



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE
MESTRADO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

FABIOLA BEATRIZ RETUERTO MELCHOR

**FILMES DE CARRAGENINA, CERA DE ABELHA E TiO_2 : PREPARAÇÃO,
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA CONSERVAÇÃO DE PINHAS**
(Annona squamosa)

MOSSORÓ

2024

FABIOLA BEATRIZ RETUERTO MELCHOR

**FILMES DE CARRAGENINA, CERA DE ABELHA E TiO_2 : PREPARAÇÃO,
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA CONSERVAÇÃO DE PINHAS**

(Annona squamosa)

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, do Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais do Semi-Árido

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Henrique de Lima Leite

Co-orientadora: Prof. Dra. Edna Maria Mendes Aroucha

MOSSORÓ

2024

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

RR439 Retuerto Melchor, Fabiola Beatriz.
f Filmes de carragenina, cera de abelha e TiO₂:
preparação, caracterização e aplicação na conservação
de pinhas (*Annona squamosa*) / Fabiola Beatriz
Retuerto Melchor. - 2024.
103 f. : il.

Orientador: Ricardo Henrique de Lima Leite.
Coorientadora: Edna Maria Mendes Aroucha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2024.

1. Nanopartículas. 2. Revestimentos. 3. Ata. 4.
Fotocatálise. 5. Dióxido de titânio. I. de Lima
Leite, Ricardo Henrique, orient. II. Mendes
Aroucha, Edna Maria, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FABIOLA BEATRIZ RETUERTO MELCHOR

**FILMES DE CARRAGENINA, CERA DE ABELHA E TIO₂: PREPARAÇÃO,
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA CONSERVAÇÃO DE PINHAS**

(Annona squamosa)

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, do Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais do Semi-Árido

Defendida em: 30 / 07 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Ricardo Henrique de Lima Leite, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Francisco Klebson Gomes dos Santos, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Elias Ariel de Moura, Prof. Dr. (UFRR)
Membro Examinador

Para minha avó Victoria e meu avô Francisco
(In Memoriam).

*A Deus, por me proteger e me guiar nessa jornada, e à minha mãe, ao meu pai e à minha
irmã, por estarem comigo, me apoiando e incentivando, apesar da distância.*

Eu dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me fazer apreciar mais a vida e por me dar forças para seguir em frente, ajudando-me a não perder o rumo durante essa nova experiência.

Aos meus pais, Marina e Fernando, e à minha irmã Rocío, que têm me incentivado e amado todos os dias para que eu possa alcançar meus objetivos e sonhos, eu os amo muito.

À minha avó Marina, ao meu avô Fernando, às minhas tias Isabel, Beatriz, Rosario, Ana e aos meus primos José e Jorge, que desejaram meu sucesso e sempre cuidaram de mim.

Ao meu coordenador e orientador Dr. Ricardo Leite, pela paciência e os conhecimentos compartilhados para poder realizar esta investigação com êxito.

À minha coorientadora, Dra. Edna Aroucha, por sua disposição, ensinamentos, preocupação e confiança em mim desde o primeiro dia em que nos conhecemos.

À Banca Examinadora, por contribuir com seu conhecimento e me dar as correções necessárias para melhorar meu trabalho.

À Professora Dra. Elis Moraes, por sua paciência e ajuda desde minha chegada ao Brasil.

Aos professores Dra. Diana Lunardi, Dr. Vitor Lunardi e Dra. Karoline Soares, pela compreensão, apoio e disposição em me ajudar sempre que precisei recorrer a eles.

Aos técnicos de laboratório, Dr. Francisco Leonardo Gomes de Menezes e Dr. José Gustavo Lima de Almeida, que me auxiliaram durante toda a pesquisa.

Aos amigos da turma do mestrado, especialmente Jeorgia Tavares, Enaira dos Santos, Janine Torres, Maicom de Oliveira e Andressa Pereira, que sempre me apoiaram e me estenderam a mão apesar da barreira do idioma.

Aos meus amigos estrangeiros que me fizeram sentir acompanhada durante o mestrado: Yansen Herrera, Franco Loyola, Carolina Ramirez, Deisy Rosero, Carlos Espinoza, Sandra Sotomayor, Terly Fuentes, Norlan Ramos e Ali Othman.

Aos meus amigos do Laboratório de Pós-colheita, Wedson da Silva, Luiz Queiroz, Lucas Perdigão, Jesus Santos, Vitória Araújo e Kaio Nunes, pelos conselhos e ajuda durante os experimentos.

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

E, por fim, gostaria de agradecer à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, à Assessoria de Relações Internacionais (ARI) e ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

“Don't be afraid of difficulties, the best comes out of them”.

Rita Levi-Montalcini

RESUMO

A pinha (*Annona squamosa*) é uma fruta com propriedades medicinais e nutricionais, com componentes bioativos, como vitaminas, minerais, compostos fenólicos e antocianinas. O fruto apresenta aroma e sabor peculiar, bem como vida útil pós-colheita curta, devido ao seu rápido processo de amadurecimento, necessitando do emprego de tecnologia apropriada para viabilizar a comercialização a mercados mais longínquos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma embalagem utilizando carragenina, cera de abelha e dióxido de titânio para prolongar o tempo de conservação das pinhas, utilizando luz ultravioleta, para manter sua qualidade. Na primeira etapa foram realizadas nove formulações de filmes (com adição de cinco repetições no ponto central) conforme um planejamento central composto com dois fatores (percentuais de cera de abelha e dióxido de titânio adicionados ao filme). A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para determinar a influência das concentrações nas propriedades físico-químicas, ópticas e mecânicas dos filmes. Os melhores resultados dos filmes nas propriedades de barreira foram obtidos para os filmes 6 e 7, com $10,36 \pm 1,37$ g mm/h k Pa m² e $11,38 \pm 0,41$ g mm/h k Pa m² para PVA, respectivamente; para solubilidade os filmes 2 e 7 com $55,76 \pm 3,84$ % e $56,18 \pm 1,95$ %, respectivamente; e para densidade os filmes 8 e 1 com $0,145 \pm 0,006$ e $0,112 \pm 0,002$, respectivamente. Nas propriedades mecânicas, para a resistência à tração foram os filmes 8 e 4, com $27,99 \pm 0,79$ MPa e $18,90 \pm 1,96$ MPa, respectivamente; para alongamento na ruptura foram os filmes 2 e 7 com $12,79 \pm 0,99$ % e $10,18 \pm 1,24$ %, respectivamente; e para o módulo de Young os filmes 7 e 2 com $56,84 \pm 14,98$ MPa e $67,95 \pm 10,15$ MPa, respectivamente. Conclui-se que, dependendo das concentrações de cera de abelha e TiO₂ utilizados em filmes de carragenina, pode-se influenciar significativamente os resultados das propriedades de barreira, ópticas e mecânicas. Em seguida, escolheu-se uma concentração média de cera de abelha e TiO₂ englobando os melhores resultados das propriedades, considerando-se principalmente os resultados de PVA, para diminuir a perda de água da pinha usando o filme como revestimento nos frutos. As seguintes formulações de filmes foram selecionadas: T1: Cera de abelha (0%) com TiO₂ (1,52%); T2: Cera de abelha (27,3%) com TiO₂ (1,52%) e T0: controle (sem revestimento). A segunda etapa consistiu no revestimento das pinhas e avaliação das características físico-químicas e sensoriais durante 12 dias, sob refrigeração, na presença e ausência de luz ultravioleta, a 15 ± 1 °C e 80 ± 1 % UR. Foi utilizado um delineamento fatorial de dois fatores, com três repetições por tratamento com três frutos por repetição para avaliar a taxa de respiração, e três repetições por tratamento com dois frutos por repetição no caso das demais avaliações. Observou-se para a qualidade pós-colheita, que o revestimento (T1) com 1,52 % TiO₂, em presença de luz UV, propiciou maior atraso na respiração dos frutos até o 5º dia e manteve as qualidades físico químicas e a aparência externa e interna por nove dias nas condições do armazenamento. Conclui-se que a mistura de carragenina e TiO₂ na presença de luz UV pode ser utilizada no futuro como recobrimento comestível na conservação de pinhas.

Palavras-Chave: nanopartículas; revestimentos; ata; fotocatalise; dióxido de titânio.

ABSTRACT

The sugar apple (*Annona squamosa*) is a fruit with medicinal and nutritional properties, with bioactive components such as vitamins, minerals, phenolic compounds and anthocyanins. The fruit has a peculiar aroma and flavor, as well as a short post-harvest shelf life due to its rapid ripening process, requiring the use of appropriate technology to enable it to be sold to more distant markets. The goal of this research was to develop packaging using carrageenan, beeswax and titanium dioxide to extend the shelf life of sugar apples, using ultraviolet light to maintain their quality. In the first stage, nine film formulations were made (with the addition of five repetitions at the central point) according to a central composite design with two factors (percentages of beeswax and titanium dioxide added to the film). The response surface methodology was used to determine the influence of the concentrations on the physical-chemical, optical and mechanical properties of the films. The best film results in terms of barrier properties were obtained for films 6 and 7, with 10.36 ± 1.37 g mm/h k Pa m² and 11.38 ± 0.41 g mm/h k Pa m² for PVA, respectively; for solubility, films 2 and 7 with 55.76 ± 3.84 % and 56.18 ± 1.95 %, respectively; and for density, films 8 and 1 with 0.145 ± 0.006 and 0.112 ± 0.002 , respectively. In terms of mechanical properties, films 8 and 4 had tensile strength of 27.99 ± 0.79 MPa and 18.90 ± 1.96 MPa, respectively; films 2 and 7 had elongation at break of 12.79 ± 0.99 % and 10.18 ± 1.24 %, respectively; and films 7 and 2 had Young's modulus of 56.84 ± 14.98 MPa and 67.95 ± 10.15 MPa, respectively. It can be concluded that, depending on the concentrations of beeswax and TiO₂ used in carrageenan films, the results of the barrier, optical and mechanical properties can be significantly influenced. A medium concentration of beeswax and TiO₂ was then chosen, encompassing the best results in terms of properties, mainly considering the PVA results, in order to reduce water loss from the sugar apple by using the film as a coating on the fruit. The following film formulations were selected: T1: Beeswax (0%) with TiO₂ (1.52%); T2: Beeswax (27.3%) with TiO₂ (1.52%) and T0: control (no coating). The second stage consisted of coating the sugar apples and evaluating their physicochemical and sensory characteristics for 12 days, under refrigeration, in the presence and absence of ultraviolet light, at 15 ± 1 °C and 80 ± 1 % RH. A two-factor factorial design was used, with three repetitions per treatment with three fruits per repetition to evaluate the respiration rate, and three repetitions per treatment with two fruits per repetition in the case of the other evaluations. In terms of post-harvest quality, it was observed that the coating (T1) with 1.52 % TiO₂, in the presence of UV light, led to a greater delay in fruit respiration up to the 5th day and maintained the physical-chemical qualities and external and internal appearance for nine days under storage conditions. It can be concluded that the mixture of carrageenan and TiO₂ in the presence of UV light can be used in the future as an edible coating for preserving sugar apples.

Keywords: nanoparticles; coatings; ata; photocatalysis; titanium dioxide.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação esquemática do Planejamento Central Composto utilizado na preparação dos filmes de carragenina, cera de abelha e dióxido de titânio.....35
- Figura 2 – Imagens do MEV da superfície e vista em seção transversal dos filmes com concentrações de (a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, (b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, (c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, (d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, (e) 20 % cera de abelha, (f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO₂, (g) 20 % cera de abelha + 2 % TiO₂, (h) 1 % TiO₂, (i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO₂.....46
- Figura 3 – Espectro de absorbância UV-Visível dos filmes (a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, (b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, (c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, (d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, (e) 20 % cera de abelha, (f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO₂, (g) 20 % cera de abelha + 2 % TiO₂, (h) 1 % TiO₂, (i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO₂.....48
- Figura 4 – Resultados das superfícies de respostas das avaliações (a) Densidade Aparente, (b) PVA, (c) Solubilidade, (d) L*.....51
- Figura 5 – Resultados das superfícies de respostas das avaliações (e) b*, (f) Resistência à Tração, (g) Alongamento na Ruptura e (h) Módulo de Young.....52
- Figura 6 – Foto dos filmes a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO₂, c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO₂, e) 20 % cera de abelha, f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO₂, g) 20% cera de abelha + 2 % TiO₂, h) 1% TiO₂, i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO₂.....50
- Figura 7 – Taxa de respiração (mg CO₂ Kg⁻¹ h⁻¹) de frutos de pinha com diferentes revestimentos com luz UV (A) e sem luz UV (B) durante o armazenamento a

	15 ± 1 °C e UR de 80 ± 1 %.....	57
Figura 8	– Fotos da aparência externa e interna da pinha com diferentes tratamentos em presença de luz UV durante os 12 dias de armazenamento a 15 ± 1 °C e 80 ± 1 %UR.....	65
Figura 9	– Fotos da aparência externa e interna da pinha com diferentes recobrimentos em ausência de luz UV durante os 12 dias de armazenamento a 15 ± 1 °C e 80 ± 1 % UR.....	66
Figura 10	– Resultados da aparência externa da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a 15 °C e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde a) Aceitação, b) Odor, c) Cor, d) Fungo.....	66
Figura 11	– Resultados da aparência externa da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a 15 °C e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde e) Manchas pretas, f) Brilho, g) Adesividade do filme.....	67
Figura 12	– Resultados da aparência interna da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a 15 °C e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde a)	

Escurecimento da polpa, b) Odor interno, c) Líquido na polpa, d)	
Podridão.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Composição (%) dos pontos experimentais utilizados no Planejamento Central Composto.....	36
Tabela 2	–	Parâmetros de espessura e opacidade dos filmes.....	47
Tabela 3	–	Resultados dos parâmetros físico-químicos da pinha com diferentes tratamentos com luz UV e sem luz UV a 15 ± 1 °C e UR de 80 ± 1 % depois de 12 dias de armazenamento.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

pH	Potencial hidrogeniônico
PVA	Permeabilidade ao vapor de água
TPVA	Taxa de permeabilidade ao vapor de água
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
SS	Sólidos solúveis
DPPH	Radical livre 2,2-difenil-1-picrylhydrazyl
UR	Umidade Relativa
UV	Ultravioleta
GRAS	Geralmente reconhecido como seguro
PM	Perda de massa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Poluição por plásticos e conservação de alimentos	20
2.1.1 Poluição por plásticos no meio ambiente	20
2.1.2 Embalagens plásticas usadas na conservação de alimentos e seu impacto ambiental	20
2.1.3 Uso de Luz UV-Visível na conservação de alimentos	21
2.2 Bioplásticos como alternativa aos plásticos convencionais	22
2.3 Embalagens bioplásticas, filmes e revestimentos	22
2.4 Biopolímeros e aditivos usados na obtenção de bioplásticos	24
2.4.1 Carragenina	24
2.4.2 Cera de abelha	25
2.4.3 Dióxido de titânio	25
2.5 Propriedades de filmes bioplásticos	26
2.5.1 Propriedades físico-químicas e de barreira	26
2.5.1.1 PVA e TPVA	26
2.5.1.2 Solubilidade	26
2.5.1.3 Densidade aparente	27
2.5.2 Propriedades ópticas	27
2.5.2.1 Cor	27
2.5.2.2 Opacidade	27
2.5.2.3 Espectro de absorção molecular no UV-Visível	28
2.5.3 Propriedades mecânicas de tração	28
2.5.3.1 Limite de resistência à tração	28
2.5.3.2 Módulo de elasticidade	29
2.5.3.3 Alongamento na ruptura	29
2.5.4 Morfologia de superfície – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	29
2.6 Pinha (<i>Annona squamosa</i>)	30
2.6.1 Características gerais e aspectos econômicos da pinha	30
2.6.2 Características fisiológicas e propriedades físico-químicas da pinha	30
2.6.3 Conservação pós-colheita da pinha	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Locais de realização dos experimentos	34
3.2 Materiais	34
3.3 Obtenção dos filmes mistos de carragenina/cera de abelha/TiO₂	34
3.3.1 Descrição do planejamento experimental usado na obtenção dos filmes	34
3.3.2 Preparo dos filmes mistos por moldagem (“casting”)	35
3.4 Caracterização dos filmes mistos de carragenina/cera de abelha/TiO₂	36
3.4.1 Obtenção das micrografias de superfície (MEV)	36
3.4.2 Medição da espessura	37
3.4.3 Determinação da opacidade	37

3.4.4 Obtenção dos espectros de absorção UV-Visível	37
3.4.5 Registro fotográfico dos filmes	37
3.4.6 Determinação dos parâmetros de cor (a^* , b^* e L)	37
3.4.7 Determinação da densidade aparente	38
3.4.8 Determinação da TPVA e PVA	38
3.4.9 Solubilidade	39
3.4.10 Determinação das propriedades mecânicas	39
3.4.11 Tratamento e análise estatística dos dados de caracterização dos filmes	40
3.5 Delineamento experimental do estudo de conservação pós-colheita da pinha	40
3.6 Obtenção, seleção, higienização e revestimento por imersão (“dipping”) dos frutos	41
3.7 Caracterização do comportamento pós-colheita da pinha	42
3.7.1 Determinação da taxa de respiração dos frutos	42
3.7.2 Determinação da perda de massa dos frutos	42
3.7.3 Determinação da firmeza	42
3.7.4 Determinação de sólidos solúveis (SS)	43
3.7.5 Determinação de fenólicos totais e atividade antioxidante	43
3.7.5.1 Determinação do total de fenóis	43
3.7.5.2 Atividade antioxidante	43
3.7.6 Análise sensorial dos frutos	44
3.7.8 Tratamento e análise estatística dos dados de pós-colheita da pinha	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Análise morfológica	44
4.2 Opacidade, Espessura e UV- Visível	46
4.3 Cor e registro fotográfico	49
4.4 Densidade Aparente	50
4.5 PVA	52
4.6 Solubilidade	53
4.7 Propriedades mecânicas	53
4.7.1 Resistência à tração	53
4.7.2 Alongamento na Ruptura	54
4.7.3 Módulo de Elasticidade	55
4.8 Efeitos dos recubrimientos sobre a qualidade da pinha com e sem luz ultravioleta	55
4.8.1 Taxa de respiração	55
4.8.2 Perda de Massa	58
4.8.3 Firmeza	60
4.8.4 Sólidos Solúveis Totais	61
4.8.5 Fenólicos Totais	61
4.8.6 Atividade antioxidante	62
4.8.7 Análise sensorial dos frutos	64
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são amplamente utilizados para o armazenamento de certos alimentos porque eles são: flexíveis, resistentes, leves, recicláveis e de baixo custo. Porém, sua principal desvantagem é que levam centenas de anos para se degradar, causando um grande impacto ambiental (Freitas *et al.*, 2020).

A degradação dos resíduos plásticos pode levar aproximadamente de 58 a 1.200 anos por meio de um processo que requer a interação de luz, oxigênio e micróbios (Tuuri; Leterme, 2023). À medida que se decompõem lentamente, esses se transformam em fibras, partículas ou filmes de tamanho inferior a 5 milímetros (mm), que são chamados de microplásticos (MP), e aqueles com tamanho inferior de 0,1 micrômetros (μm) são chamados de nanoplásticos (NP) (Cheng *et al.*, 2023).

Entre os impactos negativos da poluição plástica está a ingestão de plásticos nos mares pela fauna marinha, onde 44% das aves marinhas os consomem e 260 espécies são afetadas; podendo produzir o bloqueio físico dos sistemas digestivos, a bioacumulação de partículas de plástico e a biomagnificação de toxinas adsorvidas (Liu *et al.*, 2022a). Cheng *et al.* (2023) mencionam que os seres humanos estão constantemente expostos a microplásticos e nanoplásticos (MNPL), sendo que as principais vias pelas quais os MNPLs podem entrar no corpo humano são o trato digestivo, a inalação respiratória e a pele.

Uma tecnologia mais ecológica que tem sido usada como alternativa ao uso de embalagens plásticas convencionais para estender a vida útil de alimentos são as embalagens biodegradáveis e/ou comestíveis. Estas embalagens alternativas utilizam bioplásticos que podem ser de origem vegetal, microbiana - ácido polilático (PLA) e poli-hidroxialcanoatos (PHA), animal ou uma combinação destes, onde polissacarídeos, ceras e proteínas são os mais frequentemente utilizados (Assis; Britto, 2014; Villada; Acosta; Velasco, 2007).

Os revestimentos biodegradáveis e/ou comestíveis conseguem aumentar a vida útil do alimento e o protegem da umidade, gases e óleos (Hamann *et al.*, 2021). Além disso, podem ser aditivados com nanopartículas de diferentes materiais como TiO_2 , MgO , CaO e ZnO ; mas também com compostos naturais como óleos essenciais ou outros extratos naturais de plantas, e antioxidantes que podem migrar da embalagem para o alimento e aumentar sua vida útil (Raj *et al.*, 2021; Palou; Valencia-Chamorro; Pérez-Gago, 2015; Santos *et al.*, 2021).

A irradiação com luz UV pode ajudar na conservação de alimentos, sendo um método não térmico e econômico, pode eliminar a maior parte dos microrganismos e diminuir as perdas nutricionais dos alimentos que geralmente são processados termicamente, permitindo conservar a energia (Tchoukouang *et al.*, 2023). Os efeitos que podem ocasionar a luz UV na inativação

biológica dos microrganismos são a movimentação física de elétrons e a quebra de ligação no ácido desoxirribonucleico, o emparelhamento incorreto das bases de pirimidina do ADN na maioria dos microrganismos e danos às proteínas da membrana celular, assim como aos processos metabólicos críticos para a sobrevivência deles (Yin *et al.*, 2015). A luz UV-C (de onda curta), na pós-colheita, pode prolongar a vida útil e melhorar as qualidades dos frutos, assim como retardar e diminuir a taxa de respiração e produção do etileno, inibir o dano por frio em alguns frutos e induzir o metabolismo secundário produzindo fenóis, flavonoides e antocianinas (Zhou *et al.*, 2024).

Um polissacarídeo que pode ser utilizado na obtenção de bioplásticos é a carragenina - nome genérico para polissacarídeos sulfatados lineares de D-galactose e 3,6-anidro-D-galactose (Velasco; Forero, 2018). Esta é proveniente da extração de algumas espécies de algas vermelhas (Rhodophyta) e seu principal uso é como aditivo texturizante na indústria alimentícia (Tuvikene *et al.*, 2006). A carragenina, por ter propriedades de barreira ao vapor da água, proteção contra a luz, propriedades térmicas, hidrofobicidade da superfície e propriedades mecânicas únicas, é considerada como opção para uso na fabricação de embalagens para alimentos (Cheng *et al.*, 2022).

O dióxido de titânio (TiO_2) é uma substância usada frequentemente na indústria alimentícia como aditivo alimentar (E171) que melhora a textura, cor, estética e aumenta o tempo de vida útil dos alimentos, e no caso das embalagens de alimentos, melhora as propriedades mecânicas, reduz a hidrofiliabilidade, bloqueia os raios UV e atua como agente antimicrobiano (Menezes *et al.*, 2021).

Entre as características pelas quais o TiO_2 é usado estão sua natureza não tóxica, fácil controle, baixo custo, semicondutividade, atividade antimicrobiana (Jassal *et al.*, 2022), alta hidrofiliabilidade, atividade fotocatalítica, estabilidade térmica e química, ser inerte e ecologicamente correto (Chemiru; Gonfa, 2023).

A cera de abelha é usada na produção de revestimentos devido às suas propriedades lipídicas que servem como barreiras à umidade (Formiga *et al.*, 2019). Além da hidrofobicidade, flexibilidade e proporcionar brilho ao revestir alimentos, a cera de abelha tem propriedades antioxidantes e antibacterianas (Sharma; Saini, 2021).

A pinha, fruta do conde ou ata (*Annona squamosa* L.) pertence à família Annonaceae, cujos frutos apresentam polpa bastante apreciada para consumo *in natura* ou na forma processada (Kumari *et al.*, 2022). Vitamina B1, potássio, vitamina C e fibra dietética estão entre os componentes nutricionais mais importantes desta fruta (Kumar *et al.*, 2021a). Trata-se de um fruto climatérico, com elevada taxa de respiração e produção de etileno (Pareek *et al.*, 2011).

O armazenamento em temperatura de 15 a 20 °C possibilita um armazenamento seguro, sendo sua duração máxima de armazenamento de nove dias a 15 °C, que em comparação com a temperatura ambiente (25 a 28 °C) tem uma duração de três a quatro dias (Prasanna; Rao; Krishnamurthy, 2000).

Como mencionado por Reges *et al.* (2018), o amadurecimento de *Annona squamosa* pode ser retardado envolvendo os frutos com filmes de PVC, que atuam como uma barreira ao vapor de água, diminuir a taxa de respiração e perda de massa, cuja vida útil pode ser mantida até seis dias à temperatura máxima de 33,6 °C e mínima de 27,9 °C com 44 % UR, mas com formação de rachaduras na casca dos frutos. Também, Venkatram *et al.* (2016) acondicionaram *Annona squamosa* em sacos de polipropileno usando atmosfera modificada com diferentes concentrações de O₂ e CO₂, com ar e sem embalagem, obtendo uma vida útil mais longa com o tratamento com ar e com 3 % de O₂ + 5 % de CO₂ armazenados a 15 ± 1 °C.

Vale ressaltar que mais recentemente, técnicas inovadoras têm sido utilizadas para a conservação de frutos, como revestir a superfície das frutas com uma película de polímeros de polissacarídeos ou lipídios para manter o frescor é outra das várias aplicações de embalagem. Por exemplo, Qiu *et al.* (2022) testaram quitosana, pululana e cloreto de cálcio como coberturas em *Annona squamosa*, mostrando que os três materiais propiciaram um efeito protetor no fruto durante o armazenamento por 12 dias.

Sendo assim, o propósito deste trabalho foi desenvolver embalagens utilizando diferentes concentrações de carragenina, cera de abelha e dióxido de titânio para avaliar o impacto desses como revestimento de pinhas, na presença e ausência de luz ultravioleta, sob a vida útil dos frutos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Poluição por plásticos e conservação de alimentos

2.1.1 Poluição por plásticos no meio ambiente

Devido às características que possuem, como leveza, durabilidade e propriedades anticorrosivas, os plásticos alcançaram um uso constante em todos os aspectos de nossa vida diária (Han *et al.*, 2022).

Os plásticos se decompõem lentamente até se tornarem resíduos e, em seguida, as micropartículas resultantes (entre 1 mm e 1 µm) poluem o ambiente marinho. Estima-se que, até 2025, o oceano acumulará 1 tonelada de plástico para cada 3 toneladas de peixes e, até 2050, a massa de plásticos no oceano será maior do que a de peixes se o crescimento atual de seu uso continuar (Zanchetta *et al.*, 2021). Descobriu-se recentemente que os microplásticos estão presentes não apenas em animais, mas também em seres humanos, nos quais chegaram por meio das cadeias alimentares (Han *et al.*, 2022).

Entre os principais problemas do uso do plástico estão os quase 8 milhões de toneladas (Mt) de resíduos plásticos que são descartados no oceano devido à falta de planejamento e infraestrutura eficientes para o gerenciamento ideal desses resíduos e também a emissão de gases de efeito estufa (GEE) que ocorrem durante seu ciclo de vida, contribuindo com 15 % do total de emissões globais de carbono (Zanchetta *et al.*, 2021). Atualmente existem três rotas para o descarte de plásticos em todo o mundo: aterros sanitários, incineração e reciclagem, sendo que as duas primeiras são as mais usadas (Singh *et al.*, 2022).

2.1.2 Embalagens plásticas usadas na conservação de alimentos e seu impacto ambiental

As embalagens na indústria alimentícia são usadas porque melhoram o armazenamento, o transporte, o manuseio, a proteção e a preservação dos alimentos. As embalagens são compostas por polímeros convencionais à base de petróleo, devido às suas qualidades, como barreira a gases e umidade, transparência, resistência ao impacto, baixo custo, flexibilidade para a fabricação de sacos e envoltórios etc (Stoica *et al.*, 2020).

Apesar das vantagens mencionadas acima, os plásticos têm um impacto negativo no meio ambiente e na saúde humana devido à sua biorrecalcitrância e à presença de aditivos nas formulações para sua produção que, na tentativa de melhorar suas propriedades, em alguns casos fazem com que eles migrem para os alimentos durante o processamento e o armazenamento (Araújo *et al.*, 2022).

Por causa de sua baixa biodegradabilidade, as embalagens plásticas geram resíduos após o uso, contribuindo para 63% dos resíduos plásticos não ecológicos (Stoica *et al.*, 2020). Além

disso, não é possível reciclá-las quando contaminadas com substâncias orgânicas, gerando um acúmulo de plásticos (Mena-Martínez *et al.*, 2019).

Uma maneira de reduzir o impacto ambiental das embalagens plásticas é desenvolver materiais biodegradáveis alternativos. O desafio é reduzir o uso de plásticos não biodegradáveis e oriundos de fontes não renováveis na indústria e avaliar cuidadosamente o ciclo de vida desses materiais para entender seu impacto no meio ambiente e nos seres humanos (Jagoda; Gamage; Karunathilake, 2023).

2.1.3 Uso de Luz UV-Visível na conservação de alimentos

Os raios solares dividem-se em cinco tipos: raios X, ultravioleta, gama, infravermelhos e luz visível. A luz UV tem um comprimento de onda variando entre 10 nm a 400 nm e pode se dividir em UV-A (315 nm a 400 nm), UV-B (280 nm a 315 nm), UV-C (200 nm a 280 nm) e raios ultravioleta D a vácuo (100 nm a 200 nm). Os raios UV-C são bactericidas, destroem as células e eliminam a maior parte de microrganismos (mais efetivo à 254 nm), no caso dos raios UV-A e UV-B a taxa relativa de esterilização não é rápida (Yao; Chen; Fan, 2023).

O tempo de exposição é crucial para a eficácia da luz UV-C, no qual geralmente dura entre um e cinco minutos, sem elevar significativamente a temperatura do tecido nem causar deterioração. A eficácia também varia conforme a resistência do fruto ao tratamento, as características da sua superfície e a distancia do equipamento UV-C com o produto, devido que a intensidade diminui com a distância (Villarroel *et al.*, 2015). As altas concentrações de irradiação UV-C podem gerar um dano muito grave aos tecidos dos frutos, provocando murcha ou deterioração e diminuição do brilho, indicando uma aceleração da senescência (Sonntag; Liu; Neugart, 2023).

Fundo *et al.* (2019) avaliaram o efeito da irradiação de luz UV-C no suco de melão inoculado com esporos de *Listeria innocua* e *Alicyclobacillus acidoterrestris* e também avaliaram a presença de aeróbios mesófilos, bolores e leveduras, obtendo como resultados a inativação microbiana e a preservação da qualidade do suco. Sripong, Jitareerat e Uthairatanakij (2019) compararam o efeito da irradiação de luz UV-C e UV-B em mangostão (*Garcinia mangostana*) inoculados com *L. theobromae* em diferentes doses, resultando na luz UV-C como o melhor fungicida para evitar a podridão e manter a qualidade pós-colheita dos frutos em uma dose de 13 kJ m⁻².

2.2 Bioplásticos como alternativa aos plásticos convencionais

Considerados responsáveis por aproximadamente 1% da produção global de plásticos, os bioplásticos podem ser fabricados a partir de combustíveis fósseis ou a partir de polímeros de base biológica partindo-se de matérias-primas renováveis (Boisseaux *et al.*, 2023).

Espera-se que a demanda por bioplásticos aumente de 2,06 milhões de toneladas para mais de 7,5 milhões de toneladas em 2026, subindo para 1,33 milhão de toneladas até 2024. Os principais bioplásticos usados são misturas de amido, ácido polilático (PLA) e polihidroxialcanoatos (PHA) (Ali *et al.*, 2022). Os bioplásticos, assim como os plásticos convencionais, têm vantagens, por exemplo, os bioplásticos apresentam resistência a raios UV, termoplasticidade, boa capacidade de barreira a gases, biocompatibilidade, termoestabilidade, elasticidade, rigidez e hidrofobicidade (Costa *et al.*, 2023), menor consumo de combustível fóssil, menor pegada de carbono e, principalmente, biodegradabilidade (Ali *et al.*, 2022).

Os bioplásticos podem se decompor por meio de mecanismos microbianos e se desintegrar no solo, mas alguns têm baixa ou nenhuma degradabilidade, de modo que sua única forma de decomposição é por meio de altas temperaturas ou quando tratados em digestores municipais. Há também bioplásticos degradáveis que só podem se decompor em aterros sanitários ativos específicos sob condições de segurança definidas e testadas. Eles resultam na produção de metano, um gás de efeito estufa mais potente que o dióxido de carbono (Atiwesh *et al.*, 2021).

Apesar das desvantagens mencionadas acima, a produção de bioplásticos continua a crescer, levando a uma busca para melhorar suas propriedades, aplicações e os tipos de materiais a serem usados para sua produção, com pesquisas sendo realizadas visando o uso de matérias-primas abundantes como algas e resíduos de alimentos (Ali *et al.*, 2023).

2.3 Embalagens bioplásticas, filmes e revestimentos

As embalagens bioplásticas são aquelas embalagens que podem ser degradadas por microrganismos naturais, como fungos, bactérias e algas (Kale *et al.*, 2007), protegem os alimentos de danos químicos, físicos ou biológicos durante o armazenamento e o transporte, e fornecem informações ao consumidor sobre seu conteúdo, prazo de validade e formas corretas de armazenamento (Pauer *et al.*, 2019).

Os filmes são uma camada fina pré-processada e depois sobreposta ao alimento, podendo ser usados para fabricar invólucros, sacos ou sacolas. Os revestimentos comestíveis são formados diretamente na superfície do alimento (Díaz-Montes; Castro-Muñoz, 2021) e podem ser aplicados mediante imersão, pincelamento ou pulverização (Batista *et al.*, 2020).

Tanto filmes como revestimentos protegem também contra danos físicos, químicos e biológicos, evitam a perda de aroma e sabor, são antimicrobianos e antioxidantes, evitam a perda de oxigênio e umidade, aumentam o prazo de validade e proporcionam melhor manuseio dos alimentos (Gupta; Biswas; Roy, 2022), reduzem a descoloração do produto durante o armazenamento a frio, evitam o amarelamento e aumentam o brilho ao inibir efetivamente a oxidação (Bizymis; Tzia, 2021). A adição de alguns aditivos é necessária para melhorar as propriedades mecânicas e de barreira dos biopolímeros usados na obtenção de bioplásticos (Gupta; Biswas; Roy, 2022).

Para sua elaboração, são combinados diferentes componentes cujas propriedades permitem otimizar o resultado final do revestimento. Os revestimentos podem ser classificados da seguinte forma:

- Revestimentos a base de hidrocolóides: de origem animal, vegetal ou sintética, são polímeros hidrofílicos que funcionam como uma barreira para O_2 e CO_2 . Como agente gelificante, eles aumentam a estabilidade. Entre os principais hidrocolóides pode-se citar carboidratos e proteínas, tais como: amidos, celulose, quitosana, carrageninas, alginatos, pectinas, caseínas, albumina, proteína de soja, zeína, etc (Rosero; Espinoza-Montero; Fernández, 2020).
- Revestimentos a base de lipídios: são considerados boas barreiras à umidade e à perda de água, além de proporcionar mais brilho (Rosero; Espinoza-Montero; Fernández, 2020). Devido à sua baixa polaridade e baixa permeabilidade ao vapor de água, eles reduzem a desidratação do produto. Por serem hidrofóbicas, são mais frágeis e mais espessas. Os compostos mais comumente utilizados são cera de abelha, gordura de lã e ceras de lanolina de origem animal, ceras de carnaúba e candelila de origem vegetal, ésteres e amidas sintéticas e minerais (Palma; Pérez; Padilla, 2021).
- Revestimentos mistos: sua aplicação é em emulsão ou suspensão. Possuem características antioxidantes e estruturais, são semipermeáveis a CO_2 , O_2 e vapor de água, têm atividade antimicrobiana e produzem revestimentos transparentes e flexíveis (Rosero; Espinoza-Montero; Fernández, 2020). Eles são produzidos pela mistura de polissacarídeos, proteínas e/ou lipídios. O objetivo é melhorar as propriedades mecânicas e de permeabilidade ao vapor de água e/ou aos gases. As combinações mais comumente usadas são: carboidratos com lipídios, proteínas com polissacarídeos e proteínas com lipídios (Palma; Pérez; Padilla, 2021).

2.4 Biopolímeros e aditivos usados na obtenção de bioplásticos

Os bioplásticos podem ser classificados em três grupos: os de origem biológica e com potencial de biodegradabilidade, os produzidos a partir de recursos biológicos e renováveis, mas não biodegradáveis, e finalmente os que dependem de recursos biodegradáveis de origem fóssil. Os bioplásticos do primeiro grupo são o amido, a celulose, a proteína, a lignina e a quitosana, os do segundo grupo são o bio-PVC, o bio-PE, o bio-PP e o bio-PS, e os do último grupo são o succinato de polibutileno (PBS), policaprolactona (PCL) e poli(butileno-adipato-co-tereftalato) (PBAT). Os mais utilizados no mercado são à base de ácido polilático (PLA) e amido (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). Apesar de não estar entre os materiais de origem biológica mais utilizados, a carragenina tem-se mostrado uma possível candidata, além de um polímero sustentável e biodisponível, possui propriedades gelificantes e formadoras de filme (Mathew; Jaiswal; Jaiswal, 2024).

A utilização de lipídios tem sido considerada como um complemento à formação de bioplásticos devido à sua hidrofobicidade, devido que alguns polissacarídeos como o amido apresentam uma elevada hidrofiliabilidade, gerando uma baixa resistência à água. Entre os lipídios de maior destaque estão as ceras (abelha, carnaúba e candelilha) por apresentarem maior hidrofobicidade e que, juntamente com polímeros hidrófilos, permitem melhorar a sua propriedade de barreira ao vapor de água (Gao *et al.*, 2024).

A utilização de nanopartículas também está presente por melhorar as propriedades mecânicas, reduzir a afinidade pela água e a sua capacidade de alterar a taxa de biodegradação, o que pode acontecer mais rapidamente do que com polímeros puros (Ancy *et al.*, 2024). As nanopartículas mais utilizadas são: argilas organofílicas, à base de carbono (nanotubos e nanofibras de carbono e nanopartículas semelhantes a grafeno), nanocelulose, dióxido de titânio e prata (Carroccio *et al.*, 2022).

2.4.1 Carragenina

Derivada de algas vermelhas, a carragenina é um polissacarídeo sulfatado linear. É formada pela repetição de unidades dissacarídicas de β -D-galactopiranosose e α -galactopiranosose alternadas ou de 3,6-anidro- α -galactopiranosose. Possui propriedades biodegradáveis, biocompatíveis e gelificantes (Liu *et al.*, 2019). É formado por gelificação por meio de um processo de secagem moderado. Após a evaporação do solvente, as hélices duplas formam uma rede tridimensional, desenvolvendo um filme sólido (Lin *et al.*, 2018).

Existem vários tipos de carragenina, sendo a kappa, iota e lambda as mais comuns, com diferentes números e posições de grupos sulfato no dímero de galactose que constitui o mero

do biopolímero (Lin *et al.*, 2018). A κ -carragenina permite a formação de filmes, por si só, mas, devido à sua alta hidrofiliabilidade, suas propriedades mecânicas e de barreira ao vapor de água não são suficientemente altas, de modo que se busca a adição de outras substâncias, como extratos vegetais ou nanopartículas, para melhorar suas propriedades (Liu *et al.*, 2019).

2.4.2 Cera de abelha

O uso de lipídios para produzir revestimentos reduz a permeabilidade ao vapor de água, sendo a cera de abelha, um agente hidrofóbico composto de ésteres, álcool, hidrocarbonetos, ácidos graxos, etc (Pérez-Vergara *et al.*, 2020). As suas principais desvantagens quando usada em revestimentos são a fragilidade e a falta de homogeneidade (Reis *et al.*, 2018).

Como um biomaterial não tóxico e comestível, a cera de abelha misturada com ácido polilático ou quitosana é comumente usada no setor de alimentos e embalagens. Devido ao seu baixo custo, ela pode ser usada na produção de nanopartículas lipídicas sólidas (Shakeri; Razavi; Shakeri, 2019).

Os resultados obtidos com a adição de cera de abelha aos revestimentos são a redução da permeabilidade ao vapor de água (com redução da perda de peso nas frutas) e a melhoria das propriedades mecânicas (Pérez-Vergara *et al.*, 2020). Em um estudo realizado por Ochoa *et al.* (2017), a cera de abelha foi incorporada a filmes comestíveis de amido modificado, resultando em uma superfície de filme homogênea, redução da atividade de vapor de água, melhoria da flexibilidade, redução da fragilidade e melhoria da elasticidade, sem afetar sua espessura e opacidade. Brasil *et al.* (2022), adicionaram cera de abelha a revestimentos à base de hidroxipropilmetilcelulose, resultando em um aumento de dois dias na vida útil da pinha, mantendo a firmeza, baixa atividade de polifenoloxidase e peroxidase e baixo escurecimento da polpa. Oliveira *et al.* (2018) adicionaram cera de abelha a revestimentos à base de amido de milho, amido de mandioca e gelatina, o que resultou em melhoria da taxa de transmissão de vapor de água, aumento da elasticidade, diminuição da solubilidade e diminuição da perda de peso de goiabas.

2.4.3 Dióxido de titânio

O dióxido de titânio é usado na indústria alimentícia e farmacêutica porque é reconhecido como um material seguro (GRAS). Sua aplicação previne bactérias patogênicas por meio de efeitos antimicrobianos (Arezo *et al.*, 2020). Além de ser antimicrobiano, o dióxido de titânio permite a modificação de materiais, têm alta estabilidade química, alto desempenho fotocatalítico, biocompatibilidade (Qu *et al.*, 2019), têm propriedades estáveis,

dispersíveis, hidrofílicas, bloqueadoras de UV e excelente atividade de eliminação de etileno (Zhang *et al.*, 2019a).

Nanopartículas de TiO_2 têm sido usadas na preservação de alimentos, reparo de feridas e biossensores ou tratamento de poluição ambiental, mas também, no desenvolvimento de filmes de embalagem ativos (Zhang *et al.*, 2019a). São considerados seguros, pois baixa migração pode ocorrer da embalagem para o alimento (Zhang; Rhim, 2022c). Ao incorporar as nanopartículas de TiO_2 na elaboração de embalagens ativas melhora-se a hidrofobicidade e as propriedades mecânicas da matriz do biopolímero (Menezes *et al.*, 2024). Em presença de luz UV, o TiO_2 promove a fotodegradação do etileno (esgotamento do etileno) e apresenta atividade antimicrobiana, através da geração de *band gaps* que produzem radicais hidroxila e espécies reativas de oxigênio (ROS), os quais oxidam o etileno à CO_2 e água, conseguindo retardar a senescência e manter a qualidade dos frutos (Menezes *et al.*, 2024; Kaewklin *et al.*, 2018).

2.5 Propriedades de filmes bioplásticos

2.5.1 Propriedades físico-químicas e de barreira

2.5.1.1 PVA e TPVA

A permeabilidade ao vapor de água é a taxa de tempo de transmissão de vapor de água, sob condições específicas de temperatura e umidade, que passa por uma área de material plano com uma espessura unitária induzida pela diferença de pressão de vapor unitária entre duas superfícies específicas (ASTM E96, 1995), e a taxa de permeabilidade ao vapor de água é o fluxo constante de vapor de água em uma unidade de tempo através de uma área unitária de um corpo, normal a superfícies paralelas específicas, sob condições específicas de temperatura e umidade em cada superfície (ASTM E96-95, 1995).

2.5.1.2 Solubilidade

O valor da solubilidade é usado para determinar a capacidade de reter água. A alta solubilidade produzirá revestimentos comestíveis que se dissolvem facilmente, mas não têm a capacidade de reter água (Hatmi; Apriyati; Cahyaningrum, 2020).

A solubilidade está diretamente relacionada às propriedades estruturais da matriz (Kumar *et al.*, 2021b). Ela é considerada um parâmetro importante para a avaliação da resistência à solventes (álcalis, ácidos e água). Filmes produzidos com biopolímeros (proteínas e polissacarídeos), esses apresentam solubilidade elevada em água (Lisitsyn *et al.*, 2021). Os filmes com baixa solubilidade em água são recomendados para frutas com alta taxa de transpiração (Assis; Britto, 2014).

Um dos métodos para a produção de filmes comestíveis é o método de *casting* (moldagem), no qual a solubilidade dos aditivos e biopolímeros a serem utilizados é fundamental para se obter homogeneidade quando as moléculas interagem entre si (Hashemi; Khorshidian; Mohammadi, 2022).

A adição de nanopartículas de TiO_2 nos recobrimentos comestíveis biopoliméricos pode provocar uma ligeira redução da solubilidade, sugerindo que o TiO_2 interage mediante ligações de hidrogênio com os grupos hidrófilos do biopolímero, provocando nanocompósitos mais hidrofóbicos (Menezes *et al.*, 2021).

2.5.1.3 Densidade aparente

A densidade dos revestimentos comestíveis fornece informações sobre sua capacidade de formar barreiras. Quanto maior a densidade, melhor a barreira aos gases (Gaspar *et al.*, 2020). No método de revestimento por imersão, a densidade e a morfologia dos revestimentos podem ser afetadas por fatores como velocidade de extração, tempo de imersão, número de ciclos de revestimento por imersão, parâmetros da solução de revestimento e condições de secagem (Pham *et al.*, 2023).

2.5.2 Propriedades ópticas

2.5.2.1 Cor

As propriedades ópticas dos filmes ou revestimentos comestíveis influenciam a aceitação pelo consumidor dos alimentos embalados. Os parâmetros de cor dos revestimentos variam de acordo com as matérias-primas utilizadas, por exemplo, em polímeros, o índice de brilho e brancura aumenta à medida que óleos essenciais são adicionados às matrizes (Anis; Pal; Al-Zahrani, 2021).

Em muitos casos, é desejável que não haja cor nos filmes para não se alterar a aparência desejável do alimento, mas há casos em que se deseja alguma coloração, portanto, o uso de pigmentos naturais é uma opção. O uso de agentes bioativos naturais coloridos pode causar uma mudança de cor associada às mudanças nas propriedades do alimento e pode ser usado como marcador da qualidade deste (Chen *et al.*, 2021).

2.5.2.2 Opacidade

A opacidade e a transparência são diferentes para cada amostra devido à espessura, à concentração e à cor dos componentes. Para melhor visualização do produto, é preferível um filme com alta transparência, mas a exposição à luz pode levar à redução do prazo de validade

e à deterioração da qualidade do produto (Wang *et al.*, 2021).

A dispersão e a absorção das ondas de luz também determinam a opacidade, pois a adição de uma partícula ao filme fará com que a luz se disperse em uma determinada distância, dependendo do índice de refração relativo, do tamanho e da concentração da partícula. Quanto maior for a concentração da partícula e o contraste do índice de refração, maior será o grau de dispersão da luz. Para que os filmes pareçam transparentes, a concentração de partículas deve ser baixa ou ter o mesmo índice de refração que o filme ao redor. Quando as partículas têm menos de 40-50 nm de diâmetro, elas dispersam a luz fracamente, fazendo com que o filme pareça transparente (Chen *et al.*, 2021).

2.5.2.3 Espectro de absorção molecular no UV-Visível

A espectroscopia UV-visível é usada para ver os espectros que são formados devido à retenção de luz ultravioleta ou visível por compostos químicos, nos quais os elétrons são excitados quando recebem radiação ultravioleta, passando do estado de repouso para o estado energizado. A diferença de energia é a quantidade de radiação ultravioleta ou visível que é consumida (Jassal *et al.*, 2022).

Para determinar a transparência óptica de filmes ou revestimentos, a transmitância é usada como parâmetro e pode ser medida através de um espectrofotômetro UV-visível em uma faixa de 400 a 800 nm. Recomenda-se uma leitura em 600 nm, pois é o ponto médio da faixa visível, mas outros comprimentos de onda de 550, 660, 700 e 800 nm também têm sido usados. Como a transmitância é expressa como uma porcentagem, o valor aceito para materiais transparentes é de aproximadamente 80% de transmitância, sendo que nos materiais altamente transparentes as transmitâncias são superiores a 90% (Guzman-Puyol; Benítez; Heredia-Guerrero, 2022).

No caso de revestimentos comerciais para alimentos, a transmitância deve ser superior a 85% (Zhang *et al.*, 2022a). Em alguns casos é importante que os filmes tenham baixa transmitância de luz UV para estender sua vida útil dos alimentos, pois estes podem ser suscetíveis à degradação por ação deste tipo de radiação, como no caso de alimentos gordurosos que sofrem degradação oxidativa (Sukhija; Singh; Riar, 2018).

2.5.3 Propriedades mecânicas de tração

2.5.3.1 Limite de resistência à tração

É a tensão de tração máxima que um filme ou revestimento pode suportar (Davidović *et al.*, 2021) antes de ser cortado ou rompido (Hammam, 2019). O filme ou revestimento deve ser

mantido em ambas as extremidades com um dispositivo de resistência à tração e puxado até quebrar (Ma'ruf; Dewata, 2022).

Para materiais de embalagem, a resistência à tração deve ser superior a 4 MPa (Davidović *et al.*, 2021). Os filmes à base de proteínas têm baixa resistência à tração em comparação com outros polímeros, mas maior alongamento. Os polissacarídeos têm uma resistência à tração de 10-100 MPa (Hammam, 2019).

É necessária uma alta resistência à tração para que um filme possa suportar as tensões normais a que é submetido durante a aplicação, o transporte e o manuseio do produto, mantendo suas propriedades de barreira e integridade (Bourtoom, 2008).

2.5.3.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de Young (Arham *et al.*, 2018) reflete a rigidez que caracteriza um material (Rux *et al.*, 2023). Um valor alto do módulo indica um alto grau de rigidez do filme (Arham *et al.*, 2018).

Para a produção de revestimentos comestíveis, geralmente é adicionado um plastificante para proporcionar maior flexibilidade, já que os polissacarídeos sozinhos são quebradiços, frágeis e rígidos. A adição de plastificantes aumenta o volume intersticial da matriz, aumentando a mobilidade molecular e o grau de hidrofiliabilidade (Abe *et al.*, 2021).

2.5.3.3 Alongamento na ruptura

O alongamento na ruptura (ε %) é o aumento máximo no comprimento de um corpo de prova antes da ruptura (Davidović *et al.*, 2021). Um alto alongamento é desejável porque melhora a capacidade do filme de envolver e embalar alimentos (Kong; Degraeve; Pui, 2022).

O material usado na embalagem de alimentos deve ter um alongamento na ruptura de mais de 15 % (Davidović *et al.*, 2021). Kong, Degraeve e Pui (2022) mencionam que para ter maior flexibilidade e dificultar a quebra de filmes comestíveis, é necessário aumentar a concentração de plastificantes. Os polissacarídeos têm uma porcentagem de alongamento entre 1 e 8 % (Hammam, 2019).

2.5.4 Morfologia de superfície – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permite a visualização da seção transversal e das características morfológicas da superfície dos filmes, como a presença de porosidade, rugosidade, rachaduras, densidade e uniformidade. Essa análise é recomendada para filmes de compósitos (Lisitsyn *et al.*, 2021).

Geralmente, o procedimento é cortar uma parte dos filmes ou a superfície do fruto mais o filme para avaliar a seção transversal. Em seguida, eles são colocados em um suporte de alumínio e fixados com fita adesiva. O ouro é então aplicado às amostras para obter propriedades eletrocondutoras e, por fim, elas são submetidas a uma tensão de aceleração de 5 a 15 kV a uma distância de 10 mm (Lisitsyn *et al.*, 2021).

2.6 Pinha (*Annona squamosa*)

2.6.1 Características gerais e aspectos econômicos da pinha

A família Annonaceae compreende 2500 espécies, sendo que o gênero *Annona spp.* compreende 120, das quais 20 são cultivadas devido a seu grande interesse econômico. As espécies que são mais cultivadas são *Annona muricata* - graviola, *Annona reticulata* - condessa ou araticum, *Annona cherimola* – cherimoia e *Annona squamosa* – pinha, ata ou fruta-do-conde (Vega, 2013).

A *Annona squamosa* L., é uma espécie tropical endêmica, sua árvore pode atingir até 8 m, com casca marrom ou marrom-clara e folhas finas (Kumar *et al.*, 2021a). O fruto é conhecido popularmente como "pinha", "fruta do conde", "ata" ou "anona" (Moreira *et al.*, 2019), com peso médio de 326 g, possui polpa branca (Khodifad; Kumar, 2020). É ligeiramente granuloso, um pouco escorregadio, muito doce e macio (Shrivastava; Tripathi; Maurya, 2019). A sua produção concentra-se, principalmente, na região Nordeste do Brasil, nos Estados da Bahia (34 %), Pernambuco (17 %), Rio Grande do Norte (11 %) e Alagoas (11 %) (Ferreira *et al.*, 2021).

A disponibilidade da *Annona squamosa* é baixa durante o ano, pois é uma fruta sazonal. Na região semiárida brasileira pode crescer em altas temperaturas e, com o manejo adequado da irrigação e da floração, dessa maneira a sua produção pode ser programada para chegar ao mercado na época desejada para comercialização (Rodrigues *et al.*, 2018).

2.6.2 Características fisiológicas e propriedades físico-químicas da pinha

A pinha é um fruto tropical climatérico, com elevada taxa de respiração e etileno (Pareek *et al.*, 2011), com média de 104,23 mg de CO₂.Kg.h (Khodifad; Kumar, 2020) e produção de etileno de 2,38 [L kg⁻¹.h⁻¹ à 25 °C (Prasanna; Rao; Krishnamurthy, 2000). Apresenta boa fonte de nutrientes e fitoquímicos, incluindo fenólicos (Morais *et al.*, 2015; Du *et al.*, 2021).

A *Annona squamosa* contém entre seus principais componentes, por 100 g de porção comestível, 1,6 g de proteína, 0,9 - 6,6 g de fibra bruta, 0,5 - 0,6 g de gordura e 23,5 g de carboidrato, além de cálcio, fósforo, ferro, tiamina, riboflavina, ácido ascórbico e ácido nicotínico (Mahadevbhai; Patel, 2018). O seu valor calórico é quase o dobro do pêssego, da

laranja e da maçã (Khodifad; Kumar, 2020). Além disso, apresenta propriedades medicinais e nutricionais (Moura *et al.*, 2019). As propriedades medicinais incluem atividades antidiabética, antimicrobiana, antioxidante, inseticida, citotóxica (Dhanraj; Vennila; Dhanraj, 2020), anti-inflamatória, antidiarreica, anticonvulsiva e analgésica (Oliveira *et al.*, 2022).

É um fruto conhecido pelo seu elevado teor de sólidos solúveis (25 e 32 °Brix) (Mizobutsi *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2013), baixa acidez de 0,22 a 0,25 % (Dias *et al.*, 2003), com uma relação SS/AT variando de 15,19 a 24,40 (Bomfim *et al.*, 2014).

O valor do pH pode variar entre 3,81 e 5,72 e o conteúdo de vitamina C é igual ou superior a 25 mg/100 g. Para os compostos fenólicos, estima-se uma faixa entre 0,15 % e 0,18 % (Brandão; Santos, 2016). Em termos de peso, ela geralmente perde menos de 10 % durante os períodos pós-colheita em temperatura ambiente (25 °C) (Wongs-Aree; Noichinda, 2011).

2.6.3 Conservação pós-colheita da pinha

As frutas são altamente perecíveis pela presença de umidade alta (75 % - 95 %), respiração, transpiração, alta produção de etileno, processos enzimáticos e atividade dos microrganismos (Sharma *et al.*, 2024). Os frutos climatéricos, por apresentarem maior frequência respiratória e produção autocatalítica de etileno, têm como consequência, além do desenvolvimento precoce de características organolépticas que podem ser observadas na fase de maturação do fruto, como a diminuição de ácidos orgânicos e amido, e o aumento de açúcares solúveis, degradação e perda de vida útil do fruto (Garavito; Herrera; Castellanos, 2021).

A taxa respiratória é influenciada por fatores internos (cultivar, época, região de cultivo e estágio de maturação) e externos (temperatura, concentração de O₂ e CO₂ na embalagem) e pode ser determinada pela quantificação do oxigênio consumido e do dióxido de carbono produzido num ambiente fechado (González-Buesa; Salvador, 2019). Conseguindo determinar o consumo de O₂, produção de CO₂ e geração de vapor de água pela transpiração, podem-se estabelecer as condições de armazenamento ótimas para conservar a fruta mudando a temperatura, umidade relativa e concentração de gases na atmosfera (Garavito; Herrera; Castellanos, 2021).

O etileno atua como um hormônio vegetal que tem efeitos positivos e negativos, produzindo a aceleração da senescência, perda de clorofila, intensificação do amaciamento excessivo, e ou aceleração do endurecimento, perda de cor e o pardeamento, sendo importante o controle, durante o armazenamento, por oxidação, decomposição ou adsorção por métodos físicos ou químicos (Chiara *et al.*, 2015). Os métodos químicos atuam na via de biossíntese do

etileno ou a nível do receptor hormonal (Domínguez *et al.*, 2016).

O controle da temperatura e da atmosfera gasosa também ajudam a diminuir a produção e ação do etileno. Em ambientes fechados, como o armazenamento em câmaras frias, é preciso eliminar por completo o etileno. Uma opção é utilizar materiais fotocatalíticos ou revestimentos iluminados com luz UV, produzindo a oxidação do etileno, sendo o TiO₂ um dos mais utilizados devido a produção de agentes oxidantes que convertem os contaminantes orgânicos em CO₂ e vapor de água (Menezes *et al.*, 2024). A alta umidade, a temperatura ambiente ou baixa e as condições de ar normal e atmosfera modificada não afetam a atividade fotocatalítica do TiO₂ (Chiara *et al.*, 2015).

As baixas temperaturas, as quais são geralmente utilizadas no armazenamento pós-colheita de frutas, retardando a senescência (Wang *et al.*, 2018), produção de etileno, amaciamento, etc (Vincent; Mesa; Munné-Bosch, 2020). Por outro lado, o armazenamento em frio em algumas frutas, pode causar injúrias do frio, não permitindo manter sua qualidade, provocando a deterioração com temperaturas <12 °C, sendo uma solução o uso de recobrimentos comestíveis, nos quais o custo para sua produção é baixo e permitem prolongar o tempo de vida da fruta reduzindo os danos produzidos durante o armazenamento a frio (Andriani; Handayani, 2023), mantendo a sua qualidade organoléptica e nutricional ao atuar como barreira contra solutos e gases (Castro-Cegrí *et al.*, 2023), diminuindo os níveis de O₂ e aumentando o CO₂, conseguindo reduzir a respiração e a produção de etileno, retardando a maturação, amaciamento e mudanças na composição da fruta (Fagundes *et al.*, 2015).

A atmosfera modificada aumenta a vida útil de frutas e hortaliças e reduz sua perda de qualidade. É dividido em passivo e ativo, o passivo altera o ambiente gasoso que é produzido pela respiração e o ativo permite a adição e eliminação de gases (oxigênio e dióxido de carbono) nas embalagens dos alimentos. Para obter um bom resultado com esta tecnologia, é necessário conhecer a taxa de respiração e a taxa de transmissão de gases através das coberturas que envolvem a fruta (Fagundes *et al.*, 2015; González-Buesa; Salvador, 2019).

As alterações bioquímicas na pinha são mais intensas após a colheita (Gohlani; Bisen, 2012). Em geral, o fruto se deteriora rapidamente, permanecendo aceitável por dois a três dias em temperatura ambiente, sendo propensas ao amaciamento rápido (Ghasil *et al.*, 2022). A fruta é normalmente armazenada entre 15 a 30 °C produzindo uma maturação normal (Patil; Rao; Manasa, 2013; Venkatram; Bhagwan, 2013), mas a temperatura mais segura está entre 15 a 20 °C, com uma vida útil máxima a 15 °C (Venkatram; Bhagwan, 2013). Em temperaturas acima de 25 °C, é bastante propensa ao ataque por fungos e sob baixas temperaturas (10 °C) ocorre danos por frio como endurecimento e escurecimento da casca (Patil; Rao; Manasa, 2013).

Frutos de pinhas colhidos na maturidade fisiológica (200 a 300 g e cor de pele verde-opaca) foram avaliadas diariamente a 26 ± 2 °C e 60-70 % de umidade relativa por 4 dias, e observou-se uma vida útil não superior a 4 dias, conforme avaliaram Bolívar-Fernández *et al.* (2009). Em geral, a manutenção do fruto pós-colheita sob temperatura ambiente, há elevadas perdas pós-colheita (13-25 %) (Shrivastava; Tripathi; Maurya, 2019).

Há poucos estudos na literatura sobre a conservação pós-colheita da pinha para aumentar sua vida útil (Mizobutsi *et al.*, 2012), nesse sentido, algumas alternativas sustentáveis têm sido estudadas, como o uso de revestimentos comestíveis (Patidar *et al.*, 2021). Essas atuam como barreira contra gases e, permitem a redução da transpiração, e dependendo da composição filmogênica podem apresentar ação antimicrobiana (Patidar *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o revestimento a base de sagu (10 %) possibilitou um aumento de oito dias na vida de prateleira, em comparação aos frutos controle, em temperatura ambiente, conservando sua qualidade retardando a perda de massa e aumentando a concentração de sólidos solúveis pela desaceleração do metabolismo de carboidratos (Gohlani; Bisen, 2012). Enquanto, usando-se o revestimento com goma xantana (4 %) a qualidade foi mantida até 28 dias a 8 °C, retardando a perda de massa, mantendo a firmeza e sólidos solúveis (Minh *et al.*, 2019a). Wang *et al.* (2023a) ao recobrir as pinhas com quitosana e ácido ascórbico a 15 ± 1 °C por 12 dias conseguiram retardar a diminuição da firmeza, perda de massa, acidez titulável, deterioração da aparência e retenção de sólidos solúveis.

Apesar das embalagens comestíveis e biodegradáveis criarem uma barreira a gases (O₂, CO₂ e vapor de água), diminuem o metabolismo do fruto, atividade microbiana e prolongarem a vida útil dos frutos sob refrigeração (Minh *et al.*, 2019b; Paiva *et al.*, 2020); o uso de biopolímeros específicos de forma isolada, associado e compósitos pode influenciar as características de barreira, mecânica e físico-químicas dessas embalagens (Nor; Ding, 2020; Kocira *et al.*, 2021) e impactar de forma positiva na conservação dos frutos. Nesse quesito, observa-se pouca e/ou nenhuma informação na literatura sob o uso de compósitos – associação biopolimérica e lipídio como revestimento comestível e/ou sacolas biopoliméricas nas características de qualidade e conservação pós-colheita de pinha.

Sabendo da grande exigência dos consumidores quanto à qualidade dos produtos, o tempo de comercialização dos produtos, a busca da diminuição da utilização de plásticos e a necessidade de se evitar perdas alimentares, é importante o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que possibilitem aumentar a vida útil dos frutos, para que diminuam as perdas desde a pós-colheita até sua chegada ao consumidor.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Locais de realização dos experimentos

A elaboração deste trabalho se dividiu em duas etapas. A primeira foi a obtenção e a caracterização dos filmes de carragenina com cera de abelha e nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2). A segunda etapa foi a avaliação dos filmes na conservação da *Annona squamosa* durante o armazenamento.

Todas as análises foram realizadas na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, no campus de Mossoró, nos Laboratórios de Processos Químicos, Pós-colheita, de Microscopia Eletrônica de Varredura e no de Ensaio Mecânicos.

3.2 Materiais

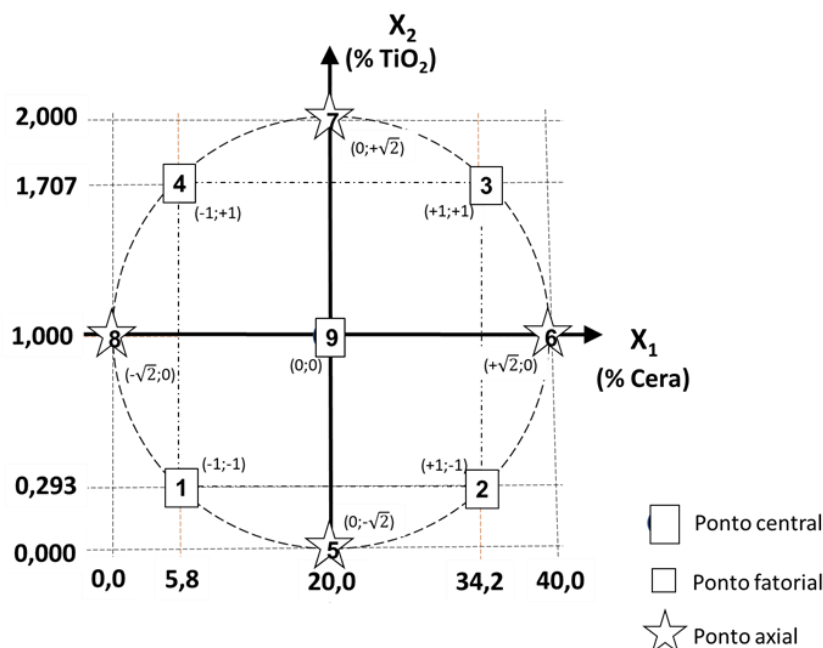
Foram utilizados carragenina em pó (grau alimentício, NCM: 1302. 3910), glicerol (Vetec, Sigma-Aldrich Brasil LTDA), tween 80 (Dinâmica, Química Contemporânea Ltda, Brasil), cera de abelha (índice de saponificação de 93,19 mg) e nanopartículas de TiO_2 (anatase, tamanho de partícula < 25 nm, pureza 99,7 %, Sigma-Aldrich Brasil Ltda).

3.3 Obtenção dos filmes mistos de carragenina/cera de abelha/ TiO_2

3.3.1 Descrição do planejamento experimental usado na obtenção dos filmes

Foi empregado um Planejamento Composto Central com dois fatores, conforme apresentado na Figura 1. Os cálculos foram realizados a fim de se preparar uma mistura filmogênica com 2,5 % de matéria seca (MS) contendo carragenina (% definida no planejamento), 20 % de glicerol (em relação à massa de biopolímero), 10 % de tween 80 (tensoativo) (em relação à massa de cera), cera de abelha (% definida pelo planejamento) e TiO_2 (% segundo o planejamento). A Tabela 1 apresenta os valores dos percentuais de cada componente para cada ensaio de preparação de filmes. Os fatores do planejamento central composto foram: X_1 (% cera) e X_2 (% TiO_2). Foram realizados 13 ensaios, sendo cinco destes, repetições no ponto central – ponto 9 – usados para determinação do erro experimental (Figura 01).

Figura 1 – Representação esquemática do Planejamento Central Composto utilizado na preparação dos filmes de carragenina, cera de abelha e dióxido de titânio.



Autoria própria (2024)

3.3.2 Preparo dos filmes mistos por moldagem (“casting”)

Para a preparação dos filmes, os materiais foram primeiramente pesados em uma balança analítica (ACCULAB, Brasil). Três béqueres foram separados com diferentes materiais; o primeiro béquer com carragenina, glicerol e água (mistura hidrofílica); o béquer 2 com TiO_2 e água (Xavier *et al.*, 2020; Noorian *et al.*, 2022) e; por fim, o béquer 3 (hidrofóbico) com cera de abelha e tween 80. Para iniciar o procedimento, o béquer 1 foi colocado em um agitador magnético com aquecimento (marca Solab, Brasil) em agitação constante até atingir $80\text{ }^\circ\text{C}$ (Larotonda *et al.*, 2016; Duan *et al.*, 2021); depois o béquer 2 foi colocado junto com o béquer 1 no agitador para aquecer por alguns minutos e, em seguida, procedeu-se a adição da solução do béquer 2 no béquer 1, um pouco de cada vez. Posteriormente, o béquer 3 foi colocado para aquecer por alguns minutos e, em seguida, procedeu-se à passagem com uma pipeta de Pasteur da solução do béquer 1 para o béquer 3, gota a gota, deixando-a homogeneizar e aquecer até $84 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. A solução foi deixada esfriar até $53 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$; toda a mistura foi transferida para uma placa de acrílico de $15 \times 15 \times 1\text{ cm}$ e deixada esfriar à temperatura ambiente ($25\text{ }^\circ\text{C}$) até ficar gelatinosa. Ela foi colocada na estufa (TE-394/2, Tecnal - Brasil) a $50\text{ }^\circ\text{C}$ até secar e, por fim, foi deixada em repouso sobre uma bancada por alguns minutos e, com a ajuda de uma pinça, o filme foi removido.

Tabela 1- Composição (%) dos pontos experimentais utilizados no Planejamento Central
Composto

Ensaio N°	Carragenina %	Glicerol %	Tween %	Cera de abelha%	TiO ₂ %
1	77,77	15,55	0,58	5,80	0,29
2	51,74	10,35	3,42	34,20	0,29
3	50,56	10,11	3,42	34,20	1,71
4	76,59	15,32	0,58	5,80	1,71
5	65,00	13,00	2,00	20,00	0,00
6	45,83	9,17	4,00	40,00	1,00
7	63,33	12,67	2,00	20,00	2,00
8	82,50	16,50	0,00	0,00	1,00
9 (C)	64,17	12,83	2,00	20,00	1,00
9 (C)	64,17	12,83	2,00	20,00	1,00
9 (C)	64,17	12,83	2,00	20,00	1,00
9 (C)	64,17	12,83	2,00	20,00	1,00
9 (C)	64,17	12,83	2,00	20,00	1,00

Planejamento Composto Central com dois fatores com 2,5 % de matéria seca (MS) contendo carragenina (%definida no planejamento), 20 % de glicerol (em relação à massa de biopolímero), 10 % (em relação à massa de cera) de tween 80 (tensoativo), cera de abelha (% definida pelo planejamento) e TiO₂ (% segundo o planejamento). Fonte: Autoria própria (2024).

3.4 Caracterização dos filmes mistos de carragenina/cera de abelha/TiO₂

3.4.1 Obtenção das micrografias de superfície (MEV)

No caso da análise de microscopia de superfície, a metodologia foi estabelecida de acordo com Xavier *et al.* (2020) e Menezes *et al.* (2021) com algumas modificações. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (Modelo VEGA 3). Foram utilizados os filmes após ruptura nos ensaios mecânicos. A seção transversal obtida após a fratura resultante dos ensaios mecânicos de tração e a superfície dos filmes foram avaliadas. Os filmes foram revestidos previamente com uma camada de ouro de 8 nm, por metalização durante 5 minutos a 30 mA para conferir condutividade elétrica, utilizando-se para tanto de um metalizador a vácuo (Quorum Tech Q150R). Em seguida, eles foram fixados em suportes de alumínio para o microscópio. Para a avaliação da superfície fraturada, foi usada uma tensão de 30 kV e magnitude de 5 kx, e para a seção transversal, foi usada uma tensão de 30 kV e magnitude de 500x. Em ambos os casos, o espaçamento foi de 15 mm.

3.4.2 Medição da espessura

A espessura do filme foi realizada com um micrômetro digital (Shahe, China). Dez pontos aleatórios tomaram-se e a média dos resultados foi calculada de acordo com a metodologia de Rukmanikrishnan *et al.* (2020).

3.4.3 Determinação da opacidade

Para determinar a opacidade foi seguida a metodologia de Roufegarinejad (2022) usando um espectrofotômetro UV-Visível (EVO-600PC, Thermo Scientific) seguindo a Equação 1. Foram realizadas as medições em triplicata para cada amostra.

$$\text{Opacidade} = \frac{A_{600}}{d} \quad (1)$$

A_{600} : Absorbância 600 nm

d: Espessura do filme

3.4.4 Obtenção dos espectros de absorção UV-Visível

Foi realizada de acordo com a metodologia empregada por Oleyaei *et al.* (2016) usando um espectrofotômetro UV-Visível (EVO-600PC, Thermo Scientific). Foi feita uma varredura de 200 a 800 nm, na qual o filme foi colocado diretamente na célula de teste do espectrofotômetro.

3.4.5 Registro fotográfico dos filmes

Foram tomadas fotos dos filmes com fundo preto e branco para melhor visualização e comparação dos materiais obtidos com diferentes formulações.

3.4.6 Determinação dos parâmetros de cor (a^* , b^* e L^*)

Para a determinação dos parâmetros de cor foi seguida a metodologia de Pires *et al.* (2013) e Oleyaei *et al.* (2016). Foi usado um padrão de fundo branco (L^* : 81.1, a^* : 5.9, b^* : 8.7) para colocar os filmes e fazer as medições para obter os valores parâmetros de cor no sistema CIELab: vermelho/verde (a^*), amarelo/azul (b^*) e luminosidade/brilho (L^*) utilizando um colorímetro portátil (Konica Minolta Sensing Inc. Japan). As Equações 2, 3 e 4 foram usadas para determinar a variação da cor dos filmes (ΔE), o índice de brancura (WI) e índices de

amarelo (YI):

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

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (3)$$

$$YI = \frac{142.86 \times b}{L} \quad (4)$$

3.4.7 Determinação da densidade aparente

A densidade aparente foi determinada segundo uma metodologia adaptada de Liu e Liu (2022) onde as amostras dos filmes foram cortadas no mesmo tamanho (3x3 cm) e a espessura (d) foi medida com um micrômetro digital (Shahe, China) em 5 pontos, no centro da amostra e 4 pontos ao redor do centro. A média das medições foi calculada. As medições foram repetidas cinco vezes para cada amostra de filme. A massa (m) foi pesada em uma balança analítica e a área da amostra (s) também foi calculada. A densidade foi determinada com a Equação 5:

$$\rho = \frac{m}{s \times d} \quad (5)$$

Onde:

ρ : Densidade aparente

d: Espessura

m: Massa

s: Área da amostra

3.4.8 Determinação da TPVA e PVA

A permeabilidade ao vapor de água e a taxa de permeabilidade ao vapor de água foram determinadas em triplicata pelo método de gravimetria, pelo padrão da norma ASTM E96-95 (1995), seguindo a metodologia utilizada por Oliveira *et al.* (2017) e Xavier *et al.* (2020). Os filmes cortados em círculos foram colocados em cápsulas de permeabilidade contendo 6 mL de água destilada e colocados em um dessecador com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 50 %. A cada hora, a cápsula foi pesada em uma balança analítica, com nove pesagens no total. Foram calculadas através da Equação 6 e 7:

$$PVA = \frac{TPA \times e}{\Delta P} \quad (6)$$

$$TPVA = \frac{w}{A \times t} \quad (7)$$

Onde:

TPVA: Taxa de permeabilidade ao vapor de água

e: média das espessuras

ΔP : diferença de pressão

w/t: taxa de perda de massa calculada por regressão linear entre os pontos de ganho de peso e tempo, no regime constante

A = área de permeação

3.4.9 Solubilidade

O procedimento usado na determinação da solubilidade foi baseado nas metodologias de Marium *et al.* (2021) e Oliveira *et al.* (2017) com pequenas modificações. Pedacos quadrados de 3x3 cm foram cortados para cada amostra e secos na estufa (TECNAL) a 105 °C por 2 horas.

Esses corpos de prova foram deixados esfriar por 20 minutos a 25 °C e pesados em uma balança analítica para determinar o peso inicial (W_1). Em seguida, os filmes foram colocados sob agitação constante (60 rpm) em frascos contendo 50 mL de água destilada por 24 horas a 23 °C. Em seguida, foram filtrados com o auxílio de papel de filtro e secos em estufa a 105 °C por 2 horas. Por fim, foram pesados para determinar o peso final (W_2) com a Equação 8:

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (8)$$

3.4.10 Determinação das propriedades mecânicas

Para os testes de resistência à tração (TS), alongamento na ruptura (EAB) e o módulo de elasticidade ou módulo de Young, foi considerada como referência a norma ASTM método D882-83. Os testes foram realizados em triplicata usando uma máquina de teste universal (DL10000 NO: 9718 NS: 319, EMIC) a uma velocidade de 5 mm/min com uma força total de 5 kN (Oliveira *et al.*, 2017).

Os filmes foram cortados em tiras de 50 mm de comprimento e 25,4 mm de largura, com espessura máxima de 0,25 mm. O resultado foi obtido com a fórmula de SORIN (Lapa *et al.*, 2021; Praseptianga *et al.*, 2021; Avramescu *et al.*, 2020) segundo a Equação 9 e 10. O Módulo de Young (Equação 11) foi o valor específico da tensão normal (MPa) e da deformação

normal (Zhang *et al.*, 2022b; Ryosuke *et al.*, 2023).

$$TS \text{ (MPa)} = \frac{F_{max}}{E \times W} \quad (9)$$

Onde:

F_{max} : resistência máxima à tração na ruptura(N)

E: espessura do filme (mm)

W: largura do filme(mm)

$$EAB \text{ (\%)} = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

L: Comprimento inicial do filme (mm)

ΔL : Diferença entre o comprimento final e o inicial do filme (mm)

$$\text{Módulo de Young (\%)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

Onde:

σ : Tensão normal (MPa)

ε : Deformação (%)

3.4.11 Tratamento e análise estatística dos dados de caracterização dos filmes

Os dados foram analisados utilizando-se o programa Statistica 13.2 (Tibco Co. USA). Foram obtidas superfícies de respostas a partir de modelos polinomiais de regressão sempre que o coeficiente de determinação – R^2 – foi superior a 0,75. Para o caso de R^2 inferior a 0,75 os dados foram analisados utilizando o programa Sisvar aplicando-se o método estatístico ANOVA. Em caso de diferenças significativas, foi realizado o teste de comparação de Tukey para determinar quais médias apresentavam diferenças significativas a um valor $p < 0,05$ entre as médias.

3.5 Delineamento experimental do estudo de conservação pós-colheita da pinha

No experimento de conservação pós-colheita dos frutos, foram utilizados um delineamento fatorial fatores duplo, com três repetições e dois frutos por unidade amostral para as avaliações físico-químicas e sensoriais. Para a avaliação da taxa de respiração, foram utilizadas três repetições por tratamento e três frutos por unidade amostral.

Os frutos foram divididos em três grupos: Cera de abelha (0%) com TiO₂ (1,52%) - T1, Cera de abelha (27,3%) com TiO₂ (1,52%) - T2, e Controle (sem recobrimento) - T0, segundo os melhores resultados obtidos na avaliação do PVA. As avaliações dos frutos ocorreram em cinco tempos (0, 3, 6, 9 e 12 dias) em presença da luz ultravioleta e em três tempos (dia 0, 6 e 12) em ausência de luz ultravioleta. No total foram utilizados 114 frutos. Os dados obtidos foram submetidos a ANOVA de dois fatores e teste de Tukey a um nível de significância de 5% utilizando o programa Sisvar.

3.6 Obtenção, seleção, higienização e revestimento por imersão (“*dipping*”) dos frutos

Os frutos da pinha (*Annona squamosa*) foram colhidos na fazenda DaniFrutas no Município de Limoeiro do Norte – CE (Latitude: -5.14889, Longitude: -38.0977), após 90 dias da polinização, em março de 2024, cuja temperatura local era 30 ± 2 °C e umidade relativa de 65,5 %.

Após seleção prévia, os frutos foram transportados para o laboratório e descartados aqueles que apresentaram machucados, arranhões, contaminação por fungos ou qualquer outro tipo de imperfeição. Eles foram lavados em água corrente para remover a sujeira e depois imersos em hipoclorito de sódio (2,0%) a 200 ppm (10 mL /litro de água) por 15 minutos para desinfecção, e depois enxaguados com água destilada (Santos; Souza, 2020). Após secagem em temperatura ambiente, as pinhas foram separadas em grupos para a aplicação dos tratamentos.

Para a aplicação dos tratamentos, cada pinha foi imersa em soluções filmogênicas, no interior de um béquer, conforme os tratamentos precursores de filme por 5 minutos, e em seguida foram deixadas para escorrer por 10 minutos e depois imersas novamente por 5 minutos, visando melhor aderência da solução aos frutos (Rossi-Márquez *et al.*, 2023).

Os frutos do grupo controle foram imersos em água destilada e posteriormente secados à temperatura ambiente (30 ± 2 °C) na bancada, semelhante aos frutos revestidos. Em seguida os frutos dos tratamentos e controle foram transportados para uma câmara fria, com temperatura de 15 ± 1 °C e UR de 80 ± 1 %, por 12 dias.

A aplicação da irradiação com luz ultravioleta (UV) usou-se a metodologia de Menezes *et al.* (2024) na qual foi utilizada uma lâmpada de 9W de 25 mm x 120 mm (modelo CUH9L, GRECH) com faixa de comprimento de onda de 230 nm até 430 nm, onde as frutas, dentro da câmara fria, foram colocadas a 50 cm da lâmpada e expostas por 2 minutos nos dias 0, 3, 6 e 9, com uma exposição total de 8 minutos ($1,68 \text{ kJm}^{-2}$).

3.7 Caracterização do comportamento pós-colheita da pinha

3.7.1 Determinação da taxa de respiração dos frutos

A metodologia a ser empregada foi baseada em Isermeyer (1952), na qual as 3 frutas com massa entre 0,635 – 0,915 kg foram colocadas, após pesagem, em recipientes de plásticos cap 1 litros fechados hermeticamente que contêm um pequeno recipiente com 40 mL de NaOH (0,5 mol/L) por 2 horas. Um *cooler* foi introduzido no interior dos recipientes para maior circulação do ar.

Após decorrido o tempo, os recipientes de NaOH foram removidas e adicionadas 3 gotas de fenolftaleína, seguindo-se a titulação com HCl (0,5 mol/L). Após a viragem da fenolftaleína adicionaram-se 5 gotas de indicador misto (0,1 % de verde de bromocresol e 0,1 % de vermelho de metila) e titularam-se novamente com HCl até mudança de cor de verde para vermelho.

Foi registrado o volume gastos de HCl. E, em um recipiente sem frutas foi determinado o CO₂ para a prova em branco. Para a determinação de CO₂ seguiu-se a Equação 12:

$$MCO_2(g) = MM\ CO_2 \cdot [HCl] \cdot f_{HCl} \cdot V_{misto} - MCO_{2b} \quad (12)$$

Onde:

MCO₂: massa de CO₂

MMCO₂: massa molar de CO₂ (g/mol)

f_{HCl}: fator de correção para HCl

V_{misto}: volume de HCl gasto na titulação com o indicador misto

MCO_{2b}: massa de CO₂ dos recipientes sem frutas

[HCl]: concentração de HCl em mol/L

3.7.2 Determinação da perda de massa dos frutos

Para determinar a perda de massa dos frutos foi utilizado o procedimento de Rossi-Márquez *et al.* (2023), onde foi utilizada a diferença entre o peso inicial do fruto e o valor obtido em cada intervalo amostral em porcentagem. A Equação 13 foi a seguinte:

$$\text{Perda de massa} = \frac{\text{Massa inicial} - \text{Massa Final}}{\text{Massa inicial}} \times 100 \quad (13)$$

3.7.3 Determinação da firmeza

A metodologia usada na determinação da firmeza foi baseada em Moura *et al.* (2021) e Prasanna, Rao e Krishnamurthy (2000) com pequenas modificações. Foi usado um

penetrômetro manual (modelo FT 327, McCormick, EUA) com diâmetro de ponta de 8 mm onde se fizeram 2 leituras entre as aréolas do fruto, na zona equatorial e opostas (cada tratamento teve 6 frutas). Os resultados foram expressos em Newton (N).

3.7.4 Determinação de sólidos solúveis (SS)

A determinação de sólidos solúveis foi baseada na metodologia de Moura *et al.* (2021) em que, depois de tirar a polpa das frutas, 1,0 g de amostra foi separado e misturado com 1,0 mL de água e, em seguida, adicionadas duas gotas de suco da polpa no refratômetro digital (modelo PR - 100 Palett, Atago, Japão) para fazer a leitura diretamente. Foram realizadas três repetições por tratamento, e os resultados foram expressos em °Brix.

3.7.5 Determinação de fenólicos totais e atividade antioxidante

Para a realização de ambas avaliações, foram realizados testes prévios para se determinar a massa de amostra e a diluição adequadas, concluindo-se que deviam ser pesados entre 0,5 - 2 g de polpa, macerados e transferidos para um balão de 50 mL com água destilada usada para completar o volume.

3.7.5.1 Determinação do total de fenóis

Essa determinação foi baseada na metodologia de Singleton e Rossi (1965) com algumas modificações. Em um tubo de ensaio colocou-se 500 µL de amostra e 2,5 mL do reagente Folin-Ciocalteu (0,2 N), agitou-se e deixou-se repousar por 5 minutos. Depois adicionou-se 2 mL de Na₂CO₃, agitou-se e deixou-se em repouso no escuro por 1 hora. A leitura da absorbância das amostras foi feita a 760 nm no espectrofotômetro UV-Visível onde o branco usado foi a água destilada.

3.7.5.2 Atividade antioxidante

Para a determinação da atividade antioxidante a metodologia adotada foi baseada no trabalho de Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995) com algumas modificações, onde colocaram-se em tubos de ensaios diferentes quantidades de amostra (1000 µL, 800 µL, 600 µL, 400 µL e 200 µL), água destilada (0 µL, 200 µL, 400 µL, 600 µL, 800 µL) e o reagente DPPH (1,5 mL) nessa ordem, e depois foi feita a leitura a 517 nm no espectrofotômetro UV-Visível, considerando-se ao controle: 0 µL de amostra + 1000 µL da água + 1,5 mL de DPPH.

3.7.6 Análise sensorial dos frutos

A análise sensorial para avaliar a aparência externa (AE) e aparência interna (AI) das frutas foi realizada de acordo com as metodologias de Patidar *et al.* (2021) e Paiva *et al.* (2020), cuja avaliações ocorreram aos 0, 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento com luz UV e aos 0, 6 e 12 dias de armazenamento sem luz UV, por um painel de 5 avaliadores treinados com uma escala de pontuação visual subjetiva.

Sete características foram avaliadas para a AE: aceitabilidade, odor, cor, fungo, manchas pretas, brilho e adesividade do filme, e quatro para a AI: escurecimento da polpa, odor interno, líquido na polpa e podridão. Uma escala de valores para o nível de aceitabilidade das características foi seguida de 1 a 4, sendo 1 a pontuação mais baixa (muito grave) e 4 a mais alta (sem defeitos). As frutas com pontuação inferior a 3 foram consideradas inadequadas para a comercialização.

3.7.7 Tratamento e análise estatística dos dados de pós-colheita da pinha

Os dados foram analisados utilizando o programa Sisvar aplicando-se o método estatístico ANOVA. Em caso de diferenças significativas, foi realizado o teste de comparação de Tukey para determinar quais médias apresentavam diferenças significativas a um valor $p < 0,05$ entre as médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise morfológica

A Figura 2 mostra as imagens do MEV dos filmes obtidas da superfície e da seção transversal da borda mecanicamente rasgada.

O filme (h) apresentou maior homogeneidade do ponto de vista superficial em relação aos demais filmes e do ponto de vista da seção transversal algumas fraturas e aglomerações de TiO_2 , bem diferente do filme (e) que apresentou restos de cera de abelha não completamente misturados e algumas fraturas, transversalmente também foi possível observar a presença de cera não completamente integrada e alguns vazios, podendo se tornar frágil por não apresentar uma matriz compacta.

O filme (g), cuja composição era a mesma em termos de porcentagem de cera que o filme (e), com a diferença de que tinha 2% de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2), apresentou uma maior homogeneidade na superfície com leves traços de cera não homogeneizada e, na seção transversal, o TiO_2 preencheu as lacunas que estavam vazias no

filme (e), a cera também foi melhor integrada, formando uma camada mais compacta com relevos heterogêneos.

No filme (i), contendo 1% menos TiO_2 do que o filme (g), foram observados relevos mais homogêneos, formando uma camada esponjosa, mas com a presença de pequenos orifícios. Embora o filme (f) possua 20% a mais de cera do que o filme (i), em uma visão de seção transversal, não foram observados os mesmos relevos, mas uma camada mais plana, porém mostrando pequenos fragmentos de cera não totalmente integrados à matriz do biopolímero.

O filme (b), em corte transversal, apresentou uma camada adicional de cera muito heterogênea e com fraturas, enquanto o filme (c) com um pouco mais de TiO_2 apresentou uma matriz mais homogênea, sem fraturas e vazios, e a camada superior de cera apresentou relevos mais homogêneos, semelhantes aos do filme (i).

Tanto o filme (a) quanto o (d) apresentaram delaminações e fraturas na seção transversal, com a diferença entre eles de pequenos relevos aglomerados devido à maior quantidade de TiO_2 no filme (d), enquanto o filme (a) apresenta-se mais homogêneo.

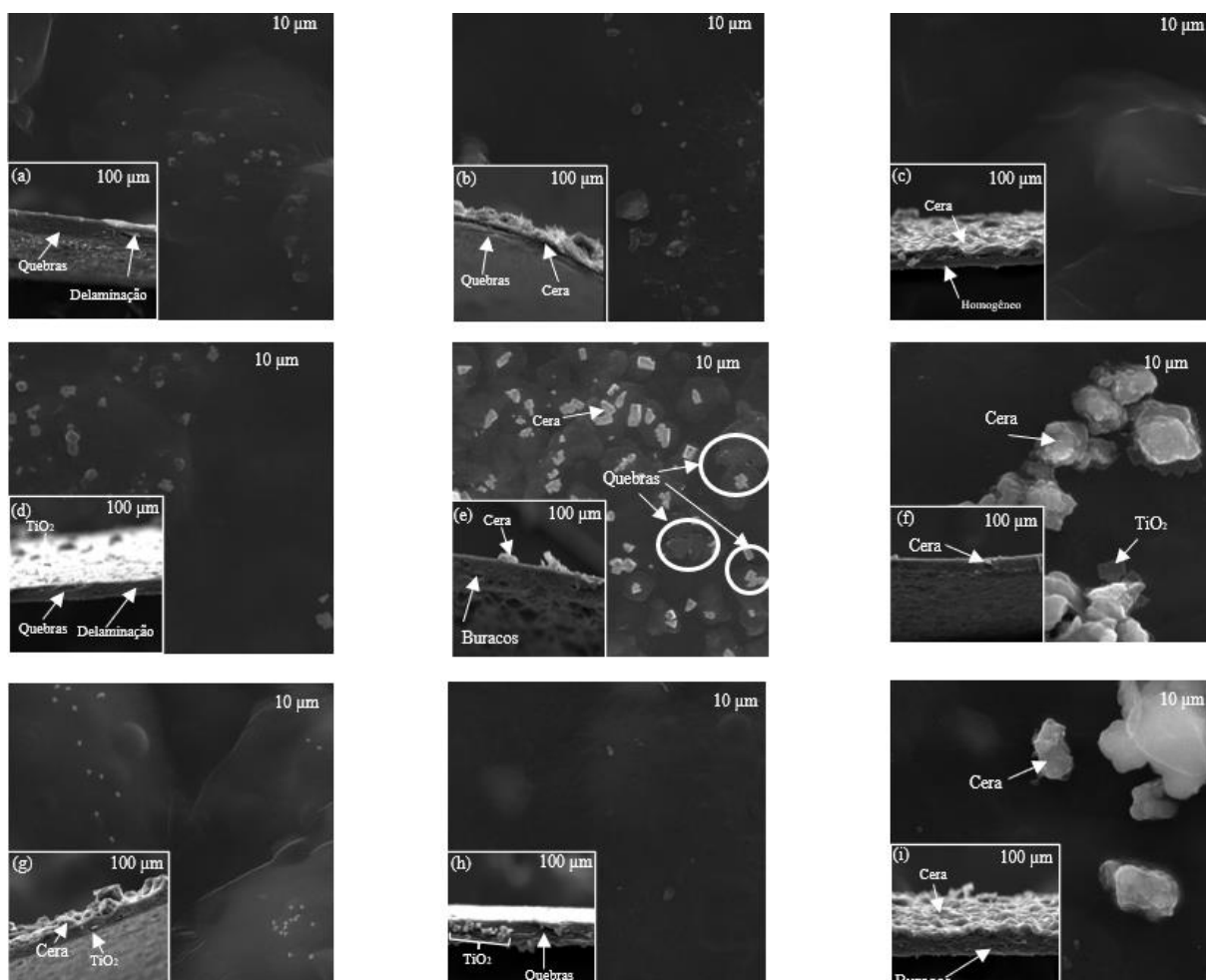
O aumento da quantidade de TiO_2 resultou em um filme mais homogêneo e compacto na matriz, como pode ser visto entre os filmes (a) e (d) e os filmes (b) e (c), enquanto o filme (g) com 2 % de TiO_2 apresentou uma superfície heterogênea, embora haja algumas nanopartículas incorporadas nos orifícios da matriz, em comparação com os filmes (e) e (i) com 0 % e 1 %, respectivamente.

Coincidindo com Vejdani *et al.* (2016) que, ao adicionar 2 g/100 g de TiO_2 , causou uma aglomeração na superfície do filme, reduzindo sua homogeneidade, mencionando que pode ter acontecido devido à alta energia superficial do TiO_2 na qual impediu a dispersão homogênea dele, mas com baixas concentrações de TiO_2 (0,5 e 1,0 g/100 g) conseguiram uma distribuição uniforme. De acordo com Balasubramanian *et al.* (2019), a homogeneidade da superfície pode estar relacionada à interação eletrostática entre polieletrólitos positivos e o TiO_2 carregado negativamente, e a heterogeneidade com as altas concentrações de TiO_2 , produzindo pequenos aglomerados que reduzem a homogeneidade da superfície do filme devido à alta energia de superfície que possuem.

A presença de cera de abelha na superfície dos filmes (b), (c), (e), (f), (g) e (i) gera uma rugosidade e heterogeneidade que podem ser devidas, de acordo com Zhang *et al.* (2020), a uma instabilidade da emulsão quando o filme foi formado, causando uma aglomeração de moléculas de lipídios. Ao produzir filmes em camadas de ágar/maltodextrina com cera de abelha, estes deduziram que quanto menos cera havia, mais esta era distribuída aleatoriamente

na matriz, enquanto que quanto mais cera, mais cera se acumula na superfície dos filmes quando a temperatura aumentava para 80 °C.

Figura 2 – Imagens do MEV da superfície e vista em seção transversal dos filmes com concentrações de (a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , (b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , (c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , (d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , (e) 20 % cera de abelha, (f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO_2 , (g) 20 % cera de abelha + 2 % TiO_2 , (h) 1 % TiO_2 , (i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO_2 .



Autoria própria (2024)

4.2 Opacidade, Espessura e UV- Visível

A luz UV pode produzir mudanças no sabor, descoloração, degradação de nutrientes e redução da vida útil dos alimentos, sendo necessário que o filme tenha boas propriedades de barreira à luz (Riahi *et al.*, 2024). De acordo com os resultados da Tabela 2, é possível observar um aumento na opacidade do filme à medida que a concentração de TiO_2 e cera de abelha aumenta, sendo a concentração de TiO_2 o fator mais influente.

A presença de cera e TiO_2 aumentou a espessura do filme. De acordo com Haq *et al.* (2016), a diferença nas densidades de fase e sua interação podem produzir uma alteração na espessura, em que a fase lipídica da cera impede a formação estrutural das cadeias de polímero, resultando em uma formação desordenada que leva a um aumento da espessura.

Fabra, Talens e Chiralt (2008) mencionam que quanto mais aumentavam a concentração de cera de abelha em seus filmes, mais a opacidade aumentava, devido à maior presença de lipídios na mistura, como no caso de Park, Friest e Liu (2023), que adicionaram cera de abelha a filmes de álcoois polivinílicos e nanocristais de celulose derivados de palha de milho e reduziram sua transparência.

Siripatrawan e Kaewklin (2018) relatam que filmes com baixa concentração de TiO_2 permanecem transparentes devido à dispersão uniforme na matriz, ao passo que, quando a concentração do TiO_2 é aumentada, o filme apresenta maior opacidade. Ambos os resultados estão de acordo com os resultados obtidos, em que quanto maior a quantidade de cera de abelha e TiO_2 , maior a opacidade.

Tabela 2- Parâmetros de espessura e opacidade dos filmes.

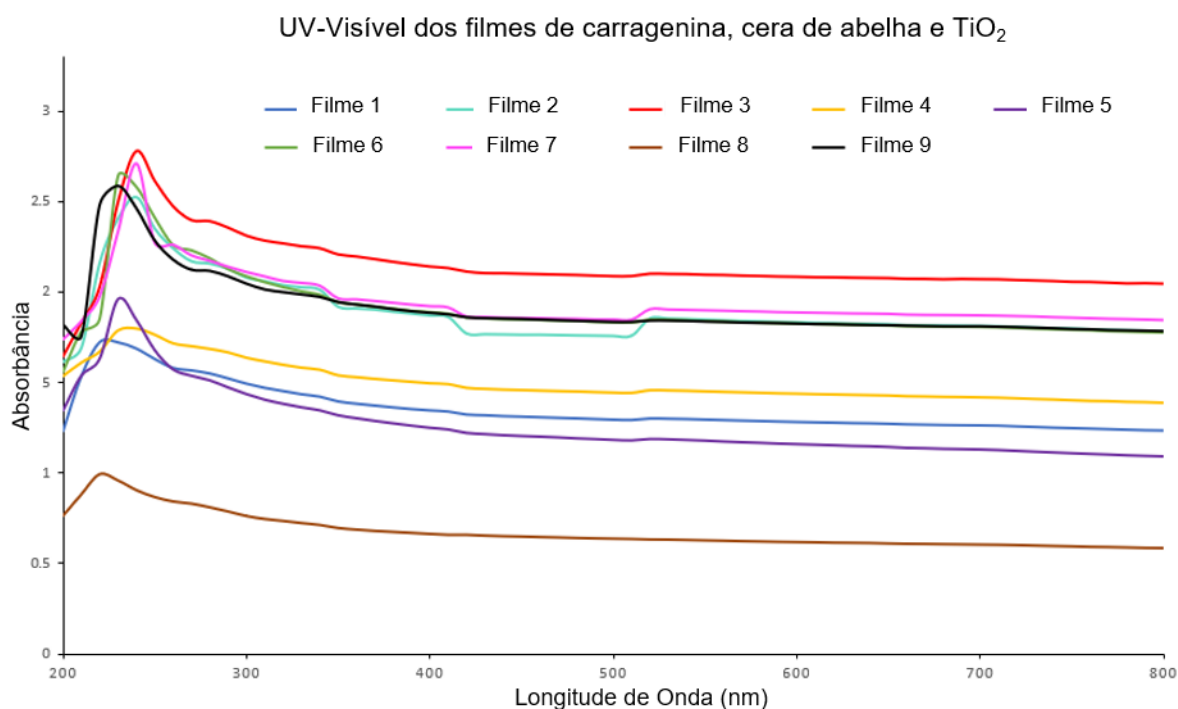
Filmes	Concentrações		Variáveis dependentes	
	Cera %	TiO_2 %	Espessura (mm)	Opacidade
1	5,80	0,29	$0,066 \pm 0,004e$	$5,72 \pm 2,15c$
2	34,20	0,29	$0,072 \pm 0,002cde$	$6,73 \pm 0,76bc$
3	34,20	1,71	$0,076 \pm 0,001abc$	$7,32 \pm 1,97bc$
4	5,80	1,71	$0,068 \pm 0,002de$	$6,18 \pm 0,85c$
5	20,00	0,00	$0,070 \pm 0,002cde$	$3,26 \pm 0,81d$
6	40,00	1,00	$0,079 \pm 0,003ab$	$14,36 \pm 1,50a$
7	20,00	2,00	$0,081 \pm 0,004a$	$13,90 \pm 1,36a$
8	0,00	1,00	$0,047 \pm 0,001f$	$8,54 \pm 0,73b$
9	20,00	1,00	$0,076 \pm 0,002abc$	$12,74 \pm 1,34a$
10	20,00	1,00	$0,075 \pm 0,002abcd$	$12,76 \pm 0,55a$
11	20,00	1,00	$0,075 \pm 0,003abcd$	$12,49 \pm 2,39a$
12	20,00	1,00	$0,075 \pm 0,001abcd$	$12,03 \pm 1,93a$
13	20,00	1,00	$0,074 \pm 0,002bcd$	$12,82 \pm 2,73a$

O conjunto de dados é apresentado como média $\pm$ desvio padrão. Letras diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Autoria própria (2024).

Em geral, os componentes dos alimentos são fotossensíveis (hemoglobina, mioglobina e riboflavina), absorvendo luz em comprimentos de onda acima de 400 nm. A luz UV, que varia de 200 a 400 nm, promove a oxidação de lipídios, levando à deterioração e à rancidez, e os aminoácidos aromáticos, como o triptofano e a tirosina, absorvem a luz UV abaixo de 310 nm, levando à clivagem da ligação peptídica (Zhang; Simpson; Dumont, 2018).

Quando há uma maior absorbância na zona UV em filmes, eles permitem que a vida útil do alimento seja estendida (Velásquez et al., 2022). A Figura 3 apresenta os espectros de absorbância obtidos dos filmes desde 200 nm até 800 nm.

Figura 3 – Espectro de absorbância UV-Visível dos filmes (a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , (b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , (c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , (d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , (e) 20 % cera de abelha, (f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO_2 , (g) 20 % cera de abelha + 2 % TiO_2 , (h) 1 % TiO_2 , (i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO_2



Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos mostram que o filme com o maior pico de absorção é aquele com 34,2% de cera com 1,707% de TiO_2 entre a região de 200-300 nm e o menor foi o de 1% de TiO_2 . O pico de absorção mais alto pode ter sido produzido em parte pelo TiO_2 , que é um semicondutor do tipo N com um *gap* de energia de 3,2 e V e que usa luz ultravioleta em vez de luz visível porque, por ser de onda curta, tem mais energia do que a luz de onda longa (visível),

e também a presença de TiO_2 produz fotocatalise ao absorver mais luz UV (Jassal *et al.*, 2022; Vejdani *et al.*, 2016).

Em um filme compósito, isto impede a transmissão de luz ao bloquear mais raios UV de ondas curtas do que raios visíveis de ondas longas, causando certa opacidade no filme em troca do aumento de suas propriedades de bloqueio de UV (Zhang; Rhim, 2022c).

Confirmando os resultados de Menezes *et al.* (2021), que obtiveram maior absorbância com a adição de TiO_2 na região de UV de 200-400 nm devido ao fato de ser um semicondutor direto de banda larga na sua forma cristalina anatase.

Zhang, Simpson, Dumont (2018) compararam os efeitos da adição de cera de abelha com a cera de carnaúba em filmes de gelatina e o resultado foi que a cera de abelha possui melhores propriedades de barreira à luz, possivelmente devido aos seus compostos bioativos e à estrutura uniforme formada, concordando com os resultados desta pesquisa, onde a formulação com 34,2 % de cera de abelha absorveu muito mais que o filme sem cera.

4.3 Cor e aspecto visual dos filmes

A cor dos filmes pode ser afetada pela nanopartícula utilizada (para o TiO_2 é a cristalinidade e o tamanho das partículas), a espessura do filme e os processos de preparação e fabricação (Menezes *et al.*, 2021). Como resultado observou-se que a adição de cera e TiO_2 tende a diminuir o valor do parâmetro L^* , levando a filmes ligeiramente mais escurecidos (Figura 4 (d)). O parâmetro a^* não apresentou variação significativa em função da cera de abelha e nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2). Apenas o percentual de TiO_2 mostrou influência significativa na variação do parâmetro b^* , sendo que o aumento no parâmetro b^* aumentou com a adição do TiO_2 (Figura 5 (e)).

Embora o TiO_2 seja branco, isso não significa que ele possa produzir uma mudança visual significativa no filme; este só pode variar ligeiramente se a matriz do filme for de uma cor diferente; quando uma pequena quantidade de TiO_2 é adicionada, que geralmente é inferior a 2 %, a mudança de cor é visualmente mínima (Zhang; Rhim, 2022c).

Isso é confirmado por Hamid *et al.* (2023), que demonstraram o fato de filmes de carragenina com diferentes concentrações de TiO_2 (1 a 7 %) apresentaram cor mais branca e menor transparência à medida que a concentração das nanopartículas aumentou, devido às propriedades de dispersão de luz que reduziram a transmissão de luz do filme. Menezes *et al.* (2023), ao adicionarem TiO_2 a filmes de quitosana e amido de mandioca, observaram que o índice de amarelo foi significativamente reduzido pela cor branca da nanopartícula, enquanto os valores de L^* , ΔE e WI aumentaram.

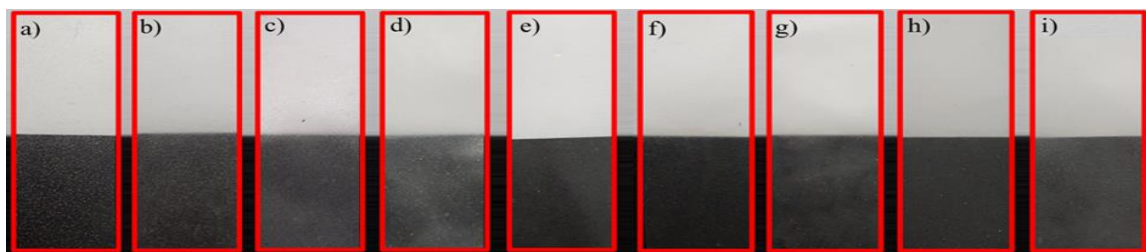
A cor que pode ser gerada pelo uso da cera de abelha varia de acordo com suas características intrínsecas, a estrutura do biopolímero e as partículas de cera na matriz do biopolímero (Kazemi *et al.*, 2023).

O brilho do filme pode ser afetado, causando uma diminuição devido à aparência opaca e à heterogeneidade química da cera (Klangmuang; Sothornvit, 2016). Isso é confirmado por Oliveira *et al.* (2018) que ao adicionarem cera de abelha a filmes de amido de mandioca tiveram uma ligeira redução no valor L^* e um aumento no valor b^* , este fato pode ser devido à cor amarela natural da cera.

Por outro lado, Mohammadi, Zoghi e Azizi (2023) mencionaram que a adição de cera de abelha e DATEM (monoglicerídeos de éster diacetiltartárico) a filmes de glúten resultou em uma redução de b^* devido à sua cor branca e amarela clara, respectivamente, a^* foi negativo devido à presença de cor verde e L^* aumentou o brilho.

A variação de cores de cada filme pode ser vista na Figura 6 com fundo branco e preto:

Figura 6 – Foto dos filmes a) 5,80 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , b) 34,20 % cera de abelha + 0,29 % TiO_2 , c) 34,20 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , d) 5,80 % cera de abelha + 1,71 % TiO_2 , e) 20 % cera de abelha, f) 40 % cera de abelha + 1 % TiO_2 , g) 20% cera de abelha + 2 % TiO_2 , h) 1% TiO_2 , i) 20 % cera de abelha + 1 % TiO_2 .



Autoria própria (2024)

4.4 Densidade Aparente

O filme com a maior densidade aparente foi o filme com 1 % de TiO_2 e o menor foi o filme com 34,2 % de cera com 1,71 % de TiO_2 . De acordo com os resultados da Figura 4 (a), a adição de cera de abelha reduziu a densidade aparente dos filmes de carragenina. Por outro lado, a adição de TiO_2 aumentou até um determinado valor, mas o excesso de TiO_2 reduziu a densidade.

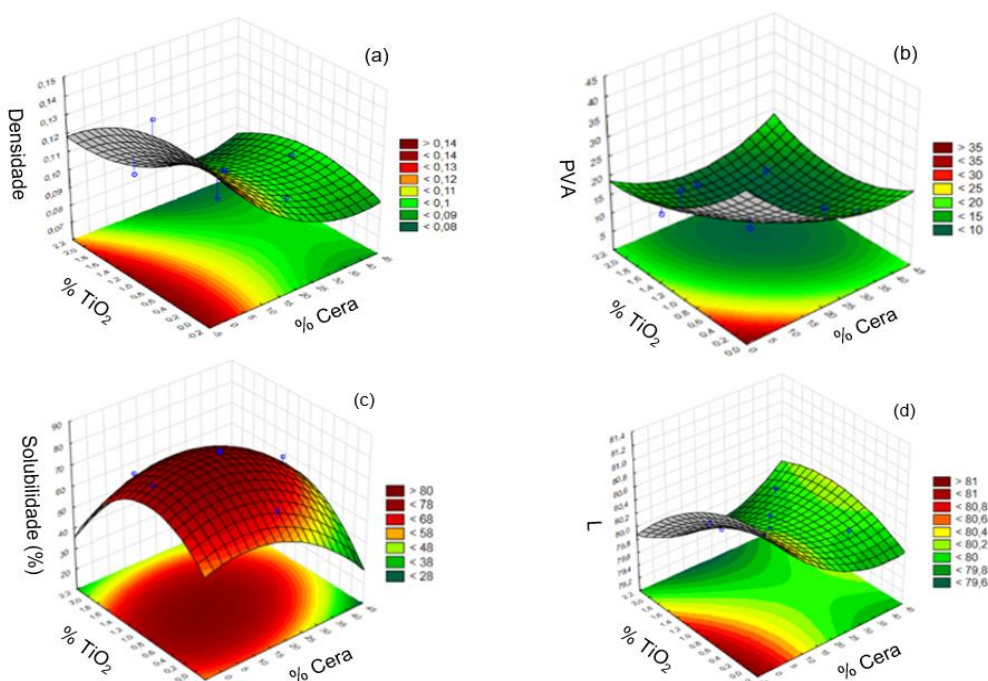
Fonseca *et al.* (2020) constataram que a adição de TiO_2 a filmes nanocompósitos de HPMC- TiO_2 e gelatina- TiO_2 não gerou mudanças significativas na espessura, sugerindo que as

concentrações de TiO_2 utilizadas (0, 0,5, 1 e 2% em peso para HPMC e 30 g para gelatina) não alteraram a densidade.

A cera de abelha tem uma estrutura densa, pois é uma gordura sólida que impede a passagem do vapor de água, mas pode impedir o alinhamento das cadeias de polímeros, produzindo uma matriz solta e desordenada que não só causa um aumento na espessura do filme, mas também pode criar espaços pelos quais o vapor de água pode passar (Haq *et al.*, 2016; Zhang; Simpson; Dumont, 2018; Zhang *et al.*, 2020).

Zhang, Xio e Qian (2014) mencionam a relação entre a taxa de transmissão de vapor de água e a densidade, em que o aumento da densidade leva a uma diminuição linear da taxa de transmissão de vapor de água após um ponto de inflexão. De acordo com Syahida *et al.* (2020), a adição de altos níveis de cera de palma a filmes de gelatina produziu rachaduras e separação de fases, e pode-se deduzir dos resultados obtidos que o aumento da quantidade de cera de abelha produziu uma superfície irregular com rachaduras nos filmes, fazendo com que a densidade diminuísse.

Figura 4 – Resultados das superfícies de respostas das avaliações (a) Densidade Aparente, (b) PVA, (c) Solubilidade, (d) L^* .



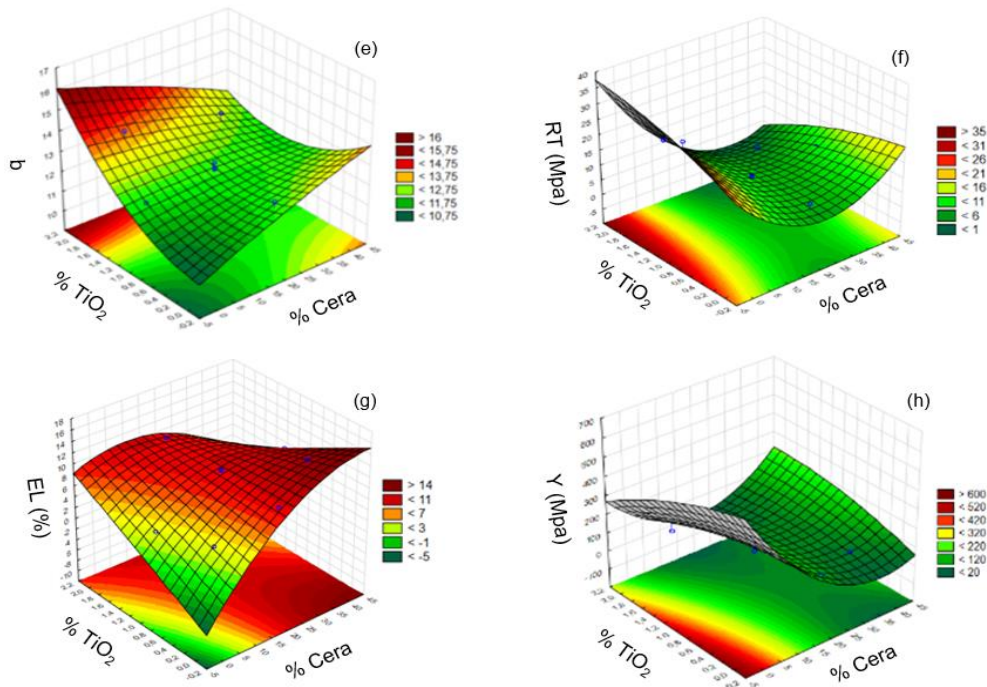
Autoria própria (2024)

4.5 PVA

A avaliação da PVA em filmes permite avaliar a quantidade de água que passa do ambiente interno para o externo através do filme por unidade de tempo. Esta informação é importante pois a perda de água em frutos acaba produzindo a deterioração de sua qualidade, sendo que uma diminuição da PVA consegue aumentar o tempo de vida útil do produto coberto (Pérez-Vergara *et al.*, 2020). Os fatores que podem afetar a PVA são a integridade do filme, a relação hidrófilo-hidrófobo, a relação cristalino-amorfo e a mobilidade da cadeia polimérica (Balasubramanian *et al.*, 2018).

O efeito da água absorvida pela rede de carrageninas produz uma plastificação decorrente do movimento das cadeias poliméricas, causando um aumento na transferência de pequenas moléculas, como água ou compostos aromáticos (Fabra *et al.*, 2009). De acordo com os resultados da Figura 4 (b), ocorreu uma influência significativa dos percentuais de cera e de TiO_2 na PVA. Um mínimo de PVA foi observado em 27,3 % de cera e 1,52 % de TiO_2 .

Figura 5 – Resultados das superfícies de respostas das avaliações (e) b^* , (f) Resistência à Tração, (g) Alongamento na Ruptura e (h) Módulo de Young.



Autoria própria (2024)

A cera de abelha provoca uma diminuição da transmissão da água por sua natureza hidrofóbica atuando como uma boa barreira (Pérez-Vergara *et al.*, 2020). Zhang *et al.* (2019b) avaliaram diferentes agentes hidrofóbicos em filmes de ágar/maltodextrina e o resultado dessa

combinação com 10% de cera de abelha foi o mais baixo em PVA, no entanto, com 20% de cera de abelha foi mais alto.

A baixa disponibilidade de grupos -OH pode ser o principal fator pelo qual a PVA diminui com o aumento da quantidade de TiO_2 (Balasubramanian *et al.*, 2019). Menezes *et al.* (2021) também relataram uma interação do TiO_2 com grupos hidrofílicos -OH e $-\text{NH}_2$ em filmes de amido de mandioca, resultando em menor PVA ao diminuir a disponibilidade de grupos hidrofílicos e reduzir as interações da água com o filme.

4.6 Solubilidade

Segundo os resultados da Figura 4 (c), a adição de cera e de TiO_2 afetam a solubilidade dos filmes, obtendo-se um máximo de solubilidade pela adição conjunta de TiO_2 e de cera de abelha. O filme que apresentou maior resultado tinha concentração de 20% de cera de abelha e 1,0% TiO_2 e a menor foi 34,2% cera de abelha com 0,293% de TiO_2 .

No caso da adição de nanopartículas como TiO_2 a revestimentos comestíveis, Menezes *et al.* (2021) mencionam que a adição de 1,0 % de TiO_2 pode causar uma redução na solubilidade do filme, sugerindo que a nanopartícula interage por meio de ligações de hidrogênio com os grupos hidrofílicos restantes, causando nanocompósitos mais hidrofóbicos.

Pérez-Vergara *et al.* (2020) mencionam que ao avaliar a solubilidade em água de filmes de amido de mandioca, cera de abelha e própolis houve uma diminuição com o aumento das concentrações de amido e cera de abelha, inferindo-se que a cera foi o principal fator para esta diminuição, pois é um composto hidrofóbico que ao permanecer dentro da matriz do filme de amido formou uma forte interação por meio de ligações de hidrogênio, reduzindo sua afinidade com a água.

Em concordância com esses resultados, Khanzadi *et al.* (2015), em um estudo em que adicionaram cera de abelha em filmes de proteína de soro de leite e pululana, constataram que o aumento da concentração de cera de abelha causou uma diminuição na solubilidade devido à sua natureza hidrofóbica.

4.7 Propriedades mecânicas

4.7.1 Resistência à tração

Como resultados, segundo a Figura 5 (f), o principal fator que afeta a RT é a adição de cera. Existe interação significativa entre a adição da cera e o TiO_2 . Observa-se uma diminuição da RT com a adição de cera. Em baixas concentrações de cera a adição de TiO_2 aumenta a RT, mas em altas concentrações tende a ter o efeito inverso.

Rukmanikrishnan *et al.* (2019) relataram que o aumento da quantidade de TiO_2 (de 0 a 5 %) em filmes mistos de κ -carragenina, goma xantana e goma gelana ocasionou um aumento na RT de até 39 %, mas quando a concentração estava entre 5% e 7%, não houve muita diferença em suas propriedades mecânicas, presumindo-se que o excesso dessa nanopartícula causou uma dispersão não uniforme, provocando aglomerados.

Riahi *et al.* (2024), ao colocarem partículas de carbono impregnadas com TiO_2 a 1 % e 3 %, derivados de cascas de batata, em filmes de carragenina com antocianinas, aumentaram a RT de 95,8 para 105,6 MPa, respectivamente, inferindo-se que ocorreu a formação de ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares entre os grupos hidroxila da carragenina e os grupos funcionais das partículas de carbono impregnadas com TiO_2 , aumentando o nível de energia necessário para produzir uma quebra.

Haq *et al.* (2016) adicionaram cera de abelha a filmes de goma de *Cordia myxa* (ameixa assíria, espécie vegetal encontrada principalmente na Ásia e África), polietilenoglicol 400 e glicerol, o que resultou em uma redução do RT à medida que as concentrações aumentaram. Kazemi *et al.* (2023) mostraram que a adição de cera de abelha a filmes de gelatina e ulvana aumentou a RT, mas um excesso a reduziu. Omar-Aziz *et al.* (2021) mencionam um aumento na RT ao aumentar as concentrações de cera em até 10% em filmes de pululana com modificação de anidrido octenil succínico.

Uma possível explicação para a diminuição da RT com relação à adição de cera de abelha seria o rompimento das interações intermoleculares entre as macromoléculas (Li; Wang; Xue, 2019).

4.7.2 Alongamento na Ruptura

O alongamento na ruptura é um dos principais fatores que afetam a aplicação industrial dos filmes (Li; Wang; Xue, 2019). Os resultados obtidos e mostrados na Figura 5 (g) indicam um aumento do alongamento na ruptura ao se aumentar a concentração de cera. Esta propriedade foi afetada de forma significativa pela adição de cera e pela interação entre a adição de cera e TiO_2 .

Os lipídios provocam o aumento do volume livre do sistema porque debilitam a força intermolecular das cadeias dos polímeros entre as quais se encontram dispersos, sendo que a adição de lipídios gera um aumento do alongamento na ruptura devido ao incremento da mobilidade das moléculas (Li; Wang; Xue, 2019). Essa observação está em acordo com os resultados obtidos por Kazemi *et al.* (2023) que ao incluir cera de abelha em filmes de ulvana

provocou um aumento do alongamento na ruptura levando a conclusão que a cera melhora as propriedades elásticas destes filmes.

A adição de TiO_2 , por sua vez, geralmente diminui o alongamento na ruptura formando um filme rígido (Sani *et al.*, 2022), o que é discrepante com o resultado aqui obtido. Rukmanikrishnan *et al.* (2019) ao adicionarem TiO_2 em filmes de λ -carragenina, goma xantana e goma gelana obtiveram uma diminuição do alongamento na ruptura de 30,6 % para 23,0 %.

Riahi *et al.* (2021) ao adicionarem 0,5 % TiO_2 em filmes de gelatina com extrato de semente de pomelo, tiveram uma diminuição do alongamento, mas ao ir adicionando maiores concentrações de TiO_2 tiveram um incremento. Poderia se dizer que o TiO_2 pode afetar as propriedades mecânicas dos filmes dependendo da concentração das nanopartículas, o estado de distribuição delas e a interação com a matriz polimérica (Sani *et al.*, 2022).

4.7.3 Módulo de Elasticidade

Segundo os resultados - Figura 5 (h), as concentrações de cera e TiO_2 afetam o módulo de elasticidade. A adição de cera diminui o valor desta variável, porém, a adição de TiO_2 diminui ligeiramente o valor de Y em baixas concentrações de cera, mas tende a aumentar este valor em altas concentrações de cera.

Rukmanikrishnan *et al.* (2019), ao aumentar as concentrações de TiO_2 em filmes de κ -carragenina, goma xantana e goma gelana, observaram que o módulo de elasticidade aumentou, mas, para Menezes *et al.* (2021), o módulo de Young diminuiu ao se incrementar as concentrações de TiO_2 de 0,25 % a 1,0 % em filmes mistos de quitosana e fécula de mandioca.

Para Saurabh *et al.* (2016) ao se aumentar as concentrações de cera de abelha em filmes de goma guar com nano-argila (nanofil-116), tween-80 e glicerol, o Módulo de Young aumentou, mas em uma concentração superior a 1,25 % produziu-se uma diminuição desta propriedade, sendo mencionado que o filme se tornou heterogêneo e aconteceu uma separação de fases da cera. Zhang *et al.* (2022b) observaram um aumento no Módulo de Young em filmes de cera de abelha, ágar e maltodextrina porque a cera foi distribuída uniformemente e houve uma melhor força coesiva do polímero.

4.8 Efeito do revestimento na qualidade da pinha com e sem luz ultravioleta

4.8.1 Taxa de respiração

A Figura 7 mostra os resultados da taxa de respiração dos frutos durante os 12 dias de armazenamento, com e sem presença de luz UV. Nota-se comportamento variável da taxa de respiração dos frutos, em função do tratamento, na presença (A) ou ausência de luz (B). Na

presença de luz UV (Figura 7 – A), os frutos do tratamento T1, alcançaram o pico de respiração no 5º dia, enquanto o controle e revestimento T2, o pico ocorreu no 2º dia; isso evidencia o efeito positivo do revestimento com carragenina + TiO_2 em retardar o metabolismo dos frutos. Este resultado, foi estatisticamente superior. A maior taxa de respiração ocorreu nos frutos do tratamento T2, a presença de cera e possíveis interações eletrostáticas com o TiO_2 e carragenina pode ter anulado o efeito da ação da nanopartícula frente ao etileno em presença da luz UV, o que afetou possivelmente a produção de radicais hidroxila e espécies reativas de oxigênio que oxidaria o etileno em CO_2 e vapor da água (Menezes *et al.*, 2024; Chiara *et al.*, 2015; Asrey *et al.*, 2023), produzindo um incremento de respiração da fruta pela presença de O_2 dentro do revestimento.

De acordo com os resultados da Figura 4 (a) e (b), apesar de ter um mínimo de PVA com 27,3 % de cera de abelha e 1,52 % de TiO_2 , a concentração da cera de abelha pode ter produzido espaços ao secar, diminuindo a densidade do revestimento e deixando entrar O_2 dentro dele. Por exemplo, a concentração com 34,2 % de cera de abelha e 1,71% de TiO_2 apresentou o valor mais baixo para densidade, de $0,086 \text{ g/cm}^3$, enquanto a concentração com 20 % de cera de abelha e 1 % de TiO_2 resultou em $0,104 \text{ g/cm}^3$.

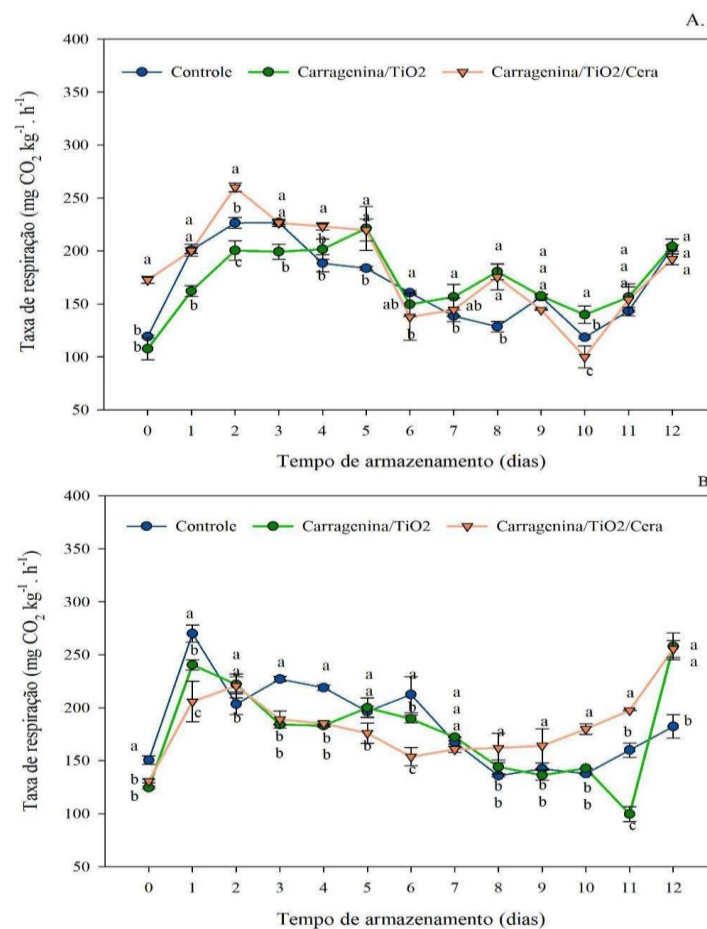
Por outro lado, na ausência de luz (Figura 7 – B) o revestimento T2 foi mais eficiente em retardar o pico e intensidade da taxa de respiração até o 2º dia. E apesar do revestimento T1 ter ocasionado menor intensidade no pico de respiração em relação aos frutos controle, ambos ocorreram no 1º dia. Esse efeito do revestimento foi positivo, visto que ambos conseguiram diminuir a intensidade e/ou pico de respiração da pinha, isso torna o amadurecimento mais lento da fruta, visto que funciona como barreira a gases, características dos revestimentos ao modificar e controlar a atmosfera interna da fruta. Para o caso do T2, a carragenina, a cera de abelha e o TiO_2 tiveram uma melhor interação eletrostática, conseguindo aumentar sua propriedade de barreira de gases devido a ativação da nanopartícula frente ao etileno, oxidando-lo para produzir CO_2 , e a propriedade que tem a cera como lipídio de controlar a troca de gases entre o ambiente externo e a fruta.

Nos últimos dias de avaliação, em ambos tratamentos com luz e sem luz, consegue-se ver um incremento da taxa de respiração, possivelmente pela presença de fungos e abertura das frutas, ocasionada pelo amadurecimento. O revestimento T1 (carragenina + TiO_2) com luz UV foi o melhor tratamento para retardar o pico de respiração da pinha até o 5º dia de armazenamento, devido a que geralmente elas são aceitáveis só por dois ou três dias (Ghasil *et al.*, 2022), e também ao conseguir uma menor intensidade que o T2 e o controle, permitindo reduzir sua senescência.

Um estudo de Chiara *et al.* (2015) ao colocar tomates verdes com TiO_2 e SiO_2 em diferentes concentrações numa atmosfera com etileno conseguiram reduzir o etileno (degradação fotocatalítica), observando-se uma mudança lenta na cor dos tomates. Não só o uso de nanopartículas permite reduzir a taxa de respiração das frutas, o uso de recobrimentos comestíveis com lipídios também, como no caso de Velickova *et al.* (2013) que utilizaram a cera de abelha em morangos, conseguindo reduzir sua taxa de respiração devido a propriedade de barreira a gases.

Sousa *et al.* (2021) também utilizaram cera de abelha com hidroxipropilcelulose em mangas, conseguindo diminuir a taxa de respiração das frutas em comparação com o controle, a diferença foi que o tratamento com 40 % de cera apresentou uma taxa parecida ao controle no nono dia de armazenamento e o tratamento com menor quantidade de cera (20 %) mantiveram a taxa respiratória baixa.

Figura 7 - Taxa de respiração ($\text{mg CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) de frutos de pinha com diferentes revestimentos com luz UV (A) e sem luz UV (B) durante o armazenamento a $15 \pm 1^\circ \text{C}$ e UR de $80 \pm 1\%$



4.8.2 Perda de Massa

Observa-se efeito significativo de tratamento, na presença ou ausência de luz UV para a perda de massa (PM) dos frutos (Tabela 3). Independente da presença ou ausência de luz, a PM dos frutos revestidos foi significativamente inferior aos frutos controle. Tais resultados, podem estar associados a uma maior taxa respiratória em frutos sem revestimento, provocado pela presença de rachaduras que ficam entre os carpelos da fruta, que propicia transpiração excessiva e produz uma maior perda de água (Gohlani; Bisen, 2012).

Apesar dos frutos revestidos, na ausência de luz, apresentarem PM dos frutos semelhantes. Na presença de luz, o tratamento T1 ($16,5 \pm 0,80$ %) apresentou frutos com menor PM quando comparado ao tratamento T2 ($20,8 \pm 1,52$ %). Apesar da presença da cera de abelha no T2, um lipídio que influencia na perda de água em revestimentos mais hidrofóbicos (Oliveira *et al.*, 2018), essa concentração utilizada não conseguiu diminuir a perda de massa da pinha, podendo ter acontecido o mesmo que na respiração, onde as interações eletrostáticas com o TiO_2 e a carragenina evitaram desenvolver sua propriedade hidrofóbica, visto que ocorreu maior taxa de respiração, o que influenciou na transpiração e, consequentemente na maior perda de massa dos frutos.

Concordando com Parven *et al.* (2020), os quais mencionam que a perda de massa pode acontecer devido ao gradiente de pressão de vapor entre o tecido e a atmosfera, através da casca da fruta, perdendo a água por transpiração, e também pela respiração, segundo Lufu, Ambaw e Opara (2019), devido à perda de carbono na forma de CO_2 , perda de água associada à respiração, onde a água gerada pela oxidação do substrato contribui para o total de água perdida como vapor durante o processo de transpiração, e a energia respiratória que gera uma maior evaporação da água devido ao calor liberado.

O estudo feito por Menezes *et al.* (2024) menciona que o TiO_2 permitiu reduzir danos a perda de massa em mamão ao absorver a luz UV em filmes de quitosana com fécula ao degradar o etileno pela geração de radicais livres de hidroxila e espécies reativas de oxigênio, reduzindo a respiração da fruta e consequentemente, reduzindo a perda de massa. Tais resultados, concordam com os efeitos evidenciados no revestimento T1, na presença de luz UV, no presente estudo.

Os revestimentos estudados por Sousa *et al.* (2021), de hidroxipropilmetilcelulose com cera de abelha, propiciaram menor perda de massa em comparação com a fruta controle, mas o aumento das concentrações de cera de abelha nos recobrimentos não permitiu reduzir em maior quantidade a perda de massa, apesar de ser um hidrófobo e atuar como barreira, deduzindo que

tem mais força a relação entre os componentes no recobrimento que os componentes sozinhos. Teria relação com os resultados obtidos, podendo ser que o recobrimento que tinha cera de abelha e TiO_2 não tiveram uma boa relação juntos com luz UV apesar que por separados atuam como boas barreiras.

Ao contrário dos frutos controle e tratamento T1, cuja PM dos frutos não diferiram na presença ou ausência de luz, nos frutos do tratamento T2 na ausência de luz, a PM foi superior na presença de luz UV ($20,8 \pm 1,52 \%$), quando comparada a ausência de luz ($17,5 \pm 0,25 \%$). É possível que a presença de cera de abelha tenha prejudicado a absorção de radiação UV pelo TiO_2 , permitindo um aumento de danos por radiação nos frutos e levando a uma maior perda de massa destes.

4.8.3 Firmeza

Independente da presença ou ausência de luz, os frutos revestidos apresentaram firmeza de polpa superior aos frutos controle (Tabela 3). A ausência de embalagem, propicia rápido amadurecimento da fruta devido à produção e ativação de enzimas hidrolíticas que estão presentes na despolimerização das substâncias pécticas da parede celular devido às reações químicas e bioquímicas durante a maturação (Menezes *et al.*, 2024). As enzimas hidrolíticas (amilase, celulase, pectina metilesterase e poligalacturonase) convertem o amido em açúcar da parede celular provocando uma perda de turgência celular e por último o amaciamento da fruta (Sousa *et al.*, 2021).

A presença de revestimento cria uma atmosfera modificada que permite retardar os processos metabólicos, mantendo maior firmeza da fruta. Também, Sousa *et al.* (2021) observaram que as mangas sem revestimento diminuíram a firmeza mais rápido que as mangas revestidas com hidroxipropilmetilcelulose e cera de abelha a diferentes concentrações. Coincidindo com Wang *et al.* (2023a) que avaliaram pinhas revestidas com quitosana e ácido ascórbico por 12 dias a $15 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, onde aos 2 dias os três tratamentos tiveram uma diminuição da firmeza, mas as frutas revestidas conseguiram um maior resultado que o controle, deduzindo que os recobrimentos protegiam a fruta.

Na ausência de luz, os frutos revestidos com tratamento T1 e T2, apresentaram resultados semelhantes. Ao contrário, na presença de luz, o tratamento T1 ($4,0 \pm 0,44 \text{ N}$) apresentou frutos com maior firmeza quando comparado ao tratamento T2 ($2,20 \pm 0 \text{ N}$); tal comportamento se assemelha ao ocorrido com a perda de massa e taxa de respiração, no qual a interação da cera de abelha com o TiO_2 e a carragenina não permitiu a degradação fotocatalítica

do etileno no T2, produzindo uma acumulação dele, causando o dano da parede celular e gerando uma menor firmeza na fruta (Alves *et al.*, 2021).

A firmeza dos frutos do tratamento T2, ao contrário dos frutos controle e tratamento T1, não diferiram na presença ou ausência de luz. Os frutos controle apresentaram firmeza maior na ausência de luz. Não obstante, os frutos do tratamento T1 a firmeza foi maior na presença de luz UV ($4,0 \pm 0,44$ N), quando comparada a ausência de luz ($2,3 \pm 0,26$ N), podendo ser que aconteceu a degradação fotocatalítica do etileno devido ao TiO_2 ao reagir com a luz UV, retardando o dano na parede celular e permitindo manter a firmeza da fruta mais tempo que na ausência de luz. Menezes *et al.* (2024) mencionam que a luz UV não teve efeito na firmeza da polpa de mamão, mas sim chegaram a ter mais firmeza os recobrimentos com e sem TiO_2 que o controle. Para Kaewklin *et al.* (2018) os revestimentos de quitosana com TiO_2 em tomates irradiadas com luz UV conseguiram uma maior firmeza que os revestimentos com quitosana sem TiO_2 e o controle, mencionando que aconteceu uma menor acumulação do etileno no interior do revestimento pela fotodegradação dele devido ao TiO_2 , inibindo a decomposição da substância péctica das paredes celulares.

4.8.4 Sólidos Solúveis

Observa-se efeito significativo dos tratamentos, na presença ou ausência de luz UV para os sólidos solúveis dos frutos (Tabela 3). Os revestimentos T1 e T2 propiciaram maior teor de SS nos frutos na presença de luz, ao contrário dos frutos controle, cujo teor de SS não diferiu na presença ou ausência de luz, podendo ser que os revestimentos geraram aos amidos e outros polissacarídeos reservados se converter na forma solúvel do açúcar (degradação de amido e acumulação de açúcar) ao criar uma atmosfera modificada que acumula o CO_2 e esgota o O_2 , fazendo lento o metabolismo de carboidratos e atrasando o esgotamento do amido (Gohlani; Bisen, 2012).

Na presença de luz, o revestimento T1 apresentou teor de SS superior ao revestimento T2 e controle, que por sua vez não diferiram entre si, podendo ser que no T1, o TiO_2 não chegou a degradar todo o etileno dentro do revestimento, possivelmente devido a quebra do filme ao maturar a fruta desde o dia 9, provocando uma maior quantidade de O_2 ao redor dela, e consequentemente, uma maior quantidade de etileno produzido, aumentando o metabolismo de carboidratos, diferindo do estudo de Kaewklin *et al.* (2018), no qual os sólidos solúveis dos tomates foram menores em revestimentos com TiO_2 do que sem ele e o controle, sugerindo que o TiO_2 diminuiu o etileno concentrado, produzindo a hidrólise de carboidratos mais lenta para formar açúcares solúveis.

Na ausência de luz, o revestimento T1 propiciou resultado semelhante ao controle e superior ao revestimento T2; este por sua vez não diferiu do controle, podendo ser que no T2 a cera de abelha promoveu uma diminuição do metabolismo enzimático da conversão de amido em açúcar, como observado por Sousa *et al.* (2021), onde suas frutas revestidas com cera de abelha e hidroxipropilmetilcelulose foram mais baixos os sólidos solúveis que os frutos controle.

4.8.5 Fenólicos Totais

Houve efeito significativo de tratamento, na presença ou ausência de luz UV para os fenólicos totais dos frutos (Tabela 3).

Observa-se que apenas o revestimento T2 não apresentou diferenças no teor de fenólicos totais, na presença ou ausência de luz. Os demais tratamentos apresentaram maior fenólicos totais na ausência de luz, podendo ser que no T2 a cera de abelha inibiu mais as enzimas catalisadoras que oxidam os compostos fenólicos, conseguindo um menor valor, tendo relação com o estudo de Iqbal *et al.* (2024), no qual as cerejas revestidas com cera de abelha, hidroxipropilmetilcelulose e nanoemulsões de óleos essenciais também tiveram uma redução de fenólicos totais durante o armazenamento.

Independente da presença ou ausência de luz, os frutos revestidos apresentaram teor de fenólicos inferiores aos frutos controle. Os revestimentos protegem os frutos da oxidação ao atuar como uma barreira de transferência de gás, reduzindo a perda do conteúdo fenólico (Rossi-Márquez *et al.*, 2023). Tais resultados são parecidos com o estudo feito por Sousa *et al.* (2021), onde os frutos controle de mangas obtiveram maior resultado que os frutos com revestimento, deduzindo que a maturação do fruto foi o causante devido que os compostos fenólicos neutralizam os radicais livres produzidos durante a maturação, caso contrário de Ghasil *et al.* (2022), onde as pinhas submetidas com diferentes tratamentos (ácido oxálico, ácido salicílico e nitroprussiato sódico), os seus fenólicos totais foram diminuindo, especialmente o controle, tendo o valor mais baixo, deduzindo que aconteceu uma oxidação dos fenóis ou outro composto ou uma mudança da forma solúvel para insolúvel.

Na presença de luz, não houve diferença estatística entre teores de fenólicos para os frutos revestidos T1 e T2. Não obstante, na ausência de luz, o revestimento T1 apresentou maior teor de fenólicos que o revestimento T2, podendo ser que o TiO_2 , ao diminuir a presença do etileno no interior do revestimento, reduziu a atividade da enzima polifenol oxidase, evitando a hidrólise de substâncias fenólicas em antraquinona e sua posterior oxidação em precipitação

macromolecular de melanina (produção de senescência marrom e manchas escuras na casca), resultando em um maior teor de fenólicos (Xie *et al.*, 2022).

4.8.6 Atividade antioxidante (DPPH)

Observa-se efeito significativo de tratamento, na presença ou ausência de luz UV para a atividade antioxidante dos frutos (Tabela 3). O DPPH dos frutos revestidos com T1, aumentaram na ausência de luz. Ao contrário, dos frutos revestidos com T2 e controle, o valor de DPPH diminuiu. Tais resultados podem ser devido uma diminuição dos antioxidantes pelo desenvolvimento de radicais livres na maturação do fruto (Ghasil *et al.*, 2022), os quais não foram controlados por um revestimento para o caso dos frutos controle, e para o T2 o revestimento pode ter sido aberto no processo de maturação, ocasionando uma maior respiração, e consequentemente uma diminuição do valor de DPPH (Osae *et al.*, 2022).

Na presença de luz, os frutos do tratamento T1 apresentaram DPPH inferior ao revestimento T2. Por outro lado, esses não diferiram estatisticamente do controle. Uma explicação aos resultados pode ser que o TiO_2 e carragenina, junto com a luz UV, promoveram uma maior atividade antioxidante, devido a que um valor baixo de IC_{50} significa uma maior atividade antioxidante (Nandhakumar; Indumathi, 2013), assim como o estudo de Taghipour *et al.* (2024), onde os pistaches com revestimentos de quitosana e TiO_2 tiveram valores mais baixos que os controle, deduzindo que a efetividade do tratamento pode depender da fruta e o polímero usado.

Khan *et al.* (2023) sugeriram que os tratamentos que conseguiram conservar a atividade antioxidante foram por sua propriedade de barreira ao oxigênio, prevenindo a oxidação enzimática dos compostos fenólicos. Nesse sentido, a cera de abelha com o TiO_2 e a carragenina irradiados por luz UV, considerando os resultados apresentados nesse trabalho, não conseguiram atuar como barreira ao oxigênio.

Na ausência de luz, os frutos do tratamento T2, apresentaram DPPH inferior ao tratamento T1 e semelhante estatisticamente do controle. Todavia os frutos controle apresentaram valores inferiores de DPPH que os frutos revestidos com T1. Uma possível explicação para os valores obtidos dos frutos controle e do T2 é o crescimento microbiano, que causa um aumento na capacidade antioxidante por meio da biossíntese de polifenóis e da oxidação de pigmentos (Zambrano-Zaragoza *et al.*, 2021). O aparecimento de fungos nas pinhas a partir do nono dia de avaliação causou uma maior atividade antioxidante nos frutos do controle e do T2; no caso do T1, o TiO_2 , por ser um antimicrobiano, conseguiu retardar e reduzir a presença de fungos melhor do que os outros tratamentos.

Tabela 3 - Resultados dos parâmetros físico-químicos da pinha com diferentes tratamentos com luz UV e sem luz UV a 15 ± 1 °C e UR de 80 ± 1 % depois de 12 dias de armazenamento.

Variáveis	Tratamentos		
	Controle (T0)	Carragenina+TiO ₂ (T1)	Carragenina +TiO ₂ +Cera (T2)
Perda de massa (%)			
Com luz UV	23,5±1,26aA	16,5±0,80cA	20,8±1,52bA
Sem luz	24,3±0,76aA	15,9±0,51bA	17,5±0,25bB
Firmeza (N)			
Com luz UV	0,5±0,21cB	4,0±0,44aA	2,20±0,00bA
Sem luz	1,1±0,22bA	2,3±0,26aB	2,0±0,26aA
SS (°Brix)			
Com luz UV	12,03±0,45bA	13,8±0,55aA	12,16±0,87bA
Sem luz	10,90±0,20abA	11,7±0,76aB	10,10±0,66bB
Fenólicos Totais			
Com luz UV	220,33±0,57aB	207,60±1,95bB	206,26±7,71bA
Sem luz	246,40±4,21aA	217,63±1,95bA	198,43±4,46cA
DPPH			
Com luz UV	23,40±2,20abA	20,40±1,30bB	25,70±2,05aA
Sem luz	19,50±1,13bB	27,06±0,52aA	22,50±1,27bB

O conjunto de dados é apresentado como média $\pm$ desvio padrão. Letras diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras minúsculas representam a diferença nas linhas e as maiúsculas representam a diferença na coluna. Fonte: A autoria própria (2024).

4.8.7 Análise sensorial dos frutos

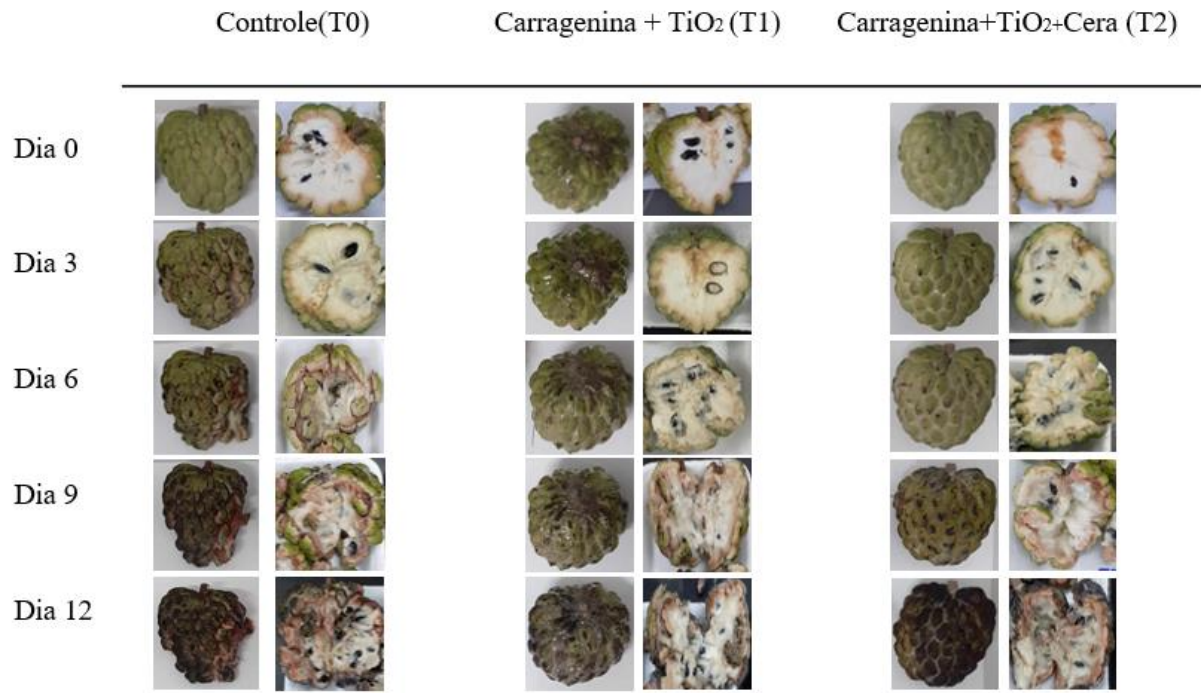
Para as avaliações visuais da aparência externa e interna, pode-se verificar na Figura 8, em presença de luz UV, os três primeiros dias que o revestimento sem cera (T1) propiciou maior brilho na cobertura e o revestimento com cera (T2) apresentou-se maior opacidade, devido a presença de cera de abelha.

A partir do 6º dia, a fruta controle abriu as espículas, indicando um estágio mais avançado de maturação em comparação com as frutas com revestimento, cujas espículas se mantiveram fechadas. A presença de fungos ocorreu a partir do nono dia, devido a abertura das espículas dos frutos com o amadurecimento, deixando expostos a polpa e o suco que contém altos níveis de açúcar, beneficiando a propagação de fungos rapidamente.

Aos 12 dias de armazenamento, a aparência externa do fruto do revestimento sem cera (T1) manteve melhor com maior proporção de cor verde e poucos pontos pretos na casca. Além disso, a aparência interna tanto dos revestimentos com e sem cera (T2 e T1), não apresentaram diferenças visualmente entre elas, mas ficaram superiores ao controle que ficou com a cor da polpa quase vermelha.

No caso dos resultados na ausência de luz UV foram registradas as fotos nos dias 0, 6 e 12 (Figura 9). Nota-se que tanto o fruto controle como os tratamentos com recobrimentos não conseguiram diminuir a presença das manchas pretas da casca no último dia em comparação com as frutas irradiadas com luz UV.

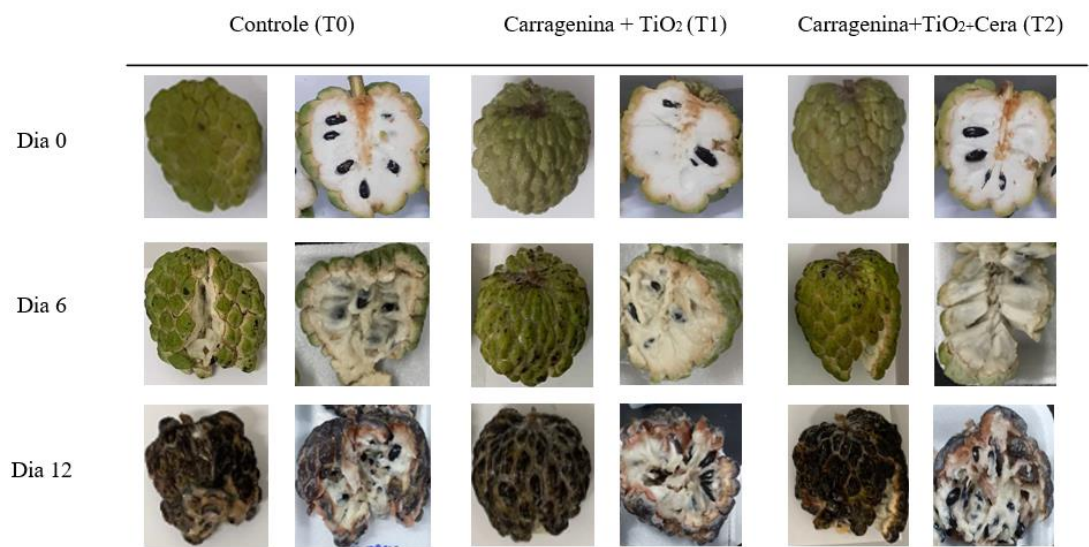
Figura 8 – Fotos da aparência externa e interna da pinha com diferentes tratamentos em presença de luz UV durante os 12 dias de armazenamento a $15 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $80 \pm 1 \text{ \% UR}$



Autoria própria (2024)

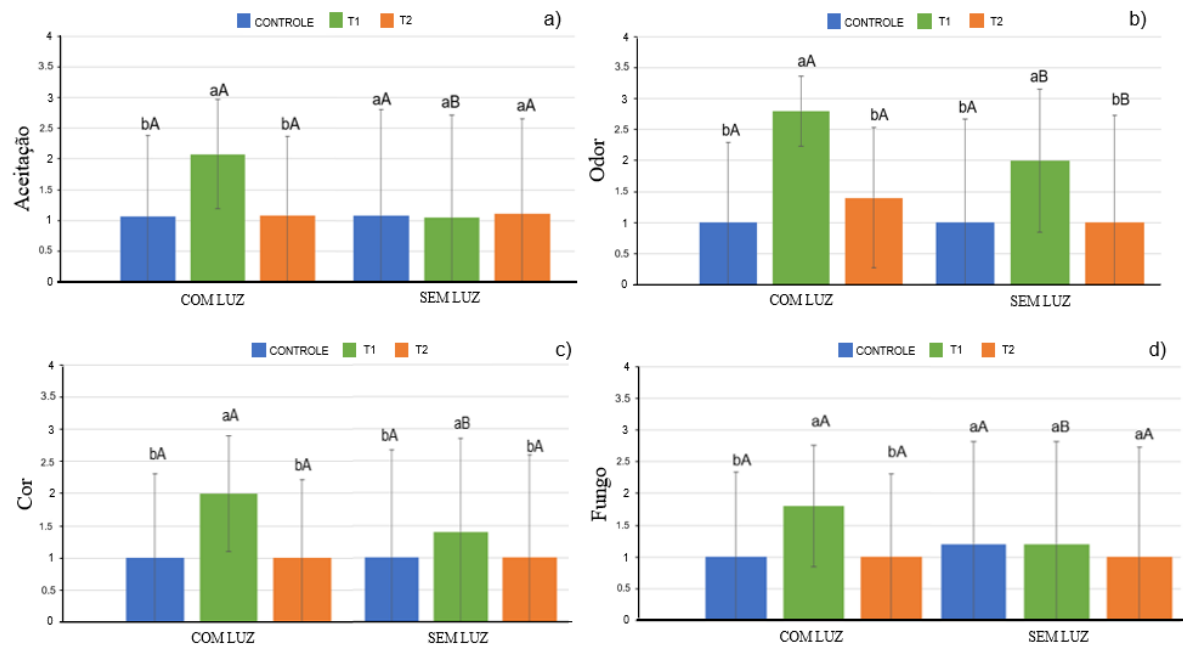
No 6º dia, apenas o revestimento sem cera (T1) manteve fechada as espículas da fruta, mas internamente a polpa dos três tratamentos continuaram maturando igual. Na aparência interna visualmente não apresentaram diferenças na polpa aos 12 dias.

Figura 9 - Fotos da aparência externa e interna da pinha com diferentes recobrimentos em ausência de luz UV durante os 12 dias de armazenamento a $15 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $80 \pm 1 \text{ \% UR}$



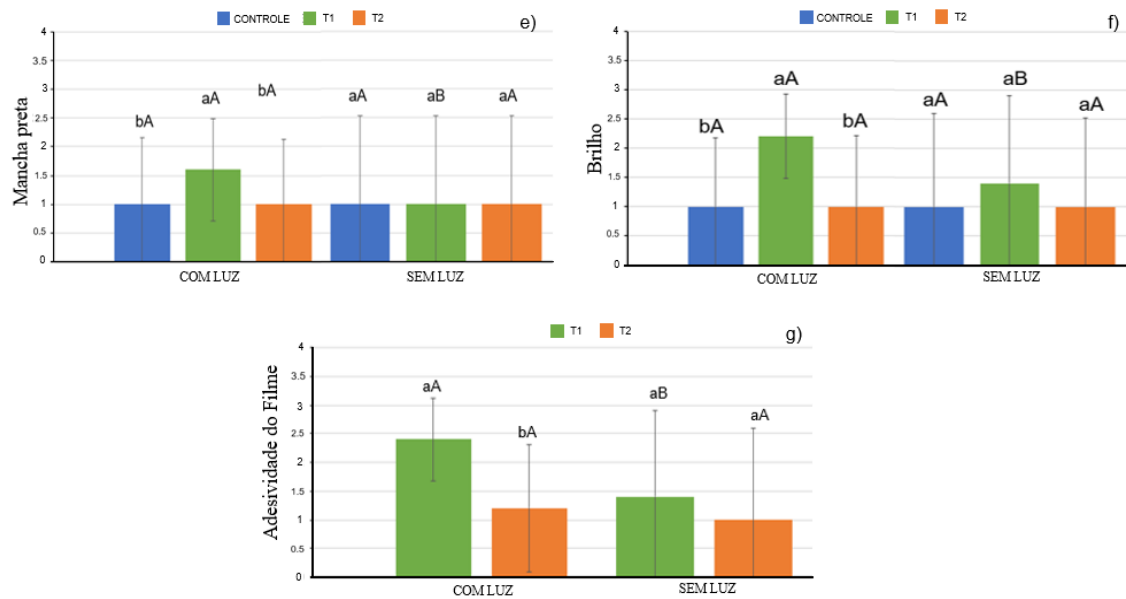
Autoria própria (2024)

Figura 10 – Resultados da aparência externa da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde a) Aceitação, b) Odor, c) Cor, d) Fungo



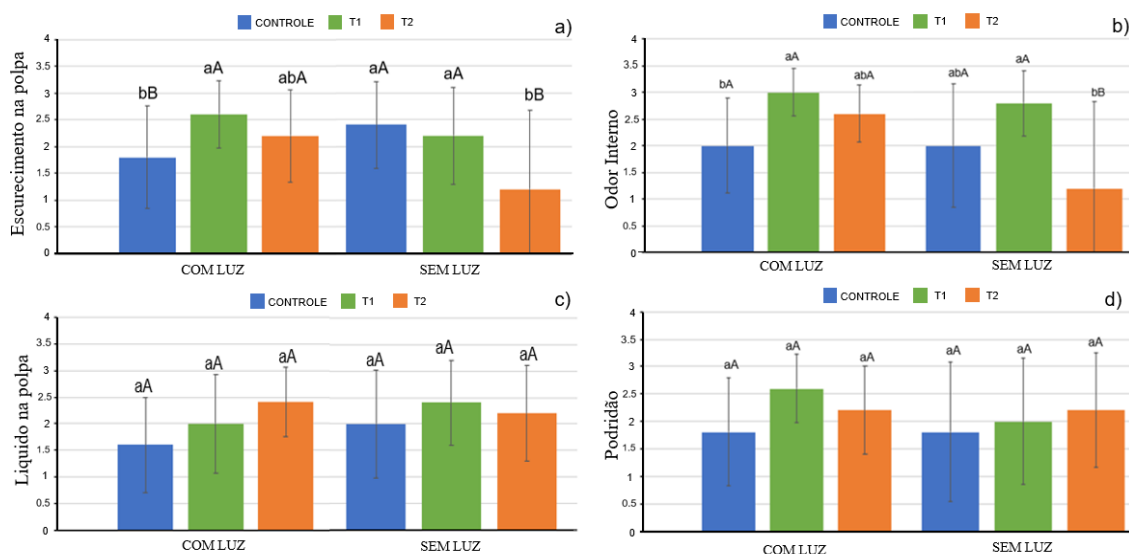
Autoria própria (2024)

Figura 11 – Resultados da aparência externa da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a 15 °C e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde e) Manchas pretas, f) Brilho, g) Adesividade do filme



Autoria própria (2024)

Figura 12 – Resultados da aparência interna da pinha com diferentes tratamentos com e sem presença da luz UV a 15 °C e UR de 80 % por 12 dias de armazenamento. Letras minúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos na mesma condição de luz pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam a diferença estatisticamente significativa entre as condições de luz no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), onde a) Escurecimento da polpa, b) Odor interno, c) Líquido na polpa, d) Podridão



Autoria própria (2024)

As Figuras 10 e 11, apresentam a comparação entre os tratamentos com e sem luz UV por 12 dias de avaliação das pinhas na aparência externa segundo as pontuações dos avaliadores.

A Figura 10 (a) representa a aceitabilidade dos frutos. Em ausência de luz, os três tratamentos foram considerados inaceitáveis pelos avaliadores por desidratação grave e velha (Figura 9). Com presença de luz, o revestimento sem cera (T1) obteve a pontuação 2 como aceitável por desidratação moderada (Figura 8). Apesar de que o TiO_2 e a combinação da nanopartícula com a luz UV permitem manter a aceitabilidade dos frutos mantendo a firmeza, reduzindo a perda de água e retardando a maturação (Yang *et al.*, 2022; Kulkarni; Karadbhajne, 2015), as pinhas com e sem revestimento não conseguiram ficar aceitáveis comercialmente até o último dia de avaliação, podendo-se ver a desidratação e amaciamento delas devido a atividade das enzimas modificadoras poligalacturonase, celulose e pectina metil esterase (Ren *et al.*, 2020).

A Figura 10 (b) representa o odor dos frutos. A pinha é conhecida por ter uma fragrância muito discreta e com cheiro adocicado devido a compostos voláteis como ésteres, aldeídos, álcoois e terpenos (Lugwisha; Fabian; Othman, 2016; Moussa *et al.*, 2024). Em ausência de luz, o controle e o revestimento com cera (T2) foram considerados inaceitáveis devido a odor desagradável moderado ou grave, só o revestimento sem cera (T1) foi considerado aceitável. Com presença de luz, o revestimento sem cera obteve pontuação perto de três, podendo-se considerar entre aceitável e bom. Os frutos podem sofrer mudanças na composição e conteúdo de substâncias responsáveis pelo sabor, produzindo-se a degradação do seu odor original, sendo

os compostos voláteis que emitem cheiro agradável também responsáveis por melhorar o sabor do fruto (Zhao *et al.*, 2024). A luz UV pode manter o cheiro das frutas tratadas (Kulkarni; Karadbhajne, 2015) e os revestimentos podem incrementar a concentração dos compostos voláteis aromáticos ao retê-los. Porém, também podem aumentar a concentração de etanol pela respiração anaeróbica gerada ao reduzir o O_2 e incrementar o CO_2 (El Hadi *et al.*, 2013), que ao se metabolizar produz cheiro de mofo ou fungo, indicando a deterioração dos frutos (Zhao *et al.*, 2024). Isso concorda com os resultados deste trabalho, já que conforme passavam-se os dias, o odor característico da pinha passou de doce a desagradável, exceto no caso dos frutos com revestimento sem cera e irradiados com luz UV, devido a interação entre a luz UV e o TiO_2 que promoveu a redução da concentração de etileno.

A Figura 10 (c) representa a cor dos frutos. Em ausência de luz, o revestimento sem cera (T1) apresentou resultado maior, mas inaceitável por perda de brilho e manchas muito intensas (Figura 9), mas com presença de luz, foi considerado aceitável por leve perda de brilho e presença de manchas escuras (Figura 8). A mudança da cor da casca da pinha passou da cor verde para amarelo e depois preto (Ren *et al.*, 2020) devido à polifenol oxidase e a fenilalanina amonialiase que produzem o escurecimento em frutas ao catalisar a oxidação de compostos polifenólicos e a síntese de precursores de substratos fenólicos, respectivamente (Kulkarni; Karadbhajne, 2015). O etileno também afetou a cor dos frutos, mas na presença de CO_2 em grandes quantidades, a mudança da cor da casca foi atrasada pela diminuição da síntese do etileno (Fagundes *et al.*, 2014) ao reagir com TiO_2 com a luz UV, os quais têm a propriedade de manter a cor nas frutas (Yang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2017; Kulkarni; Karadbhajne, 2015).

A Figura 10 (d) representa o fungo dos frutos. Em ausência de luz, os três tratamentos foram considerados como inaceitáveis por fungo severo, afetando mais de 50 % da fruta (Figura 9). Com presença de luz, o revestimento sem cera (T1) teve presença de fungos moderados afetando até duas áreas (Figura 8). Ao revestir as frutas pode acontecer uma respiração anaeróbica causada pela diminuição de O_2 e o aumento de CO_2 , ocasionando aparição de fungos ou mofos (El Hadi *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2024). Apesar de ter o revestimento sem cera (T1), em presença de luz, o TiO_2 que atua como um antimicrobiano (Qu *et al.*, 2019) e gera espécies reativas de oxigênio produzindo reações bioquímicas, provocando danos e desinfecção de bactérias e fungos (Mukherjee *et al.*, 2020), e a luz UV que tem efeitos biocidas ao degradar as paredes celulares e o ADN dos microorganismos (Kulkarni; Karadbhajne, 2015), não conseguiu evitar a presença de fungos, podendo ter acontecido a abertura do fruto devido à respiração, deixando o conteúdo da polpa exposto, favorecendo o desenvolvimento de fungos também pelo incremento de conteúdo de sólidos solúveis durante o armazenamento.

A Figura 11 (e) representa a presença de manchas pretas dos frutos. Em ausência de luz, os três tratamentos apresentaram resultado inaceitável por manchas pretas afetando mais de 50 % da fruta (Figura 9). Com presença de luz, o revestimento sem cera apresentou maior pontuação, mas foi considerada inaceitável (Figura 8). A aparição de manchas pretas teve relação com a mudança na cor da casca durante o armazenamento. As reações de escurecimento enzimático e não enzimático também produzem a aparição de manchas marrons, cinzas e pretas (Kulkarni; Karadbhajne, 2015).

O TiO_2 , em presença de luz, permitiu retardar a aparição das manchas pretas, concordando com os estudos de Yang *et al.* (2022) e Manzocco, Quarta e Dri (2009), onde as nanopartículas reduziram o dano oxidativo e polimerização de compostos fenólicos livres que causam as manchas pretas, e a luz UV conseguiu inativar a enzima polifenoloxidase de fatias de maçã refrigeradas. Apesar de a cera de abelha também retarda a aparição de manchas pretas como no estudo de Nasrin *et al.* (2020) em limões, nosso resultado ela não deixou atuar o TiO_2 em presença de luz UV, permitindo atuar a enzima polifenoloxidase e por conseguinte, a aparição de manchas pretas.

A Figura 11 (f) representa o brilho dos frutos. Em ausência de luz, os três tratamentos foram considerados inaceitáveis (embaçamento) (Figura 9). Com presença de luz, o revestimento sem cera (T1) apresentou frutos aceitáveis (levemente embaçado) (Figura 8). No primeiro dia, ao revestir as frutas com a formulação que tinha cera de abelha (T2), deu uma cor mais branca a toda a fruta ao deixar secar, podendo ser que a presença de lipídios na mistura reduz a transparência ficando mais opaco, segundo o estudo de Fabra, Talens e Chiralt (2008).

A diferença do T1, que ao ter só carragenina e TiO_2 , o revestimento ficou mais transparente e brilhante. Mas, ao passar os dias, aconteceu a redução do brilho em todos os tratamentos, segundo Menezes *et al.* (2024), devido à senescência dos frutos, só que os frutos sem cera diferiram por ter um atraso metabólico ao ter uma menor taxa de respiração e diminuição da síntese de etileno pela ação do TiO_2 e da luz UV.

A Figura 11 (g) representa a aderência do filme aos frutos. Em ausência de luz, o revestimento sem cera (T1) apresentou maior pontuação que o revestimento com cera (T2), mas ambas foram consideradas como inaceitáveis por descamação intensa, afetando mais de 50 % da fruta (Figura 9). Em presença de luz, o T1 teve uma maior pontuação que o T2 (aceitável por descamação afetando até duas áreas da fruta) (Figura 8).

É necessário filmes com alta resistência à tração, alto alongamento na ruptura e um valor baixo de módulo de Young para diminuir a rigidez do filme para evitar quebras durante o armazenamento (Bourtoom, 2008; Kong; Degraeve; Pui, 2022; Arham *et al.*, 2018).

Considerando o comportamento das propriedades mecânicas dos filmes (Figura 5 (f), (g) e (h)), o mais provável foi que o tratamento com cera, em presença ou ausência de luz, ao ter 27,3 % de cera de abelha, provocou uma diminuição da resistência à tração e aumentou o módulo de Young, fazendo ao filme quebradiço e rígido respectivamente, provocando a quebra dele ao maturar o fruto. O tratamento sem cera, por ter apenas TiO_2 e carragenina, teve um resultado contrário, conseguindo se manter completo por mais tempo em presença de luz, podendo se dizer que a luz UV permite melhorar as propriedades de adesividade do TiO_2 . Menezes *et al.* (2021) mencionam que os filmes com quitosana, fécula de mandioca e TiO_2 são mais hidrofóbicas, tendo maior resistência à tração e alongamento e por conseguinte, evitam a quebra do filme.

A Figura 12 (a) representa o escurecimento na polpa dos frutos. Em ausência de luz, o controle e o tratamento sem cera tiveram uma maior pontuação (moderado escurecimento da polpa) (Figura 9). Em presença de luz, os revestimentos com e sem cera (T1 e T2) tiveram maior pontuação, especialmente o T1 (podendo se considerar entre leve e moderado escurecimento na polpa) (Figura 8).

Os tratamentos não conseguiram retardar a maturação interna do fruto em comparação com a parte externa, onde o tratamento sem cera, em presença de luz UV, conseguiu retardar a mudança da cor e as manchas pretas características da senescência da pinha. No estudo de Kumhar, Pareek e Ameta (2014) também aconteceu o pardeamento da polpa das pinhas apesar de estarem armazenadas a temperatura ambiente e refrigeradas, diminuindo a aceitação dos avaliadores. Uma possível causa pode ser que a polifenoloxidase produz o pardeamento enzimático devido ao dano na membrana celular na senescência, formando o tecido escuro, oxidando os fenóis endógenos à quinonas para depois se polimerizar até produzir pigmentos marrons (Sui *et al.*, 2023). O revestimento sem cera (T1), ao continuar fechado, retardou a atividade da enzima.

A Figura 12 (b) representa o odor interno dos frutos. Em ausência de luz, o revestimento sem cera (T1) teve a maior pontuação (entre leve cheiro doce e moderado cheiro de podridão). Em presença de luz, o T1 teve uma pontuação de 3, considerada aceitável comercialmente (leve cheiro doce). Ao igual que os resultados do odor externo no fruto, os compostos voláteis da pinha foram mudando desde o cheiro doce até podridão devido à fermentação da polpa por a presença de fungos ao se abrir o fruto ao maturar, mas não o revestimento, produzindo-se uma respiração anaeróbica por o aumento de CO_2 e baixo O_2 , e por conseguinte, o cheiro a deterioração por fungos (El Hadi *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2024), exceto o T1 que, em presença

de luz, o TiO_2 , por sua atividade fotocatalítica, sintetizou o etileno produzindo CO_2 , além de sua atividade antimicrobiana junto à luz UV.

A Figura 12 (c) representa o líquido na polpa dos frutos. Em ausência de luz, os três tratamentos tiveram uma pontuação de 2 (líquido moderado) (Figura 9). Em presença de luz, o revestimento com cera (T2) teve uma maior pontuação, seguido do revestimento sem cera (T1) (ambas com líquido moderado) (Figura 8). A parede celular é formada por pectina unida covalentemente, hemicelulose, celulose e proteínas estruturais (Wang *et al.*, 2023b), mas quando acontece o amaciamento do fruto durante o armazenamento, a pectina da parede celular degrada-se de solúvel em ácido à solúvel em água, devido à atividade das enzimas metabolizadoras poligalacturonase e pectinametilesterase (Zushi; Hojima; Higashijima, 2024), provocando a degradação do amido, hidrolização das paredes celulares, a dispersão da celulose em filamentos e o amaciamento da polpa (Xu *et al.*, 2024). Os tratamentos com revestimento, em presença de luz, permitiram retardar a maturação ao diminuir a presença do etileno, tendo relação com os resultados de respiração e firmeza, onde ambos tratamentos não chegaram se amaciar tão rápido e conseguiram retardar o pico de respiração, evitando a degradação das pectinas da sua parede celular, assim como nos estudos de Zhang *et al.* (2017) e Shinga e Fawole (2023).

A Figura 12 (d) representa a podridão da polpa dos frutos. Em ausência de luz, os revestimentos com e sem cera (T2 e T1) foram considerados de graves por moderada podridão da polpa (Figura 9). Em presença de luz, o T1 teve a maior pontuação com moderada podridão da polpa (Figura 8). Ao início da senescência, o fruto pode ser infectado por fungos devido ao incremento da produção do etileno, tecidos fracos e sistema de defesa baixos, produzindo um intercâmbio de substâncias nocivas e enzimas hidrolíticas, gerando estresse oxidativo e dano aos tecidos (Bano *et al.*, 2023).

A luz UV afeta os tecidos das frutas ao ter fotorreceptores controlando os processos metabólicos, também acelera a síntese de metabólitos antimicóticos secundários (polifenóis e fitoalexinas) diminuindo os fungos (Bano *et al.*, 2023). No T2, a cera de abelha inibiu a atividade antimicrobiana do TiO_2 e a luz UV, fazendo que nos frutos que ficaram abertos proliferaram os fungos em maior quantidade, produzindo a podridão da polpa, a diferença do T1, onde o TiO_2 e a luz conseguiram atuar como agentes antimicrobianos, mas não tiveram muita potência devido ao revestimento quebrado ao maturar o fruto, tendo relação com o nosso resultado de presença de fungos na aparência externa.

5 CONCLUSÃO

Foram desenvolvidos filmes de carragenina com cera de abelha e TiO_2 , nos quais algumas concentrações apresentaram boas propriedades de barreira, ópticas e mecânicas. O menor resultado da PVA, segundo a superfície de resposta, foi essencial para determinar as concentrações ótimas dos filmes para seu uso posterior como revestimento em pinhas, destacando os filmes com 1,52 % de TiO_2 e 27,3 % de cera de abelha. A presença de luz UV em revestimentos com 1,52 % de TiO_2 permitiu retardar o pico de respiração, diminuir a perda de massa, manter a firmeza, sólidos solúveis, atividade antioxidante e aparência externa e interna dos frutos, atrasando a senescência. Portanto, as pinhas revestidas com 1,52 % de TiO_2 em presença de luz ultravioleta mantiveram sua qualidade aceitável até o 9º dia de armazenamento à 15 ± 1 °C e UR de 80 ± 1 %.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, M. M.; MARTINS, J. R.; SANVEZZO, P. B.; MACEDO, J. V.; BRANCIFORTI, M. C.; HALLEY, P.; BOTARO, V. R.; BRIENZO, M. Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. **Polymers**, v. 13, n. 15, p. 2484, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13152484>.

ALI, S. S.; ELSAMAHY, T.; ABDELKARIM, E. A.; AL-TOHAMY, R.; KORNAROS, M.; RUIZ, H. A.; ZHAO, T.; LI, F.; SUN, J. Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 363, p. 127869, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127869>.

ALI, S. S.; ABDELKARIM, E. A.; ELSAMAHY, T.; AL-TOHAMY, R.; LI, F.; KORNAROS, M.; ZUORRO, A.; ZHU, D.; SUN, J. Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 15, p. 100254, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100254>.

ALVES, M. J. dos S.; NOBIAS, M. C.; SOARES, L. S.; COELHO, D. S.; MARASCHIN, M.; BASSO, A.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J.; MONTEIRO, A. R. Physiological changes in green and red cherry tomatoes after photocatalytic ethylene degradation using continuous air flux. **Food Science and Technology International**, v. 29, n. 1, p. 3-12, 2021. DOI: [10.1177/10820132211056112](https://doi.org/10.1177/10820132211056112).

ANCY, A.; LAZAR, M.; CHANDRAN, A. S.; USHAMANI, M. Development of ecofriendly and sustainable bioplastics from cassava starch: Tailoring the properties using nanoparticles. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 37, p. 101377, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101377>.

ANDRIANI, V.; HANDAYANI, N. A. Recent technology of edible coating production: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 87, p. 200-206, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.397>.

ANIS, A.; PAL, K.; AL-ZAHRANI, S. M. Essential Oil-Containing Polysaccharide-Based Edible Films and Coatings for Food Security Applications. **Polymers**, v. 13, n. 4, p. 575, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040575>.

ARAÚJO, M. J. G. de; BARBOSA, F. C.; FOOK, M. V. L.; SILVA, S. M. L.; LEITE, I. F. Influence of Quaternary Ammonium Salt Functionalized Chitosan Additive as Sustainable Filler for High-Density Polyethylene Composites. **Materials**, v. 15, n. 21, p. 7418, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390%2Fma15217418>.

AREZOO, E.; MOHAMMADREZA, E.; MARYAM, M.; ABDORREZA, M. N. The synergistic effects of cinnamon essential oil and nano TiO₂ on antimicrobial and functional properties of sago starch films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 157, p. 743-751, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.244>.

ARHAM, R.; SALENGKE, S.; METUSALACH, M.; MULYATI, M. T. Optimization of agar and glycerol concentration in the manufacture of edible film. **International Food Research Journal**, v. 25, n. 5, p. 1845-1851, 2018.

ASREY, R.; SHARMA, S.; BARMAN, K.; PRAJAPATI, U.; NEGI, N.; MEENA, N. K. Biological and postharvest interventions to manage the ethylene in fruit: a review. **Sustainable Food Technology**, v. 1, n. 6, p. 803, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3FB00037K>.

ASSIS, O. B. G.; BRITTO, D. Revisão: coberturas comestíveis protetoras em frutas: fundamentos e aplicações. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 17, n. 2, p. 87-97, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/bjft.2014.019>.

ASTM D882-18. Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Annual Book of Standards, 1946.

ASTM E96/E96M-12. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. Annual Book of Standards, 1995.

ATIWESH, G.; MIKHAEL, A.; PARRISH, C. C.; BANOUB, J.; LE, T. -A. T. Environmental impact of bioplastic use: A review. **Heliyon**, v. 7, n. 9, p. e07918, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>.

AVRAMESCU, S. M.; BUTEAN, C.; POPA, C. V.; ORTAN, A.; MORARU, I.; TEMOCICO, G. Edible and Functionalized Films/Coatings-Performances and Perspectives. **Coatings**, v. 10, n. 7, p. 687, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10070687>.

BALASUBRAMANIAN, R.; KIM, S. S.; LEE, J.; LEE, J. Novel synergistic transparent k-Carrageenan/Xanthan gum/Gellan gum hydrogel film: Mechanical, thermal and water barrier properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 118, p. 561-568, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.110>.

BALASUBRAMANIAN, R.; KIM, S. S.; LEE, J.; LEE, J. Effect of TiO₂ on highly elastic, stretchable UV protective nanocomposite films formed by using a combination of k-Carrageenan, xanthan gum and gellan gum. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 123, p. 1020-1027, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.151>.

BANO, A.; GUPTA, A.; PRUSTY, M.R.; KUMAR, M. Elicitation of Fruit Fungi Infection and Its Protective Response to Improve the Postharvest Quality of Fruits. **Stresses**, v. 3, n. 1, p. 231-255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/stresses3010018>

BATISTA, D. de V. S.; REIS, R. C.; ALMEIDA, J. M.; REZENDE, B.; BRAGANÇA, C. A.

D.; SILVA, F. da. Edible coatings in post-harvest papaya: impact on physical–chemical and sensory characteristics. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 1, p. 274–281, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007%2Fs13197-019-04057-1>.

BIZYMIS, A. -P.; TZIA, C. Edible films and coatings: properties for the selection of the components, evolution through composites and nanomaterials, and safety issues. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 31, p. 8777-8792, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1934652>.

BOISSEAUX, P.; HOPKINSON, P.; SANTILLO, D.; SMITH, C.; GARMULEWICZ, A.; POWELL, Z.; GALLOWAY, T. Environmental safety of second and third generation bioplastics in the context of the circular economy. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 256, p. 114835, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114835>.

BOLÍVAR-FERNÁNDEZ, N.; SAUCEDO-VELOZ, C.; SOLÍS-PEREIRA, S.; SAURIDUCH, E. Maduración de frutos de saramuyo (*Annona squamosa* L.) desarrollados en Yucatán, México. **Agrociencia**, v. 43, n. 2, p. 133-141, 2009.

BOMFIM, M. P.; DIAS, N. O.; SOUZA, I. V. B.; SÃO JOSÉ, A. R.; PIRES, M. de M. Produção, características físico-químicas da pinha (*Annona squamosa* L.) em função do número de frutos por planta. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, v. 15, n. 1, p. 1-6, 2014.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT - Food Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).

BRANDÃO, A. P. M. E.; SANTOS, D. Y. A. C. Chapter 9: Nutritional value of the pulp of different sugar apple cultivars (*Annona squamosa* L.). **Nutritional composition of fruit cultivars**, p. 195–214, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00009-X>.

BRASIL, Y. L.; FORMIGA, A. dos S.; CRUZ, R. R. P.; SILVA, M. S. da; SILVA, A. G. F. da; MATTIUZ, B. -H.; COSTA, F. B. da; RIBEIRO, W. S. Edible coatings based on

hydroxypropyl methyl cellulose and beeswax in pinecone. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 4, 2022.

BOURTOOM, T. Factors Affecting the Properties of Edible Film Prepared from Mung Bean Proteins. **International Food Research Journal**, v. 15, n. 2, p. 167-180, 2008.

CARROCCIO, S. C.; SCARFATO, P.; BRUNO, E.; APREA, P.; DINTCHEVA, N. T.; FILIPPONE, G. Impact of nanoparticles on the environmental sustainability of polymer nanocomposites based on bioplastics or recycled plastics – A review of life-cycle assessment studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130322, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130322>.

CASTRO-CEGRÍ, A.; ORTEGA-MUÑOZ, M.; SIERRA, S.; CARVAJAL, F.; SANTOYO-GONZALES, F.; GARRIDO, D.; PALMA, F. Application of polysaccharide-based edible coatings to improve the quality of zucchini fruit during postharvest cold storage. **Scientia Horticulturae**, v. 314, p. 111941, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111941>.

CHEMIRU, G.; GONFA, G. Preparation and characterization of glycerol plasticized yam starch-based films reinforced with titanium dioxide nanofiller. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 5, p. 100300, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100300>.

CHEN, W.; MA, S.; WANG, Q.; MCCLEMENTS, D. J.; LIU, X.; NGAI, T.; LIU, F. Fortification of edible films with bioactive agents: a review of their formation, properties, and application in food preservation. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 18, p. 5029-5055, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1881435>.

CHENG, C.; CHEN, S.; SU, J.; ZHU, M.; ZHOU, M.; CHEN, T.; HAN, Y. Recent advances in carrageenan-based films for food packaging applications. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 1004588, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1004588>.

CHENG, Y.; YANG, S.; YIN, L.; PU, Y.; LIANG, G. Recent consequences of micro-nanoplastics (MNPLs) in subcellular/molecular environmental pollution toxicity on human

and animals. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 249, p. 114385, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114385>.

CHIARA, M. L. V. de; PAL, S.; LICCIULLI, A.; AMODIO, M. L.; COLELLI, G. Photocatalytic degradation of ethylene on mesoporous TiO₂/SiO₂ nanocomposites: Effects on the ripening of mature green tomatoes. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 61-70, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.02.008>.

COSTA, A.; ENCARNAÇÃO, T.; TAVARES, R.; BOM, T. T.; MATEUS, A. Bioplastics: Innovation for Green Transition. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 517, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030517>.

DAVIDOVIĆ, S.; MILJKOVIĆ, M.; GORDIC, M.; CABRERA-BARJAS, G.; NESIC, A.; DIMITRIJEVIĆ-BRANKOVIĆ, S. Dextran-Based Edible Coatings to Prolong the Shelf Life of Blueberries. **Polymers**, v. 13, n. 23, p. 4252, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13234252>.

DHANRAJ, S. R.; VENNILA, J. J.; DHANRAJ, M. Pharmacological investigation of ribosome inactivating protein (RIP) – like protein extracted from *Annona squamosa* L. seeds. **Journal of King Saud University-Science**, v. 32, n. 7, p. 2982-2988, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.08.002>.

DIAS, N. O.; MATSUMOTO, S. N.; REBOUÇAS, T. N. H.; VIANA, A. E. S.; SÃO JOSÉ, A. R.; SOUZA, I. V. B. Influência da poda de produção em ramos de diferentes diâmetros no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da pinheira (*Annona squamosa* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 1, p. 100-103, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000100029>.

DÍAZ-MONTES, E.; CASTRO-MUÑOZ, R. Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 249, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10020249>.

DOMÍNGUEZ, I.; LAFUENTE, M. T.; HERNÁNDEZ-MUÑOZ, P.; GAVARA, R. Influence of modified atmosphere and ethylene levels on quality attributes of fresh tomatoes

(*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Food Chemistry**, v. 209, p. 211-219, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.049>.

DU, J.; ZHONG, B.; SUBBIAH, V.; BARROW, C. J.; DUNSHEA, F. R.; SULERIA, H. A. R. LC-ESI-QTOF-MS/MS. Profiling and Antioxidant Activity of phenolics from Custard Apple Fruit and By-Products. **Separations**, v. 8, n. 5, p. 62, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations8050062>.

DUAN, N.; LI, Q.; MENG, X.; WANG, Z.; WU, S. Preparation and characterization of k-carrageenan/konjac glucomannan/ TiO₂ nanocomposite film with efficient anti-fungal activity and its application in strawberry preservation. **Food Chemistry**, v. 364, p. 130441, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130441>.

EL HADI, M. A.; ZHANG, F. J.; WU, F. F.; ZHOU, C. H.; TAO, J. Advances in Fruit Aroma Volatile Research. **Molecules**, v. 18, n. 7, p. 8200-8229, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules18078200>.

FABRA, M. J.; TALENS, P.; CHIRALT, A. Microstructure and optical properties of sodium caseinate films containing oleic acid–beeswax mixtures. **Food Hydrocolloids**, v. 23, p. 676-683, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.04.015>.

FABRA, M. J.; HAMBLETON, A.; TALENS, P.; DEBEAUFORT, F.; CHIRALT, A.; VOILLEY, A. Influence of interactions on water and aroma permeabilities of i-carrageenan–oleic acid–beeswax films used for flavour encapsulation. **Carbohydrate Polymers**, v. 76, p. 325-332, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.10.024>.

FAGUNDES, C.; PALOU, L.; MONTEIRO, A. R.; PÉRESZ-GAGO, M. B. Effect of antifungal hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible coatings on gray mold development and quality attributes of cold-stored cherry tomato fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 92, p. 1-8, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.01.006>.

FAGUNDES, C.; MORAES, K.; PÉREZ-GAGO, M. B.; PALOU, L.; MARASCHIN, M.; MONTEIRO, A. R. Effect of active modified atmosphere and cold storage on the postharvest quality of cherry tomatoes. **Postharvest Biology and Technology**, v. 109, p. 73-81, 2015. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.017>.

FERREIRA, F. N.; LIMA, G. S. de; GHEYI, H. R.; SÁ, F. V. da S.; DIAS, A. S.; PINHEIRO, F. W. A. Photosynthetic efficiency and production of *Annona squamosa* L. under salt stress and fertilization with NPK. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 446-452, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n7p446-452>.

FONSECA, J. M.; VALENCIA, G. A.; SOARES, L. S.; DOTTO, M. E. R.; CAMPOS, C. E. M.; MOREIRA, R. de F. P. M.; FRITZ, A. R. M. Hydroxypropyl methylcellulose-TiO₂ and gelatin-TiO₂ nanocomposite films: Physicochemical and structural properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 151, p. 944–956, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.082>.

FORMIGA, A. S.; JUNIOR, J. S. P.; PEREIRA, E. M.; CORDEIRO, I. N. F.; MATTIUZ, B. H. Use of edible coatings based on hydroxypropyl methylcellulose and beeswax in the conservation of red guava “Pedro Sato.” **Food Chemistry**, v. 290, p. 144–151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.142>.

FREITAS, I. Z. de; SANTOS, A. P. dos; BRANDALISE, L. T.; BERTOLINI, G. R. F. Os sacos plásticos na perspectiva da sustentabilidade: Uma revisão sistemática. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 10, n. 3, p.182-203, 2020.

FUNDO, J. F.; MILLER, F. A.; MANDRO, G. F.; TREMARIN, A.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. UV-C light processing of Cantaloupe melon juice: Evaluation of the impact on microbiological, and some quality characteristics, during refrigerated storage. **LWT**, v. 103, p. 247-252, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.025>.

GAO, S.; LIU, R.; SONG, H.; HUANG, D.; DAI, Y.; HOU, H.; WANG, W. Regulation of fine structure of different types of natural waxes by octenyl succinate starch in starch bioplastics. **Food Bioscience**, v. 59, p. 103920, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103920>.

GARAVITO, J.; HERRERA, A. O.; CASTELLANOS, D. A. A combined mathematical model to represent transpiration, respiration, and water activity changes in fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana*) fruits. **Biosystems Engineering**, v. 208, p. 152-163, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.05.015>.

GASPAR, X. E.; LÓPEZ, G. de los A. H.; GALINDO, G. C.; MORALES, M. P. Elaboración y evaluación de una biopelícula comestible con el uso de grenetina, miel y cera de abeja, para la conservación de tres variedades de *Vitis vinifera* (uva). **Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química**, v. 6, n. 6, p. 592-598, 2020.

GHASEMLOU, M.; BARROW, C. J.; ADHIKARI, B. The future of bioplastics in food packaging: An industrial perspective. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 43, p. 101279, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101279>.

GHASIL, I.; MEENA, N. K.; BHATNAGAR, P.; SINGH, H.; KUMAR, A.; JAIN, S. K.; BHATESHWAR, M. Effect of Postharvest Treatments on Biochemical and Bioactive Compounds of Custard Apple (*Annona Squamosa* L.) Cv. Balanagar. **International Journal of Fruit Science**, v. 22, n. 1, p. 826-836, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2022.2138684>.

GOHLANI, S.; BISEN, B. P. Effect of different coating material on the storage behavior of custard apple (*Annona squamosa* L.). **The Bioscan**, v. 7, n. 4, p. 637-640, 2012.

GONZÁLEZ- BUESA, J.; SALVADOR, M. L. An Arduino-based low cost device for the measurement of the respiration rates of fruits and vegetables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 14-20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.029>.

GUPTA, V.; BISWAS, D.; ROY, S. A Comprehensive Review of Biodegradable Polymer-Based Films and Coatings and Their Food Packaging Applications. **Materials**, v. 15, n. 17, p. 5899, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15175899>.

GUZMAN-PUYOL, S.; BENÍTEZ, J. J.; HEREDIA-GUERRERO, J. A. Transparency of polymeric food packaging materials. **Food Research International**, v. 161, p. 111792, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111792>.

HAMANN, D.; PUTÓN, B. M. S.; ROSICLER, C.; STEFFENS, J.; CENI, G. C.; CANSIAN, R. L.; BACKES, G. T. Active edible films for application in meat products. **Research, Society**

and Development, Erechim, v. 10, n. 7, p. e13610716379, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16379>.

HAMID, K. H. A.; JAYAKUMAR, T.; GUNASEGARAN, S.; AZMAN, N. A. M. Fabrication and Characterization of Semi-refined Carrageenan Films Incorporated with TiO₂ Nanoparticles. **Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology**, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15282/jceib.v9i1.9466>.

HAMMAM, A. R. A. Technological, applications, and characteristics of edible films and coatings: a review. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 632, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0660-8>.

HAN, X.; LIU, J.; TIAN, S.; TAO, F.; XU, P. Microbial cell factories for bio-based biodegradable plastics production. **iScience**, v. 25, n. 11, p. 105462, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105462>.

HAQ, M. A.; HASNAIN, A.; JAFRI, F. A.; AKBAR, M. F.; KHAN, A. Characterization of edible gum cordia film: Effects of beeswax. **LWT - Food Science and Technology**, v. 68, p. 674-680, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.011>.

HASHEMI, S. S.; KHORSHIDIAN, N.; MOHAMMADI, M. An insight to potential application of synbiotic edible films and coatings in food products. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 875368, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.875368>.

HATMI, R.U.; APRIYATI, E.; CAHYANINGRUM, N. Edible coating quality with three types of starch and sorbitol plasticizer. **E3S Web of Conferences**, v. 142, p. 02003, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014202003>.

IQBAL, S. Z.; HUSSAIN, M.; ALI, H.; HAIDER, A.; ALI, S.; HUSSAIN, A.; JAVED, M. A.; JAWAID, M. Preparation and application of hydroxypropyl methylcellulose blended with beeswax and essential oil edible coating to enhance the shelf life of sweet cherries. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 272, p. 132532, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132532>.

ISERMEYER, H. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. **Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde**, v. 56, n.1-3, p. 26–38, 1952.

JAGODA, S. U. M.; GAMAGE, J. R.; KARUNATHILAKE, H. P. Environmentally sustainable plastic food packaging: A holistic life cycle thinking approach for design decisions. **Journal of Cleaner Production**, v. 400, p. 136680, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136680>.

JASSAL, P. S.; KAUR, D.; PRASAD, R.; SINGH, J. Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Development and applications. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100361, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100361>.

KAEWKLIN, P.; SIRIPATRAWAN, U.; SUWANAGUL, A.; LEE, Y. S. Active packaging from chitosan-titanium dioxide nanocomposite film for prolonging storage life of tomato fruit. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 112, p. 523-529, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.124>.

KALE, G.; KIJCHAVENGKUL, T.; AURAS, R.; RUBINO, M.; SELKE, S. E.; SINGH, S. P. Compostability of Bioplastic Packaging Materials: An Overview. **Macromolecular Bioscience**, v. 7, n. 3, p. 255-277, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>.

KAZEMI, M.; JAHANBIN, K.; OJAGH, S. M.; ABDOLLAHI, M. Development of antimicrobial gelatin-ulvan-beeswax composite films: Optimization of formulation using mixture design methodology. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 231, p. 123384, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123384>.

KHAN, O. A.; ZAIDI, S.; ISLAM, R. U.; NASEEM, S.; JUNAID, P. M. Enhanced shelf-life of peach fruit in alginate based edible coating loaded with TiO₂ nanoparticles. **Progress in Organic Coatings**, v. 182, p. 107688, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107688>.

KHANZADI, M.; JAFARI, S. M.; MIRZAEI, H.; CHEGINI, F. K.; MAGHSOUDLOU, Y.; DEHNAD, D. Physical and mechanical properties in biodegradable films of whey protein

concentrate–pullulan by application of beeswax. **Carbohydrate Polymers**, v. 118, p. 24-29, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.015>.

KHODIFAD, B. C.; KUMAR, N. Foaming properties of custard apple pulp and mathematical modelling of foam mat drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 2, p. 526–536, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04082-0>.

KLANGMUANG, P.; SOTHORNVIT, R. Combination of beeswax and nanoclay on barriers, sorption isotherm and mechanical properties of hydroxypropyl methylcellulose-based composite films. **LWT- Food Science and Technology**, v. 65, p. 222-227, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.003>.

KOCIRA, A.; KOZŁOWICZ, K.; PANASIEWICZ, K.; STANIAK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; HORTYŃSKA, P. Polysaccharides as Edible Films and Coatings: Characteristics and Influence on Fruit and Vegetable Quality—A Review. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 813, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050813>.

KONG, I.; DEGRAEVE, P.; PUI, L. P. Polysaccharide-Based Edible Films Incorporated with Essential Oil Nanoemulsions: Physico-Chemical, Mechanical Properties and Its Application in Food Preservation- A Review. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 555, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11040555>.

KULKARNI, S.; KARADBHAJNE, S. Influence of uv light exposure on shelf life extension of freshcut fruits. **International Journal of Advanced Research**, v. 3, n. 5, p. 1296-1306, 2015.

KUMAR, M.; CHANGAN, S.; TOMAR, M.; PRAJAPATI, U.; SAURABH, V.; HASAN, M.; SASI, M.; MAHESHWARI, C.; SINGH, S.; DHUMAL, S.; RADHA; THAKUR, M.; PUNIA, S.; SATÁNKAR, V.; AMAROWICZ, R.; MEKHEMAR, M. Custard Apple (*Annona squamosa* L.) Leaves: Nutritional Composition, Phytochemical Profile, and Health-Promoting Biological Activities. **Biomolecules**, v. 11, n. 5, p. 614, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11050614>.

KUMAR, N.; PRATIBHA; PETKOSKA, A. T.; KHOJAH, E.; SAMI, R.; AL-MUSHHIN, A. A. M. Chitosan Edible Films Enhanced with Pomegranate Peel Extract: Study on Physical, Biological, Thermal, and Barrier Properties. **Materials**, v. 14, n. 12, p. 3305, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123305>.

KUMARI, N.; PRAKASH, S.; KUMAR, M.; RADHA; ZHANG, B.; SHERI, V.; RAIS, N.; CHANDRAN, D.; DEY, A.; SARKAR, T.; DHUMAL, S.; KUMAR, S.; MAHATO, D. K.; VISHVANATHAN, M.; MOHANKUMAR, P.; PATEIRO, M.; LORENZO, J. M. Seed Waste from Custard Apple (*Annona squamosa* L.): A Comprehensive Insight on Bioactive Compounds, Health Promoting Activity and Safety Profile. **Processes**, v. 10, n. 10, p. 2119, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10102119>.

KUMHAR, D. S.; PAREEK, S.; AMETA, K. D. Effect of antioxidants and storage temperatures on browning and quality of custard apple (*Annona squamosa* L.) pulp. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 73, p. 622-626, 2014.

LAPA, L. S. S.; SILVA, Y. R. de O.; SALES, P. F. de; GUIMARÃES, K. C.; DIAS, M. V. Avaliação das propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis e sua aplicação em embalagens para acondicionamento de plantas. **ForScience**, v. 9, n. 2, p. e00970, 2021. DOI: <https://doi.org/10.29069/forscience.2021v9n2.e970>.

LAROTONDA, F. D. S.; TORRES, M. D.; GONÇALVES, M. P.; SERENO, A. M.; HILLIOU, L. Hybrid carrageenan-based formulations for edible film preparation: Benchmarking with kappa carrageenan. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 2, p. 42263, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.42263>.

LI, C.; WANG, L.; XUE, F. Effects of Conjugation between Proteins and Polysaccharides on the Physical Properties of Emulsion-Based Edible Films. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 96, n. 11, p. 1249-1263, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/aocs.12278>.

LIN, M. G.; LASEKAN, O.; SAARI, N.; KHAIRUNNIZA-BEJO, S. Effect of chitosan and carrageenan-based edible coatings on post-harvested longan (*Dimocarpus longan*) fruits. **CyTA: Journal of Food**, v. 16, n. 1, p. 490-497, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1414078>.

LISITSYN, A.; SEMENOVA, A.; NASONOVA, V.; POLISHCHUK, E.; REVUTSKAYA, N.; KOZYREV, I.; KOTENKOVA, E. Approaches in Animal Proteins and Natural Polysaccharides Application for Food Packaging: Edible Film Production and Quality Estimation. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1592, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13101592>.

LIU, Z.; LIU, X. Enhanced Antibacterial Performance of Chitosan/Corn Starch Films Containing TiO₂/Graphene for Food Packaging. **Polymers**, v. 14, n. 18, p. 3844, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14183844>.

LIU, Y.; QIN, Y.; BAI, R.; ZHANG, X.; YUAN, L.; LIU, J. Preparation of pH-sensitive and antioxidant packaging films based on κ-carrageenan and mulberry polyphenolic extract. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 134, p. 993–1001, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.175>.

LIU, H.; PAN, H.; CHU, P.; HUO, D. Impact of plastic pollution on outdoor recreation in the existence of bearing capacity and perspective management. **Environmental Research**, v. 214, p. 113819, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113819>.

LUFU, R.; AMBAW, A.; OPARA, U. L. The contribution of transpiration and respiration processes in the mass loss of pomegranate fruit (cv. Wonderful). **Postharvest Biology and Technology**, v. 157, p. 110982, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110982>.

LUGWISHA, E. H.; FABIAN, C.; OTHMAN, O. C. Postharvest Changes in Physicochemical Properties and Levels of Some Inorganic Elements in Sugar Apple (*Annona squamosa* L.) Fruits of Coast Region, Tanzania. **Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 4, n. 3, p. 41-48, 2016. DOI: 10.11648/j.jfns.20160403.11.

MAHADEVBHAI, C. C.; PATEL, A. P. Effect of Grading and Post-Harvest Application of Chemicals on Bio-Chemical Parameters of Custard Apple (*Annona squamosa* L.) cv. Balanagar. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 7, n. 11, p. 1085-1093, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.711.126>.

MANZOCCO, L.; QUARTA, B.; DRI, A. Polyphenoloxidase inactivation by light exposure in model systems and apple derivatives. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 10, n. 4, p. 506-511, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.02.004>.

MARIUM, A.; TABASSUM, A.; ALI, T. M.; ALIYA, R. Production of bio-degradable carrageenan-based films from *Solieria robusta* (red bamboo) of karachi coast by using glycerol and sorbitol. **International Journal of Biology and Biotechnology**, v. 18, n. 1, p. 65-72, 2021.

MA'RUF, H.; DEWATA, I. The Effect Of Added Carrageenan On Tensile Strength And Biodegradation Of Edible Film Using Breadfruit Starch. **Jurnal Kependudukan dan Pembangunan Lingkungan**, v. 3, n. 1, p. 31-37, 2022.

MATHEW, S. S.; JAISWAL, A. K.; JAISWAL, S. Carrageenan-based sustainable biomaterials for intelligent food packaging: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 342, p. 122267, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122267>.

MENA-MARTÍNEZ, M. E.; HERNÁNDEZ-JABALERA, A.; LEÓN-ESPINOSA, E. B.; CRUZ-MONTERROSA, R. G.; RAYAS-AMOR, A. A.; DÍAZ-RAMÍREZ, M.; JIMÉNEZ-GUZMÁN, J.; MIRANDA DE LA LAMA, G. C.; GARCÍA-GARIBAY, M.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, C. J. Biopolímeros de celulosa en empaques alimenticios: Retos y aplicaciones. **Agro Productividad**, v. 12, n. 11, p. 83-88, 2019. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1499>.

MENEZES, F. L. G. de; LEITE, R. H. de L.; SANTOS, F. K. G. dos; ARIA, A. I.; AROUCHA, E. M. M. TiO₂-enhanced chitosan/cassava starch biofilms for sustainable food packaging. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 630, p. 127661, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127661>.

MENEZES, F. L. G. de; LEITE, R. H. de L.; SANTOS, F. K. G. dos; ARIA, A. I.; AROUCHA, E. M. M. TiO₂ incorporated into a blend of biopolymeric matrices improves film properties and affects the postharvest conservation of papaya fruits under UV light. **Food Chemistry**, v. 433, p. 137387, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137387>.

MINH, N. P.; PHAM, V. T.; PHUNG, L. N.; LAI, T. C.; PHUONG, D. H. Application of Edible

Coating to Extend Shelf Life of Custard Apple (*Annona squamosa*) Fruit during Storage. **Journal of Global Pharma Technology**, v. 11, n. 1, p. 14-20, 2019a.

MINH, N. P.; NHI, T. T. Y.; NGUYEN, N. T.; LUAN, T. M.; MAI, P. X. Effectiveness of edible coating to preservation of passion fruit. **Journal of Global Pharma Technology**, v. 11, n.1, p. 1-8, 2019b.

MIZOBUTSI, G. P.; SILVA, J. M. da; MIZOBUTSI, E. H.; RODRIGUES, M. L. M.; LOPES, R. S.; FERNANDES, M. B.; OLIVEIRA, F. S. Conservação de pinha com uso de atmosfera modificada e refrigeração. **Revista Ceres**, v. 59, n. 6, p. 751-757, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000600003>.

MOHAMMADI, M.; ZOGHI, A.; AZIZI, M. H. Assessment of properties of gluten-based edible film formulated with beeswax and DATEM for hamburger bread coating. **Food Science and Nutrition**, v. 11, n. 4, p. 2061-2068, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3242>.

MORAIS, D. R.; ROTTA, E. M.; SARGI, S. C.; SCHMIDT, E. M.; BONAFE, E. G.; EBERLIN, M. N.; SAWAYA, A. C. H. F.; VISENTAINER, J. V. Antioxidant activity, phenolics and UPLC–ESI(–MS of extracts from different tropical fruits parts 138 and processed peels. **Food Research International**, v. 77, p. 392–399, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.036>.

MOREIRA, R. C. L.; BRITO, M. E. B.; FERNANDES, P. D.; SÁ, F. V. da S.; SILVA, L. de A.; OLIVEIRA, C. J. A.; VELOSO, L. L. de S. A.; DE QUEIROGA, T. B. Growth and physiology of *Annona squamosa* L. under different irrigation depths and phosphate fertilization. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 2, p. 389-397, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n2a20198-41931>.

MOURA, E. A. de; CHAGAS, P. C.; CHAGAS, E. A.; OLIVEIRA, R. R. de; ARAÚJO, W. F.; SOBRAL, S. T. M.; TAVEIRA, D. L. L. Phenological study of sugar apple (*Annona squamosa* L.) in dystrophic yellow latosol under the savanna conditions of Roraima. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 9, p. 1467-1472, 2019.

MOURA, E. A. de; CHAGAS, P. C.; OLIVEIRA, R. R.; TAVEIRA, D. L. L.; GRIGIO, M. L.;

ARAÚJO, W. F. Determination of the harvest time of sugar apples (*Annona squamosa* L.) in function of carpel interspace. **Acta Scientiarum**, v. 43, p. e48732, 2021. DOI: 10.4025/actasciagron.v43i1.48732.

MOUSSA, A. Y.; SIDDIQUI, S. A.; ELHAWARY, E. A.; GUO, K.; ANWAR, S.; XU, B. Phytochemical constituents, bioactivities, and applications of custard apple (*Annona squamosa* L.): A narrative review. **Food Chemistry**, p. 140363, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140363>.

MUKHERJEE, K.; ACHARYA, K.; BISWAS, A.; JANA, N. R. TiO₂ Nanoparticles Co-doped with Nitrogen and Fluorine as Visible-Light-Activated Antifungal Agents. **ACS Applied Nano Materials**, v. 3, n. 2, p. 2016-2025, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00108>.

NANDHAKUMAR, E.; INDUMATHI, P. In vitro Antioxidant Activities of Methanol and Aqueous Extract of *Annona squamosa* (L.) Fruit Pulp. **Journal of Acupuncture and Meridian Studies**, v. 6, n. 3, p. 142-148, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jams.2012.09.002>.

NASRIN, T. A. A.; RAHMAN, M. A.; ARFIN, M. S.; ISLAM, M. N.; ULLAH, M. A. Effect of novel coconut oil and beeswax edible coating on postharvest quality of lemon at ambient storage. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, p. 100019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100019>.

NOR, S. M.; DING, P. Trends and advances in edible biopolymer coating for tropical fruit: A review. **Food Research International**, v. 134, p. 109208, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109208>.

NOORIAN, S.; NAFCHI, A. M.; BOLANDI, M.; JOKAR, M. Effects of Nano-Titanium Dioxide and Mentha piperita Essential Oil on Physicochemical, Mechanical, and Optical Properties of Cassava Starch Film. **Starch**, v. 74, n. 9-10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.202200090>.

OCHOA, T. A.; ALMENDÁREZ, B. E. G.; REYES, A. A.; PASTRANA, D. M. R.; LÓPEZ, G. F. G.; BELLOSO, O. M.; REGALADO-GONZÁLEZ, C. Design and Characterization of Corn Starch Edible Films Including Beeswax and Natural Antimicrobials. **Food Bioprocess**

Technol, v. 10, p. 103–114, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1800-4>.

OLEYAEI, S. A.; ZAHEDI, Y.; GHANBARZADEH, B.; MOAYEDI, A. A. Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 89, p. 256–264, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078>.

OLIVEIRA, V. R. L.; XAVIER, T. D. N.; ARAÚJO, N. O.; ALMEIDA, J. G. L.; AROUCHA, E. M. M.; SANTOS, F. K. G.; LEITE, R. H. de L.; SILVA, K. N. de O. Evaluation of biopolimeric films of cassava starch with incorporation of clay modified by ionic exchange and its application as a coating in a fruit. **Materials Research**, v. 20, p. 758-766, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0928>.

OLIVEIRA, V. R. L.; SANTOS, F. K. G.; LEITE, R. H. L.; AROUCHA, E. M. M.; SILVA, K. N. O. Use of biopolymeric coating hydrophobized with beeswax in post-harvest conservation of guavas. **Food Chemistry**, v. 259, p. 55-64, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.101>.

OLIVEIRA, J. R. S.; SILVA, A. P. S.; DOS SANTOS, B. S.; LIMA, V. L. M. Avaliação de diferentes extratos da casca de *Annona squamosa* para potencial analgésico. **Revista Interfaces: Saúde, Humanas e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 1456-1462, 2022. DOI: <https://doi.org/10.16891/2317-434X.v10.e2.a2022.pp1456-1462>.

OMAR-AZIZ, M.; KHODAIYAN, F.; YARMAND, M. S.; MOUSAVI, M.; GHARAGHANI, M.; KENNEDY, J. F.; HOSSEINI, S. S. Combined effects of octenylsuccination and beeswax on pullulan films: Water-resistant and mechanical properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 255, p. 117471, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117471>.

OSAE, R.; APALIYA, M. T.; ALOLGA, R. N.; KWAW, E.; OTU, P. N. Y.; AKABA, S. Influence of shea butter, bee wax and cassava starch coatings on enzyme inactivation, antioxidant properties, phenolic compounds and quality retention of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits. **Applied Food Research**, v. 2, p. 100041, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100041>.

PAIVA, C. A. de; VILVERT, J. C.; MENEZES, F. L. G. de; LEITE, R. H. de L.; SANTOS, F. K. G. dos; MEDEIROS, J. F. de; AROUCHA, E. M. M. Extended shelf life of melons using chitosan and graphene oxide-based biodegradable bags. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 11, p. e14871, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14871>.

PALMA, R. M. M.; PÉREZ, A. A. F.; PADILLA, M. C. Recubrimientos comestibles para extender la vida de anaquel de productos hortofrutícolas. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 4, p. 4605-4625, 2021. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.644.

PALOU, L.; VALENCIA-CHAMORRO, S. A.; PÉREZ-GAGO, M. B. Antifungal Edible Coatings for Fresh Citrus Fruit: A Review. **Coatings**, v. 5, n. 4, p. 962-986, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings5040962>.

PAREEK, S.; YAHIA, E. M.; PAREEK, O. P.; KAUSHIK, R. A. Postharvest physiology and technology of Annona fruits. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 1741-1751, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.016>.

PARK, N.; FRIEST, M. A.; LIU, L. Enhancing the Properties of Polyvinyl Alcohol Films by Blending with Corn Stover-Derived Cellulose Nanocrystals and Beeswax. **Polymers**, v. 15, n. 21, p. 4321, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15214321>.

PARVEN, A.; SARKER, M. R.; MEGHARAJ, M.; MEFTAUL, I. M. Prolonging the shelf life of Papaya (*Carica papaya* L.) using Aloe vera gel at ambient temperature. **Scientia Horticulturae**, v. 265, p. 109228, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109228>.

PATIDAR, M.; KANWAR, J.; SINGH, O. P.; RATHORE, G. P. S. Study on the Effect of Post Harvest Treatments on Shelf Life of Custard Apple (*Annona squamosa* L.) Variety Arka Sahan during Storage. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 10, n. 1, p. 3159-3164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.368>.

PATIL, R. A.; RAO, D. V. S.; MANASA, B. Effect of modified atmospheric packaging on chilling injury and shelf-life of custard apple fruits. **Journal of Applied Horticulture**, v. 15, n. 2, p. 100-105, 2013.

PAUER, E.; WOHNER, B.; HEINRICH, V.; TACKER, M. Assessing the Environmental Sustainability of Food Packaging: An Extended Life Cycle Assessment including Packaging-Related Food Losses and Waste and Circularity Assessment. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 925, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030925>.

PÉREZ-VERGARA, L. D.; CIFUENTES, M. T.; FRANCO, A. P.; PÉREZ-CERVERA, C. E.; ANDRADE-PIZARRO, R. D. Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. **NFS Journal**, v. 21, p. 39-49, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.09.002>.

PHAM, T. T.; NGUYEN, L. L. P.; DAM, M. S.; BARANYAI, L. Application of Edible Coating in Extension of Fruit Shelf Life: Review. **AgriEngineering**, v. 5, n. 1, p. 520-536, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010034>.

PIRES, C.; RAMOS, C.; TEIXEIRA, B.; BATISTA, I.; NUNES, M.L.; MARQUES, A. Hake proteins edible films incorporated with essential oils: Physical, mechanical, antioxidant and antibacterial properties. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 1, p. 224-231, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.019>.

PRASANNA, K. N. V.; RAO, D. V. S.; KRISHNAMURTHY, S. Effect of storage temperature on ripening and quality of custard apple (*Annona squamosa* L.) fruits. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 75, n. 5, p. 546-550, 2000. DOI: [10.1080/14620316.2000.11511283](https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511283).

PRASEPTIANGGA, D.; MUFIDA, N.; PANATARANI, C.; JONI, I. M. Enhanced multi functionality of semi-refined iota carrageenan as food packaging material by incorporating SiO₂ and ZnO nanoparticles. **Heliyon**, v. 7, n. 5, p. e06963, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06963>.

QIU, J. Y.; LIU, C. Y.; LI, Y. Q.; XIE, B. Y.; ZHU, Z. Y. Effects of postharvest treatment with pullulan, calcium chloride, and chitosan on quality and sugar metabolism of *Annona squamosa* during storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 7, p. e16615, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16615>.

QU, L.; CHEN, G.; DONG, S.; HUO, Y.; YIN, Z.; LI, S.; CHEN, Y. Improved mechanical and antimicrobial properties of zein/chitosan films by adding highly dispersed nano-TiO₂. **Industrial Crops and Products**, v. 130, p. 450-458, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.093>.

RAJ, N. B.; PAVITHRAGOWDA, N. T.; POOJA, O. S.; PURUSHOTHAM, B.; KUMAR, M. R. A.; SUKRUTHA, S. K.; RAVIKUMAR, C. R.; NAGASWARUPA, H. P.; MURTHY, H. C. A.; BOPPANA, S. B. Harnessing ZnO nanoparticles for antimicrobial and photocatalytic activities. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 6, p. 100021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100021>.

REGES, B. M.; BATISTA, E. M.; ALMEIDA, E. J. do N.; LEMOS, L. M. dos R.; SILVA, E. F. da; SOUZA, P. A. de. Post-harvest of sugar apple (*Annona squamosa* L.) covered with pvc. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 4, p. 445–451, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i4.5702>.

REIS, M. O.; OLIVATO, J. B.; BILCK, A. P.; ZANELA, J.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Biodegradable trays of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 481-487, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.045>.

REN, Y. -Y.; SUN, P. -P.; WANG, X. -X.; ZHU, Z. -Y. Degradation of cell wall polysaccharides and change of related enzyme activities with fruit softening in *Annona squamosa* during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 166, p. 111203, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111203>.

RIAHI, Z.; PRIYADARSHI, R.; RHIM, J.-W.; BAGHERI, R. Gelatin-based functional films integrated with grapefruit seed extract and TiO₂ for active food packaging applications. **Food Hydrocolloids**, v. 112, p. 106314, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106314>.

RIAHI, Z.; KHAN, A.; RHIM, J.-W.; SHIN, G. H.; KIM, J. T. Carrageenan-based active and intelligent packaging films integrated with anthocyanin and TiO₂-doped carbon dots derived

from sweet potato peels. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 259, p. 129371, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129371>.

RODRIGUES, B. R. A.; NIETSCH, S.; MERCADANTE-SIMÕES, M. O.; PEREIRA, M. C. T.; RIBEIRO, L. M. Climatic seasonality influences the development of pollen grains and fruiting in *Annona squamosa*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 150, p. 240-248, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.025>.

ROSETO, A.; ESPINOZA-MONTERO, P.; FERNÁNDEZ, L. Recubrimientos comestibles con materiales micro/nanoestructurados para la conservación de frutas y verduras: Una revisión. **InfoANALÍTICA**, v. 8, n. 1, p. 149–178, 2020. DOI: 10.26807/ia.vi.180.

ROSSI-MÁRQUEZ, G.; DÁVALOS-SAUCEDO, C. A.; MAYEK-PÉREZ, N.; DI PIERRO, P. Multilayered Edible Coatings to Enhance Some Quality Attributes of Ready-to-Eat Cherimoya (*Annona cherimola*). **Coatings**, v. 13, n. 1, p. 41, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13010041>.

ROUFEJARINEJAD, L. Development and Characterization of the Reinforced Soy Protein Isolate-Based Nanocomposite Film with CuO and TiO₂ Nanoparticles. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 30, p. 2507–2515, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02374-9>.

RUKMANIKRISHNAN, B.; KIM, S. S.; LEE, J.; LEE, J. Effect of TiO₂ on highly elastic, stretchable UV protective nanocomposite films formed by using a combination of k-Carrageenan, xanthan gum and gellan gum. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 123, p. 1020-1027, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.151>.

RUKMANIKRISHNAN, B.; RAJASEKHARAN, S. K.; LEE, J.; RAMALINGAM, S.; LEE, J. K-Carrageenan/lignin composite films: Biofilm inhibition, antioxidant activity, cytocompatibility, UV and water barrier properties. **Materials Today Communications**, v. 24, p. 101346, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101346>.

RUX, G.; LABUDE, C.; HERPPICH, W. B.; GEYER, M. Investigation on the potential of applying bio-based edible coatings for horticultural products exemplified with cucumbers. **Current Research in Food Science**, v. 6, p. 100407, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.100407>.

RYOSUKE, N.; UEMURA, A.; SHIMADA, K.; YOSHIDA, T.; MA, D.; MANDOUR, A.; OGAWA, S.; TANAKA, R. Improvement of plastic drape adhesion for surgery: Effect of Young's modulus of the base film on drape detachment from the surgical wound edge. **Perioperative Care and Operating Room Management**, v. 32, p. 100328, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pcorm.2023.100328>.

SANI, M. A.; MALEKI, M.; EGHBALJOO-GHAREHGHESHLAHI, H.; KHEZERLOU, A.; MOHAMMADIAN, E.; LIU, Q.; JAFARI, S. M. Titanium dioxide nanoparticles as multifunctional surface-active materials for smart/active nanocomposite packaging films. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 300, p. 102593, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102593>.

SANTOS, E. R. dos; SOUZA, F. T. C. de. Desenvolvimento de bebida fermentada utilizando a polpa de pinha (*Annona squamosa* L.) como alternativa para excedentes de colheita. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 14, n. 1, p. 3191-3211, 2020.

SANTOS, L. S.; FERNANDES, C. C.; SANTOS, L. S.; DEUS, I. P. B. de; SOUSA, T. L. de; MIRANDA, M. L. D. Ethanolic extract from *Capsicum chinense* Jacq. ripe fruits: phenolic compounds, antioxidant activity and development of biodegradable films. **Food Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 497-504, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.08220>.

SAURABH, C. K.; GUPTA, S.; VARIYAR, P. S.; SHARMA, A. Effect of addition of nanoclay, beeswax, tween-80 and glycerol on physicochemical properties of guar gum films. **Industrial Crops and Products**, v. 89, p. 109-118, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.003>.

SHAKERI, M.; RAZAVI, S. H.; SHAKERI, S. Carvacrol and astaxanthin co-entrapment in beeswax solid lipid nanoparticles as an efficient nano-system with dual antioxidant and anti-biofilm activities. **LWT**, v. 107, p. 280-290, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.031>.

SHARMA, M.; SAINI, C. S. Postharvest shelf-life extension of fresh-cut guavas (*Psidium guajava*) using flaxseed protein-based composite coatings. **Food Hydrocolloids for Health**, v. 1, p. 100015, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100015>.

SHARMA, S.; NAKANO, K.; KUMAR, S.; KATIYAR, V. Edible packaging to prolong postharvest shelf-life of fruits and vegetables: A review. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100711, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100711>.

SHINGA, M. H.; FAWOLE, O. A. Opuntia ficus indica mucilage coatings regulate cell wall softening enzymes and delay the ripening of banana fruit stored at retail conditions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 245, p. 125550, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125550>.

SHRIVASTAVA, A.; TRIPATHI, A. D.; MAURYA, K. K. The drying characteristics and quality evaluation of tray dried custard apple (*Annona squamosa* L.) pulp. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2019.

SINGH, N.; OGUNSEITAN, O. A.; WONG, M. H.; TANG, Y. Sustainable materials alternative to petrochemical plastics pollution: A review analysis. **Sustainable Horizons**, v. 2, p. 100016, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100016>.

SINGLETON, V.L., ROSSI, J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 48, p. 144-58, 1965.

SILVA, J. M. da; MIZOBUTSI, G. P.; MIZOBUTSI, E. H.; CORDEIRO, M. H. M.; FERNANDES, M. B. Conservação pós-colheita de pinha com uso de 1-Metilciclopropeno. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 4, p. 1201-1208, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000400031>.

SIRIPATRAWAN, U.; KAEWKLIN, P. Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging.

Food Hydrocolloids, v. 84, p. 125-134, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.049>.

SONNTAG, F.; LIU, H.; NEUGART, S. Nutritional and Physiological Effects of Postharvest UV Radiation on Vegetables: A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 26, p. 9951-9971, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00481>.

SOUSA, F. F.; JUNIOR, J. S. P.; OLIVEIRA, K. T. E. F.; RODRIGUES, E. C. N.; ANDRADE, J. P.; MATTIUZ, B.-H. Conservation of ‘Palmer’ mango with an edible coating of hydroxypropyl methylcellulose and beeswax. **Food Chemistry**, v. 346, p. 128925, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128925>.

SRIPONG, K.; JITAREERAT, P.; UTHAIRATANAKIJ, A. UV irradiation induces resistance against fruit rot disease and improves the quality of harvested mangosteen. **Postharvest Biology and Technology**, v. 149, p. 187-194, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.12.001>.

STOICA, M.; ANTOHI, V. M.; ZLATI, M. L.; STOICA, D. The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers - A smart solution for the food industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 124013, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124013>.

SUKHIJA, S.; SINGH, S.; RIAR, C. S. Physical, Mechanical, Morphological, and Barrier Properties of Elephant Foot Yam Starch, Whey Protein Concentrate and psyllium Husk Based Composite Biodegradable Films. **POLYMER COMPOSITES**, v. 39, n. S1, p. E407–E415, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.24488>.

SUI, X.; MENG, Z.; DONG, T.; FAN, X.; WANG, Q. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 81, p. 102921, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102921>.

SYAHIDA, S. N.; ISMAIL-FITRY, M. R.; AINUN, Z. M. A.; HANANI, Z. A. N. Effects of palm wax on the physical, mechanical and water barrier properties of fish gelatin films for food

packaging application. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 23, p. 100437, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100437>.

TAGHIPOUR, S.; NIA, A. E.; HOKMABADI, H.; YAHIA, E. M. Quality evaluation of fresh pistachios (*Pistacia vera* L.) cultivars coated with chitosan/TiO₂ nanocomposite. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 258, p. 129055, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129055>.

TCHONKOUANG, R. D.; LIMA, A. R.; QUINTINO, A. C.; CRISTOFOLI, N. L.; VIEIRA, M. C. UV-C Light: A Promising Preservation Technology for Vegetable-Based Nonsolid Food Products. **Foods**, v. 12, n. 17, p. 3227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12173227>.

TUURI, E. M.; LETERME, S. C. How plastic debris and associated chemicals impact the marine food web: A review. **Environmental Pollution**, v. 321, p. 121156, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121156>.

TUVIKENE, R.; TRUUS, K.; VAHER, M.; KAILAS, T.; MARTIN, G.; KERSEN, P. Extraction and quantification of hybrid carrageenans from the biomass of the red algae *Furcellaria lumbricalis* and *Coccotylus truncatus*. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Chemistry**, Estonia, v. 55, n. 1, p. 40–53, 2006.

VEGA, M. E. G. Chirimoya (*Annona cherimola* Miller), frutal tropical y sub-tropical de valores promisorios. **Cultivos Tropicales**, v. 34, n. 3, p. 52-63, 2013.

VEJDAN, A.; OJAGH, S. M.; ADELI, A.; ABDOLLAHI, M. Effect of TiO₂ nanoparticles on the physico-mechanical and ultraviolet light barrier properties of fish gelatin/agar bilayer film. **LWT-Food Science and Technology**, v. 71, p. 88-95, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.03.011>.

VELASCO, D. M. L.; FORERO, O. J. S. Gomas empleadas en la industria de alimentos. **Revista de investigaciones Carmenta**, v. 1, p. 43-48, 2018.

VELÁSQUEZ, P.; MONTENEGRO, G.; VALENZUELA, L. M.; GIORDANO, A.; CABRERA-BARJAS, G.; MARTIN-BELLOSO, O. k-carrageenan edible films for beef:

Honey and bee pollen phenolic compounds improve their antioxidant capacity. **Food Hydrocolloids**, v. 124, p. 107250, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107250>.

VELICKOVA, E.; WINKELHAUSEN, E.; KUZMANOVA, S.; ALVES, V. D.; MOLDÃO-MARTINS, M. Impact of chitosan-beeswax edible coatings on the quality of fresh strawberries (*Fragaria ananassa* cv Camarosa) under commercial storage conditions. **LWT- Food Science and Technology**, v. 52, p. 80-92, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.004>.

VENKATRAM, A.; BHAGWAN, A. Storage life improvement of custard apple (*Annona squamosa* L.) 'Balanagar' fruits by postharvest application of antioxidants. **Journal of Applied Horticulture**, v. 15, n. 3, p. 215-219, 2013.

VENKATRAM, A.; BHAGWAN, A.; PRATAP, M.; REDDY, D.V.V. Effect of modified atmosphere package on physico- chemical characteristics of 'balanagar' custard apple (*Annona squamosa* L.) fruits stored at $15 \pm 1^\circ\text{C}$. **International Journal of Science and Nature**, v. 7, n. 2, p. 332-338, 2016.

VILLADA, H. S.; ACOSTA, H. A.; VELASCO, R. J. Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. **Temas Agrarios**, v. 12, n. 2, p. 5-13, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.21897/rta.v12i2.652>.

VILLARROEL, D. M.; GONZÁLES, L. R.; BRITO, M.; RAMOS-VILLARROEL, A. Y. LUZ ULTRAVIOLETA: INACTIVACIÓN MICROBIANA EN FRUTAS. **Saber**, v. 27, n. 3, p. 454-469, 2015.

VINCENT, C.; MESA, T.; MUNNÉ-BOSCH, S. Hormonal interplay in the regulation of fruit ripening and cold acclimation in avocados. **Journal of Plant Physiology**, v. 251, p. 153225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153225>.

WANG, J.; JIANG, Y.; LI, G.; LV, M.; ZHOU, X.; ZHOU, Q.; FU, W.; ZHANG, L.; CHEN, Y.; JI, S. Effect of low temperature storage on energy and lipid metabolisms accompanying peel browning of 'Nanguo' pears during shelf life. **Postharvest Biology and Technology**, v. 139, p. 75-81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.020>.

WANG, H.; DING, F.; MA, L.; ZHANG, Y. Edible films from chitosan-gelatin: Physical properties and food packaging application. **Food Bioscience**, v. 40, p. 100871, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100871>.

WANG, L. -y.; PENG, H. -h.; LIU, C. -y.; LI, C. -c.; QU, J. -m.; GENG, X. -q.; ZHU, Z. -Y. Effect of chitosan-ascorbic acid composite coating on postharvest quality of Custard apple (*Annona squamosa*). **Process Biochemistry**, v. 129, p. 76-85, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2023.03.013>.

WANG, D.; LU, Q.; WANG, X.; LING, H.; HUANG, N. Elucidating the role of SIXTH5 in tomato fruit softening. **Horticultural Plant Journal**, v. 9, n. 4, p. 777-788, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.12.005>.

WONGS-AREE, C.; NOICHINDA, S. 20 - Sugar apple (*Annona squamosa* L.) and atemoya (*A. cherimola* Mill. × *A. squamosa* L.). **Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits**, p. 399-427, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857092618.399>.

XAVIER, T. D. N.; OLIVEIRA, V. R. L. de; LEITE, R. H. de L.; AROUCHA, E. M. M.; SANTOS, F. K. G. dos. Filmes biopoliméricos baseados em fécula, quitosana e cera de carnaúba e suas propriedades. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, p. e12866, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1166>.

XIE, J.; WANG, R.; LI, Y.; NI, Z.; SITU, W.; YE, S.; SONG, X. A novel Ag₂O-TiO₂-Bi₂WO₆/polyvinyl alcohol composite film with ethylene photocatalytic degradation performance towards banana preservation. **Food Chemistry**, v. 375, p. 131708, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131708>.

XU, Y.; YANG, C.; ZHANG, Y.; CAO, Q.; WAN, C.; CHEN, C.; CHEN, J.; HUANG, Z.; GAN, Z. Blue light treatment delays postharvest ripening of kiwifruit by suppressing ethylene biosynthesis, starch degradation, and cell wall metabolism. **LWT**, v. 199, p. 116105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116105>.

YANG, Z.; LI, M.; ZHAI, X.; ZHAO, L.; TAHIR, H. E.; SHI, J.; ZOU, X.; HUANG, X.; LI, Z.; XIAO, J. Development and characterization of sodium alginate/tea tree essential oil

nanoemulsion active film containing TiO₂ nanoparticles for banana packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 213, p. 145-154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.164>.

YAO, J.; CHEN, W.; FAN, K. Recent advances in light irradiation for improving the preservation of fruits and vegetables: A review. **Food Bioscience**, v. 56, p. 103206, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103206>.

YIN, F.; ZHU, Y.; KOUTCHMA, T.; GONG, J. Inactivation and potential reactivation of pathogenic Escherichia coli O157:H7 in bovine milk exposed to three monochromatic ultraviolet UVC lights. **Food Microbiology**, v. 49, p. 74-81, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.014>.

ZAMBRANO-ZARAGOZA, M. L.; QUINTANAR-GUERRERO, D.; GONZÁLEZ-REZA, R. M.; CORNEJO-VILLEGAS, M. A.; LEYVA-GÓMEZ, G.; URBÁN-MORLÁN, Z. Effects of UV-C and Edible Nano-Coating as a Combined Strategy to Preserve Fresh-Cut Cucumber. **Polymers**, v. 13, n. 21, p. 3705, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13213705>

ZANCHETTA, E.; DAMERGI, E.; PATEL, B.; BORGMEYER, T.; PICK, H.; PULGARIN, A.; LUDWIG, C. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities. **Algal Research**, v. 56, p. 102288, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102288>.

ZHANG, W.; XIAO, H.; QIAN, L. Beeswax–chitosan emulsion coated paper with enhanced <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.164>water vapor barrier efficiency. **Applied Surface Science**, v. 300, p. 80-85, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.005>.

ZHANG, X.; XIAO, G.; WANG, Y.; ZHAO, Y.; SU, H.; TAN, T. Preparation of chitosan-TiO₂ composite film with efficient antimicrobial activities under visible light for food packaging applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 169, p. 101-107, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.073>.

ZHANG, Y.; SIMPSON, B. K.; DUMONT, M.-J. Effect of beeswax and carnauba wax addition on properties of gelatin films: A comparative study. **Food Bioscience**, v. 26, p. 88-95, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.09.011>.

ZHANG, X.; LIU, Y.; YONG, H.; QIN, Y.; LIU, J.; LIU, J. Development of multifunctional food packaging films based on chitosan, TiO₂ nanoparticles and anthocyanin-rich black plum peel extract. **Food Hydrocolloids**, v. 94, p. 80-92, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.009>.

ZHANG, R.; WANG, W.; ZHANG, H.; DAI, Y.; DONG, H.; HOU, H. Effects of hydrophobic agents on the physicochemical properties of edible agar/maltodextrin films. **Food Hydrocolloids**, v. 88, p. 283-290, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.008>.

ZHANG, R.; WANG, W.; ZHANG, H.; DAI, Y.; DONG, H.; KONG, L.; HOU, H. Effects of preparation conditions on the properties of agar/maltodextrin beeswax pseudo-bilayer films. **Carbohydrate Polymers**, v. 236, p. 116029, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116029>.

ZHANG, L.; WANG, Z.; JIAO, Y.; WANG, Z.; TANG, X.; DU, Z.; ZHANG, Z.; LU, S.; QIAO, C.; CUI, J. Biodegradable packaging films with ϵ -polylysine/ZIF-L composites. **LWT**, v. 166, p. 113776, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113776>.

ZHANG, R.; ZHAI, X.; WANG, W.; HOU, H. Preparation and evaluation of agar/maltodextrin-beeswax emulsion films with various hydrophilic-lipophilic balance emulsifiers. **Food Chemistry**, v. 384, p. 132541, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132541>.

ZHANG, W.; RHIM, J.-W. Titanium dioxide (TiO₂) for the manufacture of multifunctional active food packaging films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100806, 2022c. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100806>.

ZHAO, H.; ZHANG, S.; MA, D.; LIU, Z.; QI, P.; WANG, Z.; DI, S.; WANG, X. Review of fruits flavor deterioration in postharvest storage: Odorants, formation mechanism and quality control. **Food Research International**, v. 182, p. 114077, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114077>.

ZHOU, D.; LIU, Q.; ZHU, T.; LI, T.; FAN, G.; LI, X.; WU, C. Effects of ultraviolet C on the quality and aroma volatile in peach fruit during postharvest storage. **Food Chemistry**, v. 456, p. 139906, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139906>.

ZUSHI, K.; HOJIMA, M.; HIGASHIJIMA, M. Postharvest changes in texture profiles and pectin metabolism in salt-stressed tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 336, p. 113381, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113381>.