



Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB
Recredenciada pelo Decreto Estadual
Nº 16.825, de 04.07.2016



Governo do
Estado da Bahia

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS
CAMPUS JUVINO DE OLIVEIRA
Área de Concentração: Engenharia De Alimentos

FILMES BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE BANANA-DA-TERRA
(*Musa Paradisiaca* L) REFORÇADOS COM MONTMORILONITA PARA
APLICAÇÃO EM ALIMENTOS

Autora: Sara Moreno Pereira Lacerda
Orientadora: Prof.^a DSc. Cristiane Patrícia de Oliveira
Coorientadora: Prof.^a DSc. Cristiane Martins Veloso

Itapetinga – Bahia

Agosto, 2026

SARA MORENO PEREIRA LACERDA

**FILMES BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE BANANA-DA-TERRA
(*Musa Paradisiaca* L) REFORÇADOS COM MONTMORILONITA PARA
APLICAÇÃO EM ALIMENTOS**

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Orientadora: Prof.^a DSc. Cristiane Patrícia de Oliveira
Coorientadora: Prof.^a DSc. Cristiane Martins Veloso

Itapetinga – Bahia

Agosto, 2026

634.772 Lacerda, Sara Moreno Pereira.
L141f Filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L) reforçados com montmorilonita para aplicação em alimentos. / Sara Moreno Pereira Lacerda. – Itapetinga-BA: UESB, 2026.
151f.

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Área de Concentração em Engenharia de Alimentos. Sob a orientação da Prof.^a D. Sc. Cristiane Patrícia de Oliveira e coordenação da Prof.^a D. Sc. Cristiane Martins Veloso.

1. Filmes biodegradáveis – Amido de banana-da-terra. 2. Embalagens inteligentes para alimentos. 3. Embalagens biodegradáveis e sustentáveis - Pós-colheita. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Engenharia e Ciências de Alimentos, *Campus* de Itapetinga. II. Oliveira, Cristiane Patrícia de. III. Veloso, Cristiane Martins. IV. Título.

CDD(21): 634.772

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Embalagens – Alimentos – Proteção e conservação

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: “FILMES BIODEGRADÁVEIS À BASE DE AMIDO DE BANANA-DA-TERRA (*Musa Paradisiaca* L) COM MONTMORILONITA PARA APLICAÇÕES EM ALIMENTOS”

Autor (a): SARA MORENO PEREIRA LACERDA

Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Cristiane Patrícia de Oliveira

Coorientadora: Prof.^a DSc. Cristiane Martins Veloso

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do Título de **DOCTOR(a) EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **JOCILANE PEREIRA DE OLIVEIRA**
Data: 31/08/2026 17:44:29-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr.^a Jocilane Pereira de Oliveira
ORCID:<https://orcid.org/0009-0005-7504-6753>

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO TONETTO DE FREITAS**
Data: 01/09/2026 10:52:25-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Sérgio Tonetto de Freitas (Embrapa Semiárido)
ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-9579-7304>

Documento assinado digitalmente
 **JOAO CLAUDIO VILVERT**
Data: 01/09/2026 10:39:39-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. João Claudio Vilvert (Embrapa Semiárido)
ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-8052-5269>

Documento assinado digitalmente
 **TAILA VELOSO DE OLIVEIRA**
Data: 01/09/2026 16:18:02-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Taila Veloso de Oliveira (UFV)
ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-444-9530>

Documento assinado digitalmente
 **CRISTIANE PATRICIA DE OLIVEIRA**
Data: 09/09/2026 14:25:55-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Cristiane Patrícia de Oliveira
Orientadora - UESB
Presidente da Banca
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-5789>

Itapetinga-BA, 31 de agosto de 2026.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.” Proverbios 16:3

Aos meus amados filhos Guilherme e Luísa

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me sustentado ao longo desta jornada tão fascinante quanto desafiadora. Foi Nele que encontrei forças para seguir em frente nos momentos de incerteza e celebrar cada conquista ao longo desse caminho.

Ao meu esposo, Davidson Lacerda, minha eterna gratidão por todo o amor, apoio, compreensão e companheirismo durante esta caminhada. Você esteve ao meu lado em todos os momentos e, sem o seu incentivo, este sonho dificilmente teria se concretizado.

Aos meus filhos, Guilherme Pereira e Luísa Pereira, dedico esta conquista. Tudo o que a mamãe faz é por vocês e para vocês. Desde o momento em que descobri a gravidez gemelar, soube que desistir não era uma opção. Muitas vezes fui para as aulas e para o laboratório carregando medos, ansiedade e inúmeras dúvidas, mas também carregava a certeza de que precisava seguir em frente por vocês. Vocês foram o meu maior combustível durante toda essa jornada e hoje celebram comigo o encerramento de mais um ciclo.

Aos meus pais, Uildo Pereira e Ilza Moreno, minha profunda gratidão por serem minha base, minha rede de apoio e minha torcida constante. Obrigada por acreditarem em mim, por me incentivarem e por nunca permitirem que eu deixasse de acreditar no meu potencial.

À minha orientadora, professora DSc. Cristiane Patrícia de Oliveira, expresso minha mais profunda gratidão por ter acreditado em mim desde o início. Mesmo sabendo que eu era mãe de dois bebês recém-nascidos, acolheu-me e aceitou o desafio de me orientar. Ao longo dessa caminhada, não apenas conduziu este trabalho com competência e dedicação, mas também contribuiu de forma decisiva para o meu crescimento profissional. Obrigada pela confiança, pelos ensinamentos, pelas correções, pelas conversas, pelas broncas quando necessárias e pelo reconhecimento nos momentos oportunos. Cris, meu muito obrigada por tudo.

À minha coorientadora, professora DSc. Cristiane Martins Veloso, agradeço por ter aberto as portas do Laboratório de Química III, tornando possível o desenvolvimento desta pesquisa em um ambiente que também me permitiu estar mais próxima dos meus filhos. Obrigada por confiar no meu trabalho, pelos conhecimentos compartilhados e por todo o suporte oferecido durante esta trajetória. Agradeço, especialmente, pelo apoio humano, pelo incentivo constante e pelo cuidado com a minha saúde

emocional. Seu incentivo para que eu buscasse ajuda quando necessário e suas palavras reafirmando o meu potencial foram fundamentais para que eu encontrasse forças para continuar.

Aos meus amigos de caminhada, Maria José Missão, Matheus Ferreira, Eduardo Macêdo, Maria Isabella Petra e Thamires Silva, muito obrigada por tudo o que compartilhamos. Vocês foram muito mais do que colegas de laboratório; foram amigos que permaneceram ao meu lado quando os desafios pareciam maiores que as minhas forças. Levo cada um de vocês no coração e desejo que nossa amizade permaneça por toda a vida.

Às minhas irmãs, aos meus sobrinhos e a todos os meus familiares e amigos que, de diferentes formas, torceram por mim, me incentivaram e celebraram cada etapa desta conquista, deixo o meu mais sincero agradecimento.

Aos colegas do Laboratório de Química III e ao Grupo de Pesquisa em Embalagens Ativas e Inteligentes, agradeço pelo apoio, pela parceria e pela colaboração durante a realização dos experimentos.

Ao professor Alcebíades Rebouças, coordenador do Laboratório Biofábrica, agradeço pela confiança depositada em meu trabalho e pelo suporte com equipamentos que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

À professora Joseane Oliveira, coordenadora do Laboratório de Solos do IFBA, agradeço pela parceria, pela receptividade e pela disponibilização do laboratório para a realização das análises.

Aos pesquisadores Sérgio Freitas e João Vilverte, da Embrapa Semiárido, agradeço pela parceria, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

A Professora Taíla Veloso da Universidade Federal de Viçosa, agradeço pela parceria, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), agradeço pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e por toda a estrutura disponibilizada durante minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço a banca pelas valiosas contribuições.

Por fim, expresso minha sincera gratidão a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho e fizeram parte desta trajetória, ainda que não tenham sido mencionados individualmente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO IV	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	2
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Amido	5
3.1.1. Filmes	7
3.2 Montmorilonita (MMT)	11
3.3 Embalagens inteligentes com curcumina	16
REFERÊNCIAS	19
CAPÍTULO II	26
.....	26
1. INTRODUCTION.....	27
2. MATERIALS AND METHODS	30
2.1 Raw Materials	30
2.2 Starch Extraction and Characterization.....	30
2.2.1 Starch Extraction	30
2.2.2 Chemical Characterization of Starch.....	30
2.3. Montmorillonite characterization	30
2.4 Film Preparation	30
2.5 Film Characterization.....	31
2.5.1 Morphostructural Analysis by Scanning Electron Microscopy (SEM)	31
2.5.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	31
2.5.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)	31
2.5.4 Thickness.....	31
2.5.5 Water Vapor Permeability (WVP).....	31

2.5.6 Solubility	32
2.5.7 Mechanical Properties	32
2.5.8 Color and opacity	32
2.6. Biodegradability of the films.....	33
2.7 Application of the films as packaging for cherry tomatoes.....	33
2.7.1. Determination of postharvest quality parameters of cherry tomatoes	34
2.8. Experimental design and statistical analysis	34
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	34
3.1 Starch characterization	34
3.2 Montmorillonite particle size	34
3.3 Morphostructural analysis by scanning electron microscopy (SEM).....	34
3.4 Analysis by Mid-Infrared Spectroscopy (FTIR – ATR)	37
3.5 Thermogravimetric analysis (TGA and DTG).....	39
3.6 Thickness, water vapor permeability (WVP), and water solubility	39
3.7 Mechanical properties	41
3.8 Instrumental color and opacity of the films.....	42
3.9 Biodegradability	43
3.10 Application of the films as packaging for postharvest preservation of cherry tomatoes ...	44
4. CONCLUSION.....	51
REFERENCES.....	52
CAPÍTULO III.....	58
1. INTRODUCTION.....	60
2. MATERIALS AND METHODS.....	62
2.1 Raw material	63
2.2. Film preparation and characterization.....	63
2.2.1. Water vapor permeability of the films (WVP).....	63
2.2.2. Mechanical properties of the films	64
2.2.3. Biodegradability of the films.....	64
2.3 Application of the films in a passive modified atmosphere system for minimally processed mangoes.....	65
2.3.1. Processing and packaging of minimally processed mangoes	65
2.3.2. Atmospheric composition and physiological parameters of the fruits.....	65
2.3.3. Instrumental color parameters of the product.....	65
2.3.4. Physicochemical parameters of fresh-cut mango.....	66
2.4 Statistical analysis	66

3. RESULTS AND DISCUSSION	67
3.1. Starch film characteristics	67
3.2. Biodegradability of the films	69
3.3. Atmospheric composition and physiological parameters of minimally processed mango ..	69
3.2. Color and appearance of minimally processed mango	72
3.2. Color and appearance of minimally processed mango	73
3.3. Physicochemical parameters of minimally processed mango	75
4. CONCLUSION	78
REFERENCES	79
CAPÍTULO IV	87
RESUMO	88
1. INTRODUÇÃO	89
2. MATERIAL E MÉTODOS	91
2.1 Materiais	91
2.2 Preparação de emulsão de curcumina	91
2.3 Determinação do tamanho médio das gotículas e da distribuição de tamanho das nanoemulsões	92
2.4 Preparação do filme	92
2.4.1 Análise Morfoestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	93
2.4.2 Espectrofotometria de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	93
2.4.3 Análise por Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC)	93
2.4.4 Espessura	93
2.4.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)	94
2.4.6 Solubilidade em água (S)	94
2.4.7 Propriedades mecânicas	94
2.4.8 Propriedades óticas e de cor	95
2.4.9 Biodegradabilidade dos filmes	95
2.4.10 Teste de alteração de cor dos filmes a diferentes pH	96
2.5 Avaliação da deterioração da carne de frango	96
2.5.1 Avaliação cromática dos filmes	97
2.5.2 Determinação do pH da carne	97
2.6 Planejamento e análise estatística	98
2.6.1 Análise estatística dos filmes	98
2.6.2 Análise estatística dos filmes aplicados à carne de frango	98

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
3.1 Avaliação das nanoemulsões O/A de curcumina.....	98
3.2 Análise morfoestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	99
3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	102
3.4 Análise térmica (DSC)	103
3.5 Espessura, Permeabilidade ao vapor de água e Solubilidade em água.....	105
3.6 Propriedades mecânicas	107
3.7 Propriedades óticas e de cor dos filmes.....	108
3.8 Biodegradabilidade	110
3.9 Análise de resposta de pH nos filmes	111
3.10 Avaliação da deterioração da carne de frango.....	114
3.10.1 Resposta colorimétrica dos filmes durante o armazenamento	114
3.10.2 Correlação entre parâmetros colorimétricos e indicadores de deterioração	117
3.10.3 Relação multivariada entre os parâmetros de deterioração e a resposta dos sensores .	120
4. CONCLUSÃO	122
REFERÊNCIAS	123
CAPÍTULO V.....	128
CONSIDERAÇÕES FINAIS	129

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Estrutura da amilose e da amilopectina.....	25
Figura 2. Representação genérica da molécula de amido.....	26
Figura 3. Estrutura da Montmorilonita.....	31
Figura 4. Esquema de diferentes tipos de compósitos resultantes da interação de silicatos e polímeros.....	33
Figura 5. Estrutura química da curcumina.....	36

CAPÍTULO II

Figure 1. Scanning electron microscopy (SEM) images of (A) montmorillonite (MMT) at 1800× magnification and (B) plantain starch at 500× magnification. Scale bars: 10 µm (A) and 50 µm (B).....	54
Figure 2. Scanning electron microscopy (SEM) images of plantain starch films with different MMT concentrations. Surface micrographs (A, C, E, G) were obtained at 1000× magnification, and cross-sectional micrographs (B, D, F, H) at 500× magnification.....	55
Figure 3. FTIR spectra of plantain starch films with different MMT concentrations....	57
Figure 4. Thermogravimetric (TGA) (a) and derivative thermogravimetric (DTG) (b) curves of plantain starch, montmorillonite (MMT), and starch–MMT composite films.....	58
Figure 5. Visual appearance of plantain starch films with different MMT concentrations: (A) 0% MMT, (B) 2% MMT, (C) 4% MMT, and (D) 6% MMT.....	61
Figure 6. Visual appearance of cherry tomatoes stored under different packaging systems: (A) without packaging (SF), (B) starch-based film without MMT (0%), (C) starch-based film containing 4% MMT, and (D) commercial PVC film.....	63
Figure 7. Mass loss (%) of cherry tomatoes during storage under different conditions: Control (no packaging), starch film (0% MMT), starch film (4% MMT), and PVC film.....	64
Figure 8. Visual appearance of cherry tomatoes under different packaging conditions: (A) without packaging; (B) starch-based film without MMT (0%); (C) starch-based film	

containing 4% MMT; and (D) commercial PVC film, evaluated at storage times of (1) 0 days, (2) 4 days, (3) 8 days, and (4) 12 days.....68

CAPÍTULO III

Figure 1. Atmospheric composition (A), ethylene (B), mass loss (C), and firmness (D) of minimally processed ‘Palmer’ mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$) 90

Figure 2. Lightness (A), chroma (B), hue angle (C), and visual evaluation (D) of minimally processed ‘Palmer’ mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$) 92

Figure 3. Soluble solids (SS) (A), titratable acidity (TA) (B), and SS/TA ratio (C) of minimally processed ‘Palmer’ mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$) 94

Figure 4. Principal component analysis (PCA) of the quality variables of minimally processed mango packaged with different sealing films during refrigerated storage.....96

CAPÍTULO IV

Figure 1. Micrographs of montmorillonite (a), curcumin (b), CS films (c), CS-MMT (d), CUR0.02 (e), CUR0.03 (f), and CUR0.04 (g). 100 $\times$ magnification.....118

Figure 2. FTIR spectra of unripe plantain banana starch films, MMT, and curcumin nanoemulsion (CUR).....120

Figure 3. DSC thermograms of unripe plantain banana starch films, MMT, and curcumin nanoemulsion (CUR).....122

Figure 4. Visual appearance of CS, CS-MMT, CUR0.02, CUR0.03, and CUR0.04 films.....126

Figure 5. Visual color change of unripe plantain banana starch films containing MMT (4%) and curcumin nanoemulsion (0.02–0.04%) in buffer solutions with pH values ranging from 3 to 10.....130

Figure 6. Visual color change of curcumin nanoemulsions (0.02, 0.03, and 0.04%) after the addition of buffer solutions with pH values ranging from 3.0 to 10.0.....	131
Figure 7. Top view of starch films containing montmorillonite (MMT) and curcumin nanoemulsion.....	133
Figure 8. Top view of starch films containing montmorillonite (MMT) and curcumin nanoemulsion applied to chicken meat to evaluate the colorimetric response during storage.....	136
Figure 9. Principal component analysis (PCA) relating the colorimetric parameters of the sensors (ΔE , C, and H) and the deterioration indicators of chicken meat (TVB-N and pH) during storage.....	140

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Estudos desenvolvidos com filmes à base de amido de banana.....29

Tabela 2. Estudos desenvolvidos com filmes contendo curcumina.....37

CAPÍTULO II

Table 1. Comparison of previous studies on biodegradable films reinforced with montmorillonite (MMT).....48

Table 2. Chemical properties of the soil used in the biodegradability test..... 52

Table 3. Effect of MMT incorporation on thickness, water vapor permeability, and solubility of plantain starch films.....60

Table 4. Mechanical properties of plantain starch films with different MMT concentrations..... 61

Table 5. Color and opacity of plantain starch films with different MMT concentrations..... 62

Table 6. Biodegradability of plantain starch films with different MMT concentrations..... 63

Table 7. Postharvest storage of cherry tomatoes under different packaging treatments over time..... 68

CAPÍTULO III

Table 1. Results of the water vapor permeability (WVP) analysis and mechanical properties of films produced with green plantain starch (*Musa paradisiaca* L.) and MMT.....87

CAPÍTULO IV

Table 1. Identification of the treatments used in the study.....109

Table 2. DSC values obtained for unripe plantain banana starch films, MMT, and curcumin nanoemulsion (CUR).....121

Table 3. Results of the thickness (*e*), water vapor permeability (WVP), and solubility (S) analyses of films produced with unripe plantain banana starch (*Musa paradisiaca* L.), MMT, and curcumin nanoemulsion.....122

Table 4. Tensile strength and elongation at break values of unripe plantain banana starch films (*Musa paradisiaca* L.) (CS) containing curcumin nanoemulsion and MMT (4%) 125

Table 5. Color and opacity data of films produced with unripe plantain banana starch (<i>Musa paradisiaca</i> L.), curcumin nanoemulsion (0.0–0.04%), and MMT (4%)	128
Table 6. Mass loss (%) values of unripe plantain banana starch films, MMT, and curcumin nanoemulsion (CUR)	129
Table 7. Hue (H), Chroma (C), and ΔE as a function of treatments and storage time	134
Table 8. pH and total volatile basic nitrogen (TVB-N) values of chicken meat packaged with starch-based films containing montmorillonite and different curcumin concentrations during refrigerated storage	137
Table 9. Pearson correlation coefficients (r) between colorimetric parameters and TVB-N for curcumin-containing films	138

RESUMO

LACERDA, Sara Moreno Pereira. **Filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) reforçados com montmorilonita para aplicação em alimentos.** Itapetinga, BA: UESB, 2026. 149 p. Tese. (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de Concentração em Engenharia de Alimentos).

O amido de banana verde pode ser utilizado como matriz polimérica na produção de filmes biodegradáveis. Contudo, esses materiais podem apresentar características como alta solubilidade e baixa resistência mecânica, de barreira e térmica, o que limita sua aplicação. Este estudo teve como objetivo desenvolver filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra verde, incorporados com montmorilonita (MMT) e nanoemulsão de curcumina, visando à melhoria de suas propriedades funcionais e estruturais para aplicação como embalagem inteligente em alimentos. No segundo capítulo desta tese, filmes foram desenvolvidos a partir de amido de banana-da-terra verde, glicerol e MMT em diferentes concentrações. Os filmes foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira. Além disso, foram utilizados para compor embalagens para hortaliças, sendo aplicados em tomates-cereja e avaliados quanto às suas características de pós-colheita durante um período de 12 dias. Obtiveram-se filmes com maior resistência mecânica, caracterizada por um incremento de 62,60% na resistência à tração (TS) e de 40,4% no módulo de Young na concentração de 4% de MMT em relação ao tratamento controle. Observou-se ainda maior barreira à passagem de luz, menor permeabilidade ao vapor de água e menor solubilidade à medida que se aumentaram as concentrações de MMT, sem comprometimento da biodegradabilidade. A aplicação do filme com 4% de MMT em embalagens de tomates-cereja promoveu menor perda de massa dos frutos ao longo de 12 dias de armazenamento a 23 °C, sugerindo uma possível melhoria nas alterações de pós-colheita, pela redução das trocas de água entre o fruto e o ambiente. De modo geral, a MMT melhorou o desempenho do filme, demonstrando seu potencial para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis e sustentáveis para a conservação pós-colheita. No terceiro capítulo, filmes de amido de banana-da-terra verde (GPTS), com e sem 4% de montmorilonita (GPTS-MMT), foram avaliados como embalagem para manga minimamente processada, em comparação ao policloreto de vinila (PVC), durante 20 dias a 9 °C. A adição de MMT aumentou a resistência à tração em 68%, o módulo de Young em 42,9% e reduziu a permeabilidade ao vapor de água em 26%, além de manter alta biodegradabilidade. O filme GPTS-MMT apresentou desempenho semelhante ao do PVC, preservando a firmeza (7,66 vs. 7,69 N), apresentando menor relação SS/AT (13,0 vs. 13,9) e maior acidez titulável (0,76% de ácido cítrico), além de reduzir a perda de massa e retardar o amadurecimento. Assim, o filme de amido com 4% de MMT mostrou potencial como alternativa biodegradável ao PVC para embalagem de mangas minimamente processadas. No quarto capítulo, foram desenvolvidos filmes à base de amido de banana-da-terra verde, glicerol, 4% de MMT e diferentes concentrações de emulsão de curcumina (CUR). Esses filmes foram caracterizados quanto à solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água, propriedades mecânicas, ópticas e de cor, biodegradabilidade, sensibilidade ao pH. A incorporação da nanoemulsão de curcumina, juntamente com a MMT, resultou em melhorias nas propriedades mecânicas. Na concentração CUR0,03, houve aumento da resistência à tração, do alongamento na ruptura e do módulo de Young

(67,12%, 1016,28% e 52,45%, respectivamente) em relação ao tratamento controle. Observou-se também aumento da barreira à luz e redução da solubilidade, sendo que o tratamento CUR0,03 apresentou redução de 71,88%. A presença dos aditivos não afetou a biodegradabilidade dos filmes. Além disso, os filmes demonstraram sensibilidade às variações de pH decorrentes do processo de deterioração da carne de frango, evidenciada pela mudança gradual da coloração dos filmes para tonalidades mais alaranjadas. O filme com 0,03% de nanoemulsão de curcumina apresentou o melhor desempenho, detectando alterações de cor (ΔE e Hue) associadas à perda de qualidade. Os resultados demonstram o potencial desses filmes como embalagem inteligente para o monitoramento em tempo real do frescor e da deterioração da carne. De modo geral, os resultados demonstram que filmes à base de amido de banana-da-terra verde, especialmente quando incorporados com MMT e nanoemulsão de curcumina, apresentam propriedades adequadas para diferentes aplicações em embalagens de alimentos. Esses materiais mostraram potencial como alternativas biodegradáveis e sustentáveis, tanto na conservação pós-colheita quanto no monitoramento da qualidade e do frescor dos alimentos.

Palavras-chave: Material de reforço, embalagens inteligentes, qualidade pós-processamento.

ABSTRACT

LACERDA, Sara Moreno Pereira. **Biodegradable Films Based on Plantain Starch (*Musa paradisiaca* L.) Reinforced with Montmorillonite for Food Applications.** Itapetinga, BA: UESB, 2026. 149 p. Thesis (Doctorate in Food Engineering and Science, Concentration Area: Food Engineering).

Green plantain starch can be used as a polymeric matrix for the production of biodegradable films. However, these materials may exhibit high solubility and low mechanical, barrier, and thermal resistance, which limits their application. This study aimed to develop biodegradable films based on green plantain starch incorporated with montmorillonite (MMT) and curcumin nanoemulsion, with the goal of improving their functional and structural properties for use as intelligent food packaging. In the second chapter of this thesis, films were developed from green plantain starch, glycerol, and MMT at different concentrations. The films were evaluated in terms of their mechanical, thermal, and barrier properties. In addition, they were used to develop packaging for vegetables and applied to cherry tomatoes, which were evaluated for postharvest characteristics over a 12-day period. The films exhibited improved mechanical strength, characterized by increases of 62.60% in tensile strength (TS) and 40.4% in Young's modulus at a 4% MMT concentration compared with the control treatment. Greater light-barrier capacity, lower water vapor permeability, and lower solubility were also observed as the MMT concentration increased, without compromising biodegradability. The application of the film containing 4% MMT as cherry tomato packaging resulted in lower fruit mass loss throughout 12 days of storage at 23 °C, suggesting a possible improvement in postharvest preservation due to reduced water exchange between the fruit and the surrounding environment. Overall, MMT improved film performance, demonstrating its potential for the development of biodegradable and sustainable packaging for postharvest preservation. In the third chapter, green plantain starch films (GPTS), with and without 4% montmorillonite (GPTS-MMT), were evaluated as packaging for minimally processed mangoes and compared with polyvinyl chloride (PVC) during 20 days of storage at 9 °C. The addition of MMT increased tensile strength by 68% and Young's modulus by 42.9%, while reducing water vapor permeability by 26% and maintaining high biodegradability. The GPTS-MMT film showed performance comparable to that of PVC, preserving firmness (7.66 vs. 7.69 N), resulting in a lower soluble solids-to-titratable acidity ratio (13.0 vs. 13.9), and exhibiting higher titratable acidity (0.76% citric acid). It also reduced mass loss and delayed ripening. Therefore, the starch-based film containing 4% MMT showed potential as a biodegradable alternative to PVC for packaging minimally processed mangoes. In the fourth chapter, films based on green plantain starch, glycerol, 4% MMT, and different concentrations of curcumin emulsion (CUR) were developed. These films were characterized in terms of water solubility, water vapor permeability, mechanical properties, optical properties, color, biodegradability, and pH sensitivity. The incorporation of the curcumin nanoemulsion, together with MMT, resulted in improvements in the mechanical properties. At the CUR0.03 concentration, increases in tensile strength, elongation at break, and Young's modulus of 67.12%, 1016.28%, and 52.45%, respectively, were observed compared with the control treatment. An increase in light-barrier capacity and a reduction in solubility were also observed, with the CUR0.03 treatment showing a 71.88% reduction in solubility. The presence of the additives did not affect the biodegradability of the films. In addition, the films exhibited

sensitivity to pH variations resulting from the deterioration process of chicken meat, as evidenced by the gradual color change of the films toward more orange hues. The film containing 0.03% curcumin nanoemulsion showed the best performance, detecting color changes (ΔE and hue) associated with quality loss. These results demonstrate the potential of these films as intelligent packaging for real-time monitoring of meat freshness and deterioration. Overall, the results demonstrate that films based on green plantain starch, particularly when incorporated with MMT and curcumin nanoemulsion, exhibit suitable properties for different food-packaging applications. These materials showed potential as biodegradable and sustainable alternatives for both postharvest preservation and the monitoring of food quality and freshness.

Keywords: Reinforcing material, intelligent packaging, post-processing quality.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

OBJETIVOS

REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A embalagem desempenha um papel essencial ao assegurar o manuseio e a distribuição segura de alimentos frescos e processados em diversas cadeias de suprimentos, tornando-se um elemento indispensável para a indústria alimentícia (Parente et al., 2025). No entanto, a crescente utilização de plásticos, especialmente os descartáveis como material de embalagem, tem representado uma ameaça significativa aos ecossistemas terrestres e aquáticos, comprometendo tanto o crescimento econômico sustentável quanto o bem-estar humano (Pruess; Garrett, 2025).

Nesse contexto, materiais sustentáveis com capacidade de formação de filmes, particularmente aqueles derivados de biopolímeros, têm sido amplamente investigados na ciência dos materiais como alternativas promissoras aos polímeros convencionais à base de petróleo (Amobonye et al., 2025). Dentre esses biopolímeros, o amido se destaca devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, ausência de toxicidade e elevada biodegradabilidade. Suas propriedades intrínsecas, como a boa capacidade de formação de filmes e a compatibilidade com aditivos naturais, conferem ao amido grande versatilidade para o desenvolvimento de sistemas de embalagem ambientalmente amigáveis (Gao et al., 2024; Parente et al., 2025).

A produção industrial de amido em larga escala concentra-se tradicionalmente em fontes como milho, batata, trigo e mandioca. Contudo, a crescente demanda global tem incentivado a busca por fontes alternativas, especialmente aquelas subutilizadas (Sharath Kumar et al., 2025). Entre essas fontes não convencionais, a banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde se destaca pela abundância do fruto e pelo elevado teor de amido (cerca de 70% em base seca), além de conter aproximadamente 25% de amilose, principal responsável pela formação de filmes (Viana et al., 2022).

Apesar de seu potencial, os filmes à base de amido apresentam limitações, como baixa resistência mecânica e reduzida capacidade de barreira, devido à natureza hidrofílica do material, o que os torna suscetíveis à absorção de água e compromete sua integridade em ambientes úmidos (Asrofi et al., 2021; Xu et al., 2025; Zou et al., 2025). Para superar essas limitações, tem-se recorrido à incorporação de substâncias que atuam como reforço estrutural. Dentre essas, os argilominerais têm se destacado por melhorarem as propriedades mecânicas, de barreira e térmicas dos filmes (Das; Panesar; Saini, 2024)

Dentre os argilominerais, a montmorilonita (MMT) tem sido amplamente utilizada devido à sua estrutura lamelar e elevada área superficial, que favorecem a

interação com a matriz polimérica, promovendo melhorias nas propriedades físicas, químicas e funcionais dos materiais (Ulrich et al., 2023; Zhang; Chen, 2023). Quando incorporada a filmes biodegradáveis, a MMT pode aprimorar características como resistência mecânica, estabilidade térmica, opacidade e impermeabilidade ao vapor de água.

Além dos materiais de reforço, a incorporação de compostos bioativos tem ganhado destaque por conferir funcionalidades adicionais aos filmes, resultando em embalagens ativas e/ou inteligentes. Um exemplo destes compostos é a curcumina, composto majoritário da cúrcuma, que apresenta reconhecidas propriedades antioxidantes, antimicrobianas (Coelho et al., 2024) e coloração que muda de tom a depender das condições de pH (Duan et al., 2023). Sua incorporação em matrizes biodegradáveis vem sendo utilizada para o desenvolvimento de embalagens ativas (Sanchez; Pinzon; Villa, 2022) e inteligentes (Viscusi et al., 2025) utilizadas na conservação de alimentos agregando valor funcional e estético às embalagens.

Apesar dos avanços no desenvolvimento de filmes biodegradáveis, ainda são limitados os estudos que exploram a utilização de materiais de reforço e compostos bioativos em matrizes de amido de fontes não convencionais, especialmente considerando sua aplicação em alimentos. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de investigar o uso do amido de banana-da-terra verde associado à montmorilonita, tanto para o aprimoramento das propriedades dos filmes quanto para sua aplicação na conservação pós-colheita e na manutenção da qualidade de alimentos. Adicionalmente, a incorporação de compostos bioativos, como a nanoemulsão de curcumina, pode ampliar as funcionalidades desses materiais, possibilitando seu uso no desenvolvimento de embalagens inteligentes.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis elaborados a partir de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde, avaliando o efeito da incorporação de montmorilonita (MMT) como agente de reforço sobre suas propriedades e seu potencial na conservação de alimentos, bem como investigar a adição de nanoemulsão de curcumina para conferir propriedades funcionais e possibilitar sua aplicação como embalagem inteligente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde, investigando inicialmente o efeito da adição de montmorilonita (MMT) como agente de reforço sobre as propriedades dos filmes e sua aplicação na conservação de alimentos, seguida da incorporação de nanoemulsão de curcumina para obtenção de embalagens inteligentes.

2.2 Objetivos específicos

- Extrair e caracterizar o amido de banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde;
- Produzir filmes biodegradáveis a partir do amido extraído, utilizando o método de casting;
- Incorporar montmorilonita (MMT) aos filmes e avaliar seu efeito sobre as propriedades físico-químicas, mecânicas, ópticas e funcionais dos materiais;
- Avaliar a aplicação dos filmes incorporados com MMT na conservação de alimentos, utilizando tomate-cereja e manga minimamente processada como modelos de aplicação;
- Incorporar nanoemulsão de curcumina aos filmes e avaliar seu efeito sobre as propriedades e funcionalidades dos materiais;
- Avaliar o desempenho dos filmes incorporados com nanoemulsão de curcumina como sistemas inteligentes, investigando sua sensibilidade às variações de pH e sua resposta colorimétrica associada à deterioração da carne de frango;
- Avaliar a aplicabilidade dos filmes contendo nanoemulsão de curcumina no monitoramento da qualidade e da deterioração de peito de frango durante o armazenamento.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Os plásticos convencionais são amplamente utilizados em diversas aplicações devido às suas propriedades, como durabilidade, flexibilidade e baixo custo de produção. Entretanto, esses materiais são produzidos principalmente a partir de polímeros derivados do petróleo, uma fonte não renovável, e apresentam elevada resistência à degradação natural. Essa característica contribui para sua persistência no ambiente e representa um importante desafio ambiental (Al-Darkazali; Aalhusaini; Harbi, 2025).

A disposição inadequada desses plásticos no meio ambiente contribui para diversos impactos negativos, como a poluição de ecossistemas terrestres e aquáticos, a contaminação do solo, além de oferecer riscos à fauna (Abera; Kasirajan; Majamo, 2024). Além disso, a má gestão de resíduos plásticos pode trazer prejuízos diretos à saúde humana, devido à liberação de microplásticos e substâncias químicas potencialmente tóxicas que entram na cadeia alimentar, tornando-se uma questão urgente e complexa para a sociedade com um todo e para os gestores ambientais (Ashok et al., 2018; Paudel; Janaswamy, 2025).

Diante dessa problemática, aumentam os esforços na pesquisa em busca de soluções sustentáveis que minimizem os danos causados pelos plásticos tradicionais. Entre essas soluções, destaca-se o interesse crescente na fabricação de plásticos produzidos a partir de recursos biodegradáveis, comumente denominados bioplásticos ou filmes biodegradáveis.

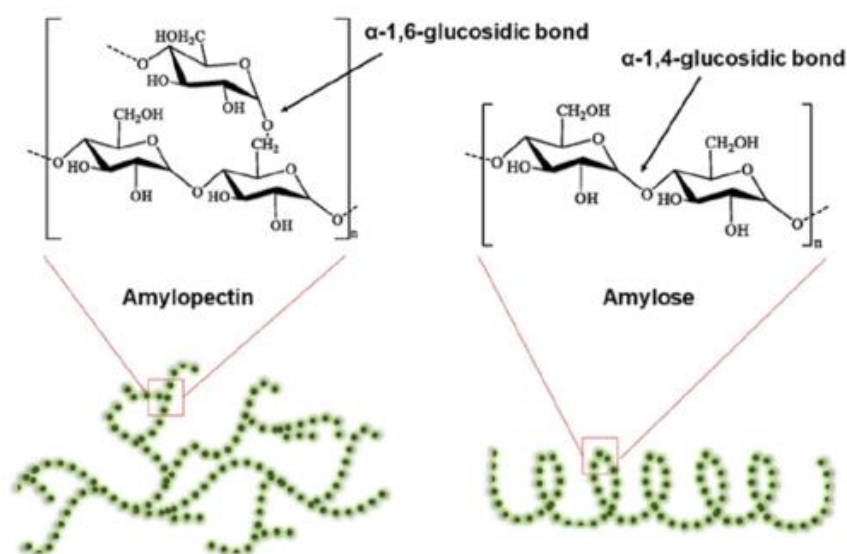
Esses materiais, derivados de fontes renováveis como amido, celulose, proteínas ou óleos vegetais, são biodegradáveis, o que contribui para uma redução do impacto ambiental ao final de seu ciclo de vida (Li et al., 2024). A produção de filmes tem como objetivo, não apenas substituir os plásticos sintéticos derivados do petróleo, mas também promover a sustentabilidade ambiental, o uso mais eficiente de recursos naturais e a diminuição dos resíduos plásticos acumulados no planeta. Essa abordagem representa um passo importante na transição para um modelo econômico mais ecológico e responsável (Behera; Mohanta; Thirugnanam, 2022).

3.1 Amido

O amido é um polissacarídeo amplamente distribuído na natureza, constituindo a principal forma de armazenamento de energia em plantas como milho, batata, mandioca, trigo e arroz. Devido à sua versatilidade e às suas propriedades funcionais, esse biopolímero é extensivamente utilizado em diferentes setores industriais. Na indústria alimentícia, atua como espessante, gelificante e estabilizante, enquanto no setor de embalagens tem sido explorado como matéria-prima para a produção de filmes biodegradáveis (Chen et al., 2019). Sua ampla disponibilidade, baixo custo e caráter renovável tornam o amido uma alternativa promissora à substituição de materiais sintéticos derivados do petróleo, especialmente em aplicações voltadas à sustentabilidade ambiental (Ma et al., 2025).

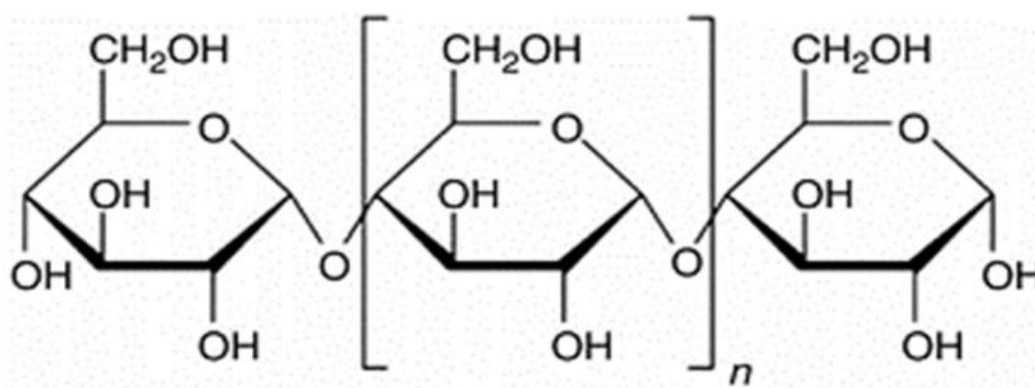
Do ponto de vista químico, o amido é constituído por duas frações principais: a amilose e a amilopectina, cujas proporções variam conforme a fonte botânica (Figura 1) (Kaur et al., 2020; Sanchez et al., 2022). A amilose é formada por cadeias lineares de unidades de glicose unidas predominantemente por ligações glicosídicas α -(1 $\rightarrow$ 4). Já a amilopectina apresenta uma estrutura altamente ramificada, com ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) na cadeia principal e α -(1 $\rightarrow$ 6) nas ramificações laterais (Patel et al., 2023), conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1: Estrutura da amilose e da amilopectina.



Fonte: Çokkuvvetli; Deniz (2025)

Figura 2: Representação genérica da molécula de amido.



Fonte: Samir et al. (2022)

Tradicionalmente, cereais e tubérculos constituem as principais fontes de extração de amido. No entanto, nas últimas décadas, o incentivo a práticas agrícolas sustentáveis

e o aproveitamento de recursos regionais tem impulsionado a busca por fontes botânicas alternativas, como frutas tropicais.

Nesse contexto, a banana destaca-se como uma fonte natural promissora de amido, sobretudo devido à possibilidade de aproveitamento de resíduos gerados durante seu processamento. Esses resíduos podem ser utilizados para a obtenção de biopolímeros de elevado valor agregado, como amido, celulose e nanocelulose, com ampla aplicação em diferentes setores industriais (Kumar et al., 2023).

A banana é uma fruta tropical pertencente à família *Musaceae*, amplamente cultivada e de elevado valor nutricional (Kraithong; Issara, 2021). Após a colheita e o processamento, são gerados resíduos que podem ser aproveitados como coprodutos para a produção de materiais biodegradáveis, revestimentos alimentícios, insumos para compostagem, aplicação em biorrefinarias, extração de fibras, isolamento de nanocelulose e obtenção de amido (Badanayak et al., 2023; Rafee et al., 2019).

As bananas são colhidas no estágio de maturidade fisiológica, ainda verdes, e posteriormente submetidas à maturação controlada. Frutos que não atendem aos padrões comerciais, devido a defeitos na casca, tamanho inadequado ou danos mecânicos, são direcionados ao processamento de subprodutos. Nesse estágio, a banana verde apresenta elevado teor de amido, que pode corresponder a cerca de 70% da massa seca da polpa (Moreno-Zaragoza; Rosell; Bello-Pérez, 2025). No caso da banana-da-terra verde, esse amido contém aproximadamente 25% de amilose, fração considerada fundamental para a formação de filmes com boas propriedades estruturais (Viana et al., 2022). Assim, o aproveitamento de bananas verdes fora do padrão comercial representa uma alternativa sustentável e de alto valor agregado para a extração de amido.

3.1.1. Filmes

Considerando sua composição química e características estruturais, o amido de banana verde apresenta propriedades particularmente favoráveis à formação de filmes biodegradáveis. A elevada fração de amilose, associada ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, torna essa matéria-prima estratégica para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis. Estudos indicam que filmes produzidos a partir do amido de banana podem apresentar desempenho comparável aos obtidos a partir de fontes convencionais, com vantagens adicionais relacionadas à sustentabilidade e à funcionalidade do material (Viana et al., 2025).

O amido é naturalmente encontrado na forma de grânulos semicristalinos, constituídos por regiões cristalinas e amorfas dispostas alternadamente (Lin et al., 2025).

Para que possa ser processado como material termoplástico, é necessária a destruição dessa estrutura granular, associada à adição de plastificantes. Esse processo ocorre por meio da gelatinização, na qual, na presença de excesso de água e aquecimento, ocorre o rompimento das ligações de hidrogênio intermoleculares, levando à perda da cristalinidade e à formação de uma pasta viscoelástica homogênea. Durante o resfriamento e o armazenamento, as cadeias de amido tendem a se reassociar, formando uma nova estrutura semicristalina por meio do fenômeno de retrogradação, que desempenha papel fundamental na formação e nas propriedades finais dos filmes de amido (Zhuang; Wang; Yang, 2023).

Filmes obtidos a partir do amido de banana apresentam características como transparência, flexibilidade e resistência, favorecendo sua aplicação especialmente na indústria alimentícia, onde podem atuar como revestimentos ou materiais de embalagem, contribuindo para o aumento da vida útil dos produtos (Patel et al., 2023). Além disso, são descritos como inodoros, incolores e insípidos, apresentando propriedades superiores em relação a filmes produzidos a partir de outras fontes de amido (Shuprajhaa et al., 2025).

O potencial tecnológico da banana como matéria-prima para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis é evidenciado por iniciativas como a patente brasileira intitulada “Filme biodegradável à base de casca de banana e galactomanana extraída de sementes de *Adenanthera pavonina* L.”, que descreve a produção de um filme plástico biodegradável a partir da casca de banana em estágio avançado de maturação e galactomanana. O material apresenta potencial para aplicação como embalagem biodegradável ou como revestimento de frutas e hortaliças, demonstrando a versatilidade e o potencial tecnológico do aproveitamento da casca de banana para o desenvolvimento de materiais sustentáveis (Macêdo et al., 2022).

Atualmente, observa-se a ampla disponibilidade de produtos comerciais tendo o amido provenientes de fontes como milho, batata e mandioca em sua composição, que são consolidados em escala industrial e aplicados na fabricação de sacolas biodegradáveis, filmes agrícolas, embalagens alimentícias e materiais compostáveis, como aqueles produzidos por Mater-Bi® e Paragon® (Bastioli, 1998; Ötles, 2004). Entretanto, no caso específico do amido de banana, o desenvolvimento ainda se concentra predominantemente em escala piloto, com iniciativas conduzidas principalmente por universidades, centros de pesquisa e startups em países como Brasil, Índia e Colômbia (Sanchez; Pinzon; Villa, 2022; Shuprajhaa et al., 2025; Viana et al., 2025).

Apesar do potencial de aplicação, os materiais filmogênicos à base de amido apresentam algumas limitações inerentes às características desse biopolímero, como elevada hidrofilicidade, alta solubilidade em água, propriedades mecânicas inferiores às de polímeros sintéticos e baixa estabilidade térmica (Shuprajhaa et al., 2025). Para superar essas restrições, diferentes estudos têm investigado estratégias como a adição de plastificantes, fibras naturais e agentes de reforço, visando à melhoria das propriedades funcionais desses materiais. A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos que utilizaram amido de banana na produção de filmes biodegradáveis.

Tabela 1: Estudos desenvolvidos com filmes à base de amido de banana.

Composições	Resultado	Referências
Amido de banana, glicerol, álcool polivinílico (PVA) e carboximetilcelulose (CMC).	Filmes com CMC e com PVA + CMC tiveram os melhores ganhos em resistência e alongamento, superiores a 100%, mostrando a importância dos aditivos nas propriedades mecânicas dos filmes.	Shuprajhaa et al. (2025)
Amido de banana verde modificado com tratamento de calor e umidade (HMT).	Os filmes de amido de banana-da-terra modificados apresentaram melhorias mecânicas significativas: aumento de 83% no módulo de Young, 88% na resistência à tração, 57% no alongamento na ruptura, 56% na força de perfuração e 39% na deformação máxima, confirmando o efeito positivo da modificação hidrotérmica na estrutura do biopolímero.	Viana et al. (2022)
Amido de banana reforçados com nanopartículas de ráquis de banana da terra	A adição de nanofibras de celulose reduziu a umidade em até 82% e aumentou a resistência à tração em mais de 500%. Houve também redução na permeabilidade ao vapor de água em cerca de 72%.	García-Ramón et al. (2021)
Amido de banana verde; farinha de banana verde; sorbitol e glicerol	O sorbitol proporcionou os maiores ganhos em resistência à tração e rigidez (aumentos acima de 130% em relação ao glicerol) e melhor barreira ao vapor de água (redução de até 38%). Já a mistura de plastificantes favoreceu maior alongamento, especialmente nos filmes de amido, indicando maior flexibilidade.	Orsuwan & Sothornvit (2018)
Amido de banana da terra incorporado com micropartículas lipídicas contendo ácido ascórbico	A incorporação de ácido ascórbico aumentou o alongamento em 180% e a rigidez em 55% em relação ao controle. Filmes com micropartículas mostraram melhor barreira à umidade, menor solubilidade e menor transmissão de luz que os filmes controle e o polietileno comercial.	Sartori & Menegalli (2016)
Amido de banana da terra e farinha de banana da terra	O filme de amido apresentou maior resistência à tração (110%) e módulo de Young (289%), indicando uma matriz mais coesa e rígida, menor umidade, solubilidade em água, opacidade e melhores propriedades ópticas. Já o filme de farinha exibiu maior alongamento e deformação por punção, refletindo maior flexibilidade, porém menor resistência.	Pelissari et al. (2013)

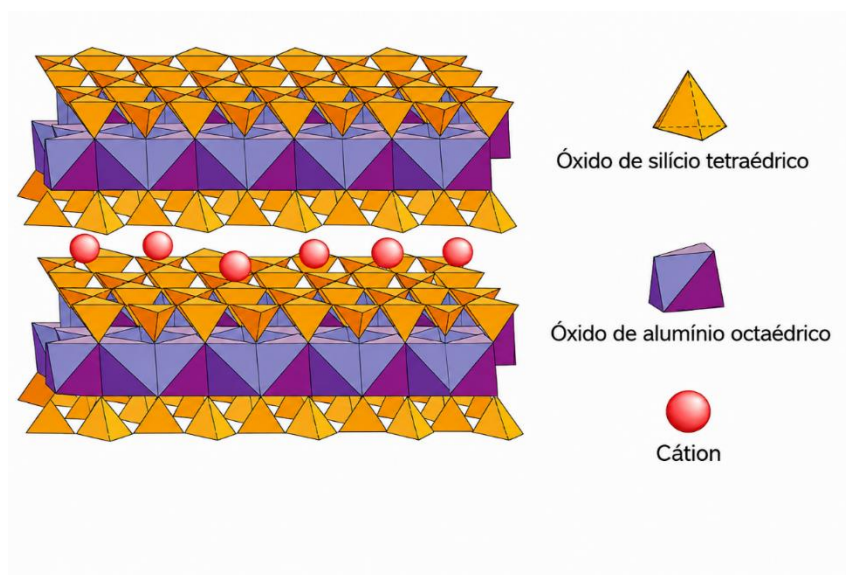
De forma consistente, os trabalhos convergem ao demonstrar que, embora o amido de banana apresente elevada sensibilidade à umidade e limitações estruturais, suas propriedades podem ser moduladas para serem aplicadas como embalagens biodegradáveis (Pelissari et al., 2013). Nesse sentido, diferentes estratégias de modificação têm se mostrado eficazes na superação dessas limitações intrínsecas. A incorporação de polímeros como CMC e PVA mostrou-se eficiente na melhoria da resistência mecânica e da flexibilidade (Shuprajhaa et al., 2025) enquanto o tratamento hidrotérmico promoveu reorganização estrutural da matriz, resultando em maior rigidez e desempenho mecânico (Viana et al., 2022). De maneira complementar, o uso de nanofibras e reforços particulados contribuiu para a redução da permeabilidade ao vapor de água e para o aumento da resistência estrutural (García-Ramón et al., 2021), ao passo que plastificantes e combinações de plastificantes influenciaram diretamente o equilíbrio entre rigidez e alongamento (Orsuwan; Sothornvit, 2018).

Entre as abordagens mais recentes, destaca-se a incorporação de cargas reforçantes inorgânicas, especialmente argilas lamelares, em virtude de sua estrutura em camadas, elevada área superficial e capacidade de interação com cadeias poliméricas. Dentre essas, a montmorilonita (MMT) tem recebido atenção significativa como agente de reforço, por contribuir para melhorias nas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira. Sua incorporação em matrizes à base de amido pode promover alterações estruturais que favorecem maior rigidez, redução da permeabilidade ao vapor de água e maior estabilidade do material, características particularmente relevantes para aplicações em embalagens.

3.2 Montmorilonita (MMT)

A montmorilonita (MMT) é um argilomineral pertencente ao grupo dos filossilicatos, amplamente reconhecido por sua elevada capacidade expansiva e por suas diversas aplicações industriais, científicas e tecnológicas. Sob o ponto de vista estrutural, apresenta organização lamelar do tipo 2:1, composta por duas camadas tetraédricas de sílica dispostas paralelamente e uma camada octaédrica central constituída por hidróxidos de alumínio ou magnésio. Essas camadas são interligadas por átomos de oxigênio compartilhados, conferindo ao mineral propriedades físico-químicas específicas e de relevante interesse tecnológico (Bee et al., 2018).

Figura 3: Estrutura da Montmorilonita



Fonte: Adaptado de Xia; Qian (2025).

Entre suas principais características destaca-se a capacidade de expansão, decorrente da incorporação de moléculas de água e íons no espaço interlamelar. Esse processo promove aumento de volume e viabiliza sua aplicação como adsorvente, agente de troca iônica e material de reforço em compósitos, entre outras finalidades (Nath et al., 2022; Wang et al., 2024). Ademais, sua estrutura ordenada e versátil possibilita processos de funcionalização direcionados a diferentes setores, como proteção ambiental, indústria de materiais, petroquímica e medicina.

As unidades estruturais da MMT organizam-se em camadas empilhadas, mantidas predominantemente por forças de Van der Waals e interações eletrostáticas. Essa configuração estrutural influencia diretamente suas propriedades e determina o comportamento da argila quando incorporada a sistemas poliméricos, especialmente no que se refere à dispersão e à interação com a matriz (Nath et al., 2022).

Nesse contexto, a montmorilonita tem se destacado como agente de reforço altamente eficiente em diversas matrizes poliméricas. Sua elevada área superficial específica, associada ao reduzido tamanho de partícula e à capacidade de sofrer processos de intercalação ou esfoliação, torna-a particularmente atrativa para a formulação de compósitos poliméricos (Karwal; Kumar; Yadav, 2025).

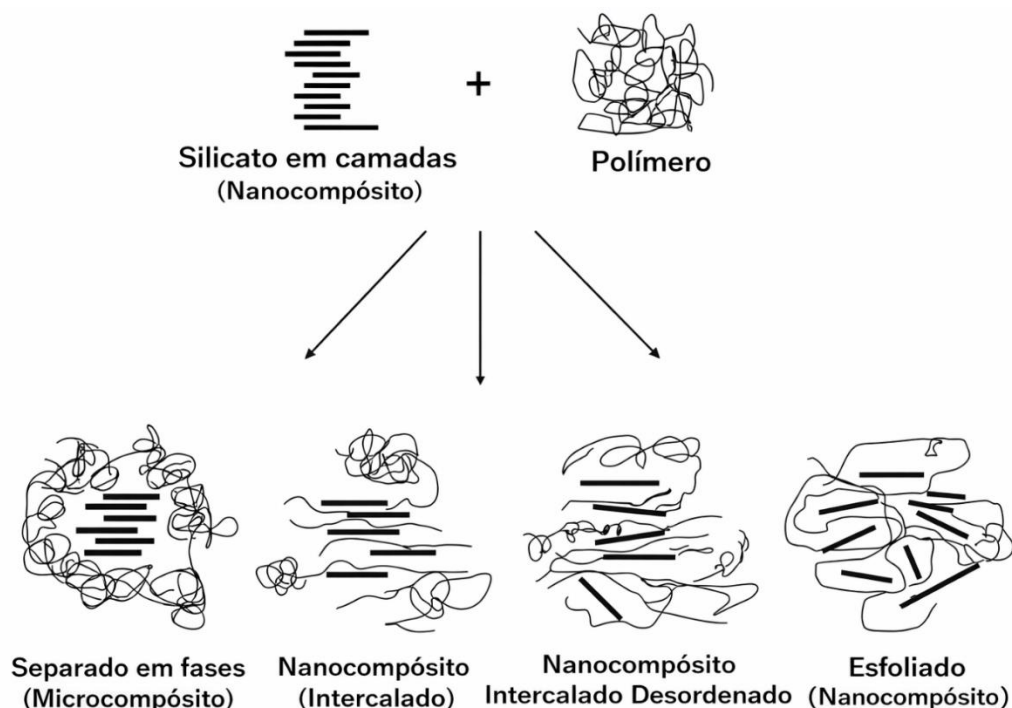
Entretanto, a MMT é geralmente obtida na forma de aglomerados de plaquetas, denominados tactoides, o que exige o emprego de técnicas como alto cisalhamento,

ultrassonicação ou modificação superficial para promover sua desagregação e distribuição homogênea na matriz polimérica. O padrão de dispersão pode ser classificado em três categorias principais: tactoide (microcompósito), intercalado e esfoliado (Chaudhary; Fatima; Kumar, 2020). No sistema tactoide, as camadas da argila permanecem empilhadas, com pouca ou nenhuma penetração das cadeias poliméricas entre as lamelas. A intercalação ocorre quando cadeias poliméricas se inserem entre as camadas empilhadas da argila, promovendo aumento do espaçamento interlamelar, ainda que a organização lamelar permaneça parcialmente preservada (Huang et al., 2023). Já a esfoliação corresponde à separação completa das camadas em nanofolhas individuais, dispersas de maneira mais uniforme na matriz polimérica (Archibong et al., 2023).

Do ponto de vista funcional, o grau de esfoliação está diretamente relacionado ao desempenho do material, uma vez que maior separação das lamelas implica maior área interfacial disponível para interação polímero–argila, favorecendo a transferência eficiente de tensões mecânicas e a maximização dos efeitos de barreira ((Muñoz-Gimena et al., 2023). Embora tanto a intercalação quanto a esfoliação contribuam para a melhoria das propriedades, a estrutura esfoliada é, em geral, associada a nanocompósitos com maior potencial de desempenho (Chaudhary; Fatima; Kumar, 2020).

A formação dessas estruturas depende diretamente das interações estabelecidas entre o polímero e a argila durante o processamento. A simples mistura física entre MMT e matriz polimérica não garante, por si só, a obtenção de um nanocompósito. Para que a intercalação ou esfoliação ocorra de forma efetiva, é necessário que as cadeias poliméricas penetrem no espaço interlamelar da argila. Na ausência dessa interação, o material resultante caracteriza-se como microcompósito, com fases separadas e propriedades semelhantes às de compósitos convencionais, sem os benefícios associados à escala nanométrica (Pandey; Singh, 2005).

Figura 4: Esquema de diferentes tipos de compósitos resultantes da interação de silicatos e polímeros



Fonte: Muñoz-Gimena et al. (2023)

A distinção entre microcompósitos, nanocompósitos intercalados e esfoliados está, portanto, diretamente relacionada ao grau de separação das camadas da MMT. Esse fator contribui para uma dispersão mais homogênea da argila em diferentes matrizes poliméricas, resultando em materiais com estrutura mais uniforme e desempenho funcional aprimorado (Wang et al., 2024).

Além de seu comportamento estrutural favorável, a MMT tem sido amplamente empregada como material de reforço em sistemas poliméricos por ser um mineral natural, atóxico, economicamente acessível e compatível com aplicações alimentícias (Risyon et al., 2020). Quando adequadamente dispersa em matrizes de biopolímeros, promove melhorias significativas nas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira dos filmes, contribuindo para o desenvolvimento de materiais com desempenho superior e maior sustentabilidade (Chaudhary; Fatima; Kumar, 2020; Peelman et al., 2013).

O mecanismo de reforço mecânico está associado à restrição da mobilidade das cadeias poliméricas nas regiões interfaciais, à transferência eficiente de tensão da matriz

para as lamelas rígidas da argila e à formação de uma rede física que dificulta a deformação do material (Calambas et al., 2021; Zhang; Chen, 2023).

No que se refere às propriedades de barreira, a presença de lamelas bem distribuídas promove o efeito de tortuosidade, tornando o caminho percorrido por moléculas de gases ou vapor de água mais longo e complexo, o que reduz significativamente a permeabilidade do material ((Muñoz-Gimena et al., 2023)

A montmorilonita (MMT) tem sido amplamente empregada no desenvolvimento de filmes e revestimentos biodegradáveis, bem como em sistemas poliméricos sintéticos que exigem elevada barreira e estabilidade térmica. Por se tratar de um recurso natural, abundante e ecologicamente favorável, seu uso contribui para o fortalecimento do caráter sustentável desses materiais (Vilarinho et al., 2018).

A incorporação de MMT em matrizes poliméricas visa superar limitações típicas dos biopolímeros, como baixa resistência mecânica, alta permeabilidade e sensibilidade à umidade. Sua adição pode aumentar a rigidez, melhorar a estabilidade térmica e reduzir a permeabilidade, tornando esses sistemas especialmente promissores para aplicações em embalagens biodegradáveis de alimentos (Genecya et al., 2023; Guo; Li, 2025).

O uso da MMT como agente de reforço em embalagens alimentícias teve início na década de 1990. Um exemplo de aplicação comercial é o Durethan® KU2-2601, filme de poliamida desenvolvido pela Bayer e empregado em embalagens médicas e alimentícias. Esse material é utilizado na conservação de carnes frescas, pois as partículas de argila dispersas na matriz polimérica atuam como barreiras físicas à difusão de oxigênio, dióxido de carbono e umidade, reduzindo a permeabilidade e contribuindo para a preservação do alimento (Brody et al., 2008).

Assim, filmes contendo MMT podem contribuir para o estabelecimento de uma atmosfera modificada passiva (MAP) no interior da embalagem. Nesse sistema, a composição gasosa interna se desenvolve naturalmente após o selamento, em função do consumo de oxigênio e da produção de dióxido de carbono pelo alimento, associada à permeabilidade do material de embalagem. Assim, o controle da permeação de O₂, CO₂ e vapor de água pelo filme pode favorecer a formação de uma atmosfera mais adequada à conservação do produto, embora sua eficiência dependa do equilíbrio entre a taxa metabólica do alimento e as propriedades de transporte do material (Zhang et al., 2026).

Nesse cenário, a utilização da MMT também tem sido associada à funcionalização de embalagens, área que vem ganhando destaque com a incorporação de compostos bioativos à matriz polimérica. Esses aditivos podem conferir propriedades antioxidantes,

antimicrobianas ou indicar a deterioração do produto, estando alinhados aos conceitos de embalagens inteligentes e embalagens ativas, o que amplia as funcionalidades do material reforçado com MMT para além da proteção física convencional (Singh et al., 2023).

A MMT pode ainda atuar como suporte ou carreador de compostos bioativos, uma vez que seu espaço interlamelar e sua elevada área superficial favorecem a adsorção e a imobilização de moléculas ativas, possibilitando sistemas de liberação controlada (Zhang; Chen, 2023).

Além disso, a interação entre a argila e os compostos bioativos pode contribuir para maior estabilidade térmica e proteção contra degradação oxidativa desses agentes, potencializando sua eficácia ao longo do armazenamento (Singh et al., 2023).

Assim, a MMT não se limita à função de agente de reforço estrutural, passando a desempenhar papel multifuncional ao combinar melhorias mecânicas e de barreira com funcionalidades ativas, aspecto particularmente relevante para embalagens biodegradáveis à base de biopolímeros.

3.3 Embalagens inteligentes com curcumina

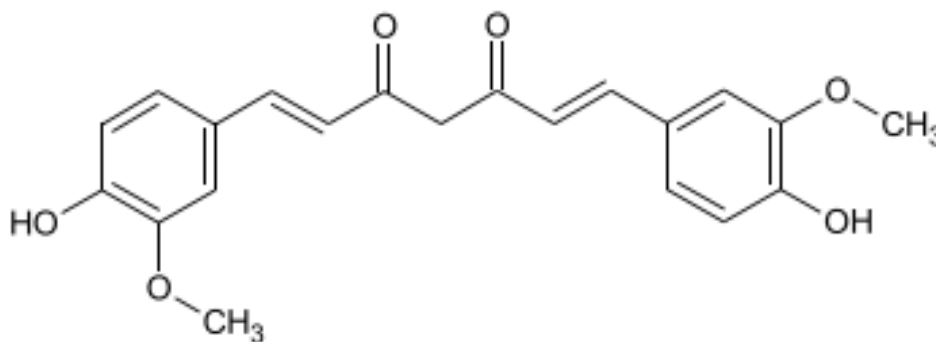
A funcionalização de materiais biodegradáveis tem se consolidado como uma estratégia promissora no desenvolvimento de embalagens sustentáveis, sobretudo por meio da incorporação de compostos bioativos. Esses aditivos podem conferir aos filmes propriedades funcionais e sensoriais, ampliando suas funções para além da proteção física convencional (Gonçalves Parente et al., 2025). Essa abordagem está diretamente associada aos conceitos de embalagens ativas e inteligentes, cujo objetivo é não apenas prolongar a vida útil dos alimentos, mas também possibilitar o monitoramento de sua qualidade ao longo do armazenamento.

Nesse contexto, a curcumina destaca-se como um dos compostos bioativos mais investigados. Trata-se de um polifenol natural extraído da *Curcuma longa* L., amplamente estudado devido às suas propriedades antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória, além de apresentar intensa coloração amarela. No contexto das embalagens inteligentes, destaca-se sua capacidade de responder visualmente às alterações de pH, característica que possibilita sua utilização como indicador colorimétrico natural. Essas características conferem à curcumina potencial aplicação em sistemas de embalagem inteligente destinados ao monitoramento da qualidade dos alimentos (Bouchama et al., 2023).

A capacidade indicadora da curcumina está relacionada às alterações de sua estrutura molecular em função do pH do meio, resultando em mudanças de coloração. Em meio ácido e neutro, a curcumina permanece predominantemente em sua forma

neutra, com os dois grupos hidroxila fenólicos não ionizados, apresentando sua coloração amarela característica. Com o aumento do pH e a alcalinização do meio, ocorre a desprotonação dos grupos fenólicos, favorecendo a formação da forma enólica do composto e resultando em uma mudança de coloração para tons alaranjados e, em valores mais elevados de pH (entre 8,5 e 10,5), para tonalidades avermelhadas ou vermelho-amarronzadas. Essa transição cromática está associada às modificações na conjugação eletrônica da molécula, que alteram seu espectro de absorção de luz. Assim, a curcumina pode atuar como indicador natural de pH, apresentando coloração amarela em condições ácidas a neutras e vermelha em condições alcalinas (Etxabide; Kilmartin; Maté, 2021; Yang; Chen; Wei, 2024).

Figura 5. Estrutura química da curcumina



Fonte: (Ribeiro; Veloso, 2021)

Apesar de seu elevado potencial funcional, a aplicação da curcumina em filmes biodegradáveis apresenta desafios, principalmente relacionados à sua baixa solubilidade em água, decorrente de sua natureza hidrofóbica. Essa limitação dificulta sua incorporação em matrizes hidrofílicas, como aquelas à base de amido. Para contornar esse problema, estratégias como a formação de emulsões e nanoemulsões têm sido amplamente empregadas, uma vez que favorecem maior estabilidade e dispersão homogênea do composto no interior da matriz polimérica (A; Srivastava, 2025).

Nesse sentido, a formação de nanoemulsões óleo-em-água (O/A) constitui uma estratégia promissora para a incorporação de compostos hidrofóbicos, como a curcumina, em matrizes predominantemente hidrofílicas, favorecendo sua dispersão e estabilidade no sistema. Além disso, a associação da curcumina com argilominerais, como a

montmorilonita (MMT), apresenta-se como uma alternativa complementar, uma vez que pode contribuir para sua estabilização e para o aprimoramento das propriedades do filme.

Dessa forma, a combinação entre amido de banana-da-terra, curcumina e montmorilonita possibilita o desenvolvimento de materiais poliméricos multifuncionais, com desempenho otimizado e potencial para aplicações em filmes biodegradáveis destinados ao monitoramento da qualidade de alimentos. Deste modo, filmes à base de amido, reforçados com montmorilonita e funcionalizados com curcumina, destacam-se como alternativas promissoras por aliar biodegradabilidade, segurança ambiental e propriedades funcionais capazes de auxiliar no acompanhamento da qualidade de alimentos perecíveis (Etxabide et al., 2017; Medina-Jaramillo et al., 2017).

A Tabela 2 apresenta uma seleção de estudos recentes que investigaram o uso da curcumina em sistemas de embalagem biodegradável, evidenciando seu potencial como indicador colorimétrico sensível a variações de pH.

Tabela 2 – Estudos desenvolvidos com filmes contendo curcumina.

Composições	Resultado	Referências
Amido de Artocarpus L. e curcumina.	O Filme de amido contendo 2,5% de curcumina apresentou mudanças de cor em resposta às variações de pH, permitindo o monitoramento visual, em tempo real, da frescura de filés de frango.	(Mali; Pandey, 2024).
Amido de milho, nanocelulose e emulsão Pickering de curcumina	Filme de amido incorporado com emulsão de Pickering contendo curcumina, apresentando distribuição uniforme do composto na matriz. A presença de curcumina conferiu ao filme sensibilidade a variações de pH, promovendo mudanças visíveis de cor, possibilitando seu uso como indicador da frescura da carne suína. O filme apresentou potencial para monitorar visualmente a deterioração do alimento durante o armazenamento.	(Yang; Chen; Wei, 2024).
Amido de banana e nanoemulsões de óleo de laranja carregadas com curcumina.	A incorporação de nanoemulsão de óleo de laranja com curcumina intensificou as colorações avermelhada e amarelada dos filmes, atribuídas à presença da curcumina, evidenciando seu potencial para aplicações em sistemas indicadores.	Sanchez et al. (2022).
Amido de arroz modificado e curcumina	A exposição a $\text{pH} \geq 9$ promoveu mudança de cor de amarelo para marrom-avermelhado ou vermelho-vinho, permitindo a detecção visual da deterioração de frango e peixe.	(Erna et al., 2022).

Tabela 2 – Estudos desenvolvidos com filmes contendo curcumina.

Composições	Resultado	Referências
Amido de Artocarpus L. e curcumina.	O Filme de amido contendo 2,5% de curcumina apresentou mudanças de cor em resposta às variações de pH, permitindo o monitoramento visual, em tempo real, da frescura de filés de frango.	(Mali; Pandey, 2024).
Amido de milho, nanocelulose e emulsão Pickering de curcumina	Filme de amido incorporado com emulsão de Pickering contendo curcumina, apresentando distribuição uniforme do composto na matriz. A presença de curcumina conferiu ao filme sensibilidade a variações de pH, promovendo mudanças visíveis de cor, possibilitando seu uso como indicador da frescura da carne suína. O filme apresentou potencial para monitorar visualmente a deterioração do alimento durante o armazenamento.	(Yang; Chen; Wei, 2024).
Amido de milho (CS), álcool polivinílico (PVA) e emulsão Pickering de curcumina	Filmes indicadores de pH à base de CS/PVA contendo emulsão de Pickering carregada com curcumina. A proteção da curcumina proporcionou mudanças de cor mais pronunciadas em resposta às variações de pH, tornando a indicação visual mais evidente no monitoramento da frescura de peixes.	(Liu et al., 2021).

De modo geral, os estudos demonstram que a incorporação da curcumina em diferentes matrizes poliméricas, possibilita respostas visuais às alterações de pH, caracterizadas por mudanças de coloração de amarelo para tonalidades alaranjadas, avermelhadas ou vermelho-amarronzadas. Essas alterações mostraram-se aplicáveis ao monitoramento visual da frescura e da deterioração de alimentos, como carnes e peixes. Além disso, os resultados evidenciam que o sistema de incorporação da curcumina pode influenciar a intensidade e a estabilidade da resposta colorimétrica, reforçando a importância da escolha adequada da matriz e dos componentes utilizados na formulação dos filmes.

REFERÊNCIAS

- A, Naseema; SRIVASTAVA, Priyanka. Optimization of Small Droplet Lantana oil-based Nanoemulsion for Enhanced Curcumin Release. **BioNanoScience**, v. 15, n. 1, p. 160, 2 mar. 2025.
- ABERA, Workiye Getnet; KASIRAJAN, Ramachandran; MAJAMO, Samuel Latebo. Synthesis and characterization of bioplastic film from banana (Musa Cavendish species) peel starch blending with banana pseudo-stem cellulosic fiber. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 17, p. 20419–20440, 3 set. 2024.

AL-DARKAZALI, Waleed N.; AALHUSAINI, Taha Najm; HARBI, Nazar Sattar. Analysis and development of biodegradable organic plastic: Study of chemical properties and sustainable environmental applications. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 11, p. 101054, jun. 2025.

AMOBONYE, Ayodeji *et al.* Review of recent advancements in starch modification: Improving the functionality of starch-based films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 315, p. 144354, jun. 2025.

ARCHIBONG, Friday Nwankwo *et al.* Emerging progress in montmorillonite rubber/polymer nanocomposites: a review. **Journal of Materials Science**, v. 58, n. 6, p. 2396–2429, 28 fev. 2023.

ASHOK, Anagha; ABHIJITH, R.; REJEESH, C. R. Material characterization of starch derived bio degradable plastics and its mechanical property estimation. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 2163–2170, 2018.

ASROFI, Mochamad *et al.* Characteristic of composite bioplastics from tapioca starch and sugarcane bagasse fiber: Effect of time duration of ultrasonication (Bath-Type). **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 1626–1630, 2021.

BADANAYAK, Pratikhya; JOSE, Seiko; BOSE, Gautam. Banana pseudostem fiber: A critical review on fiber extraction, characterization, and surface modification. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 1, 24 abr. 2023.

BASTIOLI, Catia. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, n. 1–3, p. 263–272, 3 jan. 1998.

BEE, Soo-Ling *et al.* Polymer nanocomposites based on silylated-montmorillonite: A review. **Progress in Polymer Science**, v. 85, p. 57–82, out. 2018.

BEHERA, Lopamudra; MOHANTA, Monalisha; THIRUGNANAM, Arunachalam. Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102180, fev. 2022.

BOUCHAMA, Chaymae *et al.* Effect of Phenolic Compounds Extracted from Turmeric (*Curcuma longa* L.) and Ginger (*Zingiber officinale*) on Cutaneous Wound Healing in Wistar Rats. **Cosmetics**, v. 10, n. 5, p. 137, 2 out. 2023.

BRODY, Aaron L. *et al.* Scientific Status Summary. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 8, 8 out. 2008.

CALAMBAS, Heidya Lorena *et al.* Physical-Mechanical Behavior and Water-Barrier Properties of Biopolymers-Clay Nanocomposites. **Molecules**, v. 26, n. 21, p. 6734, 7 nov. 2021.

CHAUDHARY, Pallavi; FATIMA, Faria; KUMAR, Ankur. Relevance of Nanomaterials in Food Packaging and its Advanced Future Prospects. **Journal of**

Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, v. 30, n. 12, p. 5180–5192, 19 dez. 2020.

CHEN, Long *et al.* Comprehensive investigation and comparison of surface microstructure of fractionated potato starches. **Food Hydrocolloids**, v. 89, p. 11–19, abr. 2019.

COELHO, Ana Letícia Kincheski *et al.* Chemical stability of Curcuma longa extract stored in hydrophobic deep eutectic solvent and polymers emulsion. **Food Hydrocolloids**, v. 146, p. 109166, jan. 2024.

ÇOKKUVVETLI, Ayşe Tuğçe; DENİZ, Sennur. Antibacterial thermoplastic starch/sepiolite bio-nanocomposite films: Effects of plasticizer type and starch source. **Journal of Plastic Film & Sheeting**, v. 41, n. 2, p. 165–194, 6 abr. 2025.

DAS, Dipak; PANESAR, Parmjit S.; SAINI, Charanjiv S. Effect of montmorillonite (MMT) on the properties of soybean meal protein isolate-based nanocomposite film loaded with debittered kinnow peel powder. **Food Research International**, v. 185, p. 114292, jun. 2024.

DUAN, Mengxia *et al.* Electrospun gelatin/chitosan nanofibers containing curcumin for multifunctional food packaging. **Food Science and Human Wellness**, v. 12, n. 2, p. 614–621, mar. 2023.

ERNA, Kana Husna *et al.* Development of curcumin/rice starch films for sensitive detection of hypoxanthine in chicken and fish meat. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 3, p. 100189, jun. 2022.

ETXABIDE, Alaitz; KILMARTIN, Paul A.; MATÉ, Juan I. Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. **Food Control**, v. 121, p. 107645, mar. 2021.

GAO, Qing *et al.* A comparative study on stabilizing and releasing thymol by pre-formed V-type starch and β -cyclodextrin. **Food Hydrocolloids**, v. 156, p. 110233, nov. 2024.

GARCÍA-RAMÓN, J. A. *et al.* Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles from plantain rachis. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 35–42, set. 2021.

GENECYA, Gita *et al.* Characteristic Improvement of a Carrageenan-Based Bionanocomposite Polymer Film Containing Montmorillonite as Food Packaging through the Addition of Silver and Cerium Oxide Nanoparticles. **ACS Omega**, v. 8, n. 42, p. 39194–39202, 24 out. 2023.

GONÇALVES PARENTE, Angelucia *et al.* Additives for sustainable fruit packaging: A systematic review. **Food and Humanity**, v. 4, p. 100534, 1 maio 2025.

GUO, Lei; LI, Chen. Preparation of organically modified montmorillonite reinforced gelatin/cassava starch film and its application in broccoli florets preservation. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 52, p. 101604, dez. 2025.

HUANG, Hsuan-Jung *et al.* Clay nanosheets simultaneously intercalated and stabilized by PEGylated chitosan as drug delivery vehicles for cancer chemotherapy. **Carbohydrate Polymers**, v. 302, p. 120390, fev. 2023.

KARWAL, Anchal; KUMAR, Amit; YADAV, Awesh K. Montmorillonite revolution: a unified exploration of exfoliation techniques and its emerging role as an advanced drug delivery carrier. **Applied Clay Science**, v. 273, p. 107845, set. 2025.

KAUR, Lovepreet *et al.* Banana starch: Properties, description, and modified variations - A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 2096–2102, dez. 2020.

KRAITHONG, Supaluck; ISSARA, Utthapon. A strategic review on plant by-product from banana harvesting: A potentially bio-based ingredient for approaching novel food and agro-industry sustainability. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 20, n. 8, p. 530–543, dez. 2021.

KUMAR, Vinay *et al.* Potential of banana based cellulose materials for advanced applications: A review on properties and technical challenges. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 6, p. 100366, dez. 2023.

LI, Xiquan *et al.* Development of starch-based films reinforced with curcumin-loaded nanocomplexes: Characterization and application in the preservation of blueberries. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 264, p. 130464, abr. 2024.

LIN, Ruikang *et al.* Gem-like starch granules engineered with different crystalline starches. **Food Chemistry**, v. 469, p. 142548, mar. 2025.

LIU, Di *et al.* Corn starch/polyvinyl alcohol based films incorporated with curcumin-loaded Pickering emulsion for application in intelligent packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 188, p. 974–982, out. 2021.

MA, Siyuan *et al.* Advancements in starch-based nanomaterials for functional delivery and food packaging: a comprehensive review and future directions. **Journal of Future Foods**, v. 5, n. 5, p. 443–454, set. 2025.

MACÊDO, Ana Angélica Mathias *et al.* **Filme biodegradável à base de amido de banana**. Brazil, 2022.

MALI, Suraj N.; PANDEY, Anima. Development of curcumin integrated smart pH indicator, antibacterial, and antioxidant waste derived Artocarpus lakoocha starch-based packaging film. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 275, p. 133827, ago. 2024.

- MOHD RAFEE, Siti Nor Amirah *et al.* Effect of Different Ratios of Biomaterials to Banana Peels on the Weight Loss of Biodegradable Pots. **Acta Technologica Agriculturae**, v. 22, n. 1, p. 1–4, 1 mar. 2019.
- MORENO-ZARAGOZA, Josue; ROSELL, Cristina M.; BELLO-PÉREZ, Luis Arturo. The multiscale structure of banana starch related to the physicochemical, thermal, functional and digestibility characteristics: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 159, p. 110646, fev. 2025.
- MUÑOZ-GIMENA, Pedro Francisco *et al.* A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2972, 7 jul. 2023.
- NATH, Debarshi *et al.* Nanoclay-based active food packaging systems: A review. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100803, mar. 2022.
- ORSUWAN, Aungkana; SOTHORNVIT, Rungsinee. Effect of banana and plasticizer types on mechanical, water barrier, and heat sealability of plasticized banana-based films. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 1, p. e13380, jan. 2018.
- ÖTLES, Semih; Ötles, Serkan. Manufacturing of biobased packaging materials for the food industry. **Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria**, v. 3, n. 2, p. 13–17, 2004.
- PANDEY, Jitendra Kumar; SINGH, Raj Pal. Green Nanocomposites from Renewable Resources: Effect of Plasticizer on the Structure and Material Properties of Clay-filled Starch. **STARCH - STÄRKE**, v. 57, n. 1, p. 8–15, jan. 2005.
- PATEL, M. *et al.* Potato starch-based bioplastics synthesized using glycerol–sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 7, p. 7843–7860, 3 jul. 2023.
- PAUDEL, Sandeep; JANASWAMY, Srinivas. Use of alfalfa cellulose for formulation of strong, biodegradable film to extend the shelf life of strawberries. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 290, p. 139004, fev. 2025.
- PEELMAN, Nanou *et al.* Application of bioplastics for food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, v. 32, n. 2, p. 128–141, 1 ago. 2013.
- PELISSARI, Franciele Maria *et al.* Comparative study on the properties of flour and starch films of plantain bananas (*Musa paradisiaca*). **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 2, p. 681–690, 1 mar. 2013.
- PRUESS, Jakob T.; GARRETT, Rachael D. Potential effectiveness of extended producer responsibility: An ex-ante policy impact analysis for plastic packaging waste in Belgium, France, and Germany. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 219, p. 108297, 1 jun. 2025.

RIBEIRO, Jéssica S.; VELOSO, Cristiane M. Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 112, p. 106374, 1 mar. 2021.

RISYON, Nazratul Putri *et al.* Characterization of polylactic acid/halloysite nanotubes bionanocomposite films for food packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 23, p. 100450, 1 mar. 2020.

SAMIR, Aya *et al.* Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. **npj Materials Degradation**, v. 6, n. 1, p. 68, 19 ago. 2022.

SANCHEZ, Leidy T.; PINZON, Magda I.; VILLA, Cristian C. Development of active edible films made from banana starch and curcumin-loaded nanoemulsions. **Food Chemistry**, v. 371, p. 131121, mar. 2022.

SARTORI, Tanara; MENEGALLI, Florencia Cecilia. Development and characterization of unripe banana starch films incorporated with solid lipid microparticles containing ascorbic acid. **Food Hydrocolloids**, v. 55, p. 210–219, 1 abr. 2016.

SHARATH KUMAR, N. *et al.* Banana starch: Modification methods and their effect on starch properties—a recent review. **Food and Humanity**, v. 4, p. 100543, maio 2025.

SHUPRAJHAA, Thayumanavan *et al.* Influence of additives on the development, mechanical, functional characteristics and biodegradability of banana starch-based bioplastic films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 295, p. 139544, mar. 2025.

SINGH, Prastuty *et al.* Starch based bio-nanocomposite films reinforced with montmorillonite and lemongrass oil nanoemulsion: development, characterization and biodegradability. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 1, p. 527–545, 4 fev. 2023.

ULRICH, Gabriella D. *et al.* Zein/hydroxypropylcellulose biofilms with hydrophilic and hydrophobic montmorillonite clays. **Polymer Composites**, v. 44, n. 5, p. 2634–2644, maio 2023.

VIANA, Eduardo Bruno Macêdo *et al.* Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100776, mar. 2022.

VIANA, Eduardo Bruno Macêdo *et al.* Eco-Friendly Bioplastic Film Produced With Green Plantain Starch (*Musa paradisiaca* L.): Effect of Activated Carbon Addition and Hydrothermal Modification. **Polymer Composites**, 25 nov. 2025.

VILARINHO, Fernanda *et al.* Monitoring lipid oxidation in a processed meat product packaged with nanocomposite poly(lactic acid) film. **European Polymer Journal**, v. 98, p. 362–367, 1 jan. 2018.

VISCUSI, Gianluca *et al.* Smart pH-sensitive indicators based on rice starch/pectin/alginate loading Lambrusco pomace extract and curcumin to track the freshness of pink shrimps. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 291, p. 139085, fev. 2025.

WANG, Wei *et al.* Functionality developments in montmorillonite nanosheet: Properties, preparation, and applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 499, p. 156186, nov. 2024.

XIA, Chong; QIAN, Jun. Recent advances in montmorillonite-based composites for biomedical applications: A review. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 109, p. 107012, 1 jul. 2025.

XU, Jin *et al.* Magnetic field-induced alignment of starch molecules enhances the mechanical strength of starch films. **Carbohydrate Polymers**, v. 366, p. 123834, 15 out. 2025.

YANG, Zhen; CHEN, Qifeng; WEI, Liting. Active and smart biomass film with curcumin Pickering emulsion stabilized by chitosan-adsorbed laurate esterified starch for meat freshness monitoring. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 275, p. 133331, ago. 2024.

ZHANG, Lei *et al.* Multifunctional Bio-Based Packaging for Perishable Foods: Structural Design, Scalable Fabrication, and Versatile Applications. **Advanced Materials**, v. 38, n. 33, 5 jun. 2026.

ZHANG, Minghui; CHEN, Hongyan. Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 233, p. 123462, abr. 2023.

ZHUANG, Yang; WANG, Yudong; YANG, Hong. Characterizing digestibility of potato starch with cations by SEM, X-ray, LF-NMR, FTIR. **Food Chemistry**, v. 424, p. 136396, 30 out. 2023.

ZOU, Youning *et al.* Enhanced hydrophobicity, antioxidant activity, and antimicrobial efficacy of edible starch-based films incorporating pullulan and geraniol for fresh salmon preservation. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 49, p. 101530, 1 jun. 2025.

ARTIGO 1

Microstructural Organization and Mechanical and Barrier Performance of
Montmorillonite-Reinforced Unripe Banana Starch Films

*This article was published in *Materials Today Communications* (ISSN: 2352-4928), an international journal with an impact factor of 4.9.

Microstructural Organization and Mechanical and Barrier Performance of Montmorillonite-Reinforced Unripe Banana Starch Films

Authors

Sara Moreno Pereira Lacerda^{a*}, Eduardo Bruno Macêdo Viana^a, Matheus Ferreira Almeida^b, Maria José Missão Cordeiro^a, Alcebíades Rebouças São José^b, Cristiane Martins Veloso^a, Cristiane Patrícia de Oliveira^a

Affiliations

^a State University of Southwest Bahia (UESB), Itapetinga Campus, Itapetinga, Bahia 45700-000, Brazil

^b State University of Southwest Bahia (UESB), Vitória da Conquista Campus, Vitória da Conquista, Bahia 45083-900, Brazil

Corresponding authors

* Sara Moreno Pereira Lacerda (email: saramp16@gmail.com)

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.115969>

ABSTRACT

In this study, the effect of montmorillonite (MMT) incorporation on films based on unripe banana starch (*Musa paradisiaca* L.) was evaluated. Films containing 0, 2, 4, and 6% (w/w) MMT were produced by the casting method and characterized in terms of their physical, morphological, and chemical properties. The films were also applied as primary packaging for cherry tomatoes, and quality parameters were monitored over 12 days of storage. Films containing 4% MMT exhibited a more homogeneous structure, indicating good clay dispersion, and showed improved mechanical properties, including higher tensile strength (TS). In addition, MMT incorporation reduced water vapor permeability (WVP) compared with the control film. These films also reduced tomato mass loss by 37%. MMT incorporation increased film opacity and imparted a slight yellowish coloration, without affecting biodegradability. Overall, MMT improved film performance, demonstrating its potential for the development of biodegradable and sustainable packaging for postharvest preservation.

Keywords: Reinforcing agent; biopolymer; active packaging.

1. INTRODUCTION

In the packaging sector, there has been growing interest in developing biodegradable materials based on natural polymers such as starch (Shuprajhaa et al., 2025), which stands out for being widely available, low-cost, and highly promising for the production of biodegradable materials intended to replace conventional plastics (Falua et al., 2022). Traditionally, sources such as corn, potato, and cassava have been widely used for starch extraction (Sharath Kumar et al., 2025). However, the increasing demand for more sustainable solutions, together with the emphasis on regional development, has driven the exploration of unconventional sources, such as mango seed starch, babassu mesocarp, and arrowroot, among others (Nawab et al., 2017; Sampaio et al., 2025; Saraiva Rodrigues et al., 2020)

Among unconventional starch sources, unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.) stands out. Interest in this raw material is due to its high starch concentration (over 70%

on a dry basis), high degree of purity (>90%), and significant amylose content (approximately 25%) (Viana et al., 2025). These characteristics favor the formation of biodegradable films, making this starch a promising alternative for such applications (Viana et al., 2022). Furthermore, the use of unripe plantains for starch production allows the valorization of fruits that do not meet commercial standards for consumption and would otherwise be discarded, thereby helping to reduce food waste (Taweecat; Wongsooka; Rawdkuen, 2021).

Although green plantain starch has high potential as a polymeric matrix, films produced solely from this biopolymer exhibit significant functional limitations, including high moisture sensitivity, low mechanical strength, reduced thermal stability, and unsatisfactory barrier properties (Orsuwan; Sothornvit, 2018; Shuprajhaa et al., 2025). To overcome these limitations, different strategies have been investigated, including the incorporation of plasticizers, compatible polymers, and reinforcing agents such as nanoparticles, natural fibers, and inorganic fillers, which can modify the microstructure of the matrix and improve its functional performance (García-Ramón et al., 2021; Orsuwan; Sothornvit, 2017; Shuprajhaa et al., 2025; Tibolla et al., 2019).

Studies have shown that combining unripe banana starch with reinforcing agents can yield materials with enhanced properties. García-Ramón et al. [11] developed plantain starch films reinforced with nanoparticles derived from the plantain rachis and observed increased thermal stability, as well as significant improvements in mechanical and barrier properties. Similarly, Shuprajhaa et al. [1] produced plantain starch films containing glycerol, polyvinyl alcohol (PVA), and carboxymethylcellulose (CMC), resulting in materials with greater tensile strength, higher elongation at break, and better thermal stability. These results confirm that incorporating functional reinforcements is an effective strategy to expand the potential applications of plantain starch in biodegradable packaging.

Among the available reinforcing agents, lamellar clays, especially montmorillonite (MMT), are promising alternatives. This is due to their high surface area, layered structure, and capacity to interact with natural polymer matrices. Incorporating MMT into biopolymers results in notable improvements in mechanical, thermal, and barrier properties, as well as reduced gas permeability and moisture sensitivity (Genecya et al., 2023; Kan et al., 2025). Guo and Li [16] incorporated organically modified montmorillonite (OMMT) into gelatin and cassava starch films. They observed up to a 34% reduction in oxygen permeability and a significant increase in tensile strength. This

led to greater efficiency in broccoli preservation, extending its shelf life by more than 2 days. Das et al. [17] reported similar outcomes in protein films reinforced with MMT, highlighting the versatility of this clay mineral as a functional agent in high-performance biodegradable packaging.

Although the reinforcing effect of montmorillonite has been widely demonstrated in several biopolymer matrices (Table 1), there is still a clear gap in the literature regarding biodegradable films produced from unripe plantain starch reinforced with natural, unmodified montmorillonite. Previous studies have primarily investigated other biopolymer matrices, including soy protein isolate, cassava starch, methyl cellulose, and wheat starch, in which montmorillonite has been shown to improve mechanical, thermal, and barrier properties (Das; Panesar; Saini, 2024; Derungs et al., 2021; Ruamcharoen; Munlee; Ruamcharoen, 2023; Tunç; Duman; Polat, 2016). However, these findings cannot be directly extrapolated to unripe plantain starch because its physicochemical characteristics may lead to different film properties. Moreover, information on the performance of these films under real food packaging conditions remains limited.

Table 1.

Comparison of previous studies on biodegradable films reinforced with montmorillonite (MMT).

Study	Polymer matrix	Type of montmorillonite	Main findings
Das et al. [17]	Soy protein isolate	Natural MMT	Enhanced mechanical strength, barrier properties, thermal stability.
Ruamcharoen et al. [18]	Cassava starch	Natural MMT	Reduced water vapor transmission and water solubility; improved barrier properties.
Derungs et al. [20]	Wheat starch	Na-MMT, Cloisite® 30B and Cloisite® 10 ^a	Compared natural and organomodified MMT; Na-MMT provided the best reinforcement and moisture resistance.
Orsuwan et al. [11]	Banana flour	Na-MMT	Improved water barrier properties and compatibility of banana flour films.
Present study	Unripe plantain starch	Natural MMT	Evaluated mechanical, thermal and barrier properties together with practical application as cherry tomato packaging.

Therefore, the present study was designed to address this gap by developing biodegradable films based on unripe plantain starch reinforced with natural

montmorillonite and assessing their mechanical, thermal, and barrier properties, together with their potential application as packaging materials for cherry tomatoes during postharvest storage.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Raw Materials

Plantains (*Musa paradisiaca* L.) were purchased from local open-air markets in Vitória da Conquista, Bahia, Brazil, at ripening stage 1 (unripe), characterized by physiological maturity and 100% green peel coloration. Montmorillonite (MMT) was supplied by Clariant S.A. (Brazil). The clay was beige-reddish in color and in powder form, and had a moisture content of $\leq 15\%$, as specified by the manufacturer. The MMT was used as received, without sieving, sonication, or surface modification. All reagents used in the study were of analytical grade. Glycerol (Êxodo Científica, Brazil) was employed as a plasticizer.

2.2 Starch Extraction and Characterization

2.2.1 Starch Extraction

Starch extraction was performed according to the method described by Moorthy [18], with slight modifications including alkaline treatment, filtration, sedimentation, and drying

2.2.2 Chemical Characterization of Starch

Moisture, ash, and protein contents were determined according to AOAC standard methods (AOAC International, 2016). Total lipids were determined according to the method of Bligh and Dyer [23]. Apparent amylose content was determined according to the method described by Martínez and Cuevas [24]. Total starch quantification was performed according to the Anthrone method (McCready et al., 1950).

2.3. Montmorillonite characterization

The particle size of montmorillonite (MMT) was determined by dynamic light scattering (DLS) using aqueous dispersions prepared under controlled stirring conditions. Measurements were performed at 25 °C, and average particle size and polydispersity index were obtained.

2.4 Film Preparation

The films were produced using the casting method. To prepare the film-forming solution, 3% (w/v) green plantain starch, 40% (w/w) glycerol, and different concentrations of MMT (0%, 2%, 4%, and 6% w/w, relative to starch mass) were dispersed in distilled water. The starch and MMT mixture were initially homogenized for 30 minutes with a magnetic stirrer (Novatecnica, NT137, Piracicaba, SP, Brazil) to ensure complete starch hydration. Glycerol was then added, and the mixture was heated to $80 \pm$

2 °C with stirring at 3200 rpm for 20 minutes until complete starch gelatinization. Subsequently, the solution underwent additional homogenization using a Turrax stirrer (IKA T25, Campinas, SP, Brazil) at 10,000 rpm for 30 minutes without heating. After homogenization, the suspension was sonicated in an ultrasonic bath (40 kHz, 135 W, 25 °C) (Unique, model USC 1600A, Indaiatuba, SP, Brazil) to remove bubbles. The resulting film-forming solution was poured onto glass plates (32.5 × 22.5 cm) and dried at 40 °C in a forced-air oven (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brazil) for approximately 40 hours. Once dried, the films were conditioned at 23 ± 2 °C and 50 ± 5% relative humidity for 48 hours, according to ASTM D618-00 (ASTM International, 2005). The films were produced in four replicates, totaling 16 samples.

2.5 Film Characterization

2.5.1 Morphostructural Analysis by Scanning Electron Microscopy (SEM)

Micrographs of the films were obtained using a scanning electron microscope (LEO 1430 VP, England) operated at an accelerating voltage of 10 kV. The films were previously cryofractured in liquid nitrogen, mounted on stubs with double-sided adhesive tape to obtain cross-sectional and surface images, and sputter-coated with a 200 Å gold layer for 180 s.

2.5.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR spectra were obtained using a spectrometer (Agilent Cary 630, St. Clair, USA) equipped with an attenuated total reflectance (ATR) accessory and recorded in absorbance mode from 500 to 4000 cm⁻¹ (mid-infrared region), with a resolution of 4 cm⁻¹ and 64 scans.

2.5.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Film mass loss was analyzed by thermogravimetry (TGA) using a thermal analyzer (Linseis, STA PT-1000, USA), in which a 20 mg film sample was analyzed over a temperature range of 30 to 600 °C, at a heating rate of 10 °C/min, under a nitrogen atmosphere flowing at 50 mL/min.

2.5.4 Thickness

Film thickness was determined using a digital micrometer (Mitutoyo, Suzano, SP, Brazil) with an accuracy of 0.001 mm. The measurements were taken as the average of ten readings at random regions of the film (Viana et al., 2022).

2.5.5 Water Vapor Permeability (WVP)

Water vapor permeability (WVP) was determined using the cup method, as described by ASTM International (ASTM International, 2021), with some modifications. The mass gain of the permeation cups was measured every 24 h for seven days. The water vapor permeability values of the samples were calculated according to Equation 1.

$$WWVP = (WVTR * e)/(P_{sat} * (RH1 - RH2)) \quad (1)$$

where:

- WVTR is the water vapor permeability rate (slope coefficient of the fitted model generated from the data on water mass absorbed over time)
- e is the film thickness (mm);
- P_{sat} is the saturation vapor pressure of water at the test temperature (24 ± 2 °C), considered as 3169 Pa;
- RH_1 is the relative humidity in the desiccator (100%)
- RH_2 is the relative humidity inside the cup (0%).

2.5.6 Solubility

Solubility was determined according to the method described by Gontard et al. [28], with modifications. The initial mass of each film sample was determined after drying in an oven (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brazil) at 105 ± 2 °C for 24 h. The dried films were immersed in 50 mL of distilled water in Falcon tubes and maintained under orbital agitation at 90 rpm at 24 ± 2 °C for 24 h. Afterwards, the samples were removed from the tubes and dried under the same conditions described above to determine the final mass. Solubility was expressed as the percentage of solubilized material.

2.5.7 Mechanical Properties

Mechanical tests were conducted using a TAXT2i texture analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, UK) equipped with a 10 kg load cell, as described by Aurelio et al. [29]. Film samples (10×2 cm) were tested with an initial grip separation of 5 cm and a crosshead speed of 12.5 mm/min. Thickness was measured at multiple points using a digital micrometer, and the average value was used to calculate the cross-sectional area. Tensile strength (TS), elongation at break (E%), and Young's modulus (YM) was determined.

2.5.8 Color and opacity

Film transmittance was determined using a UV-Vis spectrophotometer (Kasuki, model IL 593). Spectra were recorded for film samples measuring $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ at room temperature (25 ± 2 °C) over the wavelength range of 400 to 800 nm. In addition, film opacity was calculated at 600 nm using Equation 2 (Almeida et al., 2023).

$$Opacity = T_{600}/e \quad (2)$$

- where T_{600} is the transmittance at 600 nm, and e is the film thickness (mm).

Film color was determined using a Chroma Meter CR-400 colorimeter (Konica Minolta Sensing Inc., Sakai, Japan), previously calibrated with a white standard ($L^* = 89.89$; $a^* = 0.37$; $b^* = -2.27$). The CIELAB system (L^* , a^* , b^*) was used to determine

luminosity (L^* , ranging from 0 = dark to 100 = white) and the color coordinates a^* (negative values = green; positive values = red) and b^* (negative values = blue; positive values = yellow). The L^* , a^* , and b^* values were obtained from three readings in equidistant regions of each sample. The total color difference (ΔE^*) was calculated according to Equation 3.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

- where ΔL^* , Δa^* , and Δb^* represent the differences between the color parameters of the samples and those of the white reference standard.

2.6. Biodegradability of the films

Biodegradability analysis was carried out according to the methodology described by Martucci and Ruseckaite [31], with modifications. Film samples (2 × 3 cm) were dried to constant weight and buried in soil at a depth of 4 cm. A dystrophic Red-Yellow Latosol was used (Table 2).

Table 2

Chemical properties of the soil used in the biodegradability test.

Depth	Ph	P	K	Mg	Ca	Al	H+Al	SB	T	T	V	M
0-20 cm	H ₂ O											
LVA	5.6	6.6	91	0.57	1.18	0.1	2.31	1.98	2.08	4.29	46.2	4.8

Source: Soil Laboratory, Federal University of Viçosa (UFV). t: effective cation exchange capacity (CEC); T: potential cation exchange capacity (CEC); V (%): base saturation; m (%): aluminum saturation.

Soil moisture was maintained at approximately 40% by periodic water addition. Samples were recovered after 0, 7, and 14 days, washed, dried to constant weight, and the mass loss was determined.

2.7 Application of the films as packaging for cherry tomatoes

The films were applied as packaging for cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) to evaluate postharvest preservation. Fruits were harvested at the commercial ripening stage, sanitized in sodium hypochlorite solution, rinsed, and dried. Tomatoes were randomly distributed (three per container) in polypropylene containers and sealed with the respective films. Four treatments were evaluated: control (without film), starch film without MMT, starch film with 4% MMT, and commercial PVC film. Samples were stored at 23 ± 2 °C for 12 days, with evaluations conducted at 0, 4, 8, and 12 days (n = 3).

2.7.1. Determination of postharvest quality parameters of cherry tomatoes

Mass loss was expressed as a percentage of the initial mass. Color was determined using a colorimeter based on the CIELAB system (L^* , a^* , b^*), with measurements taken from different regions of the fruit. Soluble solids (SS), pH, and titratable acidity were determined according to AOAC standard methods [22,32].

2.8. Experimental design and statistical analysis

Data were analyzed by analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Duncan's test ($p < 0.05$). Biodegradability data were evaluated by regression analysis over time. For cherry tomatoes, a 4×4 factorial design (packaging $\times$ storage time) was applied, with regression analysis for mass loss and Duncan's test for the other variables. Analyses were performed using SAS.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Starch characterization

The extraction process yielded approximately 17% starch, similar to the values reported for unripe plantain Viana et al. [8] and comparable to other sources such as cassava and potato (Altemimi, 2018).

The starch showed low ash (0.25%), protein (0.17%), and lipid (0.27%) contents, indicating high purity and efficiency of the extraction process (Cheng et al., 2024; Olawoye et al., 2022). Moisture content (13.82%) was within the expected range for storage stability.

The total starch content reached 99.1% (dry basis), with a high apparent amylose content (44.57%). The elevated amylose content is associated with improved film-forming capacity and enhanced mechanical and barrier properties (Lourdin; Valle; Colonna, 1995; Raheena; Shankar V, 2024; Viana et al., 2022).

3.2 Montmorillonite particle size

The hydrodynamic diameter of MMT averaged 541.9 ± 17.99 nm, showing a bimodal distribution with populations of larger aggregates (≈ 817 – 871 nm) and smaller particles (≈ 150 – 160 nm). This indicates a heterogeneous dispersion, with the coexistence of aggregates and individualized platelets, which may affect the distribution of MMT in the polymer matrix and, consequently, the properties of the films (Flaker et al., 2015).

3.3 Morphostructural analysis by scanning electron microscopy (SEM)

A heterogeneous distribution of montmorillonite (MMT) particles was observed by SEM analysis (Fig. 1A). Significant variations in size and morphology were observed, as well as the formation of aggregates, a behavior characteristic of clays in their natural form, in which strong electrostatic interactions between the platelets hinder the exfoliation process and, consequently, uniform dispersion in the polymer matrix (Wang

et al., 2024). The presence of aggregates can result in structurally discontinuous regions in the film, compromising the homogeneity of the matrix and negatively influencing its mechanical and barrier properties (Nath et al., 2022). Nevertheless, even partial dispersion of natural MMT can still be beneficial, since clay particles act as reinforcing agents in different biopolymers. This interaction restricts the mobility of starch macromolecular chains, promoting a denser and more compact structure, which contributes to reduced permeability and increased mechanical strength, even if exfoliation is not complete (Orsuwan; Sothornvit, 2017).

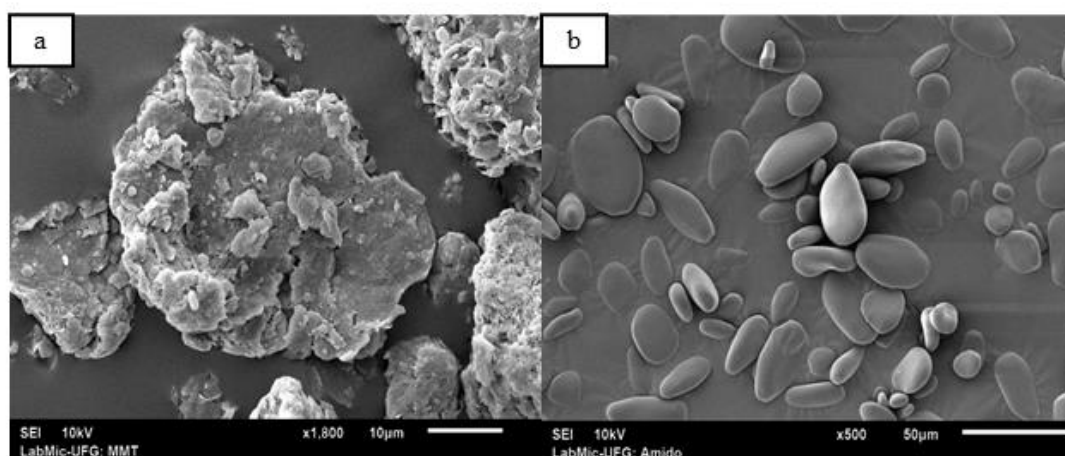


Fig. 1. Scanning electron microscopy (SEM) images of (A) montmorillonite (MMT) at 1800 $\times$ magnification and (B) plantain starch at 500 $\times$ magnification. Scale bars: 10 μ m (A) and 50 μ m (B).

Starch granules showed predominantly elliptical shapes, with smooth surfaces and no visible cracks (Fig. 1B), indicating structural integrity. This morphology can influence functional properties such as gelatinization and film formation, as well as interactions with polymers and clays (Pacheco et al., 2025).

SEM micrographs of the control film (Fig. 2A) showed a smooth and homogeneous surface, without pores or granules. Films containing 2% and 4% MMT (Figs. 2C and 2E) exhibited rougher and more compact surfaces, suggesting good incorporation of the clay. At 6% MMT (Fig. 2G), the presence of denser regions indicates particle aggregation, reducing film homogeneity, although no structural discontinuities were observed. This behavior is associated with reduced dispersion and interfacial interactions at higher MMT content (Wang et al., 2024).

Analysis of the cross-sections of the films did not reveal the presence of well-defined lamellar structures. However, scattered points were observed throughout the matrix, which may be attributed to the presence of MMT particles incorporated into the film.

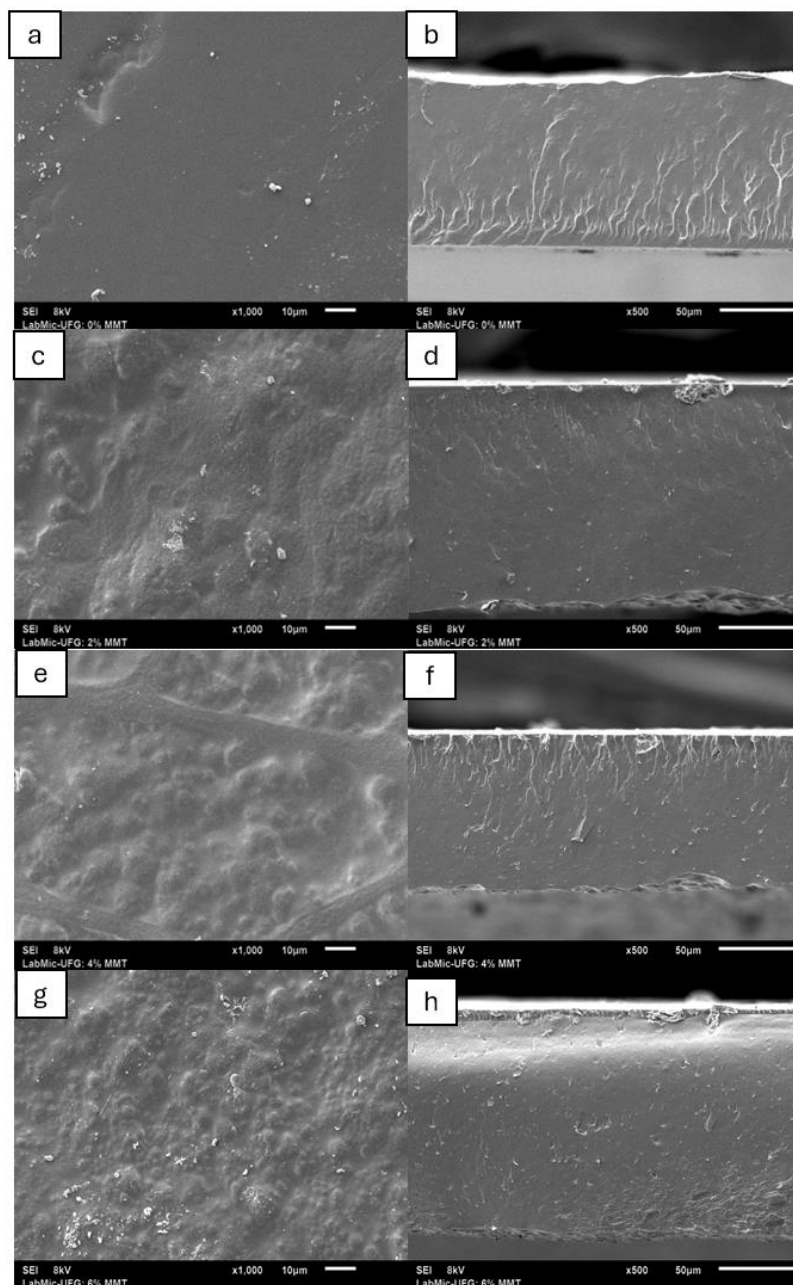


Fig. 2. Scanning electron microscopy (SEM) images of plantain starch films with different MMT concentrations. Surface micrographs (A, C, E, G) were obtained at

1000× magnification, and cross-sectional micrographs (B, D, F, H) at 500× magnification.

3.4 Analysis by Mid-Infrared Spectroscopy (FTIR – ATR)

The interaction between starch and MMT in the films was evaluated by Fourier transform infrared spectroscopy with attenuated total reflectance (FTIR–ATR) (Fig. 3), which shows the spectra of films containing different MMT concentrations (0, 2, 4, and 6%), as well as pure starch and MMT.

For MMT, the band at approximately 3615 cm^{-1} was attributed to the O–H stretching vibration of structural hydroxyl groups associated with Al-rich octahedral sites (Al–Al–OH), which are characteristic of dioctahedral smectites (Caccamo et al., 2020; Madejová, 2003; Tunç; Duman; Polat, 2016). The bands around 975 cm^{-1} were assigned to Si–O and Al–O stretching vibrations, which are characteristic of the montmorillonite silicate structure (Xu et al., 2020).

In the films containing MMT, changes were observed in the broad O–H stretching band ($3100\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$) (Ruamcharoen; Munlee; Ruamcharoen, 2023; Skowrońska; Wilpiszewska, 2022), including an apparent increase in band intensity relative to the control film. These changes are consistent with modifications in the hydrogen-bonding network of the starch matrix, likely resulting from interactions between starch hydroxyl groups and oxygen-containing sites on the montmorillonite surface, supporting effective interfacial interactions between the polymer matrix and the clay. In addition, the band 2920 cm^{-1} was attributed to the C–H stretching vibrations of the saccharide units of starch (Skowrońska; Wilpiszewska, 2022).

A band between 1630 and 1645 cm^{-1} , attributed to the H–O–H bending vibration ($\delta\text{H–O–H}$) of adsorbed water (Orsuwan; Sothornvit, 2017; Skowrońska; Wilpiszewska, 2022), remained present in the composite films, reflecting the hydrophilic nature of the starch matrix and the ability of montmorillonite to adsorb water molecules through hydrogen bonding.

Typical starch bands were observed in the $800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ region, which is associated with carbohydrate structures. The band at approximately 1336 cm^{-1} was attributed to the C–H/CH₂ bending vibrations of the glucose units in the starch backbone (Kizil; Irudayaraj; Seetharaman, 2002; Van der Venet et al., 2025). This band remained present in all starch-based films but was absent in the spectrum of pure MMT. Furthermore, the region between 800 and 1200 cm^{-1} encompasses the characteristic C–C, C–O, and C–O–C stretching vibrations of the glycosidic linkages in amylose and

amylopectin (De Oliveira et al., 2025; Viana et al., 2022). In the composite films, this broad region results from the overlap of these starch vibrations with the Si–O, Si–O–Si, and Si–O–Al stretching bands characteristic of montmorillonite (Madejová, 2003; Van Soest et al., 1995). The progressive increase in spectral contribution within this region with increasing MMT content is consistent with the successful incorporation of the clay into the starch matrix, while the overlap of the starch and silicate vibrations suggests intermolecular interactions between both components.

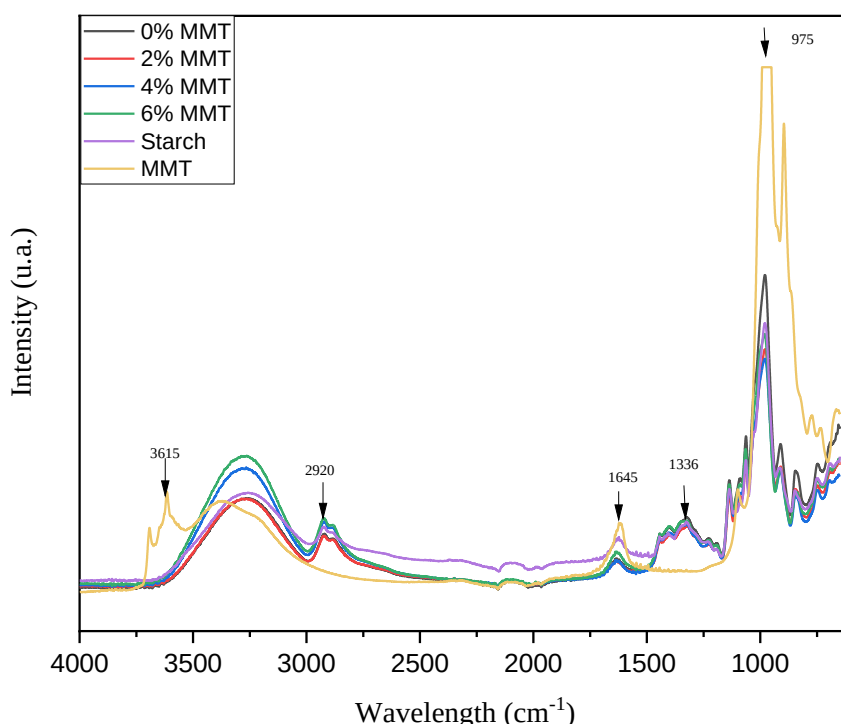


Fig. 3. FTIR spectra of plantain starch films with different MMT concentrations.

Overall, the FTIR spectra indicate that the incorporation of MMT did not introduce new functional groups but modified the spectral profile of characteristic starch bands, supporting the occurrence of intermolecular interactions between starch and montmorillonite. No new absorption bands were observed in the composite films, indicating the absence of covalent bond formation. Therefore, the interactions between starch and MMT are inferred to be predominantly governed by hydrogen bonding between the hydroxyl groups of starch and the structural oxygen atoms of montmorillonite, together with possible electrostatic interactions involving the exchangeable interlayer cations present in the clay structure.

3.5 Thermogravimetric analysis (TGA and DTG)

Thermogravimetric analysis (TGA) was used to evaluate the thermal stability of MMT, starch, and the films (Figs. 4a and 4b). MMT showed typical behavior, with initial dehydration below 200 °C and high thermal stability up to approximately 500 °C, followed by dehydroxylation of the lamellar structure, associated with the elimination of hydroxyl groups from the octahedral sheet (Chen et al., 2025; Pola et al., 2016). Starch exhibited two main events: moisture loss below 150 °C and thermal degradation around 300 °C (Pineda-Gómez et al., 2014).

Films with and without MMT showed similar thermal profiles, with two main events related to water loss and starch degradation. However, films containing 4% and 6% MMT exhibited a lower mass loss rate in the degradation stage, indicating improved thermal stability.

DTG curves confirmed a reduction in degradation rate in MMT-containing films, attributed to interactions between starch and clay and to the barrier effect of MMT, which limits the diffusion of volatile compounds during thermal decomposition (Czerniecka-Kubicka et al., 2017).

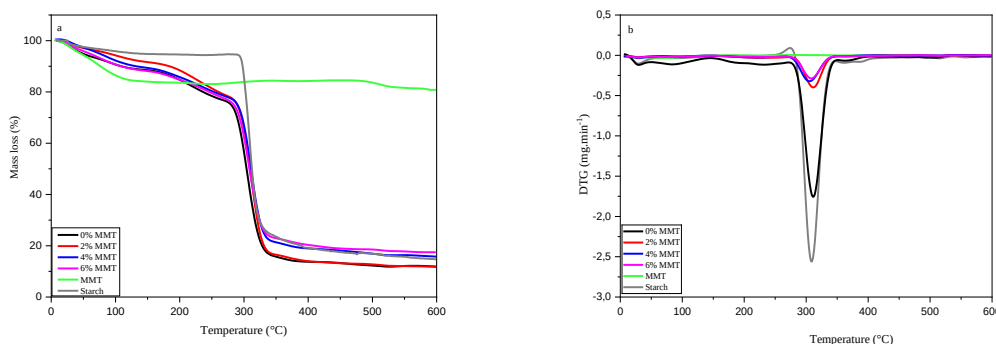


Fig. 4. Thermogravimetric (TGA) (a) and derivative thermogravimetric (DTG) (b) curves of plantain starch, montmorillonite (MMT), and starch–MMT composite films.

3.6 Thickness, water vapor permeability (WVP), and water solubility

The addition of MMT did not significantly affect film thickness ($p > 0.05$), regardless of concentration (Table 2), suggesting that clay particles were well dispersed within the polymer matrix without altering its structure.

Similar results were reported by Yousefi et al. [48] who observed no significant changes in thickness in starch-based films containing montmorillonite, attributed to the uniform dispersion of clay within the matrix.

In the present study, WVP values decreased significantly ($p < 0.05$) with increasing MMT content (Table 3), a trend that was accompanied by a reduction in water solubility. These findings indicate that the incorporation of MMT enhanced the barrier properties of the films. This behavior is attributed to the dispersion of MMT lamellae throughout the starch matrix, which act as impermeable barriers and increase the tortuosity of the diffusion pathway for water vapor molecules. As a result, water molecules are forced to travel a longer and more tortuous pathway, increasing the effective diffusion path length and consequently reducing water vapor permeability (Ruamcharoen; Munlee; Ruamcharoen, 2023; Vaezi; Asadpour; Sharifi, 2019). In addition, the incorporation of clays promotes a more compact polymer structure by reducing void spaces within the matrix and strengthening the interactions between the filler and the starch network, thereby restricting chain mobility and further hindering moisture transport (Muñoz-Gimena et al., 2023; Niazmand et al., 2025).

This finding also aligns with recent reports indicating that hydrophobic surface modification can be an effective complementary approach to improve moisture resistance in starch-based materials. In this context, ethanol-assisted alkyl ketene dimer - AKD surface modification has been shown to markedly reduce water uptake in starch foams, highlighting that while MMT improves barrier performance through internal structural reinforcement and tortuous diffusion pathways, surface engineering represents another viable route to control moisture sensitivity (Huang et al., 2026).

The lower solubility observed at higher MMT concentrations (4% and 6%) further supports the strengthening of starch–clay interactions, reducing water affinity and improving resistance to moisture. Similar trends have been reported in starch-based films containing clays (Niazmand et al., 2025).

Table 3

Effect of MMT incorporation on thickness, water vapor permeability, and solubility of plantain starch films.

Parameter	0% MMT	2% MMT	4% MMT	6% MMT	p-value
e (mm)	0.12 ± 0.01^a	0.13 ± 0.01^a	0.13 ± 0.005^a	0.13 ± 0.01^a	0.2200
WVP ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	0.079 ± 0.007^a	0.075 ± 0.003^a	0.059 ± 0.004^b	0.045 ± 0.004^c	< 0.0001
S (%)	38.38 ± 0.12^a	36.57 ± 1.43^b	28.96 ± 0.80^c	27.22 ± 0.86^c	< 0.0001

Different letters within the same row indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$) according to Duncan's multiple range test; e: thickness; WVP: water vapor permeability; S: solubility.

3.7 Mechanical properties

The addition of MMT significantly ($p \leq 0.05$) influenced the mechanical properties of the films. At 4% MMT, tensile strength (TS) and Young's modulus increased by 62.60% and 40.4%, respectively, reaching maximum values of 2.091 MPa and 27.40 MPa (Table 4), indicating increased rigidity. This behavior is attributed to the dispersion of MMT particles and their interaction with the starch matrix, which restricts polymer chain mobility and enhances mechanical strength (Calambas et al., 2021; Cyras et al., 2008; Zhang; Chen, 2023).

At 6% MMT, TS decreased, likely due to particle agglomeration, as also observed in SEM images, which can act as stress concentration points (Jiang et al., 2020). Similar behavior was reported by Kang et al. [56], indicating an optimal MMT concentration around 4% for maximizing mechanical performance.

No significant differences were observed for elongation at break ($p \geq 0.05$; Table 3), indicating that MMT incorporation did not significantly affect film flexibility. This behavior suggests that the interactions between the starch matrix and the clay were sufficient to reinforce the material without substantially restricting polymer chain mobility. Similar results have been reported by Orsuwan and Sothornvit (Orsuwan; Sothornvit, 2017), who observed that montmorillonite did not significantly change the elongation at break of biodegradable films.

Overall, MMT improved the mechanical performance of the films, particularly at 4%, providing increased strength and rigidity without compromising flexibility, indicating potential for biodegradable packaging applications.

Table 4

Mechanical properties of plantain starch films with different MMT concentrations.

Parameter	0% MMT	2% MMT	4% MMT	6% MMT	p-value
Tensile Strength (MPa)	1.286±0.16 ^b	1.5107±0.26 ^b	2.091±0.23 ^a	1.5673±0.35 ^b	<0.0270
Elongation at Break (%)	12.75±1.18 ^a	13.15±1.21 ^a	13.40±3.64 ^a	11.89±2.38 ^a	0.7802
Young Modulus (MPa)	19.51±0.20 ^b	26.97±0.72 ^a	27.40±3.12 ^a	24.84±2.32 ^a	0.0041

Different letters within the same row indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

3.8 Instrumental color and opacity of the films

The incorporation of MMT increased film opacity as a function of concentration (Table 4). The control film was translucent and colorless, while MMT-containing films exhibited a yellowish hue due to the natural color of the clay (Fig. 5). This behavior can be attributed to the dispersion of MMT platelets, which enhances light scattering and reduces transmittance (Gürler; Torğut, 2022).

Increased opacity is advantageous for packaging photosensitive foods, as it helps reduce light-induced degradation and improve shelf life (Vaezi; Asadpour; Sharifi, 2019). Although transparency is reduced, the films still allow partial visualization of the product.

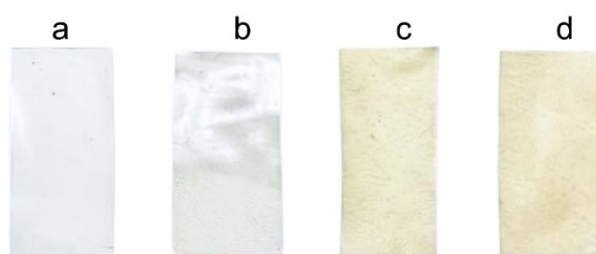


Fig. 5. Visual appearance of plantain starch films with different MMT concentrations: (A) 0% MMT, (B) 2% MMT, (C) 4% MMT, and (D) 6% MMT.

The addition of MMT reduced film brightness (L^*) and promoted a more yellowish coloration, with noticeable total color differences (ΔE^*) relative to the control, especially at higher concentrations (Table 5). This effect is associated with the intrinsic color of montmorillonite, which imparted slight darkening and increased opacity to the films.

These changes may be advantageous for packaging applications, as reduced light transmittance can help protect photosensitive compounds and minimize oxidative degradation (Orsuwan; Sothornvit, 2017; Sothornvit et al., 2010).

Table 5
Color and opacity of plantain starch films with different MMT concentrations.

Parameter	0% MMT	2% MMT	4% MMT	6% MMT	p-value
L	87.87±0.19 ^a	86.58±0.56 ^b	85.49±0.42 ^c	85.04±0.55 ^c	<0.0001
a*	0.44±0.06 ^c	0.89±0.26 ^b	1.06±0.01 ^{ab}	1.22±0.09 ^a	<0.0001
b*	-1.21±0.24 ^d	0.76±0.58 ^c	2.22±0.17 ^b	3.75±0.52 ^a	<0.0001
ΔE	2.25±0.31 ^d	4.54±0.59 ^c	6.34±0.31 ^b	7.79±0.62 ^a	<0.0001
Opacity (mm ⁻¹)	177.13±15.6 ^c	199.90±5.63 ^b	213.25±6.04 ^b	257.30±6.64 ^a	<0.0003

Different letters within the same row indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

3.9 Biodegradability

ANOVA indicated a significant difference between the control and MMT-containing films after 14 days ($p \leq 0.05$), with no differences at 7 days or among MMT concentrations (2–6%). This behavior may be attributed to increased microbial activity over time, promoting film degradation.

Films containing MMT showed slightly lower mass loss than the control, suggesting a modest reduction in biodegradation rate, likely due to the barrier effect of the clay, which can limit water diffusion (Singh et al., 2023).

Despite this effect, all films exhibited progressive degradation, indicating that MMT incorporation did not compromise biodegradability. These results agree with previous studies reporting slight reductions the degradation rate without loss of biodegradability (Issa et al., 2018).

Table 6

Biodegradability of plantain starch films with different MMT concentrations

Mass loss percentage (%)					
Time (Days)	0% MMT	2% MMT	4% MMT	6% MMT	p-value
7	0.170±0.05 ^a	0.157±0.04 ^a	0.154±0.01 ^a	0.149±0.01 ^a	0.8335
14	0.232±0.02 ^b	0.197±0.02 ^a	0.187±0.01 ^a	0.183±0.01 ^a	0.0056

Different letters within the same row indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$) according to Duncan's multiple range test.

3.10 Application of the films as packaging for postharvest preservation of cherry tomatoes

To evaluate the practical performance of the films, a postharvest storage test was conducted using cherry tomatoes, selected because of their high perishability (Cheng et al., 2021; Zou et al., 2024). The film containing 4% MMT was chosen based on its superior mechanical and barrier properties compared to the control. The experimental design included a negative control (without packaging), a positive control using commercial PVC, and a starch-based film without MMT (0%), allowing the specific effect of MMT incorporation to be assessed (Fig. 6).

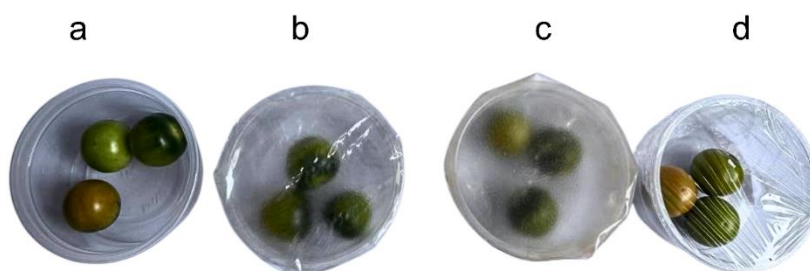


Fig. 6. Visual appearance of cherry tomatoes stored under different packaging systems: (A) without packaging (SF), (B) starch-based film without MMT (0%), (C) starch-based film containing 4% MMT, and (D) commercial PVC film.

Storage time had a significant effect on mass loss ($p < 0.0001$), with all treatments showing a progressive increase throughout the storage period (Fig. 7). This behavior is associated with continuous water evaporation driven by the gradient between the fruit and the surrounding environment. However, the rate of mass loss varied according to the packaging system, indicating differences in the barrier efficiency of the materials.

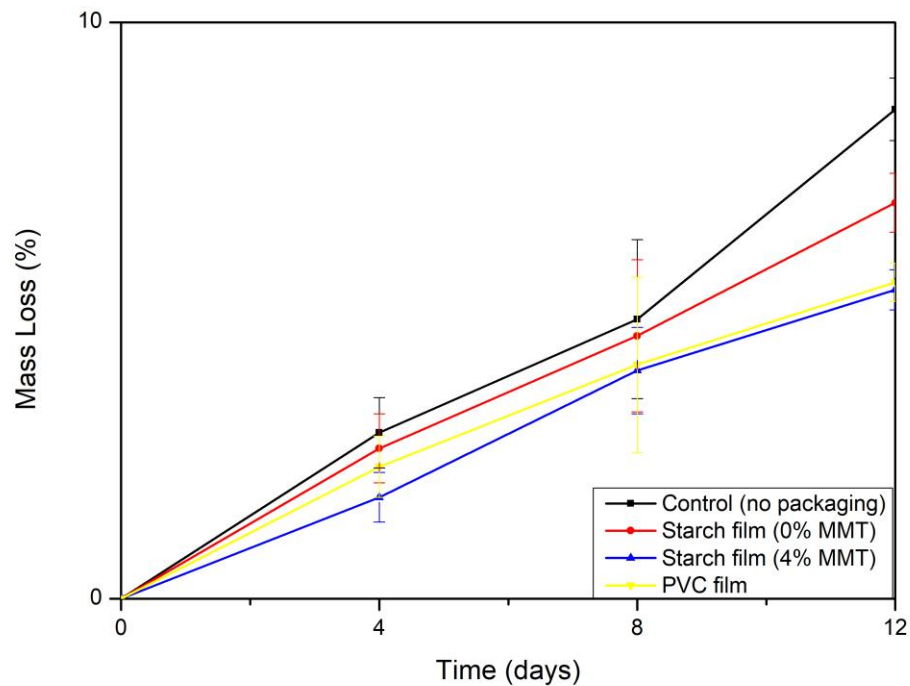


Fig. 7. Mass loss (%) of cherry tomatoes during storage under different conditions: Control (no packaging), starch film (0% MMT), starch film (4% MMT), and PVC film.

Tomatoes stored without packaging exhibited the highest mass loss, confirming the absence of resistance to water vapor transfer. In contrast, all films reduced dehydration to some extent, demonstrating their role as physical barriers. Among the evaluated treatments, the film containing 4% MMT showed the lowest mass loss over time, indicating superior performance in preserving fruit moisture.

The performance of the 4% MMT film was comparable to that of PVC, with no significant differences between these treatments ($p > 0.05$), highlighting the potential of the developed material as an alternative to conventional plastic packaging. In contrast,

the starch film without MMT (0%) showed higher mass loss, indicating lower barrier efficiency and reinforcing the contribution of MMT incorporation.

The improved performance of the MMT-containing film can be attributed to the formation of a more tortuous pathway for water vapor diffusion, which reduces permeability and enhances moisture retention. Additionally, the packaging may have contributed to a partial modification of the internal atmosphere by limiting gas exchange, thereby reducing respiration rates and slowing down metabolic activity (Tang et al., 2025; Vilvert et al., 2023; Zhang; Chen, 2023).

A significant interaction between treatment and storage time ($p = 0.0457$) indicates that the effectiveness of the packaging systems varied slightly over storage time. Although all treatments followed the same increasing trend, differences became more pronounced over time, suggesting that barrier properties play an increasingly important role during prolonged storage.

Overall, the results demonstrate that starch-based films containing MMT are effective in reducing mass loss and can achieve performance comparable to commercial PVC, supporting their potential application as sustainable alternatives for postharvest preservation.

Although the mechanisms were not directly evaluated, these results suggest the potential of MMT-based films as active packaging for postharvest preservation.

Regarding other quality parameters (Table 7), a gradual color change from greenish to reddish tones was observed during storage, consistent with the natural ripening process (Faisal et al., 2025). No significant differences were found among treatments ($p > 0.05$), indicating that the films did not interfere with fruit ripening while still contributing to freshness maintenance (Fig. 8).

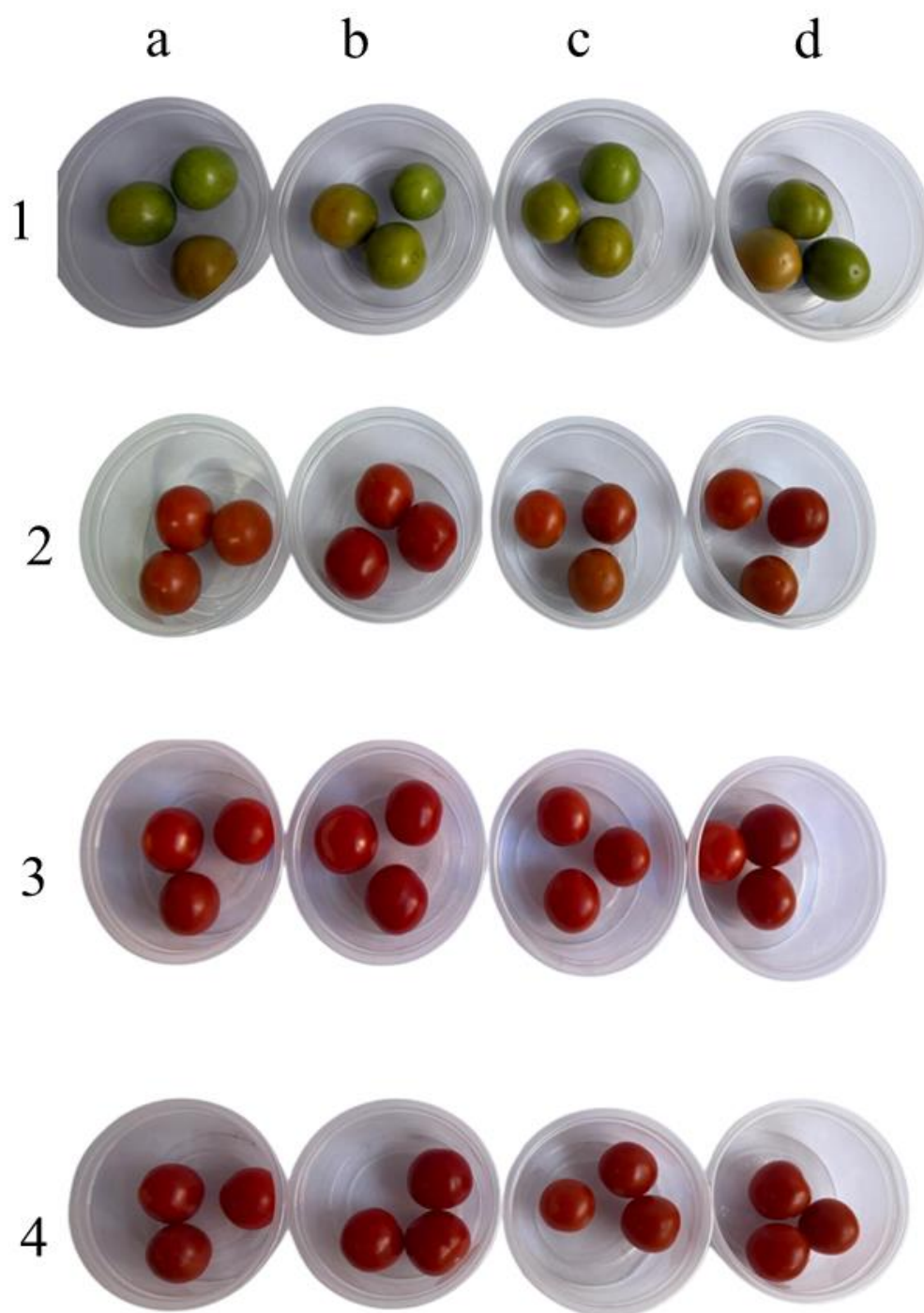


Fig. 8. Visual appearance of cherry tomatoes under different packaging conditions: (A) without packaging; (B) starch-based film without MMT (0%); (C) starch-based film containing 4% MMT; and (D) commercial PVC film, evaluated at storage times of (1) 0 days, (2) 4 days, (3) 8 days, and (4) 12 days.

No significant differences were observed in pH, titratable acidity, total soluble solids, or firmness among treatments ($p > 0.05$; Table 7), indicating that packaging did not affect the physicochemical characteristics of the fruits during storage.

Overall, the film containing 4% MMT showed the best performance, particularly due to lower mass loss, indicating better preservation of fruit freshness. This effect is attributed to its improved barrier properties, which reduce moisture and gas exchange.

These results highlight the potential of the material for biodegradable packaging applications, although further studies are needed to expand its functionality. The packaging performance was evaluated for cherry tomatoes under a single storage condition. Consequently, applying the results obtained here to other food products or storage environments may not yield equally satisfactory outcomes. In addition, unmodified montmorillonite was investigated. Future studies could examine other types of montmorillonite, including organomodified clays, or other reinforcing and hydrophobic agents, such as ethanol-assisted surface-modified alkyl ketene dimer (AKD), which has shown promising results in improving the moisture stability of starch-based materials (Huang et al., 2026). Further studies should evaluate these films with different food matrices and storage conditions to broaden their potential applications.

Table 7 –
Postharvest storage of cherry tomatoes under different packaging treatments over time.

0 day								
	Ph	TA	TSS	Firmness (N)	ML (%)	L	a*	b*
SF	4.19±0.01 ^a	10.96±0.015 ^a	4.57±0.31 ^a	7.77±0.15 ^a	0.00±0 ^a	49.33±3.84 ^a	5.70±1.61 ^a	27.74±3.68 ^a
0%MMT	4.15±0.02 ^a	10.91±0.01 ^a	4.47±0.31 ^a	7.84±0.09 ^a	0.00±0 ^a	50.37±2.00 ^a	4.54±1.40 ^a	27.85±3.43 ^a
4%MMT	4.20±0.03 ^a	10.92±0.04 ^a	4.9±0.30 ^a	7.93±0.05 ^a	0.00±0 ^a	50.21±2.13 ^a	4.34±1.89 ^a	26.28±2.73 ^a
PVC	4.17±0.03 ^a	10.89±0.13 ^a	4.57±0.31 ^a	7.97±0.19 ^a	0.00±0 ^a	49.17±3.06 ^a	5.46±1.77 ^a	26.83±3.43 ^a
p-value	0.0658	0.6203	0.3824	0.3132	1.00	0.3059	0.2593	0.0610
4^o day								
	pH	TA	TSS	Firmness (N)	ML (%)	L	a*	b*
SF	4.1±0.09 ^a	9.97±1.10 ^a	4.60±0.14 ^a	6.03±1.99 ^a	2.88±0.61 ^a	40.48±2.0 ^a	20.54±3.56 ^a	21.73±2.19 ^a
0%MMT	3.91±0.06 ^a	11.06±0.88 ^a	4.91±0.21 ^a	7.11±2.31 ^a	2.61±0.60 ^a	39.90±1.28 ^a	21.01±1.96 ^a	21.83±1.29 ^a
4%MMT	3.82±0.06 ^a	10.74±0.75 ^a	4.98±0.32 ^a	7.78±1.77 ^a	1.76±0.43 ^b	40.25±2.02 ^a	21.17±2.68 ^a	22.21±2.51 ^a
PVC	3.96±0.01 ^a	11.08±0.44 ^a	4.70±0.44 ^a	6.52±1.18 ^a	2.29±0.54 ^{ab}	40.29±2.21 ^a	19.34±3.51 ^a	21.73±2.46 ^a
p-value	0.1032	0.4996	0.5131	0.2618	0.0286	0.7410	0.1221	0.4971
8^o day								
	pH	TA	TSS	Firmness (N)	ML (%)	L	a*	b*
SF	4.28±0.24 ^a	10.57±0.74 ^a	4.71±0.34 ^a	3.55±1.23 ^a	4.85±1.38 ^a	38.09±1.04 ^a	22.96±3.12 ^a	19.51±1.94 ^a
0%MMT	3.72±0.59 ^a	10.59±0.52 ^a	4.90±1.32 ^a	5.10±1.72 ^a	4.56±1.32 ^a	38.18±1.19 ^a	23.51±2.11 ^a	19.75±1.75 ^a
4%MMT	4.08±0.10 ^a	10.13±0.49 ^a	4.73±0.75 ^a	4.74±1.98 ^a	3.96±0.75 ^a	38.35±1.58 ^a	23.38±2.64 ^a	20.14±1.86 ^a
PVC	4.09±0.05 ^a	10.02±0.71 ^a	4.63±1.51 ^a	4.41±1.52 ^a	4.06±1.51 ^a	38.44±0.80 ^a	23.66±2.35 ^a	21.09±1.11 ^a
p-value	0.2729	0.0512	0.2675	0.2415	0.3928	0.3547	0.7768	0.0995

	12° day							
	Ph	TA	TSS	Firmness (N)	ML (%)	L	a*	b*
SF	3.80±0.25 ^a	10.69±0.28 ^a	4.32±0.49 ^a	2.72±0.14 ^a	8.49±0.53 ^a	38.76±1.19 ^a	26.19±3.01 ^a	22.09±2.03 ^a
0%MMT	3.77±0.08 ^a	10.00±1.13 ^a	4.20±0.41 ^a	2.67±0.18 ^a	6.87±0.51 ^a	38.98±0.86 ^a	25.30±3.12 ^a	22.01±1.60 ^a
4%MMT	3.77±0.02 ^a	10.93±0.79 ^a	4.52±0.24 ^a	2.53±0.18 ^a	5.36±0.35 ^b	39.06±0.87 ^a	24.39±2.60 ^a	21.92±1.55 ^a
PVC	3.74±0.13 ^a	10.33±0.49 ^a	4.72±0.49 ^a	2.48±0.28 ^a	5.49±0.33 ^b	39.01±1.09 ^a	26.57±4.61 ^a	21.98±2.05 ^a
p-value	0.956	0.0627	0.0612	0.2619	0.001	0.187	0.0973	0.882

Identical letters within a column indicate no significant difference according to Duncan's multiple range test; SF – Without film; PVC – polyvinyl chloride film; TA - Titratable Acidity; TSS - Total Soluble Solids, ML – Mass loss.

4. CONCLUSION

The incorporation of montmorillonite (MMT) into the unripe plantain starch matrix significantly improved the mechanical, thermal, and barrier properties of the films developed. Among the formulations evaluated, the film containing 4% MMT showed the best overall performance, as evidenced by higher tensile strength, low water solubility, reduced water vapor permeability, and enhanced thermal properties. These results indicate that the controlled addition of MMT promotes the formation of a more compact and cohesive structure, resulting in a stronger material that is less susceptible to moisture absorption.

The film containing 4% MMT reduced mass loss by approximately 37% relative to the control (without film) over 12 days of storage. These results demonstrate the potential of the developed material as a sustainable alternative for the development of active biodegradable packaging, contributing to the extension of the shelf life of horticultural products and to the reduction of conventional plastic use.

CRedit authorship contribution statement

Sara Moreno Pereira Lacerda: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Writing – original draft, Funding acquisition.

Eduardo Bruno Macêdo Viana: Methodology, Formal analysis, Data curation.

Matheus Ferreira Almeida: Formal analysis, Data curation.

Maria José Missão Cordeiro: Methodology, Formal analysis.

Acebiades Rebouças São José: Project administration, Resources.

Cristiane Martins Veloso: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing.

Cristiane Patrícia de Oliveira: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing, Resources.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Finance Code 001.

The authors gratefully acknowledge Clariant S.A. (Brazil) for supplying the natural montmorillonite used in this research.

REFERENCES

- [1] T. Shuprajhaa, S.K. Paramasivam, S. Pushpavalli, Su. Anandakumar, R. Naik, Influence of additives on the development, mechanical, functional characteristics and biodegradability of banana starch-based bio plastic films, *Int. J. Biol. Macromol.* 295 (2025) 139544. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139544>.
- [2] K.J. Falua, A. Pokharel, A. Babaei-Ghazvini, Y. Ai, B. Acharya, Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review, *Polymers (Basel)*. 14 (2022) 2215. <https://doi.org/10.3390/polym14112215>.
- [3] N. Sharath Kumar, C.K. Sunil, M.K. Verma, V. Palanimuthu, Banana starch: Modification methods and their effect on starch properties—a recent review, *Food and Humanity* 4 (2025) 100543. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100543>.
- [4] A. Nawab, F. Alam, M.A. Haq, Z. Lutfi, A. Hasnain, Mango kernel starch-gum composite films: Physical, mechanical and barrier properties, *Int. J. Biol. Macromol.* 98 (2017) 869–876. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.054>.
- [5] J.P. Sampaio, C.S. dos S. Rolim, M.A. Novaes, I.S. Nascimento, M.C.P. Porfirio, M.P.F. Santos, G.L.G. da Silva, P. Bonomo, R.C.F. Bonomo, Orally disintegrating film with arrowroot (*Maranta arundinacea* L.) starch: An alternative for rapid administration, *Next Research* 2 (2025) 100790. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100790>.
- [6] S.C. Saraiva Rodrigues, A.S. da Silva, L.H. de Carvalho, T.S. Alves, R. Barbosa, Morphological, structural, thermal properties of a native starch obtained from babassu mesocarp for food packaging application, *Journal of Materials Research and Technology* 9 (2020) 15670–15678. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.030>.
- [7] E.B.M. Viana, M.F. Almeida, M.J.M. Cordeiro, S.M.P. Lacerda, A.R.S. José, R.C.F. Bonomo, C.C.E. de Souza, M.P.F. Santos, C.M. Veloso, Eco-Friendly Bioplastic Film Produced With Green Plantain Starch (*Musa paradisiaca* L.): Effect of Activated Carbon Addition and Hydrothermal Modification, *Polym. Compos.* (2025). <https://doi.org/10.1002/pc.70669>.
- [8] E.B.M. Viana, N.L. Oliveira, J.S. Ribeiro, M.F. Almeida, C.C.E. Souza, J.V. Resende, L.S. Santos, C.M. Veloso, Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT), *Food Packag. Shelf Life* 31 (2022) 100776. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>.
- [9] C. Taweekiat, T. Wongsooka, S. Rawdkuen, Properties of Banana (*Cavendish* spp.) Starch Film Incorporated with Banana Peel Extract and Its Application, *Molecules* 26 (2021) 1406. <https://doi.org/10.3390/molecules26051406>.
- [10] A. Orsuwan, R. Sothornvit, Effect of banana and plasticizer types on mechanical, water barrier, and heat sealability of plasticized banana-based films, *J. Food Process. Preserv.* 42 (2018) e13380. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13380>.
- [11] J.A. García-Ramón, R. Carmona-García, M. Valera-Zaragoza, A. Aparicio-Saguilán, L.A. Bello-Pérez, A. Aguirre-Cruz, J. Alvarez-Ramirez, Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles

- from plantain rachis, *Int. J. Biol. Macromol.* 187 (2021) 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>.
- [12] A. Orsuwan, R. Sothornvit, Development and characterization of banana flour film incorporated with montmorillonite and banana starch nanoparticles, *Carbohydr. Polym.* 174 (2017) 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.085>.
- [13] H. Tibolla, F.M. Pelissari, J.T. Martins, E.M. Lanzoni, A.A. Vicente, F.C. Menegalli, R.L. Cunha, Banana starch nanocomposite with cellulose nanofibers isolated from banana peel by enzymatic treatment: In vitro cytotoxicity assessment, *Carbohydr. Polym.* 207 (2019) 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079>.
- [14] G. Genecya, D.R. Adhika, W. Sutrisno, T.D.K. Wungu, Characteristic Improvement of a Carrageenan-Based Bionanocomposite Polymer Film Containing Montmorillonite as Food Packaging through the Addition of Silver and Cerium Oxide Nanoparticles, *ACS Omega* 8 (2023) 39194–39202. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04575>.
- [15] W. Kan, Y. Nie, Q. Duan, L. Zhang, Y. Xu, L. Yu, L. Meng, Y. Chen, The effect of magnetic field-induced orientation of fillers on the performance of starch composite films, *Int. J. Biol. Macromol.* 306 (2025) 141391.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141391>.
- [16] L. Guo, C. Li, Preparation of organically modified montmorillonite reinforced gelatin/cassava starch film and its application in broccoli florets preservation, *Food Packag. Shelf Life* 52 (2025) 101604. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101604>.
- [17] D. Das, P.S. Panesar, C.S. Saini, Effect of montmorillonite (MMT) on the properties of soybean meal protein isolate-based nanocomposite film loaded with debittered kinnow peel powder, *Food Research International* 185 (2024) 114292.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114292>.
- [18] I. Derungs, M. Rico, J. López, L. Barral, B. Montero, R. Bouza, Influence of the hydrophilicity of montmorillonite on structure and properties of thermoplastic wheat starch/montmorillonite bionanocomposites, *Polym. Adv. Technol.* 32 (2021) 4479–4489. <https://doi.org/10.1002/pat.5450>.
- [19] J. Ruamcharoen, R. Munlee, P. Ruamcharoen, Eco-friendly bio-based composites of cassava starch and natural rubber compatibilized with nanoclays, *Polym. Compos.* 44 (2023) 1071–1082. <https://doi.org/10.1002/pc.27154>.
- [20] S. Tunç, O. Duman, T.G. Polat, Effects of montmorillonite on properties of methyl cellulose/carvacrol based active antimicrobial nanocomposites, *Carbohydr. Polym.* 150 (2016) 259–268. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.05.019>.
- [21] S.N. Moorthy, Extraction of starches from tuber crops using ammonia, *Carbohydr. Polym.* 16 (1991) 391–398. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(91\)90057-J](https://doi.org/10.1016/0144-8617(91)90057-J).
- [22] AOAC International, Official methods of analysis of AOAC International, 20th ed., AOAC International, Gaithersburg, MD, 2016.
- [23] E.G. Bligh, W.J. Dyer, A RAPID METHOD OF TOTAL LIPID EXTRACTION AND PURIFICATION, *Can. J. Biochem. Physiol.* 37 (1959) 911–917.
<https://doi.org/10.1139/o59-099>.
- [24] C. Martínez, F. Cuevas, Evaluación de la calidad culinaria y molinera del arroz., Cali, Colombia, 1989.
- [25] R.M. McCready, Jack. Guggolz, Vernon. Silveira, H.S. Owens, Determination of Starch and Amylose in Vegetables, *Anal. Chem.* 22 (1950) 1156–1158.
<https://doi.org/10.1021/ac60045a016>.
- [26] ASTM International, Practice for Conditioning Plastics for Testing, (2005).
<https://doi.org/10.1520/D0618-05>.
- [27] ASTM International, Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, (2021).
https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-21.

- [28] N. Gontard, C. Ducheze, J. Cuq, S. Guilbert, Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties, *Int. J. Food Sci. Technol.* 29 (1994) 39–50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb02045.x>.
- [29] R.-H. Aurelio, C.-V.S. Mexlisol, D.E. Páramo-Calderón, R. Acevedo-Gómez, G.-G. Gerardo, C. Nolasco-Hipolito, B.-G.J. Eduardo, C.-A.J. Carlos, A.-S. Alejandro, Functionality and characterization of modified starch films with pineapple leaf fibers, *Int. J. Biol. Macromol.* 246 (2023) 125611. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125611>.
- [30] T. Almeida, A. Karamysheva, B.F.A. Valente, J.M. Silva, M. Braz, A. Almeida, A.J.D. Silvestre, C. Vilela, C.S.R. Freire, Biobased ternary films of thermoplastic starch, bacterial nanocellulose and gallic acid for active food packaging, *Food Hydrocoll.* 144 (2023) 108934. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108934>.
- [31] J.F. Martucci, R.A. Ruseckaite, Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions, *Polym. Degrad. Stab.* 94 (2009) 1307–1313. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.018>.
- [32] AOAC International, Official methods of analysis, 16th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, 1997.
- [33] A. Altemimi, Extraction and Optimization of Potato Starch and Its Application as a Stabilizer in Yogurt Manufacturing, *Foods* 7 (2018) 14. <https://doi.org/10.3390/foods7020014>.
- [34] Y. Cheng, P. Huang, Y. Chan, P. Chiang, W. Lu, C. Hsieh, Z. Liang, B. Yan, C.R. Wang, P. Li, Investigate the composition and physicochemical properties attributes of banana starch and flour during ripening, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 7 (2024) 100446. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100446>.
- [35] B. Olawoye, O.F. Fagbohun, O.O. Popoola, S.O. Gbadamosi, C.T. Akanbi, Understanding how different modification processes affect the physiochemical, functional, thermal, morphological structures and digestibility of cardaba banana starch, *Int. J. Biol. Macromol.* 201 (2022) 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.134>.
- [36] D. Lourdin, G. Della Valle, P. Colonna, Influence of amylose content on starch films and foams, *Carbohydr. Polym.* 27 (1995) 261–270. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00071-2).
- [37] S. Raheena, S. Shankar V, A comparative evaluation of the antioxidant property between banana starch-based edible films with and without the inclusion of silicon dioxide nanoparticles, *Interactions* 245 (2024) 207. <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02060-3>.
- [38] C.H.C. Flaker, R. V. Lourenço, A.M.Q.B. Bittante, P.J.A. Sobral, Gelatin-based nanocomposite films: A study on montmorillonite dispersion methods and concentration, *J. Food Eng.* 167 (2015) 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.009>.
- [39] W. Wang, L. Wu, L. Chang, W. Yang, L. Si, H. Nan, W. Peng, Y. Cao, Functionality developments in montmorillonite nanosheet: Properties, preparation, and applications, *Chemical Engineering Journal* 499 (2024) 156186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156186>.
- [40] D. Nath, S. R. K. Pal, P. Sarkar, Nanoclay-based active food packaging systems: A review, *Food Packag. Shelf Life* 31 (2022) 100803. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100803>.
- [41] M.T. Pacheco, B.A. Rojas, K.Y. Burbano, K.N. Zevallos, A.F. Mendoza, D.H. Rodríguez, R.G. Díaz, F.J. Moreno, Modification of green banana and maize starches:

- A comparative study to select an ingredient with functional and technological potential, *LWT* 220 (2025) 117511. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117511>.
- [42] M.T. Caccamo, G. Mavilia, L. Mavilia, D. Lombardo, S. Magazù, Self-Assembly Processes in Hydrated Montmorillonite by FTIR Investigations, *Materials* 13 (2020) 1100. <https://doi.org/10.3390/ma13051100>.
- [43] J. Madejová, FTIR techniques in clay mineral studies, *Vib. Spectrosc.* 31 (2003) 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6).
- [44] X. Xu, Y. Li, X. Ma, J. Li, Synergistic reinforcing effect of nano-montmorillonite and cellulose nanocrystals on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate), *Cellulose* 27 (2020) 6249–6261. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03252-0>.
- [45] D. Skowrońska, K. Wilpiszewska, The Effect of Montmorillonites on the Physicochemical Properties of Potato Starch Films Plasticized with Deep Eutectic Solvent, *Int. J. Mol. Sci.* 23 (2022) 16008. <https://doi.org/10.3390/ijms232416008>.
- [46] J. Van der Vennet, F. De Witte, P. Vandenabeele, M. Eeckhout, F. Van Bockstaele, Applicability of Raman Spectroscopy for the Assessment of Wheat Flour Quality and Functionality in Bakery Applications, *Foods* 14 (2025) 3330. <https://doi.org/10.3390/foods14193330>.
- [47] R. Kizil, J. Irudayaraj, K. Seetharaman, Characterization of Irradiated Starches by Using FT-Raman and FTIR Spectroscopy, *J. Agric. Food Chem.* 50 (2002) 3912–3918. <https://doi.org/10.1021/jf011652p>.
- [48] J.P. de Oliveira, M.E.F. de Almeida, J. da S.S. Costa, I.B. da Silva, J.S. de Oliveira, E.L. Oliveira, L.B. Landim, N.M.C. da Silva, C.P. de Oliveira, Effect of eucalyptus nanofibril as reinforcement in biodegradable thermoplastic films based on rice starch (*Oryza sativa*): Evaluation as primary packaging for crackers, *Food Chem.* 474 (2025) 143177. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143177>.
- [49] J.J.G. van Soest, H. Tournois, D. de Wit, J.F.G. Vliegthart, Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy, *Carbohydr. Res.* 279 (1995) 201–214. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00270-7](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00270-7).
- [50] J. Chen, P. Liu, J. Lu, S.Y. Jiang, C.-H. Lee, Y. Zhao, Y. Li, H.D. Ruan, Calcination effect on multi-adsorption abilities of modified montmorillonite, *Mater. Chem. Phys.* 343 (2025) 131008. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131008>.
- [51] C.C. Pola, E.A.A. Medeiros, O.L. Pereira, V.G.L. Souza, C.G. Otoni, G.P. Camilloto, N.F.F. Soares, Cellulose acetate active films incorporated with oregano (*Origanum vulgare*) essential oil and organophilic montmorillonite clay control the growth of phytopathogenic fungi, *Food Packag. Shelf Life* 9 (2016) 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.07.001>.
- [52] P. Pineda-Gómez, N.C. Angel-Gil, C. Valencia-Muñoz, A. Rosales-Rivera, M.E. Rodríguez-García, Thermal degradation of starch sources: Green banana, potato, cassava, and corn - kinetic study by non-isothermal procedures, *Starch - Stärke* 66 (2014) 691–699. <https://doi.org/10.1002/star.201300210>.
- [53] A. Czerniecka-Kubicka, W. Frącz, M. Jasiorski, W. Błażejowski, B. Pilch-Pitera, M. Pyda, I. Zarzyka, Thermal properties of poly(3-hydroxybutyrate) modified by nanoclay, *J. Therm. Anal. Calorim.* 128 (2017) 1513–1526. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-6039-9>.
- [54] A.R. Yousefi, B. Savadkoobi, Y. Zahedi, M. Hatami, K. Ako, Fabrication and characterization of hybrid sodium montmorillonite/TiO₂ reinforced cross-linked wheat starch-based nanocomposites, *Int. J. Biol. Macromol.* 131 (2019) 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.083>.

- [55] K. Vaezi, G. Asadpour, H. Sharifi, Effect of ZnO nanoparticles on the mechanical, barrier and optical properties of thermoplastic cationic starch/montmorillonite biodegradable films, *Int. J. Biol. Macromol.* 124 (2019) 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.142>.
- [56] P.F. Muñoz-Gimena, V. Oliver-Cuenca, L. Peponi, D. López, A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging, *Polymers (Basel)*. 15 (2023) 2972. <https://doi.org/10.3390/polym15132972>.
- [57] R. Niazmand, P. Sharayei, M. Heydari-Majd, M. Sayahi, Optimization of a novel antimicrobial nanocomposite films based on starch saffron corm incorporating nanoclay/lignin/extract using response surface methodology, *Int. J. Biol. Macromol.* 307 (2025) 141733. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141733>.
- [58] Y. Huang, S. Zhang, L. Yu, Q. Duan, Y. Xu, H. Liu, Ethanol-assisted alkyl ketene dimer surface modification for enhanced moisture stability of starch-based foams, *Carbohydr. Polym.* 381 (2026) 125222. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2026.125222>.
- [59] H.L. Calambas, A. Fonseca, D. Adames, Y. Aguirre-Loredo, C. Caicedo, Physical-Mechanical Behavior and Water-Barrier Properties of Biopolymers-Clay Nanocomposites, *Molecules* 26 (2021) 6734. <https://doi.org/10.3390/molecules26216734>.
- [60] V.P. Cyras, L.B. Manfredi, M.-T. Ton-That, A. Vázquez, Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films, *Carbohydr. Polym.* 73 (2008) 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.014>.
- [61] M. Zhang, H. Chen, Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films, *Int. J. Biol. Macromol.* 233 (2023) 123462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123462>.
- [62] Y. Jiang, Y. Ding, D. Wang, Y. Deng, Y. Zhao, Radio frequency-assisted enzymatic extraction of anthocyanins from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. flowers: Process optimization, structure, and bioactivity determination, *Ind. Crops Prod.* 149 (2020) 112327. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112327>.
- [63] X. Kang, F. Ma, P. Sun, A. Gao, Y. Zhang, Starch-based active packaging film and its application, *Bioresources* 19 (2023) 366–379. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.366-379>.
- [64] N. Gürler, G. Torğut, Physicomechanical, thermal and dielectric properties of eco-friendly starch-microcrystalline cellulose-clay nanocomposite films for food packaging and electrical applications, *Packaging Technology and Science* 35 (2022) 473–483. <https://doi.org/10.1002/pts.2643>.
- [65] R. Sothornvit, S.-I. Hong, D.J. An, J.-W. Rhim, Effect of clay content on the physical and antimicrobial properties of whey protein isolate/organo-clay composite films, *LWT - Food Science and Technology* 43 (2010) 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.08.010>.
- [66] P. Singh, G. Kaur, A. Singh, P. Kaur, Starch based bio-nanocomposite films reinforced with montmorillonite and lemongrass oil nanoemulsion: development, characterization and biodegradability, *Journal of Food Measurement and Characterization* 17 (2023) 527–545. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01635-4>.
- [67] A.T. Issa, K.A. Schimmel, M. Worku, A. Shahbazi, S.A. Ibrahim, R. Tahergorabi, Sweet Potato Starch-Based Nanocomposites: Development, Characterization, and Biodegradability, *Starch - Stärke* 70 (2018). <https://doi.org/10.1002/star.201700273>.
- [68] Y. Cheng, H. Dong, Y. Wu, K. Xiao, Preparation of an Amidated Graphene Oxide/Sulfonated Poly Ether Ether Ketone (AGO/SPEEK) Modified Atmosphere Packaging for the Storage of Cherry Tomatoes, *Foods* 10 (2021) 552. <https://doi.org/10.3390/foods10030552>.

- [69] J. Zou, H. Zhong, C. Jiang, G. Zhu, X. Lin, Y. Huang, Ginkgo biloba leaf polysaccharide-stabled selenium nanozyme as an efficient glutathione peroxidase mimic for the preservation of bananas and cherry tomatoes, *Food Chem.* 459 (2024) 140443. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140443>.
- [70] J. Tang, C. Huang, W. Liu, X. Zeng, J. Zhang, W. Liu, J. Pang, C. Wu, Preparation and characterization of a konjac glucomannan-based bio-nanocomposite film and its application in cherry tomato preservation, *Food Hydrocoll.* 159 (2025) 110689. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110689>.
- [71] J.C. Vilvert, S.T. de Freitas, M.A.R. Ferreira, C. dos S.R. Costa, R.H. de L. Leite, F.K.G. dos Santos, E.M.M. Aroucha, Preservation of Quality and Bioactive Compounds in Mangoes Using Chitosan-Graphene-Oxide-Based Biodegradable Packaging, *Horticulturae* 9 (2023) 1145. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101145>.
- [72] M. Faisal, H. Desvita, M.B. Heriansyah, Y. Abubakar, F.M. Djuned, D. Mansur, P. Ramadhani, N. Ariani, Khoirunnisa, A. Darmawan, R. Mustikasari, M. Anwar, W.A. Rizal, Chitosan-liquid smoke-based composite coating for extending the shelf life of cherry tomatoes, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 11 (2025) 101155. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101155>.

CAPÍTULO III

ARTIGO 2

Biodegradable packaging system based on plantain starch incorporated with montmorillonite for preserving the quality of minimally processed mango

Biodegradable packaging system based on plantain starch incorporated with montmorillonite for preserving the quality of fresh-cut mango

Authors

Sara Moreno Pereira Lacerda^{a*}, João Cláudio Vilvert^b, Sérgio Tonetto de Freitas^b, Cristiane Martins Veloso^a, Cristiane Patrícia de Oliveira^a

Affiliations

^a State University of Southwest Bahia (UESB), Itapetinga Campus, Itapetinga, Bahia 45700-000, Brazil

^b Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Tropical Semiárida, Petrolina 56302-970, Pernambuco, Brazil

Corresponding authors

- Sara Moreno Pereira Lacerda (email: saramp16@gmail.com)

Abstract

Biodegradable films based on green plantain starch were used as a packaging system for fresh-cut ‘Palmer’ mangoes (*Mangifera indica* L.), aiming to promote passive modified atmosphere and preserve pulp quality during storage. The treatments consisted of: (i) packaging without sealing film (control); (ii) packaging sealed with green plantain starch film (GPTS); (iii) containers sealed with green plantain starch film incorporated with 4% montmorillonite (GPTS-MMT); and (iv) packaging sealed with commercial polyvinyl chloride (PVC) film. The starch films were produced by the casting method and characterized in terms of mechanical properties, water vapor permeability, and biodegradability. The mangoes were stored at 9 °C for 20 days, and the gas composition inside the packages and the physicochemical and physiological characteristics were evaluated at 0, 10, and 20 days of storage. The incorporation of montmorillonite increased tensile strength by 68%, Young’s modulus by 42,9%, and reduced water vapor permeability by 26%, while maintaining high biodegradability. During storage, the GPTS-MMT and PVC treatments promoted lower weight loss, greater firmness retention, and better preservation of fresh-cut mango color. Mangoes packaged with GPTS-MMT showed firmness (7.66 N) similar to that obtained with PVC (7.69 N), a lower soluble solids/titratable acidity ratio (13.0 and 13.9, respectively), and higher titratable acidity (0.76% citric acid), indicating delayed ripening and better-quality preservation. The GPTS-MMT film showed performance similar to that of commercial PVC, demonstrating its potential as a biodegradable and sustainable alternative for packaging fresh-cut mangoes.

Keywords: Biodegradable packaging; passive modified atmosphere; post-processing quality.

1. INTRODUCTION

The high perishability of fruits and vegetables has driven the development of different postharvest preservation techniques. Among these techniques, passive modified atmosphere packaging (MAP) stands out for promoting the modulation of O₂ and CO₂ concentrations around the product, reducing the respiration rate and the metabolic processes related with ripening and deterioration (Almeida et al., 2024; Thakur et al., 2022).

For the application of MAP, different polymeric materials are used in package production, including polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polyvinyl chloride (PVC) (Li et al., 2026). Among these materials, PVC stands out for presenting gas permeability compatible with the formation and maintenance of the internal atmosphere required for the postharvest preservation of fruits and vegetables, depending on the crop species and film properties (Caleb et al., 2013). In addition, its chemical resistance, stability, low flammability, and ease of processing favor its widespread use in food packaging and in several industrial sectors (Braga et al., 2018; Senathirajah et al., 2022).

Despite these advantages, PVC is a fossil-based synthetic polymer characterized by high environmental persistence and low biodegradability (Hatwar & Qureshi, 2025). Under natural conditions, the material is not effectively degraded by microorganisms and may undergo fragmentation due to physical and chemical factors, resulting in the formation of microplastics that accumulate in terrestrial and aquatic ecosystems (Ali et al., 2024). In addition, its post-consumer management represents a challenge due to the possible release of potentially harmful substances, which hinders conventional recycling and final disposal processes (Campisi et al., 2025; Yang et al., 2024). This issue is particularly relevant in the packaging sector, where a large proportion of the materials used is discarded after a single use and shows limited environmental recovery (Lopez-Aguilar et al., 2022). In this context, interest has grown in the development of packaging made from biodegradable and renewable materials. In addition to contributing to the reduction of persistent waste generation, these materials may present functional properties suitable for food applications, including film-forming capacity and barrier characteristics that help preserve products (Ma et al., 2025; Thomas et al., 2023).

Among the biopolymers available for film production, starch stands out for its biodegradability, low cost, and wide availability (Falua et al., 2022). In general, starch-

based films are odorless, colorless, non-toxic, and derived from renewable sources, while also showing good transparency, flexibility, and selectivity to gas exchange (Patel et al., 2023; Shuprajhaa et al., 2025). These characteristics favor their use in modified atmosphere systems, in which permeability can be adjusted through plasticizers, reinforcements, or polymer blends, contributing to the control of the gas composition inside the package and to the maintenance of the quality of fresh products (Ding et al., 2023; Zhao et al., 2022).

Experimental studies have already demonstrated the feasibility of applying biodegradable starch-based films in modified atmosphere systems, highlighting their potential to extend the shelf life of fruits and vegetables during storage (Balanon et al., 2023; Riyajan & Poolyarat, 2023; Xie et al., 2024). However, high sensitivity to moisture and mechanical and barrier limitations still restricts some applications of starch films (Orsuwan & Sothornvit, 2018; Shuprajhaa et al., 2025). In this sense, the incorporation of nanomaterials has been widely investigated as a strategy to improve the performance of these systems (Balanon et al., 2023).

Among the most used materials, montmorillonite (MMT) stands out, a natural smectite clay composed of hydrated layered silicates, characterized by a high surface area, high cation exchange capacity, and a layered structure that favors interaction with polymer matrices (Guo & Li, 2025; Kan et al., 2025). When incorporated into polymers, MMT can increase mechanical strength, thermal stability, and structural rigidity, in addition to reducing permeability to gases and water vapor (Muñoz-Gimena et al., 2023). Among the polymer matrices that can be reinforced with MMT, green plantain starch stands out, whose films present a good oxygen barrier, as well as properties that can be adjusted through the incorporation of additives and reinforcing agents (García-Ramón et al., 2021; Shuprajhaa et al., 2025; Viana et al., 2022, 2025).

The application of packaging systems based on green plantain starch reinforced with montmorillonite (MMT) in MAP appears promising for the preservation of minimally processed fruits, such as mango (*Mangifera indica* L.). Mango has high economic importance in the global market, being widely produced and marketed round the world (Dos Santos Moreira et al., 2024; Sánchez Aldana et al., 2021). In addition to its high nutritional value and broad consumer acceptance (de Sousa et al., 2021; Vilvert et al., 2023; Win & Setha, 2022), mango follows the growing demand for minimally processed fruits, a segment that moved approximately US\$ 310 billion in 2021 and may reach about US\$ 530 billion by 2028 (Botondi et al., 2021; Morales-de la Peña et al.,

2026). However, minimal processing accelerates physiological changes that reduce product shelf life, highlighting the need for technologies capable of preserving its quality during storage (Puebla-Duarte et al., 2026).

The hypothesis is that the incorporation of MMT into biodegradable films based on green plantain starch may improve barrier properties and structural characteristics of the material, favoring the control of gas exchange in passive MAP systems and contributing to the maintenance of quality and the extension of the shelf life of minimally processed mango.

The study aimed to evaluate the application of biodegradable films based on green plantain starch, incorporated with MMT, in a passive MAP system for the preservation of minimally processed mango during storage.

2. MATERIALS AND METHODS

The experimental procedure adopted in this study, from film preparation to its application as primary packaging for mangoes and subsequent quality evaluation, is summarized in Figure 1.

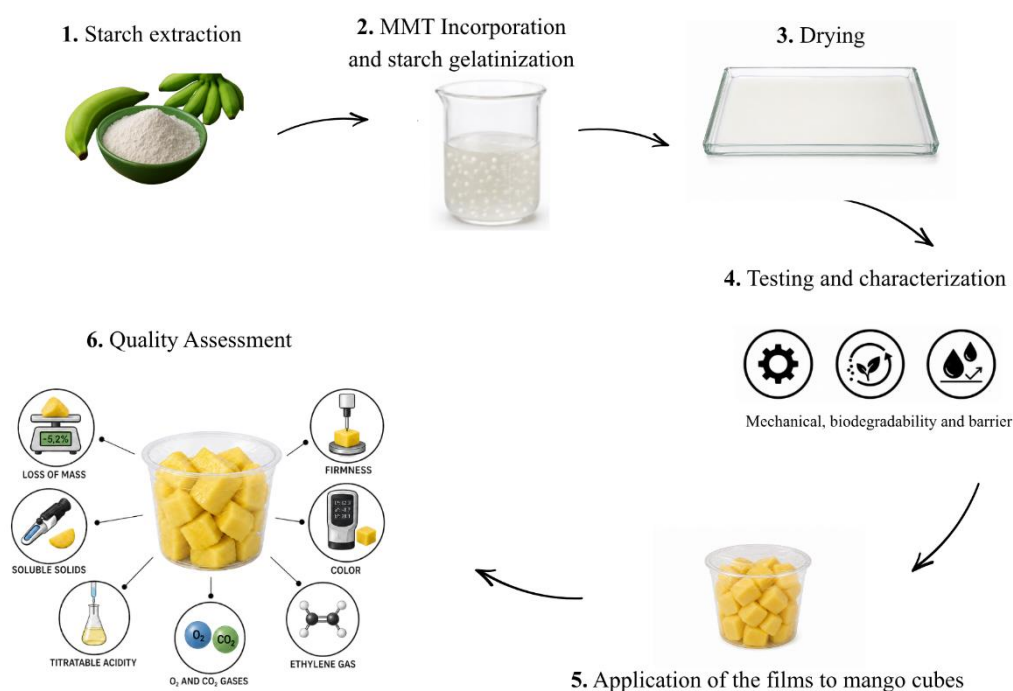


Figure 1. Schematic representation of the experimental workflow for the production and characterization of montmorillonite-reinforced banana starch films and their application as primary packaging for minimally processed mangoes.

2.1 Raw material

Green plantain starch was extracted according to the method of Moorthy (1991) and showed a moisture content of $13.62 \pm 0.01\%$, total starch of $91.93 \pm 1.15\%$, and apparent amylose of $44.57 \pm 0.71\%$. Montmorillonite (MMT) was supplied by Clariant S.A., with a beige/reddish color, powder form, and moisture content $\leq 15\%$, and glycerol (Êxodo Científica). ‘Palmer’ mangoes harvested at maturity stage 3. All reagents used were at least of analytical grade.

2.2. Film preparation and characterization

The aqueous film-forming solution for the control treatment (GPTS) was prepared using 3% (w/v) green plantain starch, 40% (w/w) glycerol, and distilled water. For the GPTS-MMT film, the same formulation was used with the additional incorporation of 4% (w/w) montmorillonite (MMT), based on the starch mass.

Initially, the components of the film-forming solution were homogenized in a magnetic stirrer (Novatecnica, NT137, Piracicaba, SP, Brazil) for 30 minutes to promote complete starch hydration. In the GPTS-MMT formulation, the MMT was previously dispersed together with the starch during this stage. Then, glycerol was added, and the mixture was heated to $80 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ under stirring at 3200 rpm for 20 minutes with a magnetic stirrer (Novatecnica, NT137, Piracicaba, SP, Brazil) to ensure complete starch hydration., until complete starch gelatinization.

Subsequently, the solutions were homogenized in a high-speed homogenizer (Turrax, IKA T25, Campinas, SP, Brazil) at 10,000 rpm for 30 minutes, without heating. The suspensions were then sonicated in an ultrasonic bath (40 kHz, 135 W, at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Unique, model USC 1600A, Indaiatuba, SP, Brazil) to remove air bubbles.

The film-forming solutions were cast onto glass plates and dried in a forced-air oven (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brazil) at $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ for approximately 40 hours to form the films by the casting method (Viana et al., 2025). After drying, the films were conditioned at $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $50 \pm 5\%$ relative humidity for 48 hours, according to method D618-00 (ASTM International, 2005), before analysis.

2.2.1. Water vapor permeability of the films (WVP)

Water vapor permeability was determined by the cup method, according to ASTM E96 (ASTM International, 2021), with modifications. The films were sealed onto cups containing silica gel and placed in a desiccator containing distilled water to simulate 100% relative humidity at $24 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mass gain was monitored every 24 hours. WVP was calculated according to Equation 1:

$$WVP = \frac{WVPR * e}{P_{sat} * (RH_1 - RH_2)} \quad (1)$$

where:

- WVTR is the water vapor permeability rate (slope coefficient of the fitted model generated from the data on water mass absorbed over time)
- e is the film thickness (mm);
- P_{sat} is the saturation vapor pressure of water at the test temperature (24 ± 2 °C), considered as 3169 Pa;
- RH_1 is the relative humidity in the desiccator (100%)
- RH_2 is the relative humidity inside the cup (0%).

2.2.2. Mechanical properties of the films

The mechanical properties were determined using a TA.XT2i texture analyzer (Stable Micro Systems, Surrey, UK) equipped with a 10 kg load cell, as described by Aurelio et al. (2023). Samples were cut into strips (10×2 cm), and thickness was measured at 10 random points. The tests were performed with an initial grip separation of 5 cm and a speed of 12.5 mm/min. Tensile strength (TS), elongation at break (E%), and Young's modulus (YM) was determined (ASTM International, 2010).

2.2.3. Biodegradability of the films

The biodegradability analysis of the produced films was conducted according to the methodology described by Martucci & Ruseckaite (2009), with adaptations. This method is based on the biodegradation of films when buried and exposed to the natural soil microbiota. The films were cut into $2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ rectangles and dried in an oven (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brazil) at 60 ± 2 °C until constant mass. Next, the films were buried in soil at a depth of approximately 4 cm from the surface of the container. Water was added to the soil every two days to maintain soil moisture at around $40 \pm 5\%$. The experiment was performed in triplicate, and the films were evaluated at 0, 2, 4, and 8 days.

At each time point, the films were unearthed and removed from contact with the soil using forceps. They were carefully washed with distilled water to remove soil residues and then dried at 60 ± 2 °C in an oven until constant mass. The degree of biodegradation of the films was determined as mass loss (WL %), by Eq. 2.

$$WL(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100 \quad (2)$$

In which: m_0 is the initial mass of the dry film sample and m_t is the remaining dry mass at time t .

2.3 Application of the films in a passive modified atmosphere system for minimally processed mangoes

2.3.1. Processing and packaging of minimally processed mangoes

‘Palmer’ mangoes were harvested from a commercial orchard located in the São Francisco Valley, Petrolina, PE, Brazil. The mangoes were harvested at commercial maturity, characterized by shoulder filling and the onset of change in the internal pulp color (National Mango Board, 2022). After harvesting, the fruits were sanitized in a solution containing 0.5 mL L^{-1} active chlorine (10%), peeled, and cut into cubes with an area of approximately $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$. The cubes were then gently homogenized for randomization and composition of the experimental samples.

After processing, mango samples containing five cubes were packed in food-grade polyethylene containers with a capacity of 250 mL and randomly distributed into four packaging conditions: (i) packaging without sealing film (control); (ii) packaging sealed with plantain starch film (GPTS); (iii) packaging sealed with plantain starch film and 4% MMT (GPTS-MMT); and (iv) packaging sealed with commercial polyvinyl chloride film (PVC). The samples were stored at 9°C and 90% RH and evaluated on the day of processing and after 10 and 20 days of storage with respect to atmospheric composition and physiological, colorimetric, and physicochemical parameters, as described below.

2.3.2. Atmospheric composition and physiological parameters of the fruits

The atmospheric composition (O_2 , CO_2 , and ethylene) inside the packages was determined directly using a portable gas analyzer model F-960 (Felix Instruments, Camas, WA, USA).

Mass loss was calculated by multiplying the difference between the initial and stored fruit mass by 100 and dividing by the initial mass. The results were expressed as a percentage.

Pulp firmness was determined using a texture analyzer model TA.XTplus (Stable Micro Systems, Godalming, UK), equipped with a 6 mm probe. The results were expressed as the force required to penetrate 10 mm into the mango cube, at a speed of 2 mm/s. Firmness was expressed in Newtons (N) (Vilvert et al., 2023).

2.3.3. Instrumental color parameters of the product

The color of the minimally processed mango was evaluated using a portable colorimeter model CR-400 (Konica Minolta, Tokyo, Japan), with values expressed in the

CIELCh color system, in which L* represents lightness (ranging from 0 = black to 100 = white), C* (chroma) indicates color saturation or intensity, and h° (hue angle) describes the perceived color, where 0° corresponds to red, 90° to yellow, 180° to green, and 270° to blue (Commission Internationale de l'Éclairage, 2004).

2.3.4. Physicochemical parameters of fresh-cut mango

Soluble solids (SS) content was quantified using a digital refractometer model PAL-1 (Atago, Tokyo, Japan), using 1 mL of juice, with the results expressed as a percentage, according to AOAC official method no. 932.12 (AOAC INTERNATIONAL, 2023a).

Titrateable acidity (TA) was evaluated using an automatic digital titrator model Titrino Plus 848 (Metrohm, Herisau, Switzerland). Titration was performed on 1 mL of juice diluted in 50 mL of distilled water, using 0.1 N NaOH solution, up to pH 8.1. The results were expressed as percentage of citric acid, according to AOAC official method no. 942.15 (AOAC INTERNATIONAL, 2023b).

The SS/TA ratio was calculated for each sample by dividing the SS value by the respective TA value.

2.4 Statistical analysis

For the films, the data were subjected to Student's t-test to compare the treatment means. Initially, the assumptions of data normality and homogeneity of variances were verified. Normality was assessed by Q-Q plots and homogeneity of variances by the Folded F test, both at the 5% significance level. The analyses were performed using SAS Studio software.

The experiment with minimally processed mangoes was conducted in a completely randomized design, with four replicates per treatment. Initially, the data were evaluated for the assumptions of analysis of variance, including normality of residuals verified by the Shapiro-Wilk test and homogeneity of variances verified by Levene's test, both at the 5% significance level.

The data related to physiological and physicochemical parameters were subjected to analysis of variance (ANOVA) ($p < 0.05$), and treatment means were compared by LSD test ($p < 0.05$).

The variables related to atmospheric composition (O_2 , CO_2 , and ethylene), which did not meet the homogeneity of variance assumption, were analyzed by bootstrap resampling with 5000 resamples, followed by comparison of treatment means using the

LSD test ($p < 0.05$). The analyses were performed in R software version 4.5.2 (R Core Team, Vienna, Austria), using the ExpDes.pt and agricolae packages.

Principal component analysis (PCA) was applied to synthesize the main results of the study in a two-dimensional graph, composed of two principal components obtained from the correlation matrix among the variables, which explained most of the total data variance. PCA was conducted using Minitab 22 software (Minitab, LLC., State College, PA, USA).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Starch film characteristics

The characteristics of the starch films are presented in Table 1. The incorporation of MMT promoted a 26% reduction in the water vapor permeability of the films. The GPTS and GPTS -MMT films showed water vapor permeability (WVP) values of 0.085 and 0.063 $\text{g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$, respectively. Although these values are higher than those reported by Chambi & Grosso (2011) for PVC films (0.02 $\text{g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$), which are widely used in food packaging due to their high barrier properties, the incorporation of MMT reduced film permeability, evidencing the potential of the clay to improve the barrier properties of the biopolymer.

Water vapor permeability is an important technological parameter in the evaluation of materials intended for food packaging, especially for perishable products, in which high barrier properties are desirable to minimize moisture exchange with the external environment (Long et al., 2023; Santhosh et al., 2024). Thus, low WVP values indicate greater efficiency of the material in protecting the food, favoring quality preservation and extending product shelf life (Niazmand et al., 2025; Poongavanam et al., 2023).

These results indicate that adding MMT improved the barrier properties of the films. Studies show that clay lamellae dispersed in the polymer matrix act as physical barriers to water vapor passage, preventing molecules from crossing the film by a direct route. Instead, they must bypass these particles successively, following a longer and more tortuous path (tortuosity effect), which hinders diffusion through the material (Ihalavithana et al., 2025; Singh et al., 2023). In addition to this physical barrier effect, hydrogen bonding between the hydroxyl groups of starch and the oxygens present in the MMT structure contributes to the formation of a more cohesive and compact matrix, reducing polymer chain mobility and, consequently, water vapor permeability (Ihalavithana et al., 2025; Muñoz-Gimena et al., 2023; Niazmand et al., 2025).

Montmorillonite (MMT) has been widely used in food packaging production due to its ability to improve the mechanical and barrier properties of polymer films. In addition, migration studies and regulatory assessments indicate that, when properly dispersed and incorporated into the polymer matrix, MMT has low migration potential into foods, being considered a promising material for food-contact applications (Perera et al., 2024; Punia Bangar et al., 2023).

Table 1: Results of the water vapor permeability (WVP) analysis and mechanical properties of films produced with green plantain starch (*Musa paradisiaca* L.) and MMT.

Treatment	WVP (g·mm/(m ² ·h·kPa))	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
GPTS	0.085±0.027 ^a	1.182±0.17 ^b	12.248±1.62 ^a	16.019±1.64 ^b
GPTS-MMT	0.063±0.020 ^b	1.989±0.13 ^a	12.123±1.23 ^a	22.885±2.02 ^a

*Different letters in the same column indicate a statistical difference ($p < 0.05$) according to the LSD test.

The tensile strength and Young's modulus of the GPTS -MMT films showed a significant increase ($p \leq 0.05$) compared with the GPTS films, with increments of 68% and 42,9%, respectively. This behavior is associated with the incorporation of MMT into the polymer matrix, favored by the small particle size and high specific surface area of the clay. The interaction between the hydroxyl groups of starch and MMT promotes the formation of hydrogen bonds, increasing intermolecular forces and providing better stress transfer and distribution throughout the film matrix (Singh et al., 2023; Zhang & Chen, 2023).

In addition, the presence of MMT reduces the mobility of the polymer chains, contributing to increased rigidity and mechanical strength of the composite films. However, elongation at break was not influenced by the addition of MMT ($p \geq 0.05$), indicating that the deformation capacity of the films was maintained. According to Frangopoulos et al. (2023) and Skowrońska & Wilpiszewska (2022), this result suggests a balance between the reinforcing effect promoted by the clay and the partial restriction of starch chain mobility, resulting in elongation values similar to those observed for the control film.

The increases observed in tensile strength and Young's modulus are relevant for packaging applications, since commercially used materials such as PVC are valued for their adequate mechanical strength. In addition, the maintenance of elongation at break indicates that the increase in mechanical resistance did not compromise the flexibility of

the films. Thus, the addition of MMT contributed to improving the mechanical performance of the material, expanding its potential for packaging applications.

3.2. Biodegradability of the films

The biodegradability analysis showed that, after four days of burial in soil, the GPTS and GPTS-MMT films exhibited mass losses of 60% and 50%, respectively. On the eighth day of evaluation, it was not possible to assess the samples due to the advanced degradation state of the materials. These results show that the films formulated with green plantain starch retained high biodegradation capacity, even after the incorporation of montmorillonite (MMT). The progressive mass loss observed throughout the experimental period indicates that the addition of clay did not compromise film degradability, reinforcing their potential as an environmentally safe alternative for biodegradable packaging applications.

The biodegradation rate of polymers is directly related to the physicochemical and microbiological characteristics of the soil, highlighting the importance of the degradation medium in the rate and extent of this process (Sander, 2019). In this study, a soil rich in humus and active organic matter were used, a condition that may have favored intense microbial activity and, consequently, contributed to the rapid degradation observed in the films.

In contrast to conventional materials such as PVC, which may remain in the environment for decades due to their low susceptibility to microbial action, the films developed in this study showed rapid degradation under soil conditions, demonstrating a significant environmental advantage and reinforcing their potential as sustainable substitutes for petrochemical polymers in modified atmosphere (MA) applications.

3.3. Atmospheric composition and physiological parameters of minimally processed mango

The gas composition inside the packages was significantly influenced by the use of sealing films ($p < 0.05$) (Figure 2A). It was observed that the packages sealed with GPTS, GPTS -MMT, and PVC films promoted changes in O_2 and CO_2 concentrations during storage, characterizing the formation of a passive modified atmosphere (MA).

The progressive reduction in O_2 concentration and the concomitant increase in CO_2 indicate the efficiency of the different packaging systems, composed of containers sealed with the films, in modulating gas exchange. These systems acted as semipermeable barriers, balancing the respiration of plant tissues with the diffusion rates of O_2 and CO_2 . At 20 days of storage, the system using PVC film promoted the greatest modification of the internal atmosphere ($p < 0.05$), reducing the O_2 concentration to 10.45% and

increasing CO₂ to 3.20%, indicating greater resistance to gas exchange. The systems containing biodegradable films showed intermediate behavior, with concentrations of 19.03% O₂ and 1.28% CO₂ for the system with GPTS film, and 18.45% O₂ and 2.25% CO₂ for the system with GPTS-MMT film (Figure 2A).

This change in the internal atmosphere is directly related to the selective permeability of the films and the respiratory intensity of the stored product. The reduction in O₂ concentration associated with the increase in CO₂ tends to slow down the respiratory metabolism of plant tissues, reducing the senescence rate and extending postharvest shelf life (Wei et al., 2021).

In this context, the system containing PVC film showed the greatest resistance to gas exchange, promoting an internal atmosphere with lower O₂ concentrations and greater CO₂ accumulation. This behavior suggests lower gas permeability, a characteristic often associated with conventional synthetic films (Wang et al., 2021).

On the other hand, the systems containing biodegradable GPTS and GPTS-MMT films promoted more moderate gas changes, indicating a better balance between the respiration of the processed pulp and gas diffusion through the package. The incorporation of MMT into the GPTS film resulted in greater CO₂ retention and lower O₂ concentration compared with pure GPTS. This behavior can be attributed to the same mechanism observed for water vapor permeability, in which MMT lamellae dispersed in the polymer matrix increase the tortuosity of the diffusion pathway. Thus, gas molecules travel longer and more sinuous paths to cross the film, partially reducing gas permeability and favoring the maintenance of the modified atmosphere inside the package (Xu et al., 2020). Similar results were reported by Giuggioli et al. (2017), who observed that the permeability of biodegradable films directly influenced the internal gas composition of packages and, consequently, the postharvest quality of fruits stored under modified atmosphere.

Although modified atmospheres are often associated with reduced ethylene biosynthesis, ethylene accumulation was observed in the packages over storage time (Figure 2B). This behavior may be related to the combined effect of synthesis by the tissues and the low permeability of the films to ethylene produced by the mangoes inside the packages. In addition, minimal processing triggers physiological responses to stress caused by peeling and cutting, accelerating tissue metabolism and favoring increased respiration and ethylene production in tropical fruits (Gonzalez-Aguilar et al., 2008). Since mango maintains its climacteric behavior even after processing, the continuous

production of this phytohormone, associated with limited diffusion to the external environment, may explain its accumulation inside the packages during storage Liu et al., 2022).

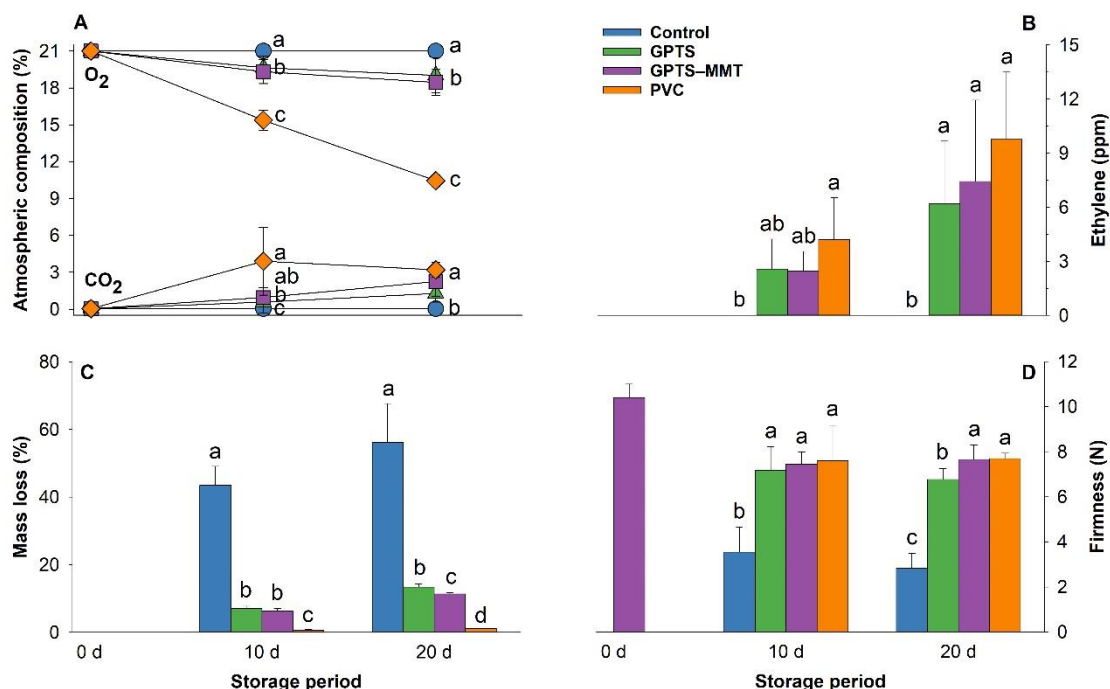


Figure 2. Atmospheric composition (A), ethylene concentration (B), mass loss (C), and firmness (D) of minimally processed ‘Palmer’ mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$).

The mass loss was significantly lower in mangoes packaged with films than in the control, at both storage times ($p < 0.05$) (Figure 2C). The control showed losses above 43% at 10 days and above 56% at 20 days, evidencing intense dehydration due to the absence of protection against water vapor transfer. In contrast, the packages with GPTS, GPTS-MMT, and PVC films markedly reduced mass loss ($p < 0.05$), with emphasis on PVC, which showed the lowest percentage of loss (1.1%), followed by GPTS-MMT (11.4%).

Mass loss is directly associated with transpiration and respiration of plant tissues, physiological processes responsible for water loss and consumption of respiratory substrates during ripening (Almeida et al., 2026). In this context, the systems containing films reduced moisture exchange between the product and the external environment,

favoring greater mass retention during storage and contributing to the maintenance of the quality of minimally processed mango (Montoya et al., 2018).

Firmness of the fresh-cut mango was significantly affected by the treatments throughout storage ($p < 0.05$) (Figure 2D). At 20 days, the control showed an approximately 63% reduction in firmness compared with samples packaged with PVC film (7.69 N) and GPTS-MMT (7.66 N), evidencing greater dehydration, cell wall degradation and impaired structural integrity of the tissues.

Loss of firmness is one of the main quality changes in minimally processed mangoes and is related both to ripening progression and to physiological responses induced by minimal processing. Peeling and cutting cause tissue damage, accelerating metabolic activity and favoring the action of enzymes responsible for the degradation of structural components of the cell wall, resulting in pulp softening (Gonzalez-Aguilar et al., 2008; Toivonen & Brummell, 2008). In addition, during ripening there is intense degradation of pectin and starch, accompanied by modifications in cellulose and hemicellulose, including depolymerization, de-esterification, and solubilization of cell wall polysaccharides, promoting tissue weakening (Liu et al., 2022).

In this context, the greater retention of firmness observed in samples packaged in PVC and GPTS-MMT film systems suggests that the modified atmosphere formed inside the packages reduced the respiratory rate and slowed the metabolic processes responsible for cell wall degradation, contributing to the preservation of the texture of minimally processed mangoes during storage.

3.2. Color and appearance of minimally processed mango

The color of the fresh-cut mango was significantly influenced by the MA conditions over storage time ($p < 0.05$), as evidenced by the colorimetric parameters L^* (lightness), C^* (chroma), and hue angle (Figure 3A–C).

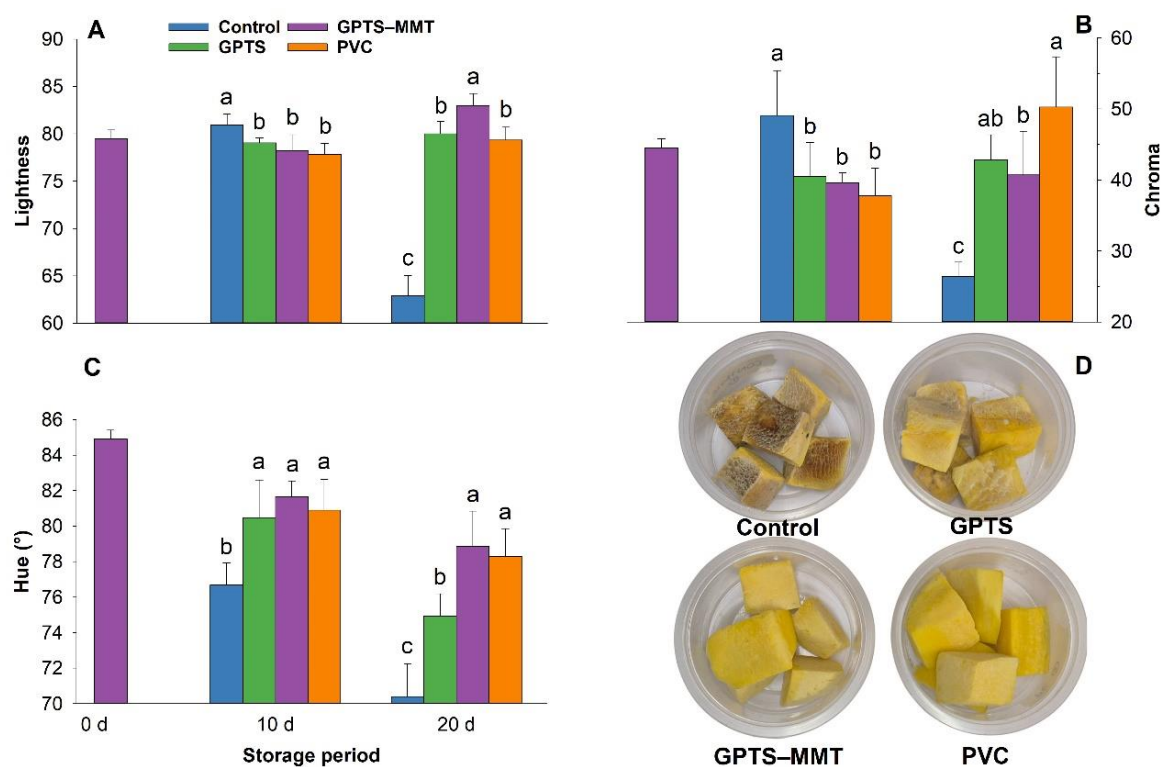


Figure 3. Lightness (A), chroma (B), hue angle (C), and visual evaluation (D) of minimally processed 'Palmer' mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$).

3.2. Color and appearance of minimally processed mango

Lightness (L^*) showed different behavior among treatments during storage (Figure 3A). At 20 days, the control showed a significant reduction in L^* (62.9), indicating tissue darkening, possibly associated with oxidation of phenolic compounds and surface dehydration. In contrast, the fresh-cut mango packaged with GPTS (80.0), GPTS-MMT (83.0), and PVC (79.4) maintained significantly higher L^* values ($p < 0.05$), evidencing better preservation of the clear and fresh appearance of the fruit tissue during storage. Among the treatments, the GPTS-MMT film stood out for presenting the highest L^* value. This preservative effect may be related to the synergistic action of the film in reducing respiratory rates and metabolic and enzymatic activity, delaying pigment degradation and tissue darkening during storage (Puebla-Duarte et al., 2026).

Chroma (C^*), which expresses color intensity, was significantly affected by the treatments ($p < 0.05$) (Figure 3B). At 20 days of storage, the control showed a mean value of 26.4, evidencing a marked reduction in color vividness and a less attractive visual appearance. In contrast, the fruits packaged with sealing films maintained significantly higher C^* values, with emphasis on PVC (50.3), followed by GPTS (42.8) and GPTS-

MMT (40.7), reflecting greater stability of carotenoids, the pigments responsible for the characteristic yellow color of mango. This behavior may be associated with the lower availability of O₂ inside the packages, which reduces oxidative pigment degradation and helps maintain the visual quality of the cubes during storage. According to Wei et al. (2021), modified atmospheres containing low O₂ and higher CO₂ reduced oxidative processes and contributed to the maintenance of visual quality and pigments in stored mangoes.

The hue angle, which defines color, was also significantly influenced by the treatments ($p < 0.05$) (Figure 3C). At 20 days, the control showed lower h° values (70.4°), indicating a color shift toward darker and brownish tones, characteristic of advanced tissue senescence. In contrast, the fruits packaged with GPTS-MMT (78.9°) and PVC (78.3°) maintained higher h° values, close to the yellow tone characteristic of ripe mango, suggesting greater color stability during storage. The GPTS treatment showed intermediate behavior (74.9°), with values higher than the control but lower than those observed for GPTS-MMT and PVC.

The reduction in hue angle observed during storage indicates ripening progression and tissue darkening, changes often associated with cell disruption caused by minimal processing, increased activity of enzymes related to browning, and modifications in pulp pigments. In fresh-cut fruits, pulp color is an important visual quality attribute and directly influences consumer acceptance (Santos et al., 2015).

In this context, the modified atmosphere promoted by the packaging systems may have contributed to reducing metabolic activity and oxidative processes, delaying visual changes associated with senescence. Thus, the use of the packaging systems proved effective in preserving the sensory and visual quality of mangoes during refrigerated storage.

The visual evaluation of the fruits (Figure 3D) corroborated the instrumental results. After 20 days of refrigerated storage, the fresh-cut mango in the control showed surface darkening, a dull appearance, and evident signs of dehydration, whereas the fruits packaged with GPTS, GPTS-MMT, and PVC maintained a more uniform color, surface shine, and a more attractive visual appearance. Among the treatments, GPTS-MMT stood out by presenting an appearance similar to that of PVC, with less darkening and greater color homogeneity, reinforcing the effectiveness of MMT incorporation in improving the functional properties of the biodegradable GPTS film.

3.3. Physicochemical parameters of minimally processed mango

Soluble solids (SS) content was significantly influenced by the treatments throughout storage ($p < 0.05$) (Figure 4A).

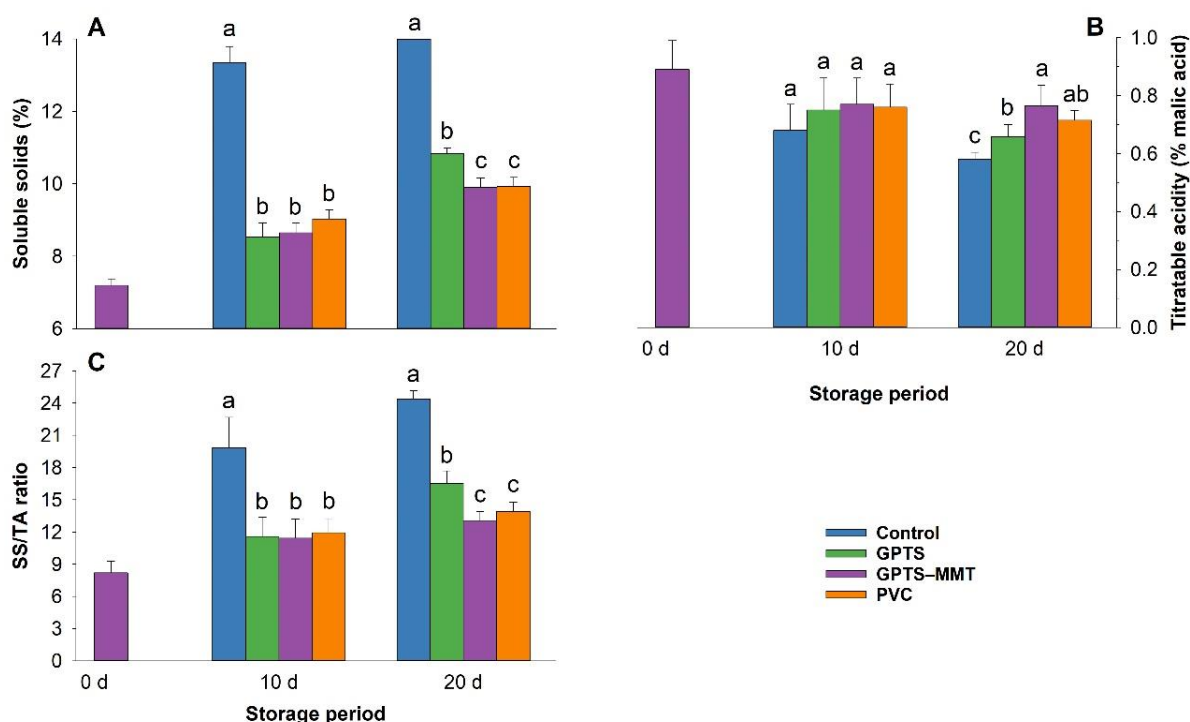


Figure 4. Soluble solids (SS) (A), titratable acidity (TA) (B), and SS/TA ratio (C) of minimally processed ‘Palmer’ mango packaged with different sealing films during refrigerated storage. Bars represent mean $\pm$ standard deviation. Means followed by the same letter do not differ according to the LSD test ($p < 0.05$).

A marked increase in SS values was observed in the control group, reaching 14.1% at 20 days, whereas the samples packaged with films maintained considerably lower contents, especially in the GPTS-MMT and PVC packaging systems, with a mean SS content of 9.9% in the same period. This behavior suggests that the passive modified atmosphere promoted by the packaging systems reduced respiratory intensity and slowed ripening metabolism, decreasing the conversion of starch into soluble sugars. In minimally processed fruits, peeling and cutting accelerate respiration and ethylene production, intensifying metabolic changes and reducing shelf life. In this context, edible films and coatings act as semipermeable barriers to gas diffusion, promoting a modified atmosphere around the product, which reduces the rate of physiological processes and preserves quality characteristics (Zdulski et al., 2024). Thus, the lower accumulation of

soluble solids observed in the samples packaged with GPTS-MMT and PVC indicates delayed ripening compared with the control. This behavior is consistent with the mango physiology described by Liu et al. (2022), who showed that atmospheres with lower O₂ concentration and higher CO₂ concentration reduce ethylene sensitivity, delaying the degradation of reserve carbohydrates and the formation of soluble sugars during ripening.

Regarding titratable acidity (TA), there was a general trend of reduction throughout the experimental period (Figure 4B). The most pronounced decrease was observed in the control treatment at 20 days (0.58% citric acid), indicating greater consumption of acidic compounds during respiratory metabolism. In contrast, the GPTS-MMT packaging system (0.76% citric acid) showed greater efficiency in maintaining acidity over the 20 days of storage. This behavior suggests lower degradation of organic acids, attributed to the reduced metabolic activity promoted by the passive modified atmosphere generated by the films. Similar results were observed by Dias et al. (2023), who reported a smaller reduction in titratable acidity in minimally processed fruits coated with edible films during refrigerated storage. According to the authors, the coatings acted as semipermeable barriers to gas diffusion, delaying the physiological changes associated with ripening and contributing to the preservation of fruit quality characteristics. Thus, the greater maintenance of TA observed in the samples packaged with GPTS-MMT indicates lower use of organic acids as respiratory substrates and, consequently, better preservation of the quality of minimally processed mango.

The SS/TA ratio, used as an important maturity and sensory quality index, reflected the balance between sugar accumulation and acid degradation (Figure 4C). Mango cubes without sealing film showed the highest SS/TA ratio at 20 days (24.4), evidencing a more advanced stage of ripening due to the absence of protection. In contrast, the packaging systems with films maintained significantly lower and more stable SS/TA values, especially the GPTS-MMT (13.0) and PVC (13.9) films. Mango ripening is characterized by an increase in soluble solids and a decrease in acidity, due to the conversion of starch into sugars and the consumption of organic acids during respiration (Vilvert et al., 2023). The delay in these changes in the fruits packaged with films suggests an effect of the modified atmosphere in reducing respiratory metabolism.

These results indicate that the modified atmosphere promoted by the films delayed the ripening of minimally processed mango. Although ethylene accumulated inside the packages during storage, the simultaneous increase in CO₂ concentration and reduction in O₂ availability likely attenuated ethylene action by interfering with its perception and

signaling, thereby reducing the activation of ripening-related enzymes and slowing the consumption of organic acids during respiration. Consequently, the fruits maintained higher titratable acidity and lower SS/TA values throughout storage, indicating better preservation of quality (Asrey et al., 2023; de Wild et al., 2005).

3.4. Principal component analysis (PCA)

Principal component analysis (PCA) was used as an exploratory tool to evaluate the relationships among the physiological, colorimetric, and physicochemical variables of minimally processed ‘Palmer’ mango. The analysis generated two principal components that together explained 82.7% of the total data variance, with 67.2% attributed to PC1 and 15.5% to PC2 (Figure 5). The PC1 was strongly and positively associated with mass loss and soluble solids (SS), while showing a negative association with firmness, hue angle, and TA. This axis can be interpreted as a quality preservation gradient, in which negative PC1 values indicate fruits with greater structural integrity and better maintenance of quality characteristics, whereas positive values reflect greater dehydration and metabolic changes associated with ripening and senescence.

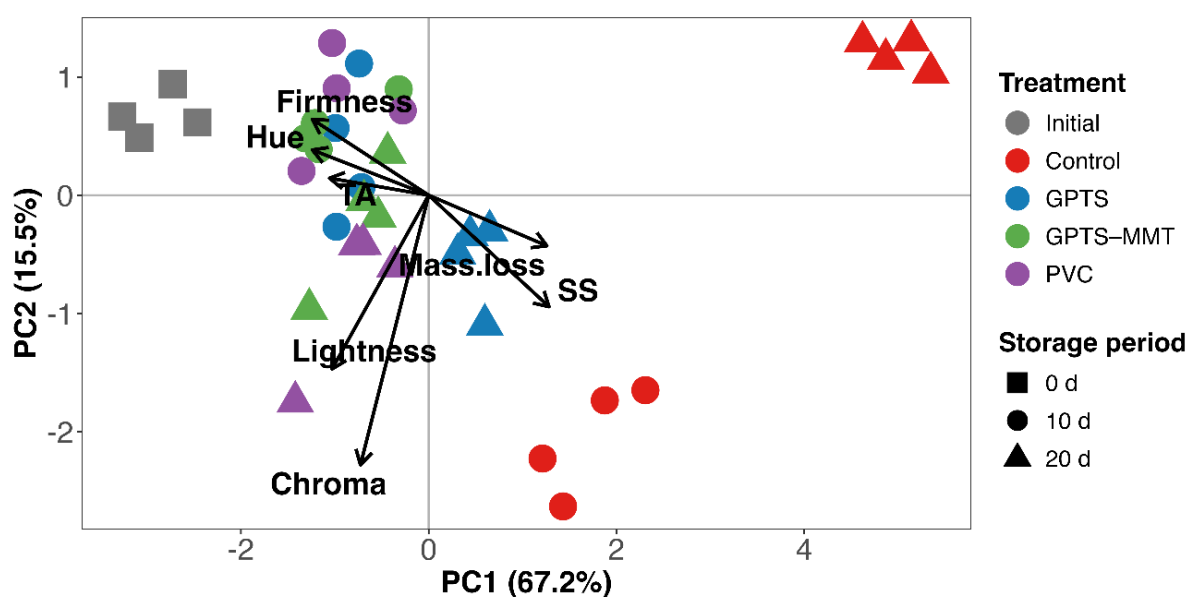


Figure 5. Principal component analysis (PCA) of the quality variables of minimally processed mango packaged with different sealing films during refrigerated storage.

PC2 was mainly related to the C* and L* parameters, indicating that this component predominantly describes changes in the color of minimally processed mango during storage.

The sample distribution shows a clear separation between treatments and storage periods. Control samples were concentrated at positive PC1 values, being associated with greater mass loss and higher SS values, indicating advanced ripening and lower quality preservation. In contrast, samples packaged with GPTS, GPTS-MMT, and PVC systems were predominantly positioned at negative or near-zero PC1 values, showing greater firmness retention and maintenance of chemical and color characteristics (Figure 5).

Among the packaging systems evaluated, the GPTS-MMT film showed behavior similar to PVC, with scores predominantly positioned at negative or near-zero PC1 values (Figure 5), suggesting comparable efficiency to the commercial film in preserving the quality of minimally processed mango. This result indicates that the incorporation of montmorillonite into the green plantain starch film contributed to improving the barrier properties of the packaging, reducing dehydration and slowing physiological and physicochemical changes during refrigerated storage.

Overall, the PCA corroborates the results obtained in the univariate analyses, reinforcing the evidence that biodegradable films based on green plantain starch, especially when incorporated with montmorillonite, were effective in maintaining quality and extending the shelf life of minimally processed mango during refrigerated storage.

4. CONCLUSION

The results confirm the hypothesis proposed in this study that the incorporation of MMT into biodegradable films based on green plantain starch improves their performance as a passive MAP system. The addition of MMT increased tensile strength and Young's modulus, reduced water vapor permeability, and maintained high film biodegradability, making the films more suitable for food packaging applications.

The packaging system using the GPTS-MMT film was effective in preserving quality of minimally processed mango (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) during 20 days of refrigerated storage, promoting a passive modified atmosphere capable of reducing the physiological, physicochemical, and visual changes associated with ripening. Compared with the control, the system provided lower mass loss, greater maintenance of firmness, color, and titratable acidity, as well as lower soluble solids/titratable acidity (SS/TA) ratio values, indicating better pulp quality preservation.

The performance of the GPTS-MMT film was similar to that of commercial PVC film, demonstrating its potential as a biodegradable, sustainable, and technically viable alternative for preserving minimally processed mango and replacing conventional plastic packaging.

CRedit authorship contribution statement

Sara Moreno Pereira Lacerda: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Writing – original draft, Funding acquisition.

João Cláudio Vilvert: Methodology, Formal analysis, Data curation.

Sérgio Tonetto de Freitas: Formal analysis, Data curation.

Cristiane Martins Veloso: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing.

Cristiane Patrícia de Oliveira: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing, Resources.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Finance Code 001.

The authors gratefully acknowledge Clariant S.A. (Brazil) for supplying the natural montmorillonite used in this research.

REFERENCES

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., & Sun, J. (2024). A critical review of microplastics in aquatic ecosystems: Degradation mechanisms and removing strategies. *Environmental Science and Ecotechnology*, 21, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2024.100427>
- Almeida, M. F., Rocha, J. A., do Bonfim, R. A. A., Brito, N. D., Gondim, G. D., Guimarães, A. S. S., Dias Santos, K. M., Santos, E. R., Santos, M. J. M. C., José, A. R. S., & Veloso, C. M. (2026). Sustainable postharvest approach using starch-based edible coatings to control anthracnose in ‘Palmer’ mangoes. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-026-04266-1>
- Almeida, M. F., Silva, G. L., Gondim, G. D., Alves, C. E. F., Silva, M. C., de Andrade Braga Mendes, B., dos Anjos, D. A., São José, A. R., & Veloso, C. M. (2024). Maintenance of postharvest quality of ‘Palmer’ mango coated with biodegradable coatings based on cassava starch and emulsion of lemongrass essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134323. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134323>

- AOAC INTERNATIONAL. (2023a). *Official Methods of Analysis* (22nd ed., 932.12 SS).
- AOAC INTERNATIONAL. (2023b). *Official Methods of Analysis*. In AOAC INTERNATIONAL (Ed.), *Official Methods of Analysis* (22nd ed., 942.15 AT).
- Asrey, R., Sharma, S., Barman, K., Prajapati, U., Negi, N., & Meena, N. K. (2023). Biological and postharvest interventions to manage the ethylene in fruit: a review. *Sustainable Food Technology*, 1(6), 803–826. <https://doi.org/10.1039/D3FB00037K>
- ASTM International. (2005). *Practice for Conditioning Plastics for Testing*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0618-05>
- ASTM International. (2010). *Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0882-10>
- ASTM International. (2021). *Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-21
- Aurelio, R.-H., Mexlislol, C.-V. S., Páramo-Calderón, D. E., Acevedo-Gómez, R., Gerardo, G.-G., Nolasco-Hipolito, C., Eduardo, B.-G. J., Carlos, C.-A. J., & Alejandro, A.-S. (2023). Functionality and characterization of modified starch films with pineapple leaf fibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125611. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125611>
- Balanon, D. A. G., Sane, A., Jariyasakoolroj, P., & Leelaphiwat, P. (2023). Application of biodegradable film as modified atmosphere packaging for red chili (*Capsicum annuum* cv. Jinda). *Packaging Technology and Science*, 36(5), 379–388. <https://doi.org/10.1002/pts.2714>
- Botondi, R., Barone, M., & Grasso, C. (2021). A Review into the Effectiveness of Ozone Technology for Improving the Safety and Preserving the Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables. *Foods*, 10(4), 748. <https://doi.org/10.3390/foods10040748>
- Braga, L. R., Rangel, E. T., Suarez, P. A. Z., & Machado, F. (2018). Simple synthesis of active films based on PVC incorporated with silver nanoparticles: Evaluation of the thermal, structural and antimicrobial properties. *Food Packaging and Shelf Life*, 15, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.12.005>
- Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Al-Said, F. A.-J., & Opara, U. L. (2013). Modified Atmosphere Packaging Technology of Fresh and Fresh-cut Produce and the Microbial Consequences—A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 303–329. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0932-4>
- Campisi, L., La Motta, C., & Napierska, D. (2025). Polyvinyl chloride (PVC), its additives, microplastic and human health: Unresolved and emerging issues. *Science of The Total Environment*, 960, 178276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178276>
- Chambi, H. N. M., & Grosso, C. R. F. (2011). Mechanical and water vapor permeability properties of biodegradable films based on methylcellulose, glucomannan, pectin and gelatin. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 31(3), 739–746. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000300029>
- Commission Internationale de l'Éclairage. (2004). *Colorimetry* (3rd ed.). CIE - Commission Internationale de l'Éclairage.
- de Sousa, A. S. B., da Silva, M. C. A., Lima, R. P., Meireles, B. R. L. de A., Cordeiro, A. T. M., Santos, E. F. da S., Amaro, A. L., Pintado, M. M. E., & Silva, S. de M. (2021). Phenolic compounds and antioxidant activity as discriminating markers and adding value of mango varieties. *Scientia Horticulturae*, 287, 110259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110259>
- de Wild, H. P. J., Balk, P. A., Fernandes, E. C. A., & Peppelenbos, H. W. (2005). The action site of carbon dioxide in relation to inhibition of ethylene production in tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 36(3), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.02.004>

- Dias, J. V. B., Costa, W. K. A., Melo, D. de S., Oliveira, K. Á. R. de, Batista, A. U. D., de Souza, E. L., Schwan, R. F., Pimentel, T. C., & Magnani, M. (2023). Probiotic and synbiotic edible coatings: Effects on *Lactobacillus casei* viability and general quality of minimally processed fruit during storage. *Food Bioscience*, 56, 103144. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103144>
- Ding, J., Hao, Y., Liu, B., Chen, Y., & Li, L. (2023). Development and Application of Poly (Lactic Acid)/Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate)/Thermoplastic Starch Film Containing Salicylic Acid for Banana Preservation. *Foods*, 12(18), 3397. <https://doi.org/10.3390/foods12183397>
- Dos Santos Moreira, D., Nicolosi, A., Laganà, V. R., Di Gregorio, D., & Agosteo, G. E. (2024). Factors Driving Consumption Preferences for Fresh Mango and Mango-Based Products in Italy and Brazil. *Sustainability*, 16(21), 9401. <https://doi.org/10.3390/su16219401>
- Falua, K. J., Pokharel, A., Babaei-Ghazvini, A., Ai, Y., & Acharya, B. (2022). Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers*, 14(11), 2215. <https://doi.org/10.3390/polym14112215>
- Frangopoulos, T., Marinopoulou, A., Goulas, A., Likotrafiti, E., Rhoades, J., Petridis, D., Kannidou, E., Stamelos, A., Theodoridou, M., Arampatzidou, A., Tosounidou, A., Tsekmes, L., Tsihlakis, K., Gkikas, G., Tourasanidis, E., & Karageorgiou, V. (2023). Optimizing the Functional Properties of Starch-Based Biodegradable Films. *Foods*, 12(14), 2812. <https://doi.org/10.3390/foods12142812>
- García-Ramón, J. A., Carmona-García, R., Valera-Zaragoza, M., Aparicio-Saguilán, A., Bello-Pérez, L. A., Aguirre-Cruz, A., & Alvarez-Ramirez, J. (2021). Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles from plantain rachis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>
- Giuggioli, N., Girgenti, V., & Peano, C. (2017). Qualitative Performance and Consumer Acceptability of Starch Films for the Blueberry Modified Atmosphere Packaging Storage. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 67(2), 129–136. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2016-0023>
- Gonzalez-Aguilar, G. A., Celis, J., Sotelo-Mundo, R. R., De La Rosa, L. A., Rodrigo-Garcia, J., & Alvarez-Parrilla, E. (2008). Physiological and biochemical changes of different fresh-cut mango cultivars stored at 5 °C. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(1), 91–101. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01394.x>
- Guo, L., & Li, C. (2025). Preparation of organically modified montmorillonite reinforced gelatin/cassava starch film and its application in broccoli florets preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 52, 101604. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101604>
- Hatwar, N., & Qureshi, A. (2025). Comprehensive Review on Bio-Based Treatments for Polyvinyl Chloride Plastic. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 197(5), 2769–2798. <https://doi.org/10.1007/s12010-024-05174-0>
- Ihalavithana, C. V., Madanayake, N. H., & Adassooriya, N. M. (2025). Montmorillonite nanoclay reinforced carboxymethyl cellulose/stearic acid modified TiO₂ nanocomposites for food packaging applications. *Journal of Food Science and Technology*, 62(12), 2303–2311. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06169-9>
- Kan, W., Nie, Y., Duan, Q., Zhang, L., Xu, Y., Yu, L., Meng, L., & Chen, Y. (2025). The effect of magnetic field-induced orientation of fillers on the performance of starch composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141391. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141391>
- Li, R., Yang, T., Ding, M., Yu, H., Yang, S., Pan, X., Zhang, L., & Xie, H. (2026). Multifunctional nanocomposite packaging films enabled by tannic acid-modified chitin

- nanocrystals for fruit preservation. *Food Hydrocolloids*, 171, 111863. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111863>
- Liu, B., Xin, Q., Zhang, M., Chen, J., Lu, Q., Zhou, X., Li, X., Zhang, W., Feng, W., Pei, H., & Sun, J. (2022). Research Progress on Mango Post-Harvest Ripening Physiology and the Regulatory Technologies. *Foods*, 12(1), 173. <https://doi.org/10.3390/foods12010173>
- Long, J., Zhang, W., Zhao, M., & Ruan, C.-Q. (2023). The reduce of water vapor permeability of polysaccharide-based films in food packaging: A comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121267>
- Lopez-Aguilar, J. F., Seigné-Itoiz, E., Maspoch, M. L., & Peña, J. (2022). A realistic material flow analysis for end-of-life plastic packaging management in Spain: Data gaps and suggestions for improvements towards effective recyclability. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.011>
- Ma, S., He, J., Chen, Q., Zhou, J., Xie, F., & Cai, J. (2025). Advancements in starch-based nanomaterials for functional delivery and food packaging: a comprehensive review and future directions. *Journal of Future Foods*, 5(5), 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.08.002>
- Martucci, J. F., & Ruseckaite, R. A. (2009). Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 94(8), 1307–1313. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.018>
- Montoya, Ú., Zuluaga, R., Castro, C., Vélez, L., & Gañán, P. (2018). Starch and Starch/Bacterial Nanocellulose Films as Alternatives for the Management of Minimally Processed Mangoes. *Starch - Stärke*, 1800120. <https://doi.org/10.1002/star.201800120>
- Moorthy, S. N. (1991). Extraction of starches from tuber crops using ammonia. *Carbohydrate Polymers*, 16(4), 391–398. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(91\)90057-J](https://doi.org/10.1016/0144-8617(91)90057-J)
- Morales-de la Peña, M., Lopez-Raesfeld, P., Vega-Iturbe, M., Tejada-Ortigoza, V., Morales Sanchez, E., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. (2026). Preservation of fresh-cut mango cubes: a comparative study using ohmic heating, pulsed light, and traditional thermal processes. *CyTA - Journal of Food*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2606479>
- Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. *Polymers*, 15(13), 2972. <https://doi.org/10.3390/polym15132972>
- National Mango Board. (2022). *National Mango Board*. National Mango Board. <https://www.mango.org/>
- Niazmand, R., Sharayei, P., Heydari-Majd, M., & Sayahi, M. (2025). Optimization of a novel antimicrobial nanocomposite films based on starch saffron corm incorporating nanoclay/lignin/extract using response surface methodology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 307, 141733. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141733>
- Orsuwan, A., & Sothornvit, R. (2018). Effect of banana and plasticizer types on mechanical, water barrier, and heat sealability of plasticized banana-based films. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13380. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13380>
- Patel, M., Islam, S., Kallem, P., Patel, R., Banat, F., & Patel, A. (2023). Potato starch-based bioplastics synthesized using glycerol–sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(7), 7843–7860. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04492-2>
- Perera, K. Y., Hopkins, M., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). Nanoclays-containing bio-based packaging materials: properties, applications, safety, and regulatory issues.

- Journal of Nanostructure in Chemistry*, 14(1), 71–93. <https://doi.org/10.1007/s40097-023-00525-5>
- Poongavanam, S. S., Subramaniyan, V., Sellamuthu, P. S., Jarugala, J., & Sadiku, E. R. (2023). Fabrication of Bio-Nanocomposite Packaging Films with PVA, MMT Clay Nanoparticles, CNCs, and Essential Oils for the Postharvest Preservation of Sapota Fruits. *Polymers*, 15(17), 3589. <https://doi.org/10.3390/polym15173589>
- Puebla-Duarte, A. L., Fernández-Quiroz, D., Bernal-Mercado, A. T., Rodríguez-Félix, F., Iturralde-García, R. D., Robles-García, M. Á., Ruiz-Cruz, S., Ornelas-Paz, J. de J., González-Vega, R. I., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2026). Effect of Water Vapor Generated by Fresh-Cut Mango (*Mangifera indica*) on the Release of β -Carotene from β -Cyclodextrin Inclusion Complexes Under Modified-Atmosphere Packaging. *Molecules*, 31(6), 976. <https://doi.org/10.3390/molecules31060976>
- Punia Bangar, S., Whiteside, W. S., Chaudhary, V., Parambil Akhila, P., & Sunooj, K. V. (2023). Recent functionality developments in Montmorillonite as a nanofiller in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 140, 104148. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.104148>
- Riyajan, S.-A., & Poolyarat, N. (2023). Cassava starch with ozone amendment and its blend: Fabrication and properties for fruit packaging application. *Industrial Crops and Products*, 201, 116886. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116886>
- Sánchez Aldana, D., Aguilar, C. N., Contreras-Esquivel, J. C., Souza, M. P., Carneiro-da-Cunha, M. das G., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2021). Use of a Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle) edible coating to preserve minimally processed mango (*Mangifera indica* L.). *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 62(5), 765–775. <https://doi.org/10.1007/s13580-021-00347-w>
- Sander, M. (2019). Biodegradation of Polymeric Mulch Films in Agricultural Soils: Concepts, Knowledge Gaps, and Future Research Directions. *Environmental Science & Technology*, 53(5), 2304–2315. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05208>
- Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., & Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties – a review. *Sustainable Food Technology*, 2(2), 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
- Santos, J. G., Fernandes, F. A. N., de Siqueira Oliveira, L., & de Miranda, M. R. A. (2015). Influence of Ultrasound on Fresh-Cut Mango Quality Through Evaluation of Enzymatic and Oxidative Metabolism. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1532–1542. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1518-8>
- Senathirajah, K., Kemp, A., Saaristo, M., Ishizuka, S., & Palanisami, T. (2022). Polymer prioritization framework: A novel multi-criteria framework for source mapping and characterizing the environmental risk of plastic polymers. *Journal of Hazardous Materials*, 429, 128330. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128330>
- Shuprajhaa, T., Paramasivam, S. K., Pushpavalli, S., Anandakumar, Su., & Naik, R. (2025). Influence of additives on the development, mechanical, functional characteristics and biodegradability of banana starch-based bio plastic films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139544. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139544>
- Singh, P., Kaur, G., Singh, A., & Kaur, P. (2023). Starch based bio-nanocomposite films reinforced with montmorillonite and lemongrass oil nanoemulsion: development, characterization and biodegradability. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 527–545. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01635-4>
- Skowrońska, D., & Wilpiszewska, K. (2022). The Effect of Montmorillonites on the Physicochemical Properties of Potato Starch Films Plasticized with Deep Eutectic

- Solvent. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16008.
<https://doi.org/10.3390/ijms232416008>
- Thakur, R. R., Mangaraj, S., Tripathi, M. K., Singh, K. P., & Jadhav, M. L. (2022). Design of a modified atmosphere storage system for shelf life enhancement of mango (*Mangifera indica* , cv. *Amrapali*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(9).
<https://doi.org/10.1111/jfpp.16600>
- Thomas, A. P., Kasa, V. P., Dubey, B. K., Sen, R., & Sarmah, A. K. (2023). Synthesis and commercialization of bioplastics: Organic waste as a sustainable feedstock. *Science of The Total Environment*, 904, 167243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167243>
- Toivonen, P. M. A., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.004>
- Viana, E. B. M., Almeida, M. F., Cordeiro, M. J. M., Lacerda, S. M. P., José, A. R. S., Bonomo, R. C. F., de Souza, C. C. E., Santos, M. P. F., & Veloso, C. M. (2025). Eco-Friendly Bioplastic Film Produced With Green Plantain Starch (*Musa paradisiaca* L.): Effect of Activated Carbon Addition and Hydrothermal Modification. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.70669>
- Viana, E. B. M., Oliveira, N. L., Ribeiro, J. S., Almeida, M. F., Souza, C. C. E., Resende, J. V., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2022). Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100776.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>
- Vilvert, J. C., de Freitas, S. T., Ferreira, M. A. R., Costa, C. dos S. R., Leite, R. H. de L., dos Santos, F. K. G., & Aroucha, E. M. M. (2023). Preservation of Quality and Bioactive Compounds in Mangoes Using Chitosan-Graphene-Oxide-Based Biodegradable Packaging. *Horticulturae*, 9(10), 1145. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101145>
- Wang, L., Hong, K., Xu, R., Zhao, Z., & Cao, J. (2021). The alleviation of cold-stimulated flesh reddening in ‘Friar’ plum fruit by the elevated CO₂ with polyvinyl chloride (PVC) packaging. *Scientia Horticulturae*, 281, 109997.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109997>
- Wei, S., Mei, J., & Xie, J. (2021). Effects of Different Carbon Dioxide-Modified Atmosphere Packaging and Low-Temperature Storage at 13 °C on the Quality and Metabolism in Mango (*Mangifera indica* L.). *Agriculture*, 11(7), 636.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11070636>
- Win, S. T., & Setha, S. (2022). Enhancement of Anti-Inflammatory and Antioxidant Activities of Mango Fruit by Pre- and Postharvest Application of Salicylic Acid. *Horticulturae*, 8(6), 555. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060555>
- Xie, D., Huang, G., Yang, M., Yi, S., Zheng, X., Zhu, M., & Zhai, H. (2024). Bionic modified atmosphere film Inspired by plant stomata with curcumin as controllable gas “Switches” for fruit preservation. *Chemical Engineering Journal*, 500, 156741.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156741>
- Xu, X., Li, Y., Ma, X., & Li, J. (2020). Synergistic reinforcing effect of nano-montmorillonite and cellulose nanocrystals on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate). *Cellulose*, 27(11), 6249–6261. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03252-0>
- Yang, J., Duan, A., Li, Z., Chen, Z., Xu, Q., Huang, T., Liu, W., & Wang, A. (2024). Critical advances and assessment on chemo-biological conversions of waste polyvinyl chloride. *Science of The Total Environment*, 956, 177170.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177170>

- Zdulski, J. A., Rutkowski, K. P., & Konopacka, D. (2024). Strategies to Extend the Shelf Life of Fresh and Minimally Processed Fruit and Vegetables with Edible Coatings and Modified Atmosphere Packaging. *Applied Sciences*, 14(23), 11074. <https://doi.org/10.3390/app142311074>
- Zhang, M., & Chen, H. (2023). Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123462>
- Zhao, M., Zhang, Z., Cai, H., Wang, L., Hu, C., Li, D., Chen, Y., Kang, Y., & Li, L. (2022). Controlled moisture permeability of thermoplastic starch/polylactic acid/poly butylene adipate-co-terephthalate film for the autolysis of straw mushroom *Volvariella volvacea*. *Food Chemistry*, 373, 131409. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131409>

ARTIGO 3

Embalagem inteligente à base de filmes biodegradáveis de amido de banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca* L.) funcionalizados com nanoemulsão de curcumina

Embalagem inteligente à base de filmes biodegradáveis de amido de banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca* L.) funcionalizados com nanoemulsão de curcumina

Autores

Sara Moreno Pereira Lacerda^{a*}, Esaul Lucas Oliveira^a, Alcebíades Rebouças São José^b, Cristiane Martins Veloso^a, Cristiane Patrícia de Oliveira^a

Afiliação

^a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Itapetinga Campus, Itapetinga, Bahia 45700-000, Brazil

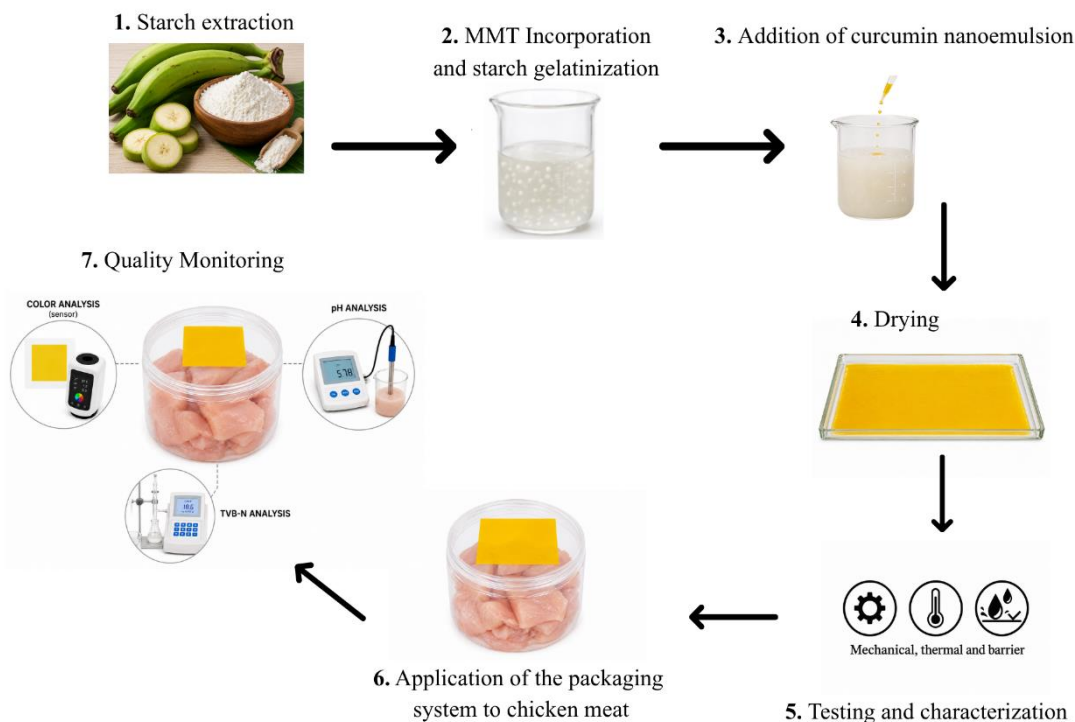
^b Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Vitória da Conquista Campus, Vitória da Conquista, Bahia 45083-900, Brazil

RESUMO

Materiais poliméricos obtidos a partir de fontes renováveis têm despertado crescente interesse como alternativa sustentável aos plásticos convencionais, especialmente para o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes. Neste estudo, objetivou-se desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca* L.) reforçados com 4% de montmorilonita (MMT) e incorporados com diferentes concentrações de nanoemulsão de curcumina (0; 0,02; 0,03 e 0,04%, m/m), visando sua aplicação como sensores colorimétricos para o monitoramento do frescor de carne de frango. Os filmes foram avaliados quanto às propriedades estruturais, morfológicas, térmicas, mecânicas, de barreira, ópticas, biodegradabilidade, sensibilidade ao pH e monitoramento da deterioração da carne de frango. A incorporação da montmorilonita e da nanoemulsão de curcumina melhorou significativamente o desempenho dos filmes, no filme CUR0,03 houve uma redução da permeabilidade ao vapor de água e a solubilidade em até 36,09% e 71,83%, respectivamente em relação ao tratamento controle (CS). A formulação contendo 0,04% de nanoemulsão de curcumina apresentou a maior resistência à tração ($3,38 \pm 0,16$ MPa), enquanto a formulação com 0,03% apresentou o melhor desempenho global, conciliando propriedades físico-mecânicas adequadas e elevada sensibilidade colorimétrica. Os filmes apresentaram mudança de coloração de amarelo, em meio ácido, para tons alaranjados, em meio alcalino, além de biodegradação praticamente completa em aproximadamente oito dias. Na aplicação como embalagem inteligente, os filmes responderam às alterações decorrentes da deterioração da carne por meio de mudanças significativas nos parâmetros colorimétricos, especialmente ΔE e Hue, os quais apresentaram forte correlação com os indicadores de deterioração pH e nitrogênio básico volátil total (TVB-N). A formulação contendo 0,03% de nanoemulsão de curcumina apresentou a maior capacidade preditiva para o monitoramento do frescor da carne ($R^2 = 0,9620$), evidenciando elevada sensibilidade às alterações químicas associadas ao processo de deterioração. Os resultados demonstram que a combinação de amido de banana-da-terra verde, montmorilonita e nanoemulsão de curcumina constitui uma estratégia promissora para o desenvolvimento de embalagens inteligentes, biodegradáveis e de baixo custo, capazes de monitorar, de forma simples, visual, não destrutiva e em tempo real, a qualidade e o frescor de alimentos perecíveis.

Palavras-chave: aproveitamento de resíduos; polímero sustentável; embalagem inteligente; sensor colorimétrico.

RESUMO GRÁFICO



1. INTRODUÇÃO

Os filmes biopoliméricos produzidos a partir de biomoléculas, como proteínas, polissacarídeos, lipídios ou suas combinações, têm se destacado como alternativas promissoras às embalagens plásticas convencionais (Li et al., 2024). Esse interesse deve-se ao fato de essas biomoléculas serem, em geral, obtidas de matérias-primas provenientes de recursos renováveis e apresentarem potencial biodegradável (Amin et al., 2021). Essas características conferem aos filmes biopoliméricos vantagens ambientais em relação aos polímeros de origem fóssil, contribuindo para a redução da persistência de resíduos plásticos no ambiente e para a mitigação da poluição ambiental (Wang et al., 2024).

Entre os diferentes biopolímeros de origem renovável, o amido tem despertado grande interesse para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, biodegradabilidade e capacidade de formar filmes (Jiang et al., 2020). Estudos recentes demonstram a viabilidade da utilização de amidos provenientes de milho (Liu et al., 2023), mandioca (Noorian et al., 2022), batata (Skowrońska; Wilpiszewska, 2022) e arroz (De Oliveira et al., 2025) na produção de embalagens biodegradáveis para alimentos. Além do crescente interesse científico, materiais à base de amido já são empregados comercialmente, como aqueles produzidos

com a tecnologia Mater-Bi® (Bastioli, 1998). Nesse contexto, o amido de banana verde destaca-se como uma fonte alternativa promissora, podendo também ser obtido a partir do aproveitamento de frutos fora do padrão comercial, devido a defeitos na casca, tamanho inadequado ou danos mecânicos, e por apresentar elevado teor de amilose, característica que favorece a formação de filmes coesos (Shuprajhaa et al., 2025; Viana et al., 2022).

Apesar de seu potencial, os filmes à base de amido apresentam limitações relacionadas à elevada permeabilidade ao vapor de água, à sensibilidade à umidade e às propriedades mecânicas e de barreira ainda restritas (Vieira et al., 2026). A incorporação de agentes de reforço, como a montmorilonita (MMT), constitui uma estratégia eficiente para minimizar essas limitações (Nath et al., 2022). A MMT é um argilomineral lamelar que, quando adequadamente disperso na matriz polimérica, promove maior coesão estrutural e aumenta a tortuosidade do caminho de difusão de moléculas de água e gases, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira dos filmes (Singh et al., 2023; Yadav; Purwar; Bose, 2021). Além disso, sua elevada área superficial e estrutura interlamelar permitem a adsorção e o transporte de compostos bioativos, favorecendo o desenvolvimento de embalagens funcionais (Zhang; Chen, 2023).

Entre os compostos bioativos empregados em embalagens ativas e inteligentes, a curcumina destaca-se por sua elevada atividade antioxidante e por apresentar alterações visíveis de coloração em resposta às variações de pH, permitindo sua utilização como indicador colorimétrico da qualidade de alimentos (Duan et al., 2023; Mondal et al., 2024). Entretanto, sua aplicação direta em matrizes poliméricas é limitada por sua natureza hidrofóbica e pela baixa estabilidade frente à luz, ao calor e ao oxigênio (Li et al., 2024). Nesse contexto, diferentes estratégias de nanoencapsulação têm sido propostas para aumentar sua estabilidade e favorecer sua incorporação em filmes biodegradáveis. D. Liu et al. (2021) demonstraram que emulsões de Pickering reduziram a degradação da curcumina e melhoraram a resposta colorimétrica de filmes de amido. Sanchez et al. (2022) verificaram que a incorporação de nanoemulsão de curcumina em filmes de amido de banana reduziu a permeabilidade ao vapor de água e promoveu a liberação controlada do composto. Yang et al. (2024) relataram que emulsões de Pickering contendo curcumina aumentaram as propriedades mecânicas, antioxidantes e a eficiência de filmes inteligentes no monitoramento da deterioração de carne suína. Esses resultados demonstram que a nanoemulsão constitui uma estratégia promissora para aumentar a

estabilidade da curcumina e potencializar seu desempenho em embalagens biodegradáveis.

Apesar dos avanços obtidos com o uso de amido de banana, montmorilonita e curcumina em estudos independentes, ainda são escassos os trabalhos que investigam a combinação desses componentes em um único sistema, especialmente utilizando nanoemulsão de curcumina incorporada a filmes de amido de banana-da-terra verde. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar filmes biodegradáveis à base de amido de banana-da-terra verde reforçados com montmorilonita e funcionalizados com nanoemulsão de curcumina em diferentes concentrações, visando à obtenção de embalagens inteligentes com potencial aplicação no monitoramento da qualidade da carne de frango.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

A Banana-da-terra (*Musa paradisiaca* L.) verde foi obtida em feiras livres de Vitória da Conquista - BA, no estágio de maturação 1, ou seja, com maturidade fisiológica e 100% da casca verde (Viana et al., 2025). Amido foi extraído conforme o método descrito por Moorthy (1991). A montmorilonita (MMT) foi fornecida pela empresa Clariant S.A., de coloração bege/avermelhada, aspecto em pó e umidade $\leq 15\%$, o glicerol obtido da Exôdo® (Brasil), curcumina com concentração de 95% (Exôdo®, Brasil), óleo de canola (*Brassica napus* L.) com densidade de 840 kg.m^{-3} , Tween 80 PA com densidade de 1060 kg.m^{-3} , foram utilizados na preparação dos filmes e das emulsões. O frango fresco foi adquirido no comércio local, proveniente de aves abatidas no mesmo dia da realização dos experimentos.

2.2 Preparação de emulsão de curcumina

A emulsão óleo em água (OA) foi preparada utilizando curcumina, óleo comercial de canola e Tween 80 como agente anfifílico na proporção de 1:5:6 (v/v/v), respectivamente, de acordo com a metodologia proposta por Prakash et al. (2020), com modificações.

Os volumes dos componentes foram transferidos para um béquer e adicionados água destilada até atingir um volume de 100 mL. A emulsão foi agitada a 15000 rpm em um agitador Turrax (Modelo: T 25 D S 32, Germany), por 15 min, para homogeneizar todos os constituintes. Posteriormente, a nanoemulsão foi colocada em um banho

ultrassônico (SolidSteel, SSBu, Piracicaba, Brasil) na frequência de 40 kHz, e temperatura de 40 ± 2 °C, por 30 min.

2.3 Determinação do tamanho médio das gotículas e da distribuição de tamanho das nanoemulsões

O tamanho médio das gotículas, a distribuição de tamanho e os índices de polidispersão (PDI) das nanoemulsões foram determinados utilizando um Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, Reino Unido), em um comprimento de onda de 633 nm e ângulo de espalhamento de 173° , com faixa de tamanho de 3,8 nm a $100\ \mu\text{m}$ e faixa de potencial zeta de -200 a $+200$ mV. As nanoemulsões foram analisadas por leitura direta, sem diluição prévia da amostra.

2.4 Preparação do filme

Os filmes foram produzidos pela técnica de *casting*, conforme metodologia descrita por Aurelio et al. (2023). A solução filmogênica foi preparada utilizando 3,0 g de amido de banana-da-terra verde, 1,2 g de glicerol e água deionizada até completar o volume final de 100 mL. Para os tratamentos contendo agente de reforço, foi incorporada montmorilonita (MMT) na concentração de 4% (m/m, em relação à massa de amido). Essas concentrações foram definidas com base em resultados preliminares, que indicaram desempenho superior em termos de propriedades mecânicas e de barreira em comparação às demais formulações avaliadas. Posteriormente, foram adicionadas nanoemulsões de curcumina nas concentrações de 0,02, 0,03 e 0,04% (m/m, em relação à massa de amido). Os tratamentos avaliados neste estudo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação dos tratamentos utilizados no estudo.

Tratamento	Composição
CS	Filme de amido de banana-da-terra verde
CS-MMT	Filme de amido + 4% de montmorilonita
CUR0.02	Filme de amido + 4% de montmorilonita + 0,02% de nanoemulsão de curcumina
CUR0.03	Filme de amido + 4% de montmorilonita + 0,03% de nanoemulsão de curcumina
CUR0.04	Filme de amido + 4% de montmorilonita + 0,04% de nanoemulsão de curcumina

Para a preparação dos filmes, o amido de banana-da-terra verde, a MMT e a água destilada foram inicialmente misturados e homogeneizados em agitador mecânico (modelo NT 137, Piracicaba, Brasil) a 350 rpm por 30 minutos, a fim de assegurar a

completa hidratação do amido. Em seguida, o glicerol foi adicionado e a mistura submetida ao aquecimento a 80 ± 2 °C, sob agitação constante de 170 rpm, por 20 minutos, até a completa gelatinização do amido. Posteriormente, a nanoemulsão foi incorporada à suspensão, procedendo-se à homogeneização em agitador de alta rotação (Ultra-Turrax T 25 digital, Alemanha) a 10.000 rpm por 5 minutos.

Após essa etapa, a suspensão foi submetida à sonicação em banho de ultrassom (SolidSteel SSBu, Piracicaba, Brasil) para a remoção de bolhas de ar e, em seguida, vertida sobre placas de vidro com bordas (32,5 × 22,5 cm) para a moldagem dos filmes. A secagem foi realizada em estufa com circulação de ar (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brasil) a 40 ± 2 °C por aproximadamente 24 horas. Após a secagem, os filmes formados foram removidos das placas de vidro e destinados às etapas de caracterização.

2.4.1 Análise Morfoestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias da superfície dos filmes foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (modelo LEO 1430 VP, Inglaterra), operando com tensão de aceleração de 10 kV. Os filmes foram fixados em suportes metálicos (*stubs*) com fita adesiva dupla face e revestidos com uma camada de ouro de aproximadamente 200 Å por 180 s, sendo, em seguida, submetidos à análise para obtenção das imagens da superfície.

2.4.2 Espectrofotometria de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros FTIR foram obtidos em espectrômetro (Agilent, modelo Cary 630, St. Clair, EUA), utilizando acessório de reflectância total atenuada (ATR), sendo registrados no modo absorbância de 500 a 4000 cm^{-1} (região do infravermelho médio) com 4 cm^{-1} e 64 scans.

2.4.3 Análise por Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC)

As propriedades térmicas dos filmes foram avaliadas por Calorimetria Exploratória de Varredura (DSC), conforme metodologia adaptada de Akbarbaglu et al.(2021), utilizando um calorímetro modelo DSC250 (TA Instruments, New Castle, DE, EUA). As amostras foram acondicionadas em cadinhos de alumínio hermeticamente selados e submetidas à análise em atmosfera de nitrogênio. Os termogramas obtidos foram analisados por meio do software TRIOS (versão 5.8.1.14, TA Instruments).

2.4.4 Espessura

A espessura do filme foi determinada com um micrômetro digital (Mitutoyo, Suzano, SP, Brasil) com precisão de 0,001 mm. As medições foram obtidas pela média de dez leituras realizadas em regiões aleatórias do filme (Viana et al., 2022).

2.4.5 Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

Para determinar a permeabilidade ao vapor de água, foi utilizado o método da American Society Standard Testing Materials (ASTM) E96/E96M, com modificações (ASTM International, 2021). Filmes circulares, com diâmetro aproximado de 3 cm, foram posicionados e selados na superfície do frasco de permeação contendo gel de sílica seco. A célula de permeação foi pesada e colocada dentro de um dessecador com água destilada (UR = 100%; pressão de vapor = 32,23 mmHg) a uma temperatura controlada de 25±2 °C. Os filmes foram pesados a cada 24 horas, por 10 dias. A permeabilidade ao vapor de água foi calculada usando a Eq. 1.

$$PVA = \frac{PVAR * e}{P_{sat} * (UR1 - UR2)} \quad (1)$$

Em que: PVAR é a taxa de permeabilidade ao vapor d'água (coeficiente angular da do modelo ajustado gerado a partir dos dados de massa de água absorvida em função do tempo); e é a espessura do filme (mm); Psat é a pressão de saturação da água à temperatura de ensaio (3,169 kPa); UR1 é a umidade relativa do dessecador (100%) e UR2 é a umidade relativa dentro da cápsula (0%).

2.4.6 Solubilidade em água (S)

A solubilidade do filme foi determinada em triplicata de acordo com o método descrito por Gontard et al. (1994) com adaptações. A massa inicial da amostra do filme (5 cm x 2 cm) foi determinada após secagem inicial em estufa (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brasil), a 105±2 °C, por 24 horas. O peso da amostra seca foi registrado como peso inicial (M1). A amostra seca foi colocada em um frasco Erlenmeyer contendo 50 mL de água destilada e, em seguida, agitada a 60 rpm, em um Orbital Shaker MA-140/CF, a 25±2 °C, por 24 horas. Após o tempo designado, a água da amostra foi removida por filtração e o filme foi novamente seco em estufa até atingir peso constante, sendo registrado o peso M2. A solubilidade foi determinada em porcentagem usando a Eq. 2:

$$S = \frac{M1 - M2}{M1} * 100 \quad (2)$$

Em que: M₁ é a massa inicial (g) e M₂ é a massa final (g).

2.4.7 Propriedades mecânicas

Os testes mecânicos foram conduzidos usando um analisador de textura TAXT2i (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido) equipado com uma célula de carga de 10

kg, conforme descrito por Aurelio et al. (2023). Para o teste de tração, foi determinado a resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de Young, em que amostras de filme foram cortadas em formatos retangulares de 6 cm de comprimento e 1 cm de largura.

A espessura de cada corpo de prova foi medida em 10 posições aleatórias por toda a dimensão da amostra usando um paquímetro digital (Digimess), com uma faixa de 0–25 mm, e precisão de 0,001 mm. A média dessas medições foi usada para calcular a área da seção transversal sobre a qual a força de tração foi aplicada. Uma vez determinada a espessura média de cada corpo de prova, as amostras foram posicionadas entre as garras de fixação do equipamento, com distância de separação de 5 cm, a uma velocidade de separação de 12,5 mm/min.

2.4.8 Propriedades óticas e de cor

As propriedades óticas e a opacidade dos filmes foi determinada usando o espectrofotômetro UV-vis (kasuaki, modelo IL 593), em 600 nm. A opacidade foi calculada pela Eq. 3:

$$Opacidade = \frac{T_{600}}{x} \quad (3)$$

Sendo que T_{600} é a transmitância em 600 nm e x a espessura dos filmes (mm).

As coordenadas colorimétricas dos filmes foi determinada em colorímetro Chroma Meter CR – 400 (Konica Minolta Sensing Inc, Sakai, Japan). O instrumento foi calibrado com padrão branco ($L^* = 89,89$, $a^* = 0,37$, $b^* = -2,27$) antes das medições. Utilizou-se o sistema CIElab para medir a luminosidade (L^* 0: escuro, 100: branco) e as coordenadas a^* (valor negativo: verde, valor positivo: vermelho) e b^* (valor negativo: azul, valor positivo: amarelo). Os valores de L^* , a^* e b^* foram determinados a partir de três leituras em regiões equidistantes. A diferença de cor (ΔE^*) foi calculada usando a seguinte Eq. (4):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

Em que ΔL^* , Δa^* e Δb^* são as diferenças entre os correspondentes parâmetro de cor das amostras;

2.4.9 Biodegradabilidade dos filmes

A análise de biodegradabilidade dos filmes produzidos foi conduzida de acordo com a metodologia descrita por Martucci & Ruseckaite (2009) com adaptações. Este método é baseado na biodegradação dos filmes quando são enterrados e expostos à microbiota natural do solo. Os filmes foram cortados em retângulos de 2 cm × 3 cm e

secos em estufa (SolidSteel SSDc, Piracicaba, SP, Brasil) a 60 ± 2 °C até massa constante.

Em seguida, os filmes foram enterrados no solo, a uma profundidade de, aproximadamente, 4 cm a partir da superfície do recipiente. Água foi adicionada ao solo a cada dois dias para manter a umidade do solo a cerca de $40\pm 5\%$. O experimento foi realizado em triplicata e os filmes foram avaliados em intervalos de 0, 7 e 15 dias.

Em cada tempo, os filmes foram desenterrados e retirado do contato com o solo com o auxílio de uma pinça. Foram cuidadosamente lavados com água destilada para retirar resquícios de solo e, em seguida, foram submetidos à secagem a 60 ± 2 °C em estufa até massa constante. O grau de biodegradação das películas foi determinado como a perda de massa (WL %), pela Eq. 5.

$$WL(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100 \quad (5)$$

Em que: m_0 é a massa inicial da amostra seca de filme e m_t é a massa seca remanescente no tempo t .

2.4.10 Teste de alteração de cor dos filmes a diferentes pH

A mudança de cor da curcumina está relacionada ao valor do pH e, para determinar a influência da matriz polimérica na capacidade de transição de cor do composto, foi conduzido um teste de sensibilidade conforme Choi et al. (2017). Os filmes foram imersos em 5 mL de soluções tampão com valores de pH variando de 3,0 a 10,0, permanecendo em contato com as soluções por 10 min. Em seguida, os filmes ainda úmidos foram removidos das soluções, posicionados sobre uma superfície branca e avaliados qualitativamente quanto à alteração de cor por inspeção visual, sendo as mudanças registradas por meio de fotografias obtidas imediatamente após a remoção das soluções tampão. De forma complementar, a sensibilidade da nanoemulsão de curcumina ao pH também foi avaliada pela adição direta das soluções tampão às emulsões líquidas, seguida de inspeção visual e registro fotográfico imediato das alterações de cor.

2.5 Avaliação da deterioração da carne de frango

A carne fresca foi adquirida no comércio local, transportada sob refrigeração e utilizada no mesmo dia da aquisição. As amostras foram cortadas em porções de aproximadamente 40 g e acondicionadas individualmente em recipientes herméticos de polipropileno, com capacidade de 350 mL.

Os filmes indicadores foram fixados na parte interna da tampa dos recipientes com fita dupla face, de modo a evitar o contato direto com a carne e permitir exclusivamente a exposição aos compostos voláteis liberados durante o armazenamento, como amônia e aminas provenientes da deterioração proteica. Os recipientes foram mantidos sob refrigeração a 4 ± 1 °C. As análises foram realizadas a cada dois dias, em quatro tempos de avaliação, totalizando um período experimental de 8 dias.

2.5.1 Avaliação cromática dos filmes

A mudança de cor dos filmes foi determinada utilizando calorímetro digital NH310 – 3nh (Shenzhen, China), no sistema CIELab, sendo calculada a diferença total de cor (ΔE), chroma e ângulo hue (Said & Sarbon, 2023).

2.5.2 Determinação do pH da carne

Para a determinação do pH, foram coletados 10 g de carne de frango de cada recipiente e homogeneizados com 90 mL de água destilada por aproximadamente 1 minuto, conforme a metodologia descrita por Choi et al. (2017). A suspensão obtida foi filtrada em papel de filtro qualitativo, e o pH do filtrado foi determinado utilizando-se um pHmetro (Instrutherm – PH-5000, São Paulo, Brasil), previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0.

2.5.3 Determinação do nitrogênio básico volátil total (TVB-N)

A quantificação de compostos nitrogenados voláteis, incluindo amônia, foi realizada por destilação utilizando o método Kjeldahl descrito por (Y. H. Choi et al., 2024). Para cada análise, 5 g de carne foram homogeneizados com 45 mL de solução de ácido tricloroacético (TCA) 7,5%. A mistura foi filtrada em papel de filtro qualitativo e o extrato obtido submetido à destilação após alcalinização com Óxido de Magnésio. Os compostos voláteis liberados foram capturados em solução de ácido bórico contendo indicador misto, e posteriormente titulados com ácido clorídrico padronizado. Os resultados foram expressos em mg de nitrogênio por 100 g de amostra (mg N/100 g).

2.6 Planejamento e análise estatística

2.6.1 Análise estatística dos filmes

Os dados referentes à caracterização dos filmes, foram analisados em delineamento inteiramente casualizado (DIC), constituído por cinco tratamentos e três repetições, totalizando 15 unidades experimentais. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando observadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

2.6.2 Análise estatística dos filmes aplicados à carne de frango

Os dados dos parâmetros colorimétricos dos sensores (ΔE , Chroma e Hue) foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial, considerando os tratamentos e os tempos de armazenamento como fatores fixos. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para avaliar a associação entre os parâmetros colorimétricos dos sensores e os indicadores de qualidade da carne de frango, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson entre ΔE , Chroma, Hue, pH e bases voláteis totais (TVB). As análises de correlação foram realizadas apenas para os filmes contendo curcumina, por constituírem os sistemas indicadores propostos para monitoramento da deterioração. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software SAS Studio, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada com o objetivo de avaliar a relação entre os parâmetros colorimétricos dos sensores (ΔE , Chroma e Hue) e os indicadores de deterioração da carne de frango (TVB-N e pH). A análise foi conduzida utilizando o software OriginPro (OriginLab Corporation, Northampton, MA, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação das nanoemulsões O/A de curcumina

As nanoemulsões óleo/água (O/A) de curcumina foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS). Os valores de Z-Average foram de 71,39 nm para 0,02CUR, 93,78 nm para 0,03CUR e 69,36 nm para 0,04CUR. Dessa forma, os três tratamentos apresentaram tamanho hidrodinâmico médio inferior a 100 nm, confirmando a formação de gotículas em escala nanométrica.

3.2 Análise morfoestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para compreender a estrutura superficial da curcumina e montmorilonita (MMT), bem como de filmes de amido de banana da terra verde produzidos na ausência e presença de MMT e de diferentes concentrações de nanoemulsão de curcumina.

A curcumina em pó (Figura 1a), exibiu uma morfologia cristalina, com partículas de formato alongado, semelhantes a agulhas (Erna et al., 2022). Essa estrutura cristalina é uma característica fundamental que pode influenciar a sua dispersão na matriz polimérica. A MMT evidenciou uma morfologia em flocos, típica de argilas. Suas camadas empilhadas são visíveis, o que é um fator-chave para as suas propriedades de reforço (Figura 1b). A forma e a agregação inicial do pó de MMT influenciam diretamente a sua capacidade de dispersão durante a preparação dos filmes.

Nos filmes de amido CS (controle, Figura 1c), observou-se uma superfície predominantemente contínua e relativamente homogênea, sem a presença evidente de poros ou fissuras. Entretanto, foram identificados pontos/estruturas granulares dispersos na matriz, indicando a presença de frações de amido que não foram completamente gelatinizadas durante o processamento. A introdução de 4% de MMT (Figura 1d) mostra que a argila foi bem distribuída na matriz, embora ainda se percebam algumas regiões de aglomeração. Essa dispersão indica possível interação entre a matriz de amido e as lamelas da MMT, o que pode contribuir para melhorias nas propriedades mecânicas e de barreira (Calambas et al., 2021).

A adição da curcumina emulsificada em diferentes concentrações resultou em modificações evidentes na microestrutura dos filmes. Em baixa concentração (CUR0,02, Figura 1e), a curcumina apresentou-se bem dispersa na matriz, sem a formação significativa de aglomerados, sugerindo boa compatibilidade da fase ativa com o sistema e melhor empacotamento estrutural, indicando a eficiência da emulsificação e sua capacidade de incorporação homogênea no filme. Nas maiores concentrações de curcumina, CUR0,03 e CUR0,04 (Figuras 1f e 1g), observou-se a presença de aglomerados e áreas superficiais menos uniformes, indicando uma redução progressiva da homogeneidade da matriz com o aumento da concentração do composto ativo. Esse comportamento pode ser atribuído à cristalização da curcumina nos filmes em decorrência do aumento de sua concentração e da baixa compatibilidade com a matriz de amido, somada à tendência de agregação em função de sua natureza hidrofóbica (Liu et al., 2022b).

De forma geral, a análise morfológica evidencia que a adição de MMT promove potencial interação com a matriz de amido. A presença da nanoemulsão de curcumina em baixas concentrações não compromete a homogeneidade do filme, mas nas maiores concentrações leva à formação de pontos concentrados, associados a cristalização ou aglomeração do composto bioativo. Esse comportamento é relevante, pois pode influenciar tanto as propriedades físicas (transparência, homogeneidade, integridade mecânica) quanto as funcionais (liberação controlada de curcumina) dos filmes produzidos. Apesar da presença de aglomerados em maiores concentrações de curcumina, não foram observadas trincas, fissuras ou descontinuidades estruturais na matriz polimérica, evidenciando boa integridade e coesão dos filmes.

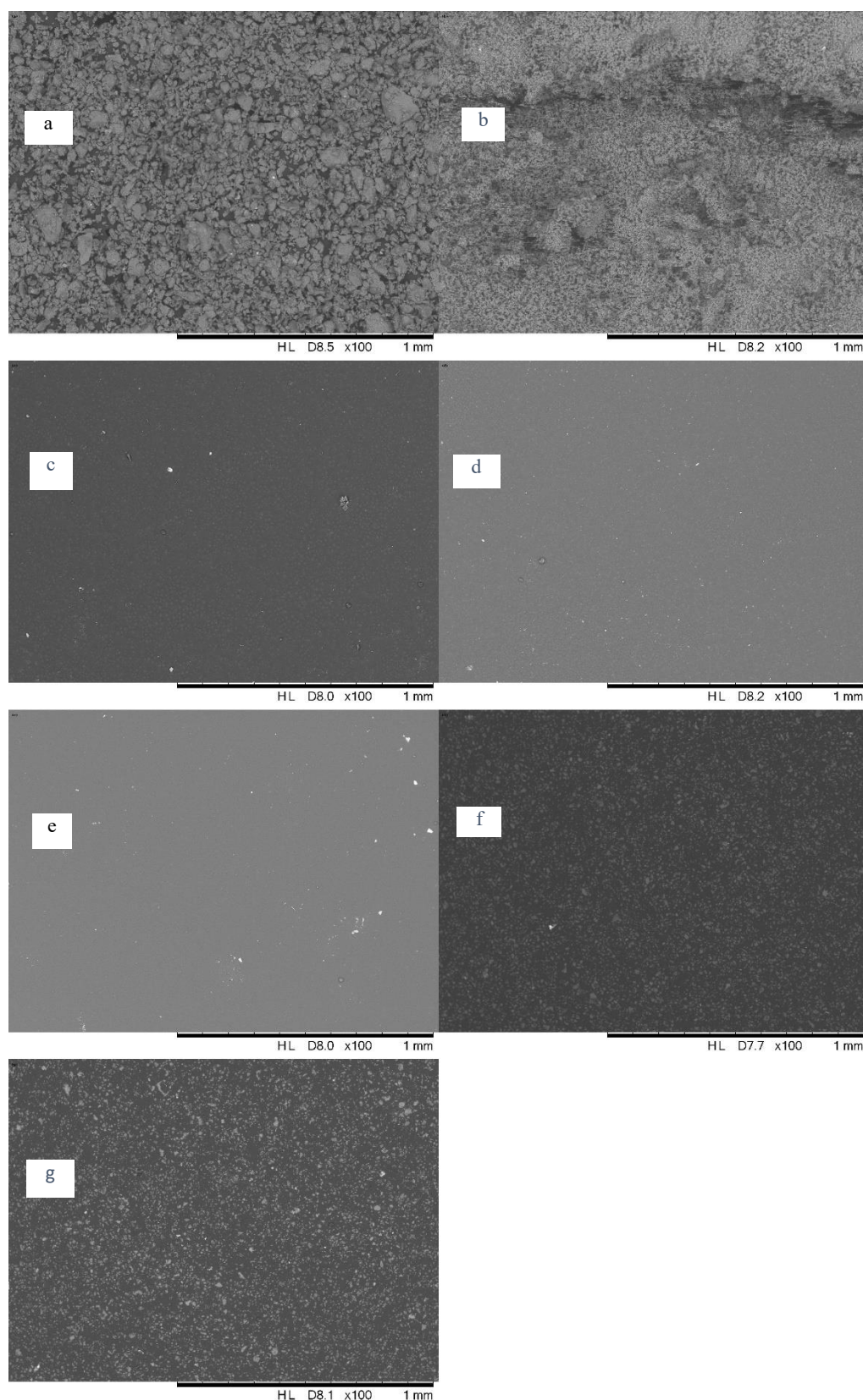


Figura 1. Micrografias da montmorilonita (a), curcumina (b), filmes CS (c), CS-MMT (d), CUR0.02 (e), CUR0.03 (f) e CUR0.04 (g). Ampliação de 100 $\times$.

3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR dos filmes de amido de banana-da-terra verde incorporados com MMT e nanoemulsão de curcumina são apresentados na Figura 2. De modo geral, todos os filmes apresentaram perfis espectrais semelhantes, sem o surgimento de novas bandas de absorção, indicando que a incorporação da MMT e da nanoemulsão não promoveu modificações na estrutura química da matriz de amido. As alterações observadas ocorreram principalmente na intensidade de algumas bandas características, sugerindo que as interações entre os componentes ocorreram predominantemente por ligações de hidrogênio e outras interações físicas.

A banda larga entre 3200 e 3400 cm^{-1} , atribuída ao estiramento dos grupos hidroxila (O–H) (Maniglia; Silveira; Tapia-Blácido, 2022) presentes no amido, glicerol, MMT e curcumina, apresentou aumento de intensidade após a incorporação da MMT + nanoemulsão de curcumina. Esse comportamento sugere o fortalecimento das ligações de hidrogênio entre os componentes da matriz polimérica, favorecendo maior integração entre as fases e uma reorganização estrutural do sistema.

A banda em aproximadamente 2920 cm^{-1} , atribuída ao estiramento assimétrico das ligações C–H dos grupos CH_2 e CH_3 (Skowrońska; Wilpiszewska, 2022), esteve presente em todos os filmes devido à contribuição do amido e do glicerol. As pequenas variações observadas em sua intensidade após a incorporação da nanoemulsão podem estar relacionadas à presença da fase oleosa e do surfactante, ambos ricos em cadeias alifáticas, bem como às alterações nas interações entre esses componentes e a matriz polimérica (De Almeida et al., 2024).

Na região entre 1000 e 1150 cm^{-1} , correspondente principalmente às vibrações de estiramento das ligações C–O, C–O–C do amido (Viana et al., 2022) e Si–O da montmorilonita (Madejová, 2003; Van Soest et al., 1995).

A ausência de deslocamentos significativos nas posições das principais bandas, associada às variações observadas em suas intensidades, indica a manutenção dos grupos funcionais característicos da matriz de amido após a incorporação da MMT e da nanoemulsão. Esse comportamento sugere que a adição desses componentes não promoveu modificações químicas expressivas na estrutura do polímero, tampouco evidenciou a formação de novas ligações covalentes detectáveis por FTIR. Dessa forma, as alterações observadas nos espectros podem estar relacionadas principalmente às interações entre os componentes e às mudanças físicas na organização e compactação da matriz.

A incorporação da MMT e da nanoemulsão pode contribuir para o preenchimento de espaços livres existentes na matriz de amido, caracterizando um possível efeito de preenchimento (filling effect). A presença desses componentes pode ocupar regiões de menor densidade e reduzir espaços vazios na estrutura do filme, favorecendo uma matriz mais compacta e integrada.

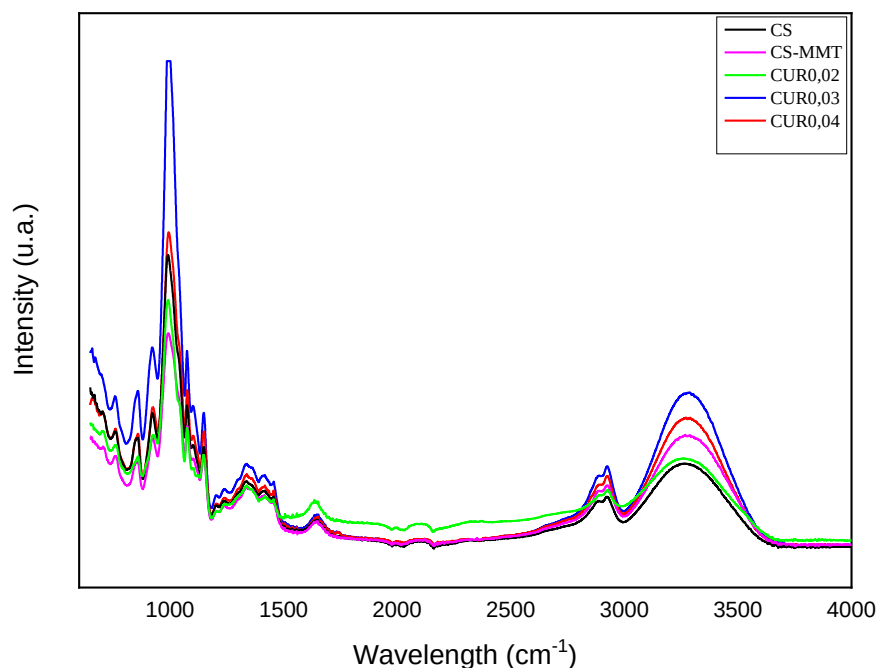


Figura 2 – Espectros FTIR dos filmes amido de banana da terra verde, MMT e nanoemulsão de curcumina (CUR).

3.4 Análise térmica (DSC)

Os resultados obtidos por DSC evidenciam, por meio das curvas térmicas, as transições relacionadas às propriedades estruturais dos filmes, refletindo as interações entre o amido de banana-da-terra verde, a MMT e a nanoemulsão de curcumina (Figura 3). A amostra controle (CS) apresentou valores de T_p (83,50 °C) e ΔH (113,64 J/g), indicando que a gelatinização do amido não foi completa durante o processamento (Tabela 2). Esse comportamento é coerente com a literatura, que reporta picos endotérmicos mais intensos em materiais com estrutura nativa parcialmente preservada (Calambas et al., 2021).

Tabela 2 – Valores obtidos para análise de DSC para filmes amido de banana da terra verde, MMT e nanoemulsão de curcumina (CUR).

Trat.	Tp (°C)	ΔH (J/g)
CS	83,5	113,64
CS-MMT	89,50	140,60
CUR0,02	84.60	125,75
CUR0,03	96,33	154.52
CUR0,04	97.55	155.84

A incorporação de 4% de MMT resultou no aumento de Tp e ΔH , sugerindo maior grau de ordenação molecular em comparação ao filme controle. O deslocamento do pico endotérmico indica forte interação entre a argila e a matriz polimérica, gerando um efeito de isolamento térmico. Isso pode estar relacionado à boa dispersão da MMT na matriz de amido, o que amplia a área de contato entre a argila e o polímero e contribui para uma estrutura mais compacta dos filmes, exigindo maior energia para sua desorganização (Sun et al., 2014)

A adição de curcumina provocou aumento progressivo de Tp e ΔH , nas concentrações de CUR0,03 e CUR0,04, indicando maior estabilidade térmica e reforço estrutural da matriz. Tal comportamento pode estar associado às interações entre curcumina, MMT e amido, que favorecem a ordenação molecular e o fortalecimento das regiões cristalinas. O deslocamento dos picos para temperaturas mais elevadas evidencia melhora na estabilidade térmica, possivelmente em função da restrição da mobilidade molecular em domínios semicristalinos.

Comparando os tratamentos, observa-se que a presença dos aditivos promoveu o aumento das temperaturas de pico. Além disso, a incorporação de MMT e da nanoemulsão de curcumina elevou a entalpia dos filmes compósitos. Esses efeitos podem estar associados às interações entre os componentes e os segmentos da cadeia do amido, que contribuíram para o aumento da cristalinidade dos materiais (Qin et al., 2016). Assim, valores mais elevados de entalpia de gelatinização (ΔH) indicam maior compatibilidade entre o amido de banana-da-terra verde, a MMT e a nanoemulsão de curcumina.

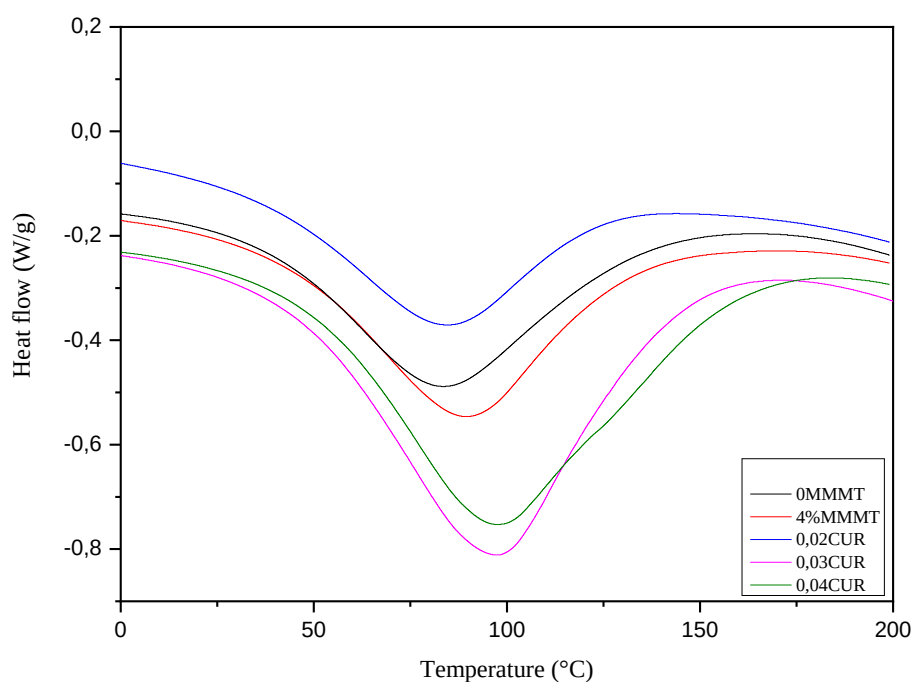


Figura 3. Termogramas DSC dos filmes amido de banana da terra verde, MMT e nanoemulsão de curcumina (CUR).

3.5 Espessura, Permeabilidade ao vapor de água e Solubilidade em água

Os valores de espessura, permeabilidade ao vapor de água e solubilidade dos filmes de amido de banana da terra verde, MMT e nanoemulsão de curcumina podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado da análise de Espessura (e), Permeabilidade ao vapor de água (PVA) e Solubilidade (S) dos filmes produzidos com amido de Banana da terra verde (*Musa paradisíaca* L.), MMT e nanoemulsão de curcumina.

Análises	CS	CS – MMT	CUR0,02	CUR0,03	CUR0,04	p-value
e (mm)	0.12±0.005 ^a	0.13±0.013 ^a	0.13±0.005 ^a	0.13±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.2600
PVA (g.cm. s ⁻¹ .cm ⁻² . Pa ⁻¹)	14.30±0.33 ^a	10.50±0.081 ^b	10.00±1.17 ^b	9.14±1.42 ^b	9.69± 1.16 ^b	<0.0009
S (%)	38.38±0.12 ^a	30.67±1.44 ^b	11.91±1.93 ^d	10.79±2.97 ^d	14.46±4.23 ^c	<0.0001

*Letras diferentes na mesma linha representam diferença estatística (p<0,05) para o teste Tukey.

A espessura dos filmes não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p \geq 0,05$), indicando que os componentes adicionados foram incorporados à rede de amido com redução do volume livre da matriz, favorecendo um empacotamento mais eficiente das cadeias poliméricas. A MMT, especialmente quando bem dispersa na matriz, pode atuar como material de preenchimento (filler), ocupando espaços vazios entre as cadeias de amido e contribuindo para uma estrutura mais compacta (Lacerda et al., 2026). Entretanto, esse efeito depende da distribuição homogênea das partículas na matriz, uma vez que sua agregação ou dispersão inadequada pode dificultar o empacotamento das cadeias e favorecer seu afastamento. De forma semelhante, a incorporação da nanoemulsão pode alterar a organização da matriz, dependendo da interação entre a fase dispersa e a fase contínua. Quando a fase dispersa é adequadamente distribuída, pode favorecer uma organização mais homogênea da estrutura, por outro lado, sua distribuição heterogênea ou a formação de agregados pode aumentar o espaçamento entre as cadeias e comprometer o empacotamento da matriz.

Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p \leq 0,05$) para a permeabilidade ao vapor de água (PVA). A incorporação da montmorilonita (MMT) promoveu redução da PVA em relação ao filme controle (CS). Esse comportamento é atribuído à boa dispersão das lamelas de MMT na matriz polimérica, que aumenta a tortuosidade do caminho percorrido pelas moléculas de água, dificultando sua difusão através do filme e, conseqüentemente, melhorando a propriedade de barreira (Ihalavithana; Madanayake; Adassooriya, 2025). Por outro lado, a adição da nanoemulsão de curcumina aos filmes contendo MMT não promoveu redução estatisticamente significativa da PVA em comparação ao tratamento contendo apenas MMT ($p > 0,05$), indicando que a melhoria da barreira ao vapor de água foi predominantemente decorrente da incorporação da argila. Esse resultado sugere que a estrutura lamelar da MMT exerceu maior influência sobre o transporte de vapor de água do que a fase lipídica introduzida pela nanoemulsão, corroborando estudos que apontam a MMT como um dos principais agentes responsáveis pelo aumento da resistência à difusão de umidade em matrizes poliméricas (Muñoz-Gimena et al., 2023).

A solubilidade em água dos filmes também foi influenciada pela incorporação da MMT e da nanoemulsão de curcumina (Tabela 3). A redução da solubilidade promovida pela MMT está relacionada ao mesmo mecanismo responsável pela diminuição da PVA, uma vez que a interação entre as lamelas da argila e as cadeias poliméricas resulta em uma matriz mais compacta e coesa, restringindo a penetração de água e dificultando a

dissolução do material (Vaezi; Asadpour; Sharifi, 2020). Além disso, a incorporação da nanoemulsão de curcumina contribuiu para reduzir a solubilidade dos filmes em razão da presença de componentes hidrofóbicos, como a curcumina e o óleo de canola, que diminuem a afinidade da matriz pela água e dificultam sua desintegração. Esses componentes permanecem dispersos na estrutura polimérica, tornando-a menos suscetível à dissolução em meio aquoso (Sanchez; Pinzon; Villa, 2022). Dessa forma, embora a nanoemulsão não tenha promovido melhoria significativa na barreira ao vapor de água, sua incorporação contribuiu para aumentar a resistência dos filmes à dissolução, característica desejável para aplicações em embalagens de alimentos.

3.6 Propriedades mecânicas

O efeito da adição de montmorilonita (MMT) e de nanoemulsão de curcumina nas propriedades mecânicas dos filmes de amido de banana-da-terra verde é apresentado na Tabela 4.

A incorporação da MMT aumentou a resistência à tração dos filmes, indicando um efeito de reforço da fase mineral na matriz de amido. Quando adequadamente dispersa, a MMT pode atuar como material de preenchimento (*filler*), ocupando espaços livres entre as cadeias poliméricas e favorecendo um maior empacotamento da matriz. Além disso, a elevada razão de aspecto e a interação entre as partículas de MMT e as cadeias de amido podem restringir a mobilidade das cadeias, contribuindo para uma estrutura mais coesa e resistente à deformação (Zhang; Chen, 2023)

A incorporação da nanoemulsão de curcumina promoveu aumento significativo na resistência a tração, no alongamento na ruptura e no módulo de Young, indicando alterações na organização física e nas propriedades mecânicas da matriz polimérica (Vieira et al., 2026). Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito de preenchimento (*filling effect*) observado por MEV, no qual os componentes incorporados ocupam espaços livres da matriz, favorecendo uma estrutura mais compacta e uma melhor distribuição de tensões. O aumento da entalpia de gelatinização (ΔH) observado por DSC corrobora essa hipótese, sugerindo maior restrição da mobilidade das cadeias de amido e maior estabilidade das estruturas organizadas presentes no filme.

Esse comportamento sugere que a presença da nanoemulsão contribuiu para uma maior organização e compactação da matriz polimérica, aumentando sua resistência à deformação elástica. Esse efeito pode estar relacionado ao preenchimento de espaços livres da matriz e à interação física entre a fase dispersa da nanoemulsão, a MMT e as

cadeias de amido, reduzindo a mobilidade molecular e favorecendo uma estrutura com maior capacidade de transferência de tensões. O aumento da entalpia de gelatinização (ΔH) observado por DSC corrobora essa interpretação, indicando maior estabilidade das estruturas organizadas presentes na matriz. Assim, a nanoemulsão de curcumina atuou como um componente estruturante do filme, promovendo maior rigidez sem alterar significativamente a integridade da matriz polimérica.

Tabela 4 – Valores de resistência à tração e alongamento na ruptura dos filmes de amido de banana-da-terra verde (*Musa paradisíaca* L.) (CS), nanoemulsão de curcumina e MMT (4%).

Análises	CS	CS - MMT	CUR0,02	CUR0,03	CUR0,04	p-value
Resistência à Tração (MPa)	1.46±0.05 ^d	2.22±0.04 ^c	2.26±0.19 ^{bc}	2.44±0,12 ^b	3.38±0.16 ^a	<0.0374
Alongamento na Ruptura (%)	14.06±1.01 ^d	12.72±1.01 ^c	165.31±8.00 ^a	156.95±4,77 ^b	142.23±3.75 ^b	<0.0001
Módulo de Young	15.90±2.06 ^b	17.51±0.91 ^b	24.95±1.65 ^a	24.24±1,20 ^a	24.20±2.95 ^a	<0.0035

*Letras diferentes na mesma linha representam diferença estatística ($p < 0,05$) para o teste Tukey

3.7 Propriedades óticas e de cor dos filmes

Os filmes desenvolvidos são apresentados na Figura 4. A olho nu podem ser observados filmes com colorações diferentes branco, bege e amarelo.

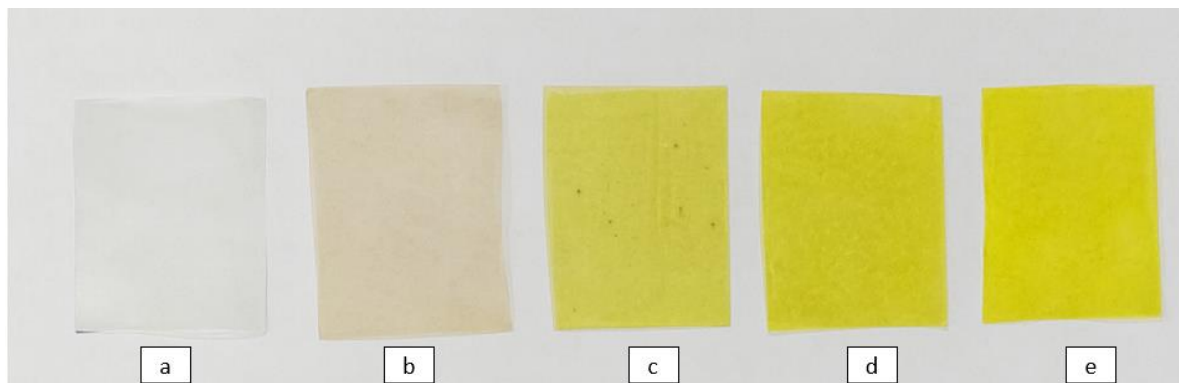


Figura 4. Aspecto visual dos filmes CS, CS-MMT, CUR0.02, CUR0.03 e CUR0.04.

A incorporação da nanoemulsão de curcumina promoveu alterações significativas nos parâmetros de cor dos filmes de amido de banana-da-terra verde (Tabela 5). Os filmes CS e CS-MMT apresentaram maiores valores de luminosidade (L^*) e menores valores de b^* , caracterizando materiais mais claros e com baixa intensidade da tonalidade amarela.

Em contrapartida, os filmes CUR0.02, CUR0.03 e CUR0.04 apresentaram redução significativa de L^* e aumento progressivo de b^* , evidenciando o escurecimento dos filmes e a intensificação da coloração amarela em função da incorporação da curcumina. Esse comportamento é esperado, uma vez que a curcumina apresenta coloração amarelo-alaranjada e, quando incorporada à matriz polimérica, transfere suas características ao material (Rachtanapun et al., 2021).

A incorporação da montmorilonita também influenciou a coloração dos filmes, sendo observada diferença significativa nos valores de ΔE^* entre os tratamentos CS e CS-MMT, indicando que a presença da argila modificou a aparência visual da matriz polimérica. A adição da nanoemulsão de curcumina promoveu aumento ainda mais pronunciado de ΔE^* , demonstrando que a presença do pigmento intensificou as diferenças de cor em relação ao filme controle. Resultados semelhantes foram reportados por Musso et al. (2016), que observaram redução da luminosidade, aumento da intensidade da cor amarela e elevação dos valores de ΔE^* em filmes de gelatina incorporados com curcumina, atribuindo esse comportamento à elevada capacidade de coloração desse composto fenólico.

Em conjunto, os resultados de L^* , b^* e ΔE^* confirmam a incorporação da nanoemulsão de curcumina à matriz de amido de banana-da-terra verde e evidenciam a preservação de suas propriedades colorimétricas após o processamento. Essa característica é essencial para a aplicação desses materiais como embalagens inteligentes, uma vez que a estabilidade da cor permite que a curcumina atue como indicador colorimétrico das alterações de pH associadas ao processo de deterioração dos alimentos.

A incorporação da montmorilonita (MMT) e da nanoemulsão de curcumina promoveu aumento significativo da opacidade dos filmes (Tabela 5). O incremento observado nos filmes contendo MMT pode ser atribuído à dispersão das lamelas de argila na matriz polimérica, que aumenta a dispersão e a reflexão da luz incidente, reduzindo sua transmitância e, conseqüentemente, elevando a opacidade dos filmes (Calambas et al., 2021). A adição da nanoemulsão de curcumina intensificou esse efeito, uma vez que as gotículas de óleo dispersas atuam como centros adicionais de espalhamento da luz,

aumentando a reflexão difusa e reduzindo a transparência do material (Aydogdu et al., 2020). Dessa forma, a ação combinada da MMT e da nanoemulsão resultou em filmes mais opacos, característica que pode ser vantajosa para embalagens de alimentos sensíveis à luz, por proporcionar maior proteção contra processos de foto-oxidação e degradação de compostos bioativos.

Tabela 5 – Dados da Cor e da Opacidade dos filmes produzidos com amido de Banana-da-terra verde (*Musa paradisíaca* L.), nanoemulsão de curcumina (0.0-0.04%) e MMT (4%).

Análises	CS	CS – MMT	CUR0,02	CUR0,03	CUR0,04	p-value
L	87.80±0,16 ^a	85.69±0.18 ^c	86.79±0,55 ^b	85.14±0.30 ^c	85.15±0.68 ^c	<0.0001
a*	0.47±0,01 ^a	1.06±0.02 ^a	-5.69±1,14 ^b	-8.38±0.21 ^c	-9.11±0.83 ^c	<0.0001
b*	-1.14±0,23 ^c	2.16±0.16 ^c	22.06±4,29 ^b	34.61±0.54 ^a	38.00±6.54 ^a	<0.0001
ΔE	47.28±0,24 ^a	44.11±0.15 ^b	23.32±4,45 ^c	10.42±0.53 ^d	7.09±6.44 ^d	<0.0001
Opacidade	177.13±6,51 ^c	213.23±1.53 ^b	267.22±8,26 ^a	257.30±9.29 ^a	266.87±6.71 ^a	<0.0001

*Letras diferentes na mesma linha representam diferença estatística (p<0,05) para o teste Tukey

3.8 Biodegradabilidade

Ao longo dos oito dias de incubação em solo, os filmes de amido de banana-da-terra verde apresentaram perda contínua de massa, alcançando reduções superiores a 70% após seis dias (Tabela 6). Esse comportamento evidencia a elevada biodegradabilidade dos filmes e está relacionado à ação conjunta de processos físicos, químicos e, principalmente, biológicos promovidos pelos microrganismos presentes no solo (De Oliveira et al., 2025).

A velocidade de degradação é influenciada pelas características do solo, especialmente pela disponibilidade de matéria orgânica, umidade e atividade microbiana. Solos mais férteis apresentam maior biomassa de bactérias e fungos, favorecendo a produção de enzimas hidrolíticas responsáveis pela decomposição de materiais biodegradáveis (Rech et al., 2020). Durante o enterramento, o amido passa a ser utilizado como fonte de carbono e energia pelos microrganismos, que secretam principalmente α -amilases e outras glicosidases capazes de hidrolisar as ligações glicosídicas α -1,4 e α -1,6 da amilose e da amilopectina. Inicialmente, essas enzimas degradam as regiões amorfas da matriz polimérica, mais acessíveis à penetração de água, e, posteriormente, promovem

a degradação gradual das regiões mais organizadas, resultando na fragmentação das cadeias poliméricas e na formação de oligossacarídeos, dissacarídeos e glicose (Ge et al., 2024; Malekzadeh; Tatari; Dehghani Firouzabadi, 2024).

Após oito dias de incubação, os filmes apresentavam elevado grau de fragmentação e perda de integridade estrutural, impossibilitando a realização de novas pesagens. Esse comportamento evidencia o avanço do processo de degradação dos filmes ao longo do período de incubação e indica uma rápida perda de integridade da matriz de amido de banana-da-terra verde em condições de solo. A degradação observada reforça o caráter biodegradável dos filmes e seu potencial para aplicações em materiais de embalagem mais ambientalmente sustentáveis, especialmente quando comparados a materiais plásticos convencionais de maior persistência no ambiente.

Tabela 6 – Valores de perda de massa (%) para filmes amido de banana da terra verde, MMT e nanoemulsão de curcumina (CUR).

Tratamento	PM 2 dias	PM 4 dias	PM 6 dias
CS	0.2832±0.07 ^b	0.6743±0.03 ^a	0.7410±0.01 ^e
CS-MMT	0.1661±0.07 ^e	0.5136±0.36 ^d	0.8424±0.04 ^a
CUR0,02	0.1877±0.03 ^d	0.5415±0.04 ^b	0.7582±0.01 ^d
CUR0,04	0.3289±0.14 ^a	0.5347±0.02 ^c	0.7851±0.01 ^b
CUR0,04	0.1914±0.05 ^c	0.4637±0.42 ^e	0.7668±0.03 ^c

3.9 Análise de resposta de pH nos filmes

Conforme apresentado na Figura 5, os filmes contendo nanoemulsão de curcumina apresentaram tonalidade amarelada quando imersos em soluções tampão com pH entre 3,0 e 8,0. Em meio alcalino (pH 9,0 e 10,0), observou-se uma transição gradual da coloração para tons alaranjados, evidenciando a resposta colorimétrica da curcumina após sua incorporação à matriz polimérica. De forma complementar, a Figura 6 apresenta a resposta cromática da nanoemulsão de curcumina ainda em estado líquido, obtida pela adição direta das soluções tampão à emulsão. Assim como observado nos filmes, a nanoemulsão apresentou alteração de cor em função do pH, confirmando que a sensibilidade colorimétrica da curcumina foi preservada tanto na emulsão quanto após sua incorporação ao filme.

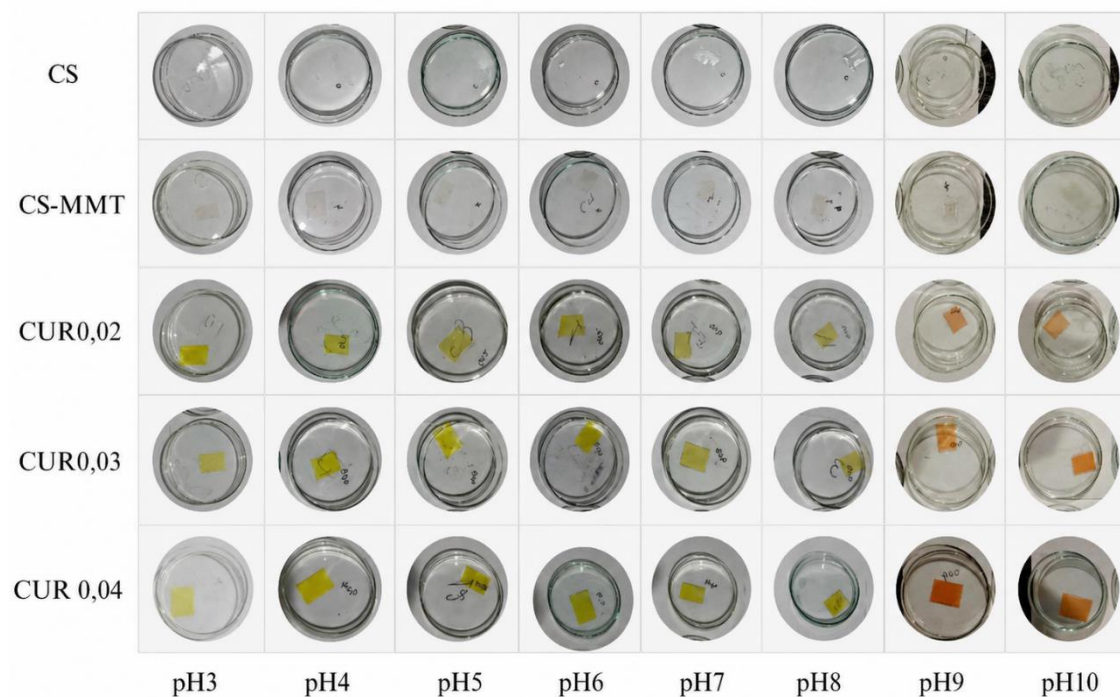


Figura 5 – Mudança visual de cor de filmes de amido de banana-da-terra verde, MMT (4%) e nanoemulsão de curcumina (0,02-0,04%), em solução tampão com valor de pH de 3-10.

Essa mudança de cor está diretamente relacionada ao estado de protonação dos grupos hidroxila presentes nos sítios ativos da curcumina. Em condições de pH entre 3 e 7, esses grupos permanecem protonados, entretanto, em valores de pH acima de 7, ocorre a desprotonação, que provoca uma redistribuição eletrônica responsável pela rápida alteração da coloração (Zheng; McClements, 2020). A alteração de cor da curcumina em meio básico ocorre em função da formação do ânion fenóxido, resultante da reação entre os grupos hidroxila fenólicos e os íons hidroxila. (OH^-) (Roy et al., 2022)

Além do processo de protonação/desprotonação, a mudança de coloração observada nos filmes contendo nanoemulsão de curcumina também está associada ao tautomerismo ceto-enólico, cuja forma predominante varia conforme o pH do meio. Em condições ácidas ou neutras, predomina a forma ceto, responsável pela coloração amarela característica. Em ambientes alcalinos, a forma enolato torna-se predominante, favorecendo maior conjugação eletrônica e resultando em transição da cor para tons alaranjados ou avermelhados (Zheng; McClements, 2020). Entre pH 3 e 7, ocorre um equilíbrio entre as formas, com leve predominância da forma enólica, favorecida pela ligação de hidrogênio intramolecular e pela maior planaridade da molécula (Sueth-

Santiago et al., 2015). Como a forma enol é menos estável quimicamente que a ceto, a curcumina apresenta menor estabilidade em meios básicos (Zheng & McClements, 2020).

Assim, a variação de pH promove mudanças estruturais na curcumina que se refletem visivelmente na coloração dos filmes, evidenciando o seu potencial para aplicações como sistemas de monitoramento de qualidade e frescor em alimentos.



Figura 6 – Alteração visual da coloração das nanoemulsões de curcumina (0,02; 0,03 e 0,04%) após adição de soluções tampão com pH variando de 3,0 a 10,0.

3.10 Avaliação da deterioração da carne de frango

3.10.1 Resposta colorimétrica dos filmes durante o armazenamento

A Figura 7 apresenta a aparência visual dos filmes de amido de banana-da-terra verde contendo montmorilonita (MMT) e nanoemulsão de curcumina, enquanto a Tabela 7 apresenta os parâmetros colorimétricos (L , a , b^* , ΔE , C^* e h°), permitindo avaliar o efeito da incorporação desses componentes sobre a coloração e a funcionalidade dos films. A análise de variância revelou efeito significativo ($p < 0,0001$) da interação tratamento $\times$ tempo para todas as variáveis colorimétricas avaliadas (ΔE , C e H), indicando que a resposta dos filmes ao longo do armazenamento dependeu da sua composição. Dessa forma, foi realizado o desdobramento da interação para avaliar o comportamento de cada tratamento ao longo do tempo.

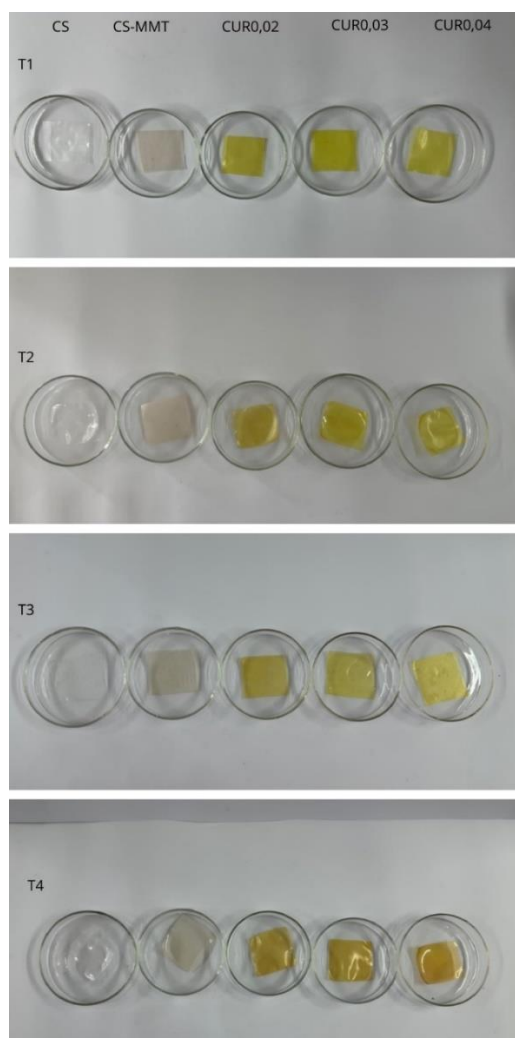


Figura 7: Vista superior dos filmes de amido contendo montmorilonita (MMT) e nanoemulsão de curcumina.

Para os filmes contendo 0% e 4% de MMT, os parâmetros ΔE , Chroma e Hue não apresentaram diferenças significativas durante o armazenamento, indicando baixa sensibilidade dessas formulações às alterações decorrentes da deterioração da carne de frango (Tabela 6).

Tabela 7: Hue (H), Chroma (C) e ΔE em função dos tratamentos e do tempo de armazenamento.

Hue	T1	T2	T3	T4
CS	331.89±1.24 ^{aB}	332.95±0.47 ^{aB}	333.23±0.23 ^{aB}	333.88±0.62 ^{aB}
CS-MMT	356.38±2.81 ^{aA}	352.49±0.78 ^{aA}	352.44±0.14 ^{aA}	352.12±0.74 ^{aA}
CUR0,02	93.80±0.29 ^{aC}	91.01±0.17 ^{bC}	90.88±0.61 ^{bC}	89.27±0.86 ^{bC}
CUR0,03	94.39±0.14 ^{aC}	92.97±0.20 ^{aC}	91.94±0.73 ^{aC}	89.19±0.49 ^{cC}
CUR0,04	94.12±0.11 ^{aC}	92.86±0.13 ^{bC}	91.44±0.78 ^{cC}	85.53±0.85 ^{dD}
Delta E	T1	T2	T3	T4
CS	0.00±0.00 ^{aA}	0.91±0.27 ^{aA}	1.43±0.49 ^{aCD}	1.27±0.30 ^{aD}
CS-MMT	0.00±0.00 ^{aA}	0.75±0.09 ^{aA}	0.80±0.12 ^{aD}	0.46±0.09 ^{aD}
CUR0,02	0.00±0.00 ^{cA}	3.20±1.15 ^{abC}	4.45±0.52 ^{aC}	4.89±0.44 ^{aB}
CUR0,03	0.00±0.00 ^{cA}	4.72±0.64 ^{bB}	9.84±0.59 ^{bA}	11.77±1.87 ^{aA}
CUR0,04	0.00±0.00 ^{cA}	5.15±0.72 ^{bB}	6.58±0.16 ^{abB}	7.18±1.06 ^{aB}
Chroma	T1	T2	T3	T4
CS	12.21±0.06 ^{aC}	11.28±0.27 ^{aC}	10.76±0.49 ^{aD}	10.96±0.33 ^{aD}
CS-MMT	5.87±0.15 ^{aD}	6.73±0.12 ^{aD}	7.54±0.12 ^{aC}	5.64±0.14 ^{aE}
CUR0,02	34.72±1.30 ^{abB}	32.45±1.13 ^{bcAB}	31.56±0.39 ^{cC}	30.58±0.48 ^{cB}
CUR0,03	41.60±0.39 ^{aA}	35.16±2.32 ^{bCA}	32.18±0.59 ^{cdBC}	29.77±1.85 ^{dB}
CUR0,04	36.09±1.59 ^{aB}	34.73±0.75 ^{abAB}	32.51±1.26 ^{bcAB}	30.93±0.99 ^{cB}

Letras minúsculas diferentes na mesma linha e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nos filmes contendo curcumina, a diminuição do Hue indica o deslocamento da coloração amarela para tons mais alaranjados, provavelmente em resposta à produção de compostos nitrogenados básicos voláteis, como amônia, dimetilamina e trimetilamina, formados durante a deterioração microbiana da carne (Bekhit et al., 2021). A formação desses compostos promove o aumento do pH no interior da embalagem, induzindo alterações estruturais na molécula de curcumina e, consequentemente, mudanças em sua coloração (Iqbal et al., 2024).

Paralelamente, verificou-se aumento significativo da diferença total de cor (ΔE) nos tratamentos contendo curcumina ao final do armazenamento (8 dias). O tratamento contendo

0,03% de curcumina apresentou a maior variação cromática ($\Delta E = 11,77$ em T4), indicando maior sensibilidade às alterações químicas decorrentes da deterioração da carne.

Por outro lado, o aumento da concentração de curcumina para 0,04% não resultou em incremento proporcional de ΔE . Esse comportamento pode estar relacionado à formação de aglomerados observada nas micrografias de MEV, decorrente da maior concentração do composto e da redução da sua dispersão na matriz de amido. Adicionalmente, o aumento de entalpia de fusão observados por DSC e a espessura constante dos filmes sugere maior restrição da mobilidade molecular da matriz, possivelmente associada ao efeito de preenchimento promovido pela nanoemulsão. Dessa forma, o contato da curcumina com os compostos voláteis foi limitado, diminuindo a eficiência da resposta colorimétrica.

Em relação ao chroma (C^*), observou-se redução gradual da saturação da cor nos filmes com curcumina, especialmente no tratamento 0,03CUR. A diminuição do chroma, juntamente com a redução do hue e o aumento do ΔE , indica alterações na intensidade e na tonalidade da cor, refletindo a deterioração da carne de frango. De modo geral, os resultados evidenciam a capacidade dos filmes com curcumina em responder às mudanças químicas durante o armazenamento, destacando a formulação com 0,03% de curcumina como a mais sensível colorimetricamente e promissora para aplicação em embalagens inteligentes para monitoramento da qualidade da carne de frango (Figura 8).

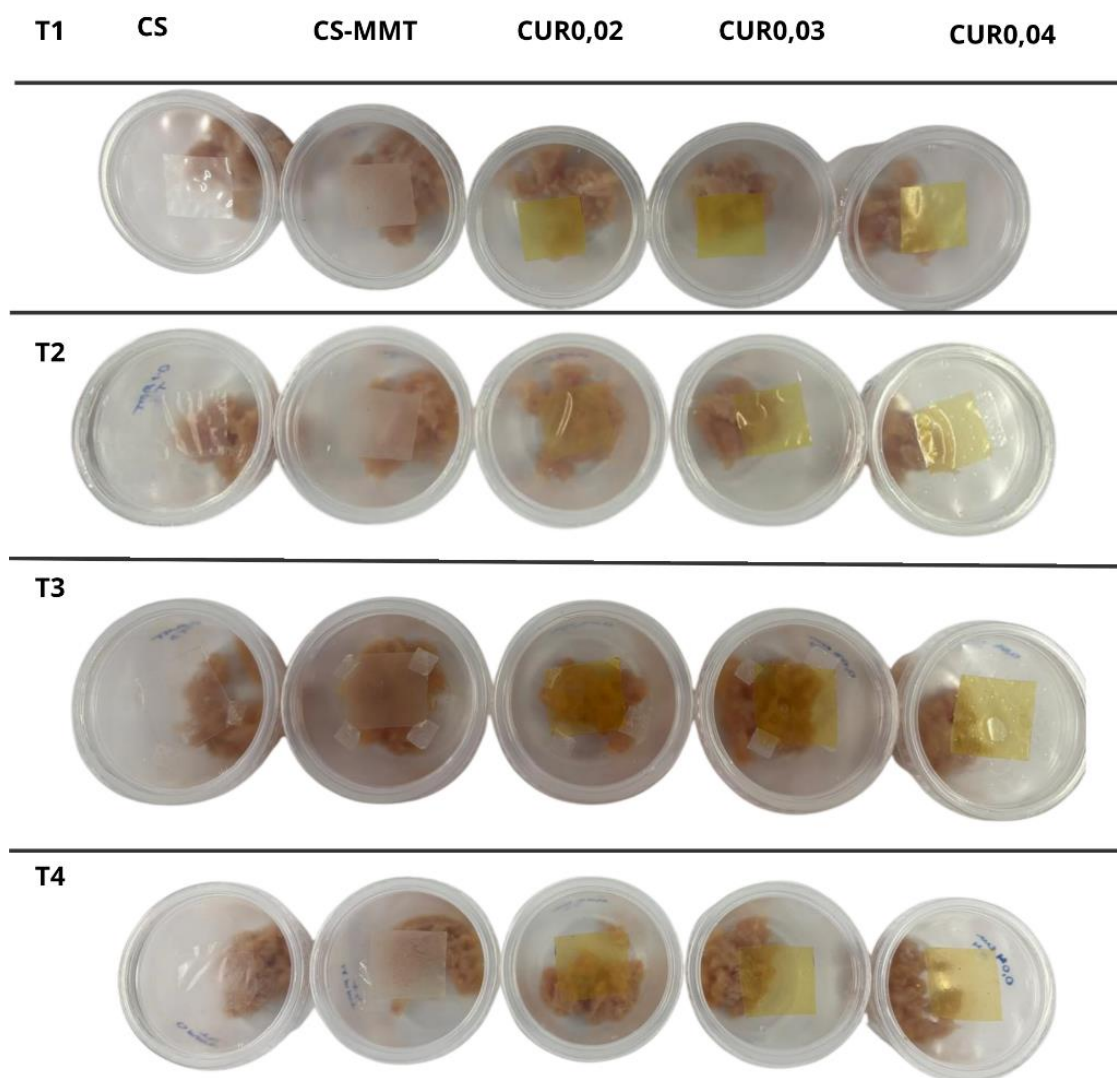


Figura 8 – Vista superior dos filmes de amido contendo montmorilonita (MMT) e nanoemulsão de curcumina aplicados sobre carne de frango para avaliação da resposta colorimétrica durante o armazenamento.

3.10.2 Correlação entre parâmetros colorimétricos e indicadores de deterioração

De modo geral, os resultados evidenciam a capacidade dos filmes contendo curcumina em responder às alterações químicas decorrentes do armazenamento, sendo a formulação contendo CUR0,03 a que apresentou maior sensibilidade colorimétrica e, consequentemente, maior potencial para aplicação em embalagens inteligentes para monitoramento da qualidade da carne de frango. Entretanto, para confirmar que essas alterações colorimétricas estavam efetivamente associadas à perda de qualidade do alimento,

foram avaliados os valores de pH e nitrogênio básico volátil total (TVB-N), apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores de pH e nitrogênio básico volátil total (TVB-N) de carne de frango embalada com filmes à base de amido contendo montmorilonita e diferentes concentrações de curcumina durante o armazenamento refrigerado.

Tempo	Tratamento	pH	TVB-N
T1	CS	5.38 ± 0.02	3.43 ± 0.47
	CS-MMT	5.56 ± 0.11	3.10 ± 0.33
	CUR0.02	5.60 ± 0.13	3.43 ± 0.26
	CUR0.03	5.55 ± 0.14	3.70 ± 0.25
	CUR0.04	5.50 ± 0.07	3.44 ± 0.21
T2	CS	6.63 ± 0.06	5.49 ± 0.69
	CS-MMT	6.72 ± 0.07	6.15 ± 0.14
	CUR0.02	6.80 ± 0.20	6.09 ± 0.66
	CUR0.03	7.03 ± 0.17	6.16 ± 0.43
	CUR0.04	7.06 ± 0.30	6.43 ± 0.20
T3	CS	7.94 ± 0.17	14.61 ± 0.44
	CS-MMT	8.02 ± 0.20	14.62 ± 0.64
	CUR0.02	8.13 ± 0.12	14.41 ± 0.02
	CUR0.03	8.16 ± 0.06	14.60 ± 0.40
	CUR0.04	8.32 ± 0.41	14.62 ± 0.28
T4	CS	8.65 ± 0.10	30.70 ± 0.20
	CS-MMT	8.54 ± 0.11	30.03 ± 0.62
	CUR0.02	8.63 ± 0.14	29.91 ± 0.43
	CUR0.03	8.52 ± 0.13	30.75 ± 0.23
	CUR0.04	8.61 ± 0.15	30.28 ± 0.48

- Os resultados são expressos como média ± desvio-padrão (n = 3).

Os valores de pH e TVB-N aumentaram progressivamente ao longo do armazenamento refrigerado, independentemente da formulação do filme, evidenciando o avanço do processo natural de deterioração da carne de frango. Em um mesmo período de armazenamento, não foram observadas diferenças expressivas entre os tratamentos, indicando que os filmes atuaram como sensores colorimétricos, sem influenciar a evolução desses parâmetros. Esse comportamento era esperado, uma vez que os filmes foram desenvolvidos para monitorar a deterioração por meio da resposta da curcumina aos

compostos voláteis alcalinos, e não para prolongar a vida útil do alimento. Assim, o aumento concomitante de pH e TVB-N confirma que as mudanças de cor observadas nos sensores acompanharam a formação desses compostos durante a degradação proteica da carne.

Também foi realizada a análise de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos dos filmes sensores e os valores de pH e TVB-N, com o objetivo de avaliar o grau de associação entre as respostas visuais dos filmes e a evolução da deterioração do produto (Tabela 9).

Tabela 9. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os parâmetros colorimétricos e o TVB-N para os filmes contendo curcumina.

Tratamento	Variável	pH	p-valor	TVB-N	p-valor
CUR0,02	Hue	-0.895	(p < 0.0001)	-0.813	(p = 0.0013)
CUR0,02	ΔE	0.665	(p = 0.0182)	0.489	(p = 0.1067)
CUR0,03	Chroma	-0.908	(p < 0.0001)	-0.614	(p = 0.0337)
CUR0,03	Hue	-0.875	(p = 0.0002)	-0.965	(p < 0.0001)
CUR0,03	ΔE	0.943	(p < 0.0001)	0.708	(p = 0.0100)
CUR0,04	Hue	-0.777	(p = 0.0029)	-0.981	(p < 0.0001)
CUR0,04	ΔE	0.934	(p < 0.0001)	0.653	(p = 0.0213)

A análise de correlação de Pearson demonstrou associação significativa entre os parâmetros colorimétricos dos filmes sensores e os indicadores de deterioração da carne de frango. O ΔE apresentou correlações significativas com o pH em todas as formulações contendo curcumina, com coeficientes variando de 0,665 a 0,943. Os maiores valores foram observados para os filmes contendo 0,03 e 0,04% de curcumina, indicando que o aumento da diferença total de cor acompanhou a elevação do pH da carne durante o armazenamento. Além disso, ΔE também apresentou associação significativa com os valores de TVB-N para as formulações 0,03 CUR (r = 0,708) e 0,04 CUR (r = 0,653), evidenciando que as alterações colorimétricas do filme refletiram o acúmulo de compostos nitrogenados voláteis produzidos durante o processo de deterioração microbiológica.

O parâmetro Hue apresentou forte associação inversa com pH e TVB-N em todos filmes sensores. As correlações mais expressivas foram observadas entre Hue e TVB-N para os filmes contendo CUR0,03 (r = -0,965) e CUR0,04 (r = -0,981), indicando redução

progressiva do ângulo Hue à medida que compostos básicos voláteis se acumulavam na embalagem. Esse comportamento demonstra a elevada sensibilidade da curcumina às alterações químicas do meio, uma vez que o pigmento sofre modificações estruturais em condições alcalinas, resultando em mudanças perceptíveis de tonalidade.

Entre as formulações avaliadas, o filme contendo 0,03% de curcumina apresentou o conjunto mais consistente de correlações significativas entre os parâmetros colorimétricos e os indicadores de deterioração. Esses resultados sugerem que essa concentração proporcionou elevada sensibilidade às alterações químicas associadas à perda de qualidade da carne de frango.

Resultados semelhantes foram relatados por (Choi et al., 2024), que observaram alterações progressivas nos parâmetros colorimétricos de filmes contendo curcumina durante o armazenamento de alimentos proteicos. Os autores verificaram redução dos valores de L^* e b^* , aumento de a^* e incremento de ΔE , associados ao aumento simultâneo do pH e dos valores de TVB-N decorrentes da deterioração microbiana. Segundo os autores, a produção de compostos nitrogenados voláteis modifica o ambiente químico da embalagem, promovendo alterações estruturais na molécula de curcumina e, conseqüentemente, mudanças na coloração do filme. Esse mecanismo corrobora os resultados obtidos neste estudo e confirma o potencial da curcumina como indicador natural para o monitoramento da qualidade e do frescor de produtos cárneos.

Dessa forma, as fortes correlações observadas entre os parâmetros colorimétricos e os indicadores de deterioração demonstram que os filmes desenvolvidos possuem potencial para aplicação como embalagens inteligentes destinadas ao monitoramento não destrutivo da qualidade de carne de frango.

3.10.3 Relação multivariada entre os parâmetros de deterioração e a resposta dos sensores

A análise de componentes principais (PCA) demonstrou que os dois primeiros componentes explicaram 89,75% da variabilidade total dos dados, indicando que a maior parte da informação experimental foi representada no plano bidimensional (Figura 9). O primeiro componente principal (PC1) explicou 51,10% da variância, enquanto o segundo componente (PC2) respondeu por 38,65%. A distribuição das variáveis evidenciou forte associação entre pH e nitrogênio básico volátil total (TVB-N), cujos vetores apresentaram direções semelhantes, indicando elevada correlação positiva. O parâmetro ΔE apresentou a

mesma tendência, demonstrando que o aumento da diferença total de cor acompanhou a elevação dos principais indicadores químicos de deterioração da carne.

Em contrapartida, o ângulo Hue (H°) apresentou orientação oposta à de pH, TVB-N e ΔE , indicando correlação negativa com esses parâmetros. Esse comportamento demonstra que, à medida que ocorreu o avanço da deterioração da carne, caracterizado pelo aumento de pH e TVB-N em decorrência da formação de compostos nitrogenados voláteis e substâncias alcalinas produzidas pela atividade microbiana e enzimática, houve redução dos valores de H° , refletindo a resposta colorimétrica dos filmes (Said; Sarbon, 2023).

Os resultados do PCA corroboram as análises de correlação de Pearson, confirmando que as alterações cromáticas dos filmes acompanharam de forma consistente as mudanças físico-químicas associadas à deterioração da carne de frango. Observou-se ainda uma tendência de separação das amostras em função do tempo de armazenamento e das formulações avaliadas, evidenciando a capacidade dos filmes em discriminar diferentes estágios de frescor. Entre as formulações, o filme contendo 0,03% de nanoemulsão de curcumina apresentou o desempenho mais promissor, por reunir elevada sensibilidade colorimétrica, forte associação com os indicadores de deterioração e propriedades físico-mecânicas adequadas, confirmando seu potencial para aplicação como sensor inteligente no monitoramento em tempo real da qualidade de carne de frango.

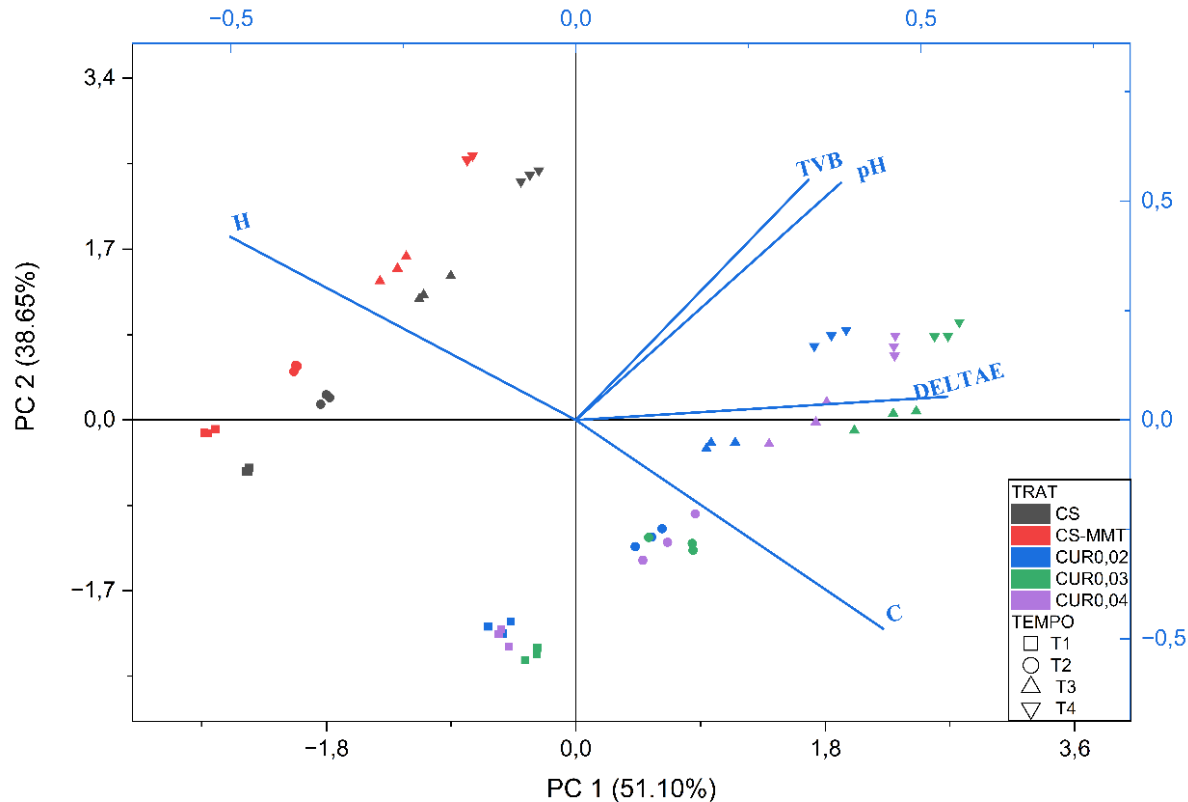


Figura 9: Análise de Componentes Principais (PCA) relacionando os parâmetros colorimétricos dos sensores (ΔE , C e H) e os indicadores de deterioração da carne de frango (TVB-N e pH) durante o armazenamento.

4. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade da produção de filmes compósitos à base de amido de banana-da-terra verde (*Musa paradisiaca* L.), montmorilonita (4%) e nanoemulsão de curcumina para aplicação em embalagens inteligentes. A incorporação da montmorilonita e da nanoemulsão de curcumina promoveu melhorias nas propriedades de barreira ao vapor de água, mecânicas, térmicas e na resistência à solubilidade em água, além de conferir sensibilidade colorimétrica às variações de pH, sem comprometer a biodegradabilidade dos filmes, que apresentaram degradação praticamente completa em aproximadamente oito dias.

Entre as formulações avaliadas, o filme contendo 0,03% de nanoemulsão de curcumina apresentou o melhor desempenho global, combinando propriedades físico-

químicas e mecânicas adequadas com elevada estabilidade térmica e maior capacidade de resposta colorimétrica às alterações químicas associadas à deterioração da carne de frango. Na aplicação como sensor inteligente, esse filme apresentou mudanças significativas nos parâmetros colorimétricos, especialmente ΔE e Hue, os quais exibiram forte correlação com os valores de TVB-N e pH, demonstrando elevada eficiência no monitoramento do frescor do alimento.

Dessa forma, os resultados confirmam que a combinação de amido de banana-da-terra verde, montmorilonita e nanoemulsão de curcumina constitui uma estratégia promissora para o desenvolvimento de embalagens inteligentes e sustentáveis, capazes de monitorar, de forma simples, visual, rápida e de baixo custo, a qualidade e o frescor de alimentos perecíveis, contribuindo para a redução do desperdício de alimentos e para o avanço de tecnologias de embalagem ambientalmente amigáveis.

REFERÊNCIAS

- Amin, U., Khan, M. U., Majeed, Y., Rebezov, M., Khayrullin, M., Bobkova, E., Shariati, M. A., Chung, I. M., & Thiruvengadam, M. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2184–2198. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.182>
- ASTM International. (2021). *Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0096_E0096M-21
- Aurelio, R.-H., Mextlisol, C.-V. S., Páramo-Calderón, D. E., Acevedo-Gómez, R., Gerardo, G.-G., Nolasco-Hipolito, C., Eduardo, B.-G. J., Carlos, C.-A. J., & Alejandro, A.-S. (2023). Functionality and characterization of modified starch films with pineapple leaf fibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125611. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125611>
- Bastioli, C. (1998). Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1–3), 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00156-0)
- Bekhit, A. E. A., Giteru, S. G., Holman, B. W. B., & Hopkins, D. L. (2021). Total volatile basic nitrogen and trimethylamine in muscle foods: Potential formation pathways and effects on human health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3620–3666. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12764>
- Calambas, H. L., Fonseca, A., Adames, D., Aguirre-Loredo, Y., & Caicedo, C. (2021). Physical-Mechanical Behavior and Water-Barrier Properties of Biopolymers-Clay Nanocomposites. *Molecules*, 26(21), 6734. <https://doi.org/10.3390/molecules26216734>
- Choi, I., Lee, J. Y., Lacroix, M., & Han, J. (2017). Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chemistry*, 218, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.050>

- Choi, Y. H., Kim, J. T., Kim, M. H., & Park, W. H. (2024). Biodegradable poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/curcumin composite film as a smart indicator of food spoilage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 408, 135511. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135511>
- de Almeida, N. T., Pereira, A. L. S., de Oliveira Barros, M., Mattos, A. L. A., & Rosa, M. de F. (2024). Enhancing Starch Film Properties Using Bacterial Nanocellulose-Stabilized Pickering Emulsions. *Polymers*, 16(23), 3346. <https://doi.org/10.3390/polym16233346>
- de Oliveira, J. P., de Almeida, M. E. F., Costa, J. da S. S., da Silva, I. B., de Oliveira, J. S., Oliveira, E. L., Landim, L. B., da Silva, N. M. C., & de Oliveira, C. P. (2025). Effect of eucalyptus nanofibril as reinforcement in biodegradable thermoplastic films based on rice starch (*Oryza sativa*): Evaluation as primary packaging for crackers. *Food Chemistry*, 474, 143177. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143177>
- Duan, M., Sun, J., Huang, Y., Jiang, H., Hu, Y., Pang, J., & Wu, C. (2023). Electrospun gelatin/chitosan nanofibers containing curcumin for multifunctional food packaging. *Food Science and Human Wellness*, 12(2), 614–621. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.064>
- Erna, K. H., Felicia, W. X. L., Rovina, K., Vonnice, J. M., & Huda, N. (2022). Development of curcumin/rice starch films for sensitive detection of hypoxanthine in chicken and fish meat. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 3, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100189>
- 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, 129200. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129200>
- Gontard, N., Ducheze, C., Cuq, J., & Guilbert, S. (1994). Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 29(1), 39–50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb02045.x>
- Ihalavithana, C. V., Madanayake, N. H., & Adassooriya, N. M. (2025). Montmorillonite nanoclay reinforced carboxymethyl cellulose/stearic acid modified TiO₂ nanocomposites for food packaging applications. *Journal of Food Science and Technology*, 62(12), 2303–2311. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06169-9>
- Iqbal, M. A., Gohar, S., Zhu, C., Mayakrishnan, G., & Kim, I. S. (2024). Eggshell membrane as a novel and green platform for the preparation of highly efficient and reversible curcumin-based colorimetric sensor for the monitoring of chicken freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, 131089. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131089>
- Jiang, Y., Ding, Y., Wang, D., Deng, Y., & Zhao, Y. (2020). Radio frequency-assisted enzymatic extraction of anthocyanins from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. flowers: Process optimization, structure, and bioactivity determination. *Industrial Crops and Products*, 149, 112327. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112327>
- Lacerda, S. M. P., Viana, E. B. M., Almeida, M. F., Cordeiro, M. J. M., José, A. R. S., Veloso, C. M., & de Oliveira, C. P. (2026). Microstructural organization and mechanical and barrier performance of montmorillonite-reinforced unripe banana starch films. *Materials Today Communications*, 56, 115969. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.115969>
- Li, X., Zhang, X., Lv, J., Zhang, X., Li, Y., Han, X., & Zhang, W. (2024). Development of starch-based films reinforced with curcumin-loaded nanocomplexes: Characterization and

- application in the preservation of blueberries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130464>
- Liu, D., Dang, S., Zhang, L., Munsop, K., & Li, X. (2021). Corn starch/polyvinyl alcohol based films incorporated with curcumin-loaded Pickering emulsion for application in intelligent packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 974–982. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.080>
- Liu, Q., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., Xiong, L., & Sun, Q. (2023). Incorporation of oxidized debranched starch/chitosan nanoparticles for enhanced hydrophobicity of corn starch films. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101032. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101032>
- Liu, Y., Liu, M., Zhang, L., Cao, W., Wang, H., Chen, G., & Wang, S. (2022). Preparation and properties of biodegradable films made of cationic potato-peel starch and loaded with curcumin. *Food Hydrocolloids*, 130, 107690. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107690>
- Madejová, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6)
- Malekzadeh, E., Tatari, A., & Dehghani Firouzabadi, M. (2024). Effects of biodegradation of starch-nanocellulose films incorporated with black tea extract on soil quality. *Scientific Reports*, 14(1), 18817. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69841-2>
- Maniglia, B. C., Silveira, T. M. G., & Tapia-Blácido, D. R. (2022). Starch isolation from turmeric dye extraction residue and its application in active film production. *International Journal of Biological Macromolecules*, 202, 508–519. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.145>
- Martucci, J. F., & Ruseckaite, R. A. (2009). Biodegradation of three-layer laminate films based on gelatin under indoor soil conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 94(8), 1307–1313. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.018>
- Mondal, K., Soundararajan, N., Goud, V. V., & Katiyar, V. (2024). Cellulose Nanocrystals Modulate Curcumin Migration in PLA-Based Active Films and Its Application as Secondary Packaging. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(26), 9642–9657. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c00518>
- Moorthy, S. N. (1991). Extraction of starches from tuber crops using ammonia. *Carbohydrate Polymers*, 16(4), 391–398. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(91\)90057-J](https://doi.org/10.1016/0144-8617(91)90057-J)
- Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). A Review on Reinforcements and Additives in Starch-Based Composites for Food Packaging. *Polymers*, 15(13), 2972. <https://doi.org/10.3390/polym15132972>
- Musso, Y. S., Salgado, P. R., & Mauri, A. N. (2016). Gelatin based films capable of modifying its color against environmental pH changes. *Food Hydrocolloids*, 61, 523–530. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.013>
- Nath, D., R, S., Pal, K., & Sarkar, P. (2022). Nanoclay-based active food packaging systems: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100803>
- Noorian, S., Mohammadi Nafchi, A., Bolandi, M., & Jokar, M. (2022). Effects of Nano-Titanium Dioxide and *Mentha piperita* Essential Oil on Physicochemical, Mechanical, and Optical Properties of Cassava Starch Film. *Starch - Stärke*, 74(9–10). <https://doi.org/10.1002/star.202200090>
- Qin, Y., Zhang, S., Yu, J., Yang, J., Xiong, L., & Sun, Q. (2016). Effects of chitin nano-whiskers on the antibacterial and physicochemical properties of maize starch films. *Carbohydrate Polymers*, 147, 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.095>

- Rachtanapun, P., Klunklin, W., Jantrawut, P., Jantanasakulwong, K., Phimolsiripol, Y., Seesuriyachan, P., Leksawasdi, N., Chaiyasong, T., Ruksiriwanich, W., Phongthai, S., Sommano, S. R., Punyodom, W., Reungsang, A., & Ngo, T. M. P. (2021). Characterization of Chitosan Film Incorporated with Curcumin Extract. *Polymers*, 13(6), 963. <https://doi.org/10.3390/polym13060963>
- Rech, C. R., da Silva Brabes, K. C., Bagnara e Silva, B. E., Bittencourt, P. R. S., Koschevic, M. T., da Silveira, T. F. S., Martines, M. A. U., Caon, T., & Martelli, S. M. (2020). Biodegradation of eugenol-loaded polyhydroxybutyrate films in different soil types. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100014>
- Roy, S., Priyadarshi, R., Ezati, P., & Rhim, J.-W. (2022). Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications - a comprehensive review. *Food Chemistry*, 375, 131885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131885>
- Said, N. S., & Sarbon, N. M. (2023). Monitoring the freshness of fish fillets by colorimetric gelatin composite film incorporated with curcumin extract. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 50, 102722. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102722>
- Sanchez, L. T., Pinzon, M. I., & Villa, C. C. (2022). Development of active edible films made from banana starch and curcumin-loaded nanoemulsions. *Food Chemistry*, 371, 131121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131121>
- Shuprajhaa, T., Paramasivam, S. K., Pushpavalli, S., Anandakumar, Su., & Naik, R. (2025). Influence of additives on the development, mechanical, functional characteristics and biodegradability of banana starch-based bio plastic films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139544. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139544>
- Singh, P., Kaur, G., Singh, A., & Kaur, P. (2023). Starch based bio-nanocomposite films reinforced with montmorillonite and lemongrass oil nanoemulsion: development, characterization and biodegradability. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(1), 527–545. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01635-4>
- Skowrońska, D., & Wilpiszewska, K. (2022). The Effect of Montmorillonites on the Physicochemical Properties of Potato Starch Films Plasticized with Deep Eutectic Solvent. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16008. <https://doi.org/10.3390/ijms232416008>
- Sueth-Santiago, V., Mendes-Silva, G. P., Decoté-Ricardo, D., & Lima, M. E. F. de. (2015). CURCUMIN, THE GOLDEN POWDER FROM TURMERIC: INSIGHTS INTO CHEMICAL AND BIOLOGICAL ACTIVITIES. *Química Nova*. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150035>
- Sun, Q., Xi, T., Li, Y., & Xiong, L. (2014). Characterization of Corn Starch Films Reinforced with CaCO₃ Nanoparticles. *PLoS ONE*, 9(9), e106727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106727>
- Vaezi, K., Asadpour, G., & Sharifi, S. H. (2020). Bio nanocomposites based on cationic starch reinforced with montmorillonite and cellulose nanocrystals: Fundamental properties and biodegradability study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.007>
- van Soest, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegthart, J. F. G. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201–214. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00270-7](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00270-7)

- Viana, E. B. M., Almeida, M. F., Cordeiro, M. J. M., Lacerda, S. M. P., José, A. R. S., Bonomo, R. C. F., de Souza, C. C. E., Santos, M. P. F., & Veloso, C. M. (2025). Eco-Friendly Bioplastic Film Produced With Green Plantain Starch (*Musa paradisiaca* L.): Effect of Activated Carbon Addition and Hydrothermal Modification. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.70669>
- Viana, E. B. M., Oliveira, N. L., Ribeiro, J. S., Almeida, M. F., Souza, C. C. E., Resende, J. V., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2022). Development of starch-based bioplastics of green plantain banana (*Musa paradisiaca* L.) modified with heat-moisture treatment (HMT). *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100776>
- Vieira, E. F., Amaral, T., Domingues, V. F., & Delerue-Matos, C. (2026). Hydrophobicity Strategies of Starch-Based Films: Recent Advances and Perspectives. *Polymers*, 18(4), 490. <https://doi.org/10.3390/polym18040490>
- Wang, W., Wu, L., Chang, L., Yang, W., Si, L., Nan, H., Peng, W., & Cao, Y. (2024). Functionality developments in montmorillonite nanosheet: Properties, preparation, and applications. *Chemical Engineering Journal*, 499, 156186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156186>
- Yadav, R., Purwar, R., & Bose, U. (2021). Studies of rheological, electrical, and optical properties of silk fibroin/Benzalkonium chloride modified MMT clay nanocomposite films. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4998–5004. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.424>
- Yang, Z., Chen, Q., & Wei, L. (2024). Active and smart biomass film with curcumin Pickering emulsion stabilized by chitosan-adsorbed laurate esterified starch for meat freshness monitoring. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275, 133331. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133331>
- Zhang, M., & Chen, H. (2023). Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123462>
- Zheng, B., & McClements, D. J. (2020). Formulation of More Efficacious Curcumin Delivery Systems Using Colloid Science: Enhanced Solubility, Stability, and Bioavailability. *Molecules*, 25(12), 2791. <https://doi.org/10.3390/molecules25122791>

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta tese demonstram que o amido de banana-da-terra verde constitui uma matriz polimérica promissora para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis destinados à aplicação em embalagens de alimentos. A incorporação de montmorilonita (MMT) mostrou-se uma estratégia eficiente para superar limitações inerentes aos filmes à base de amido, promovendo melhorias significativas nas propriedades mecânicas, de barreira e estruturais, sem comprometer seu caráter biodegradável. A formulação contendo 4% de MMT apresentou o melhor desempenho, evidenciando maior potencial para aplicações práticas.

A validação desse material como embalagem para tomates-cereja e mangas minimamente processadas demonstrou sua eficiência na preservação pós-colheita e da conservação da qualidade, reduzindo a perda de massa, retardando o amadurecimento e mantendo atributos físico-químicos importantes dos alimentos. O desempenho semelhante ao do policloreto de vinila (PVC) reforça o potencial do filme desenvolvido como alternativa sustentável aos materiais plásticos convencionais utilizados na indústria de alimentos.

Além disso, a funcionalização do filme otimizado com nanoemulsão de curcumina ampliou sua aplicação, conferindo-lhe características de embalagem inteligente. A combinação entre MMT e nanoemulsão de curcumina resultou em filmes com melhores propriedades mecânicas, ópticas e de barreira, além de sensibilidade às variações de pH e capacidade de indicar alterações associadas ao processo de deterioração da carne de frango por meio de mudanças colorimétricas correlacionadas aos valores de nitrogênio básico volátil total (TVB-N). Esses resultados evidenciam o potencial do material para o monitoramento em tempo real da qualidade e do frescor dos alimentos.

De forma integrada, esta tese demonstra que a combinação de amido de banana-da-terra verde, montmorilonita e nanoemulsão de curcumina possibilita o desenvolvimento de materiais biodegradáveis com propriedades adequadas para aplicações como embalagens ativas e inteligentes. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento sobre o uso de biopolímeros reforçados com nanomateriais e compostos bioativos, ampliando as possibilidades de substituição de polímeros sintéticos por alternativas renováveis e ambientalmente sustentáveis.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de estudos envolvendo a avaliação da estabilidade dos filmes em diferentes condições de armazenamento, testes em escala piloto e industrial, estudos de migração e segurança para contato com alimentos, bem como análises de viabilidade econômica e do ciclo de vida dos materiais desenvolvidos. Essas investigações poderão subsidiar a aplicação comercial dos filmes e contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para o setor de embalagens alimentícia.