

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade De Farmácia
Programa De Pós Graduação Em Ciência Dos Alimentos

Noemi De Paula Almeida

**FILMES BIOPOLIMÉRICOS DE PECTINA E PROTEÍNA ISOLADA DE GIRASSOL:
desenvolvimento, caracterização e aplicação sustentável do mesocarpo de
pequi.**

Belo Horizonte
2025

Noemi De Paula Almeida

**FILMES BIOPOLIMÉRICOS DE PECTINA E PROTEÍNA ISOLADA DE GIRASSOL:
desenvolvimento, caracterização e aplicação sustentável do mesocarpo de
pequi.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos da Faculdade de Farmácia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dr^a Adriana Silva França

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira

Belo Horizonte

2025

A447f

Almeida, Noemi de Paula.

Filmes biopoliméricos de pectina e proteína isolada de girassol [recurso eletrônico] : desenvolvimento, caracterização e aplicação sustentável do mesocarpo de pequi / Noemi de Paula Almeida. – 2025. 1 recurso eletrônico (101 f. : il.) : pdf.

Orientadora: Adriana Silva França.

Orientador: Leandro Soares de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Faculdade de Farmácia, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Biopolímeros – Teses. 2. Pectinas – Teses. 3. Girassol – Semente – Teses. 4. Pequi – Teses. 5. Alimentos – Embalagens – Teses. I. França, Adriana Silva. II. Oliveira, Leandro Soares de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Faculdade de Farmácia. IV. Título.

CDD: 664.092

Elaborado por Aline Guimarães Amorim – CRB-6/2292



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO**FILMES BIOPOLIMÉRICOS DE PECTINA E PROTEÍNA ISOLADA DE GIRASSOL: DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL DO MESOCARPO DE PEQUI****NOEMI DE PAULA ALMEIDA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DE ALIMENTOS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIA DE ALIMENTOS, área de concentração CIÊNCIA DE ALIMENTOS.

Aprovada em 16 de junho de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Dra. Adriana Silva França (Orientadora e presidente da comissão) - UFMG

Prof. Dr. Leandro Soares de Oliveira (Coorientador) - UFMG

Profa. Dra. Idalina José Monteiro Gonçalves - Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio - UFMG

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Silva França, Professora do Magistério Superior**, em 16/06/2025, às 14:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Campos Rubio, Professor do Magistério Superior**, em 16/06/2025, às 23:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Idalina José Monteiro Gonçalves, Usuária Externa**, em 17/06/2025, às 04:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 17/06/2025, às 06:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4299664** e o código CRC **44580E0B**.

Dedico aos meus pais, minha família e meus amigos

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, que esteve comigo em cada etapa desta caminhada.

Aos meus pais, Eliud e Isabel, que sempre me apoiaram de todas as formas, mesmo à distância, e ao meu irmão, Cândido, junto com sua família, Estefany e Heitor, que guardo com imenso carinho. À minha tia Isméria e à minha avó Nilce, por quem as palavras são poucas diante de tudo o que tenho a agradecer e expressar.

Aos amigos, que fazem com que a vida em Belo Horizonte tenha um significado maior do que conquistar um diploma, e também àqueles que, mesmo de longe, seguem ao meu lado.

Agradeço também às minhas colegas de laboratório, especialmente Bárbara e Layla, que sempre estiveram dispostas a me ouvir, seja sobre ciência ou sobre as dificuldades do processo. Muito obrigada, sem vocês este trabalho não seria possível.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, Adriana e Leandro, que tornaram este trabalho viável. Admiro muito a trajetória de vocês na ciência e sou grata por todo trabalho e empenho nesse projeto.

Por fim, agradeço aos parceiros que proporcionaram a realização deste trabalho: ao Prof. Herman S. Mansur, do Centro de Nanociência, Nanotecnologia e Inovação — CeNano²I/CEMUCASI/UFMG, por possibilitar as análises de FTIR; ao Dr. Felipe Furtini Haddad, da UFLA, pela realização das análises mecânicas; e à Faculdade de Farmácia, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, bem como aos funcionários e professores, que contribuíram para minha formação.

Informações sobre uso de ferramentas de Inteligência Artificial (IA)

Informo que o software ChatGPT-4 (Open AI, chatgpt.com) foi utilizado como recurso exclusivamente para correção gramatical e reestruturação de texto. O texto foi posteriormente revisado e editado pela autora e orientadores, para garantir coerência e acurácia das informações

RESUMO

As embalagens utilizadas em produtos alimentícios são majoritariamente constituídas de materiais poliméricos sintéticos, especialmente plásticos, os quais contribuem significativamente para a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação de ambientes terrestres e aquáticos. Diante da crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis, os biopolímeros oriundos de fontes renováveis, como carboidratos e proteínas extraídas de resíduos agroindustriais, emergem como alternativas promissoras para o desenvolvimento de materiais de embalagem sustentáveis. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de filmes biopoliméricos formulados a partir de proteína isolada de girassol, em associação com pectina cítrica comercial em diferentes proporções. Adicionalmente, investiga-se a substituição da pectina comercial por pectina extraída do mesocarpo do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) como estratégia para potencializar a sustentabilidade do material produzido. Dentre os principais resultados obtidos, destaca-se a formação de filmes com características interessantes de barreira de oxigênio e vapor de água, com destaque para o filme com 80% de proteína e 20% de pectina, que apresentou menores valores para esta propriedade, sendo a blenda selecionada para avaliação comparativa entre a pectina comercial cítrica e pectina extraída de mesocarpo de pequi. A pectina extraída apresentou grau de esterificação superior a 50%, se assemelhando à pectina comercial. A substituição não acarretou em diferenças com relação às propriedades de barreira, porém, houveram diferenças significativas com relação às propriedades mecânicas. Os filmes blends (com exceção de F20-80) e puros de proteína apresentam biodegradabilidade em até 10 dias em solo, evidenciando a sustentabilidade da embalagem. Conclui-se que é possível a produção de filmes a base de pectina comercial e extraída do mesocarpo do pequi em conjunto com a proteína isolada da semente de girassol, sendo essa uma alternativa sustentável para a fabricação de embalagens plásticas.

Palavras-chave: Filme biopolimérico; Pectina; Proteína isolada da semente de girassol; Pequi.

ABSTRACT

The packaging used for food products is mostly made of synthetic polymeric materials, especially plastics, which contribute significantly to greenhouse gas emissions and the contamination of terrestrial and aquatic environments. Given the growing demand for environmentally responsible solutions, biopolymers from renewable sources, such as carbohydrates and proteins extracted from agro-industrial wastes, are emerging as promising alternatives for the development of sustainable packaging materials. In this context, this study aimed to develop and characterize biopolymeric films formulated from isolated sunflower protein combined with commercial citrus pectin in different proportions. Additionally, the replacement of commercial pectin with pectin extracted from the mesocarp of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) was investigated as a strategy to further enhance the sustainability of the produced material. Among the main results obtained, the formation of films with favorable oxygen and water vapor barrier properties was highlighted, particularly the film containing 80% protein and 20% pectin, which exhibited the lowest permeability values. This blend was selected for comparative evaluation between commercial citrus pectin and pectin extracted from pequi mesocarp. The extracted pectin showed a degree of esterification above 50%, comparable to that of commercial pectin. The substitution did not result in differences regarding barrier properties. However, significant differences were observed in the mechanical properties. Most of the blends, as well as the pure protein films, were biodegradable within 10 days of soil exposure, demonstrating the sustainability of the packaging. It was concluded that it is feasible to produce films based on commercial pectin or pectin extracted from pequi mesocarp combined with protein isolated from sunflower seeds, representing a sustainable alternative to conventional plastic packaging.

Keywords: Biopolymeric film; Pectin; Isolated sunflower seed protein; Pequi.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS DE FONTE NATURAL	16
FIGURA 2 – EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS E A ECONOMIA CIRCULAR	20
FIGURA 3 - PARTES DO PEQUI.....	22
FIGURA 9 - FOTOGRAFIAS DOS FILMES CONTROLE E BLENDA.	41
FIGURA 4 - ESPECTRO FTIR DA AMOSTRA DE FILME À BASE DE PISG (F100-0).	48
FIGURA 5 - ESPECTRO FTIR DA AMOSTRA DE FILME A BASE DE PECTINA CÍTRICA (F0-100).....	49
FIGURA 6 - ESPECTRO FTIR DAS AMOSTRAS DE FILMES CONTROLES E BLENDA: F100-0 (VERMELHO); F0-100 (AZUL PETRÓLEO); F80-20 (AMARELO); F60-40 (VERDE); F40-60 (AZUL CÉU MÉDIO); F20-80 (ROSA CLARO).....	52
FIGURA 7 - CURVAS TGA DOS FILMES CONTROLE E BLENDA: F100-0 (VERMELHO); F0-100 (AZUL PETRÓLEO); F80-20 (AMARELO); F60-40 (VERDE); F40-60 (AZUL CÉU MÉDIO); F20-80 (ROSA CLARO)	58
FIGURA 8 - CURVAS DTG DOS FILMES CONTROLE E BLENDA: F100-0 (VERMELHO); F0-100 (AZUL PETRÓLEO); F80-20 (AMARELO); F60-40 (VERDE); F40-60 (AZUL CÉU MÉDIO); F20-80 (ROSA CLARO)	60
FIGURA 10 - FOTOGRAFIAS DA DEGRADAÇÃO EM SOLO DOS FILMES CONTROLE E BLENDA POR 10 DIAS	62
FIGURA 11 - FOTOGRAFIAS DA DEGRADAÇÃO EM SOLO DOS FILMES CONTROLE PECTINA E F20-80 ENTRE O 15º E 30º DIA	63
FIGURA 12 - ESPECTRO FTIR DAS AMOSTRAS DE PECTINA COMERCIAL (LINHA PRETA) E PECTINA EXTRAÍDA DE MESOCARPO DO PEQUI (LINHA VERMELHA).	65
FIGURA 20 - FOTOGRAFIAS DOS FILMES À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E CONJUGADOS COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL	68
FIGURA 13 - ESPECTRO FTIR DAS AMOSTRAS DE FILME PURAS A BASE DE PECTINA COMERCIAL (LINHA AZUL) E EXTRAÍDA (LINHA VERDE-ÁGUA ESCURO)	73
FIGURA 14 - ESPECTRO FTIR DAS AMOSTRAS DE FILMES BLENDA DE PECTINA COMERCIAL (LINHA AMARELO-OURO) OU EXTRAÍDA (LINHA MOSTARDA) E PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL.....	75
FIGURA 15 - RESULTADOS DE UMIDADE E SOLUBILIDADE PARA OS FILMES A BASE DE PECTINA À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E BLENDA COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL	77
FIGURA 16 - RESULTADOS DE PVA PARA OS FILMES A BASE DE PECTINA À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E CONJUGADOS COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL.	78
FIGURA 17 - RESULTADOS DE TTVA E PVO PARA OS FILMES A BASE DE PECTINA À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E BLENDA COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL	79
FIGURA 18 - CURVAS TGA DOS FILMES À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E BLENDA COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL: F0-100 (AZUL); PEC-PEQUI (VERDE-ÁGUA ESCURO); F80-20 (AMARELO-OURO); F80-20P (MOSTARDA)	80
FIGURA 19 - CURVAS DTG DOS FILMES À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E BLENDA COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL: F0-100 (AZUL); PEC-PEQUI (VERDE-ÁGUA ESCURO); F80-20 (AMARELO-OURO); F80-20P (MOSTARDA)	82
FIGURA 21 - FOTOGRAFIAS DA DEGRADAÇÃO EM SOLO DOS FILMES A PARTIR DA PECTINA EXTRAÍDA DO PEQUI, PURO E EM BLEND COM A PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL.....	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 4 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DOS FILMES CONTROLE E BLENDA	42
TABELA 1 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FILMES CONTROLE E BLENDA.....	45
TABELA 2 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS FILMES CONTROLE E BLENDA.....	54
TABELA 3 - DADOS DAS CURVAS DA ANÁLISE DE TERMOGRAVIMETRIA E DA PRIMEIRA DERIVADA DOS FILMES CONTROLE E BLENDA.....	59
TABELA 5 - VALORES DE GRAU DE ESTERIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA DO MESOCARPO DO PEQUI.	67
TABELA 8 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DE FILMES À BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E CONJUGADOS COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL	69
TABELA 6 - ESPESSURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FILMES FORMULADOS COM PECTINA EXTRAÍDA (PURA) E BLENDA HÍBRIDAS COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL (PISG), UTILIZANDO PECTINA COMERCIAL OU EXTRAÍDA.....	70
TABELA 7 - DADOS DAS CURVAS DA ANÁLISE DE TERMOGRAVIMETRIA E DA PRIMEIRA DERIVADA DOS FILMES À BASE DE PECTINA EXTRAÍDA, PURO E BLENDA COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL ...	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS A PARTIR DE BIOPOLÍMEROS	15
3.2	APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS AGROALIMENTARES.....	19
3.3	PEQUI (<i>CARYOCAR BRASILIENSE</i> CAMB.).....	21
3.3.1	<i>Pectina</i>	24
3.4	SEMENTE DO GIRASSOL.....	28
3.4.1	<i>Proteína isolada da semente de girassol (PISG)</i>	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	MATERIAIS.....	32
4.2	PRODUÇÃO DOS FILMES	32
4.2.1	<i>Solução para filme controle PISG 2% (m/v)</i>	32
4.2.2	<i>Solução para filme controle de pectina comercial e extraída 2% (m/v)</i>	32
4.2.3	<i>Solução para filmes a partir de PISG e Pectina 2% (m/v)</i>	33
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES	34
4.3.1	<i>Espessura e propriedades mecânicas</i>	34
4.3.2	<i>Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR)</i>	34
4.3.3	<i>Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade</i>	34
4.3.4	<i>Análise termogravimétrica (TGA)</i>	37
4.3.5	<i>Propriedades cromáticas</i>	37
4.3.6	<i>Estudo da biodegradabilidade dos filmes</i>	38
4.4	PROCESSAMENTO DAS FARINHAS DE PEQUI.....	38
4.5	EXTRAÇÃO E FLOTAÇÃO DA PECTINA OBTIDA DO MESOCARPO DO PEQUI.....	39
4.6	ANÁLISE POR FTIR DOS PÓS DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA DA FARINHA DO MESOCARPO DO PEQUI E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE ESTERIFICAÇÃO	39
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES CONTROLE E BLENDA A BASE DE PECTINA COMERCIAL E PROTEÍNA ISOLADA DE SEMENTE DE GIRASSOL	41
5.1.1	<i>Propriedades cromáticas dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i>	41
5.1.2	<i>Espessura e propriedades mecânicas dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i>	44
5.1.3	<i>Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i>	47
5.1.4	<i>Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i>	53
5.1.5	<i>Análise termogravimétrica dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i> ...	58
5.1.6	<i>Biodegradabilidade dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial</i>	61
5.2	ANÁLISE POR FTIR DOS PÓS DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA DA FARINHA DO MESOCARPO DO PEQUI E DETERMINAÇÃO DO GRAU DE ESTERIFICAÇÃO	63
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES BASE DE PECTINA COMERCIAL E EXTRAÍDA, PUROS E CONJUGADOS COM PROTEÍNA ISOLADA DA SEMENTE DE GIRASSOL	67

5.3.1	<i>Propriedades cromáticas de filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	68
5.3.2	<i>Espessura e propriedades mecânicas dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	70
5.3.3	<i>Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	72
5.3.4	<i>Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	75
5.3.5	<i>Análise termogravimétrica dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	80
5.3.6	<i>Biodegradabilidade dos filmes à base de pectina extraída puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol</i>	82
6	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS	86
	ANEXO A – COMPOSIÇÃO DOS FILMES CONTROLE E BLENDA	100
	ANEXO B - FOTOGRAFIAS DA DEGRADAÇÃO EM SOLO DO FILME PEC-PEQUI ENTRE O 15º E 30º DIA	101

1 INTRODUÇÃO

As embalagens alimentícias são, em sua maioria, produzidas a partir de plásticos de origem fóssil, que causam diversos prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana. A busca por equilíbrio entre a utilização de embalagens alimentícias, fundamentais para garantir a segurança do consumidor e reduzir o desperdício de alimentos, e os impactos ambientais negativos decorrentes do material convencionalmente empregado nesse recurso, tornou-se um desafio imprescindível. (Dörnyei et al., 2023; Sundqvist-Andberg e Åkerman, 2021).

A cadeia produtiva dos materiais plásticos está associada à emissão de gases de efeito estufa durante a sua fabricação, enquanto o descarte inadequado resulta na formação de aterros sanitários que podem contaminar solos, rios e mares (Mendes e Pedersen, 2021). Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias e inovações que priorizem a sustentabilidade e fomentem a economia circular, exigindo o comprometimento de todos os agentes envolvidos como indústria, governo e consumidores (Dörnyei et al., 2023).

Diversas alternativas vêm sendo estudadas com o intuito de mitigar esses impactos, especialmente por meio do desenvolvimento de substitutos biodegradáveis e de base biológica, como celulose microbiana, polissacarídeos, proteínas e lipídeos (Dörnyei et al., 2023; Huang e Wang, 2025). Nesse contexto, os resíduos agrícolas, que também representam uma preocupação ambiental quando descartados inadequadamente, podem ser aproveitados como matéria-prima para a produção de embalagens sustentáveis, reduzindo o impacto ambiental desses subprodutos e promovendo a economia circular anteriormente mencionada (Yin e Woo, 2024).

Dentre esses resíduos, destaca-se o pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), fruto utilizado pela população regional do Cerrado Mineiro na culinária e na medicina tradicional, cuja exploração resulta em consideráveis quantidades de resíduos, especialmente de cascas (Martins et al., 2021), situação comum no processamento de frutas (Yu et al., 2024). No entanto, esses subprodutos possuem quantidades expressivas de fibras alimentares (Li et al., 2024b), como por exemplo a pectina extraída do mesocarpo do pequi (Leão et al., 2018).

A literatura aponta a pectina como um polímero vegetal promissor para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis, denominadas “verdes” ou bio-based (Xie et al., 2023). Diversos estudos relatam a utilização da pectina, seja na forma

comercial ou extraída de frutas e resíduos agroindustriais (Said et al., 2023; Xie et al., 2023; Zhang et al., 2024). Ademais, a pectina é frequentemente combinada a outros polímeros (Butler et al., 2023; Sucheta et al., 2019), visando a aprimorar propriedades como resistência mecânica, solubilidade e entre outras.

Outro biopolímero de destaque é a proteína isolada da semente de girassol, considerada uma alternativa interessante para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis, uma vez que também é obtida a partir de resíduos e apresenta propriedades funcionais relevantes. Proveniente da indústria de óleo de girassol, essa proteína é extraída da torta gerada no processo de obtenção do óleo, sendo composta principalmente por albuminas solúveis em água (2S) e globulinas solúveis em sal (heliantinina, 11S) (Kaur e Ghoshal, 2022; Mehryar et al., 2021).

Embora existam estudos sobre o desenvolvimento e a caracterização de filmes à base de pectina e proteínas (Rossi Marquez et al., 2017; Salimi et al., 2025), bem como sobre a aplicação da proteína isolada da semente de girassol em combinação com polissacarídeos (Alves et al., 2024; Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024), empregados para produzir filmes com melhores propriedades de barreira e mecânica (Salimi et al., 2025). É observado uma lacuna na literatura no que se refere à investigação da possibilidade de produção de filmes elaborados especificamente com pectina e proteína isolada da semente de girassol.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo produzir e avaliar diferentes filmes poliméricos do tipo blenda, compostos por pectina cítrica e proteína isolada da semente de girassol, variando-se a concentração de cada polímero. Além, disso, pretende-se verificar a possibilidade de substituição da pectina comercial por pectina extraída do mesocarpo do pequi.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar filmes biopoliméricos à base de pectina cítrica e proteína isolada de semente de girassol, avaliando diferentes proporções desses biopolímeros, bem como a viabilidade da substituição da pectina comercial pela pectina extraída do mesocarpo do pequi, como uma abordagem sustentável para o aproveitamento de resíduos agroindustriais.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver filmes controle a partir da pectina cítrica comercial e da proteína isolada de semente de girassol (PISG), com o intuito de compreender as propriedades individuais de cada biopolímero e o respectivo papel na formulação das blendas poliméricas.
- Produzir e caracterizar filmes a partir de pectina cítrica associada à proteína isolada da semente de girassol em quatro proporções distintas, avaliando o efeito da interação entre os polímeros com base na espessura, propriedades mecânicas, grupos químicos presentes, propriedades de barreira, solubilidade, umidade, perfil térmico, propriedades ópticas e biodegradabilidade em solo.
- Extrair a pectina da farinha do mesocarpo do pequi, por meio de uma metodologia “verde”, determinando o rendimento e caracterizando-a quanto à presença dos grupos funcionais e ao grau de esterificação.
- Aplicar o polímero extraído na formulação de filmes puro e blendas com a proteína isolada de girassol, visando investigar a viabilidade de substituição da pectina comercial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Embalagens alimentícias a partir de biopolímeros

As embalagens para alimentos são definidas, segundo a legislação vigente, como materiais ou artigos destinados a entrar em contato com os alimentos, a fim de protegê-los de agentes externos, alterações, contaminações e adulterações, desde a fabricação até o consumidor final (ANVISA, 2001).

Tradicionalmente, materiais de origem fóssil são empregados na produção dessas embalagens, destacando-se o tereftalato de polietileno (PET), o cloreto de polivinila (PVC), o poliestireno (PS), o polipropileno (PP) e o polietileno (PE). Estima-se que aproximadamente 40% de todo o plástico produzido mundialmente seja destinado à fabricação de embalagens alimentícias (Dörnyei et al., 2023; Mendes e Pedersen, 2021).

A problemática associada a esses materiais reside na elevada resistência e consequente persistência no ambiente. A ação conjunta da água do mar, das ondas e da radiação solar promove a fragmentação desses polímeros em pequenas partículas, que, com o tempo, originam os microplásticos. Esses, por vez, podem ser ingeridos por organismos aquáticos, entrando na cadeia alimentar e, consequentemente, afetando a saúde humana (Kauts et al., 2023; Sundqvist-Andberg e Åkerman, 2021).

Adicionalmente, a produção desses materiais implica na emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para as mudanças climáticas e agravando os impactos ambientais. Seus aditivos, por sua vez, podem se depositar e acumular no meio ambiente e em organismos vivos, representando riscos ecotoxicológicos (Dey e Ashok S, 2025; Mendes e Pedersen, 2021; Sundqvist-Andberg e Åkerman, 2021).

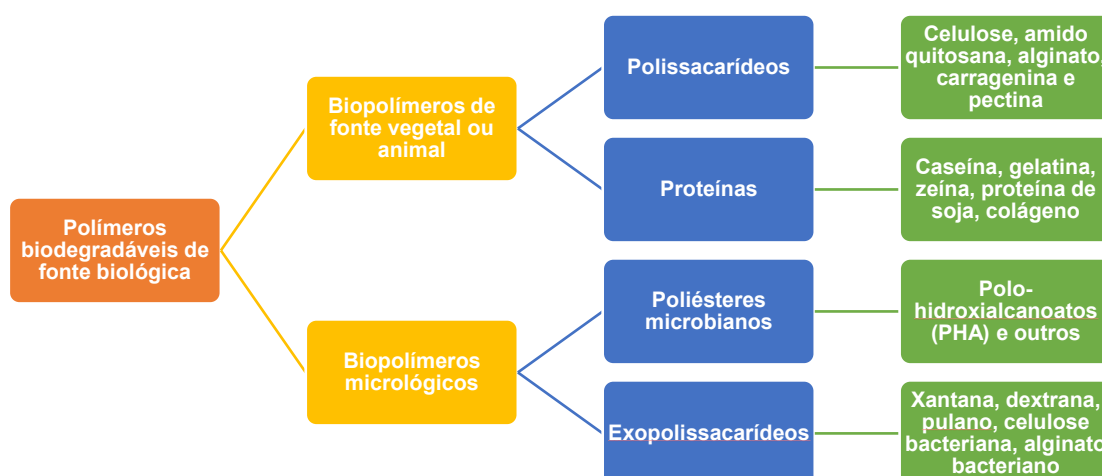
Entretanto, os polímeros sintéticos à base de petróleo apresentam vantagens significativas quanto à aparência, transparência, custo-benefício e propriedades de barreira, configurando-se como um desafio para a substituição por alternativas mais sustentáveis (Carvalho et al., 2025). Por essa razão, a pesquisa e o desenvolvimento de embalagens ambientalmente sustentáveis têm se intensificado, visando minimizar os impactos negativos associados ao uso de embalagens plásticas sintéticas e tornar viável sua substituição (Borah et al., 2025).

Segundo Mendes e Pedersen (2021) uma embalagem sustentável envolve diversos aspectos que transcendem a simples ausência de poluição. O estudo destaca a necessidade de considerar, adicionalmente, a redução da emissão de

gases de efeito estufa, a possibilidade de reciclagem ou reuso, a diminuição do consumo de água e energia, bem como a não toxicidade dos materiais empregados. Esses critérios somam-se às funções já tradicionalmente atribuídas às embalagens, sintetizadas na sigla em inglês PCCC (“Proteção e Preservação, Contenção, Comunicação e Conveniência”, em tradução literal) (Yin e Woo, 2024).

Nesse contexto, os plásticos de base biológica e biodegradáveis têm ganhado destaque, proporcionando alternativas mais alinhadas ao desenvolvimento verde e sustentável. Tais materiais são produzidos a partir de polímeros de origem biológica, obtidos por diversos métodos (Huang e Wang, 2025) (Figura 1).

Figura 1 - Polímeros biodegradáveis de fonte natural



Fonte: Dirpan, Ainani e Djalal, (2023).

No Brasil, ainda não há uma definição oficial para bioplásticos; entretanto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece definições para termos correlatos, como biopolímero, definido como aquele produzido a partir de matéria-prima de fonte renovável, e biodegradação, entendida como a degradação realizada por ação biológica enzimática natural, que pode ocorrer de forma aeróbia ou anaeróbia (ABNT, 2008).

De modo geral, os filmes, termo aqui utilizado como sinônimo do material de embalagem biodegradável, apresentam suas qualidades e características determinadas pelos ingredientes da solução filmogênica, pelo solvente e pela técnica

empregada no processamento, ou seja, por aspectos que influenciam diretamente a estrutura da matriz filmogênica (Flórez, Cazón e Vázquez, 2023).

Martins et al. (2024) descrevem que esses filmes podem ser classificados como “bio-embalagens” no sentido de serem de fonte biológica e funcionais, com capacidade para prevenir a ação de patógenos e a deterioração não microbiológica e física dos alimentos. Esses filmes podem ser produzidos por diversos métodos, entre os quais se destacam a evaporação de solvente (*casting*), o revestimento e a extrusão (Rodriguez et al., 2024).

O método de casting é o mais amplamente utilizado devido à simplicidade do processo, ao custo-benefício, à aplicabilidade em diversos materiais, incluindo aqueles com propriedades bioativas, e à possibilidade de produção em larga escala (Rodriguez et al., 2024). Nessa metodologia, a solução filmogênica, que geralmente passa por um processo de desgaseificação, é depositada sobre uma superfície plana e, em seguida, submetida à secagem, que pode ser realizada por meio de equipamentos, como estufa de circulação de ar, ou por secagem natural (Ribeiro, Estevinho e Rocha, 2021).

Apesar da necessidade de controle rigoroso do processo e da alta qualidade dos materiais para obtenção de filmes satisfatórios, esse método geralmente resulta em filmes com propriedades de barreira satisfórias, além de permitir o controle da espessura e da estrutura da película formada (Li et al., 2024a).

Polissacarídeos e proteínas têm sido amplamente estudados para aplicação na produção de filmes biodegradáveis. Entre os polissacarídeos mais utilizados destacam-se a pectina, carragenina, alginato, amido e gomas. Esses polímeros são valorizados pela ampla disponibilidade, ausência de toxicidade e seletividade na permeabilidade a gases como CO₂ e oxigênio (Mohamed, El-Sakhawy e El-Sakhawy, 2020). Entretanto, apresentam limitações, tais como sensibilidade à umidade, propriedades mecânicas reduzidas e dificuldades de processabilidade (Li et al., 2024a).

De forma semelhante, as proteínas também são encontradas em diversas fontes e apresentam-se como uma alternativa promissora para a fabricação de embalagens. Entre as proteínas de origem animal, destacam-se a proteína isolada do soro do leite, caseína e colágeno; já as proteínas de origem vegetal incluem o glúten, a proteína isolada da soja, a zeína e a proteína isolada da semente de girassol (Gururani et al., 2023). A aplicação dessas proteínas em filmes está relacionada a

uma boa permeabilidade à água, propriedades mecânicas superiores e excelente formação da película (Chen et al., 2019; Gururani et al., 2023).

Uma estratégia amplamente utilizada para aprimorar as propriedades dos filmes biopoliméricos consiste na produção de filmes conjugados, nos quais um co-biopolímero é incorporado. Essa abordagem visa potencializar as características do material por meio do sinergismo entre as qualidades dos diferentes polímeros, como ocorre em filmes compostos por proteínas e polissacarídeos (Li et al., 2024a; Roy et al., 2024). Nessa combinação, as unidades monoméricas, ou seja, os ácidos nucleicos (lineares ou ramificados) de nucleotídeos, aminoácidos e sacarídeos, interagem, formando estruturas secundárias e terciárias, com capacidade para gelificação, formação de espuma, emulsificação e, principalmente, a formação de filmes (Roy et al., 2024).

Outro aspecto fundamental no desenvolvimento desses filmes é a utilização de plastificantes, os quais influenciam diretamente a morfologia, bem como as propriedades mecânicas e térmicas do material (Hazrol et al., 2021). Um exemplo comum é o glicerol, uma molécula de baixo peso molecular que atua reduzindo as ligações de hidrogênio intermoleculares entre as cadeias poliméricas, resultando em maior flexibilidade do filme e diminuição da fragilidade (Yin e Woo, 2024).

Atualmente, já existem no mercado embalagens produzidas a partir de polímeros de fonte biológica. Como exemplo, Yin e Woo (2024) destacam a empresa “Biopac”, que fabrica embalagens a partir de algas marinhas, tubérculos de batata, mandioca e batata-doce, além de proteínas isoladas de soja e glúten, comercializadas nas formas de bolsas, folhas e sachês. Outro exemplo é a “Green World Biotech Material Co., Ltd.”, que trabalham com o amido de tapioca utilizado para diversas aplicações em embalagens alimentícias, entre outras iniciativas.

Entretanto, a adoção dos biopolímeros ainda enfrenta diversos desafios. Conforme Dörnyei et al. (2023), os principais obstáculos para a consolidação das embalagens sustentáveis incluem a garantia da proteção adequada ao alimento e ao consumidor; a preservação da qualidade e extensão do tempo de prateleira; a minimização dos impactos ambientais diretos e indiretos, sobretudo para evitar que se tornem resíduos adicionais; a viabilidade econômica da produção; a ausência de regulamentações específicas; e o limitado conhecimento e aceitação por parte dos consumidores.

Dessa forma, as embalagens alimentícias produzidas a partir de biopolímeros representam uma alternativa promissora para a substituição dos materiais convencionais de origem fóssil. Os desafios evidenciam a necessidade de aprofundamento nas pesquisas e da realização de ações conjuntas entre indústria, governo e sociedade para superá-los, visando a construção de uma sociedade mais sustentável.

3.2 Aproveitamento de resíduos agroalimentares

Outro tema relevante no contexto da sustentabilidade refere-se ao aproveitamento dos resíduos agroindustriais, que representam cerca de um terço da produção total de alimentos descartada. Esse descarte inadequado contribui para a emissão de gases de efeito estufa e a poluição ambiental (Varghese et al., 2023). No Brasil, estima-se que aproximadamente 35% dos alimentos produzidos tornam-se resíduos (König e Sousa Junior, 2021).

Nos últimos anos, o aumento da geração desses resíduos tem motivado discussões acerca da destinação adequada destes (Yin e Woo, 2024). Os subprodutos gerados podem ser de origem vegetal, como cascas de frutas e vegetais provenientes da colheita ou do processamento, ou de origem animal, como peles, penas e cascas (Varghese et al., 2023; Yin e Woo, 2024). Embora, frequentemente, esses resíduos sejam utilizados como alimentação animal, as moléculas presentes neles apresentam potencial para aplicações em outros setores da indústria alimentícia, como na produção de embalagens sustentáveis (Carnaval, Jaiswal e Jaiswal, 2024; Yin e Woo, 2024).

Além de solucionar o problema da destinação inadequada desses resíduos, essa alternativa ganha ainda mais relevância quando considerada como substituta das embalagens plásticas convencionais. Esses materiais se configuram como sustentáveis por serem biocompatíveis, biodegradáveis e não tóxicos, conforme mencionado anteriormente (Carnaval, Jaiswal e Jaiswal, 2024).

Esse uso também está alinhado com o conceito de economia circular. Dörnyei et al. (2023) destacam o conceito de “embalagem circular”, que consiste em um produto cuja produção é pautada na reciclagem e no reuso, otimizando o uso, preservando recursos e minimizando impactos ambientais, com o objetivo de alcançar o descarte zero de materiais (Figura 2). Nesse contexto, destacam-se as cascas e

talos de frutas e vegetais, subprodutos ricos em compostos como antioxidantes, polissacarídeos e proteínas (Moura et al., 2017; Sani et al., 2023).

Figura 2 – Embalagens biodegradáveis e a economia circular



Fonte: Carnaval, Jaiswal e Jaiswal, (2024)

Um exemplo de polissacarídeo amplamente utilizado para a produção de embalagens é o amido. Silveira, Franca e Oliveira (2025) utilizaram amido extraído das cascas da mandioca (com e sem periderme) para produzir filmes adicionados de óleo extraído do cravo, que apresentaram boa permeabilidade ao vapor de água e eficácia contra microrganismos Gram-positivos e Gram-negativos. Além da casca da mandioca, o amido também pode ser extraído de outros resíduos, como o caroço da manga-ubá (Ferraz et al., 2019) e semente de açaí (Carpiné et al., 2020).

Outra ilustração é o estudo de Azmin, Hayat e Nor (2020), que desenvolveram um filme a partir da casca da vagem do cacau e do bagaço de cana-de-açúcar, por meio da extração de celulose e fibras. Foram testadas diferentes concentrações e identificada uma blenda que apresentou menor barreira ao vapor e maior absorção de água.

Um exemplo adicional de polissacarídeo para embalagens circulares é a quitosana obtida da casca de caranguejo, utilizada na produção de um filme nanoestruturado ultrafino (Pandharipande e Bhagat, 2016). Entretanto, esse trabalho

não apresentou caracterização das propriedades mecânicas e de barreira, o que limita a avaliação da qualidade do filme.

Para o uso das proteínas proveniente de resíduos existem na literatura exemplos de filmes produzidos a partir de fontes animais e vegetais. Andrade et al. (2021), produziram um filme à base de soro de leite, um subproduto das indústrias de laticínios, adicionado de extrato de algas marinhas. Esse filme apresentou propriedades interessantes, tanto em relação às características mecânicas quanto à atividade antioxidante. Também de origem animal, filmes foram produzidos utilizando exclusivamente gelatina extraída da escama de peixe (Jridi et al., 2019), assim como filmes elaborados com gelatina combinada com outras proteínas (Kchaou et al., 2020).

As tortas residuais geradas nos processos de prensagem para obtenção de óleos também representam uma fonte sustentável para a produção de filmes a partir de resíduos. Sabbah et al. (2020), utilizaram a proteína concentrada obtida da torta desengordurada do cominho preto para produzir um filme com potencial aplicação em embalagens alimentícias, devido às suas propriedades de barreira e mecânicas. De forma semelhante, Chen et al. (2025), empregaram a torta da semente de carmélia para a extração de proteína, que, em conjunto com alginato, formou um filme com destaque pela eficiente barreira ao vapor de água.

É possível perceber que os resíduos agroalimentares representam uma fonte rica de polímeros que podem ser utilizados na produção de embalagens. Em consonância com a economia circular, essa prática possibilita a redução da poluição de sistemas aquáticos e solos, mas deve ser associada a incentivos e ações governamentais, industriais e dos consumidores, de forma a criar um ambiente favorável ao desenvolvimento de novas tecnologias e à otimização de recursos (Carvalho et al., 2025). Ademais, esses resíduos podem representar uma fonte de renda alternativa para pequenos produtores que processam frutos.

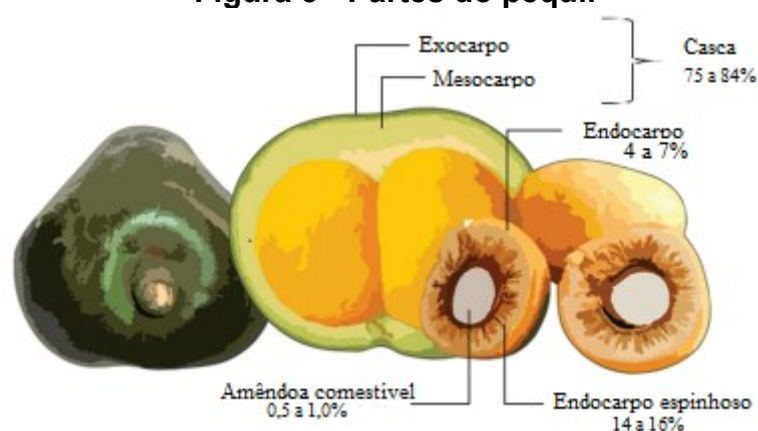
3.3 Pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.)

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, abrangendo 11 estados brasileiros. Trata-se de um ecossistema diverso, caracterizado por elevada biodiversidade de fauna e flora, destacando-se, entre seus diversos frutos, o pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), amplamente empregado na culinária regional, na indústria cosmética e na medicina popular e tradicional (Coutinho et al., 2020; Geöcze et al., 2021). A produção anual desse fruto no Brasil é de pouco mais de 51 toneladas,

gerando uma receita superior a 50 mil reais, com o estado de Minas Gerais figurando como o principal produtor (IBGE, [s.d.]).

O pequi é um fruto oleaginoso, estruturalmente dividido em: exocarpo, correspondente à casca externa de coloração verde; mesocarpo, representando a camada interna da casca; endocarpo, que contém a polpa de coloração amarela; além de espinhos e das distintas camadas que compõem a semente (Brito et al., 2022) (Figura 3).

Figura 3 - Partes do pequi.



Fonte: Nascimento-Silva e Naves, (2019)

A polpa do pequi corresponde à porção mais utilizada pela população, sendo incorporada em diversos pratos e sobremesas, e considerada a parte de maior valor agregado. É justamente nessa fração do fruto que se concentram lipídios, carotenoides, polifenóis, fibras dietéticas e minerais, tais como magnésio, fósforo, zinco e cálcio (Nascimento-Silva e Naves, 2019; Silva et al., 2022).

A combinação da semente com a polpa possibilita a extração do óleo de pequi, rico em ácidos graxos oleico e palmítico, amplamente empregado como ingrediente culinário e na indústria cosmética (Pessoa et al., 2015). Ademais, na medicina popular, esse óleo é tradicionalmente associado à atividade anti-inflamatória, sendo utilizado no tratamento de úlceras, reumatismo, dores musculares, hematomas e na promoção da cicatrização (Faro Silva, et al., 2022).

Outro componente do fruto é a casca (exocarpo e mesocarpo), caracterizada por ser rica em carotenoides, ácido gálico, ácido ascórbico e fibras alimentares (Alves-Silva, Romani e Martins, 2024). Apesar dessas propriedades e de representar a maior fração do fruto (aproximadamente 80% do total), a casca ainda é pouco explorada,

sendo geralmente considerada um resíduo agroalimentar. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de estudos que viabilizem alternativas para o aproveitamento desse material, alinhadas aos princípios da sustentabilidade, do desenvolvimento tecnológico e da responsabilidade social (Martins et al., 2021).

Dentre as possibilidades de valorização, destaca-se a extração de pectina, conforme já mencionado. Leão et al. (2018) realizaram a extração de pectina da casca do pequi utilizando um método sustentável. No estudo, a extração foi conduzida em reator de micro-ondas, a partir de farinhas obtidas da casca (com e sem exocarpo), resultando em rendimentos que alcançaram até 20 g/100 g de farinha, variando conforme os parâmetros de temperatura, tempo e potência empregados. Esses rendimentos são comparáveis aos obtidos de fontes tradicionais, como maçã e laranja, evidenciando o potencial do pequi como fonte dessa fibra alimentar (FA).

Em outro estudo, Siqueira et al. (2012), também extraíram pectina da casca do pequi, com aplicação em produto alimentício. A investigação avaliou o rendimento e o grau de esterificação (G.E.), empregando um processo convencional ácido, com variações na concentração de ácido cítrico, no tempo e na temperatura de extração, a partir das cascas submetidas a descascamento químico. Os resultados indicaram rendimentos entre 14,9% e 55,1% e graus de esterificação variando de aproximadamente 11,8% a 48,1%. Além disso, foi possível desenvolver uma geleia light de manga utilizando a pectina extraída, a qual apresentou aceitação sensorial próxima à da geleia controle, embora não tenha sido preferida pelos avaliadores.

De forma semelhante, Silva et al. (2020), propuseram a extração de pectina das cascas do pequi por meio de um método convencional e a aplicaram como agente gelificante na elaboração de uma geleia de maracujá-do-mato. Utilizando ácido cítrico (8%) em banho-maria a 74 °C, durante 60 min, o processo resultou em um rendimento de 29,9% e um grau de esterificação de 36,3%. A aplicação da pectina na geleia apresentou bom potencial de consumo, com atributos sensoriais superiores a 70% de aceitação.

Conforme já mencionado, esse polissacarídeo pode ser empregado não apenas na elaboração de produtos alimentícios, mas também na produção de filmes biodegradáveis. Siqueira et al., (2022), propuseram a extração e a produção de filmes de pectina a partir do mesocarpo do pequi. Por meio de extração ácida em condições de temperatura elevada, os autores isolaram a pectina, solubilizaram-na em água e adicionaram glicerol, bem como um agente de reticulação (*cross-link*). Como

resultado, verificaram que, além do pequi se constituir como uma boa fonte do polímero, foi possível obter filmes com maior solubilidade, umidade, opacidade e módulo de Young, bem como menor luminosidade, em comparação com filmes elaborados a partir de pectina comercial. Ademais, os filmes apresentaram desempenho semelhante nos testes de biodegradabilidade e de estabilidade térmica.

No estudo de Guerra et al. (2023), foi produzido um filme de pectina extraída do pequi, adicionado de nanopartículas de óxido de zinco (nano-ZnO), com o objetivo de conferir atividade antimicrobiana ao material. A pectina, obtida por meio de extração ácida convencional, foi solubilizada em água e incorporada a glicerol, cloreto de cálcio (como agente de reticulação) e nano-ZnO, em diferentes proporções. Os resultados indicaram que a adição de nano-ZnO influenciou a resistência à tração e a permeabilidade ao vapor de água. Ademais, constatou-se que o filme elaborado exclusivamente com a pectina extraída já apresentava atividade antimicrobiana, não sendo significativamente alterada pela adição do nano-ZnO, o que reforça as vantagens do uso da pectina extraída do pequi para o desenvolvimento de filmes biodegradáveis.

3.3.1 Pectina

A pectina é um heteropolissacarídeo complexo que exerce função estrutural nas paredes celulares das plantas, estando geralmente associada à celulose e à hemicelulose. Trata-se de uma molécula com ampla diversidade de aplicações, incluindo a área farmacêutica, onde é utilizada em curativos adesivos, como veículo e matriz polimérica para medicamentos, e na tecnologia de alimentos, destacando-se pelas propriedades gelificantes e emulsificantes (Nastasi et al., 2022).

Sua estrutura é composta por duas regiões principais, sendo uma delas denominada *smooth*. Essa região corresponde a aproximadamente 50 a 70% da molécula total, conhecida como homogalacturonano (HG), constituída pelo ácido galacturônico (GalA), que forma uma cadeia linear por meio de ligações $\alpha(1\rightarrow4)$. Essa cadeia é parcialmente metil-esterificada no grupo carboxílico do carbono 6 e, dependendo da fonte, pode apresentar O-acetilação no carbono 2 ou 3 (Cui et al., 2021)

A outra região, denominada *hairy*, é composta pelo ramnogalacturonano I (RGI), um heteropolímero ramificado formado por unidades repetidas de α -L-ramnose (Rha) e resíduos de GalA. Os resíduos de Rha na cadeia principal do RGI podem ser

substituídos em 20 a 80% por cadeias laterais de oligossacarídeos ácidos ou neutros no carbono 4, enquanto os resíduos de GalA permanecem não substituídos e não metilados. Ainda nessa região, encontra-se o ramnogalacturonano II (RGII), constituído por nove resíduos de α -1,4-D-GalA, que podem ou não ser metilados no carbono 6, representando aproximadamente 10% da estrutura total da pectina (Cui et al., 2021, 2023).

Apesar do conhecimento sobre a estrutura e os componentes da pectina, a disposição espacial e a interação entre esses componentes na macromolécula ainda não estão completamente esclarecidas. Ademais, é importante ressaltar que a estrutura da pectina pode sofrer modificações significativas em função da metodologia empregada para a extração, da fonte vegetal, do estágio de maturação e dos processos de separação utilizados (Butler et al., 2023). Dessa forma, as aplicações da pectina são frequentemente limitadas pelas características estruturais específicas da molécula.

Na indústria de alimentos, a aplicação mais comum da pectina ocorre devido à sua propriedade gelificante, sendo utilizada como ingrediente em geleias, compotas, marmeladas, produtos de confeitaria, iogurtes, entre outros. Além disso, a pectina apresenta usos descritos como emulsificante, substituto de gordura, texturizante, agente formador de estruturas, potencializador do efeito antioxidante e sorvente, contribuindo para a melhoria de produtos de panificação (Barrera-Chamorro et al., 2025; Cui et al., 2023).

Nesse contexto, destaca-se o grau de esterificação (GE) da molécula, o qual está diretamente relacionado à sua estrutura e às propriedades funcionais (Liang et al., 2022). As moléculas são classificadas em pectinas de alto teor de esterificação, quando mais de 50% dos grupos carboxílicos estão esterificados, e de baixo teor de esterificação, quando essa porcentagem é inferior a 50% (Huang et al., 2021; Morales-Medina et al., 2022).

A pectina com alto grau de esterificação (GE) promove a gelificação por meio de interações hidrofóbicas e ligações de hidrogênio, geralmente na presença de sacarose em alta concentração (>55%) e em meio ácido (pH < 3,6). Em contrapartida, a pectina com baixo GE forma gel por meio da criação de zonas de junção iônica entre grupos carboxílicos dissociados, requerendo a presença de cátions divalentes, como Ca^{2+} (Cui et al., 2023; Yilmaz-Turan et al., 2023).

Entretanto, a formação do gel não depende exclusivamente do grau de esterificação, sendo também influenciada pelo peso molecular, conformação espacial, ramificações, densidade de carga e composição em monossacarídeos, fatores estes que podem variar conforme o método de extração utilizado (Liang et al., 2022). Além do grau de esterificação, as pectinas são avaliadas quanto ao grau de acetilação, que corresponde à proporção de grupos acetil em relação aos grupos de ácido galacturônico, peso molecular e composição de monossacarídeos (Cui et al., 2021).

Usualmente, a pectina é extraída do bagaço de maçã, das cascas de frutas cítricas (limão, laranja e lima) e da polpa de beterraba. A pesquisa por novas fontes, especialmente a partir de resíduos agroalimentares, é valorizada devido à elevada demanda internacional pelo produto, além de contribuir para a resolução de um problema econômico enfrentado pelas indústrias, relacionado ao custo da destinação adequada desses resíduos, favorecendo assim a economia circular (Putnik et al., 2017). Entre as fontes recentemente investigadas destacam-se a casca de cacau, casca de toranja, casca de romã, casca de maracujá, casca de manga, casca de banana, bagaço de kiwi, cascas verdes de pistache, resíduos de tomate e a casca do pequi (Leão et al., 2018; Rehman et al., 2019; Yu et al., 2021).

O método de extração ácida é o mais utilizado para a obtenção da pectina a partir de plantas, devido à sua simplicidade e baixo custo. Geralmente, emprega ácidos clorídrico e acético como reagentes extratores, embora apresente desvantagens relacionadas ao tempo prolongado de extração e ao baixo rendimento (Rehman et al., 2019). Outra técnica é a extração alcalina, que preserva melhor a estrutura das cadeias laterais neutras, resultando em uma molécula com menor teor de grupos ésteres em comparação ao método ácido (Wang et al., 2023). Além disso, a extração enzimática, realizada em baixas temperaturas, produz pectina de elevada pureza, embora seja limitada à obtenção em pequenas quantidades (Cui et al., 2021).

Todavia, esses métodos de extração apresentam limitações no contexto industrial. Além das desvantagens intrínsecas a cada metodologia, destaca-se o elevado volume de reagentes potencialmente tóxicos lançados no meio ambiente. No caso da extração ácida, pode ocorrer ainda a perda de compostos voláteis, degradação de moléculas valiosas presentes nas plantas e aumento dos custos operacionais (Marić et al., 2018).

Diante disso, novas alternativas sustentáveis vêm sendo desenvolvidas, combinando técnicas convencionais com tecnologias avançadas, tais como extração

subcrítica, micro-ondas, ultrassom, alta pressão e aquecimento ôhmico (Putnik et al., 2017). Essas inovações promovem maior rendimento, redução do tempo de extração e menor uso de solventes. O processo torna-se ainda mais atrativo com o emprego de ácidos orgânicos, que, embora promovam menor hidrólise, resultam em menor despolimerização e preservação da estrutura da molécula (Cui et al., 2021).

A pectina tem sido destacada como um biopolímero promissor para a fabricação de embalagens alimentícias sustentáveis. Suas propriedades gelificantes e filmogênicas aliadas à crescente demanda por materiais biodegradáveis e biocompatíveis oferecem uma alternativa viável às embalagens convencionais de origem petroquímica. O uso da pectina contribui para enfrentar desafios globais relacionados à redução do uso de plástico, ao aproveitamento de resíduos agroindustriais e à preservação ambiental (Norcino et al., 2020; Xie et al., 2023).

Adicionalmente, Roy et al. (2023) enfatizam que os filmes à base de pectina apresentam características vantajosas, tais como alta solubilidade em água, adequada retenção de umidade, boa barreira contra aromas, baixa permeabilidade ao oxigênio, o que resulta em menor oxidação do alimento e, conseqüentemente, no aumento da vida útil do produto.

Os filmes de pectina são produzidos por meio da homogeneização do polímero em água, podendo-se empregar variações de temperatura, adição de agentes plastificantes e métodos de secagem úmida ou seca para a obtenção do filme final (Butler et al., 2023; Kumar et al., 2023). A exemplo, Zhang et al. (2024) realizaram a extração ácida da pectina das cascas de pitaya branca e vermelha a 90 °C, conseguindo produzir filmes cujas propriedades se aproximam das obtidas a partir de pectina cítrica comercial. Esses filmes foram preparados pelo método de casting, por solubilização da pectina em água à temperatura ambiente, sem a adição de plastificantes.

Similarmente, Said et al. (2023), extraíram a pectina ácida das farinhas provenientes das cascas das frutas Setoka (ST), Kanpei (KP) e Shiranui. A pectina obtida foi solubilizada em água e adicionada de glicerol para a produção de filmes, também pelo método de casting, os quais apresentaram desempenho superior ao da pectina comercial em termos de resistência mecânica, flexibilidade e menor solubilidade em água.

Outras fontes recentes para extração de pectina destinada à produção de filmes incluem ambarella e sementes de jaca (Nguyen et al., 2024), cascas de abóbora

(Lalnunthari, Devi e Badwaik, 2020), frutas de baixa qualidade e caule de figo (Çavdaroğlu et al., 2023), entre outras. Contudo, apesar da viabilidade, filmes compostos exclusivamente por pectina têm sido considerados, em diversos estudos, como limitados em suas propriedades mecânicas, com baixa resistência à água e resistência térmica inferior quando comparados a plásticos convencionais e outros biopolímeros (Butler et al., 2023; Xie et al., 2023). Essa limitação está relacionada à sua estrutura química, rica em grupos hidroxila, que favorece a absorção de água e fragiliza a matriz polimérica (Sucheta et al., 2019).

Dessa forma, diversos polímeros ou moléculas são incorporados aos filmes de pectina para conferir propriedades específicas, como atividade antioxidante, antimicrobiana, hidrofobicidade, além da melhora das características mecânicas e de barreira. Entre os compostos comumente adicionados estão outros biopolímeros utilizados na formação de filmes, tais como amido, celulose, gomas, gelatina, zeína, óleos, ceras e proteínas (Sucheta et al., 2019).

Por exemplo, foram desenvolvidos filmes a partir da pectina extraída da casca de bananas via extração enzimática, aos quais foram adicionadas nanopartículas de cera de abelha (Xie et al., 2023); filmes híbridos compostos por pectina e proteína extraídas da casca e semente da abóbora, respectivamente (Lalnunthari, Devi e Badwaik, 2020); além de filmes produzidos com pectinas comerciais enriquecidos com diferentes proteínas, como whey protein (Marquez et al., 2017) e proteína de chícharo (*Lathyrus sativus*) (Salimi et al., 2025). Nesses casos, a adição visou melhorar propriedades mecânicas e a barreira contra gases e vapor de água.

Assim, a pectina demonstra ser um polímero promissor para aplicação em filmes, especialmente quando combinada com outros polímeros. Entre as diversas fontes disponíveis, aquelas originadas de resíduos agroalimentares ganham destaque por agregar valor à materiais subutilizados, reduzir o impacto ambiental, ampliar a diversidade de tipos de pectina, diminuir custos de produção e estimular aplicações inovadoras (Silva et al., 2020).

3.4 Semente do Girassol

A semente do girassol (*Helianthus annuus* L.) representa uma fonte significativa de óleo, utilizado tanto em alimentos quanto em outras aplicações. A espécie é o quarto maior cultivo para óleo do mundo, com uma produção no Brasil superior a 87 mil toneladas de grãos (IBGE, [s.d.]). A relevância e vantagem deste em relação a

outros óleos estão relacionadas ao alto valor nutricional, devido à elevada proporção de ácidos graxos insaturados, principalmente o ácido linoleico, além de altos níveis de proteínas, fibras, minerais e compostos fenólicos (Li, et al., 2024c; Puttha et al., 2023).

O grão, em sua fase madura, é composto por três camadas estruturais: endocarpo (camada interna), mesocarpo (camada média) e epicarpo (camada externa). Além disso, é protegido por uma casca composta por lignina e outros componentes celulolíticos que conferem proteção à semente (Laaraj et al., 2025). Para a extração do óleo, as sementes passam por limpeza, secagem, retirada das cascas e, em seguida, a extração propriamente dita, que pode ser realizada por prensa hidráulica, prensa parafuso ou utilizando solventes extratores. No caso da prensa, a torta residual ainda contém níveis significativos de óleo, que são removidos posteriormente por extração com solventes, originando um produto que requer processos subsequentes para a obtenção do óleo refinado e uma torta desengordurada (Puttha et al., 2023).

Esse subproduto da extração corresponde a aproximadamente 36% da massa inicial do material e apresenta uma composição proteica entre 45 e 50%. Além das proteínas, contém outros compostos que conferem ao resíduo características únicas e nutritivas, como antioxidantes, aminoácidos, vitamina C e minerais (Adeleke e Babalola, 2020). Contudo, assim como outros subprodutos, essa torta é normalmente destinada à alimentação animal devido à presença de polifenóis, que conferem sabor amargo e adstringente. No entanto, a extração da proteína dessa torta abre possibilidades para novas funcionalidades e aplicações para esse resíduo (Adeleke e Babalola, 2020; Kaur e Ghoshal, 2022; Malik e Saini, 2017).

3.4.1 Proteína isolada da semente de girassol (PISG)

As proteínas são polímeros formados por monômeros chamados aminoácidos, ligados por ligações peptídicas, frequentemente constituídos por centenas dessas unidades. Por essa razão, as moléculas proteicas apresentam diversas estruturas, interações e adesões. Além disso, podem ser submetidas a tratamentos para melhorar suas propriedades funcionais, como tratamento mecânico, aquecimento, pressão, irradiação, entre outros (Chen et al., 2019).

O processo de isolamento das proteínas provenientes da torta residual do processamento da semente de girassol inicia-se com a aplicação de soluções aquosas contendo solventes orgânicos ou suas misturas, tais como metanol, etanol e

2-propanol, visando à extração e remoção dos compostos fenólicos presentes. Em sequência, a separação proteica ocorre em duas etapas principais: extração e isolamento proteico (Kaur e Ghoshal, 2022).

Na etapa de extração, a torta desengordurada é submetida a um tratamento alcalino para solubilização das proteínas, seguido pela remoção dos resíduos sólidos por centrifugação. O sobrenadante obtido é então acidificado por adição de ácido diluído, promovendo a precipitação das proteínas isoladas. Posteriormente, as proteínas precipitadas são recuperadas por centrifugação, separadas do sobrenadante, lavadas com água para remoção de impurezas e finalmente submetidas à secagem para obtenção do produto final (Kaur e Ghoshal, 2022).

No contexto do girassol, as proteínas predominantes são as albuminas e as heliantinas (globulinas), sendo estas últimas encontradas em maior quantidade (Kaur e Ghoshal, 2022). As albuminas do girassol são proteínas alcalinas, compostas por uma única cadeia polipeptídica, solúveis em água, com coeficiente de sedimentação de 2S, massas moleculares entre 10 e 18 kDa, e ponto isoelétrico (pI) próximo de 9 (Kaur e Ghoshal, 2022). Por outro lado, as heliantinas são proteínas neutras organizadas estruturalmente em um antiprisma trigonal formado por seis subunidades esféricas, com massa molecular variando entre 300 e 350 kDa e coeficiente de sedimentação de 11S. Essas podem se dissociar em monômeros de 2 a 3S ou em oligômeros de 7S, apresentando pI na faixa de 4 a 6. As seis subunidades monoméricas são constituídas por cadeias peptídicas básicas ou ácidas, interligadas por pontes dissulfeto (Kaur e Ghoshal, 2022).

No sistema alimentício as proteínas desempenham funções essenciais na formação de espuma, emulsões, retenção de água e gelatinização (Malik e Saini, 2017). No caso específico das proteínas extraídas da torta da semente de girassol, elas são consideradas promissoras devido ao seu elevado valor nutricional e, além das funcionalidades mencionadas, destacam-se pelas propriedades bioativas e pela capacidade de formar complexos com íons cálcio (Laaraj et al., 2025). Ressalta-se que a solubilidade da proteína é um fator determinante para sua funcionalidade, assim como as interações com outras moléculas, tais como os polifenóis (Malik e Saini, 2017).

No contexto das embalagens, a proteína isolada da semente de girassol (PISG) tem sido explorada em diversos estudos científicos. Rouilly et al. (2006), produziram filmes à base de PISG utilizando o método de extrusão, investigando a influência da

temperatura e das proporções de água e glicerol no processo. Os resultados indicaram a viabilidade da produção de filmes com textura lisa e homogênea, bem como a formulação ideal para obtenção dessas características.

Em filmes produzidos pelo método de casting, em sistemas aquosos, a proteína é inicialmente solubilizada mediante agitação e ajuste do pH para valores alcalinos entre 11 e 12. Além disso, a solução é adicionada de plastificantes com o objetivo de reduzir a fragilidade do filme, promovendo melhora nas propriedades viscoelásticas e extensibilidade, tornando o material menos quebradiço (Chen et al., 2019).

No estudo de Salgado et al. (2010), realizou-se o isolamento das proteínas a partir da torta residual obtida em indústria, seguido da produção de filmes à base de proteína isolada da semente de girassol (PISG) a 5% (m/v), com diferentes concentrações de compostos fenólicos e glicerol. Os filmes não apresentaram diferenças significativas quanto à espessura, permeabilidade ao vapor de água, umidade e resistência à tração. Contudo, os filmes contendo compostos fenólicos exibiram atividade antioxidante e diferenças notáveis nas propriedades ópticas.

Em trabalho subsequente, Salgado et al. (2013) isolaram as proteínas da torta residual e produziram filmes (5% m/v) plastificados com glicerol, adicionados de óleo essencial de cravo. Esses filmes demonstraram propriedades antioxidantes e antimicrobianas, sendo eficazes na retardação da oxidação lipídica em hambúrgueres de sardinha refrigerados.

Além disso, a combinação da PISG com polissacarídeos tem sido estudada. Efthymiou et al. (2022) desenvolveram filmes híbridos de PISG e nanocelulose de origem bacteriana, que apresentaram melhorias nas propriedades mecânicas e redução na permeabilidade à água e solubilidade, quando comparados aos filmes à base de PISG puro. O estudo também evidenciou a aplicação eficaz desses filmes na preservação de morangos resfriados. Outras combinações descritas na literatura incluem a associação da PISG com goma de alfarroba (locust bean gum - LBG) (Alves et al., 2024) e amido de batata (Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para a produção dos filmes, foram utilizados os seguintes insumos: proteína isolada da semente de girassol (SSP), com baixo teor de compostos clorogênicos e teor proteico bruto de 80%, fornecida pela Bio Technologies; pectina extraída de cascas cítricas, com teor de ácido galacturônico de 74% em base seca (Sigma-Aldrich, Dinamarca); e glicerol grau P.A., fornecida pela Dinâmica (Indaiatuba, SP, Brasil). Todos os demais reagentes empregados foram de grau analítico.

4.2 Produção dos filmes

4.2.1 Solução para filme controle PISG 2% (m/v)

O filme controle de proteína isolada da semente de girassol (PISG) foi preparado seguindo metodologia adaptada de Alves et al. (2024). Em béquer contendo água destilada, foram solubilizados 2% (m/v) de PISG, ajustando-se o pH para 11 por meio da adição de solução de hidróxido de sódio 2 M, para a solubilização da proteína e consequente formação do filme. A mistura foi mantida sob agitação constante por 30 min à temperatura ambiente. Após esse período, adicionou-se 1,5% (v/v) de glicerol como plastificante, promovendo homogeneização por cinco min. Em seguida, a solução foi submetida a tratamento ultrassônico em banho (USC-1650A, Unique, Brasil) a 25 kHz e 150 W por 15 min, seguido de dois min de sonicação com sonificador de ponteira (QR350, Ultronique, Brasil) a 85 kHz.

4.2.2 Solução para filme controle de pectina comercial e extraída 2% (m/v)

A preparação das soluções filmogênicas de pectina, tanto comercial quanto extraída do mesocarpo do pequi, seguiu metodologia adaptada de Siqueira et al., (2022). A quantidade adequada do polissacarídeo foi dispersa em água destilada sob agitação constante por 1h30 à temperatura ambiente, seguida de agitação por 30 min a 70 °C, com correção do volume ao final do processo. Posteriormente, foi adicionado 1,5% (v/v) de glicerol, homogeneizando-se a mistura por cinco min sob agitação. A solução foi então submetida a tratamento ultrassônico em banho (USC-1650A, Unique, Brasil) a 25 kHz e 150 W por 30 min para eliminação de bolhas.

4.2.3 Solução para filmes a partir de PISG e Pectina 2% (m/v)

As soluções filmogênicas contendo misturas de proteína isolada da semente de girassol e pectina comercial foram preparadas conforme Liu et al. (2007), utilizando diferentes proporções entre os polímeros (4:1; 3:2; 2:3; 1:4). As soluções foram inicialmente preparadas separadamente: a PISG foi solubilizada por agitação constante durante 30 min após ajuste do pH para 11 com solução de hidróxido de sódio 2 M; a pectina foi homogeneizada sob agitação constante por 1h30 à temperatura ambiente, seguida de 30 min a 70 °C. Após completa homogeneização, as soluções foram combinadas, adicionadas de glicerol (1,5% v/v), e submetidas a agitação por 5 min, seguido de tratamento ultrassônico em banho (USC-1650A, Unique, Brasil) a 25 kHz e 150 W por 15 min, e sonicação com sonificador de ponteira (QR350, Ultronique, Brasil) a 85 kHz por 2 min.

A produção das blendas contendo proteína isolada da semente de girassol e pectina extraída do mesocarpo do pequi seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente, com substituição da pectina comercial pela pectina extraída.

As soluções preparadas foram vertidas (~130 g) em formas de silicone (18 × 17 cm) e secas em estufa de convecção (420-1DE, Nova Ética, Brasil) por 24 h a 30 °C. Os filmes, produzidos em triplicata, foram removidos manualmente das formas após secagem e armazenados em sacos ziplock identificados, mantidos à temperatura ambiente. Antes das análises, as amostras foram acondicionadas em dessecador com sílica por no mínimo 48 h (UR ≈ 20%), a fim de igualar e estabilizá-las quanto a umidade. A composição dos filmes é apresentada na Tabela A.1 (Anexo A).

Os filmes foram identificados como:

- F100-0 - filme a base de proteína isolada da semente de girassol;
- F0-100 - filme a base de pectina comercial;
- F80-20; F60-40; F40-60; F20-80 - filme a base de proteína isolada da semente de girassol e pectina comercial nas proporções de 80:20; 60:40; 40:60 e 20:80 (m/m de polímero), respectivamente.
- Pec-pequi - filme a base de pectina extraída da farinha do mesocarpo do pequi

- F80-20p - filme a base de proteína isolada da semente de girassol e pectina extraída da farinha do mesocarpo do pequi na proporção de 80:20, respectivamente.

4.3 Caracterização dos filmes

4.3.1 Espessura e propriedades mecânicas

A espessura das amostras foi medida utilizando micrômetro externo (modelo 103-137, Mitutoyo Corporation, Japão) com precisão de 0,001 mm. Foram realizadas medições em 10 pontos aleatórios distribuídos em diferentes repetições da mesma amostra. As propriedades mecânicas, resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade, foram avaliadas conforme a norma ASTM D882-18 (ASTM, 2018), utilizando um analisador de textura (TA.XT plus, Stable Micro Systems, Reino Unido) equipado com célula de carga de 50 kgf. As amostras foram recortadas em dimensões de 10 × 100 mm, com distância inicial entre as garras de 50 mm e velocidade de teste de 0,80 mm/s. Oito repetições foram realizadas para cada amostra, sendo consideradas para análise estatística as quatro melhores execuções.

4.3.2 Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR)

As amostras de filme, previamente acondicionadas em dessecador, foram analisadas por espectroscopia no infravermelho médio utilizando transformada de Fourier (FTIR), por meio do equipamento Nicolet iN10 Infrared Microscope (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, EUA), acoplado a um acessório de Reflectância Total Atenuada (ATR). A faixa espectral analisada compreendeu 675 a 4000 cm^{-1} , com 64 varreduras (scans) por amostra. Foram realizadas duas replicatas para cada tipo de filme. Os espectros obtidos de diferentes pontos dos filmes foram processados e analisados no software OriginPro 2023 (OriginLab Corporation, Northampton, EUA).

4.3.3 Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade

Os ensaios descritos em sequência foram efetuados conforme metodologia descrita por Alves et al. (2024). A permeabilidade ao vapor de água (PVA) e a taxa

de transmissão de vapor de água (TTVA) foram determinadas pelo método gravimétrico, utilizando-se frascos de vidro com capacidade de 15 mL e abertura superior de 12 mm de diâmetro, contendo aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume preenchido com sílica gel previamente seca por 24 h a 150 °C.

As amostras dos filmes foram cortadas com bisturi em formato quadrado, dimensionadas para cobrir integralmente a abertura dos frascos, de modo a posicioná-las entre a boca do recipiente e a tampa perfurada. Os frascos foram acondicionados em dessecador hermético contendo solução saturada de cloreto de sódio (NaCl), garantindo umidade relativa de 75–80%. Durante sete dias consecutivos, os frascos, foram pesados em intervalos de 24 h, a fim de registrar o ganho de massa da sílica, possibilitando a construção da curva de calibração.

O ensaio foi conduzido em ambiente climatizado a $20 \pm 0,5$ °C, em quatro repetições e um branco. Os parâmetros PVA e TTVA foram calculados segundo as Equações 1 e 2, respectivamente:

$$PVA = \frac{G}{t} \times \frac{e}{(\Delta P \times A)} \quad (1)$$

$$TTVA = \frac{G}{t \times A} \quad (2)$$

em que:

- G/t significa a inclinação da curva entre o ganho de peso (G) em função do tempo (t);
- e é o valor médio da espessura dos filmes em milímetro;
- ΔP é a pressão de vapor de saturação da água à 20 °C (2,33921 kPa) e;
- A é a área de permeação da amostra (m²) equivalente à área da abertura da tampa.

Para determinação da permeabilidade ao oxigênio (PVO), utilizou-se o mesmo tipo de frascos de vidro (15 mL, abertura de 12 mm). Foram adicionados 3 g do reagente desoxidante, constituído por ferro metálico em pó, carvão ativado e cloreto de sódio, na proporção 0,5:1:1,5 (m/m/m). As amostras foram cortadas em triplicata em quadrados ajustados à abertura do frasco, posicionadas entre a tampa e o corpo do recipiente. Os frascos foram mantidos em dessecador contendo solução saturada de cloreto de bário (umidade relativa de 99%) por 48 horas a 25 °C. Os pesos dos

frascos foram registrados no início e ao final do ensaio. O ensaio foi realizado a partir de quatro repetições amostrais para a caracterização dos filmes contendo pectina comercial e PISG (em filmes controle e blindados), e em três repetições para a caracterização comparativa entre os filmes controle e blendas produzidos a partir da pectina comercial e extraída em conjunto com PISG. A permeabilidade ao oxigênio foi calculada conforme a Equação 3:

$$PVO = \frac{m_f - m_i}{t \times A} \quad (3)$$

Na qual:

- m_f significa massa final (g);
- m_i , massa inicial (g);
- t , o tempo de equilíbrio (s);
- A , área do filme (m^2), correspondente à área da abertura da tampa.

O ensaio de solubilidade em água (SA) foi conduzido com filmes cortados em formato circular com 2 cm de diâmetro em cinco repetições. As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105 °C por 24 horas para determinação da massa seca inicial (m_i). Posteriormente, submergiram-se em 50 mL de água destilada e foram agitados orbitalmente a 150 rpm por 24 h. Após este período, as amostras foram novamente secas em estufa por 24 h a 105 °C para obtenção da massa final (m_f). A solubilidade em água, expressa em percentual, foi calculada pela Equação 4:

$$SA = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (4)$$

A umidade dos filmes foi determinada por método gravimétrico a partir de 5 repetições amostrais. Cortes de 2 cm x 2 cm, com massa inicial conhecida (m_i), foram secos em estufa a 105 °C por 24 h, utilizando placas de Petri previamente pesadas. Após a secagem, a massa final (m_f) foi registrada, e a umidade relativa (%) foi calculada conforme a Equação 5:

$$U (\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

4.3.4 Análise termogravimétrica (TGA)

Foram utilizadas aproximadamente 10 mg de amostras cortadas para a análise e comparação do perfil térmico dos filmes. A caracterização térmica foi realizada em um analisador térmico simultâneo (SDT Q600, TA Instruments, New Castle, DE, EUA), utilizando cadinhos de alumínio sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo constante de 50 mL·min⁻¹. A temperatura foi elevada a uma taxa de 10 °C·min⁻¹ até atingir 600 °C (Alves et al., 2024).

4.3.5 Propriedades cromáticas

Os filmes foram avaliados quanto a cor e opacidade. A análise de cor foi realizada em colorímetro tristímulo (Colorflex, Hunter Associates Laboratory, Reston, USA) no qual foram obtidos os parâmetros CIE L*, a* e b*. A partir dos resultados de a* e b*, foram calculadas as propriedades croma (c) ou saturação de cor (Equação 6) e ângulo de tonalidade (h) (Equação 7 e 8) (Alves et al., 2024; Yoo et al., 2020).

$$c = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (6)$$

$$h = \sqrt{\tan \frac{b^*}{a^*}}, \text{ para } a^* \text{ e } b^* > 0 \quad (7)$$

$$h = 360 + \sqrt{\tan \frac{b^*}{a^*}}, \text{ para } a^* > 0 \text{ e } b^* < 0 \quad (8)$$

A opacidade dos filmes foi determinada por meio da medição da absorbância nas amostras a 600 nm, utilizando espectrofotômetro UV-Vis (SP-2000UV, Spectrum, EUA). As amostras foram cortadas em retângulos de 3 × 1 cm e posicionadas na parede interna das cubetas de quartzo, sendo analisadas em triplicata (Alves et al., 2024). O índice de opacidade foi calculado conforme a Equação 9.

$$\text{Opacidade} = \frac{A_{600}}{X} \quad (9)$$

Onde, A₆₀₀ corresponde a absorção da amostra a 600 nm e X, a espessura da amostra.

4.3.6 Estudo da biodegradabilidade dos filmes

O estudo da biodegradabilidade dos filmes foi conduzido conforme Alves et al. (2024), com adaptações. Amostras de 2 × 2 cm foram enterradas em solo tipo turfa (All Garden, Holambra, Brasil) a uma profundidade de 3 cm, em recipientes plásticos com 12,5 cm de altura. Durante os primeiros dez dias de análise, foram realizadas fotografias diárias dos filmes cuidadosamente removidos para documentação visual. Após esse período, as imagens foram registradas em intervalos de cinco dias. O experimento foi conduzido à temperatura ambiente (~25 °C), com a adição de 5 mL de água a cada dois dias para manter a umidade, buscando simular condições naturais de degradação.

4.4 Processamento das farinhas de pequi

Cerca de 20 quilos de frutos de pequi foram comprados no CEASA-MG na cidade de Contagem, na safra de 2023/2024. As etapas seguintes foram realizadas segundo a metodologia de Leão et al. (2018), na qual, se inicia pela separação visual dos frutos para retirar do conjunto de frutos aqueles que estivessem com algum dano nas cascas. Posteriormente seguiu-se para a lavagem dos pequis com detergente neutro e higienização com hipoclorito de sódio a 15 ppm por 15 min.

Após a higienização, o exocarpo das cascas foi removido manualmente com facas de aço inoxidável. As cascas foram cortadas ao meio, retirou-se a polpa e os pedaços foram novamente fracionados para facilitar o branqueamento. No processo de branqueamento, os fragmentos do mesocarpo do pequi foram imersos em água a 90 °C por 3 min, seguidos por choque térmico em água a 4 °C por 3 min. As cascas branqueadas foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes e armazenadas congeladas a -18 °C.

Para a produção das farinhas, 100 g das cascas armazenadas, previamente retiradas do congelador 24h antes, foram moídas juntamente com 100 mL de água destilada até a obtenção de uma pasta homogênea. Essa pasta foi distribuída em bandejas de alumínio e seca em estufa com circulação forçada (420-1DE, Nova Ética, Brasil) a 50 °C por 24h. Após o resfriamento à temperatura ambiente, as partículas foram segregadas com o auxílio de um moedor elétrico (MDR302, Cadence, Brasil), tamisadas para obtenção de partículas menores que 425 µm, para padronização da granulometria, e armazenadas em sacos plásticos herméticos.

4.5 Extração e flotação da pectina obtida do mesocarpo do pequi

A extração da pectina seguiu a metodologia adaptada de Leão et al. (2018). Em recipiente apropriado, foram adicionados 2 g de farinha do mesocarpo de pequi, 50 mL de água destilada e 50 mL de ácido cítrico (0,5 mol/L). A extração ocorreu em reator de micro-ondas (START SYNTH, Milestone, Itália), com agitação constante por barra magnética.

O processo foi conduzido em duas etapas: a primeira de pré-aquecimento, com o equipamento programado para atingir a temperatura de 108 °C durante 2 min, a uma potência de 600 W; e a segunda de extração, também a 108 °C, por 3 min, com a mesma potência.

O extrato obtido foi filtrado ainda quente, utilizando malha de aço inoxidável com abertura de 250 µm, e posteriormente resfriado até atingir 4 °C. Sob agitação constante, adicionaram-se lentamente 150 mL de álcool etílico absoluto, previamente resfriado a 4 °C, promovendo a flotação da pectina. Após 10 min de agitação, o sistema permaneceu em repouso por 30 min, seguido de separação da pectina por filtração a vácuo, utilizando papel filtro qualitativo (porosidade de 8-12 µm).

O gel retido foi imerso em álcool etílico absoluto por 12 h, seguido de desidratação parcial, pela submersão em acetona. Por fim, a pectina foi seca em estufa com circulação de ar (420-1DE, Nova Ética, Brasil), a 40 °C por 12 h. O rendimento da pectina (%) foi calculado usando a Equação 10.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{massa da pectina seca (g)}}{\text{massa da quantidade de farinha do mesocarpo do pequi (g)}} \times 100 \quad (10)$$

4.6 Análise por FTIR dos pós de pectina comercial e extraída da farinha do mesocarpo do pequi e determinação do grau de esterificação

A análise da pectina extraída da casca do pequi, bem como sua comparação com a pectina cítrica comercial, foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando o equipamento IRAffinity-1 (Shimadzu, Japão), com detector DLATGS (Deuterated Triglycine Sulfate doped with L-Alanine).

Previamente à análise, a pectina extraída foi peneirada em tamis de 425 µm, visando à uniformização do tamanho das partículas. As amostras foram homogeneizadas com brometo de potássio (KBr) na proporção de 1:9 (amostra:KBr), sendo utilizado o próprio KBr para obtenção do branco. As análises foram realizadas

em ambiente de atmosfera seca, à temperatura de $20 \pm 0,5$ °C, obedecendo aos seguintes parâmetros:

- Faixa abrangida: $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$;
- Scans: 45;
- Apodização: Happ-Genzel;
- Resolução de 4 cm^{-1} .

Para a medição da refletância difusa (RD), foi utilizado o acessório DRIFT (DRS8000A, Shimadzu). Os espectros obtidos foram processados no software OriginPro Learning Edition, sendo calculadas as áreas dos picos característicos dos grupos carboxílicos livres ($\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$) e esterificados ($\sim 1740 \text{ cm}^{-1}$), conforme descrito por Leão et al. (2018). A determinação do grau de esterificação foi calculada conforme a equação a seguir (Eq. 11), com os resultados expressos em porcentagem.

$$\text{Grau de esterificação (\%)} = \frac{(\text{área COOR})}{(\text{área COOH} + \text{área COOR})} \times 100 \quad (11)$$

4.7 Análise estatística

Os dados do trabalho foram avaliados utilizando o software de estatística Minitab (Minitab 22.2.2, Minitab, EUA), a partir da avaliação de variância (ANOVA) e teste comparativo de diferença significativa ($p < 0,05$) entre as amostras, pelo método Tukey.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

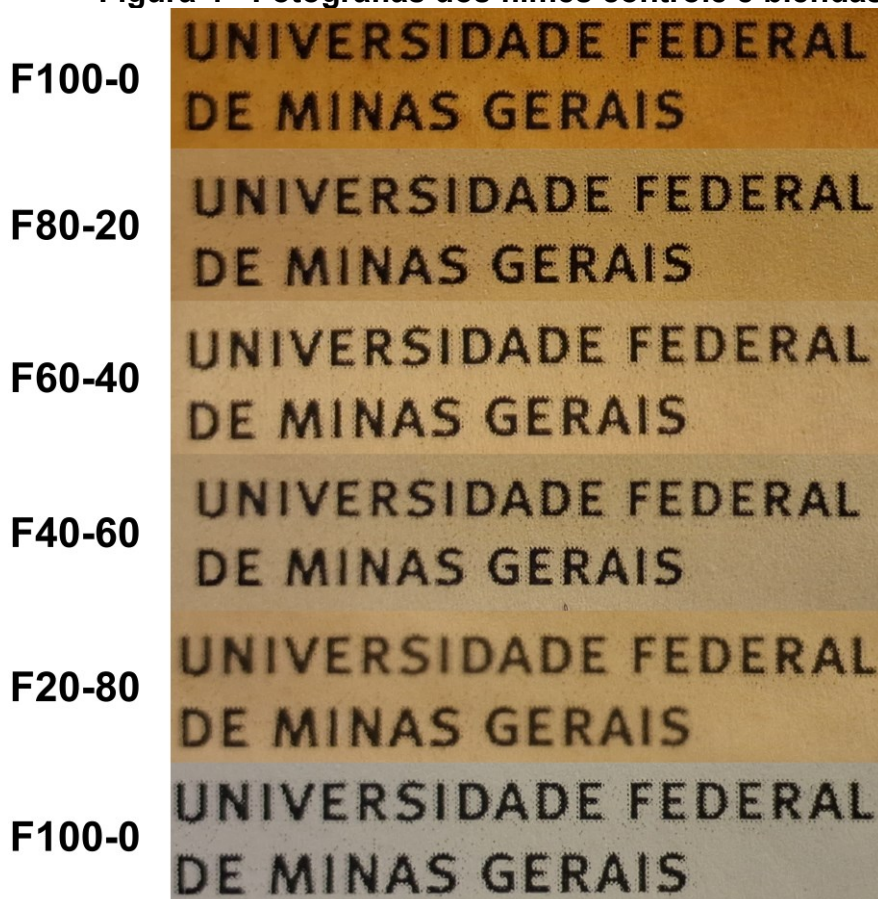
5.1 Caracterização dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial e proteína isolada de semente de girassol

5.1.1 Propriedades cromáticas dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

As propriedades cromáticas das embalagens alimentícias constituem fatores cruciais para aceitação pelos consumidores. Relatos indicam que compradores preferem filmes com maior transparência, possibilitando melhor visualização do produto; entretanto, filmes com maior opacidade podem apresentar vantagens na proteção contra radiação ultravioleta, sendo, portanto, recomendados para determinados alimentos, uma vez que a exposição à luz pode induzir reações oxidativas (Kola e Carvalho, 2023).

Essa propriedade é avaliada pelos parâmetros de opacidade, luminosidade e cor, cujos resultados estão na Tabela 1, juntamente com as fotografias de cada amostra (Figura 9).

Figura 4 - Fotografias dos filmes controle e blendas.



Fonte: elaborado pela autora.

As fotografias evidenciam a influência da proporção de proteína isolada da semente de girassol na coloração dos filmes conjugados. Nota-se que, com a redução da concentração desse polímero, há uma atenuação da tonalidade marrom, especialmente evidente na comparação visual entre o filme controle e as blendas F80-20 e F60-40. Destaca-se, também, a diferença perceptível entre os filmes controles, cem como entre as blendas e o filme composto exclusivamente de pectina comercial, apontando um menor impacto deste polímero sobre a coloração final.

Tabela 1 - Propriedades cromáticas dos filmes controle e blenda

Amostras	F100-0	F80-20	F60-40	F40-60	F20-80	F0-100
L^*	17,44 ± 0,36 ^d	19,41 ± 0,08 ^{c,d}	19,16 ± 0,33 ^{c,d}	20,81 ± 0,19 ^{b,c}	23,79 ± 2,88 ^{a,b}	24,41 ± 0,37 ^a
a^*	1,19 ± 0,15 ^a	0,14 ± 0,08 ^c	0,59 ± 0,04 ^b	0,68 ± 0,04 ^b	0,51 ± 0,12 ^b	0,19 ± 0,10 ^c
b^*	2,76 ± 0,20 ^b	0,45 ± 0,10 ^c	2,90 ± 0,18 ^{a,b}	3,21 ± 0,16 ^{a,b}	3,55 ± 0,55 ^a	-0,36 ± 0,23 ^d
Chroma/ Saturação - c	3,00 ± 0,21 ^a	0,48 ± 0,10 ^b	2,96 ± 0,17 ^a	3,28 ± 0,15 ^a	3,59 ± 0,55 ^a	0,42 ± 0,21 ^b
Ângulo de tonalidade - h (°)	66,69 ± 2,85 ^b	72,33 ± 10,24 ^b	78,53 ± 0,89 ^b	78,00 ± 0,97 ^b	81,78 ± 2,36 ^b	301,2 ± 21,3 ^a
Opacidade (Abs × mm ⁻¹)	3,65 ± 0,18 ^b	2,80 ± 0,07 ^c	3,25 ± 0,06 ^{b,c}	3,62 ± 0,19 ^b	7,69 ± 0,29 ^a	1,82 ± 0,02 ^d

Fonte: Elaborado pela autora. Médias com as mesmas letras na mesma linha não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0,05$).

Os valores CIELab representam coordenadas de cor, em que: " L^* " indica luminosidade, variando de 0 (preto) a 100 (branco); " a^* " apresenta valores positivos para a tonalidade vermelha e negativos para a verde; enquanto " b^* ", denota o amarelo (positivos) e o azul (negativo). Com essas coordenadas, é possível determinar as propriedades croma (c), que expressa a intensidade ou saturação da cor, e ângulo de tonalidade (h) que descreve a tonalidade predominante (Yoo et al., 2020).

Em relação a luminosidade, observa-se que a adição da pectina resulta em um aumento nos valores de L^* . O filme controle F100-0 exibe o valor mais baixo para o

parâmetro, seguido pelas blendas F80-20 e F60-40, que não diferenciam estatisticamente entre si. Na sequência, a blenda F40-60 apresenta luminosidade semelhante tanto à F40-60 quanto ao filme controle de pectina, este último com o maior valor de L^* .

Os resultados para intensidade de cor (c), não indicam diferença estatística entre o filme controle de proteína e as blendas F60-40, F40-60 e F20-80, que exibem coloração mais intensa. Esses valores contrastam com os do filme controle de pectina e F80-20 que são iguais ($p > 0,05$). Ainda assim, observa-se que a adição da pectina exerce influência na saturação da cor; contudo, a partir de uma concentração de 40%, esse efeito não é mais significativo.

O ângulo de tonalidade (h), descreve a cor específica. Nota-se que o filme F100-0 e as blendas não apresentam diferença estatística entre si, com valores entre 66 e 81°, que correspondem a coloração próxima do marrom (menores valores) e do laranja (maiores). Esse resultado demonstra que mesmo em pequenas quantidades, a adição da proteína isolada da semente de girassol impacta significativamente na coloração dos filmes.

O filme de pectina apresentou um valor de h ligeiramente maior que 300 °, indicando uma tonalidade próxima ao roxo. No entanto, devido à baixa saturação, que confere uma aparência mais acinzentada, essa coloração não é nitidamente perceptível nas imagens.

No estudo de Sood e Saini (2022), filmes blenda à base de pectina, adicionados de caseína e/ou albumina de ovo em diferentes proporções, apresentaram valores de croma consideravelmente mais elevados, variando entre 43 a 48, e valores próximos de ângulo de tonalidade, entre 68 a 75°. A adição de um polissacarídeo em filmes de proteína também provocou o aumento da coordenada L^* no estudo de Alves et al. (2024). Entretanto nesse mesmo estudo, essa incorporação também resultou em um aumento na tonalidade e uma redução na saturação, comportamento que não se verifica no presente trabalho.

Como dito anteriormente, a opacidade é uma propriedade relevante para embalagens, indicando o grau de opacidade do material com base na absorbância; quando maior o valor de absorbância, menor a transparência. A tabela expõe que a opacidade das blendas aumenta com o acréscimo de pectina, variando entre 2,8 e 7,7.

Os controles apresentam uma diferença notável entre si: o filme contendo somente pectina exibe menor valor de opacidade entre todas amostras analisadas, enquanto o filme puro de proteína, apresenta o terceiro maior valor, sem diferença estatística para as blendas F60-40 e F40-60.

O resultado para F20-80 estaca-se, apresentando o maior valor de opacidade. No geral, são consideradas transparentes aquelas embalagens cuja opacidade é inferior a 5 (Guzman-Puyol, Benítez e Heredia-Guerrero, 2022). Assim, o filme F20-80, é o único, entre os avaliados neste teste, classificado como opaco.

Esse resultado pode ser atribuído à formação de agregados insolúveis, consequência da interação proteína-polissacarídeo em alguma etapa do processo produção ou secagem, fenômeno geralmente observado em filmes à base de proteína de soro de leite (Chakravartula et al., 2019).

No entanto, para Singh et al. (2025) o incremento da quantidade de proteína miofibrilar de peixe na formulação de filmes compostos por pectina e glucomanano, resultou em um aumento significativo de opacidade, o contrário do comportamento observado nos filmes desenvolvidos no presente trabalho. Isso demonstra que a fonte da proteína influencia na interação da pectina-proteína e por consequência impacta na presença de agregados insolúveis.

Adicionalmente Sarker, Matak e Jaczynski (2025), relataram que o filme controle elaborado na proporção de 4:1 (proteína de soja: pectina), apresentou resultados semelhantes ao de opacidade, $2,69 \pm 0,1$, encontrados para a blenda com mesma razão de polissacarídeo e proteína, analisada neste estudo.

5.1.2 Espessura e propriedades mecânicas dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

Os filmes controle e blendas foram avaliadas com base em análises de espessura e propriedades mecânicas, quanto a resistência a tração, alongamento à ruptura e módulo elástico, e os resultados estão apresentados na Tabela 2. Essas propriedades estão diretamente relacionadas à resistência dos filmes durante o manuseio e à durabilidade, visto que a resistência a tração refere-se à capacidade de suportar a um estresse aplicado, o alongamento a ruptura indica a elasticidade do material (Dash, Singh e Singha, 2024) e o módulo elástico a rigidez inerente (Roy et al., 2024).

A espessura do filme controle à base de proteína isolada de semente de girassol (F 100-0) não apresentou diferença estatística comparando com o filme controle de pectina (F 0-100). Observa-se que a adição de pectina às blendas não estabelece uma tendência clara quanto à espessura. Ressalta-se, ainda, que o filme de pectina apresenta maior desvio entre as medições, indicando uma variação da espessura ao longo da extensão do bioplástico.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos filmes controle e blendas

Amostra	Espessura (mm)	Resistência a tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo Elástico (MPa)
F 100-0	0,12 ± 0,04 ^{a,b}	1,20 ± 0,10 ^c	219,20 ± 29,10 ^a	3,88 ± 0,75 ^c
F 80-20	0,10 ± 0,01 ^{a,b}	2,10 ± 0,09 ^b	141,66 ± 5,98 ^b	16,84 ± 5,24 ^b
F 60-40	0,10 ± 0,02 ^{a,b}	2,08 ± 0,18 ^b	127,42 ± 4,59 ^b	24,20 ± 3,31 ^b
F 40-60	0,15 ± 0,04 ^a	1,37 ± 0,12 ^b	117,46 ± 1,76 ^b	13,07 ± 1,07 ^b
F 20-80	0,11 ± 0,03 ^{a,b}	1,57 ± 0,13 ^b	116,69 ± 3,51 ^b	18,22 ± 1,07 ^b
F 0-100	0,09 ± 0,06 ^b	13,12 ± 2,25 ^a	115,44 ± 2,36 ^b	296,50 ± 51,70 ^a

Fonte: Elaborado pela autora. Médias com as mesmas letras na mesma coluna não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0,05$). Nomenclatura: F (%proteína-%pectina)

Para a resistência a tração, o filme controle de proteína (F 100-0) apresentou o menor valor, e o filme controle de pectina (F 0-100), o maior, variando de 1,20 a 13,12 MPa. No caso das blendas, observou-se um aumento da resistência à tração com a adição de pectina, em comparação com o filme controle de proteína. No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre as blendas, indicando que variações no percentual de pectina não afetaram a resistência à tração.

Em alongamento na ruptura, as respostas variam de 115,44 a 219,20%. O filme o filme controle de proteína (F 100-0) apresentou o maior valor de alongamento, diferindo dos demais ($p > 0,05$), o que denota maior elasticidade em comparação com as blendas e o filme controle de pectina. Não foram observadas diferenças significativas entre as blendas. No entanto, observa-se uma leve tendência à diminuição da elasticidade com o aumento do teor de pectina.

No que se refere ao módulo elástico, o filme formulado exclusivamente com pectina (F 0-100) apresentou o maior valor (296,50 ± 51,70 MPa), destacando-se

significativamente em relação às demais amostras. O filme controle de proteína (F 100-0), apresentou o menor valor dentre todas as amostras, diferenciando-se estatisticamente de todas as blendas. Não foram observadas diferenças significativas à medida em que aumentou o teor de pectina entre as blendas. Também não foi observada nenhuma tendência de variação do comportamento.

De modo geral, observa-se que o filme controle formulado exclusivamente com pectina (F 0-100) apresentou valores significativamente superior aos demais em resistência à tração e módulo elástico, enquanto o filme controle à base de proteína (F 100-0) destacou-se do ponto de vista de plasticidade (maior valor de alongamento na ruptura). Em relação às blendas, verifica-se que a adição de pectina, mesmo em proporções reduzidas, é capaz de promover alterações significativas nas propriedades mecânicas dos filmes, evidenciando sua influência na estrutura e comportamento mecânico dos materiais compostos.

Os resultados obtidos neste estudo estão em consonância com os reportados por Sood e Saini (2022), que investigaram filmes conjugados de pectina, caseína e albumina de ovo, no que se refere à tendência de aumento ou diminuição a partir da adição da pectina. No referido estudo, os filmes baseados em pectina pura também apresentaram maior resistência à tração e menor alongamento na ruptura, quando comparados aos filmes elaborados apenas com proteínas ou suas combinações. Os autores atribuíram esse comportamento ao aumento das interações intermoleculares promovidas pela presença da pectina, o que resulta em uma matriz polimérica mais coesa e compacta. De forma semelhante, os dados observados neste trabalho indicam que a incorporação da pectina aos sistemas poliméricos avaliados contribui significativamente para o incremento da resistência mecânica dos filmes.

As variações de comportamento são afetadas pelo tipo de polissacarídeo. Os resultados obtidos neste estudo contrastam com os reportados por Ebrahimi et al. (2016), que avaliaram filmes desenvolvidos a partir da goma da semente de *Lepidium perfoliatum* e proteína isolada de ervilha-de-cheiro (*Lathyrus sativus*). Nesse trabalho, o aumento da fração polissacarídica na formulação resultou em elevação dos valores de resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade. Os autores atribuíram esse comportamento ao favorecimento da formação de ligações de hidrogênio em função da maior presença da goma, além de sugerirem que a fração proteica também participa do estabelecimento de novas ligações intermoleculares, promovendo a formação de uma matriz mais rígida, porém frágil e com menor

capacidade de deformação. De maneira semelhante, Dhaigude, Saini e Sheikh (2024), ao investigarem filmes blenda de proteína isolada da semente de girassol (PISG) e amido de batata, observaram que o aumento do teor de polissacarídeo está associado ao incremento tanto da resistência à tração quanto do alongamento na ruptura.

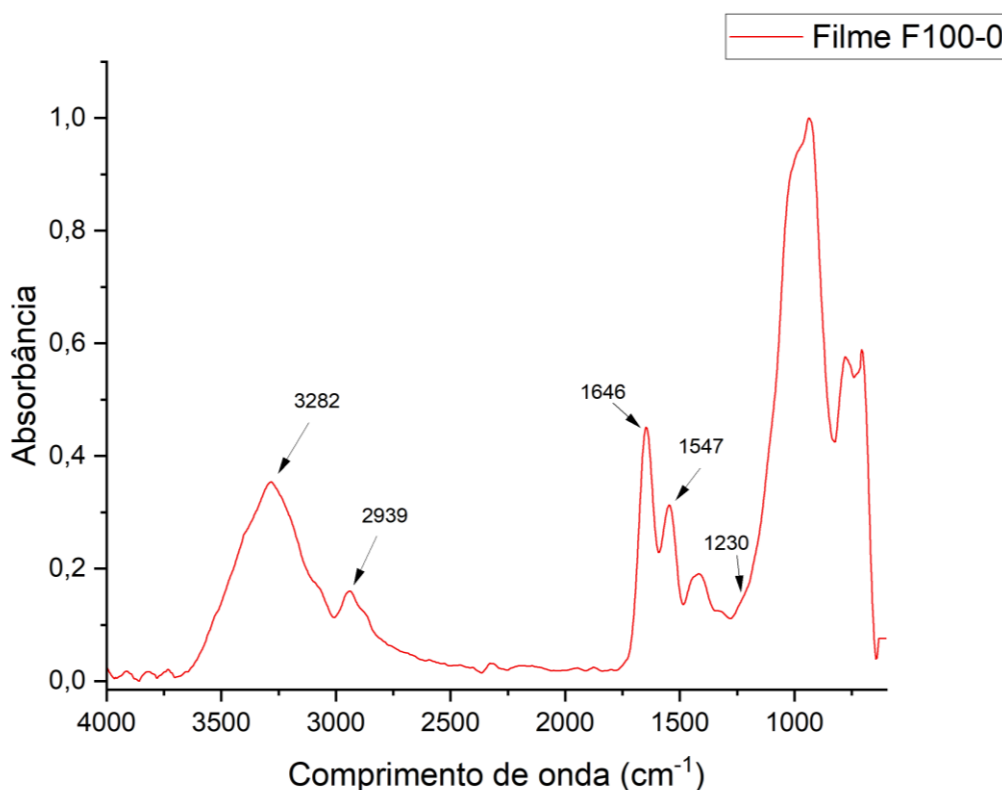
Adicionalmente, Amado, Silva e Mauro (2019) relatam que a máxima interação entre polissacarídeos e proteínas ocorre quando o potencial Zeta se aproxima de zero, o que favorece a formação de uma matriz mais coesa e, conseqüentemente, a melhoria nas propriedades mecânicas. Além disso, destacam-se a concentração total de polímeros e o tipo de proteína como fatores determinantes para a compatibilidade entre os biopolímeros utilizados.

Considerando os resultados obtidos no presente estudo, é plausível inferir que as interações entre proteína e polissacarídeo não tenham atingido seu nível ótimo, o que pode explicar a ausência de efeitos significativos das diferentes proporções nas propriedades mecânicas das blendas. Di Pierro et al. (2013) destacam que a estabilidade de sistemas compostos por proteínas e polissacarídeos depende das propriedades funcionais de cada biopolímero, bem como da natureza e intensidade das interações estabelecidas entre eles. Nesse contexto, ajustes nas condições de processamento, como a utilização de um pH próximo ao ponto de complexação, podem favorecer a formação de uma matriz mais estável e coesa, potencializando as propriedades mecânicas dos filmes.

5.1.3 Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

A análise de FTIR tem como finalidade identificar os grupamentos funcionais presente nos filmes, a partir da absorção das moléculas, que se diferenciam em função do comprimento de onda, números e intensidade dos mesmos. O espectro normalizado obtido para o filme controle de proteína isolada da semente de girassol, encontra-se na Figura 5.

Figura 5 - Espectro FTIR da amostra de filme à base de PISG (F100-0).



Fonte: Elaborado pela autora.

O espectro do filme apresenta picos similares aos descritos na literatura para as proteínas e, especificamente, para proteína isolada da semente do girassol. Na região entre 3000 e 3500 cm^{-1} , observa-se uma banda larga que corresponde a ligação O-H e N-H, características da Amida A. Há também um pico em 2939 cm^{-1} associado à Amida B, relacionado aos estiramentos C-H simétrico e assimétrico (Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024; Li, et al., 2024c; Subaşı et al., 2021).

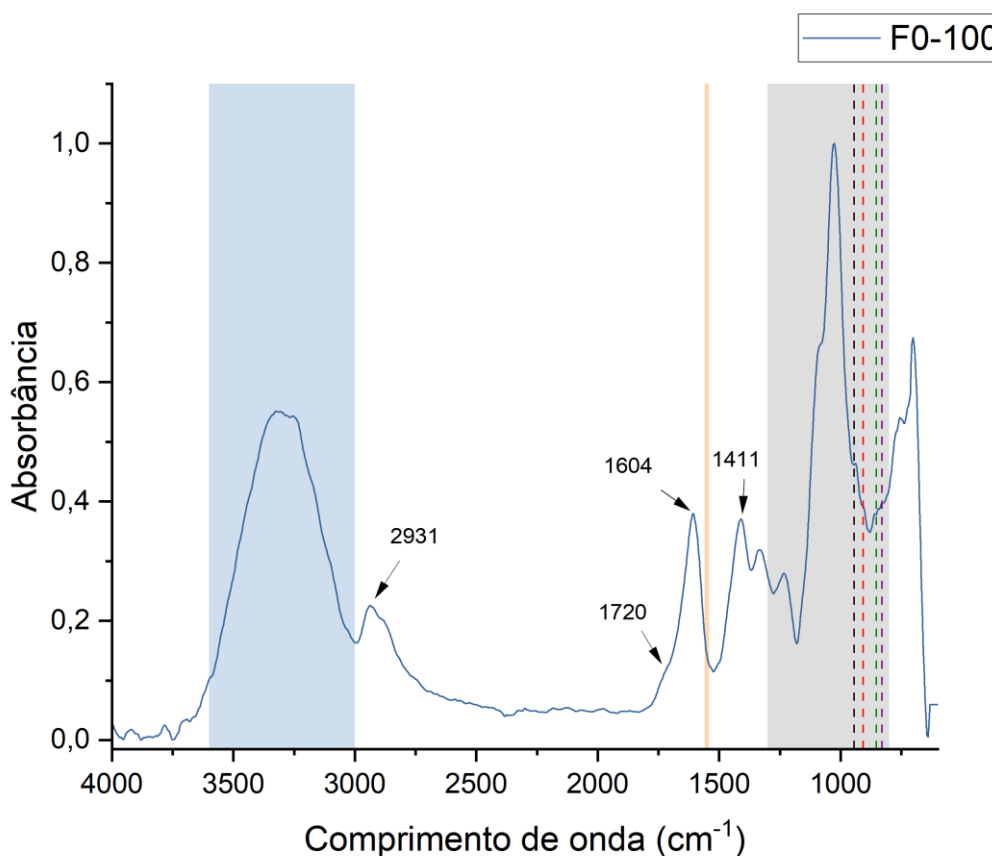
Além desses, três picos característicos de grupamentos amida são verificados em 1646, 1547 e 1200 cm^{-1} associados, respectivamente, aos estiramentos C=O (Amida I), vibração N-H (Amida II) e à vibração no plano N-H combinada ao estiramento C-N (Amida III), (Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024; Li et al., 2024c; Subaşı et al., 2021). Por fim, próximo a 1000 cm^{-1} , é observado um pico que Dhaigude, Saini e Sheikh (2024) relacionam com o glicerol.

No espectro de FTIR do filme de pectina (Figura 6), também se constata picos similares aos encontrados na literatura. Entre 3600 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} (destacada em azul) identifica-se uma banda larga relacionado com a vibração do estiramento O-H

das moléculas de água e de grupos hidroxilas presentes na estrutura da pectina (Norcino et al., 2020; Zhang et al., 2024).

Em 2931 cm^{-1} , é identificado uma absorção associada a vibração da ligação C-H, atribuída aos grupos CH_2 (Younis e Zhao, 2019) e aos carbonos de anéis piranóides (Norcino et al., 2020). Uma banda sutil, resultante da sobreposição de picos, é observada em 1720 cm^{-1} , correspondente às vibrações de C=O de grupos carboxílicos e respectivos ésteres. Além disso, são detectadas absorções em 1604 e 1411 cm^{-1} , correlacionadas aos estiramentos antissimétricos e simétricos, respectivamente, dos grupos COO^- de ácidos poligalacturônicos (Alasalvar, Yildirim e Yildirim, 2023; Liu et al., 2021; Norcino et al., 2020).

Figura 6 - Espectro FTIR da amostra de filme a base de pectina cítrica (F0-100).



Fonte: Elaborado pela autora.

A região de impressão digital (fingerprint) de polissacarídeos se localiza entre 1300 e 800 cm^{-1} . Observa-se uma sobreposição de picos na faixa de 1300 a 879 cm^{-1} (destacada em cinza); segundo Liu et al. (2021) picos entre 1150 e 1000 cm^{-1} são

correlacionados à presença de pectina e, mais especificamente, as absorções entre 1100 e 1090 cm^{-1} são atribuídas aos estiramentos de ligações C–C em anéis de galacturonanos e as absorções entre 1070 e 1076 cm^{-1} são atribuídas a estiramentos de ligações C–C em anéis de ramnogalacturonanos. Ainda segundo Liu et al. (2021), bandas entre 1331 e 1320 cm^{-1} são atribuídas a deformações de grupos O–H em anéis piranosídicos de pectinas, bandas entre 1240 e 1230 cm^{-1} são atribuídas a estiramentos das ligações C–O em pectinas e bandas entre 1020 e 1014 cm^{-1} são atribuídas a vibrações das ligações C2–C3, C2–O2 e C1–O1 na cadeia principal de pectinas.

Além dessas, as outras bandas que aparecem em 937 cm^{-1} (linha tracejada preta), 905 cm^{-1} (tracejado vermelho), 852 cm^{-1} (tracejado verde) e 829 cm^{-1} (tracejado roxo), podem estar associadas a moléculas de ramnogalacturonano I, resíduos de D-glucopiranosil ou ligação α -glicosídica, ligação β -glicosídica D-manopiranoose, respectivamente (Alasalvar, Yildirim e Yildirim, 2023; Younis e Zhao, 2019). A falta de picos na faixa de 1560 a 1540 cm^{-1} , assinalada com uma faixa alaranjada, na Figura 8, indica pouca ou nenhuma presença de proteína ou lignina (Said et al., 2023).

As amostras formuladas com diferentes proporções dos polímeros também foram analisadas por FTIR, e os respectivos espectros são apresentados na Figura 7. Constata-se que os espectros das blendas apresentam similaridades com os espectros das amostras controle de proteína isolada da semente de girassol e pectina, evidenciando a presença dos principais grupamentos funcionais de ambos os biopolímeros. Também são identificados alguns deslocamentos de bandas e diferenças em intensidades de absorção.

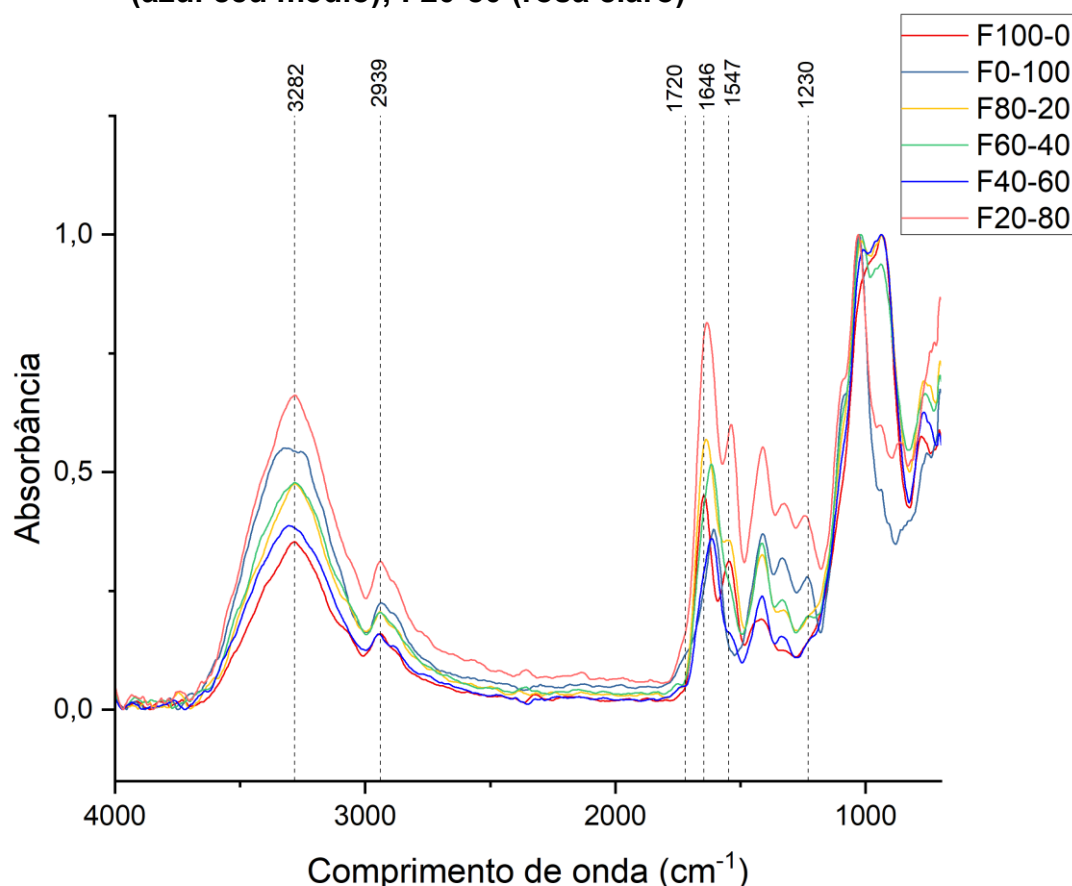
De modo geral, percebe-se que a amostra F20-80 apresenta, em várias regiões do espectro, uma maior intensidade de picos em comparação com os de outras amostras, especialmente em relação aos dos filmes controles, exceto na faixa abaixo de 1000 cm^{-1} . Em contrapartida, os picos da amostra F40-60 apresentam menor intensidade em comparação com os de outras blendas na maior parte do espectro.

Alguns deslocamentos de bandas também são identificados. Na região referenciada para amida A e/ou vibração O–H (livres ou ligados a ácidos carboxílicos e aminoácidos), o respectivo pico da amostra F40-60 exibe um deslocamento para o azul em comparação com o do filme F100-0, enquanto o da amostra F20-80 apresenta a maior intensidade e largura de banda. De acordo com Gharibzahedi et al. (2022), o

alargamento da banda está relacionado a um sistema de ligações mais complexo, envolvendo interações entre grupos -OH, -COOH e -NH₂. O deslocamento do número de onda para o azul representa uma compressão da ligação do grupamento -NH (com carga) da proteína quando este interage com um grupamento -OH da pectina via ligação de hidrogênio, de modo que a atração eletrostática entre o -OH e o -NH é contrabalanceada por uma repulsão significativa entre o átomo de oxigênio e o átomo de nitrogênio devido à pequena distância entre os dois (Li, Liu e Schlegel, 2002)

Na região correspondente à amida B, associada à ligação C-H, são verificadas similaridades em relação à amida A, tanto quanto à intensidade quanto ao deslocamento observado na amostra F40-60. Já na região da amida I, relacionada também a grupos carboxílicos, os respectivos picos de todas as amostras apresentam deslocamento para o vermelho em comparação com os do filme, F100-0, indicando a diminuição nos valores de número de onda. O deslocamento para o vermelho pode ser explicado por um balanço entre as interações atrativas e repulsivas da ligação de hidrogênio em que fortes interações entre orbitais causam uma elongação significativa da ligação, superando o encurtamento da ligação causado por forças repulsivas estéricas.

Figura 7 - Espectro FTIR das amostras de filmes controles e blends: F100-0 (vermelho); F0-100 (azul petróleo); F80-20 (amarelo); F60-40 (verde); F40-60 (azul céu médio); F20-80 (rosa claro)



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à amida II, observa-se que os picos das amostras F60-40 e F40-60 estão em menor intensidade e aparecem sobrepostos a outros sinais, sem uma separação nítida como acontece nas amostras F100-0, F80-20 e F20-80. Também se verifica um deslocamento para o vermelho do pico da amostra F20-80 comparado com o do filme F100-0, o que sugere que, nessa proporção, a pectina exerce influência na conformação estrutural da proteína isolada da semente do girassol, especialmente na estrutura α -hélice, estabilizando-a via ligações de hidrogênio. Fenômeno semelhante foi relatado por Chentir et al. (2024) em uns filmes elaborados a partir de gelatina e pectina.

Na região amida III e das ligações C-H, somente a amostra B20-80 e filme de pectina apresentam uma evidente separação, enquanto nas demais amostras, que se assemelham ao espectro do filme controle de F100-0, os picos se mostram de menor intensidade e sobrepostos. Próximo a 1100–1090 cm^{-1} são exibidos picos com alta

intensidade para todas as amostras, associados à presença de glicerol (1,5% v/v) na formulação dos filmes (Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024), bem como aos estiramentos de ligações C–C em anéis de galacturonanos (Liu et al., 2021).

As alterações observadas nos picos relacionados às amidas I, II e III evidenciam a interação entre a proteína e a pectina (S; Jaiswal, 2020; Wegrzynowska-Drzymalska et al., 2022). Também é constatada uma discreta absorção em 1720 cm^{-1} em todas as blendas atribuídas às com as vibrações do grupo carbonila (C=O) (Chentir et al., 2024). Ressalta-se que, com exceção da blenda F20-80, é observado um deslocamento desse pico para o azul, evidenciando a interação dos constituintes da matriz polimérica dos filmes.

5.1.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

As propriedades físico-químicas dos filmes são mostradas na Tabela 3. Essas propriedades são relevantes para a utilização dos filmes como embalagens alimentícias, visto que, tanto a transferência da umidade do meio para o alimento, quanto a permeabilidade do oxigênio, afetam a vida útil do produto, qualidade e crescimento microbiano (Salimi et al., 2025).

O teor de umidade do filme controle à base de proteína (F 100-0) foi superior ao do filme controle de pectina (F 0-100). Os valores obtidos para as blendas não apresentaram diferença significativa com relação ao filme controle de proteína. Apesar da pectina ser um carboidrato capaz de reter moléculas de água, o filme de proteína e as blendas, em sua maioria, apresentam maior umidade. Supõe-se que, por a proteína ser uma molécula anfifílica, capaz de alterar sua conformação para a formação e estabilização dos filmes (Phillips, Whitehead e Kinsella, 1994), tenha se rearranjado de modo a reter mais moléculas de água. Além disso, pode ser inferido que o filme de pectina formado resultou em uma matriz polimérica mais compacta, originando um filme biopolimérico com baixa umidade (Sood e Saini, 2022).

Os valores de umidade observados para o filme à base de proteína diferem dos reportados por Alves et al. (2024), que encontraram um teor de 16,20%. Contudo, é importante destacar que, naquele estudo, foi utilizada uma concentração de glicerol de 0,6%, em contraste com os 1,5% aplicados no presente trabalho. Os autores

atribuíram ao glicerol o aumento do teor de umidade em outros filmes analisados, devido à sua ação como plastificante. O glicerol possui grupos hidroxila com alta afinidade por moléculas de água sendo capaz de reter umidade na matriz polimérica, elevando o teor de água nos filmes (Hazrol et al., 2021). Além disso, o plastificante aumenta o volume hidrodinâmico entre as moléculas, o que pode aumentar a disponibilidade dos grupos polares com a água (Marturano et al., 2023).

Em outros trabalhos envolvendo polissacarídeos e proteínas, foi observado que a adição de pectina em filmes conjugados com caseína e/ou albumina, ou proteína de feijão-frade, levou a uma diminuição da umidade (Samani et al., 2024; Sood e Saini, 2022). Essa diferença de tendencia pode ser explicado por diferentes interações entre polissacarídeos-proteínas que resultam em matrizes filmogênica diferentes impactando na retenção de moléculas de água.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas dos filmes controle e blenda

Amostra	Umidade (%)	Solubilidade (%)	TTVA ($\times 10^{-3}$ g/s.m ²)	PVA ($\times 10^{-10}$ g/s.m.Pa)	PVO ($\times 10^{-9}$ g/s.mm ²)
F 100-0	38,80 $\pm$ 2,72 ^a	48,78 $\pm$ 3,53 ^c	6,68 $\pm$ 0,12 ^a	4,00 $\pm$ 0,07 ^b	4,16 $\pm$ 0,13 ^a
F 80-20	39,35 $\pm$ 2,16 ^a	72,29 $\pm$ 10,02 ^{b,c}	6,75 $\pm$ 0,20 ^a	2,81 $\pm$ 0,09 ^d	3,79 $\pm$ 0,05 ^b
F 60-40	36,89 $\pm$ 1,84 ^{a,b}	50,29 $\pm$ 5,73 ^c	6,84 $\pm$ 0,21 ^a	3,22 $\pm$ 0,10 ^c	4,22 $\pm$ 0,14 ^a
F 40-60	39,74 $\pm$ 0,45 ^a	56,26 $\pm$ 6,02 ^{b,c}	6,42 $\pm$ 0,29 ^a	4,53 $\pm$ 0,20 ^a	4,04 $\pm$ 0,09 ^{a,b}
F 20-80	39,53 $\pm$ 0,72 ^a	76,68 $\pm$ 6,75 ^b	6,58 $\pm$ 0,08 ^a	3,30 $\pm$ 0,10 ^c	3,99 $\pm$ 0,15 ^{a,b}
F 0-100	33,64 $\pm$ 0,60 ^b	100,00 $\pm$ 0,00 ^a	6,71 $\pm$ 0,19 ^a	2,58 $\pm$ 0,07 ^d	3,85 $\pm$ 0,06 ^b

Fonte: Elaborado pela autora. Médias com as mesmas letras na mesma coluna não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0,05$). Nomenclatura: F (%proteína-%pectina)

A análise de solubilidade se destaca pela necessidade de avaliar a integridade estrutural dos filmes frente a diferentes tipos de alimentos. Considerando que não existe uma característica universalmente desejável para todas as embalagens, essa

propriedade é dependente da aplicação específica: alimentos com maior teor de umidade requerem, idealmente, embalagens com baixa solubilidade, ao passo que, para embalagens comestíveis, uma alta solubilidade é desejável (Oliveira et al., 2018).

Os resultados de solubilidade mostram que o filme a base de pectina apresenta maior solubilidade em água, sendo totalmente dissolvido, seguido pela blenda F20-80, F80-20 e F40-60, sem diferença estatística entre si. As amostras F60-40 e F100-0, aparecem em sequência, também não se diferenciando estatisticamente. Nota-se, portanto, que novamente a adição da pectina não resulta em um efeito linear.

A amostra F20-80, conforme supracitado, obteve a segunda maior solubilidade. Esse resultado acontece devido à maior porção da formulação ser pectina, um polissacarídeo naturalmente hidrofílico. Ademais, a literatura relata que complexos formados por polissacarídeo e proteína tendem a ser mais solúveis quando um dos polímeros está em maior quantidade, em razão da ausência de neutralização completa das cargas na molécula (Silva, et al., 2018). No entanto, essa tendência não foi observada para a blenda F80-20, que apresenta valor intermediário de solubilidade, não se diferenciando estatisticamente dos filmes de menor solubilidade (F100-0 e F60-40), bem como da segunda maior solubilidade observada (F20-80).

Os resultados encontrados estão concordantes com o estudo de (Oliveira et al., 2018), que encontrou solubilidade entre 42 e 100% para filmes conjugados de gelatina e goma de caju, preparados em diferentes proporções e adicionados de 10% de plastificante (glicerol). Liu et al. (2020) em contrapartida, ao avaliar filmes constituídos por um polissacarídeo solúvel extraído da soja e gelatina (5% p/v; plastificante a 40% p/v), observa solubilidades entre 34 e 55 %, menores em comparação a este trabalho, com exceção da blenda contendo 80% do polissacarídeo.

Uma das principais funções das embalagens alimentícias ou revestimentos é a barreira entre o alimento e o ambiente externo, assegurando a baixa transferência de água e oxigênio (Giancone et al., 2011). Em relação à permeabilidade ao vapor de água, os menores resultados são observados para os filmes F0-100 e F80-20, enquanto a maior permeabilidade é verificada para a amostra F40-60.

Esse parâmetro depende principalmente das condições ambientais, bem como dos processos de difusão e dissolução através da matriz polimérica do filme (Cheng et al., 2022). Além disso, fatores como a hidrofobicidade, espessura, integridade da estrutura do polímero e interação com os grupos poliméricos, também influenciam diretamente esse comportamento (Alves et al., 2024).

Observa-se que os resultados estão coerentes com os já apresentados de umidade e espessura. A blenda F40-60 apresenta característica mais hidrofílica em comparação com as outras amostras, além de apresentar maior espessura entre os avaliados. Assim, conclui-se que a maior espessura da blenda F40-60 pode ter favorecido a difusão da umidade ao longo da matriz polimérica, resultando em valores elevados de permeabilidade ao vapor de água (PVA).

Contudo, tal relação não se aplica às outras blendas. Não se verifica uma tendência clara associada a adição da pectina na formulação. Embora todas as amostras apresentem uma umidade e espessura estatisticamente semelhante, a blenda F80-20 demonstra PVA mais baixo quando comparado com as demais blendas.

Os resultados demonstram valores de PVA inferiores, aproximadamente uma ordem de grandeza, em comparação com os reportados por Silva et al. (2018) para filmes blendas de proteína de soro de leite e pectina. Por outro lado, Samani et al., (2024), que desenvolverem filmes a base de pectina e proteína do feijão, reportaram valores de PVA variando entre 1,3 e $3,4 \times 10^{-10}$ g/m.s.Pa. De forma semelhante, em Dhaigude, Saini e Sheikh (2024), filmes conjugados de PISG com amido de batata apresentaram uma redução do valor de PVA à medida que a concentração de PISG foi diminuída. Destaca-se que a determinação da PVA é uma técnica sensível a fatores como metodologia, condições ambientais e características estruturais de cada filme, o que dificulta comparações entre diferentes estudos (Cazón et al., 2022).

A taxa de transmissão de vapor água (TTVA) apresenta a mesma relevância da permeabilidade de água, entretanto, é baseada na quantidade de vapor de água que consegue ser transferida em uma determinada área por uma unidade de tempo (Dai et al., 2023). Os resultados obtidos neste estudo, que não desconsideram variáveis como espessura dos filmes e a pressão de vapor da água, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as amostras analisadas.

Na literatura, são reportados valores mais altos da TTVA para filmes de pectina produzidos com concentrações superiores do polímero (4% m/v) e menores proporções de glicerol (30% m relação à massa de pectina) (Ghanta e Saini, 2025). De acordo com Ebrahimi et al. (2016), a incorporação de proteína em filmes blendas com goma resultou na redução dos valores de taxa de transmissão de vapor de água (TTVA) e de permeabilidade ao vapor de água (PVA), indicando uma correlação inversa entre o teor de proteína e a difusão de umidade. No entanto, tal

comportamento não foi observado no presente estudo, sugerindo que outros fatores estruturais e composicionais podem estar influenciando as propriedades de barreira dos filmes analisados.

Em relação à permeabilidade ao oxigênio, os filmes controle apresentam diferença estatisticamente significativa, sendo o filme à base de PISG o que demonstrou maior permeabilidade ao gás, enquanto o filme de pectina exibiu a menor. As blendas apresentaram valores variando entre 4,22 e 3,79 ($\times 10^{-9}$ g/s.mm²), com destaque para a amostra F80-20, que apresentou o menor valor dentre todas as amostras analisadas, e a F60-40, que apresentou o maior.

De modo semelhante às demais análises físico-químicas, esta propriedade não revela uma mudança proporcional com a adição de pectina. No geral, os filmes F100-0 e F60-40, não apresentaram diferenças estatísticas entre si, sendo os que apresentaram os maiores valores de permeabilidade. Os filmes de pectina e F80-20, por outro lado, apresentaram os menores valores sem diferença estatística entre eles. As blendas F40-60 e F20-80 apresentaram valores intermediários, estatisticamente semelhantes a todas as demais amostras analisadas.

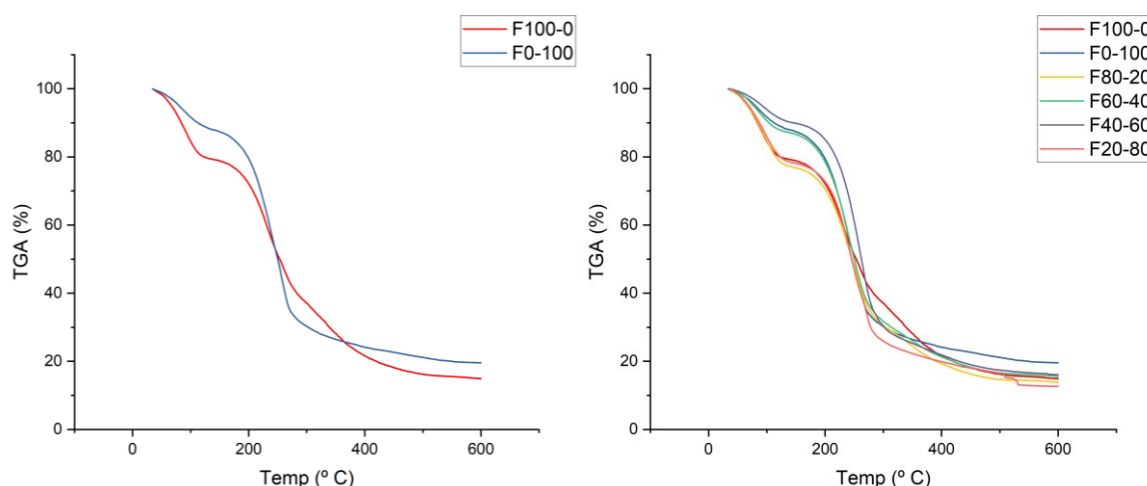
No estudo de Guo et al. (2024) em um filme conjugado de pectina e proteína isolada da soja, na uma proporção de 1:3 (polissacarídeo:proteína) e com 2% de glicerol, foi observado um valor de PVO superior ao encontrado no presente trabalho. Entretanto, foi similarmente demonstrado que a adição da pectina resultou na diminuição da permeabilidade ao oxigênio, fenômeno também evidenciado na blenda F80-20, em comparação com o filme controle de proteína. Esse comportamento é atribuído à formação de uma estrutura densa, oriunda das interações entre pectina e proteína dificultando a difusão do oxigênio e da água.

Verifica-se que, nas análises de permeabilidade de água e oxigênio, que a blenda 80-20 apresenta os menores valores de transmissibilidade entre todas as blendas. Quando comparada aos controles, se destaca por apresentar valores inferiores aos do filme a base de proteína de girassol, e estatisticamente equivalentes aos do filme de pectina. Pressupõe-se que a blenda F80-20 tenha formado uma rede polimérica coesa, atuando com maior eficiência que as demais formulações nas propriedades de barreira para a água e oxigênio.

5.1.5 Análise termogravimétrica dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

Os resultados para propriedade térmica dos filmes estão descritos na Tabela 4, Figura 8 (curvas de perda de massa) e Figura 9 (curvas da primeira derivada dessa análise). Esta análise tem o intuito de estimar a perda de massa da amostra em diferentes faixas de temperaturas, a fim de determinar um comportamento do material em contato com o calor, bem como sua estabilidade. Essa avaliação é interessante para embalagens alimentícias, pois permite compreender a tolerância do polímero frente a temperaturas (Salimi et al., 2025; Sood e Saini, 2022).

Figura 8 - Curvas TGA dos filmes controle e blendas: F100-0 (vermelho); F0-100 (azul petróleo); F80-20 (amarelo); F60-40 (verde); F40-60 (azul céu médio); F20-80 (rosa claro)



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que todas as amostras analisadas apresentam um perfil de decomposição térmica em três estágios distintos. O primeiro estágio ocorre na faixa de temperatura entre 35 °C e 155 °C. Os filmes controle, F100-0 e F0-100, demonstram intervalos de degradação térmica semelhantes. No entanto, as blendas, embora iniciem a degradação em temperaturas comparáveis às dos filmes controle, apresentam uma elevação na temperatura final deste estágio. Tal comportamento sugere uma tendência de aumento na estabilidade térmica com a incorporação de pectina. Esse estágio corresponde à perda da água (Ke et al., 2025), e os valores de perda de massa estão coerentes com os dados antes citados de umidade para F100-0, F80-20 e F20-80. Contudo, essa correlação não se verifica para as demais formulações.

No segundo estágio de degradação, as faixas térmicas dos filmes controles exibem uma diferença na temperatura final, com variação de aproximadamente 50 °C. Para as blendas, a faixa de degradação situa-se entre 140 e 461 °C, sem evidência de propensão associada à adição da pectina. A literatura indica que nesse estágio ocorre a quebra dos anéis de sacarídeos, a desintegração de cadeias de moléculas, a quebra de ligações de hidrogênio e das ligações covalentes entre os aminoácidos (Singh et al., 2025), além da decomposição do glicerol (Samani et al., 2024). Esse é o estágio com maior perda de massa, variando entre 58 a 70% da amostra.

O último estágio de degradação acontece acima de 399 °C, sendo relacionado à decomposição da matriz do filme (Samani et al., 2024) e à degradação das macromoléculas de proteínas e de polissacarídeos (Guo et al., 2024; Ke et al., 2025), em temperaturas mais elevadas. A massa remanescente, chamada de resíduo apresenta valores entre 13,28% e 19,95%, sendo F0-100 com maior percentual e F20-80 o menor.

Tabela 4 - Dados das curvas da análise de termogravimetria e da primeira derivada dos filmes controle e blendas

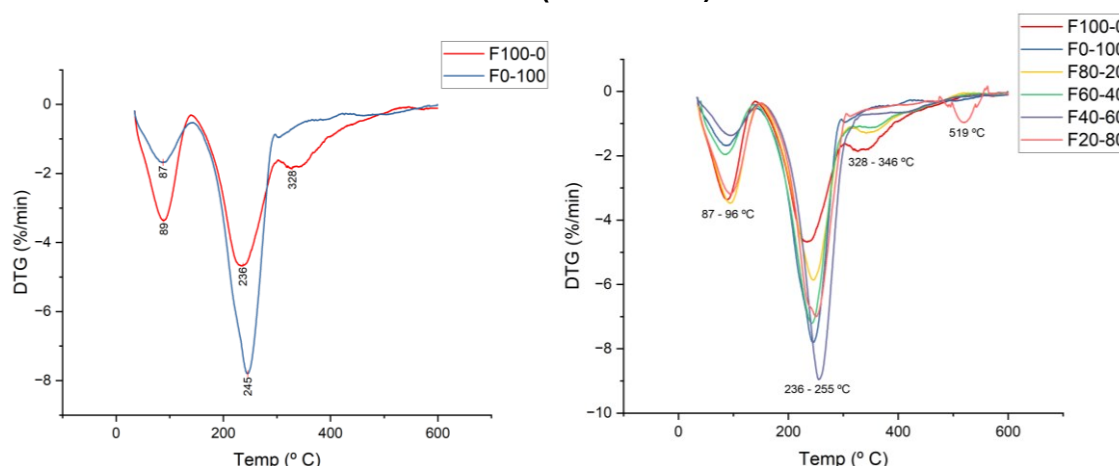
Amostras	Estágio	Faixa de degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de massa (%)
F100-0	1º	35,48 - 131,71	89	20,33
	2º	137,42 - 473,70	236	62,23
	3º	481,53 - 598,98	328	1,99
	Resíduo	-	-	15,45
F80-20	1º	38,63 - 135,92	95	22,15
	2º	141,88 - 454,48	246	60,97
	3º	456,59 - 599,22	346	2,16
	Resíduo	-	-	14,72
F60-40	1º	43,34 - 137,42	84	12,43
	2º	140,56 - 461,12	242	69,29
	3º	463,73 - 599,69	-	2,17
	Resíduo	-	-	16,11
F40-60	1º	36,58 - 155,35	96	10,2
	2º	157,56 - 443,47	255	70,2
	3º	445,11 - 599,05	-	3,26
	Resíduo	-	-	16,34
F20-80	1º	39,82 - 144,52	95	21,41
	2º	149,00 - 396,84	250	58,02
	3º	399,05 - 599,84	519	7,292

F0-100	Resíduo	-	-	13,28
	1º	35,58 - 133,87	87	11,66
	2º	139,12 - 421,08	245	64,46
	3º	424,35 - 599,15	-	3,93
	Resíduo	-	-	19,95

Fonte: Elaborado pela autora.

Os picos de degradação da primeira derivada da análise termogravimétrica fornecem informações adicionais sobre a estabilidade dos filmes, indicando a taxa máxima de perda de massa. De modo geral, os resultados mostram que os filmes, controle à base de proteína, bem como as blendas F80-20 e F20-80, apresentam três picos de degradação, enquanto os demais exibem apenas dois picos.

Figura 9 - Curvas DTG dos filmes controle e blendas: F100-0 (vermelho); F0-100 (azul petróleo); F80-20 (amarelo); F60-40 (verde); F40-60 (azul céu médio); F20-80 (rosa claro)



Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras controle apresentaram similaridades nos picos de degradação, observadas a 87 °C (F0-100) e 89 °C (F100-0), sendo que a amostra F100-0 exibiu um pico máximo de perda de massa mais acentuado. Os picos máximos de degradação ocorreram a 236 °C para F100-0 e a 245 °C para F0-100, sendo este último o que apresentou a maior intensidade de degradação. Um terceiro pico, na faixa de 328 a 346 °C, é exibido na amostra controle F100-0, estando ausente em F0-100, mas presente nas blendas F80-20 e F60-40, que foram formuladas com maior proporção de proteína isolada de semente de girassol.

Em relação às blendas, o primeiro pico de degradação é apresentado na faixa de 84 a 96 °C, sendo que as amostras F80-20, F40-60 e F20-80 apresentaram valores máximos superiores aos filmes controles. O segundo pico é verificado na faixa de 242 e 255 °C, com destaque para as blendas F40-60 e F20-80, que atingem as temperaturas mais elevadas, de 250 e 255 °C, respectivamente. Adicionalmente, blenda F20-80 também apresenta um terceiro pico; entretanto, em contraste com as blendas que exibem um terceiro pico de degradação, este é situado a 519 °C.

Verifica-se que, para pico associado à maior taxa de degradação, as formulações em que a quantidade de pectina é superior à de proteína (F40-60 e F20-80) resultam em maior estabilidade térmica.

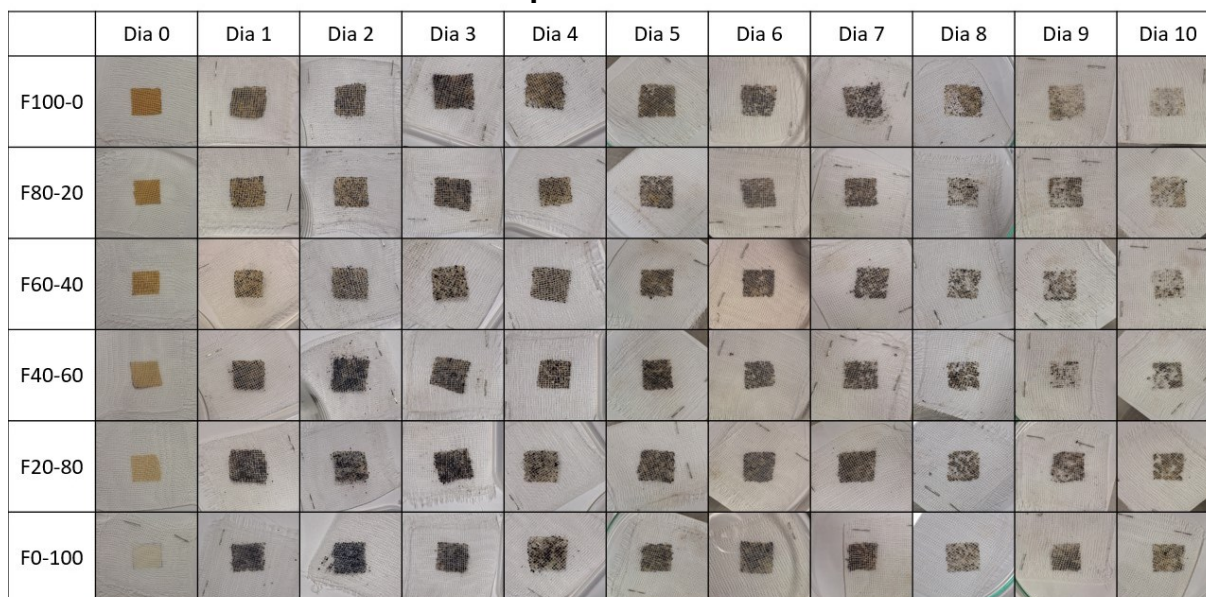
5.1.6 Biodegradabilidade dos filmes controle e blendas a base de pectina comercial

A crescente preocupação com os microplásticos, que persistem no ambiente por longos períodos, promovendo poluição e riscos à saúde humana, impulsiona o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis. Considera-se biodegradável o material que consegue se decompor ao longo do tempo; o contrário, aquele não biodegradável a degradação pode levar centenas de anos. Esse processo de degradação ocorre pela ação combinada da difusão de água, atividade de microrganismos, como bactéria e fungos, e pela formação de produtos resultantes da degradação (Dirpan, Ainani e Djalal, 2023; Kola e Carvalho, 2023).

A Figura 10 mostra o comportamento quanto da degradação das amostras em solo ao longo dos 10 primeiros dias de análise. A partir do quinto dia de ensaio, os filmes com maior proporção de proteína e o filme controle F100-0, apresentam sinais de degradação. Em contraste, a blenda F40-60 inicia a degradação no sexto dia; a amostra F20-80, no oitavo dia; enquanto o filme controle F0-100, não exibe sinais de degradação ao final dos 10 dias.

Todas as amostras são consideradas degradadas ao término do 10º dia, com excetuando-se as amostras controle pectina e F20-80. Infere-se que filmes contendo proteína em proporções variando de 100% a 40% apresentam completa degradação em até 10 dias, sob condições controladas de umidade no solo.

Figura 10 - Fotografias da degradação em solo dos filmes controle e blendas por 10 dias

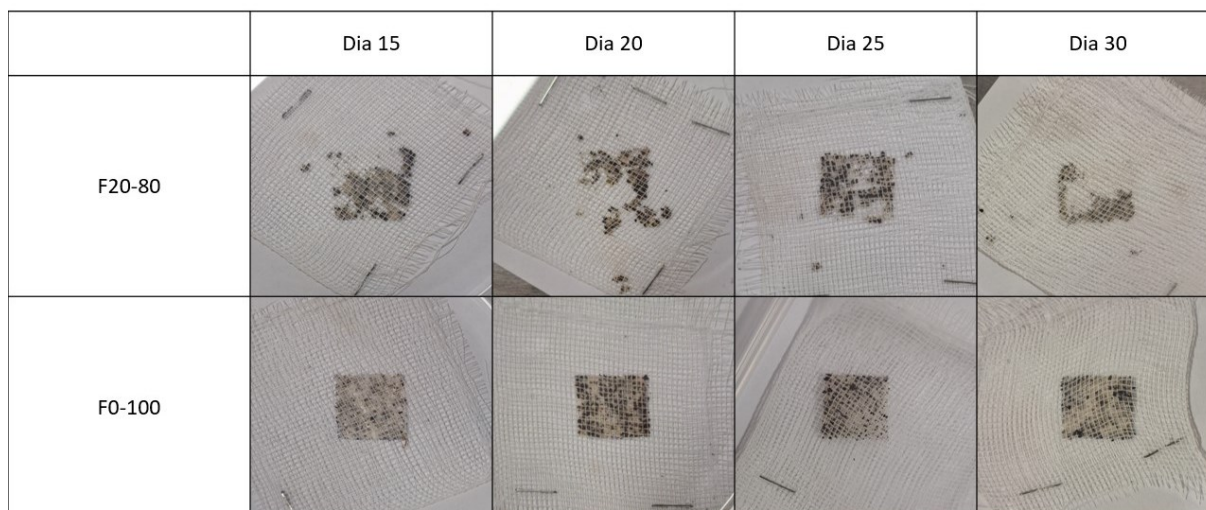


Fonte: Elaborado pela autora.

O tempo de degradação observado é compatível com os ensaios reportados por Alves et al. (2024), em que filmes de proteína isolada da semente do girassol puro e em conjunto com a galactomanana (em diferentes proporções), foram degradados em 8 dias. Semelhantemente, em Boeira et al. (2022) relataram a completa degradação, em 9 dia, de filmes blenda de gelatina e amido de milho (5 e 2% m/v, respectivamente).

A avaliação quanto a biodegradabilidade do filme puro de pectina e F20-80, continuou até o 30º dia, representado na Figura 11. Constata-se que, em 30 dias, o filme puro de pectina não apresenta sinais de biodegradabilidade. No entanto, a blenda F20-80, demonstra evoluções na degradação, e ao final desse período, menos da metade da estrutura inicial do filme é observada em uma análise visual.

Figura 11 - Fotografias da degradação em solo dos filmes controle pectina e F20-80 entre o 15º e 30º dia



Fonte: Elaborado pela autora.

Essa falta de sinais quanto a biodegradabilidade é um indicativo da formação de uma rede polimérica coesa e estruturalmente estável da matriz filmogênica (Bishnoi et al., 2023). Em Bishnoi et al. (2023) filmes elaborados com amido de tapioca em conjunto com proteína do soro de leite, apresentaram tempo de degradação de aproximadamente 45 dias. Em Norcino et al. (2020) o filme de pectina puro (6% m/v) requereu 28 dias para a degradação, resultado que não se verificou no presente estudo.

Embora se reconheça limitações quanto à reprodutibilidade dos ensaios de biodegradabilidade (Kola e Carvalho, 2023), os resultados indicam que as blendas produzidas possuem biodegradabilidade de até 1 mês. Esse reduzido tempo de degradação evidencia o potencial ambientalmente favorável desses materiais, uma vez que seus resíduos podem ser depositados nos solos, como em quintais contribuindo para a redução de despesas com processamento de resíduos (Boeira et al., 2022).

5.2 Análise por FTIR dos pós de pectina comercial e extraída da farinha do mesocarpo do pequi e determinação do grau de esterificação

A extração da pectina a partir da farinha do mesocarpo do pequi obteve um rendimento de $15,1 \pm 3,2\%$, valor próximo ao encontrado na literatura para extração por micro-ondas por Leão et al. (2018), de cerca de 16%, usando os mesmos parâmetros e material. Por outro lado, o rendimento é inferior ao relatado para

extração ácida convencional, realizada apenas pela acidificação do material com temperatura elevada, sem o auxílio do micro-ondas, com valores variando de 10,3-26,6% e 14,89-55,86%, em Siqueira et al. (2022) e Siqueira et al. (2012), nessa ordem, ambos usando a farinha do mesocarpo do pequi, mas sob diferentes condições de concentração de ácido, temperatura e tempo de extração. Esses resultados de rendimento podem significar uma pureza da extração, evidenciados pela similaridade dos espectros de FTIR posteriormente demonstrados no trabalho.

Destaca-se novamente sobre a relevância da metodologia empregada, tendo em vista que a irradiação por micro-ondas é uma tecnologia que permite a extração com um baixo gasto de energia e de reagente, redução do tempo de processamento e maior segurança operacional (Benassi, Alessandri e Vassalini, 2021; Leão et al., 2018). Além disso, o uso do ácido cítrico, um ácido orgânico considerado um solvente “verde”, contribui para a caracterização da metodologia como ambientalmente favorável (eco-friendly). Segundo Gómez Vargas et al. (2024), tal abordagem envolve a obtenção de um bom rendimento, com produto final de qualidade, em pouco tempo e mediante a utilização de solventes não poluentes.

Em outros trabalhos envolvendo a extração ácida da pectina a partir de outros materiais vegetais, também via micro-ondas, são observados rendimentos próximos. Em Spatafora Salazar et al. (2019) em que se extraiu pectina de cascas de laranja e de manga, obtiveram-se rendimentos de $17,28 \pm 0,39\%$ e $10,20 \pm 0,55\%$, respectivamente, enquanto Kute et al. (2020) relataram rendimentos de 15,79% para cascas de laranja. Os resultados foram superiores aos encontrados para casca de figo (9,26%) (Gharibzahedi, Smith e Guo, 2019), porém inferiores aos obtidos para bagaço de maçã (38,91%) (Dranca et al., 2021) e casca de mamão (25,14%) (Maran e Prakash, 2015).

Os rendimentos citados servem de referência para contextualizar o rendimento do presente trabalho, demonstrando que este é comparável aos valores reportados na literatura e, portanto, satisfatório. Ressalta-se, contudo, que além do tipo de material utilizado como fonte do polímero, existem outros fatores como pH, tempo, temperatura, granulometria do material e a razão sólido-líquido, que influenciam no rendimento da extração da pectina (Laet et al., 2024).

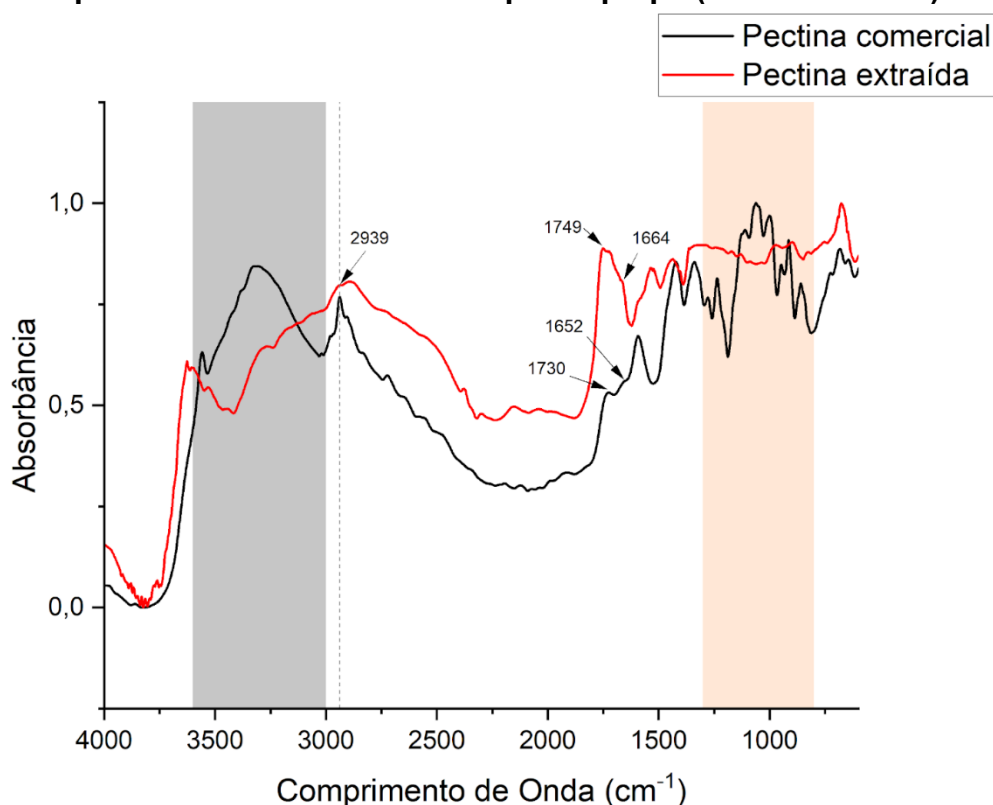
Com objetivo de compreender as diferenças estruturais entre a pectina comercial e a extraída do mesocarpo da casca do pequi, realizou-se a análise de FTIR, conforme apresentada na Figura 12. Essa análise também tem como propósito quantificar o

grau de esterificação das pectinas, que como descrita anteriormente está relacionada com a classificação e propriedades físico-químicas da molécula.

Observa-se que as amostras de pectina apresentaram semelhanças entre os espectros, embora apresentem discretas variações na largura, intensidade e posição dos picos de absorção. Na região espectral entre $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, considerada região de vibração das ligações de hidrogênio, verifica-se que banda para pectina comercial apresenta maior intensidade de absorção em comparação com a da pectina extraída do mesocarpo do pequi.

Em 2939 cm^{-1} , destacado na Figura por uma linha tracejada, observa-se um pico de absorção para as duas amostras, atribuído na literatura às vibrações de estiramento da ligação C-H, relacionadas aos grupamentos -CH, -CH₂ e -CH₃ (Liang et al., 2022; Santos et al., 2020; Turan et al., 2024).

Figura 12 - Espectro FTIR das amostras de pectina comercial (linha preta) e pectina extraída de mesocarpo do pequi (linha vermelha).



Fonte: Elaborado pela autora.

Adicionalmente, são observados picos próximos de 1740 e 1650 cm^{-1} , referentes às vibrações associadas aos grupos carboxílicos esterificados e livres,

respectivamente, em ambas amostras de pectina (Cui et al., 2023; Leão et al., 2018). A região destacada em vermelho, entre 1300-800 cm^{-1} , é reconhecida como região de fingerprint de polissacarídeos (Jarrín-Chacón et al., 2023; Liang et al., 2022; Santos et al., 2020; Turan et al., 2024). Nessa faixa espectral, são identificados picos mais proeminentes na pectina comercial, enquanto que, para pectina extraída é constatada a sobreposição de sinais.

Ressalta-se ainda a presença de um pico em 1537 cm^{-1} exclusivo da pectina extraída, ausente na amostra comercial. Em Said et al., (2023), relacionaram essa absorção à presença de ligações relacionadas à amida II, conforme observado na análise de FTIR de filmes a base de pectina extraída de cascas de 3 frutos cítricos.

De maneira geral, pode-se perceber que a pectina extraída da farinha do mesocarpo do pequi apresenta espectro altamente comparável ao da pectina comercial cítrica utilizada neste trabalho, com pequenas diferenças atribuídas, possivelmente, à origem botânica e às condições do processo de extração.

Para a determinação do grau de esterificação (GE), foi realizada a segunda derivada da região de interesse (1800-1500 cm^{-1}). Essa transformação matemática permite uma melhor resolução das bandas, eliminando os picos largos e maior eficiência na detecção das pequenas características espectrais (Leão et al., 2018). Dessa forma, minimiza-se o risco de interpretações equivocadas decorrentes da sobreposição de grupamentos funcionais que absorvem na mesma região e por consequência aumentam os valores de absorbância.

Os resultados para o grau de esterificação são apresentados na Tabela 5. O cálculo baseou-se na análise dos picos detectados na segunda derivada dos espectros. Para a pectina comercial, considerou-se o pico em 1747 cm^{-1} como correspondente do grupamento carboxílico esterificado e o pico em 1608 cm^{-1} como representativo do grupamento carboxílico livre. Por outro lado, para a amostra do polímero extraído, utilizaram-se os picos em 1751 cm^{-1} e 1608 cm^{-1} referentes aos grupos carboxílico esterificado e livre, respectivamente, respaldados por Leão et al. (2018) e Wandee; Uttapap; Mischnick (2019).

No espectro da pectina extraída, identificam-se picos adicionais em 1632 cm^{-1} e 1649 cm^{-1} , os quais Leão et al. (2018) também identificou pela derivação do espectro da pectina também extraída de farinha do mesocarpo do pequi, sendo atribuídos à absorção de água e grupamento amida do tipo I, respectivamente. Esse fato, aliado com as diferenças observadas nos espectros, sugere que a extração resultou na

coextração de outros constituintes presentes da farinha do mesocarpo do pequi, evidenciando a falta de uma etapa subsequente de purificação.

Tabela 5 - Valores de grau de esterificação das amostras de pectina comercial e extraída do mesocarpo do pequi.

Amostra	Grau de esterificação (%)
Pectina comercial	69,9
Pectina extraída do pequi	63,4

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 5, é mostrado que ambas as amostras podem ser classificadas como pectinas de alto grau de esterificação ($GE > 50\%$). Essa categoria de pectina é comumente utilizada na indústria alimentícia, principalmente devido sua capacidade de formação de gel em variadas formulações de geleias e compotas, como também usada como estabilizante e emulsionante (Gavahian et al., 2021). A estabilidade conferida pelas pectinas de alto GE é atribuída à formação de ligações de hidrogênio intermoleculares, bem como interações hidrofóbicas entre ésteres metílicos presentes na estrutura polimérica (Chandel et al., 2022). Essa constatação é relevante pois indica o potencial da utilização da pectina extraída do mesocarpo do pequi para substituir a pectina comercial cítrica, podendo assim ampliar o aproveitamento de resíduos agroindustriais regionais.

O resultado para a pectina extraída está de acordo com os encontrados por Leão et al. (2018), que também reportaram valores de GE superiores a 50% para a pectina extraída do mesocarpo do pequi utilizando tecnologia assistida por micro-ondas. Outros estudos de extração ácida da pectina via micro-ondas oriundos de resíduos vegetais também resultaram em pectinas de alto grau de esterificação, como para cascas de pomelo (Wandee, Uttapap e Mischnick, 2019), laranja (Turan et al., 2024) e manga (Spatafora Salazar et al., 2019).

5.3 Caracterização dos filmes base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

Considerando os resultados obtidos anteriormente, a blenda F80-20 foi selecionada para a substituição da pectina comercial cítrica pela pectina extraída do mesocarpo do pequi. Essa escolha baseou-se, principalmente, no desempenho

superior da amostra nas propriedades de barreira, enquanto suas propriedades mecânicas apresentaram resultados satisfatórios, embora não superiores aos observados em outras blendas.

5.3.1 Propriedades cromáticas de filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

A Figura 13 demonstra efeitos na aparência dos filmes na substituição da a pectina comercial pela pectina extraída do mesocarpo do pequi. As fotografias foram obtidas em mini estúdio em controle rigoroso de iluminação, a fim de destacar as diferenças visuais entre os polímeros.

Considerando uma avaliação visual, percebe-se que o filme produzido com a pectina extraída apresenta coloração mais escura, possivelmente devido a coextração de outros componentes, conforme sugerido pela análise de FTIR.

Figura 13 - Fotografias dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol.



Fonte: Elaborado pela autora.

A aplicação do polímero extraído no filme blenda resultou visualmente em um filme com indícios de dispersão heterogênea, revelados por manchas de coloração mais escuras distribuídas pela extensão do filme. Além disso, o símbolo posicionado atrás das amostras permanece visível em todas as imagens fotografadas, indicando

uma certa translucidez, mesmo diante dos resultados observados na análise de opacidade. Para uma avaliação mais precisa, a análise colorimétrica por colorímetro foi empregada (Tabela 6).

Como evidenciados pela fotografia, o filme Pec-pequi com o polímero extraído apresenta um valor de L^* significativamente inferior ao observado para o filme F0-100. Entretanto, o comportamento contrário acontece ao comparar os filmes blendas, F80-20p com valor luminosidade maior que F80-20. Ainda se destaca que não houve diferença estatística para este parâmetro entre os filmes produzidos com a pectina proveniente do pequi, F80-20p e Pec-pequi.

Tabela 6 - Propriedades ópticas de filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

Amostras	Cor			Croma	Hue Angle (°)	Opacidade (Abs $\times$ mm ⁻¹)
	L^*	a^*	b^*			
F0-100	24,41 $\pm$ 0,37 ^a	0,19 $\pm$ 0,10 ^c	-0,36 $\pm$ 0,23 ^d	0,42 $\pm$ 0,21 ^c	301,20 $\pm$ 21,30 ^a	1,82 $\pm$ 0,02 ^c
Pec-pequi	22,98 $\pm$ 0,40 ^b	0,50 $\pm$ 0,11 ^b	1,09 $\pm$ 0,06 ^b	1,20 $\pm$ 0,05 ^b	65,45 $\pm$ 5,26 ^b	6,63 $\pm$ 0,38 ^a
F80-20	19,41 $\pm$ 0,08 ^c	0,14 $\pm$ 0,08 ^c	0,45 $\pm$ 0,10 ^c	0,48 $\pm$ 0,10 ^c	72,33 $\pm$ 10,24 ^b	2,80 $\pm$ 0,07 ^b
F80-20p	23,08 $\pm$ 0,31 ^b	2,37 $\pm$ 0,11 ^a	4,19 $\pm$ 0,19 ^a	4,81 $\pm$ 0,21 ^a	60,50 $\pm$ 0,73 ^b	6,62 $\pm$ 0,34 ^a

Médias com as mesmas letras na mesma coluna não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0.05$).

Quanto aos resultados de croma, o filme F80-20p apresentou maior saturação, seguido de Pec-pequi, F80-20 e F0-100, sendo que estes dois últimos não diferiram estatisticamente entre si.

No que tange à tonalidade, somente o filme F0-100 se diferencia estatisticamente, posicionando-se próxima à tonalidade roxa, enquanto Pec-pequi, F80-20 e F80-20p apresentam coloração marrom. De modo geral, foi evidenciado que a substituição pela pectina extraída do pequi afeta os parâmetros de cor e intensidade

no filme conjugado com a proteína, entretanto a tonalidade, que descreve a cor percebida, não sofre impacto. Essa tendência não foi observada para os filmes puros de pectina.

Said et al. (2023), ao comparar filmes de pectina extraída a partir dos frutos setoka (ST), kanpei (KP) e shiranui (SH) com um filme de pectina comercial, também verificaram uma menor luminosidade, para os filmes a partir da pectina de ST e KP, em comparação com o filme de pectina comercial cítrica. Ressalta-se que os valores do filme produzido com pectina comercial no presente estudo diferem dos encontrados por Said et al. (2023) apresentando valor de L^* superior. Também diferente do atual trabalho, em Zhang et al. (2024) observaram que, nos filmes a base de pectina extraída da casca da pitaya, os valores para luminosidade foram superiores aos da pectina comercial cítrica.

5.3.2 Espessura e propriedades mecânicas dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

Os resultados de espessura (Tabela 7) revelam que a substituição da pectina não leva a diferenças significativas entre as amostras. Siqueira et al. (2022), prepararam filmes puros de pectina e reportaram igualdade estatística entre amostras produzidas a partir de pectina comercial e de pectina extraída do mesocarpo do pequi. Essa evidência é corroborada por estudos prévios (Çavdaroğlu et al., 2023; Khalil, Sharaby e Abdelrahim, 2023; Said et al., 2023), os quais identificaram comportamentos análogos em filmes poliméricos formulados com pectina extraída de diferentes fontes frutíferas, quando comparados àqueles elaborados com pectina cítrica de grau comercial.

Tabela 7 - Espessura e propriedades mecânicas dos filmes formulados com pectina extraída (pura) e blendas híbridas com proteína isolada da semente de girassol (PISG), utilizando pectina comercial ou extraída.

Amostra	Espessura (mm)	Resistência a tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo Elástico (MPa)
Pec-pequi	$0,10 \pm 0,02^a$	$6,34 \pm 0,51^a$	$123,49 \pm 2,36^b$	$46,90 \pm 19,00^a$
F80-20	$0,10 \pm 0,01^a$	$2,09 \pm 0,08^b$	$142,42 \pm 4,99^a$	$15,39 \pm 5,01^b$
F80-20p	$0,12 \pm 0,02^a$	$1,49 \pm 0,12^c$	$128,15 \pm 3,69^b$	$9,26 \pm 0,46^b$

Fonte: Elaborado pela autora. Médias com as mesmas letras na mesma coluna não apresentam diferenças estatísticas ($p > 0,05$).

Nos resultados referentes a resistência a tração, foram observadas diferenças significativas entre todas as amostras, com o menor valor observado para a blenda utilizando pectina de pequi. No alongamento a ruptura, observa-se que não há diferenças entre os filmes à base de pectina extraída de pequi, porém a blenda utilizando pectina cítrica apresenta maior valor de alongamento. Para módulo elástico, a F0-100 exibe um resultado de $296,50 \pm 51,70$ MPa, expressivamente superior aos observados para os demais filmes. Os filmes resultantes de blendas proteína/pectina não apresentam diferença estatística entre si nessa propriedade, diferenciando-se somente do filme de pectina pura.

Çavdaroglu et al. (2023) compararam filmes à base de pectina extraída de resíduos de figo e frutas de baixa qualidade, com o produzido com pectina comercial (3% m/v; 30% glicerol m/v) e observaram que o filme de pectina comercial apresentava valores de resistência a tração e módulo elástico, consideravelmente superiores aos encontrados para os filmes a partir do polímero extraído, com aproximadamente 3 e 6 vezes mais resistência à tração e 13 e 10 vezes maior em módulo elástico. Entretanto, para o filme produzido com a pectina extraída e posteriormente purificada, não foi observada essa diferença. No mesmo estudo, também foi observado que a pectina cítrica obteve menores resultados para alongamento na ruptura em comparação com os filmes de pectina extraída, inclusive quando purificada, cerca de 6 e 3 vezes menores para os filmes não purificados e 2 vezes menores para o purificado.

Siqueira et al. (2022), no filme a base de pectina extraída do pequi, observaram similaridades nas propriedades de resistência a tração e alongamento na ruptura, resultado que não se confirmou no presente trabalho. Além disso, para módulo elástico, os resultados obtidos no estudo mostram o oposto do observado no presente trabalho: o filme a base de pectina comercial apresentou valor médio menor que o descrito para a pectina do pequi.

De modo geral, os resultados obtidos para F80-20p foram inferiores ou semelhantes aos observados para F80-20. Assim, a substituição da pectina extraída, olhando apenas para essas propriedades de ensaio mecânico analisadas, limita-se aplicações que não exijam elevada resistência à ruptura ou grande elasticidade. Como exemplo, destaca-se o uso como revestimento protetor, formando uma camada fina

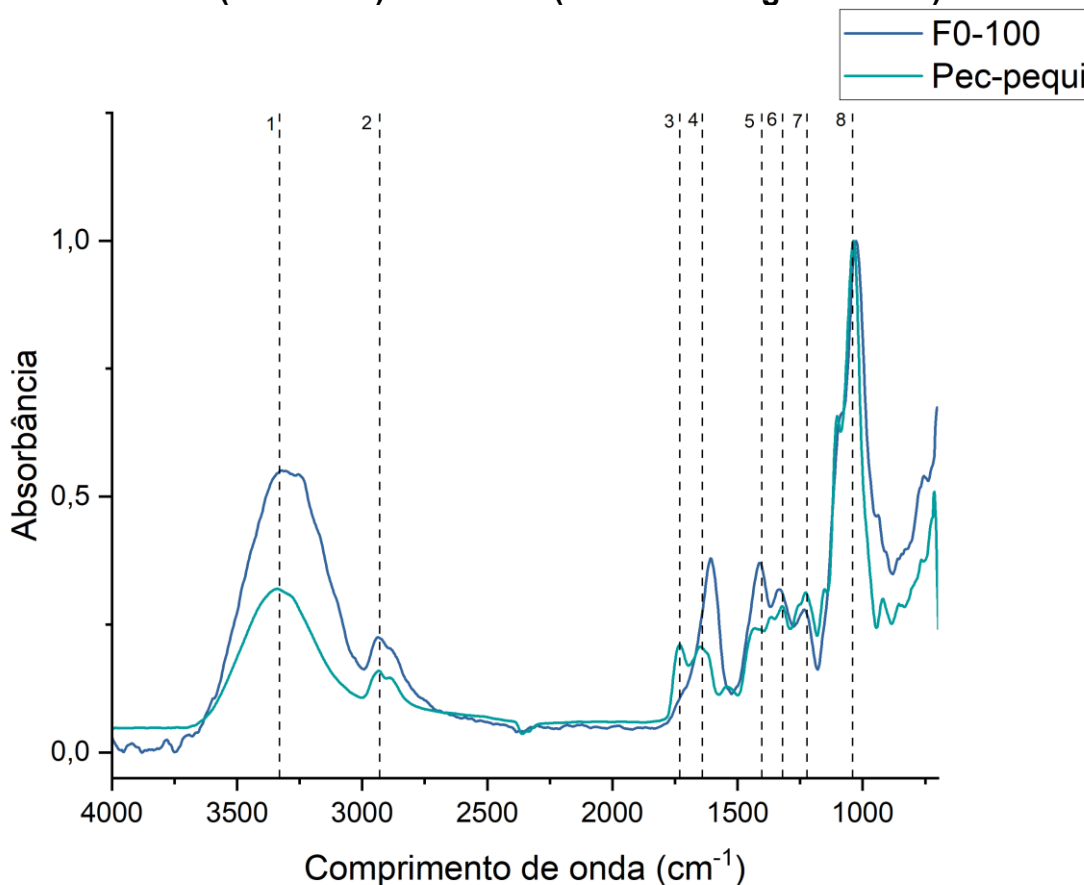
para proteção de frutas e hortaliças, em que as propriedades de barreira são mais determinantes.

5.3.3 Análise de espectroscopia no infravermelho médio por transformada de Fourier (FTIR) dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

Na Figura 14, são apresentados os espectros de FTIR dos filmes a base de pectina comercial e de pectina extraída do pequi. É possível verificar a semelhança entre os espectros com pequenas diferenças quanto à intensidade e deslocamentos sutis nos picos característicos das amostras.

O primeiro pico do espectro presente na região entre $3500 - 3000 \text{ cm}^{-1}$, está relacionado vibração de estiramento da ligação O-H, enquanto o segundo, em $\sim 2927 \text{ cm}^{-1}$ corresponde à vibração C-H. Ambos apresentam variações de intensidade entre as amostras, indicando que a amostra de filme à base da pectina extraída possui menor quantidade de grupos C-H e O-H livres, sendo esta diferença ainda mais pronunciada para o grupo hidroxila. Possivelmente, há maior presença de ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, como explicado por Khalil, Sharaby e Abdelrahim (2023).

Figura 14 - Espectro FTIR das amostras de filme puras a base de pectina comercial (linha azul) e extraída (linha verde-água escuro)



Fonte: Elaborado pela autora.

Em sequência observa-se que os picos correspondentes aos grupos carboxílicos esterificado (1720 cm^{-1}), e livres ($\sim 1640\text{ cm}^{-1}$) no filme à base de pectina cítrica comercial apresenta maior intensidade quando comparado com o espectro do filme produzido a partir do polímero extraído, além de estarem parcialmente sobrepostos. Ainda é identificado que o pico relacionado ao grupamento carboxílico livre ocorre em um comprimento de onda menor. Essa mudança na posição do pico máximo pode ser atribuída a diferentes interações intermoleculares acontecendo simultaneamente, a exemplo de ligações de hidrogênio e dipolo-dipolo (Ryu, Noda e Jung, 2011).

Os picos numerados como cinco e seis, em ~ 1403 e $\sim 1319\text{ cm}^{-1}$, respectivamente, também apresentam uma maior intensidade para F0-100. Entretanto, no pico sete (1222 cm^{-1}) o contrário acontece, com maior intensidade para o filme com a pectina extraída. Os picos em 1403 e 1319 cm^{-1} são descritos, respectivamente, como a ligação C-H da glicose e deformação das ligações de grupos

O-H no anel piranosídico da pectina (Liu et al., 2021; Tristante et al., 2024; Xie et al., 2023). Já o pico em 1222 cm^{-1} está associado às vibrações do grupo éster ou à presença de ácido galacturônico com ausência de ligação glicosídica (Liu et al., 2021; Tristante et al., 2024).

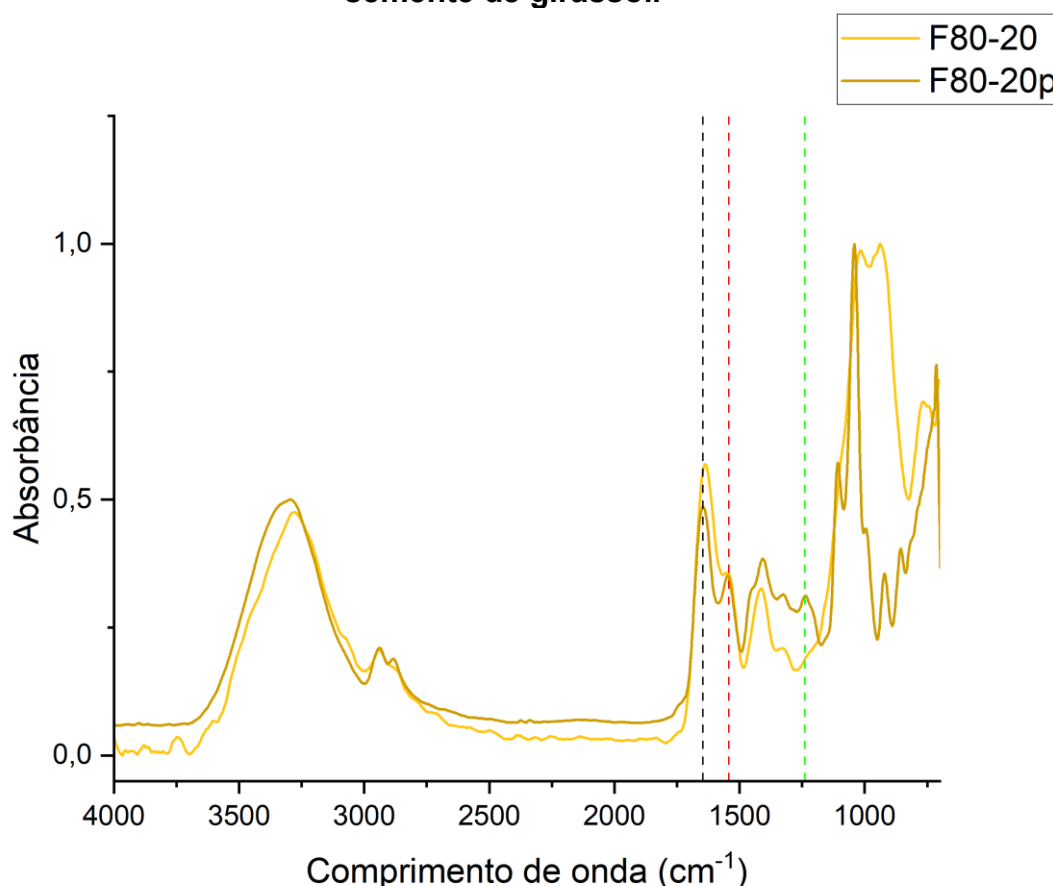
O pico numerado como oito, em $\sim 1040\text{ cm}^{-1}$, se destacou pela alta intensidade em ambas amostras de filmes. O sinal é referenciado por Zhang et al. (2024) como um dos indicativos da presença de açúcares como arabinose, galactose e xilose. Porém, também pode estar relacionado com a presença do glicerol que apresenta bandas de absorção na faixa entre $1200\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ (Dhaigude, Saini e Sheikh, 2024).

Na análise por FTIR dos filmes blenda contendo a pectina, comercial e extraída, em conjunto com a PISG (Figura 15) também se observam similaridades nos picos, com diferenças na intensidade, as quais podem ser justificadas pela interação dos grupamentos funcionais por meio de ligações inter e intramoleculares.

Além dos picos discutidos anteriormente, destacam-se os picos em 1646 cm^{-1} (tracejado preto) e 1220 cm^{-1} (tracejado verde), atribuídos, respectivamente, às bandas de amida I e amida III, que apresentam diferenças entre os filmes blendas. Por outro lado, o pico em 1542 cm^{-1} (tracejado vermelho), correspondente à amida II, apresenta comportamento similar entre as amostras.

No espectro de F80-20p, há uma sobreposição dos picos atribuídos aos grupos carboxílicos esterificados e livres, fenômeno não observado no filme a base do polímero extraído puro. Tal sobreposição ocorre em razão da presença de amida primária, em maior concentração devido a adição de PISG, que absorve na mesma faixa de comprimento de onda dos grupos carboxílicos livres, devido à vibração do estiramento C=O. Em consequência disso, há um aumento na intensidade do sinal e a sobreposição dos picos, impedindo a separação entre os grupamentos carboxílicos que foi possível observar no espectro do filme com a pectina extraída pura. Além disso, é possível que tenha ocorrido o deslocamento da banda, como inferido anteriormente.

Figura 15 - Espectro FTIR das amostras de filmes blendas de pectina comercial (linha amarelo-ouro) ou extraída (linha mostarda) e proteína isolada de semente de girassol.



Fonte: elaborado pela autora.

Na região próxima de 1000 cm^{-1} também se identificam picos de maior intensidade, relacionados às vibrações C-H associadas à presença de carboidratos (Santos-Silva, dos et al., 2024; Sartori et al., 2018) e ao glicerol, com distinção na intensidade como exposto anteriormente para os filmes F0-100 e Pec-pequi. Por fim, observa-se um pico largo entre 3500 e 3000 cm^{-1} , correspondente à ligação O-H, que apresenta grande semelhança entre as amostras.

5.3.4 Permeabilidade ao vapor de água (PVA), taxa de transmissão de vapor de água (TTVA), permeabilidade ao oxigênio (PVO), solubilidade em água (SA) e umidade dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

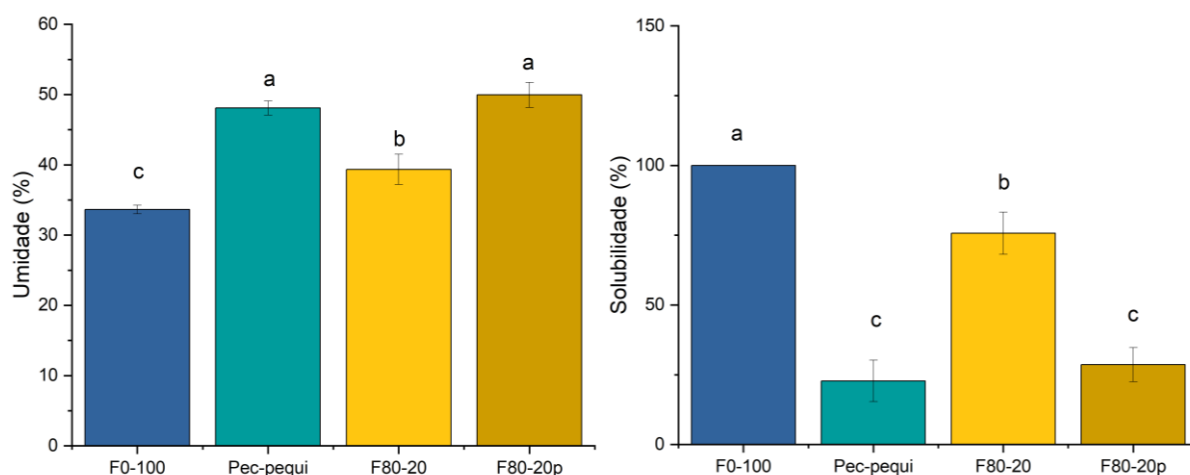
A substituição pela pectina extraída cítrica comercial pela pectina extraída do mesocarpo do pequi acarreta diferenças significativas para umidade e solubilidade

dos filmes (Figura 16). Os filmes F80-20p e Pec-pequi apresentam os maiores valores de umidade, sem diferença estatística entre eles, com uma diferença de quase 27% entre os filmes blendas e de cerca de 43% para os filmes puros. Esse resultado indica que os filmes aplicando a pectina extraída do pequi como alternativa a pectina cítrica comercial retêm mais moléculas de água.

Comportamento similar foi reportado por Said et al. (2023), em que duas amostras de filme à base de pectina extraídas de diferentes cascas de frutas (setoka e shiranui) apresentaram aumento de cerca de 20% no teor de umidade em relação à amostra elaborada com a pectina comercial cítrica. No referido estudo foi indicada a relação entre a quantidade de ácido galacturônico presente na molécula e a interação com as moléculas de água, bem como a influência do grau de metilação (GM) e acetilação (GA) na região “hairy” da estrutura da pectina, anteriormente explicada. Um baixo teor de GM e GA permitem uma maior disponibilidade de grupos carboxílicos livres, em consequência, aumenta a hidrofilicidade e assim tendem a elevar a absorção e retenção de água.

Embora tais avaliações não tenham sido conduzidas no presente estudo, entretanto, é relatado em literatura que diferentes fontes de pectina apresentam diferentes valores de GA (Çavdaroğlu et al., 2023). Ainda, de acordo com Cui et al. (2021), em processo de extração assistida por micro-ondas o ácido galacturônico é frequentemente o monossacarídeo majoritário, sendo uma possível explicação para a diferença observadas nos resultados deste trabalho.

Figura 16 - Resultados de umidade e solubilidade para os filmes a base de pectina à base de pectina comercial e extraída, puros e blendados com proteína isolada da semente de girassol



Fonte: elaborado pela autora.

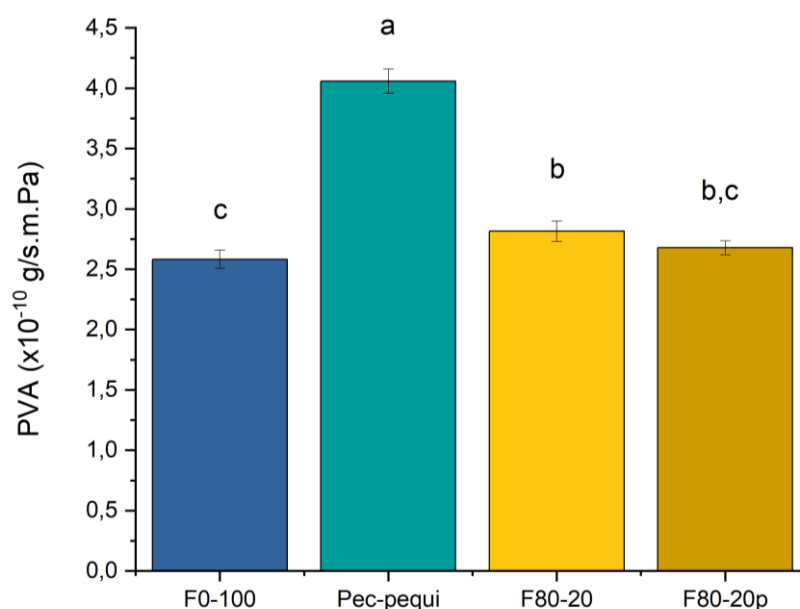
Sobre a solubilidade dos filmes, os resultados revelam uma diferença significativa entre as pectinas utilizadas puras e em blendas. Os filmes a base de pectina extraída do mesocarpo do pequi, tanto na forma pura quanto em blendas, apresentam os menores valores de solubilidade, enquanto o filme contendo pectina cítrica comercial exibe o maior valor para essa propriedade.

Em Said et al. (2023), foi reportado uma redução de aproximadamente 50% na solubilidade dos filmes produzidos com pectina extraída em comparação com aqueles elaborados com pectina cítrica comercial. Para Çavdaroğlu et al. (2023), duas amostras de filmes a partir de pectina extraída também se comportaram da mesma forma.

Adicionalmente, é relevante destacar que, no estudo de Çavdaroğlu et al. (2023), a amostra de pectina submetida a um processo de purificação apresentou similaridade estatística ($p < 0,05$) com a amostra de pectina comercial. Embora não seja possível afirmar com certeza, os dados apresentados pelo artigo sugerem uma relação entre as impurezas remanescentes do processo extração e a solubilidade dos filmes.

As propriedades de barreira são apresentadas nas Figura 17 e Figura 18. Dentre todas as propriedades avaliadas, somente foram observadas diferenças significativas na permeabilidade ao vapor de água dos filmes puros de pectina.

Figura 17 - Resultados de PVA para os filmes a base de pectina à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol.

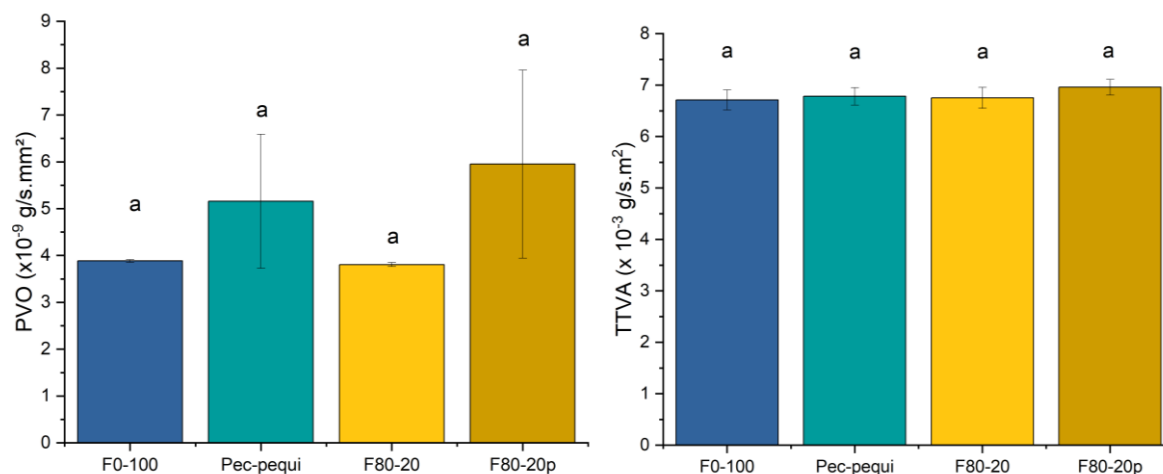


Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se que o filme a base de pectina extraída do pequi exibe a maior permeabilidade de vapor de água entre os filmes analisados. No entanto, destaca-se que o filme blenda a base com a pectina proveniente do pequi não exibe diferença significativa em relação à blenda com a pectina comercial, além de apresentar o segundo menor valor de PVA entre as amostras.

Os resultados referentes à TTVA e PVO não indicaram diferenças estatísticas significativas entre os filmes analisados, entende-se que a fonte de pectina não foi um fator determinante para essas propriedades de barreira.

Figura 18 - Resultados de TTVA e PVO para os filmes a base de pectina à base de pectina comercial e extraída, puros e blendados com proteína isolada da semente de girassol



Fonte: elaborado pela autora.

Na literatura, artigos comparando pectina obtida por extração ácida com a pectina cítrica comercial não revelam uma tendência uniforme quanto às propriedades de barreira dos filmes. Em Zhang et al. (2024), por exemplo, os filmes produzidos a partir da pectina extraída de cascas de pitaya vermelha não apresentaram diferenças significativas para PVA e PVO em comparação com as amostras de filmes à base de pectina comercial cítrica.

No entanto, resultados distintos também são encontrados. Em (Çavdaroğlu et al., 2023) os resultados de PVA e PVO observados foram maiores para os filmes a base de pectina extraída (caule de figo e frutos de baixa qualidade), em comparação com os filmes formulados com pectina comercial. De forma semelhante ao presente estudo, Said et al. (2023) também verificaram maiores valores de PVA para filmes a partir da pectina extraída (de diferentes frutas cítricas), e, assim como no presente trabalho, não encontraram diferenças estatísticas na permeabilidade ao oxigênio em relação aos filmes com pectina cítrica comercial.

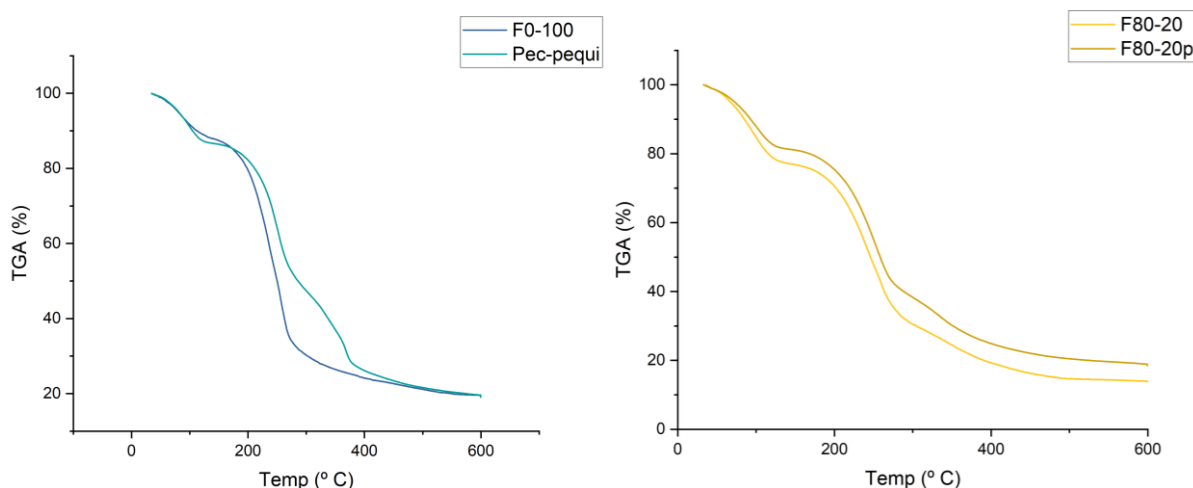
Além disso, em Lalnunthari, Devi e Badwaik (2020) realizaram a extração de proteína e pectina a partir de resíduos da abóbora, avaliando a permeabilidade ao vapor de água dos filmes. O filme à base de pectina pura (5% m/v) apresentou um PVA de $5,09 \times 10^{-6}$; enquanto o filme em blenda de proteína e pectina (50:50 m/m; 5% m/v) apresentou $6,24 \times 10^{-6}$. Esses resultados são inferiores aos observados no atual estudo, e foram justificadas à falta de compactação da matriz polimérica nos filmes.

Assim, os resultados indicam que a pectina extraída do mesocarpo do pequi apresenta desempenho comparável à pectina comercial cítrica na produção de filmes conjugados com proteína, em relação às propriedades de barreira. menores índices de solubilidade observados para os filmes elaborados com a pectina extraída, apesar de divergentes na comparação entre o polímero comercial, sugerem um potencial aplicação em sistemas alimentares com maior teor de umidade, nos quais a redução da solubilidade pode ser considerada uma característica desejável

5.3.5 Análise termogravimétrica dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol.

Os resultados obtidos com relação às análises termogravimétricas dos filmes são apresentados na Tabela 8, e Figura 19 e Figura 20. Os resultados demonstram a similaridade no perfil térmico das amostras, principalmente entre as blendas, caracterizadas por um processo de decomposição em 3 estágios.

Figura 19 - Curvas TGA dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e blendados com proteína isolada da semente de girassol: F0-100 (azul); Pec-pequi (verde-àgua escuro); F80-20 (amarelo-ouro); F80-20p (mostarda)



Fonte: elaborado pela autora.

Ao comparar as curvas térmicas do filme F0-100 e Pec-pequi, pode-se perceber diferenças entre as curvas na curva durante o segundo estágio. Essa diferença resulta em uma variação sutil na porcentagem de perda de massa entre as amostras, 64,46% para F0-100, já apresentado anteriormente, e 66,63% para Pec-pequi. No que se refere às blendas F80-20 e F80-20p, as curvas apresentam comportamento semelhante, com o segundo estágio associado à maior perda de massa 65,13% em

F80-20p e 60,97% para F80-20. Os resultados também evidenciam similaridade quanto às quantidades de resíduos finais das amostras.

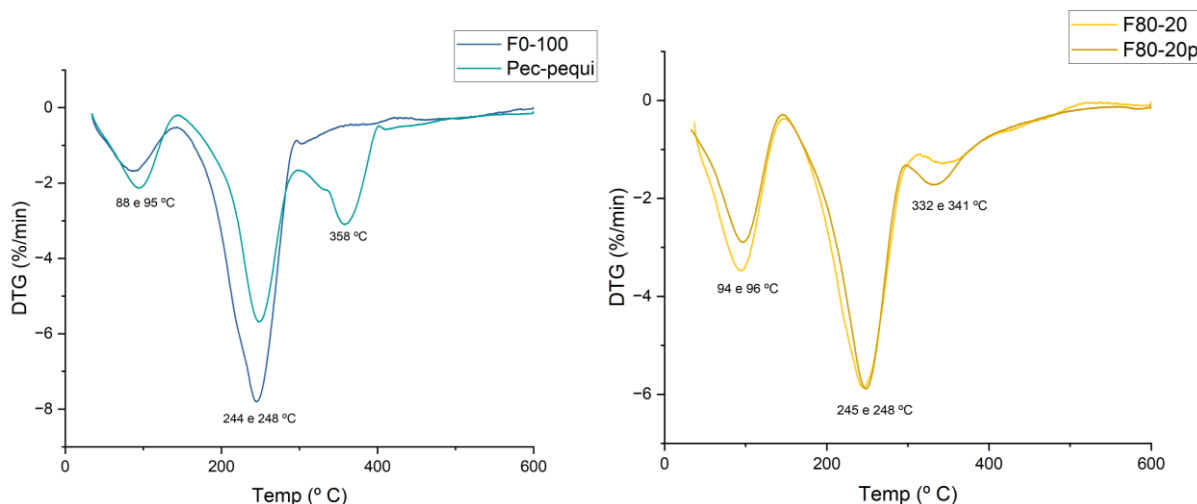
Tabela 8 - Dados das curvas da análise de termogravimetria e da primeira derivada dos filmes à base de pectina extraída, puro e blendado com proteína isolada da semente de girassol

Amostras	Estágio	Faixa de degradação (°C)	Picos da DTG (°C)	Perda de massa (%)
Pec-pequi	1º	35,27 - 140,65	95	13,66
	2º	144,67 - 491,44	248	66,63
	3º	494,38 - 599,58	358	2,73
	Resíduo	-	-	16,98
F80-20p	1º	34,19 - 135,98	96	19,81
	2º	138,93 - 473,97	248	65,13
	3º	477,99 - 599,86	332	2,8
	Resíduo	-	-	12,26

Fonte: elaborado pela autora.

O filme F0-100 é o único a apresentar apenas dois picos de degradação na primeira derivada das curvas de TGA, contrastando com as demais amostras, que apresentam 3 picos. Os dois picos observados para Pectina coincidem com aqueles apresentados pela amostra Pec-pequi, embora as temperaturas associadas à degradação máxima sejam ligeiramente inferiores para o filme à base do polímero comercial. Na comparação entre F80-20 e F80-20p, os resultados não demonstram diferenças expressivas que evidenciem uma maior estabilidade térmica de uma das formulações.

Figura 20 - Curvas DTG dos filmes à base de pectina comercial e extraída, puros e blendados com proteína isolada da semente de girassol: F0-100 (azul); Pec-pequi (verde-àgua escuro); F80-20 (amarelo-ouro); F80-20p (mostarda)



Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados obtidos são similares aos existentes na literatura. Em Khalil, Sharaby e Abdelrahim (2023) os gráficos de TGA entre filmes à base de pectina comercial e pectina extraída de uva brancas frescas também apresentaram similaridades, com pico máximo de degradação em 370 °C, valor superior ao encontrado no presente trabalho. De forma mais comparável aos resultados aqui apresentados, Tristante et al. (2024) reportaram o pico de degradação máxima para pectina extraída de pitaya entre 217 e 251 °C.

Esses resultados reforçam a possibilidade de substituição da pectina cítrica pela obtida do pequi, dado que ambas resultam com boa estabilidade térmica, tanto nas amostras puras quanto nas formulações em blenda.

5.3.6 Biodegradabilidade dos filmes à base de pectina extraída puros e conjugados com proteína isolada da semente de girassol

Os resultados obtidos em referência à degradação dos filmes preparados com a pectina obtida do mesocarpo do pequi demonstram maior velocidade para a decomposição total da amostra em comparação à pectina comercial cítrica (Figura 21). A amostra F80-20p inicia seu processo de degradação no 4º dia, com progresso expressivo no 5º dia, sendo considerada degradada no 6º dia. Em F80-20 a amostra permaneceu por 8 dias até ser considerado degradada.

O filme Pec-pequi inicia a degradação no 8º dia, apresentando aproximadamente 50% de degradação ao 10º dia, destaca-se que a amostra de filme F0-100, durante 30 dias de análise não apresenta tal sinal. Assim como para a amostra elaborada com a pectina cítrica pura, o filme à base de pectina extraída também foi observado até o 30º dia (Figura B.1, Anexo B), entretanto os resultados observados não apresentaram tendência clara de progressão de degradação, em alguns casos as amostras com tempos mais curtos apresentaram aparência de degradação maior do que aquelas de tempos mais longos.

Foi verificada uma atividade microbiana pronunciada no solo utilizado, caracterizado por manchas brancas na superfície do solo, em comparação com análises anteriores, o que pode ter contribuído para uma degradação mais acelerada de algumas amostras de filmes, e por essa razão podem ter influenciado e limitado a avaliação visual.

Figura 21 - Fotografias da degradação em solo dos filmes a partir da pectina extraída do pequi, puro e em blenda com a proteína isolada da semente de girassol

AMOSTRA	Dia 0	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
F80-20p											
Pec-pequi											

Fonte: elaborado pela autora.

Na literatura são encontrados resultados variados quanto à biodegradabilidade de filmes a base de pectina. Khalil, Sharaby e Abdelrahim (2023) relataram que o filme a base de pectina extraída de uva (10% m/v) apresentou degradação estendida por 28 dias. Em contrapartida, Weldearegay et al. (2024) observaram que um filme contendo 3% (m/v) de pectina extraída de cascas de pera-espinhosa atingiu uma taxa máxima de degradabilidade de aproximadamente 94% já no décimo dia.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou a viabilidade de desenvolvimento de filmes poliméricos formulados a partir de pectina cítrica e proteína isolada de semente de girassol em distintas proporções, com subsequente caracterização de suas propriedades. Os resultados indicaram a possibilidade de modulação das propriedades dos filmes à base de proteína pela adição da pectina e a ausência de uma correlação linear ou tendência definida entre a razão dos biopolímeros utilizados e as propriedades de barreira, mecânicas e térmicas dos filmes obtidos.

As análises espectroscópicas indicaram similaridade química entre as blends, evidenciada pela presença dos grupos funcionais característicos de cada macromolécula: grupos carboxílicos esterificados e não esterificados da pectina, e grupos amida primários, secundários e terciários da proteína, além do espectro de impressão digital (fingerprint) típico da pectina.

A blenda F80-20, composta por 80% de proteína e 20% do polissacarídeo, foi selecionado para a avaliação da substituição de pectina comercial por pectina extraída a partir de mesocarpo de pequi, em razão do desempenho nos resultados de propriedades de barreira. Esse filme, juntamente com o filme puro de pectina cítrica, apresentou os menores valores para permeabilidade de oxigênio e vapor de água, encontrando-se na ordem de grandeza de 10^{-9} e 10^{-10} , respectivamente, como com as demais amostras. Além disso, exibiu resultados interessantes para propriedades mecânicas, com desempenho igual ou superior em relação às outras formulações testadas.

O objetivo de extração da pectina do mesocarpo do pequi por micro-ondas com rendimento de cerca de 15% próximo aos reportados na literatura para esta metodologia. O polímero extraído apresenta alto grau de esterificação (>50%), característica amplamente associada à pectina utilizada na indústria alimentícia e capaz de formar filmes, assemelhando-se à pectina cítrica comercial. Embora a presença de impurezas tenha sido detectada, estas não impediram a produção dos filmes.

O filme blenda elaborado com a pectina extraída do mesocarpo do pequi em combinação com a PISG evidenciou o potencial para substituir a pectina cítrica. Tal filme demonstrou similaridades no perfil térmico e nos grupos químicos (FTIR), e suas propriedades de barreira não foram inferiores, apesar de apresentar desempenho mecânico ligeiramente inferior, exceto no módulo de elasticidade.

Com exceção dos filmes puros de pectina comercial e extraída, observou-se uma biodegradabilidade em solo superior a metade do material em até 1 mês. Este resultado indica uma possibilidade de destinação da embalagem adequada, minimizando problemas relacionados a falta de destinação final e oferecendo a possibilidade de degradação domiciliar sem custos adicionais. Com isso, a embalagem que pela produção já utiliza um resíduo agroindustrial frequentemente descartado em aterros, também contribui para outra redução de impactos ambientais negativos.

Os resultados contribuem para a valorização das cascas do pequi, um resíduo agroalimentar, indicando nova aplicação para o material, contribuindo para o meio ambiente e a economia circular, além de possibilitar uma nova renda para pequenos produtores, mediante demanda pela casca do fruto. O estudo demonstra também a formulação inovadora de filmes biodegradáveis a partir da pectina em conjunto com a PISG, estimulando o desenvolvimento de novos produtos sustentáveis, integração de setores diferentes e o avanço científico.

O trabalho também contribui como base para novas pesquisas para o aprimoramento das propriedades do filme como a otimização da interação entre os polímeros. Recomenda-se trabalhos futuros explorando sobre o estudo das interações polissacarídeo-proteína, a aplicação de modificações químicas e incorporação de extratos com atividade antioxidante, inclusive provenientes de resíduos do pequi.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15448-1:2008 — Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis — Parte 1: Terminologia**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- ADELEKE, B. S.; BABALOLA, O. O. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. **Food Science and Nutrition**, v. 8, n. 9, p. 4666–4684, 1 set. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução - RDC nº 91, de 11 de maio de 2001**. Brasília: [s.n.].
- ALASALVAR, H.; YILDIRIM, Z.; YILDIRIM, M. Development and characterization of sustainable active pectin films: The role of choline chloride/glycerol-based natural deep eutectic solvent and lavender extracts. **Heliyon**, v. 9, n. 11, p. 21756, 1 nov. 2023.
- ALVES, L. T.; FRONZA, P.; GONÇALVES, I.; SILVA, W. A. DA; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. Development of Polymeric Films Based on Sunflower Seed Proteins and Locust Bean Gum. **Polymers**, v. 16, n. 13, p. 1905, 2024.
- ALVES-SILVA, G. F.; ROMANI, V. P.; MARTINS, V. G. Different crosslinking as a strategy to improve films produced from external mesocarp of pequi (*Caryocar brasiliense*). **Food Chemistry**, v. 432, 30 jan. 2024.
- ANDRADE, M. A. et al. Novel Active Food Packaging Films Based on Whey Protein Incorporated with Seaweed Extract: Development, Characterization, and Application in Fresh Poultry Meat. **Coatings 2021, Vol. 11, Page 229**, v. 11, n. 2, p. 229, 14 fev. 2021.
- AZMIN, S. N. H. M.; HAYAT, N. A. B. M.; NOR, M. S. M. Development and characterization of food packaging bioplastic film from cocoa pod husk cellulose incorporated with sugarcane bagasse fibre. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 5, n. 4, p. 248–255, 1 nov. 2020.
- BARRERA-CHAMORRO, L.; FERNANDEZ-PRIOR, Á.; RIVERO-PINO, F.; MONTSERRAT-DE LA PAZ, S. **A comprehensive review on the functionality and biological relevance of pectin and the use in the food industry** Carbohydrate Polymers Elsevier Ltd, , 15 jan. 2025.
- BENASSI, L.; ALESSANDRI, I.; VASSALINI, I. Assessing Green Methods for Pectin Extraction from Waste Orange Peels. **Molecules 2021, Vol. 26, Page 1766**, v. 26, n. 6, p. 1766, 21 mar. 2021.
- BISHNOI, A.; CHANDLA, N. K.; TALWAR, G.; KHATKAR, S. K.; SHARMA, A. Mechanical Strength, Solubility, and Functional Studies of Developed Composite Biopolymeric Film. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 2023, n. 1, p. 5108490, 1 jan. 2023.

BOEIRA, C. P.; FLORES, D. C. B.; ALVES, J. DOS S.; MOURA, M. R. DE; MELO, P. T. S.; ROLIM, C. M. B.; NOGUEIRA-LIBRELOTTO, D. R.; ROSA, C. S. DA. Effect of corn stigma extract on physical and antioxidant properties of biodegradable and edible gelatin and corn starch films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 208, p. 698–706, 31 maio 2022.

BORAH, P.; BAISHYA, H.; MUKHERJEE, A.; MITRA, A.; DUTTA, J.; KUMAR, S. Plant-mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles and their applications in biopolymer-based sustainable food packaging: A state of-art-review. **Trends in Food Science & Technology**, p. 105101, 22 maio 2025.

BRITO, R. M.; BARCIA, M. T.; FARIAS, C. A. A.; ZAMBIASI, R. C.; MARCHI, P. G. F. DE; FUJIMORI, M.; HONORIO-FRANÇA, A. C.; FRANÇA, E. L.; PERTUZATTI, P. B. Bioactive compounds of pequi pulp and oil extracts modulate antioxidant activity and antiproliferative activity in cocultured blood mononuclear cells and breast cancer cells. **Food and Nutrition Research**, v. 66, 2022.

BUTLER, I. P.; BANTA, R. A.; TYUFTIN, A. A.; HOLMES, J.; PATHANIA, S.; KERRY, J. Pectin as a biopolymer source for packaging films using a circular economy approach: Origins, extraction, structure and films properties. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 40, p. 101224, 1 dez. 2023.

CARNAVAL, L. DE S. C.; JAISWAL, A. K.; JAISWAL, S. Agro-Food Waste Valorization for Sustainable Bio-Based Packaging. **Journal of Composites Science** **2024**, Vol. 8, Page 41, v. 8, n. 2, p. 41, 24 jan. 2024.

CARPINÉ, D.; DAGOSTIN, J. L. A.; MAZON, E.; BARBI, R. C. T.; ALVES, F. E. DA S. B.; CHAIMSOHN, F. P.; RIBANI, R. H. Valorization of Euterpe edulis Mart. agroindustrial residues (pomace and seeds) as sources of unconventional starch and bioactive compounds. **Journal of Food Science**, v. 85, n. 1, p. 96–104, 1 jan. 2020.

CARVALHO, A. C. F.; GHOSH, S.; HOFFMANN, T. G.; PRUDÊNCIO, E. S.; SOUZA, C. K. DE; ROY, S. Valuing agro-industrial waste in the development of sustainable food packaging based on the system of a circular bioeconomy: A review. **Cleaner Waste Systems**, v. 11, p. 100275, 1 jun.

ÇAVDAROĞLU, E.; BÜYÜKTAŞ, D.; FARRIS, S.; YEMENICIOĞLU, A. Novel edible films of pectins extracted from low-grade fruits and stalk wastes of sun-dried figs: Effects of pectin composition and molecular properties on film characteristics. **Food Hydrocolloids**, v. 135, p. 108136, 1 fev. 2023.

CAZÓN, P.; MORALES-SANCHEZ, E.; VELAZQUEZ, G.; VÁZQUEZ, M. Measurement of the Water Vapor Permeability of Chitosan Films: A Laboratory Experiment on Food Packaging Materials. **Journal of Chemical Education**, v. 99, n. 6, p. 2403–2408, 2022.

CHAKRAVARTULA, S. S. N.; SOCCIO, M.; LOTTI, N.; BALESTRA, F.; DALLA ROSA, M.; SIRACUSA, V. Characterization of Composite Edible Films Based on Pectin/Alginate/Whey Protein Concentrate. **Materials** **2019**, Vol. 12, Page 2454, v. 12, n. 15, p. 2454, 1 ago. 2019.

- CHANDEL, V.; BISWAS, D.; ROY, S.; VAIDYA, D.; VERMA, A.; GUPTA, A. Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. **Foods** **2022**, Vol. **11**, Page **2683**, v. 11, n. 17, p. 2683, 2 set. 2022.
- CHEN, H.; WANG, J.; CHENG, Y.; WANG, C.; LIU, H.; BIAN, H.; PAN, Y.; SUN, J.; HAN, W. Application of Protein-Based Films and Coatings for Food Packaging: A Review. **Polymers** **2019**, Vol. **11**, Page **2039**, v. 11, n. 12, p. 2039, 9 dez. 2019.
- CHEN, J.; ZHANG, Y.; LIU, H.; LU, H.; XU, X.; SHEN, M. Sodium alginate-camellia seed cake protein active packaging film cross-linked by electrostatic interactions for fruit preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 288, p. 138627, 1 fev. 2025.
- CHENG, H.; CAO, J.; LIU, W.; MEI, J.; XIE, J. Characterization of Sodium Alginate—Locust Bean Gum Films Reinforced with Daphnetin Emulsions for the Development of Active Packaging. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 731, 2022.
- CHENTIR, I.; ARIBI, C.; TARCHOUN, A. F.; KCHAOU, H.; LAMRI, M.; NASRI, M.; TRACHE, D. Development of functional active films from blend of gelatin with crude orange juice pomace pectin: Test for packaging of virgin olive oil. **Packaging Technology and Science**, v. 37, n. 1, p. 17–37, 1 jan. 2024.
- COUTINHO, D. DE S.; PIRES, J.; GOMES, H.; POHLMANN, A. R.; GUTERRES, S. S.; E SILVA, P. M. R.; MARTINS, M. A.; FERRARINI, S. R.; BERNARDI, A. Pequi (*Caryocar brasiliense* cambess)-loaded nanoemulsion, orally delivered, modulates inflammation in lps-induced acute lung injury in mice. **Pharmaceutics**, v. 12, n. 11, p. 1–17, 1 nov. 2020.
- CUI, J.; ZHANG, L.; WANG, J.; ZHAO, S.; ZHAO, C.; LIU, D.; LI, W.; ZHENG, J. Study on the relationship between primary structure/ spatial conformation and gel properties of pectins from different varieties. **Food Hydrocolloids**, v. 144, p. 109055, 1 nov. 2023.
- CUI, J.; ZHAO, C.; FENG, L.; HAN, Y.; DU, H.; XIAO, H.; ZHENG, J. Pectins from fruits: Relationships between extraction methods, structural characteristics, and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 110, p. 39–54, 1 abr. 2021.
- DAI, Y.; YU, K.; ZHU, H.-Y.; LI, H.; XIE, J.; LUO, Y.-C.; NIE, D.-P.; DU, H.-J.; ZHU, C.-X.; XU, Y.-M. Determination of the water vapor transmission rate of cellulose-based papers by multiple headspace extraction analysis. **Journal of chromatography A/Journal of chromatography**, v. 1710, p. 464404, 2023.
- DASH, D. R.; SINGH, S. K.; SINGHA, P. Bio-based composite active film/coating from deccan hemp seed protein, taro starch and leaf extract: Characterizations and application in grapes. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 39, p. 101609, 2024.
- DEY, A.; ASHOK S, D. Policy pathways utilizing extended producer responsibility and eco-modulation frameworks for sustainable food packaging waste management in India: A review. **Results in Engineering**, v. 26, p. 104885, 1 jun. 2025.

DHAIGUDE, H.; SAINI, C. S.; SHEIKH, M. A. Development of sunflower protein isolate emulsion-based edible composite films with the addition of potato starch: Barrier, mechanical, thermal, and morphological properties. **Food Safety and Health**, v. 2, n. 4, p. 465–479, 1 out. 2024.

DIRPAN, A.; AINANI, A. F.; DJALAL, M. A Review on Biopolymer-Based Biodegradable Film for Food Packaging: Trends over the Last Decade and Future Research. **Polymers** **2023**, Vol. **15**, Page **2781**, v. 15, n. 13, p. 2781, 22 jun. 2023.

DÖRNYEI, K. R. et al. Sustainable food packaging: An updated definition following a holistic approach. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1119052, 21 abr. 2023.

DRANCA, F.; TALÓN, E.; VARGAS, M.; OROIAN, M. Microwave vs. conventional extraction of pectin from *Malus domestica* 'Fălticeni' pomace and its potential use in hydrocolloid-based films. **Food Hydrocolloids**, v. 121, p. 107026, 1 dez. 2021.

EFTHYMIIOU, M. N.; TSOUKO, E.; PAPAGIANNPOULOS, A.; ATHANASOULIA, I. G.; GEORGIADOU, M.; PISPAS, S.; BRIASSOULIS, D.; TSIRONI, T.; KOUTINAS, A. Development of biodegradable films using sunflower protein isolates and bacterial nanocellulose as innovative food packaging materials for fresh fruit preservation. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1–13, 1 dez. 2022.

FARO SILVA, R. DE et al. Enhancement of the functionality of women with knee osteoarthritis by a gel formulation with *Caryocar coriaceum* Wittm ("Pequi") nanoencapsulated pulp fixed oil. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 150, p. 112938, 1 jun. 2022.

FERRAZ, C. A.; FONTES, R. L. S.; FONTES-SANT'ANA, G. C.; CALADO, V.; LÓPEZ, E. O.; ROCHA-LEÃO, M. H. M. Extraction, Modification, and Chemical, Thermal and Morphological Characterization of Starch From the Agro-Industrial Residue of Mango (*Mangifera indica* L) var. Ubá. **Starch/Staerke**, v. 71, n. 1–2, p. 1800023, 1 jan. 2019.

FLÓREZ, M.; CAZÓN, P.; VÁZQUEZ, M. Selected Biopolymers' Processing and Their Applications: A Review. **Polymers** **2023**, Vol. **15**, Page **641**, v. 15, n. 3, p. 641, 26 jan. 2023.

GAVAHIAN, M.; MATHAD, G. N.; PANDISELVAM, R.; LIN, J.; SUN, D. W. Emerging technologies to obtain pectin from food processing by-products: A strategy for enhancing resource efficiency. **Trends in Food Science & Technology**, v. 115, p. 42–54, 1 set. 2021.

GEÖCZE, K. C.; BARBOSA, L. C. A.; LIMA, C. F.; FERRUZZI, M. G.; FIDÊNCIO, P. H.; SANT'ANA, H. M. P.; SILVÉRIO, F. O. *Caryocar brasiliense* Camb. fruits from the Brazilian Cerrado as a rich source of carotenoids with pro-vitamin A activity. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 101, p. 103943, 1 ago. 2021.

GHANTA, C.; SAINI, C. S. Ecologically sustainable biodegradable polymers fabricated from banana peel pectin reinforced with silver zeolite nanoparticles

(Ag/zeolite NPs). **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 140209, 2025.

GHARIBZAHEDI, S. M. T.; AHMADIGOL, A.; KHUBBER, S.; ALTINTAS, Z. Whey protein isolate/jujube polysaccharide-based edible nanocomposite films reinforced with starch nanocrystals for the shelf-life extension of banana: Optimization and characterization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 222, p. 1063–1077, 1 dez. 2022.

GHARIBZAHEDI, S. M. T.; SMITH, B.; GUO, Y. Pectin extraction from common fig skin by different methods: The physicochemical, rheological, functional, and structural evaluations. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 136, p. 275–283, 1 set. 2019.

GIANCONE, T.; TORRIERI, E.; PIERRO, P. DI; CAVELLA, S.; GIOSAFATTO, C. V. L.; MASI, P. Effect of Surface Density on the Engineering Properties of High Methoxyl Pectin-Based Edible Films. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 7, p. 1228–1236, 14 out. 2011.

GONÇALVES DE MOURA, I.; VASCONCELOS DE SÁ, A.; LEMOS MACHADO ABREU, A. S.; ALVES MACHADO, A. V. Bioplastics from agro-wastes for food packaging applications. **Food Packaging**, p. 223–263, 1 jan. 2017.

GUERRA, I. C.; SOUSA, T. L. DE; FARIAS, P. M. DE; CAPPATO, L. P.; FREITAS, B. S. M. DE; ROMANI, V. P.; PLÁCIDO, G. R. Films and coatings from pequi mesocarp incorporated with nano-ZnO: Properties and capacity to increase mango shelf life. **Industrial Crops and Products**, v. 195, p. 116414, 1 maio 2023.

GUO, H.; BAI, J.; JIN, X.; LIU, H.; WU, D.; GAN, R.; GAO, H. Innovative edible films for food preservation: Combining pectin and flavonoids from citrus peels with soy protein isolates. **LWT**, v. 214, p. 117102, 2024.

GURURANI, P.; BHATNAGAR, P.; DOGRA, P.; CHANDRA JOSHI, H.; CHAUHAN, P. K.; VLASKIN, M. S.; CHANDRA JOSHI, N.; KURBATOVA, A.; IRINA, A.; KUMAR, V. Bio-based food packaging materials: A sustainable and Holistic approach for cleaner environment- a review. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 7, p. 100384, 1 jan. 2023.

GUZMAN-PUYOL, S.; BENÍTEZ, J. J.; HEREDIA-GUERRERO, J. A. Transparency of polymeric food packaging materials. **Food Research International**, v. 161, p. 111792, 1 nov. 2022.

HAZROL, M. D.; SAPUAN, S. M.; ZAINUDIN, E. S.; ZUHRI, M. Y. M.; ABDUL WAHAB, N. I. Corn Starch (*Zea mays*) Biopolymer Plastic Reaction in Combination with Sorbitol and Glycerol. **Polymers**, v. 13, n. 2, p. 242, 2021.

HUANG, J.; HU, Z.; HU, L.; LI, G.; YAO, Q.; HU, Y. Pectin-based active packaging: A critical review on preparation, physical properties and novel application in food preservation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 118, p. 167–178, 1 dez. 2021.

HUANG, K.; WANG, Y. Advances in bio-based smart food packaging for enhanced food safety. **Trends in Food Science & Technology**, v. 159, p. 104960, 1 maio 2025.

IBGE. **Produção de Pequi no Brasil | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pequi/br>>. Acesso em: 10 maio. 2025a.

_____. **Produção de Girassol (em grão) no Brasil | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/girassol/br>>. Acesso em: 24 maio. 2025b.

JAMWAL, V.; MITTAL, A.; DHAUNDIYAL, A. Valorization of agro-industrial waste in composite films for sustainable packaging applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 113, p. 94–100, 1 jan. 2024.

JARRÍN-CHACÓN, J. P.; NÚÑEZ-PÉREZ, J.; ESPÍN-VALLADARES, R. DEL C.; MANOSALVAS-QUIROZ, L. A.; RODRÍGUEZ-CABRERA, H. M.; PAIS-CHANFRAU, J. M. Pectin Extraction from Residues of the Cocoa Fruit (*Theobroma cacao* L.) by Different Organic Acids: A Comparative Study. **Foods** **2023**, Vol. 12, Page 590, v. 12, n. 3, p. 590, 30 jan. 2023.

JRIDI, M.; BOUGHRIBA, S.; ABDELHEDI, O.; NCIRI, H.; NASRI, R.; KCHAOU, H.; KAYA, M.; SEBAI, H.; ZOUARI, N.; NASRI, M. Investigation of physicochemical and antioxidant properties of gelatin edible film mixed with blood orange (*Citrus sinensis*) peel extract. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 21, p. 100342, 1 set. 2019.

KARIMI SANI, I.; MASOUDPOUR-BEHABADI, M.; ALIZADEH SANI, M.; MOTALEBINEJAD, H.; JUMA, A. S. M.; ASDAGH, A.; EGHBALJOO, H.; KHODAEI, S. M.; RHIM, J. W.; MOHAMMADI, F. Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. **Food Chemistry**, v. 405, p. 134964, 30 mar. 2023.

KAUR, R. P.; GHOSHAL, G. Sunflower protein isolates-composition, extraction and functional properties. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 306, p. 102725, 1 ago. 2022.

KAUTS, S.; SHABIR, S.; YOUSUF, S.; MISHRA, Y.; BHARDWAJ, R.; MILIBARI, A. A.; SINGH, S. K.; SINGH, M. P. The evidence of in-vivo and in-vitro studies on microplastic and nano plastic toxicity in mammals: A possible threat for an upcoming generation? **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 132, p. 103511, 1 dez. 2023.

KCHAOU, H.; JRIDI, M.; BENBETTAIEB, N.; DEBEAUFORT, F.; NASRI, M. Bioactive films based on cuttlefish (*Sepia officinalis*) skin gelatin incorporated with cuttlefish protein hydrolysates: Physicochemical characterization and antioxidant properties. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 24, p. 100477, 1 jun. 2020.

KE, F.; YANG, M.; JI, W.; LIU, D. Functional pH-sensitive film based on pectin and whey protein for grape preservation and shrimp freshness monitoring. **Food Chemistry**, v. 463, p. 141092, 15 jan. 2025.

- KHALIL, R. K. S.; SHARABY, M. R.; ABDELRAHIM, D. S. Novel active edible food packaging films based entirely on citrus peel wastes. **Food Hydrocolloids**, v. 134, p. 107961, 1 jan. 2023.
- KOLA, V.; CARVALHO, I. S. Plant extracts as additives in biodegradable films and coatings in active food packaging. **Food Bioscience**, v. 54, p. 102860, 1 ago. 2023.
- KÖNIG, C. C.; SOUSA JUNIOR, E. DOS S. DE. **Relatório de Pesquisa - Perdas e Desperdício de Alimentos: causas principais**. [s.l: s.n.]. . Acesso em: 23 maio. 2025.
- KUMAR, S.; REDDY, A. R. L.; BASUMATARY, I. B.; NAYAK, A.; DUTTA, D.; KONWAR, J.; PURKAYASTHA, M. DAS; MUKHERJEE, A. Recent progress in pectin extraction and their applications in developing films and coatings for sustainable food packaging: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 239, 1 jun. 2023.
- KUTE, A. B.; MOHAPATRA, D.; KOTWALIWALE, N.; GIRI, S. K.; SAWANT, B. P. Characterization of Pectin Extracted from Orange Peel Powder using Microwave-Assisted and Acid Extraction Methods. **Agricultural Research**, v. 9, n. 2, p. 241–248, 1 jun. 2020.
- LAARAJ, S.; HUSSAIN, A.; SHAHID, E.; BAKHTAWAR, F.; ZIA, M.; NAJAM, A.; ZULFIQAR, N.; SWEILAM, S. H.; ED-DRA, A.; ELFAZAZI, K. Nutritional, pharmaceutical, and health benefits of sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.): A comprehensive review of food applications. **Food and Humanity**, v. 5, p. 100641, 1 dez. 2025.
- LAET, E. DE; BERNAERTS, T.; DEWETTINCK, K.; HENDRICKX, M. E.; LOEY, A. M. VAN. The effect of different particle size reduction techniques on the biomass microstructure and the influence on the pectin extraction yield and structure. **Food Hydrocolloids**, v. 151, p. 109875, 1 jun. 2024.
- LALNUNTHARI, C.; DEVI, L. M.; BADWAIK, L. S. Extraction of protein and pectin from pumpkin industry by-products and their utilization for developing edible film. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 5, p. 1807–1816, 1 maio 2020.
- LEÃO, D. P.; BOTELHO, B. G.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S. Potential of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) peels as sources of highly esterified pectins obtained by microwave assisted extraction. **LWT**, v. 87, p. 575–580, 1 jan. 2018.
- LI, S.; REN, Y.; HOU, Y.; ZHAN, Q.; JIN, P.; ZHENG, Y.; WU, Z. Polysaccharide-Based Composite Films: Promising Biodegradable Food Packaging Materials. **Foods** **2024**, Vol. 13, Page 3674, v. 13, n. 22, p. 3674, 18 nov. 2024a.
- LI, X.; LIU, L.; SCHLEGEL, H. B. On the physical origin of blue-shifted hydrogen bonds. **Journal of the American Chemical Society**, v. 124, n. 32, p. 9639–9647, 14 ago. 2002.
- LI, X.; WANG, L.; TAN, B.; LI, R. Effect of structural characteristics on the physicochemical properties and functional activities of dietary fiber: A review of

structure-activity relationship. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 269, n. Pt 2, 1 jun. 2024b.

LI, Z.; XIANG, F.; HUANG, X.; LIANG, M.; MA, S.; GAFUROV, K.; GU, F.; GUO, Q.; WANG, Q. Properties and Characterization of Sunflower Seeds from Different Varieties of Edible and Oil Sunflower Seeds. **Foods 2024, Vol. 13, Page 1188**, v. 13, n. 8, p. 1188, 13 abr. 2024c.

LIANG, W. LING; LIAO, J. SONG; QI, J. R.; JIANG, W. XIN; YANG, X. QUAN. Physicochemical characteristics and functional properties of high methoxyl pectin with different degree of esterification. **Food Chemistry**, v. 375, p. 131806, 1 maio 2022.

LIU, C.; HUANG, J.; ZHENG, X.; LIU, S.; LU, K.; TANG, K.; LIU, J. Heat sealable soluble soybean polysaccharide/gelatin blend edible films for food packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 24, p. 100485, 2020.

LIU, L. S.; LIU, C. K.; FISHMAN, M. L.; HICKS, K. B. Composite films from pectin and fish skin gelatin or soybean flour protein. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 6, p. 2349–2355, 21 mar. 2007.

LIU, X.; RENARD, C. M. G. C.; BUREAU, S.; BOURVELLEC, C. LE. Revisiting the contribution of ATR-FTIR spectroscopy to characterize plant cell wall polysaccharides. **Carbohydrate Polymers**, v. 262, 15 jun. 2021.

MALIK, M. A.; SAINI, C. S. Polyphenol removal from sunflower seed and kernel: Effect on functional and rheological properties of protein isolates. **Food Hydrocolloids**, v. 63, p. 705–715, 1 fev. 2017.

MARAN, J. P.; PRAKASH, K. A. Process variables influence on microwave assisted extraction of pectin from waste Carica papaya L. peel. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 73, p. 202–206, 1 fev. 2015.

MARIĆ, M.; GRASSINO, A. N.; ZHU, Z.; BARBA, F. J.; BRNČIĆ, M.; RIMAC BRNČIĆ, S. An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. **Trends in Food Science & Technology**, v. 76, p. 28–37, 1 jun. 2018.

MARTINS, J. P. G.; SETTER, C.; ATAÍDE, C. H.; PIRES DE OLIVEIRA, T. J.; MAGRIOTIS, Z. M. Study of pequi peel pyrolysis: Thermal decomposition analysis and product characterization. **Biomass and Bioenergy**, v. 149, p. 106095, 1 jun. 2021.

MARTINS, V. F. R.; PINTADO, M. E.; MORAIS, R. M. S. C.; MORAIS, A. M. M. B. Recent Highlights in Sustainable Bio-Based Edible Films and Coatings for Fruit and Vegetable Applications. **Foods**, v. 13, n. 2, p. 318, 19 jan. 2024.

MARTURANO, V.; MAROTTA, A.; SALAZAR, S.; AMBROGI, V.; CERRUTI, P. Recent advances in bio-based functional additives for polymers. **Progress in Materials Science**, v. 139, p. 101186, 1 out. 2023.

- MEHRYAR, L.; ESMAILI, M.; ZEYNALI, F.; IMANI, M.; SADEGHI, R. Fabrication and characterization of sunflower protein isolate nanoparticles, and their potential for encapsulation and sustainable release of curcumin. **Food Chemistry**, v. 355, p. 129572, 1 set. 2021.
- MENDES, A. C.; PEDERSEN, G. A. Perspectives on sustainable food packaging:— is bio-based plastics a solution? **Trends in Food Science & Technology**, v. 112, p. 839–846, 1 jun. 2021.
- MOHAMED, S. A. A.; EL-SAKHAWY, M.; EL-SAKHAWY, M. A. M. Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, p. 116178, 15 jun. 2020.
- MORALES-MEDINA, R. et al. Structure, controlled release mechanisms and health benefits of pectins as an encapsulation material for bioactive food components. **Food & Function**, v. 13, n. 21, p. 10870–10881, 31 out. 2022.
- NASCIMENTO-SILVA, N. R. R. DO; NAVES, M. M. V. Potential of Whole Pequi (Caryocar spp.) Fruit-Pulp, Almond, Oil, and Shell-as a Medicinal Food. **Journal of Medicinal Food**, v. 22, n. 9, p. 952–962, 1 set. 2019.
- NASTASI, J. R.; KONTOGIORGOS, V.; DAYGON, V. D.; FITZGERALD, M. A. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: A systematic review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 120, p. 193–211, 1 fev. 2022.
- NGUYEN, T. T. T.; HO, H. T.; HOANG, D. Q.; NGUYEN, Q. A. P.; TRAN, T. VAN. Novel films of pectin extracted from ambarella fruit peel and jackfruit seed slimy sheath: Effect of ionic crosslinking on the properties of pectin film. **Carbohydrate Polymers**, v. 334, p. 122043, 15 jun. 2024.
- NORCINO, L. B.; MENDES, J. F.; NATARELLI, C. V. L.; MANRICH, A.; OLIVEIRA, J. E.; MATTOSO, L. H. C. Pectin films loaded with copaiba oil nanoemulsions for potential use as bio-based active packaging. **Food Hydrocolloids**, v. 106, p. 105862, 1 set. 2020.
- OLIVEIRA, M. A.; FURTADO, R. F.; BASTOS, M. S. R.; LEITÃO, R. C.; BENEVIDES, S. D.; MUNIZ, C. R.; CHENG, H. N.; BISWAS, A. Performance evaluation of cashew gum and gelatin blend for food packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 17, p. 57–64, 2018.
- PANDHARIPANDE, S.; BHAGAT, P. Synthesis of Chitin from Crab Shells and its Utilization in Preparation of Nanostructured Film. **International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)**, v. 5, n. 5, 2016.
- PESSOA, A. S.; PODESTÁ, R.; BLOCK, J. M.; FRANCESCHI, E.; DARIVA, C.; LANZA, M. Extraction of pequi (Caryocar coriaceum) pulp oil using subcritical propane: Determination of process yield and fatty acid profile. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 101, p. 95–103, 1 jun. 2015.
- PHILLIPS, L. G.; WHITEHEAD, D. M.; KINSELLA, J. **Structure-function properties of food proteins**. [s.l.] ACADEMIC PRESS, 1994.

- PUTNIK, P.; BURSAC KOVAČEVIĆ, D.; REŽEK JAMBRAK, A.; BARBA, F. J.; CRAVOTTO, G.; BINELLO, A.; LORENZO, J. M.; SHPIGELMAN, A. Innovative “Green” and Novel Strategies for the Extraction of Bioactive Added Value Compounds from Citrus Wastes—A Review. **Molecules** **2017**, Vol. **22**, Page **680**, v. 22, n. 5, p. 680, 27 abr. 2017.
- PUTTHA, R.; VENKATACHALAM, K.; HANPAKDEESAKUL, S.; WONGSA, J.; PARAMETTHANUWAT, T.; SREAN, P.; PAKEECHAI, K.; CHAROENPHUN, N. Exploring the Potential of Sunflowers: Agronomy, Applications, and Opportunities within Bio-Circular-Green Economy. **Horticulturae** **2023**, Vol. **9**, Page **1079**, v. 9, n. 10, p. 1079, 27 set. 2023.
- REHMAN, A.; AHMAD, T.; AADIL, R. M.; SPOTTI, M. J.; BAKRY, A. M.; KHAN, I. M.; ZHAO, L.; RIAZ, T.; TONG, Q. Pectin polymers as wall materials for the nano-encapsulation of bioactive compounds. **Trends in Food Science & Technology**, v. 90, p. 35–46, 1 ago. 2019.
- RIBEIRO, A. M.; ESTEVINHO, B. N.; ROCHA, F. Preparation and Incorporation of Functional Ingredients in Edible Films and Coatings. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, n. 2, p. 209–231, 1 fev. 2021.
- RODRIGUEZ, O. T.; VALERO, M. F.; GÓMEZ-TEJEDOR, J. A.; DIAZ, L. Performance of Biodegradable Active Packaging in the Preservation of Fresh-Cut Fruits: A Systematic Review. **Polymers** **2024**, Vol. **16**, Page **3518**, v. 16, n. 24, p. 3518, 18 dez. 2024.
- ROSSI MARQUEZ, G.; PIERRO, P. DI; MARINIELLO, L.; ESPOSITO, M.; GIOSAFATTO, C. V. L.; PORTA, R. Fresh-cut fruit and vegetable coatings by transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin edible films. **LWT**, v. 75, p. 124–130, 1 jan. 2017.
- ROUILLY, A.; MÉRIAUX, A.; GENEAU, C.; SILVESTRE, F.; RIGAL, L. Film extrusion of sunflower protein isolate. **Polymer Engineering & Science**, v. 46, n. 11, p. 1635–1640, 1 nov. 2006.
- ROY, S.; MALIK, B.; CHAWLA, R.; BORA, S.; GHOSH, T.; SANTHOSH, R.; THAKUR, R.; SARKAR, P. Biocompatible film based on protein/polysaccharides combination for food packaging applications: A comprehensive review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134658, 2024.
- ROY, S.; PRIYADARSHI, R.; ŁOPUSIEWICZ, L.; BISWAS, D.; CHANDEL, V.; RHIM, J. W. Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 239, p. 124248, 1 jun. 2023.
- RYU, S. R.; NODA, I.; JUNG, Y. M. Relationship between Infrared Peak Maximum Position and Molecular Interactions. **Bulletin of the Korean Chemical Society**, v. 32, n. 11, p. 4011–4015, 20 nov. 2011.

S, P.; JAISWAL, A. K. Effect of interpolymer complex formation between chondroitin sulfate and chitosan-gelatin hydrogel on physico-chemical and rheological properties. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, p. 116179, 15 jun. 2020.

SABBAH, M.; ALTAMIMI, M.; PIERRO, P. DI; SCHIRALDI, C.; CAMMAROTA, M.; PORTA, R. Black Edible Films from Protein-Containing Defatted Cake of *Nigella sativa* Seeds. **International Journal of Molecular Sciences** 2020, Vol. 21, Page 832, v. 21, n. 3, p. 832, 28 jan. 2020.

SAID, N. S.; OLAWUYI, I. F.; CHO, H. S.; LEE, W. Y. Novel edible films fabricated with HG-type pectin extracted from different types of hybrid citrus peels: Effects of pectin composition on film properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 127238, 31 dez. 2023.

SALGADO, P. R.; LÓPEZ-CABALLERO, M. E.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C.; MAURI, A. N.; MONTERO, M. P. Sunflower protein films incorporated with clove essential oil have potential application for the preservation of fish patties. **Food Hydrocolloids**, v. 33, n. 1, p. 74–84, 1 ago. 2013.

SALGADO, P. R.; MOLINA ORTIZ, S. E.; PETRUCCELLI, S.; MAURI, A. N. Biodegradable sunflower protein films naturally activated with antioxidant compounds. **Food Hydrocolloids**, v. 24, n. 5, p. 525–533, 1 jul. 2010.

SALIMI, A.; KHODAIYAN, F.; ASKARI, G.; AMRAEI, A. Effect of propolis extract-loaded films made of apple pomace pectin and grass pea protein on the shelf life extension of black mulberry. **Food Hydrocolloids**, v. 158, p. 110549, 1 jan. 2025.

SAMANI, S. A.; POURVATANDOUST, S.; SAVAROLYIA, M.; ABOUTALEBZADEH, S.; KHEZRI, M.; KAZEMI, M.; KHODAIYAN, F.; HOSSEINI, S. S. Valorization of red grape pomace for sustainable food packaging: Development of pectin/kidney bean protein based biocomposite films enriched with grape pomace polyphenols. **Food Hydrocolloids**, v. 160, p. 110806, 2024.

SANTOS, E. E.; AMARO, R. C.; BUSTAMANTE, C. C. C.; GUERRA, M. H. A.; SOARES, L. C.; FROES, R. E. S. Extraction of pectin from agroindustrial residue with an ecofriendly solvent: use of FTIR and chemometrics to differentiate pectins according to degree of methyl esterification. **Food Hydrocolloids**, v. 107, p. 105921, 1 out. 2020.

SANTOS-SILVA, A. C. DOS; SARAIVA, B. R.; LAZZARI, A.; SANTOS, H. DOS; OLIVEIRA, É. L. DE; SATO, F.; MEURER, E. C.; MATUMOTO-PINTRO, P. T. Optimization and Characterization of Protein Extraction from Asparagus Leafy By-Products. **Foods** 2024, Vol. 13, Page 894, v. 13, n. 6, p. 894, 15 mar. 2024.

SARKER, A.; MATAK, K.; JACZYNSKI, J. Effect of transglutaminase concentration on the properties of soy protein isolate-pectin composite edible films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 47, p. 101418, 1 jan. 2025.

SARTORI, T.; FELTRE, G.; AMARAL SOBRAL, P. J. DO; LOPES DA CUNHA, R.; MENEGALLI, F. C. Properties of films produced from blends of pectin and gluten. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 18, p. 221–229, 1 dez. 2018.

- SILVA, K. S.; FONSECA, T. M. R.; AMADO, L. R.; MAURO, M. A. Physicochemical and microstructural properties of whey protein isolate-based films with addition of pectin. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 16, p. 122–128, 1 jun. 2018.
- SILVA, L. M. DOS S. F. E.; PEREIRA, G. S. L.; RIBEIRO, I. G.; BRAGA-SOUTO, R. N.; TEIXEIRA, M. G.; VIEIRA, C. R.; LIMA, J. P. DE. Production, characterization and shelf-life evaluation of Caryocar brasiliense pulp flour. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 28, p. 100512, 1 jun. 2022.
- SILVA, W. B. DA; RODRIGUES DE SOUSA, J. P.; MARIANA, C.; LIMA, G.; FERREIRA DA SILVA, J.; VERRUCK, S.; CAETANO, D.; ALVES BARBOSA, E. MARACUJA-DO-MATO (PASSIFLORA CININNATA MAST.) JELLY DEVELOPED WITH PEQUI (CARYOCAR BRASILIENSE CAMB.) PEEL PECTIN AND COMMERCIAL PECTIN: A COMPARATIVE STUDY. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Volume 1**, v. 1, p. 279–291, 2020.
- SILVEIRA, Y. D. O.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Cassava Waste Starch as a Source of Bioplastics: Development of a Polymeric Film with Antimicrobial Properties. **Foods 2025, Vol. 14, Page 113**, v. 14, n. 1, p. 113, 3 jan. 2025.
- SINGH, N. S.; NATH, H.; MEHTA, N. K.; PATI, B. K.; VAISHNAV, A.; WAIKHOM, G.; PARHI, J.; PRIYADARSHINI, M. B.; DESAI, A. S. Impact of fish myofibrillar protein and apple pectin–konjac glucomannan on the physical, thermal, and micro-structural properties of biodegradable blend film. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. 16, 6 jan. 2025.
- SIQUEIRA, B. DOS S.; ALVES, L. D.; VASCONCELOS, P. N.; DAMIANI, C.; SOARES, M. S. Pectina extraída de casca de pequi e aplicação em geleia light de manga. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 2, p. 560–567, 2012.
- SIQUEIRA, R. A.; VERAS, J. M. L.; SOUSA, T. L. DE; FARIAS, P. M. DE; OLIVEIRA FILHO, J. G. DE; BERTOLO, M. R. V.; EGEA, M. B.; PLÁCIDO, G. R. Pequi mesocarp: a new source of pectin to produce biodegradable film for application as food packaging. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e71421, 6 jun. 2022.
- SOOD, A.; SAINI, C. S. Red pomelo peel pectin based edible composite films: Effect of pectin incorporation on mechanical, structural, morphological and thermal properties of composite films. **Food Hydrocolloids**, v. 123, p. 107135, 1 fev. 2022.
- SPATAFORA SALAZAR, A. S.; SÁENZ CAVAZOS, P. A.; MÚJICA PAZ, H.; VALDEZ FRAGOSO, A. External factors and nanoparticles effect on water vapor permeability of pectin-based films. **Journal of Food Engineering**, v. 245, p. 73–79, 1 mar. 2019.
- SUBAŞI, B. G.; JAHROMI, M.; CASANOVA, F.; CAPANOGLU, E.; AJALLOUEIAN, F.; MOHAMMADIFAR, M. A. Effect of moderate electric field on structural and thermo-physical properties of sunflower protein and sodium caseinate. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 67, p. 102593, 1 jan. 2021.
- SUCHETA; RAI, S. K.; CHATURVEDI, K.; YADAV, S. K. Evaluation of structural integrity and functionality of commercial pectin based edible films incorporated with

corn flour, beetroot, orange peel, muesli and rice flour. **Food Hydrocolloids**, v. 91, p. 127–135, 1 jun. 2019.

SUNDQVIST-ANDBERG, H.; ÅKERMAN, M. Sustainability governance and contested plastic food packaging – An integrative review. **Journal of Cleaner Production**, v. 306, p. 127111, 15 jul. 2021.

TRISTANTO, N. A.; CAO, W.; CHEN, N.; SURYOPRABOWO, S.; SOETAREDJO, F. E.; ISMADJI, S.; HUA, X. Pectin extracted from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel and its usage in edible film. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 133804, 1 set. 2024.

TURAN, O.; ISCI, A.; YILMAZ, M. S.; TOLUN, A.; SAKIYAN, O. Microwave-assisted extraction of pectin from orange peel using deep eutectic solvents. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 37, p. 101352, 1 fev. 2024.

VARGAS, C. G.; PONCE, N. M. A.; STORTZ, C. A.; FISSORE, E. N.; BONELLI, P.; OTÁLORA GONZÁLEZ, C. M.; GERSCHENSON, L. N. Pectin obtention from agroindustrial wastes of *Malus domestica* using green solvents (citric acid and natural deep eutectic solvents). Chemical, thermal, and rheological characterization. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, p. 1504582, 6 jan. 2024.

VARGHESE, S. A.; PULIKKALPARAMBIL, H.; PROMHUAD, K.; SRISA, A.; LAORENZA, Y.; JARUPAN, L.; NAMPITCH, T.; CHONHENCHOB, V.; HARNKARNSUJARIT, N. Renovation of Agro-Waste for Sustainable Food Packaging: A Review. **Polymers 2023, Vol. 15, Page 648**, v. 15, n. 3, p. 648, 27 jan. 2023.

WANDEE, Y.; UTTAPAP, D.; MISCHNICK, P. Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions. **Food Hydrocolloids**, v. 87, p. 237–244, 1 fev. 2019.

WANG, T.; TAO, Y.; LAI, C.; HUANG, C.; LING, Z.; YONG, Q. Influence of extraction methods on navel orange peel pectin: structural characteristics, antioxidant activity and cytoprotective capacity. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 58, n. 3, p. 1382–1393, 1 mar. 2023.

WEGRZYNOWSKA-DRZYMALSKA, K.; MLYNARCZYK, D. T.; CHELMINIAK-DUDKIEWICZ, D.; KACZMAREK, H.; GOSLINSKI, T.; ZIEGLER-BOROWSKA, M. Chitosan-Gelatin Films Cross-Linked with Dialdehyde Cellulose Nanocrystals as Potential Materials for Wound Dressings. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 17, p. 9700, 1 set. 2022.

WELDEAREGAY, S. G.; GADDALA, B.; FENTIE, E. G.; SUNDRAMURTHY, V. P.; PRIYA, L. S. Valorization of waste prickly pear peels: optimization for pectin extraction, characterization, and development of edible film. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1–23, 20 jun. 2024.

XIE, J.; ZHANG, Y.; KLOMKLAO, S.; SIMPSON, B. K. Pectin from plantain peels: Green recovery for transformation into reinforced packaging films. **Waste Management**, v. 161, p. 225–233, 15 abr. 2023.

YILMAZ-TURAN, S.; GÁL, T.; LOPEZ-SANCHEZ, P.; MARTINEZ, M. M.; MENZEL, C.; VILAPLANA, F. Modulating temperature and pH during subcritical water extraction tunes the molecular properties of apple pomace pectin as food gels and emulsifiers. **Food Hydrocolloids**, v. 145, p. 109148, 1 dez. 2023.

YIN, Y.; WOO, M. W. Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives. **Sustainable Food Technology**, v. 2, n. 3, p. 548–566, 24 maio 2024.

YOO, S.; DUGASANI, S. R.; JEON, S.; JEONG, J. H.; PARK, S. H. Chroma-hue controllable color and thermocolor-added deoxyribonucleic acid films. **Thin Solid Films**, v. 706, p. 138072, 31 jul. 2020.

YOUNIS, H. G. R.; ZHAO, G. Physicochemical properties of the edible films from the blends of high methoxyl apple pectin and chitosan. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 131, p. 1057–1066, 15 jun. 2019.

YU, L.; WEN, D.; TAN, M.; WANG, B.; WU, W.; ZHANG, Y. Physicochemical and structural properties of soluble dietary fibres in navel orange peel modified by superfine grinding and their immunomodulatory activities. **Food Chemistry Advances**, v. 5, p. 100752, 1 dez. 2024.

YU, M.; XIA, Y.; ZHOU, M.; GUO, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, Y. Effects of different extraction methods on structural and physicochemical properties of pectins from finger citron pomace. **Carbohydrate Polymers**, v. 258, 15 abr. 2021.

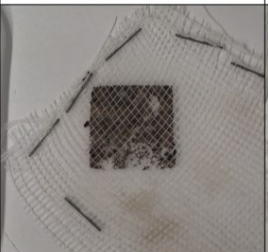
ZHANG, X.; CHEN, X.; DAI, J.; CUI, H.; LIN, L. Edible films of pectin extracted from dragon fruit peel: Effects of boiling water treatment on pectin and film properties. **Food Hydrocolloids**, v. 147, p. 109324, 1 fev. 2024.

ANEXO A – Composição dos filmes controle e blendas

Amostra	PISG (g)	Pectina (g)	Glicerol (mL) 1,5%	Água (mL)
F100-0	2,8	-	2,1	140
F80-20	2,24	0,56	2,1	140
F60-40	1,68	1,12	2,1	140
F40-60	1,12	1,68	2,1	140
F20-80	0,56	2,24	2,1	140
F0-100	-	2,8	2,1	140

Fonte: Elaborado pela autora. Nomenclatura: F (%proteína-%pectina)

ANEXO B - Fotografias da degradação em solo do filme Pec-pequi entre o 15º e 30º dia

AMOSTRA	Dia 15	Dia 20	Dia 25	Dia 30
Pec-pequi				

Fonte: Elaborado pela autora.