trends and regulatory aspects. *Foods*, 11(19), 3087. <https://doi.org/10.3390/foods11193087>

Devi, M., & Gidado, M. J. (2026). Sustainable valorisation of postharvest waste for disease control and quality preservation in fruits and vegetables. *Waste Management*, 210, Article 115253. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115253>

Duan, D., Chen, D., Huang, L., Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Xiao, G., Zhang, W., Lei, H., & Ruan, R. (2021). Biomass-derived activated carbon as catalyst: A review of applications in fast pyrolysis processes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105246>

Escher, G. B., Wen, M., Zhang, L., Rosso, N. D., & Granato, D. (2020). Phenolic composition by UHPLC-Q-TOF-MS/MS and stability of anthocyanins from *Clitoria ternatea* L. (butterfly pea) blue petals. *Food Chemistry*, 331, Article 127341. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127341>

Escobar, D., Sala, A., Silvera, C., Harsipe, R., & Márquez, R. (2009). Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: Estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. *Innotec*, 4, 33–36. <https://doi.org/10.26461/04.07>

Figueiredo, J. L., Pereira, M. F. R., Freitas, M. M. A., & Órfão, J. J. M. (1999). Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*, 37(9), 1379–1389. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00333-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00333-9)

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>

Franca, T., Goncalves, D., & Cena, C. (2022). ATR-FTIR spectroscopy combined with machine learning for classification of PVA/PVP blends in low concentration. *Vibrational Spectroscopy*, 120, 103378. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103378>

Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., & Al-Amiery, A. A. (2015). Properties and Applications of Polyvinyl Alcohol, Halloysite Nanotubes and Their Nanocomposites. *Molecules*, 20(12), 22833–22847. <https://doi.org/10.3390/molecules201219884>

Gajanananda, G., Charoenliviisiri, S., & Oratai, P. (2025). Development of pH indicator film containing butterfly pea flower (*Clitoria ternatea* L.) anthocyanin using locust bean gum/unbleached wheat flour matrix. *Next Materials*, 9, 101208. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101208>

Galus, S., & Kadzińska, J. (2015). Food applications of emulsion-based edible films and coatings. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.011>

Gonçalves, G. C. P., Rosas, A. L. G., Sousa, R. C., Vieira, T. R. R., Sousa, T. C. A., Ramires, T., Silveira, T. F. F., Barros, L., Silva, W. P., Dias, Á. R. G., Zavareze, E. R., & Meinhart, A. D. (2024). A green method for anthocyanin extraction from *Clitoria ternatea* flowers cultivated in southern Brazil: Characterization, in vivo toxicity, and biological activity. *Food Chemistry*, 435, 137575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137575>

Grzebieniarz, W., Biswas, D., Roy, S., & Jamróz, E. (2023). Advances in biopolymer-based multi-layer film preparations and food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101033. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101033>

Handayani, L., Aprilia, S., Rahman, N., & Bilad, M. R. (2024). Identification of anthocyanin profiles in butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) flowers under different extraction conditions: Evaluation of its potential as a natural blue food colorant and application as a colorimetric indicator. *South African Journal of Chemical Engineering*, 49, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.04.008>

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. (2020). Novel edible coating of starch-based stenospermocarpic mango prolongs the shelf life of mango “Ataulfo” fruit. *Journal of Food Quality*. 1320357, 9. <https://doi.org/10.1155/2020/1320357>

Jong-Whan Rhim, Hwan-Man Park, Chang-Sik Há. ( 2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*: 38 (10–11), 1629- 1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>.

Kalita, P., Goswami, A., Bhattacharjee, B., Nath, D., & Roy, S. (2026). Recent advances in biodegradable polymer-based packaging film/coatings on shelf-life extension of banana. *Food Chemistry*, 507, 148206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.148206>

Kaur, R., & Watson, J. A. (2024). A scoping review of postharvest losses, supply chain management, and technology: Implications for produce quality in developing countries. *Journal of the ASABE*, 67(5), 1103–1131. <https://doi.org/10.13031/ja.15660>

Kuśmierk, K., Szala, M., & Świątkowski, A. (2016). Adsorption of 2,4-dichlorophenol and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid from aqueous solutions on carbonaceous materials obtained by combustion synthesis. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.03.036>

Law, K. L., & Narayan, R. (2022). Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life. *Nature Reviews Materials*, 7, 104–116. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00382-0>

Liu, D., Cui, Z., & Zhong, Y. (2021). A colorimetric film based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose incorporated with red cabbage anthocyanin for monitoring pork freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100641>

Magwaza, L. S.; Opara, U. L. (2015). Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products – A review. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, 184, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.01.001>

Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.

Mondal, K., Bhattacharjee, S. K., Goud, V. V., & Katiyar, V. (2024). Effect of waste *Dunaliella tertiolecta* biomass ethanolic extract and turmeric essential oil on properties of guar gum-based active films. *Food Hydrocolloids*, 146, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109199>

Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*, 42(1), 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2003.09.022>

Mukherjee, P. K., Kumar, V., Kumar, N. S., & Heinrich, M. (2008). The Ayurvedic medicine *Clitoria ternatea*-From traditional use to scientific assessment. *Journal of Ethnopharmacology*, 120(3), 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.09.009>

Oguis, G. K., Gilding, E. K., Jackson, M. A., & Craik, D. J. (2019). Butterfly pea (*Clitoria ternatea*), a cyclotide-bearing plant with applications in agriculture and medicine. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 645. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00645>

Oliveira, J. P. de, Almeida, M. E. F. de, Costa, J. da S. S., Nascimento, C. S. do, Oliveira, J. S. de, Oliveira, E. L., Santos Rolim, C. S. dos, Landim, L. B., Silva, N. M. C. da, & Oliveira, C. P. de. (2025). The incorporation of *Pereskia aculeata* Miller extract into the starch film provides antioxidant capacity for the preservation of refrigerated meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 52, 101654. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101654>

Oun, A. A., Shin, G. H., Rhim, J. W., & Kim, J. T. (2022). Recent advances in polyvinyl alcohol-based composite films and their applications in food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100991>

Pasukamonset, P., Pumalee, T., Sanguansuk, N., Chumyen, C., Wongvasu, P., Adisakwattana, S., & Ngamukote, S. (2018). Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of sponge cakes fortified with *Clitoria ternatea* extract. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), 2881–2889. [10.1007/s13197-018-3204-0](https://doi.org/10.1007/s13197-018-3204-0)

Pérez Córdoba, L. J., & Sobral, P. J. A. (2017). Physical and antioxidant properties of films based on gelatin, gelatin–chitosan or gelatin–sodium caseinate blends loaded with nanoemulsified active compounds. *Journal of Food Engineering*, 213, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.023>

Pop, L. M., Cozmuta, A. M., Nicula, C., Cozmuta, L. M., & Peter, A. (2024). Attempts to obtain material based on polyvinyl alcohol with barrier properties against water vapor. *Applied Sciences*, 14(10), 4310. <https://doi.org/10.3390/app14104310>

Qi, J., Zhang, H., Wang, Y., Mani, M. P., & Jaganathan, S. K. (2018). Development and blood compatibility assessment of electrospun polyvinyl alcohol blended with metallocene polyethylene and *Plectranthus amboinicus* (PVA/mPE/PA) for bone tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 2777–2788. <https://doi.org/10.2147/IJN.S151242>

Ren, Y., Fan, X., Cao, L., & Chen, Y. (2024). Water-resistant and barrier properties of poly(vinyl alcohol)/nanocellulose films enhanced by metal ion crosslinking. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134245. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134245>

Salinas, R. A., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., & Acosta-Motos, J. R. (2024). Strategies to delay ethylene-mediated ripening in climacteric fruits: Implications for shelf life extension and postharvest quality. *Horticulturae*, 10(8), 840. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080840>

Santos, M. P. F., Silva, J. F., Fontan, R. C. I., Bonomo, R. C. F., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2020). New insight about the relationship between the main characteristics of precursor materials and activated carbon properties using multivariate analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(7), 1501–1511. <https://doi.org/10.1002/cjce.23721>

Sapper, M., & Chiralt, A. (2018). Starch-based coatings for preservation of fruits and vegetables. *Coatings*, 8(5), Article 152. <https://doi.org/10.3390/coatings8050152>

Shankar, S., Teng, X., Li, G., & Rhim, J. W. (2015). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. *Food Hydrocolloids*, 45, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.12.001>

Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J., & Bryce, D. L. (2014). *Spectrometric identification of organic compounds* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Souza, R. D., Lopes, E. R., Ramos, E. M., Oliveira, T. V., & Oliveira, C. P. (2024). Active packaging: Development and characterization of polyvinyl alcohol (PVA) and nitrite film for pork preservation. *Food Chemistry*, 437, 137811. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137811>

Sumer Gaaz, T., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., & Al-Amiery, A. A. (2015). Properties and applications of polyvinyl alcohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites. *Molecules*, 20(12), 22833–22847. <https://doi.org/10.3390/molecules201219884>

Trajkovska Petkoska, A., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International*, 140, 109981. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>

Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

Versino, F., Ortega, F., Monroy, Y., Rivero, S., López, O. V., & García, M. A. (2023). Sustainable and bio-based food packaging: A review on past and current design innovations. *Foods*, 12(5), Article 1057. <https://doi.org/10.3390/foods12051057>

Viana, E. B. M., Almeida, M. F., Cordeiro, M. J. M., Lacerda, S. M. P., São José, A. R., Bonomo, R. C. F., Souza, C. C. L., Santos, M. P. F., & Veloso, C. M. (2026). Eco-friendly bioplastic film produced with green plantain starch (*Musa paradisiaca* L.): Effect of activated carbon addition and hydrothermal modification. *Polymer Composites*, 47(9), 8048–8063. <https://doi.org/10.1002/pc.70669>

Wang, T., Song, Y., Lai, L., Fang, D., Li, W., Cao, F., & Su, E. (2024). Sustaining freshness: Critical review of physiological and biochemical transformations and storage techniques in postharvest bananas. *Food Packaging and Shelf Life*, 46, 101386. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101386>

Xie, Q., Zheng, X., Li, L., Ma, L., Zhao, Q., Chang, S., & You, L. (2021). Effect of curcumin addition on the properties of biodegradable pectin/chitosan films. *Molecules*, 26(8), 2152. <https://doi.org/10.3390/molecules26082152>

Xiong, Y., Zhang, P., Luo, J., Johnson, S., & Fang, Z. (2019). Effect of processing on the phenolic contents, antioxidant activity and volatile compounds of sorghum grain tea. *Journal of Cereal Science*, 85, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.10.012>

Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2018). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165–199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

Yim, Y. J., & Kim, B. J. (2023). Preparation and characterization of activated carbon/polymer composites: A review. *Polymers*, 15(16), Article 3472. <https://doi.org/10.3390/polym15163472>

Zor, M., Şen, F., Candan, Z., Ivanov, E., Batakliiev, T., Georgiev, V., & Menseidov, D. (2024). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol (PVA)/carbonized waste rubber biocomposite films. *Polymers*, 16(8), Article 1050. <https://doi.org/10.3390/polym16081050>