



UnB

Instituto de Química
Programa de Pós-Graduação em Química

DEFESA DE MESTRADO

**BIOPLÁSTICOS À BASE DE PECTINA E EXTRATO DE BAGAÇO DE
MALTE: UMA ABORDAGEM CIRCULAR PARA O SETOR
AGROINDUSTRIAL – DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO,
PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E ESTADO DA ARTE**

Sandy Chaves da Silva

Orientadora: Prof.^aDra. Grace Ferreira Ghesti

Brasília, DF
2024

**BIOPLÁSTICOS À BASE DE PECTINA E EXTRATO DE BAGAÇO DE MALTE:
UMA ABORDAGEM CIRCULAR PARA O SETOR AGROINDUSTRIAL –
DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO, PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA E
ESTADO DA ARTE**

SANDY CHAVES DA SILVA

Defesa de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade de Brasília como requisito para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora: Prof.^aDra. Grace Ferreira Ghesti

Brasília, DF
2024

Aos que me deram tempo, paciência e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que foi minha fonte de força e sabedoria, e me guiou com Sua luz durante cada passo desta jornada. Sem Sua orientação divina, não teria encontrado a coragem necessária para enfrentar os desafios e realizar este trabalho.

À minha mãe, Rosângela, cuja força, coragem e sabedoria foram faróis que iluminaram meu caminho e me incentivaram a ser uma mulher determinada e resiliente. Às minhas irmãs, Yasmin e Karoline, espero que minha caminhada sirva de exemplo e que, através dela, se abram caminhos e possibilidades para que vocês possam ser o que quiserem, com a mesma força e coragem que aprendi com nossa mãe.

Ao meu companheiro Fernando, que esteve ao meu lado nessa jornada. Seu amor, apoio e compreensão foram o alicerce que me sustentou nos dias mais árduos. Com você, cada conquista tem um sabor ainda mais doce, celebramos esta vitória, que é nossa. Tenho certeza de que muitas outras realizações e sonhos virão, e será uma honra compartilhá-los com você.

À minha orientadora, Profa. Dra. Grace Ferreira Ghesti que acreditou em meu potencial, oferecendo-me não apenas orientação, mas também confiança e oportunidade. Seu apoio foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e sou profundamente grata pela sua generosidade e dedicação. Ao Pesquisador Daniel e a Professora Izabel Cristina que me receberam em seu laboratório com tanto acolhimento e prontidão, compartilhando generosamente seus conhecimentos.

Às minhas amigas Jéssica e Emanuella, que tornaram a caminhada acadêmica mais leve e repleta de momentos de alegria. A presença de vocês foi um alento em momentos difíceis e uma fonte de grande inspiração.

A Universidade de Brasília, em especial o laboratório LMCerva e todos os seus integrantes, que me ofereceram apoio e trouxeram momentos de alegria durante essa jornada. A convivência e a colaboração de vocês tornaram o caminho mais leve e prazeroso.

A todos que caminharam ao meu lado, meu mais profundo e sincero agradecimento.

"Lendo a rota das estrelas."

Jorge Vercillo, *Ciclo*. 2005.

RESUMO

Este estudo abordou a urgência de alternativas sustentáveis aos polímeros derivados de combustíveis fósseis, com foco no desenvolvimento de bioplásticos comestíveis a partir do resíduo cervejeiro, especialmente o bagaço de malte. Essa solução não apenas reduziu o impacto ambiental do descarte de resíduos, mas também ofereceu soluções práticas para estender a vida útil dos alimentos, combatendo o desperdício na cadeia alimentar. Além disso, a pesquisa explorou a adição de pectina e óleos essenciais, como orégano e limão, aos bioplásticos comestíveis, visando propriedades antioxidantes e antibacterianas. A análise de tecnologias, artigos e patentes destacou o papel de países como China, Índia e Brasil, ressaltando a necessidade de inovações para aumentar a competitividade dos bioplásticos. O estudo contribuiu significativamente para a inovação na produção de bioplásticos comestíveis, integrando pectina e óleos essenciais, enquanto promoveu a sustentabilidade e a economia circular. Além disso, explorou o desenvolvimento e a análise de bioplásticos comestíveis produzidos a partir de pectina e glicerol, com a adição de extrato de bagaço de malte (EBM) e óleos essenciais (OEs) para avaliar suas propriedades antimicrobianas e biodegradabilidade. A análise térmica, realizada por calorimetria diferencial de varredura (DSC), revelou que a adição de EBM a 7,5 % reduziu significativamente a temperatura de transição vítrea dos filmes, indicando um efeito plastificante mais forte do que o glicerol sozinho. A caracterização térmica também evidenciou duas etapas principais de degradação dos filmes: uma associada à evaporação da água e outra à degradação simultânea de pectina e plastificante, com contribuições adicionais dos óleos essenciais. Os testes antimicrobianos demonstraram que o EBM e os óleos essenciais possuíam atividades inibitórias significativas, com o EBM apresentando alta eficácia e sinergismo positivo quando combinado com óleos essenciais. A análise da biodegradabilidade mostrou que todos os bioplásticos testados apresentaram boa capacidade de degradação, com as amostras contendo EBM e óleos essenciais se destacando pela maior perda de massa. Esses resultados sublinharam o potencial dos bioplásticos comestíveis para aplicações sustentáveis, indicando que a combinação de EBM com óleos essenciais poderia otimizar tanto as propriedades antimicrobianas quanto a biodegradabilidade dos filmes, reforçando a viabilidade desses materiais para uso em embalagens alimentícias.

Palavras-chave: Bioplásticos; Pectina; Óleos Essenciais; Economia Circular.

ABSTRACT

This study addressed the urgent need for sustainable alternatives to fossil fuel-derived polymers, focusing on the development of edible bioplastics from brewery waste, particularly malt husks. This solution not only reduced the environmental impact of waste disposal but also offered practical means to extend the shelf life of food, combating waste within the food supply chain. Additionally, the research explored the incorporation of pectin and essential oils, such as oregano and lemon, into the edible bioplastics to enhance antioxidant and antibacterial properties. The analysis of technologies, articles, and patents highlighted the roles of countries such as China, India, and Brazil, emphasizing the need for innovations to increase the competitiveness of bioplastics. The study significantly contributed to advancements in the production of edible bioplastics by integrating pectin and essential oils while promoting sustainability and the circular economy. It also examined the development and characterization of edible bioplastics made from pectin and glycerol, with the addition of malt husk extract (EBM) and essential oils (OEs) to evaluate their antimicrobial properties and biodegradability. Thermal analysis conducted through differential scanning calorimetry (DSC) revealed that the addition of EBM at 7.5% significantly reduced the glass transition temperature of the films, indicating a stronger plasticizing effect than glycerol alone. The thermal characterization further demonstrated two main degradation stages of the films: one associated with water evaporation and another linked to the simultaneous degradation of pectin and plasticizer, with additional contributions from essential oils. Antimicrobial tests showed that EBM and essential oils possessed significant inhibitory activities, with EBM exhibiting high efficacy and positive synergism when combined with essential oils. The biodegradability analysis indicated that all tested bioplastics exhibited good degradation capacity, with samples containing EBM and essential oils standing out due to the highest mass loss. These results underscored the potential of edible bioplastics for sustainable applications, indicating that the combination of EBM and essential oils could optimize both antimicrobial properties and biodegradability of the films, reinforcing the viability of these materials for use in food packaging.

Keywords: Bioplastics; Pectin; Essential Oils; Circular Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do fluxograma da produção de cerveja	20
Figura 2 - Classificação das patentes por área de aplicação.....	22
Figura 3 - Classificação dos processos de produção de polímeros biodegradáveis	25
Figura 4 - Estrutura hipotética da pectina	26
Figura 5 - Esquema integrado de gestão sustentável de resíduos na produção de cerveja.....	28
Figura 6 - Curva de crescimento típica de microrganismos em alimentos expressa em logaritmo.....	30
Figura 7 - Principais OEs importados pelo Brasil	31
Figura 8 - Estrutura química dos flavonóides característicos de <i>C. limon</i>	34
Figura 9 - Estrutura de carvacrol e timol.....	35
Figura 10 - Fluxograma de métodos para obtenção de dados de artigos e patentes.....	39
Figura 11 - Fluxograma de atividades da fase experimental.....	44
Figura 12 - Ilustração do método da microdiluição em placa de poliestireno de 96 poços	48
Figura 13 - (a) Número de patentes (preto) e artigos científicos (cinza) publicados por ano de 2002 a 2022; (b) Número de artigos publicados por país.....	53
Figura 14 - (a) Número de artigos publicados com diferentes matrizes poliméricas (b) Número de artigos publicados com diferentes óleos essenciais	55
Figura 15 - Estrutura molecular da quitina e quitosana.....	56
Figura 16 - Estrutura molecular do amido.....	56
Figura 17 - Número de artigos publicados no desenvolvimento de bioplásticos com o uso de: pectina (vermelho), óleo essencial de orégano (preto) e óleo essencial de limão (verde)	58
Figura 18 -Análise por categorias da Web of Science	61
Figura 19 - Análise das palavras-chaves dos artigos publicados	62
Figura 20 - Número de famílias de patentes registradas nos últimos 10 anos por países	65
Figura 21 - Categorias das famílias de patentes registradas.....	65
Figura 22 - Classes de patentes	66
Figura 23 - (a)Número de patentes registradas no INPI por palavra-chave (b) Número de patentes registradas no INPI por classe	68
Figura 24 - Cromatograma de massas (CG-MS) para o EBM	74
Figura 25 - DSC da amostra B1, B2, 10 L, 10 O e 17 OL	82
Figura 26 - Gráficos TGA e DTG para as amostras: B1, B2, 10 L, 10 O e 17 OL.....	84
Figura 27 - (a) Filmes posicionados na bandeja; (b) filmes enterrados com posições marcadas	90
Figura 28 - Filmes antes da secagem.....	92
Figura 29 - Filmes após secagem	93
Figura 30 - Observação do comportamento da amostra B1	94
Figura 31 - Observação do comportamento da amostra B2	95
Figura 32 - Observação do comportamento da amostra 10L	96
Figura 33 - Observação do comportamento da amostra 10O.....	97
Figura 34 - Observação do comportamento da amostra 17OL.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos trabalhos que utilizaram o bagaço de malte para produção de bioplástico.....	29
Tabela 2 - Pesquisa de artigos utilizando o <i>Web of Science</i> com as palavras-chave selecionadas	52
Tabela 3 - Autores mais relevantes no segmento dos bioplásticos comestíveis.....	63
Tabela 4 - Pesquisa das famílias de patentes no Orbit com as palavras-chave	64
Tabela 5 - Definição da classificação por CIP de acordo com o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) das subseções encontradas na Figura 22.....	67
Tabela 6 - Artigos classificados como os mais relevantes no âmbito dos bioplásticos comestíveis ativos.....	71
Tabela 7 - Composição centesimal do bagaço de malte	73
Tabela 8 - Lista de compostos identificados no cromatograma de massas do EBM.....	75
Tabela 9 - Teor de solubilidade dos filmes.....	80
Tabela 10 - Atividade biológica	86
Tabela 11 - Perda de massa dos filmes	90

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Quantidades de OE e EBM utilizados para produzir o bioplástico na Etapa 1 e 2	45
Quadro 2 - Teor de umidade dos filmes	76

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

BM	Bagaço de Malte
°C	Graus Celsius
CMI	Concentração Mínima Inibitória
CIP	Classificação Internacional de Patentes
EBM	Extrato de Bagaço de Malte
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
g	Gramas
h	Hora
mL	Mililitro
OE	Óleo Essencial
OEL	Óleo Essencial de Limão Siciliano
OEO	Óleo Essencial de Orégano
OEs	Óleos Essenciais
pH	Potencial Hidrogeniônico
WIPO	Organização Mundial da Propriedade Intelectual
WWF	Fundo Mundial da Natureza

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1 ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE.....	16
3.2 A ALIMENTAÇÃO BRASILEIRA E O DESPERDÍCIO ALIMENTAR.....	17
3.3 A INDÚSTRIA DA CERVEJA.....	18
3.3.1 Processo de fabricação de cerveja.....	19
3.4 BAGAÇO DE MALTE.....	21
3.5 PLÁSTICOS, BIOPLÁSTICOS E BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS ATIVOS.....	22
3.6 BIOPLÁSTICO COMESTÍVEL A BASE DE POLISSACARÍDEOS.....	25
3.7 Bioplásticos: avançando em direção a uma economia circular.....	27
3.8.1 Óleos essenciais e suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas.....	31
3.7.1.1 Óleo essencial de limão siciliano.....	32
3.7.1.2 Óleo essencial de orégano.....	34
3.9 PROSPECÇÃO E INOVAÇÃO.....	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 MATERIAIS.....	37
4.1.1 Reagentes.....	37
4.2 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA.....	38
4.2.1 Artigos científicos.....	38
4.2.2 Patentes.....	38
4.3 PRÉ-TRATAMENTO: SECAGEM, MOAGEM E GRANULOMETRIA.....	39
4.3.1 Secagem.....	39
4.3.2 Moagem.....	39
4.3.3 Granulometria.....	40
4.4 ANÁLISE CENTESIMAL.....	40
4.4.1 Teor de umidade.....	40
4.4.2 Teor de cinzas.....	40
4.4.3 Teor de proteína.....	41
4.4.4 Teor de lipídios.....	41
4.4.5 Teor de fibras.....	42
4.5 EXTRATO DE BAGAÇO DE MALTE (EBM).....	42
4.5.1 Preparação e extração do bagaço de malte.....	42

4.5.2 Caracterização do EBM	43
4.6 PREPARO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS	43
4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS	46
4.7.1 Umidade	46
4.7.2 Solubilidade.....	46
4.7.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	47
4.7.4 termogravimetria derivada (TG/DTG).....	47
4.7.5 Atividade biológica	47
4.7.5.1 Microdiluição em placa de poliestireno de 96 poços.....	47
4.7.5.2 Teste de Disco-Difusão.....	49
4.7.6 Biodegradabilidade.....	50
4.7.7 Aplicação do bioplásticos como revestimento alimentar	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	52
5.2 PATENTES	64
5.3 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO BAGAÇO DE MALTE E CARACTERIZAÇÃO.....	73
5.3.1 Caracterização do extrato de bagaço de malte	74
5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS ATIVOS.....	76
5.4.1 Umidade	76
5.4.2 Solubilidade.....	79
5.4.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	81
5.4.5 Termogravimetria (DTG).....	83
5.4.6 Atividade biológica	85
5.4.6.1 Microdiluição.....	85
5.4.6.2 Teste de Disco-Difusão.....	89
5.4.7 Biodegradabilidade.....	90
5.4.8 Uso dos bioplásticos comestíveis ativos como revestimento.....	92
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	100
7 REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais associados aos materiais poliméricos à base de combustíveis fósseis tem levado à busca por alternativas que promovam uma economia circular. Os plásticos convencionais, embora versáteis, são responsáveis por significativos problemas de poluição e acúmulo de resíduos (Atiwesh *et al.*, 2021).

A dependência de materiais petrolíferos, que enfrentam desafios sérios em termos de reciclagem, intensifica a necessidade de soluções sustentáveis (Lauer & Smith, 2020). Nesse cenário, os bioplásticos biodegradáveis, derivados de fontes renováveis, emergem como uma alternativa promissora que pode não apenas reduzir o impacto ambiental, mas também propagar práticas sustentáveis no setor agroindustrial (Lambert; Wagner, 2017; Mohanty *et al.*, 2002).

Particularmente no setor alimentar, que gera grandes volumes de resíduos orgânicos, a implementação de bioplásticos pode ajudar a integrar as cadeias alimentares e energéticas, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável (Sganzerla *et al.*, 2021; Shanmugam *et al.*, 2021). Essa abordagem não só melhora a produtividade, mas também minimiza desperdícios, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, a promoção de bioplásticos biodegradáveis é essencial para mitigar o problema global dos resíduos plásticos e estimular a transição para materiais mais ecológicos (Mohanty *et al.*, 2000).

Esses materiais não apenas podem oferecer propriedades antimicrobianas que prolongam a vida útil dos alimentos, mas também podem desempenhar um papel crucial na segurança e qualidade durante o transporte (Mohanty *et al.*, 2002; Ncube *et al.*, 2020). A pectina, devido às suas características biocompatíveis e biodegradáveis, é promissora para a produção de filmes comestíveis (Espitia *et al.*, 2014). Adicionalmente, a incorporação de óleos essenciais, seguros e eficazes contra microrganismos, representa uma alternativa viável aos aditivos sintéticos, bem como o uso de extratos vegetais, como o extraído do bagaço de malte (Nisar *et al.*, 2018).

Esses avanços são fundamentais para a transição para práticas mais sustentáveis na indústria alimentícia e de embalagens. Portanto, esta pesquisa busca contribuir para a inovação na produção de bioplásticos comestíveis que possuam características antioxidantes e antibacterianas, atendendo às necessidades da indústria, promovendo a segurança alimentar e fomentando a economia circular ao reduzir o desperdício.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem por objetivo a produção de um bioplástico comestível para o revestimento alimentar mediante a utilização do extrato de bagaço de malte como substrato primário, sendo esse um resíduo cervejeiro. Com o produto visa-se à extensão do período de conservação de frutas e hortaliças e, simultaneamente, fomentar princípios da economia circular na cadeia agroalimentar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a prospecção tecnológica e uma revisão sistemática a respeito dos bioplásticos comestíveis a fim de avaliar a sua eficiência e utilização;
- Realizar o pré-tratamento do bagaço de malte, como: secagem, moagem e granulometria e caracterizar o bagaço de malte após o pré-tratamento por análise de umidade, cinzas, proteína, lipídios e fibras;
- Obter o extrato do bagaço de malte e caracterizá-lo por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (CG/MS);
- Preparar os bioplástico com extrato de bagaço de malte e diferentes óleos essenciais usando a metodologia adaptada de Lukda (2022);
- Caracterizar os bioplásticos obtidos por Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG), Umidade, Solubilidade, Atividade Biológica e Biodegradabilidade;
- Avaliar a influência das diferentes concentrações de extrato de bagaço de malte e óleo essencial para determinar a que melhor atende o objetivo proposto;
- Comparar os óleos essenciais de acordo com suas características físico-químicas e biológicas para determinar o mais adequado para o objetivo proposto;
- Avaliar o melhor bioplástico formado e aplicá-lo no revestimento de frutas para observar a sua interação com o alimento e o tempo de validade do mesmo, com ou sem o bioplástico produzido.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE

Evidencia-se um notório e acelerado crescimento populacional, com um aumento de 121% apenas no período compreendido entre 1970 e a última década. Simultaneamente, à medida que a sociedade avança em suas conquistas tecnológicas, expansão territorial, aumento na produção de bens de consumo e aquisição de novos conhecimentos, observa-se uma concomitante intensificação da demanda por uma produção cada vez mais substancial de bens de consumo e o setor produtivo concentra seus esforços em satisfazer as crescentes necessidades de uma população em constante expansão e cada vez mais exigente, atendendo-se ainda para os impactos ambientais causados dentro desse cenário (Weetman, 2019).

A busca por inovações impulsionou as empresas a ampliar sua produção, resultando em um agravamento da escassez de recursos. De acordo com dados do World Wildlife Fund - WWF, nos últimos 50 anos, a biodiversidade global experimentou uma redução de 69%, com um aumento ainda mais significativo nos países da América Latina. Esse declínio está fortemente correlacionado com a exploração excessiva dos recursos naturais e sua má gestão (World Wildlife Fund, 2023).

Para isso, é crucial adotar novas abordagens na produção, consumo e gestão de resíduos na cadeia produtiva. De acordo com Abdalla e Sampaio (2018), a Economia Circular busca a internalização de soluções eficazes na indústria, promovendo o envolvimento de indivíduos, governos e a implementação de políticas públicas, comportamento em pesquisa e sensibilização da necessidade de uma mudança significativa no social em relação ao consumo de bens. Isso contrasta com o sistema predominante da Economia Linear, que segue o paradigma de “extrair-produzir-descartar”.

A Economia Circular também enfatiza a estabilidade da economia local, a geração de novos empregos e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do uso excessivo de recursos e descarte inadequado, tornando-a muito mais ampla, uma vez que alarga a cadeia produtiva, incluindo todo o ciclo de vida do produto, ou seja, do berço ao túmulo. Essa visão ampliada inclui o reuso, reaproveitamento, novas rotas de produção, desenvolvimento de novos produtos e novas tecnologias, dando assim um novo ciclo aos resíduos (Abdalla; Sampaio, 2018; Tiozzi; Simon, 2021).

Dessa forma, empresas dedicadas à produção de bens e serviços estão progressivamente incorporando medidas sustentáveis em suas estratégias empresariais e na administração de suas operações. Profissionais do setor visualizam a economia circular como uma abordagem destinada a reconfigurar os procedimentos de produção, visando estimular transformações industriais regenerativas que culminarão na consecução de práticas de produção e consumo sustentáveis, além de contribuir para o fomento de crescimento econômico de natureza sustentável (Tiozzi; Simon, 2021).

3.2 A ALIMENTAÇÃO BRASILEIRA E O DESPERDÍCIO ALIMENTAR

A sociedade contemporânea enfrenta transformações em seus hábitos alimentares e padrões de vida, impulsionados pelo crescimento populacional e urbanização. Esses fatores resultaram em um aumento significativo no desperdício de alimentos, a *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)* estimou o descarte de aproximadamente 1,3 bilhão de toneladas de alimentos anualmente em escala global. Dessas perdas, 46% ocorrem nas etapas de processamento, distribuição e consumo, incluindo restaurantes, onde grandes quantidades de alimentos são descartadas devido a desvios dos padrões de qualidade (Dos Santos *et al.*, 2018; Fonseca, 2018; Santos *et al.*, 2020).

O Brasil não é exceção a essa problemática, desperdiçando 26,3 milhões de toneladas de alimentos anualmente. Essas perdas ocorrem principalmente durante a produção, pós-colheita e processamento, devido a ineficiências na cadeia de suprimentos e infraestrutura deficientes, bem como ao descarte deliberado de alimentos. O desperdício, por outro lado, envolve o descarte intencional de alimentos ainda próprios para consumo humano, muitas vezes devido à sua aparência externa (Fonseca, 2018; Santos *et al.*, 2020).

Reduzir o desperdício de alimentos é a forma mais sustentável de diminuir perdas de recursos naturais. E reduzir o desperdício de alimentos pela metade *per capita* mundial, em nível de varejo e do consumidor, é uma das metas relacionadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável aprovados pelas Nações Unidas. Esta meta consiste em diminuir as perdas de alimentos em toda a rede alimentar, desde a produção à distribuição, abrangendo ainda as perdas pós-colheita, até 2030 (Santos *et al.*, 2020).

Os bioplásticos comestíveis desempenham um papel vital nesse contexto, pois oferecem uma solução sustentável para embalar e conservar frutas e hortaliças. Esses materiais, seguros para consumo humano, podem ser usados para revestir ou embalar produtos agrícolas, auxiliando na extensão de sua vida útil, preservação de qualidade e redução de resíduos. Além disso, os bioplásticos apresentam-se como uma alternativa mais ecológica em relação aos plásticos tradicionais, que são poluentes e prejudiciais para problemas ambientais.

A cadeia agroalimentar abrange uma série de etapas, desde a plantação, colheita, processamento, logística de distribuição, chegando aos supermercados ou locais de venda e, por fim, aos consumidores. No entanto, no caso de frutas e hortaliças, que são alimentos minimamente processados, a vida útil é notavelmente curta em comparação com alimentos processados e ultraprocessados, o que aumenta ainda as chances desses alimentos serem desperdiçados.

Uma abordagem viável é utilizar os resíduos da produção de cerveja para desenvolver bioplásticos comestíveis que apresentem atividade antioxidante e antibacteriana. A pesquisa e o desenvolvimento desses bioplásticos são importantes para enfrentar o desperdício de alimentos, ajudando a reduzir a perda de recursos naturais e promovendo práticas sustentáveis na produção e consumo de alimentos, contribuindo assim para uma cadeia agroalimentar mais circular.

3.3 A INDÚSTRIA DA CERVEJA

A cerveja, uma bebida com uma história que se estende por pelo menos 8.000 anos, não apenas desempenhou um papel crucial na cultura e na alimentação ao longo da história, mas também foi uma força motriz na disseminação de conhecimento e intercâmbio cultural. Durante a Idade Média, a cerveja já era uma presença comum nas mesas familiares, muitas vezes enriquecida com uma variedade de ervas e especiarias para conferir sabores distintos e, em alguns casos, atributos medicinais. Esse legado histórico e cultural da cerveja continua a ser uma parte significativa da nossa herança, refletindo-se na diversidade de cervejas que apreciamos atualmente (Bernardi *et al.*, 2019).

Por definição, a cerveja é resultado da fermentação com levedura de cerveja, mosto de cevada e extrato de malte. Esses ingredientes são submetidos a um processo de cocção e,

posteriormente, recebe a adição de lúpulo. É relevante destacar que uma parte do mosto de cevada e do extrato de malte pode ser substituída por aditivos cervejeiros, como arroz, milho e trigo (Brasil, 2019, p.7).

O setor cervejeiro brasileiro é um dos principais geradores de empregos, com cerca de 2,7 milhões de postos de trabalho, demonstrando um crescimento notável que supera a média da indústria nacional. A cada novo emprego criado em uma cervejaria, outros 52 empregos são gerados na cadeia produtiva, de acordo com relatórios da Fundação Getúlio Vargas (FGV) (FGV *apud* CERVBrasil, 2014). Além disso, o setor contribui com aproximadamente 2 % do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, sendo o terceiro maior fabricante mundial, com 15,4 bilhões de litros produzidos (CERVBrasil, 2023; SINDICERV, 2017).

Em 2022, o Brasil registrou 180 novos estabelecimentos, um aumento de 11,6 % em relação ao ano anterior, quando havia 1.383 cervejarias. A distribuição geográfica das cervejarias mostra uma concentração significativa nas regiões Sul e Sudeste, sendo o estado de São Paulo o líder em número de cervejarias. Na região Nordeste houve um aumento de 7,1 % das cervejarias, enquanto a região Centro-Oeste se mantém estável no seu número de estabelecimentos registrados, sendo responsável por 5,1 % do mercado brasileiro. Com isso, a presença de cervejarias em municípios brasileiros aumentou para 722 em comparação com 672 em 2021, representando um aumento de 7,4 % na dispersão geográfica (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2022).

Outro ponto de destaque é o aumento também do consumo de cervejas artesanais. No Distrito Federal, a pioneira a obter autorização legal para comercializar seus produtos nas principais lojas e empórios da região foi a Stadt Bier. Juntamente com ela, outras microcervejarias, como a Jinbeer Cervejaria Artesanal, Máfia Beer, Micro X e Corina, entre outras, também ingressaram no cenário cervejeiro (Assoni, 2018).

3.3.1 Processo de fabricação de cerveja

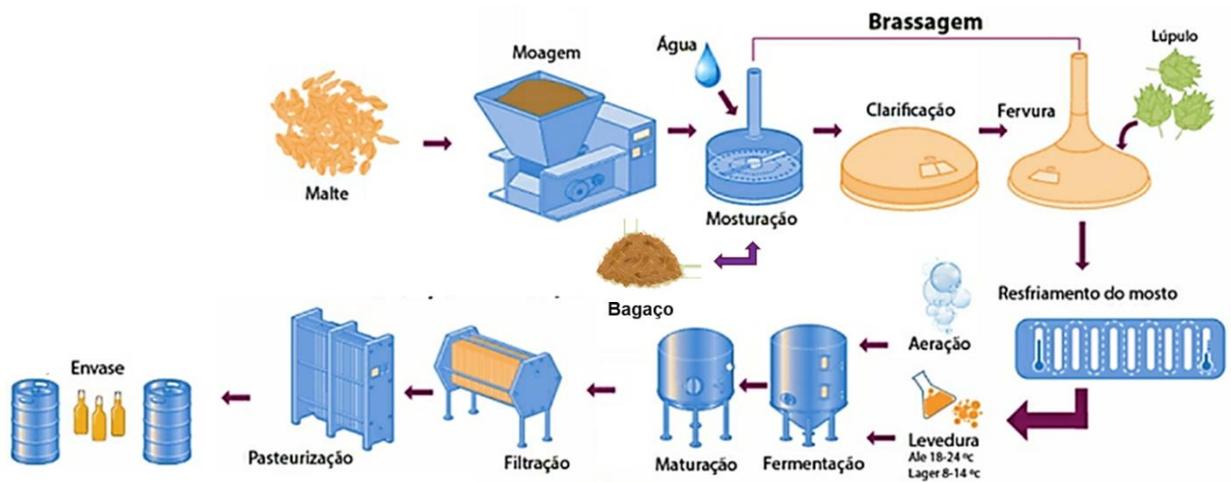
Inicialmente, no processo de fabricação de cerveja ocorre o processo germinativo dos grãos do cereal escolhido, que implica na hidratação dos grãos para a germinação das sementes, e durante esse processo, diversas enzimas características do malte são produzidas.

Posteriormente, o malte é separado em malte propriamente dito e radículas, formadas durante a germinação. As radículas são destinadas à preparação de alimentos para animais, enquanto o malte finalizado é transportado às indústrias cervejeiras para utilização, e irá influenciar diretamente o teor alcóolico, a formação de espuma e em parte do sabor e do aroma das cervejas (Coelho *et al.*, 2020).

O processo de produção da cerveja é dividido em duas fases essenciais. A primeira, denominada etapa quente, compreende a sala de brassagem, onde ocorrem processos como mosturação, filtração e fervura. A segunda fase, conhecida como etapa fria, engloba a fermentação e a maturação, como ilustrado na Figura 1 (Ghesti *et al.*, 2018).

A etapa de mosturação consiste no cozimento do malte, que é misturado com água e adjuntos já moídos. Durante esse processo, o amido presente no malte é transformado em açúcar, resultando em um líquido espesso e turvo chamado mosto. Esse mosto é submetido a um processo de filtração para separar o bagaço da cevada do líquido rico em açúcares. (Coelho *et al.*, 2020).

Figura 1- Ilustração do fluxograma da produção de cerveja



Fonte: Ghesti *et al.*(2018) com adaptação.

Após retirada do bagaço, o lúpulo é adicionado, conferindo à cerveja seu característico sabor amargo. Em seguida, o mosto é resfriado e segue para as etapas subsequentes de fermentação, maturação, filtração, pasteurização e envase.

3.4 BAGAÇO DE MALTE

A indústria da cerveja tem visto um crescimento notável, o setor mostra números exponenciais e do início do século XX até os dias atuais o número de cervejarias já cresceu mais de 4000 %, de acordo com o Anuário da Cerveja de 2022 (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2022). Porém, esta produção significativa resulta também na produção significativa de resíduos cervejeiros, especialmente bagaço de malte ou BSG (sigla do inglês “*brewer’s spent grain*”), que representa cerca de 85 % deste volume (Sganzerla *et al.*, 2021; Castro; Meurer; Colpini, 2021).

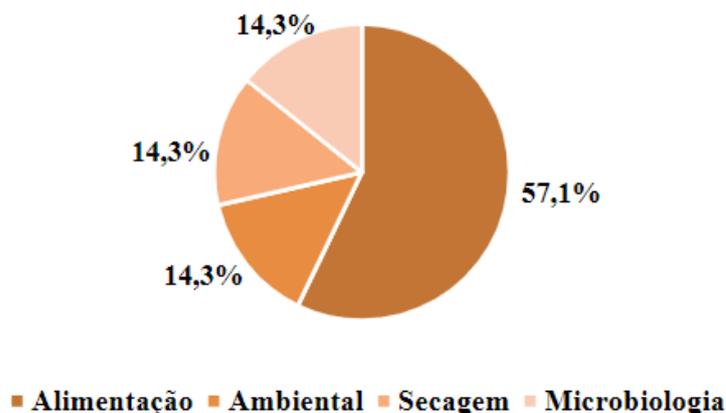
Estima-se ainda que para cada 100 litros de cerveja fabricada sejam produzidos cerca de 20 kg de bagaço com 70% a 80 % de umidade. Isso significa que a produção anual de bagaço do Brasil pode ser calculada em aproximadamente 2,8 milhões de toneladas de peso úmido ou, em média, 0,71 milhões de toneladas do resíduo seco, sendo a sua composição diversa devido à variedade de tipos comerciais e aos diferentes processos de fabricação de cerveja existentes. Geralmente, sua composição inclui celulose (16,8 %-20,6 %), hemiceluloses (18,4 % -28,4 %), lignina (9,9 % -27,8 %), proteínas (15,3 % -26,6 %), extrativos (5,2% - 5,8 %) e cinzas (2,7% - 4,6 %) (Sganzerla *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2021; Massardi *et al.*, 2020).

A produção de bagaço segue a tendência de crescimento exponencial do mercado de cerveja no Brasil, suscitando preocupações adicionais sobre seu destino. O bagaço está prontamente disponível em cervejarias de vários tamanhos e a um preço acessível durante todo o ano, sendo a maior parte desse volume direcionada para a alimentação de animais, incluindo bovinos, suínos, aves e caprinos (Evaristo *et al.*, 2023). Além disso, existem pesquisas que avaliam o potencial dessa inclusão na dieta desses animais, como aponta Carvalho *et al.* (2021). Mas apesar das vantagens nutricionais, o uso do bagaço de malte na alimentação animal apresenta desafios, incluindo dificuldades de armazenamento, devida a alta umidade, que pode causar, por exemplo, a contaminação por microrganismos, trazendo assim problemas de saúde em bovinos, levando à redução dessa aplicação e à busca por alternativas de reaproveitamento (Carvalho *et al.*, 2021; Massardi *et al.*, 2020).

O estudo realizado por Tombini *et al.* (2021) avaliou a capacidade inovadora e a propriedade intelectual relacionada ao uso do bagaço de malte em diferentes áreas. Os resultados da prospecção tecnológica revelaram que, das 14 patentes analisadas, a maioria delas (57,1% do total) está relacionada à aplicação do bagaço de malte na alimentação, tanto humana

quanto animal, enquanto as demais estão distribuídas em outros eixos, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Classificação das patentes por área de aplicação



Fonte: Tombini *et al.*, 2021.

Já Evaristo *et al* (2023), identificou em seus estudos que existem outras aplicações para o bagaço de malte, além da destinação para a alimentação animal, como: o uso para a produção de gás de síntese por gaseificação; pirólise; produção de bioetanol e biobutano; produção de enzimas; hidrólise enzimática; obtenção de celulose e derivados; biogás, e na elaboração de materiais poliméricos.

No entanto, o Brasil enfrenta o desafio de gerenciar adequadamente esse resíduo, ao mesmo tempo em que expande vigorosamente sua indústria cervejeira. A busca por soluções sustentáveis para o reaproveitamento do bagaço de malte está se mostrando uma oportunidade significativa para mitigar o impacto ambiental e promover uma economia circular dentro desse setor.

3.5 PLÁSTICOS, BIOPLÁSTICOS E BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS ATIVOS

Polímeros são macromoléculas orgânicas de alta massa molar, variando entre 10^4 e 10^6 g/mol, compostas por unidades estruturais repetitivas, chamadas meros, ao longo de suas cadeias. Essas macromoléculas são formadas pela união de pequenos monômeros, e sua classificação pode ser feita de acordo com diversos critérios, como origem, quantidade de monômeros, método de produção, estrutura química, configuração, encadeamento,

comportamento mecânico, grau de cristalinidade, entre outros (Mano; Mendes, 1999; Canevarolo JR, 2002).

No que se refere à origem, os polímeros podem ser categorizados em naturais e sintéticos. Polímeros naturais são aqueles encontrados na natureza, sem intervenção humana. Já os sintéticos ou artificiais são produtos de processos laboratoriais, geralmente derivados de transformações químicas em matérias-primas naturais, visando atender à demanda industrial em larga escala (Akcelrud, 1969).

Quanto ao número de monômeros envolvidos, os polímeros podem ser divididos em homopolímeros e copolímeros. Homopolímeros são formados por um único tipo de monômero, como é o caso do polietileno (PE). Por outro lado, copolímeros consistem em mais de um tipo de monômero, como a borracha sintética SBR, que é composta de estireno e butadieno (Gorni, 2002).

As propriedades dos polímeros variam bastante, podendo apresentar desde grande flexibilidade até rigidez, além de características como permeabilidade ou impermeabilidade, hidrofília ou hidrofobicidade. A maioria dos plásticos comerciais são termoplásticos, que podem ser remodelados por aquecimento, como aqueles usados em garrafas e tecidos. Entretanto, alguns polímeros, durante o processamento, tornam-se reticulados, formando materiais termofixos que não sofrem alterações com o calor, como os usados em pneus e resinas epóxi, essa versatilidade dos polímeros, embora vantajosa do ponto de vista funcional, traz desafios significativos no que se refere ao descarte e ao impacto ambiental (Rosenboom *et al.*, 2022; Maraveas, 2020; Atiwesh *et al.*, 2021).

Ao avaliar o comportamento mecânico, os polímeros podem ser classificados em plásticos, elastômeros e fibras. Algumas propriedades mecânicas relevantes para o desenvolvimento de novas tecnologias incluem alta flexibilidade, resistência a impactos e desempenho em baixas temperaturas, fatores que contribuem para a redução dos custos de processamento. Além disso, a adição de cargas não só diminui o custo do material, mas também melhora sua resistência mecânica (Mano; Mendes, 1999; Canevarolo JR, 2002).

Dada essa classificação, os polímeros podem ser transformados em plásticos, fibras e elastômeros. Isso indica que todos os plásticos são polímeros, e não é difícil encontrar objetos plásticos em nosso cotidiano. A produção global de plásticos já ultrapassa 400 milhões de

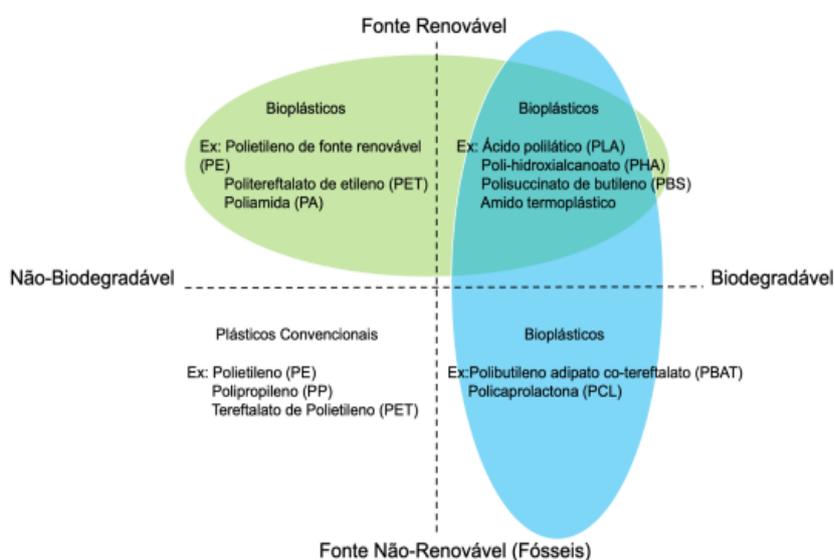
toneladas de resíduos anuais, crescendo a uma taxa de 4 % ao ano. Desde meados do século XX, mais de 6,3 bilhões de toneladas de resíduos plásticos foram gerados, e espera-se que esse número quadruplique até 2050 (OECD, 2020). Isso demonstra a insustentabilidade do modelo linear tradicional, que envolve a extração de recursos, produção, uso e descarte.

Neste contexto, os bioplásticos despontam como uma inovação promissora, especialmente no setor de embalagens. Ao contrário dos plásticos convencionais, derivados de fontes fósseis e de decomposição extremamente lenta, grande parte dos bioplásticos são produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como biomassa, e oferecem um ciclo de vida mais sustentável, sendo em muitos casos biodegradáveis (Rosenboom *et al.*, 2022; Maraveas, 2020; Karan *et al.*, 2019).

Segundo a *European Bioplastics*, um material plástico é classificado como bioplástico quando possui base biológica, é biodegradável, ou apresenta ambas as características. No caso de ser de base biológica, o termo implica que o material ou produto é, pelo menos parcialmente, derivado de biomassa, como milho, cana-de-açúcar ou celulose. A biomassa utilizada na produção de bioplásticos provém de fontes vegetais. A biodegradação, por sua vez, é um processo químico no qual microrganismos presentes no ambiente convertem os materiais em substâncias naturais, como água, dióxido de carbono e compostos, sem a necessidade de aditivos artificiais. Vale ressaltar que a eficácia desse processo está sujeita às condições ambientais, como localização e temperatura, além das características específicas do material e sua aplicação (European Bioplastics-EUBP, 2023).

É crucial destacar que o termo 'de base biológica' não deve ser confundido com 'biodegradável'. A propriedade de biodegradação não está estritamente ligada à origem dos recursos do material, mas sim à sua estrutura química. Em outras palavras, plásticos totalmente derivados de biomassa podem não ser biodegradáveis, ao passo que plásticos totalmente fósseis podem apresentar essa propriedade. Assim, a biodegradabilidade não é determinada pela base de recursos do material, mas sim por sua composição química específica (European Bioplastics-EUBP, 2023).

Figura 3 - Classificação dos processos de produção de polímeros biodegradáveis



Fonte: Maraveas, (2020).

Os bioplásticos de base biológica e obtidos através de fontes renováveis, estão em desenvolvimento como alternativas que mantêm as propriedades benéficas dos plásticos petroquímicos, e que permitem ao mesmo tempo a transição para uma economia circular, reduzindo a dependência de recursos fósseis e minimizando os impactos ambientais ao final de sua vida útil (Bispo *et al.*, 2021). A deterioração desses bioplásticos é influenciada pelo grau de exposição à radiação UV, que pode desencadear foto-oxidação, pela degradação térmica causada pelo calor, pelo potencial de dissolução em água e pela resistência mecânica em aplicações de alta intensidade. Existem diversas alternativas disponíveis para o tratamento do fim de vida desses polímeros biodegradáveis, incluindo a reciclagem doméstica, a compostagem industrial, a despolimerização enzimática, a reciclagem catalítica, a reciclagem química, a reciclagem mecânica e a digestão anaeróbica (Maraveas, 2020).

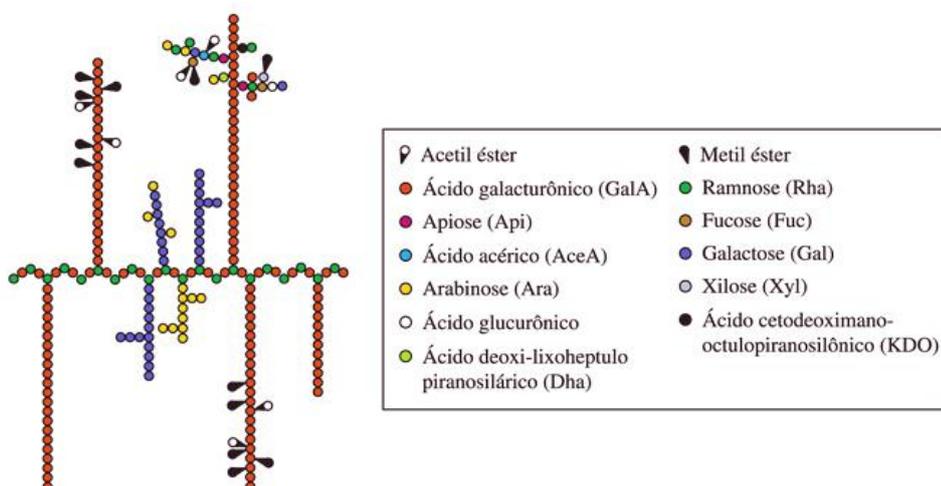
3.6 BIOPLÁSTICO COMESTÍVEL A BASE DE POLISSACARÍDEOS

Um bioplástico comestível é uma fina camada de material comestível que serve como proteção para os alimentos e pode ser consumida junto com eles. Em síntese, os filmes são estruturas autônomas pré-fabricadas e aplicadas posteriormente aos alimentos, enquanto os revestimentos comestíveis são formados diretamente na superfície dos alimentos (Otoni *et al.*, 2017; Galus *et al.*, 2020).

Os hidrocolóides, como polissacarídeos e proteínas, são os biopolímeros mais comuns usados na fabricação desses materiais comestíveis, sendo obtidos de fontes naturais, como plantas, animais ou microrganismos. Exemplos populares de polissacarídeos incluem celulose, amido, alginatos, pectinas, quitosana, pululano e carrageninas, enquanto proteínas como proteínas de soja, glúten de trigo, zeína de milho, proteínas de girassol, gelatina, soro de leite, caseína e queratina são amplamente utilizadas (Galus *et al.*, 2020; Coppola, 2021).

A pectina é uma macromolécula altamente complexa presente nas células vegetais. São formadas por dezessete diferentes monossacarídeos, organizados em polissacarídeos distintos, formando assim uma rede quando unidos, como representado na Figura 4 (Canteri *et al.*, 2012). Além de sua presença natural nos alimentos, a pectina é considerada segura para consumo e é frequentemente utilizada na indústria de alimentos como um agente gelificante, estabilizante e espessante em produtos como geleias (Espitia *et al.*, 2014; Otoni *et al.*, 2017).

Figura 4 - Estrutura hipotética da pectina



Fonte: Willats., *et al* (2006) adaptado por Canteri *et al.*, (2012).

Para criar filmes comestíveis à base de pectina, diversos métodos podem ser empregados, incluindo, imersão, pulverização ou revestimento (Maraveas, 2020; Galus *et al.*, 2020). Além disso, é possível formular esses materiais combinando várias substâncias formadoras de filme, como plastificantes, sendo os mais comuns o glicerol e o sorbitol, agentes de reticulação, emulsionantes, antioxidantes e reforços, a fim de aprimorar suas propriedades físicas, mecânicas e de barreira.

Esses revestimentos são frequentemente aplicados em frutas e vegetais devido à sua natureza perecível, o que impacta significativamente a qualidade durante o armazenamento. Os bioplásticos geram uma quantidade reduzida de gases de efeito estufa em comparação com os plásticos convencionais durante sua vida útil. Isso faz com que os bioplásticos desempenhem um papel na promoção de uma sociedade mais sustentável (Coppola, 2021).

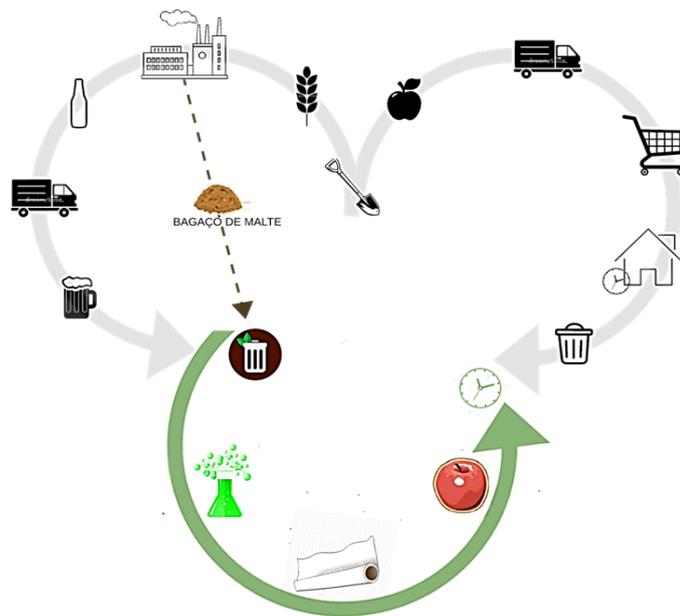
3.7 Bioplásticos: avançando em direção a uma economia circular

Na cadeia produtiva da cerveja, após o processamento dos grãos, ocorre um descarte substancial de biomassa. Este material orgânico, rico em nutrientes, é frequentemente eliminado sem reaproveitamento, contribuindo para um ciclo linear de resíduos. Esse processo gera volumes significativos de material orgânico que poderiam ser melhor aproveitados. Por outro lado, na cadeia de frutas e hortaliças, o desperdício ocorre em várias etapas, desde a colheita até o consumo doméstico. Frutas e vegetais frequentemente são descartados devido a problemas de aparência, maturação inadequada ou deterioração durante o transporte e armazenamento.

A integração dos bioplásticos comestíveis nessa cadeia oferece uma visão inovadora e mais amplas para esses problemas, promovendo um ciclo mais sustentável. Os bioplásticos comestíveis, produzidos a partir de bases poliméricas de fonte renovável e enriquecidos de aditivos como o bagaço de malte, têm o potencial de reduzir significativamente o desperdício tanto na indústria cervejeira quanto na cadeia de frutas e hortaliças. Esses bioplásticos podem ser usados para criar revestimentos protetores para frutas, prolongando sua vida útil e reduzindo a quantidade de produtos descartados devido à deterioração. Ao mesmo tempo, o reaproveitamento do bagaço de malte para a produção desses bioplásticos fecha o ciclo de resíduos da produção de cerveja, transformando um subproduto que normalmente seria descartado em um material útil e sustentável.

Essa integração não só contribui para a redução de resíduos e melhora a sustentabilidade das cadeias produtivas, mas também promove a economia circular ao transformar subprodutos em novos recursos. A Figura 5 ilustra como a aplicação de bioplásticos comestíveis pode fechar o ciclo de produção e consumo, mostrando uma solução prática e eficiente para mitigar o desperdício e melhorar a sustentabilidade nas cadeias produtivas envolvidas

Figura 5 - Esquema integrado de gestão sustentável de resíduos na produção de cerveja



Fonte: A autora.

Esses bioplásticos podem ser aplicados para revestir alimentos, prolongando sua vida útil, e essa aplicação pode ocorrer tanto nas residências dos consumidores, quanto no pós-colheita, minimizando as perdas durante o transporte, pois os bioplásticos formam uma barreira física, química e biológica. A integração desses dois contextos representa uma abordagem mais sustentável na gestão de resíduos e no aproveitamento de biomassa para a produção de bioplásticos comestíveis.

Na Tabela 1 a seguir é possível notar a escassez de estudos sobre bioplásticos com adição de bagaço de malte. Dentre os trabalhos identificados, os pesquisadores empregaram o amido de mandioca como polissacarídeo, variando concentrações entre 3 % e 8 %, e o glicerol como plastificante, mantendo-o a uma concentração constante de 20 %. É notável que o BM foi empregado de duas maneiras distintas: como reforço, utilizando suas fibras, conforme abordado por Mendes *et al.* (2020), e como extrato na formulação dos bioplásticos, conforme investigado por Ludka *et al.* (2020) e Vieira *et al.* (2022). Contudo, é relevante destacar que nenhum dos estudos mencionados direcionou o bioplástico resultante para aplicação em revestimento alimentar; eles apenas exploraram a viabilidade do BM para esse propósito.

Tabela 1 - Resumo dos trabalhos que utilizaram o bagaço de malte para produção de bioplástico

Polissacarídeo	PL	Biomassa	OE	Aplicação	Referência
Amido de Mandioca	Glicerol	Fibra do BM	-	-	Mendes <i>et al.</i> , 2020
Amido de Mandioca	Glicerol	Extrato de BM	-	-	Lukda <i>et al.</i> , 2020
Amido de Mandioca	Glicerol	Extrato de BM	-	Revestimento de Queijo	Vieira <i>et al.</i> , 2022
Amido de Mandioca	Glicerol	Farinha de BM	-	-	Rodrigues <i>et al.</i> , 2022
Pectina	Glicerol	Extrato de BM	OEO OEL	Revestimento de Morango	A autora

PL= Plastificante; OE=Óleo Essencial; OEO= Óleo Essencial de Orégano; OEL= Óleo Essencial de Limão Siciliano.

Fonte: A autora.

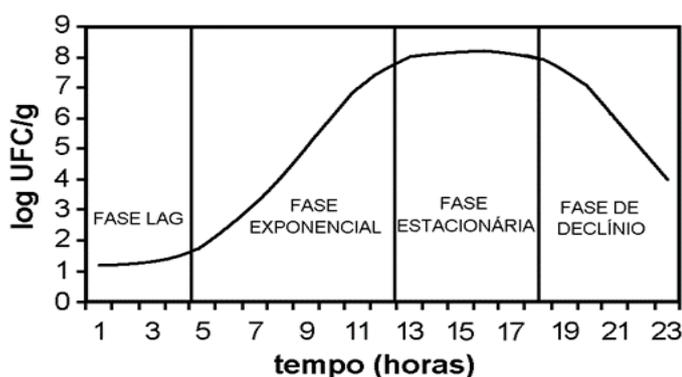
A ausência de incorporação de óleos essenciais é uma lacuna notável, considerando o potencial desses aditivos para conferir propriedades antioxidantes e antimicrobianas aos bioplásticos. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma abordagem inovadora ao incorporar óleos essenciais de orégano e limão siciliano nas formulações de bioplásticos derivados de BM. Além disso, diferenciando-se dos estudos analisados, este estudo buscou não apenas explorar a viabilidade desses bioplásticos para aplicações em revestimento alimentar, mas também aplicar prontamente essa inovação no desenvolvimento de embalagens comestíveis. Essa abordagem não apenas amplia o espectro de possibilidades de aplicação do BM na produção de bioplásticos, mas também ressalta a importância de explorar novas fronteiras para promover materiais sustentáveis e funcionalmente avançados na indústria.

3.8 O USO DE EXTRATOS VEGETAIS E ÓLEOS ESSENCIAIS NA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

Conservar alimentos é fundamental para manter sua estabilidade e qualidade. Essa preservação envolve aspectos físicos, químicos e biológicos. Os conservantes desempenham um papel vital ao retardar ou inibir as alterações causadas por microrganismos, enzimas e oxidação (Silva *et al.*, 2010; Galus *et al.*, 2020).

Além dos fatores intrínsecos, os fatores extrínsecos, como temperatura, umidade, atmosfera, luz e materiais de embalagem, também influenciam o desenvolvimento de microrganismos nos alimentos. Em condições ideais, os microrganismos iniciam seu crescimento e multiplicação, seguindo diferentes fases representadas em uma curva de crescimento microbiano, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Curva de crescimento típica de microrganismos em alimentos expressa em logaritmo



Fonte: Robazza *et al.*, (2010).

O ciclo de crescimento de microrganismos é composto por quatro fases distintas: a fase "lag", onde ocorre a adaptação ao meio; a fase exponencial, caracterizada pela máxima reprodução; a fase estacionária, em que há um equilíbrio entre reprodução e morte; e, por fim, a fase de declínio, marcada pelo aumento de toxinas e pela morte de microrganismos, sem crescimento de novos (Robazza *et al.*, 2010). Para preservar a qualidade dos alimentos e aumentar sua vida útil, os conservantes alimentares desempenham um papel importante, prolongando a fase de latência ou "lag", o que pode resultar na redução da quantidade de microrganismos se essa fase for adequadamente retardada (Tavares, 2021; Alonso, 2022).

Nesse contexto, a busca por métodos inovadores para controlar microrganismos indesejáveis, como o uso de óleos essenciais e extratos vegetais, tem se tornado essencial na indústria alimentícia. Extratos naturais obtidos de resíduos e subprodutos da indústria de alimentos, especialmente do bagaço de malte, têm se destacado por suas propriedades antioxidantes e inibidoras do crescimento microbiano (Silva *et al.*, 2010). Dillmann (2018) avaliou, por meio de um delineamento fatorial, as melhores condições para a extração de compostos bioativos do bagaço de malte e constatou que o número de extrações foi a única variável com relevância significativa para a melhoria da atividade antioxidante. Embora os extratos de bagaço de malte apresentem concentrações menores de compostos bioativos em

comparação com outras fontes vegetais, a grande quantidade gerada na produção de cerveja torna sua utilização vantajosa.

Pesquisas têm avaliado a viabilidade comercial da extração de compostos antioxidantes desse subproduto, o que pode agregar valor aos produtos alimentícios e melhorar sua conservação. Esses extratos são cada vez mais utilizados como alternativas aos aditivos sintéticos, que podem apresentar efeitos tóxicos. A diversidade química dos compostos bioativos naturais permite sinergismos que potencializam sua ação antioxidante, beneficiando a preservação dos alimentos e aumentando sua frescura (Gruz *et al.*, 2013; Shopska *et al.*, 2021; Quirós-Saucena *et al.*, 2014). Além disso, a aplicação de antioxidantes naturais se estende a embalagens ativas, onde o bagaço de malte é um candidato promissor, pois pode liberar compostos benéficos de forma contínua, melhorando a eficácia na preservação dos alimentos.

3.8.1 Óleos essenciais e suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas

É relevante observar que no contexto brasileiro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu diretrizes normativas para os óleos essenciais (OEs) a partir da década de 1970. No entanto, essas normas foram revogadas entre 2010 e 2011 (Bizzo *et al.*, 2022). Como resultado dessas mudanças, o Brasil enfrenta a ausência de normativas nacionais vigentes para os óleos essenciais, o que representa desafios significativos para a padronização e a garantia da qualidade dos OEs produzidos e comercializados no país.

Nesse contexto, atualmente, torna-se evidente a necessidade de se basear em padrões internacionais, como os estabelecidos pela *International Organization for Standardization* (ISO), para orientar a indústria e assegurar a conformidade dos produtos. Com isso, segundo a norma 9235, revisada em 2021, os OEs são definidos como "...produtos obtidos de matérias-primas naturais de origem vegetal, por destilação a vapor, por processos mecânicos a partir do epicarpo de frutos cítricos, ou por destilação a seco, após a separação da fase aquosa – se houver – por processos físicos" (Bizzo *et al.*, 2022; International Organization for Standardization, 2021).

Em 2022, o mercado global de óleos essenciais (OE) foi avaliado em aproximadamente US\$8,8 bilhões. Esse setor demonstrou uma tendência de crescimento contínuo, cujo crescimento está previsto para 11,8% até 2027, atingindo uma margem de US\$15,3 bilhões, tornando o cenário otimista para os próximos anos (“About MarketsandMarkets”, [s.d.]). O

Brasil uma figura de destaque na cadeia de produção e comercialização de óleos essenciais, uma vez que fornece esses insumos ao mercado internacional por quase um século. Ao longo desse período, uma variada gama de óleos essenciais foi produzida, abrangendo tanto espécies vegetais nativas, como pau-rosa e sassafrás, quanto espécies exóticas, a exemplo de menta, laranja e eucalipto, como investigado por Bizzo e Rezende (2022).

O mercado de óleos essenciais está em constante evolução e demonstra um dinamismo significativo. Uma tendência global crescente é a substituição gradual de materiais sintéticos por produtos naturais, impulsionada principalmente pela demanda dos consumidores, especialmente em países do hemisfério Norte. Essa preferência por produtos de origem natural está provocando mudanças nos ingredientes utilizados na formulação de alimentos e bebidas. Nesse cenário, os óleos essenciais emergem como alternativas naturais em diversos setores da indústria, representando uma transformação importante no mercado (Craveiro *et al.*, 1995; Reis *et al.*, 2020; Bizzo *et al.*, 2022).

Boa parte dos óleos essenciais derivados de plantas e especiarias se destacam por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, tornando-os ingredientes valiosos na indústria de alimentos. Além disso, a maioria desses óleos é considerada segura para consumo (GRAS). No entanto, o desafio reside na incorporação desses óleos como conservantes de alimentos, devido ao seu sabor pronunciado e o seu forte odor, que pode alterar as propriedades organolépticas dos alimentos frescos (Syafiq, R. *et al.*, 2020). Por outro lado, devido à sua natureza lipídica, espera-se que esses óleos reduzam a permeabilidade ao vapor de água em filmes comestíveis, tornando-os candidatos promissores como agentes de conservação em produtos alimentícios sujeitos à deterioração, sendo possível a sua inclusão em embalagens ativas por suas propriedades bioativas, como fenólicos e terpenoides conferindo-lhes uma ação antimicrobianas e antioxidantes (Nisar, 2018; Mahcene, 2020; Atarés *et al.*, 2016). Contudo, as melhores concentrações de OE que são eficazes contra diferentes microrganismos dependem dos tipos de OE e biopolímeros utilizados (Syafiq, R. *et al.*, 2020).

3.7.1.1 Óleo essencial de limão siciliano

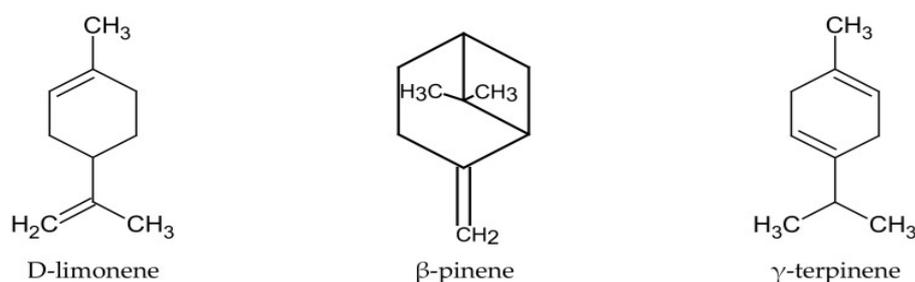
Os limões, membros do gênero *Citrus*, são conhecidos principalmente pela sua acidez, e devida suas propriedades nutricionais foi comercializado em grande escala por vários países.

A Itália liderou por muito tempo a produção de limões, juntamente com outras nações notáveis, como Estados Unidos, Argentina, Espanha e Turquia, sendo que no Brasil, essa indústria cresceu substancialmente, tornando-se uma importante fonte de renda para agricultores, com notável aumento nas exportações de limões entre 1998 e 2007 (Dos Santos *et al.*, 2020).

Os óleos essenciais de limão têm diversas aplicações na indústria alimentícia e farmacêutica, bem como em produtos de higiene pessoal e limpeza. Esses óleos essenciais são estudados por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, que afetam as células bacterianas, em especial as membranas celulares, tornando-se uma promissora opção para a preservação natural de alimentos. Além disso, os antioxidantes nos limões têm potencial para prevenir doenças como câncer, síndrome metabólica e enfermidades neurodegenerativas (Dos Santos *et al.*, 2020; Bitencourt, 2020).

Os óleos essenciais derivados do Limão Siciliano (*Citrus limon (L)*), também conhecido como limão verdadeiro, prosperam em regiões subtropicais e tropicais, demonstrando maior sensibilidade ao frio em comparação a outras espécies cítricas. A composição deste óleo essencial é primariamente constituída por hidrocarbonetos, tendo como componentes mais proeminentes o: D-limoneno (60-70%), γ -terpineno (7-10%) e β -pineno (8-12%), representados na Figura 7 (Dos Santos *et al.*, 2020; Martins, 2016).

Figura 7 - Estrutura química de terpenóides selecionados característicos do óleo

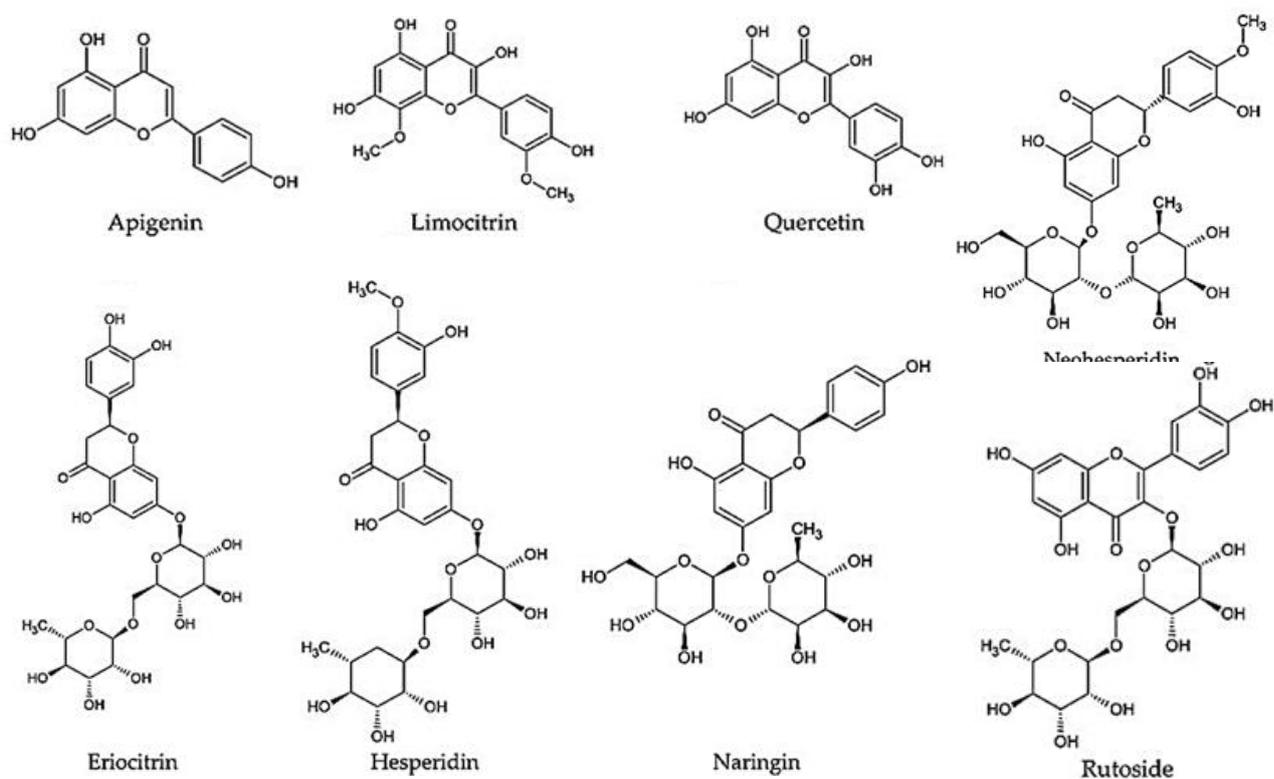


Fonte: Klimek-Szczykutowicz; Szopa; Ekiert (2020).

No Limão Siciliano, os flavonoides representam os compostos bioativos mais significativos, desempenhando um papel fundamental na determinação de sua atividade biológica. Estes flavonoides incluem flavononas como eriodictiol, hesperidina, hesperetina e naringina; e flavonas como apigenina e diosmina; e flavonóis como quercetina, juntamente com

seus derivados, conforme ilustrado na Figura 8 (Klimek-Szczykutowicz; Szopa; Ekiert, 2020; Kodjoh, 2022).

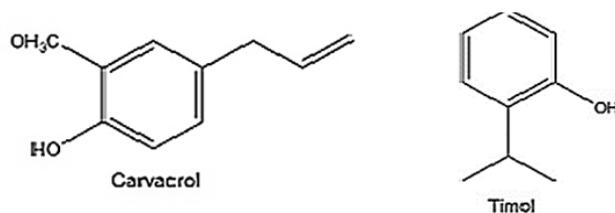
Figura 8 - Estrutura química dos flavonóides característicos de *C. limon*



Fonte: Klimek-Szczykutowicz; Szopa; Ekiert (2020).

3.8.1.2 Óleo essencial de orégano

O orégano (*Origanum vulgare L.*) é uma planta condimentar pertencente à família Lamiaceae e nativa das regiões Euro-Siberiana e Irano-Siberiana, com ao menos 38 espécies do gênero *Origanum* espalhadas pelo mundo (Aligiannis *et al.*, 2001). Por ser uma planta condimentar, é amplamente utilizada na culinária por conferir sabor e aroma aos alimentos. O gênero apresenta uma ampla variedade de composição química, sendo que os fenóis, como carvacrol e timol (Figura 9), são os mais abundantes, podendo alcançar entre 80,2% e 98% da composição total do OE, conferindo-lhes sua atividade antimicrobiana. Araújo *et al.* (2016) encontrou porcentagem de carvacrol de 76,5% e timol de 4,3%, já Reis (2020) encontrou valores percentuais para carvacrol de 72% e timol de 2% (Oliveira, apud Araujo *et al.*, 2016; Reis, 2020).

Figura 9 - Estrutura de carvacrol e timol

Fonte: Del ré; Jorge, (2012).

É importante destacar que as concentrações de diferentes componentes podem variar consideravelmente de acordo com fatores como o tipo de solo, as condições climáticas, as práticas agrícolas, a variedade de orégano e o método de extração. No entanto, numerosos estudos têm corroborado a eficácia do orégano contra patógenos pertencentes a gêneros como *Escherichia*, *Salmonella*, *Staphylococcus*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* e *Rhizoctonia* (Araujo *et al.*, 2016; Tavares, 2021). Além disso, seu poder na inibição de bactérias Gram negativas também é notável (Brito *et al.*, 2020).

Outro fator de relevância é a sua natureza hidrofóbica e alta aceitabilidade dos óleos essenciais, permitindo que eles sejam facilmente incorporados na produção de alimentos, possibilitando a combinação de diferentes tipos de óleos essenciais em um único produto (Brito *et al.*, 2020). Essa prática tem o potencial de intensificar suas propriedades biológicas, causando um efeito sinérgico.

Um estudo conduzido por Silva *et al.* (2010) enfatiza a importância das interações entre os componentes dos OEs em baixas concentrações, demonstrando que a presença de elementos como p-cimeno e γ -terpineno, presentes no óleo essencial de limão siciliano, por exemplo, pode ampliar a ação antimicrobiana de compostos majoritários, como o carvacrol e o timol, presentes no OE de orégano, uma vez que alguns compostos não têm efeito antibacteriano se usado sozinho, apenas quando combinado. (Silva *et al.*, 2010; Araujo *et al.*, 2016). Por outro lado, Pombo *et al.* (2018) observou em seus estudos sobre o OE de orégano, que o sinergismo entre os OEs é possível, desde que cada um esteja em concentrações específicas (Pombo *et al.*, 2018).

3.9 PROSPECÇÃO E INOVAÇÃO

A prospecção tecnológica e o estudo da arte, métodos consolidados ao longo de mais de três décadas, têm se destacado como instrumentos eficazes na pesquisa, coleta e análise de dados em âmbito nacional e internacional. Essas abordagens proporcionam uma visão

abrangente do desenvolvimento tecnológico, capacitando os pesquisadores a mapearem informações de forma sistemática e impulsionar o progresso com impactos positivos na sociedade, indústria e comércio. Esses estudos representam ferramentas cruciais para um planejamento estratégico eficaz, fornecendo dados claros para embasar a tomada de decisão relacionada ao futuro das pesquisas, considerando nuances e explorando possibilidades de alcançar os resultados desejados (De Melo Pequeno *et al.*, 2021).

Uma das formas de avaliar a prospecção tecnológica de um tema é pela análise de artigos científicos. O *Methodi Ordinatio*, que é dividido em nove etapas distintas, vem como uma ferramenta que associa cálculos matemáticos para elucidar o cenário que se estuda. Para a aplicação do método, inicialmente é preciso estabelecer a intenção da pesquisa, seguida por uma busca preliminar nas bases de dados utilizando palavras-chave relacionadas ao tema. Posteriormente, são definidas as combinações de palavras-chave, operadores booleanos e a base de dados a ser utilizada. Após a busca preliminar, realiza-se a busca final na base selecionada. Os resultados brutos são então submetidos a procedimentos de filtragem para eliminar trabalhos não relevantes ou duplicados (Pagani; Kovaleski; De Resende, 2017).

Na sétima fase do *Methodi Ordinatio*, conhecida como *InOrdinatio*, é empregada uma equação para classificar os artigos conforme sua relevância científica, considerando o fator de impacto, ano de publicação e número de citações do artigo. Essa equação incorpora o elemento alfa (α), cujo valor pode variar de 0 a 10, dependendo da urgência de atualidade da pesquisa e da percepção individual do pesquisador em relação a essa necessidade, ou seja, quanto maior o valor de alfa (α) maior a linha temporal da busca desejada (Bilcati *et al.*, 2019). Por fim, os artigos classificados são localizados em formato integral e submetidos à leitura sistemática e análise. Essas etapas visam construir um portfólio bibliográfico robusto e relevante sobre o tema pesquisado (Pagani; Kovaleski; De Resende, 2017).

Em suma, a complexidade das questões associadas aos plásticos convencionais, a crescente necessidade de alternativas sustentáveis, os avanços na inovação de bioplásticos comestíveis ativos, a relevância estratégica do Brasil na busca pela sustentabilidade e os desafios enfrentados pela indústria alimentar em termos de preservação de alimentos são temas interconectados que demandam uma abordagem coordenada e abrangente. Esses elementos delineiam o cenário para discussões subsequentes sobre as implicações e perspectivas dessas soluções no contexto atual.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

O bagaço de malte utilizado foi doado pela Madstein Cervejaria. Os óleos essenciais e a pectina foram adquiridos comercialmente através de lojas virtuais. O óleo essencial de orégano foi extraído através de destilação por arraste de vapor, conforme consta na embalagem do produto. Já o modo de extração do óleo essencial de limão siciliano não está expresso na embalagem do produto.

4.1.1 Reagentes

- ✓ Água destilada;
- ✓ Pectina, marca Diotooni;
- ✓ Glicerol, marca Merck;
- ✓ Etanol, marca Dinâmica;
- ✓ Ciclohexano, marca Dinâmica;
- ✓ Óleo essencial de orégano, marca Phytoterápica;
- ✓ Óleo essencial de limão siciliano, marca WNF;
- ✓ Terra Vegetal, marca AllGarden (lote 002010724).

4.1.2 Equipamentos

- ✓ Peneira granulométrica, marca Cole-Parmer;
- ✓ Analisador Termogravimétrico SHIMADZU de modelo DTG-60;
- ✓ Banho Ultrassônico, marca Unique;
- ✓ Evaporizador rotativo, Marca Quimis.
- ✓ Espectrofotômetro modelo K37-VIS da marca Kasvi;
- ✓ Leitor de placas modelo DR-200BS-NM da Kasuaki;
- ✓ Cromatógrafo de gás com detector de massas, marca Shimadzu CG-MS, modelo QP-2020.

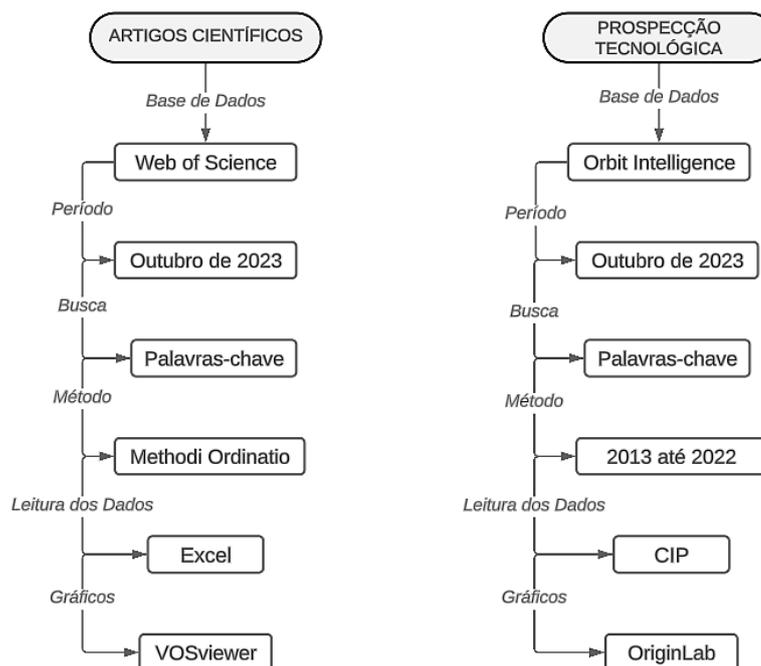
4.2 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

4.2.1 Artigos científicos

A busca por artigos científicos foi conduzida na base de dados *Web of Science* (Web of Science, 2023) em outubro de 2023. O campo de pesquisa utilizado foi "Tema", e os termos pesquisados foram (*Development OR Synthesis OR Characterization OR Production*) AND (*Biofilm* OR Edible Bioplastic* OR Edible Film* OR Edible Biofilm* OR Edible Coating* OR Edible Biocomposite OR Edible Composite*) AND (*Essential oil**). Esse método de busca foi aplicado para filtrar os artigos da base que continham esses termos em seus títulos, resumos e palavras-chave. A análise dos dados obtidos incluiu a contagem de artigos publicados anualmente, identificação dos países e instituições mais proeminentes em publicações e a identificação das áreas de pesquisa abordadas nas publicações, bem como as palavras chaves mais utilizadas, e os principais autores e coautores das áreas pesquisadas. O *software VOSviewer* foi utilizado para criar os mapas, visualizar e explorar os dados obtidos.

4.2.2 Patentes

A estratégia de busca por patentes seguiu a mesma abordagem adotada para a pesquisa de artigos científicos, utilizando a base de dados *Questel Orbit Intelligence* em outubro de 2023. Foram empregados os termos (*Biofilm OR Edible Biofilm OR Edible Bioplastic OR Edible Film OR Edible Coating OR Edible Biocomposite OR Edible Composite*) AND (*Essential Oil*) AND (*Food*). A restrição foi que essas palavras-chave deveriam estar presentes nos resumos das patentes. A análise dos dados coletados envolveu a quantificação dos depósitos de patentes ao longo dos últimos 10 anos, de 2014 a 2022, a identificação dos países que mais contribuíram com depósitos, a lista das empresas ou instituições que lideraram em depósitos e a avaliação do domínio tecnológico predominante. Adicionalmente, procedeu-se à análise dos códigos mais frequentes, seguindo a Classificação Internacional de Patentes (CIP), para o conjunto de termos pesquisados. O *software OriginLab* foi utilizado para gerar as figuras. A Figura 10 simplifica em forma de fluxograma os passos para a obtenção de dados de artigos e patentes.

Figura 10 - Fluxograma de métodos para obtenção de dados de artigos e patentes

Fonte: A autora.

4.3 PRÉ-TRATAMENTO: SECAGEM, MOAGEM E GRANULOMETRIA

Todas as análises centesimais seguiram a metodologia do Instituto Adolfo Lutz, descritas no manual para análise de alimentos.

4.3.1 Secagem

Em detrimento do alto teor de umidade presente no BM o processo de secagem foi empregado. Sua secagem foi feita em estufa Olidef CZ por 48 horas a 100 °C.

4.3.2 Moagem

Após secagem o BM foi moído em moedor de disco da marca Arbel, a fim de uniformizar a amostra e aumentar sua superfície de contato, diminuindo o tamanho dos grãos.

4.3.3 Granulometria

Peneiras de 710 nm foram utilizadas para deixar o BM mais homogêneo a fim de retirar os grãos maiores.

4.4 ANÁLISE CENTESIMAL

4.4.1 Teor de umidade

O teor de umidade do bagaço de malte foi determinado por diferença de peso após secagem em estufa por 12h a 105°C. Quatro amostras foram analisadas com peso de aproximadamente 2 g cada. As mesmas foram pesadas em cadinhos, de peso conhecido, e submetidas a aquecimento. Após as 12 h os cadinhos foram pesados novamente e seus valores anotados para os devidos cálculos de teor de umidade, como determinado na Equação 1:

$$TU\% = 100 - \left(\frac{P}{P_o}\right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

onde P é o peso, em gramas, da amostra final e P_o corresponde ao peso, em gramas, da amostra inicial.

4.4.2 Teor de cinzas

As cinzas foram determinadas em mufla por 8h a 550 °C, com rampa de aquecimento de 6 °C/min. A análise foi realizada em quadruplicata e 2 gramas de amostra foram pesadas em cadinhos de peso conhecido. Após o processo, os cadinhos foram pesados novamente e seus valores anotados para os devidos cálculos, conforme a Equação 2:

$$\text{Cinzas \%} = \left(\frac{P-C}{P_o}\right) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

onde P é o peso, em gramas, da amostra final, C é o peso, em gramas, do cadinho vazio e P_o corresponde ao peso, em gramas, da amostra inicial.

4.4.3 Teor de proteína

O teor de proteína foi determinado utilizando destilador de nitrogênio por arraste e digestor de Kjeldahl. Para realizar a análise, quatro amostras de BM foram pesadas, com cerca de 0,1 g, com 0,5 g de catalisador e foram colocadas no digestor por aproximadamente 6h a 350°C. Após digestão as amostras foram transferidas para aparelho destilador, após destilação foram tituladas. Seus respectivos valores foram anotados para os devidos cálculos, conforme Equações 3 e 4:

$$\% \textit{Nitrogênio Total} = \frac{V.M.f.0,014.100}{P} \quad \text{Equação 3}$$

$$\% \textit{Proteína} = \% \textit{Nitrogênio Total} . F \quad \text{Equação 4}$$

onde V é o volume em mL de ácido clorídrico 0,1 mol.L⁻¹ gastos na titulação, P é a massa final da amostra em gramas, f é o fator de correção da solução do ácido clorídrico e F é o fator de correção de nitrogênio em proteínas, que corresponde a 6,25 para o BM.

4.4.4 Teor de lipídios

O teor de lipídios foi determinado em quadruplicata por extração direta em Soxhlet. Pesaram-se 5g da amostra em um cartucho de papel de filtro, transferiu-se o cartucho para o aparelho extrator tipo Soxhlet e conectou-se o reboiler, já previamente seco em estufa por 1h a 105 °C, ao aparelho. Foi adicionado a cada reboiler, 50 mL de éter de petróleo. O extrator foi mantido sob aquecimento em chapa elétrica, à extração contínua por 8h (quatro a cinco gotas por segundo). Retirou-se os cartuchos e o reboiler com o resíduo extraído e ambos foram levados para estufa a 105°C, por cerca de uma hora, ou até todo o solvente evaporar. Resfriou-se os reboilers e os cartuchos em um dessecador até a temperatura ambiente. Pesaram-se as amostras e os dados foram anotados para os devidos cálculos, conforme a Equação 5:

$$\% \textit{Lipídios} = \frac{100.N}{P} \quad \text{Equação 5}$$

onde N é o número de gramas de lipídios e P o número de gramas da amostra.

4.4.5 Teor de fibras

As fibras foram determinadas pelo método detergente ácido (FDA). Aproximadamente 1 g de cada amostra foi pesada e transferida para um béquer Berzelins e foi adicionado 100 mL de solução detergente ácida. Os béqueres foram colocados em aparelho digestor a 105 °C por aproximadamente 1 h. Após a digestão, as amostras foram filtradas em sistema de filtração a vácuo com o auxílio de um cadinho do tipo Gooch, em seguida foram lavadas com água fervendo até pH neutro. Após filtração, as amostras foram submetidas a secagem a 105 °C por 6 horas e depois levadas à mufla por 5 h a 550°C para determinar seu teor de cinzas. Os valores obtidos foram anotados para os devidos cálculos conforme a Equação 6:

$$\text{Fibras (FDA) \%} = \left(\frac{C - C_0}{P} \right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

onde C é o peso, em gramas, do cadinho de Gooch com o resíduo, C_0 é o peso, em gramas, do cadinho de Gooch vazio e P corresponde ao peso da amostra em gramas.

4.5 EXTRATO DE BAGAÇO DE MALTE (EBM)

4.5.1 Preparação e extração do bagaço de malte

Inicialmente, 300 gramas do bagaço do malte (BM), pré tratado, foram pesados em balança analítica utilizando papel filtro em formato de cartucho e colocado dentro de um extrator tipo Soxhlet, adaptado para grandes quantidades de extrações. Um balão de fundo redondo de 2 L foi anexado ao tubo de extração, em seguida 1,5 L de etanol e 1,5 L de ciclohexano foram adicionadas dentro do tubo extrator na proporção de 1:1. A temperatura foi mantida a 60 °C e a extração foi realizada por seis horas. Após esse processo, o excesso de solvente foi removido em rotaevaporador com temperatura controlada de 65 °C e 30-40 rpm.

O rendimento da extração foi calculado conforme Equação 7 a seguir:

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{massa do EBM}}{\text{massa do BM}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

onde EBM é o volume, em mililitros, do extrato obtido e BM é o peso, em gramas, do bagaço de malte utilizado para a extração.

4.5.2 Caracterização do EBM

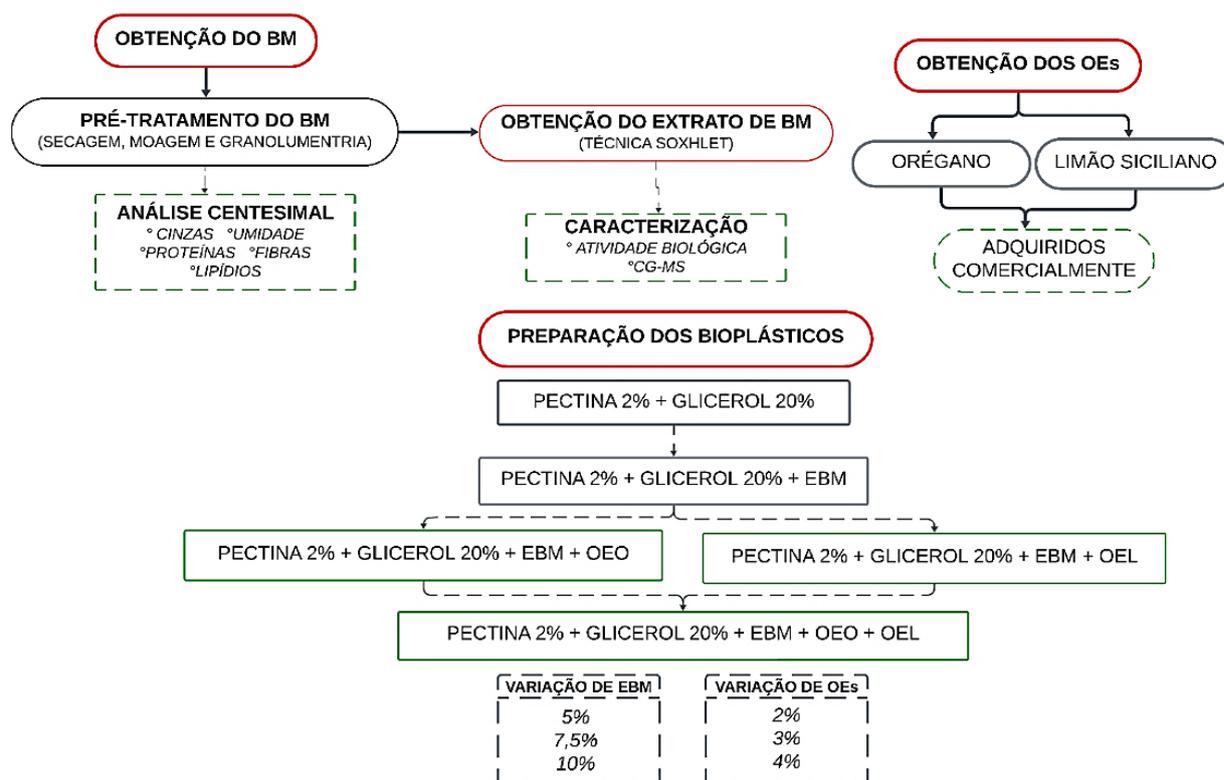
4.5.2.1 cromatografia gasosa com detector de massas (CG/MS)

O cromatograma de massa foi obtido utilizando um cromatógrafo gasoso Shimadzu CG-MS, modelo QP-2020. As amostras foram diluídas em isopropanol e eluídas em uma coluna SH-Rxi-5ms com 0,25 µm de espessura, 0,25 mm de diâmetro e 30 m de comprimento. A temperatura inicial da coluna foi ajustada para 35 °C, mantida por 5 minutos, e posteriormente elevada a uma taxa de 3 °C por minuto até atingir 230 °C, onde foi mantida por 10 minutos. A temperatura de injeção foi de 250 °C, a temperatura da fonte de íons foi de 200 °C, e a temperatura da interface foi de 300 °C. O volume de injeção foi de 1 µL, com uma divisão (split) de 1:15 hélio de grau analítico foi utilizado como gás de arraste, com uma vazão de 1,06 mL por minuto.

4.6 PREPARO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS

Os bioplásticos comestíveis foram preparados conforme a metodologia de Lukda (2022), com adaptações. Utilizaram-se 2% (m/m; base úmida) de pectina e glicerol na proporção de 20 % (m/m; em relação à pectina). O EBM foi adicionado em concentrações de 5 %, 7,5 % e 10 % (m/m; em relação à pectina), enquanto os OEs foram adicionados em concentrações de 2 %, 3 % e 4 % (m/m; em relação à pectina), conforme ilustrado na Figura 11. Para uma análise detalhada das variáveis EBM e OEs de orégano e limão siciliano, foi implementado um planejamento composto central em duas etapas, utilizando o *software Statistica 12* e a função *Design of Experiment* (DOE). Ensaios no ponto central, indicados no Quadro 1, foram conduzidos.

Figura 11 - Fluxograma de atividades da fase experimental



Fonte: A autora.

Os filmes foram preparados pela técnica de *casting*. A pectina e o glicerol foram aquecidos gradativamente até 95 °C, sob agitação constante, para formar a base dos filmes. Após resfriamento da solução, os compostos ativos foram adicionados e submetidos ao banho ultrassônico por 20 min, após esse processo a solução foi vertida em placas redondas de acrílico e secada em estufa com circulação de ar a 35 °C por 24 horas ou até secagem completa. Após a secagem, os filmes foram removidos manualmente das placas e analisados.

As análises seguiram a ordem estabelecida para minimizar erros operacionais. A preparação dos bioplásticos com óleo essencial de orégano e limão siciliano foi realizada sob condições e proporções constantes, conforme descrito na Quadro 1, variando apenas o tipo de óleo essencial utilizado. Para cada óleo essencial, foram preparadas 13 amostras, totalizando 26 amostras ao final da Etapa 1, que foi repetida duas vezes, além das amostras para controle. O objetivo desta etapa é investigar o comportamento individual de cada óleo essencial na composição dos bioplásticos e identificar a concentração ótima.

As siglas OEO e OEL adotadas para nomear as amostras referem-se ao óleo essencial de orégano e óleo essencial de limão, respectivamente.

Quadro 1 - Quantidades de OE e EBM utilizados para produzir o bioplástico na Etapa 1 e 2

ETAPA 1		
Execução Padrão	OE (%)	EBM (%)
12 (C)	3,0	7,50
2	2,0	10,0
9 (C)	3,0	7,5
10 (C)	3,0	7,5
4	4,0	10,0
13 (C)	3,0	7,5
5	1,5	7,5
7	3,0	3,9
11 (C)	3,0	7,5
3	4,0	5,0
6	4,4	7,5
8	3,0	11,0
1	2,0	5,0

CONTROLE	
B1	Pectina 2% + Glicerol 20%
B2	Pectina 2% + Glicerol 20% + 7,5% EBM
B3	Pectina 2% + Glicerol 20% + 3% OEL
B4	Pectina 2% + Glicerol 20% + 3% OEO

ETAPA 2			
Execução Padrão	OEO (%)	OEL (%)	EBM (%)
4	1,5	0,5	10,0
13	0,5	2,5	7,5
12	1,0	1,0	11,7
18 (C)	1,0	1,0	7,5
7	1,0	2,5	10,0
14	2,0	0,5	7,5
15 (C)	1,0	1,0	7,5
8	2,5	1,0	10,0
16 (C)	1,0	1,0	7,5
10	2,0	2,0	7,5
9	0,5	0,5	7,5
3	0,5	1,5	10,0
5	1,0	2,5	5,0
1	0,5	1,5	5,0
17 (C)	1,0	1,0	7,5
2	1,5	0,5	5,0
19 (C)	1,0	1,0	7,5
11	1,0	1,0	3,2
6	2,5	1,0	5,0

Fonte: A autora.

Na Etapa 2, os óleos essenciais foram combinados com extrato de bagaço de malte em diferentes proporções para examinar o comportamento dos três ativos em diversas condições experimentais, resultando em 19 amostras. No total, foram analisadas 49 amostras, somando-se as amostras da Etapa 1, e as amostras de controle, todas foram realizadas em quintuplicata.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS

Após a preparação dos bioplásticos, foram realizadas várias caracterizações, incluindo a determinação da Umidade, Solubilidade, Biodegradabilidade, Atividade Biológica, Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Este conjunto de análises permitiu compreender as estruturas formadas no bioplástico e suas características físico-químicas, visando determinar o bioplástico que melhor atende aos objetivos deste trabalho.

4.7.1 Umidade

O teor de umidade dos filmes foi determinado de maneira semelhante ao teor de umidade do bagaço de malte, através da diferença de peso após secagem em estufa a 105 °C por 12 horas. Quatro pedaços de cada filme, com peso previamente conhecido, foram cortados em formato circular com diâmetro de aproximadamente 20 mm. As amostras foram colocadas em placas de Petri, cujo peso também era conhecido, e submetidas ao aquecimento.

Após as 12 horas, as placas foram pesadas novamente e os valores anotados para os cálculos de teor de umidade, conforme determinado na Equação 8. O peso das placas de Petri foi desconsiderado ao final dos cálculos.

$$U\% = 100 - \left(\frac{P}{P_0}\right) \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

onde P é o peso, em gramas, da amostra final e P_0 corresponde ao peso, em gramas, da amostra inicial.

4.7.2 SOLUBILIDADE

A solubilidade dos filmes em água foi determinada conforme o método descrito por Gontard (1992). Inicialmente, filmes com peso previamente conhecido foram cortados em formato circular, com diâmetro de aproximadamente 20 mm, e pesados. Em seguida, esses filmes foram imersos em um béquer contendo 50 mL de água destilada e agitados lentamente por 24 horas a 25 °C.

Após o período de agitação, o material foi filtrado e os filmes foram secos em uma estufa a 105 °C por 24 horas. Após a secagem, a fração de material não solúvel foi determinada por pesagem, conforme Equação 9. Os pesos dos filtros foram medidos previamente e seus valores foram desprezados ao final do processo.

$$S\% = \frac{P_o - P}{P_o} \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Onde P_o é o peso inicial do filme antes de ser imerso em água, P é o peso final do filme após ser removido da água e seco na estufa.

4.7.3 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

A temperatura de transição vítrea (T_g) dos filmes com diferentes composições foi determinada por calorimetria exploratória diferencial (DSC). A análise foi realizada utilizando um equipamento da marca SHIMADZU, modelo DSC60, com uma faixa de temperatura de -50 °C a 150 °C e uma taxa de aquecimento de 1 °C/min, sob atmosfera de nitrogênio. O experimento foi realizado no LMCerva no IQ/UnB.

4.7.4 TERMOGRAVIMETRIA DERIVADA (TG/DTG)

A análise de termogravimetria (DTG) foi realizada no equipamento analisador termogravimétrico da marca Shimadzu modelo DTG-60H em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de gás de 50 mL/min e com rampa de aquecimento de 30 °C/min até 800 °C. O experimento foi realizado no LMCerva no IQ/UnB.

4.7.5 ATIVIDADE BIOLÓGICA

4.7.5.1 Microdiluição em placa de poliestireno de 96 poços

Para a avaliação das atividades biológicas dos bioplásticos utilizou-se o método da microdiluição em placa de poliestireno de 96 poços. Os bioensaios foram realizados com os microrganismos *Staphylococcus aureus* (ATCC29212) e *Escherichia coli* (ATCC25922) cultivadas em caldo Muller Hinton, disponíveis na coleção de cultura de microrganismos do

Laboratório 2 da Universidade de Brasília - UnB, *campus* Ceilândia, fornecidas pelo Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde (INCQS), da Fundação Oswaldo Cruz-FIOCRUZ.

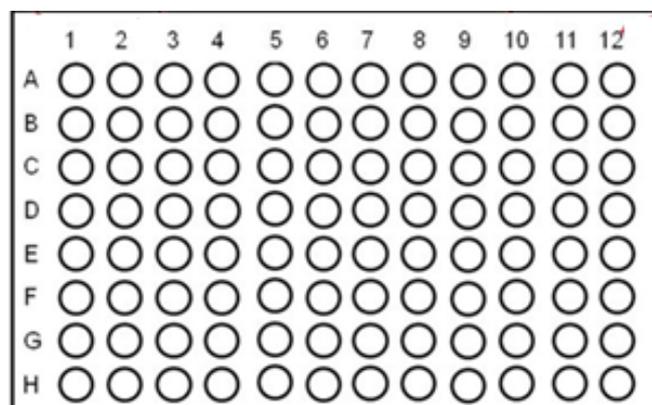
4.7.5.1.2 Inóculo

As cepas bacterianas utilizadas foram semeadas em placas de ágar sangue e cultivadas overnight. Após o crescimento foram selecionadas colônias isoladas e com perfil morfológico de cada bactéria. As colônias foram suspensas em solução de cloreto de sódio 0,85 % e ajustadas na escala de Mcfarland 0,5 na escala de absorvância de 0,08 a 0,013 nanômetro no comprimento de onda de 625 nanômetro, espectrofotômetro modelo K37-VIS da marca Kasvi, obtendo uma suspensão padrão com $1,5 \times 10^8$ UFC/ml, desta solução foi realizado uma diluição para 1:1000, resultando em uma concentração de $1,5 \times 10^5$ UFC/mL.

4.7.5.1.3 Preparo das amostras

Para cada composto foi preparado uma placa, com teste para cepas de *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*. Os testes foram realizados em triplicata. A Figura 12 representa as divisões da placa para a realização da análise. Nas linhas de A a C foi realizado o teste com *Staphylococcus aureus* contra o composto, usando 100 µl caldo Mueller Hinton com as diferentes concentrações das formulações e 100 µl do inóculo na concentração de $1,5 \times 10^5$ UFC/mL. Nas linhas de E a G foi realizado o teste com seguido a mesma preparação. Na linha D foi realizado um teste como 100 µl de caldo e 100 µl do caldo com as mesmas concentrações dos testes com as bactérias.

Figura 12 - Ilustração do método da microdiluição em placa de poliestireno de 96 poços



Fonte: Oliveira *et al.*, 2018.

Na linha H foram realizados os controles de crescimento das bactérias, nos poços de 1 a 4 controle de *Staphylococcus aureus* e de 9 a 12 controle de *Escherichia coli*, no poças de 5 a 8 o teste de esterilidade do caldo, ou branco. As placas foram incubadas em estufa a 36,5 °C por 24 horas. Passado est períodos, realizou-se a leitura em um leitor de placas modelo DR-200BS-NM da Kasuaki. A partir da leitura espectrofotométrico, aplicou-se a Equação 10 segundo o método do Cálculo da Viabilidade Bacteriana.

$$\% \text{ Inibição do crescimento bacteriano} = [1 - 100 (Ac/AO)] \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Em que: Ac: é a média das absorvâncias por concentração de substância testada, A0: é a média das absorvâncias do controle de crescimento bacteriano. Os resultados obtidos representam a porcentagem de células bacterianas que a substância testada foi capaz de inibir.

4.7.5.2 Teste de Disco-Difusão

A análise biológica para avaliar a atividade antimicrobiana de bioplásticos contra *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213) e *Escherichia coli* (ATCC 25922) foi realizada utilizando o método de disco de difusão, as bactérias foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde (INCQS), da Fundação Oswaldo Cruz-FIOCRUZ.

O meio de cultura utilizado foi o ágar Müeller-Hinton, preparado e esterilizado em autoclave a 121 °C por 15 minutos, sendo então vertido em placas de Petri estéreis para solidificação. As culturas de *S. aureus* e *E. coli* foram cultivadas em caldo nutritivo e incubadas a 37 °C por 18-24 horas. A densidade celular foi ajustada para a escala 0,5 de McFarland, correspondente a 1.5×10^8 UFC/mL. Cada bactéria foi inoculada uniformemente sobre a superfície das placas de ágar usando swabs estéreis. Discos de bioplástico, foram previamente cortados com 6 mm de diâmetro e colocados cuidadosamente sobre o ágar inoculado. As placas foram incubadas invertidas a 37 °C por 24-48 horas. O ensaio se repetiu para as amostras B1, B2, 10L, 100 e 170L.

3.1 Preparação do Inóculo

As colônias da cultura over-night foram suspendidas em solução de cloreto de sódio 0,85% e ajustadas na escala de Mcfarland 0,5 na escala de absorvância de 0,08 a 0,013 nanômetro no comprimento de onda de 625 nanômetro, espectrofotômetro modelo K37-VIS da Kasvi, obtendo uma suspensão padrão com $1,5 \times 10^8$ UFC/ml. Com o auxílio de um swab estéril os inóculos foram semeados em toda a superfície de placas contendo meios de cultura ágar Mueller Hinton. Os discos dos biofilmes preparados com as formulações citadas acima foram colocados na superfície do ágar semeado. As placas foram cultivadas em estufa bacteriológica a 36 °C por 24 horas.

Após a incubação, os halos de inibição ao redor dos discos de bioplástico serão medidos em milímetros, comparando-se os resultados com controles negativos (bioplástico sem aditivos antimicrobianos) e positivos (antibiótico padrão). A análise estatística dos resultados foi realizada para determinar a significância dos efeitos antimicrobianos dos diferentes bioplásticos.

4.7.6 BIODEGRADABILIDADE

A biodegradabilidade dos materiais formados foi determinada por diferença de massa. Para isso, as amostras foram dispostas em bandejas de plástico, recobertas com solo fértil e mantidas em condições controladas de temperatura ambiente. Para garantir a manutenção da umidade, as amostras foram umedecidas a cada 24 horas por meio de borrifação de água. O ensaio teve a duração de 15 dias, com pesagens realizadas nos tempos de 0 e ao final dos 15 dias. O progresso do experimento foi monitorado e documentado por meio de registros fotográficos, conforme metodologia descrita por Dias *et al.* (2019), com as devidas adaptações. Todas as análises foram conduzidas em triplicata e a perda de massa das amostras foram calculadas conforme Equação 11.

$$\text{Perda de Massa\%} = \frac{P_o - P}{P_o} \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

onde P é o peso, em gramas, da amostra final e P_o corresponde ao peso, em gramas, da amostra inicial.

4.7.7 APLICAÇÃO DO BIOPLÁSTICOS COMO REVESTIMENTO ALIMENTAR

O objetivo deste experimento foi avaliar a influência do material produzido sobre a conservação de alimentos, utilizando frutas como modelo. Especificamente, os filmes produzidos foram aplicados como revestimento alimentar e sua eficácia foi comparada em dois métodos: imersão dos alimentos na solução filmogênica e aplicação direta dos filmes como camadas protetoras envolvendo a superfície dos alimentos.

Para a realização dos testes, escolheu-se o morango como a fruta base. Foram analisados três morangos para cada composição de filme selecionada, totalizando 15 morangos. As mudanças nos morangos foram monitoradas ao longo de 12 dias, com registros fotográficos documentando as alterações observadas.

Os morangos foram divididos em três grupos experimentais: A, B e C. O grupo A serviu como controle, não recebendo nenhum tipo de tratamento. Os morangos do grupo B foram imersos na solução filmogênica, enquanto os do grupo C foram diretamente envolvidos com os filmes produzidos. Todos os morangos foram mantidos em temperatura ambiente durante o experimento e higienizados previamente antes da aplicação dos tratamentos. As alterações nos morangos de cada grupo foram observadas e analisadas, com ênfase na avaliação da eficácia dos métodos de revestimento na preservação da fruta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Empregou-se combinações de termos em inglês como palavras-chave, juntamente com os conectivos booleanos "OR" (ou) e "AND" (e). Os resultados dessa pesquisa encontram-se documentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Pesquisa de artigos utilizando o *Web of Science* com as palavras-chave selecionadas

Nº da busca	Palavra-chave	Operador	Palavra-chave	Resultado
1	((“Development” OR “Synthesis” OR “Characterization” OR “Production”) AND (“Biofilm*” OR “edible Bioplastic*” OR “Edible Film*” OR “Edible Biofilm*” OR “Edible Coating*” OR “Edible Biocomposite” OR “Edible Composite”))	-	-	31.104
2	((“Development” OR “Synthesis” OR “Characterization” OR “Production”) AND (“Biofilm*” OR “edible Bioplastic*” OR “Edible Film*” OR “Edible Biofilm*” OR “Edible Coating*” OR “Edible Biocomposite” OR “Edible Composite”))	AND	(“Essential Oil”)	1.205
3	((“Development” OR “Synthesis” OR “Characterization” OR “Production”) AND (“Biofilm*” OR “edible Bioplastic*” OR “Edible Film*” OR “Edible Biofilm*” OR “Edible Coating*” OR “Edible Biocomposite” OR “Edible Composite”)) AND (“Essential Oil”)	-	-	300

Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

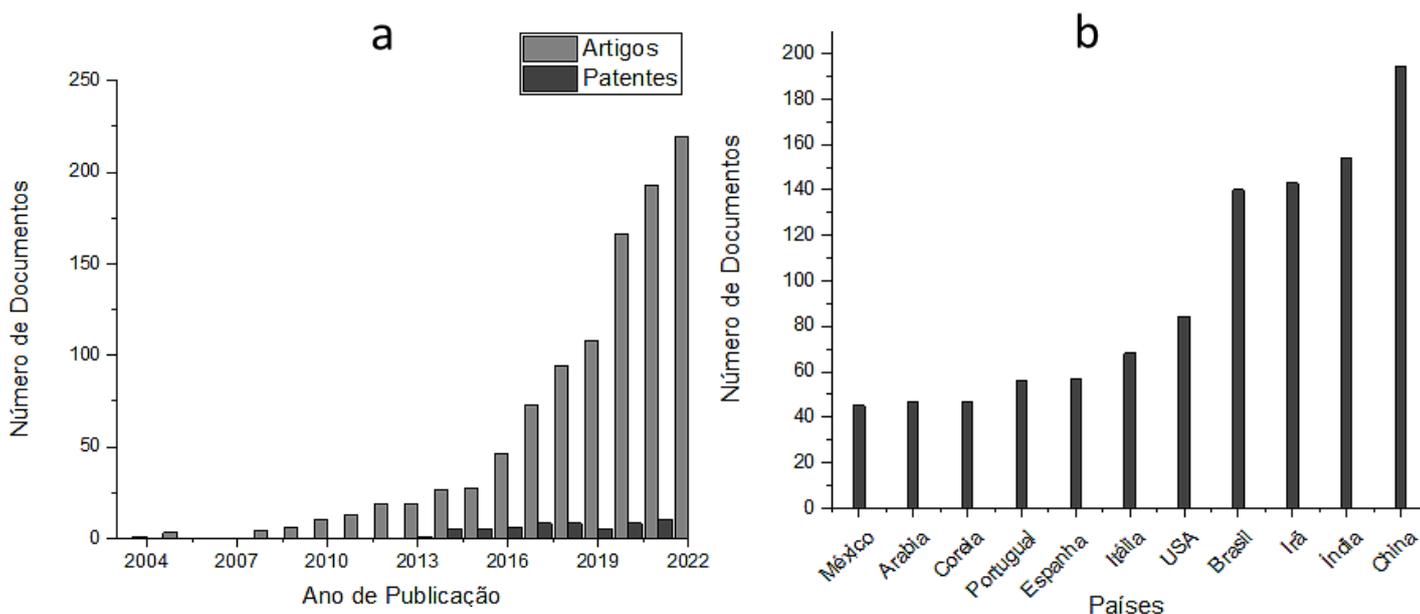
A primeira busca restringiu-se às aplicações de bioplásticos comestíveis, sem delimitar o tipo de matriz polimérica, ou se havia algum composto ativo integrado ao bioplástico, com isso, o objetivo foi conhecer a abrangência desse setor. Na segunda pesquisa foi adicionado a palavra-chave “*Oil Essential*” (óleo essencial), delimitando os resultados de acordo com o tema deste trabalho, assim, foi possível analisar a inovação dos biopolímeros comestíveis incorporados com agentes antioxidantes e antibacterianos, ou seja, bioplásticos comestíveis

ativos. Com o acréscimo da palavra-chave os resultados encontrados caíram para um pouco mais de 1.000 periódicos, e todos foram analisados.

Para o cálculo de *InOrdinatio* foi utilizado alfa (α) no valor 10, o que indica o período de publicação dos periódicos a serem analisados. Ressalta-se que a partir do *Methodi Ordinatio* os artigos com o indicativo negativo não foram considerados no portfólio. Após aplicação do cálculo houve a leitura sistemática dos artigos possibilitando o alinhamento deles com o tema deste trabalho, totalizando 300 periódicos selecionados, representados na terceira busca, que foram classificados em escala de relevância. Esses artigos por sua vez foram utilizados como base para a arguição deste estudo da arte.

Com os resultados obtidos é possível observar um notável aumento do interesse na pesquisa de bioplásticos, um campo que tem experimentado um crescimento substancial, como claramente demonstrado pelo expressivo aumento na quantidade de publicações, conforme ilustrado na Figura 13a. Além disso, a Figura 13b nos proporciona uma visão sobre a contribuição de diferentes países nesse campo em constante expansão. A China e a Índia se destacam como líderes na quantidade de publicações, seguidas pelo Irã, Brasil e Estados Unidos.

Figura 13 - (a) Número de patentes (preto) e artigos científicos (cinza) publicados por ano de 2002 a 2022; (b) Número de artigos publicados por país



Fonte: A autora com dados de Orbit (2023) e Web of Science (2023).

A produção plástica chinesa representa aproximadamente 25 % da projeção global de plástico. A partir de 2015, a massa total de resíduos plásticos reciclados na China ultrapassou 50% da reciclagem global de resíduos plásticos. Entre 2007 e 2016, o governo chinês implementou uma série de alterações nas políticas e regulamentações relevantes em apoio ao desenvolvimento das indústrias chinesas de reciclagem de plástico. Nos últimos dez anos, as políticas de economia circular na China têm sido aplicadas em diversas escalas, incluindo micro (processos individuais ou empresas), meso (*clusters* industriais ou parques ecoindustriais) e macro (abrangendo desde cidades até economias nacionais), o que justifica sua grande participação nas pesquisas que envolvem a produção e utilização de bioplásticos.

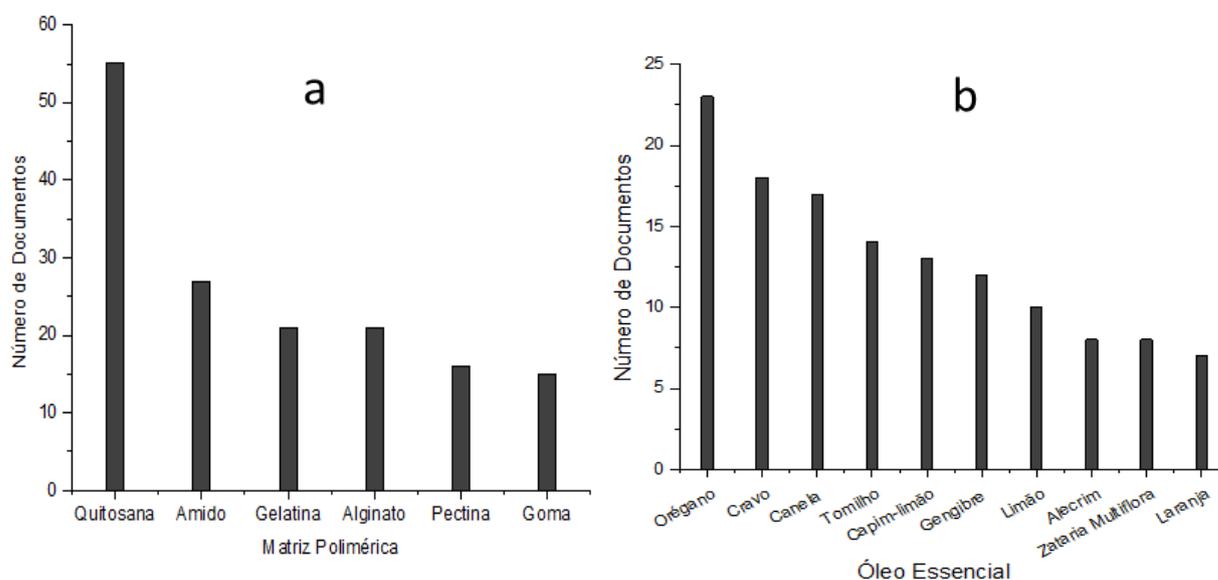
O Brasil, como um país agroindustrial, desempenha um papel significativo nesse cenário. Até o ano de 2022, já havia contribuído com cerca de 140 periódicos na área de bioplásticos, mostrando seu contínuo envolvimento e contribuição ativa nas pesquisas relacionadas a esse tema. Esta pesquisa não apenas alinha o Brasil com as tendências globais em busca de alternativas sustentáveis aos materiais poliméricos convencionais, mas também fortalece seu papel na inovação e na promoção da sustentabilidade. Isso é particularmente relevante considerando que o Brasil se destaca na produção mundial de óleos essenciais.

Os óleos essenciais têm emergido como ingredientes promissores em embalagens biodegradáveis para alimentos, devido à sua origem natural e às suas propriedades funcionais, como antioxidantes e antimicrobianas. Esses compostos possibilitam a formulação de materiais ativos visando prolongar a vida útil dos alimentos, conferindo-lhes maior valor agregado. Entretanto, sua incorporação em filmes comestíveis ou biodegradáveis para embalagens de alimentos pode impactar diversas propriedades do sistema, como transparência e resistência à tração, podendo influenciar na aceitação pelo consumidor. A adição de óleo essencial altera a estrutura da matriz polimérica, acarretando mudanças físicas que variam conforme as interações específicas entre os componentes do polímero e do óleo. Geralmente, a presença do óleo enfraquece a estrutura do filme, mas melhora suas propriedades de barreira à água, enquanto reduz sua transparência. Esses óleos podem conferir propriedades antioxidantes e/ou antimicrobianas aos filmes, cuja eficácia depende da composição do óleo e das interações com o polímero.

Por outro lado, no contexto brasileiro, a utilização de óleos essenciais em bioplásticos apresenta desafios significativos. A manutenção do padrão de qualidade desses óleos, a falta de representatividade nacional e os baixos investimentos governamentais no setor são questões críticas a serem superadas. Superar esses obstáculos é fundamental para que o Brasil possa explorar plenamente seu potencial no desenvolvimento de bioplásticos e óleos essenciais, aproveitando sua vasta riqueza em recursos naturais. Além disso, é imperativo avançar em pesquisa e inovação para fortalecer a posição do país na vanguarda da sustentabilidade global.

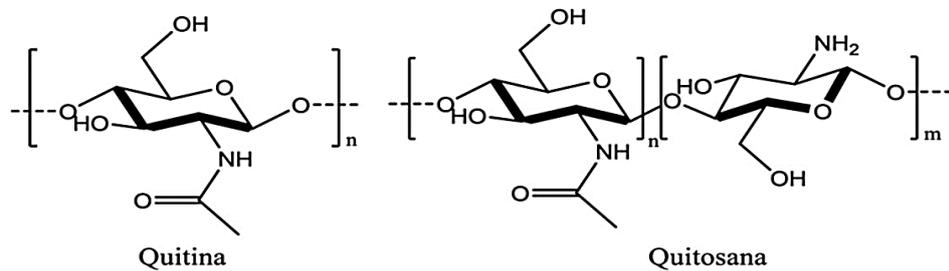
Para avaliar a evolução das pesquisas no contexto da utilização de biopolímeros na produção de bioplásticos comestíveis ativos, juntamente com o emprego dos óleos essenciais, conduziu-se uma análise dentro dos 300 artigos selecionados para este estudo. Após as análises dos periódicos observou-se que a quitosana e o amido são os polissacarídeos mais utilizados nas formulações dos bioplásticos comestíveis, ilustrado na Figura 14a.

Figura 14 - (a) Número de artigos publicados com diferentes matrizes poliméricas (b) Número de artigos publicados com diferentes óleos essenciais



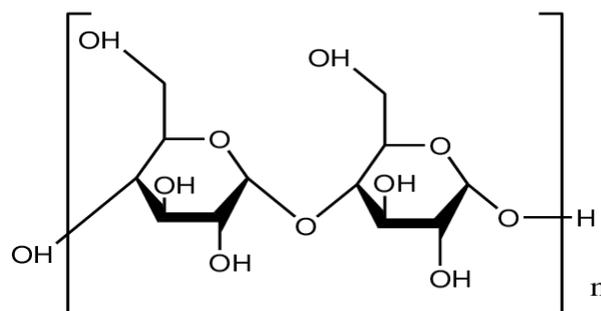
Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

A quitosana é um polissacarídeo biocompatível, antimicrobiano e atóxico, classificado como um polieletrólito. A produção anual de quitina, que é a forma acetilada da quitosana (poli-beta-(1-4)-N-acetil-D-glucosamina), observado na Figura 15, foi estimada em 105 milhões de toneladas. As quitosanas destacam-se como polímeros promissores para diversas aplicações, incluindo biotecnologia, devido às suas propriedades de baixa toxicidade e biodegradabilidade.

Figura 15 - Estrutura molecular da quitina e quitosana

Fonte: Regattieri *et al.*, (2016).

Por outro lado, o amido, estrutura observada na Figura 16, segundo biopolímero mais abundante no mundo após a celulose, tem sido amplamente estudado devido à sua ampla disponibilidade como matéria-prima. Os estudos se concentraram na caracterização das propriedades funcionais dos filmes de amido, explorando diversas possibilidades de alterações químicas, físicas ou genéticas. A capacidade destacada de gelificação do amido, especialmente crucial nas indústrias de alimentos e fármacos, refere-se à transformação irreversível do amido granular em uma pasta viscoelástica.

Figura 16 - Estrutura molecular do amido

Fonte: Braibante, M., & Storgatto, G. (2015).

Diversos tipos de amido são empregados na composição da matriz dos bioplásticos comestíveis, provenientes de uma variedade de fontes. Por exemplo, Prabowo e Mawarani (2020) utilizaram amido de semente de durian, enquanto Gomez-Cantleras *et al.* (2021) optaram pelo amido de inhame. Outros estudos destacam o uso de amido de ervilha por Saberi *et al.* (2017) e amido de semente de jaca por Saturos (2021) e colaboradores. Esses exemplos ilustram a versatilidade desse biopolímero, extraído de diferentes fontes, para ser empregado como matéria-prima no desenvolvimento de bioplásticos comestíveis.

Foi observada a utilização de combinações de dois ou mais biopolímeros na formulação dos bioplásticos comestíveis, demonstrando uma abordagem inovadora e multifacetada na busca por soluções sustentáveis. Por exemplo, Lin *et al.* (2022) desenvolveram um bioplástico contendo amido de mandioca e carboximetilcelulose sódica, com a incorporação de polifenóis de maçã. Da mesma forma, Nair (2018) e colaboradores utilizaram quitosana e alginato em conjunto com extrato da casca de romã para o revestimento de pimenta da espécie *Capsicum*.

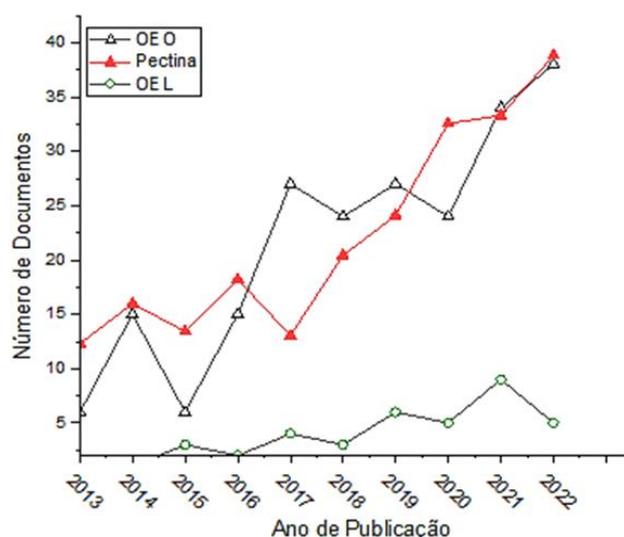
Outros estudos destacam a combinação de gelatina e amido de milho em filmes contendo extrato de torta de noz pecã, conforme demonstrado por Alves *et al.* (2023). Além disso, Jovanovic *et al.* (2021) empregaram pectina e gelatina juntamente com óleo essencial de capim-limão na formulação de biofilmes. Houve também relatos do uso combinado de quitosana e gelatina. Por exemplo, Haghighi *et al.* (2019) enriqueceram esses biopolímeros com óleos essenciais de canela, citronela, cravo-rosa, noz-moscada e tomilho. Por sua vez, Bonilla e Sobral (2019) optaram por agregar extrato de Boldo à mesma base polimérica, resultando em um filme aplicado como revestimento para queijo do tipo Prato fatiado.

A Figura 14b apresenta uma representação dos diversos OEs mais frequentemente utilizados pelos pesquisadores na elaboração de materiais ativos. Cada óleo essencial exibe atributos específicos, conferindo aos bioplásticos propriedades antioxidantes, antibacterianas, antifúngicas, anti-inflamatórias ou uma combinação destas características. A incorporação de óleos essenciais neste contexto é de suma importância, ampliando as possibilidades de aplicação e permitindo a exploração de óleos essenciais não convencionais, potencializando as propriedades dessas matérias-primas.

Para avaliar a evolução das pesquisas no contexto da utilização de pectina como polissacarídeo na produção de bioplásticos comestíveis, juntamente com o emprego dos óleos essenciais de orégano e limão, conduziu-se uma análise adicional na base de dados da *Web of Science*. Os termos de busca adotados para essa pesquisa foram os mesmos da primeira pesquisa, conforme descritos na Tabela 2, porém, foi adicionado as palavras-chave "*Pectin*" (pectina), "*Oregano Essential Oil*" (óleo essencial de orégano) e "*Limon Essential Oil*" (óleo essencial de limão) para uma análise mais específica.

Os resultados obtidos, representados na Figura 17, refletem um crescimento exponencial no número de estudos relacionados ao uso da pectina como polímero na fabricação de bioplásticos comestíveis. Além disso, o uso do óleo essencial de orégano (OEO) também demonstra uma tendência ascendente, sendo mais notável o aumento de publicações no ano de 2021.

Figura 17 - Número de artigos publicados no desenvolvimento de bioplásticos com o uso de: pectina (vermelho), óleo essencial de orégano (preto) e óleo essencial de limão (verde)



Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

Os estudos que investigaram o óleo essencial de limão (OEL), embora menos numerosos em comparação ao orégano, refletem um crescente interesse nesse tipo de óleo. Notavelmente, nos últimos cinco anos, observa-se um aumento substancial na quantidade de trabalhos que incorporam o OEL na composição de bioplásticos. Portanto, a investigação de bioplásticos contendo pectina e óleos essenciais de orégano e limão representa uma área de pesquisa em crescimento.

Choi *et al.*, empregaram o OEO e bergamota na elaboração de revestimentos comestíveis destinados à aplicação em ameixas 'Formosa' frescas. Os efeitos do OEO em diferentes concentrações (1- 6%) foram avaliados por Hashemi *et al.*, quanto à sua atividade antibacteriana frente a cepas de *E. coli*, *S. Typhimurium*, *P. aeruginosa*, *S. aureus* e *B. cereus*, além de sua atividade antioxidante. Aguilar-Sánchez *et al.*, utilizaram o mesmo OE, porém em concentrações de 0 %, 1 % e 2 % v/v para desenvolver um filme comestível de amido adicionado com nanocompósitos e óleo essencial de orégano mexicano

A padronização da concentração do óleo essencial na formulação dos revestimentos ativos ainda não foi estabelecida, ficando a cargo de cada autor pesquisar nas bases de dados as concentrações ideais que atendam aos objetivos desejados. Dessa forma, é comum encontrar estudos utilizando os mesmos óleos essenciais em proporções diferentes, o que também resulta em diferentes propriedades dos materiais, levando a uma variedade de resultados para um mesmo OE em filmes com diferentes características.

Essas pesquisas evidenciam a ampla gama de abordagens utilizadas na formulação de bioplásticos comestíveis, ressaltando sua viabilidade e versatilidade como um novo material para se aplicar diretamente aos alimentos, proporcionando melhores no armazenamento e na duração dos mesmos. É importante destacar também a diversidade de óleos essenciais disponíveis no mercado, que oferecem uma vasta gama de possibilidades para a composição de revestimentos comestíveis, possibilitando agregar aos bioplásticos características ativas usando óleos essenciais não tão convencionais, ou ainda aqueles que habitualmente eram utilizados para outros fins.

Nguyen *et al.* (2021) utilizou o OE de *Piper betle Linn*, uma planta tradicional da família *Piperaceae*, amplamente distribuída na Índia, Indonésia, Malásia e outros países do Sudeste Asiático e da África Oriental. Os principais componentes do *Piper betle Linn* incluem uma complexa mistura de polifenóis, flavonoides, taninos e polissacarídeos. Compostos fitoquímicos como hidroxí-chavicol, 4-cromanol e eugenol são consistentemente encontrados nas folhas do betle da Índia, conferindo-lhes notáveis propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antibacterianas e antifúngicas. O OE do betle também é reconhecido como uma fonte promissora para a produção de medicamentos e produtos fitoterápicos, sendo também empregado como aditivo alimentar para preservar e estender a vida útil de frutas secas, especiarias e noz.

Além disso, é notável que um mesmo produto pode conter não apenas a combinação de diferentes biopolímeros, mas também incorporar diversos tipos de óleos essenciais em sua formulação. Tal prática é frequente quando se busca potencializar os efeitos ativos do material ou controlar o crescimento de microrganismos específicos.

Lundgren *et al.* (2022) empregaram um revestimento comestível ativo em bananas com o intuito de mitigar o desenvolvimento de antracnose, ocasionada por patógenos distintos de

Colletotrichum musae, durante o armazenamento da fruta em temperatura ambiente. Para este fim, o filme utilizado foi composto pelo óleo essencial proveniente de *Conyza bonariensis*, uma espécie de planta alimentícia não convencional pertencente ao gênero *Conyza*, da família Asteraceae. Esta planta é amplamente distribuída pelo território brasileiro e demonstra.

Outro parâmetro a ser considerado são as técnicas empregadas na formação dos bioplásticos. Na análise dos artigos selecionados, foi possível identificar algumas técnicas, como a de “*casting*”, emulsão, nanoemulsão e pulverização. A de “*casting*” por sua vez é a mais reconhecidas e utilizadas na elaboração de filmes biodegradáveis, onde, após o processo de gelatinização há a formação de uma solução aquosa. Logo após secagem as moléculas se reorganizam, formando a matriz que origina o filme. Em outras palavras, a solução filmogênica é vertida sobre uma superfície lisa até que o material se solidifique e forme o filme. Devido à sua execução simplificada, essa técnica é a mais adotada pelos pesquisadores (De Carvalho *et al.*, 2016).

A pulverização é um método que envolve a dispersão de uma substância líquida em partículas finas. No contexto dos bioplásticos, é viável utilizar a solução filmogênica diretamente nos alimentos, pulverizando-os. Por exemplo, VU *et al.*, empregaram esse método com filmes à base de tomilho vermelho, extrato de orégano e hortelã-pimenta para investigar o prolongamento da vida útil de morangos frescos.

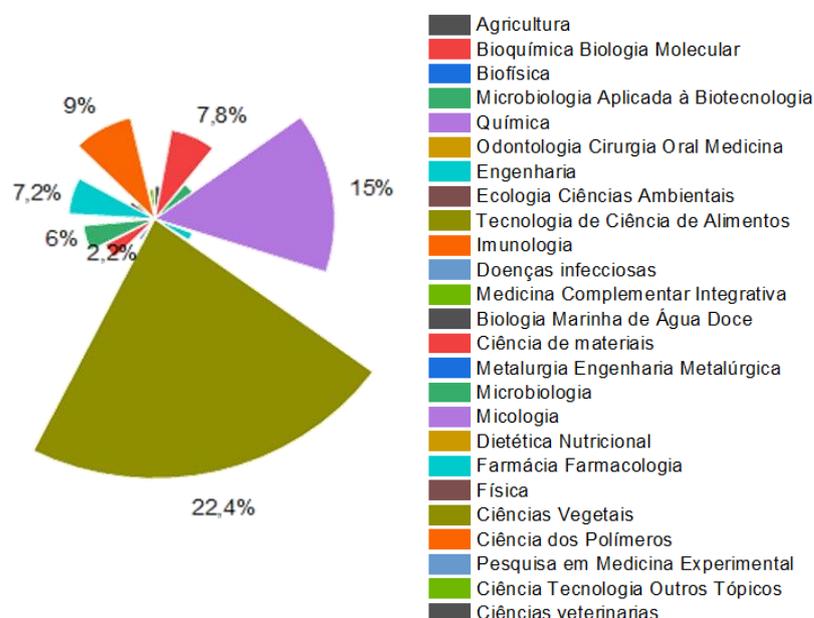
Uma técnica adicional que tem ganhado crescente popularidade é a nanoemulsão. As nanoemulsões são sistemas caracterizados por gotículas com tamanho variando entre 20 e 300 nm, apresentando várias vantagens, como serem veículos eficientes para fármacos, alta estabilidade contra sedimentação e separação de fases, aumento da permeabilidade cutânea devido ao tamanho reduzido das gotículas, e maior área de contato com a superfície. Dessa forma, o aprimoramento das propriedades desses filmes tem sido alvo de estudo por meio do reforço da matriz polimérica com nanopartículas, resultando em um material frequentemente denominado bionanocompósito ou nanocompósito. Tais nanopartículas despertam considerável interesse devido à sua capacidade de preencher a matriz polimérica, melhorando suas propriedades mecânicas, térmicas, de barreira, entre outras (Saranti, 2019). Miranda *et al.* (2022) empregaram essa abordagem para desenvolver revestimentos à base de emulsões de cera de carnaúba incorporadas com óleo essencial de gengibre e hidroxipropilmetilcelulose, visando

melhorar a vida útil, reduzir a perda de peso, controlar a mudança de cor e retardar o amadurecimento do fruto do mamão.

Em suma, a aplicação de diversas técnicas na formação dos bioplásticos tem sido objeto de estudo devido à sua relevância na produção de filmes biodegradáveis e revestimentos ativos. Essas abordagens têm implicações importantes não apenas na conservação de alimentos, mas também em outras áreas, como a farmacêutica e cosmética. Para uma compreensão mais abrangente das aplicações e avanços nesse campo, deve-se explorar as diferentes áreas de pesquisa que se dedicam com maior ênfase a essa nova tecnologia.

No exame dos artigos analisados, é viável classificá-los em diferentes áreas para uma compreensão mais aprofundada dos setores que se dedicam com maior ênfase a essa nova tecnologia. Conforme retratado na Figura 18, observa-se que os trabalhos abarcam principalmente as áreas de Tecnologia de Ciência de Alimentos, Química e Ciência de Polímeros, sendo importante destacar que essa categorização é intrínseca à própria estrutura da *Web of Science*.

Figura 18 -Análise por categorias da Web of Science



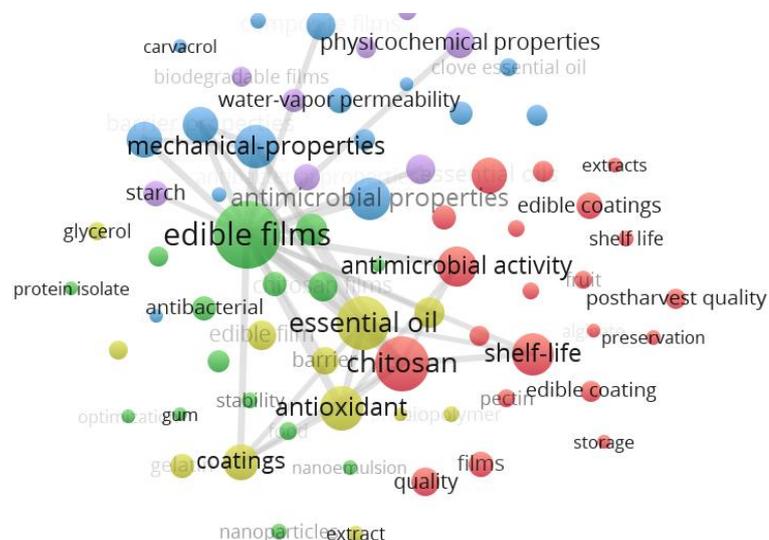
Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

Um aspecto adicional a ser considerado é o conjunto de palavras-chave empregadas nos artigos, visto que essas expressões são selecionadas pelos autores e refletem a essência do

trabalho, sendo capazes de revelar os temas ou propostas mais recorrentes entre os estudos analisados. A partir dessa análise, é possível identificar as palavras-chave mais frequentes, como "*Edible films*" (filmes comestíveis), "*Shelf-life*" (vida útil), "*Antimicrobial properties*" (propriedades antimicrobianas), "*Antioxidante*" (antioxidantes), "*Essential oil*" (óleo essencial), entre outras, conforme evidenciado na Figura 19. A elaboração dessa nuvem de palavras foi realizada por meio do *software VOSviewer*, aplicou-se um filtro de, no mínimo, 10 palavras-chave por documento para destacar os termos mais prevalentes entre os artigos. Essas observações indicam que as pesquisas nesse domínio estão concentradas no desenvolvimento de revestimentos comestíveis que possuam propriedades antioxidantes e antimicrobianas, visando principalmente prolongar a durabilidade dos produtos alimentícios tratados com esses filmes. Esses objetivos alinham-se com os propósitos deste estudo e espelham a tendência atual na pesquisa do campo em questão.

Além disso, a análise das palavras-chave revela não apenas os temas mais recorrentes, mas também proporciona *insights* sobre as áreas de interesse predominantes na comunidade científica. É interessante observar que o foco em propriedades antioxidantes e antimicrobianas reflete não apenas as demandas atuais da indústria alimentícia, mas também o crescente interesse da sociedade por alimentos mais saudáveis e seguros. A busca por soluções inovadoras para prolongar a vida útil dos alimentos tem impulsionado a pesquisa nesse campo, levando a uma ampla gama de estudos que exploram diferentes abordagens, desde a utilização de óleos essenciais até a incorporação de nanopartículas em filmes comestíveis.

Figura 19 - Análise das palavras-chaves dos artigos publicados



Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

Também é possível identificar os autores mais proeminentes em termos de quantidade de artigos e de citações na área dos bioplásticos comestíveis. A Tabela 3, gerada pelo *software VOSviewer*, apresenta os autores com o maior número de publicações e a quantidade total de citações que seus trabalhos receberam até o ano de 2023.

A análise de citações é uma ferramenta útil para avaliar o impacto e a visibilidade de autores, publicações e instituições na comunidade científica. Ela permite medir o impacto da ciência, analisando as referências usadas nas pesquisas. A citação é um ato que confirma a importância da ciência referenciada (Castanha *et al.*, 2020). É importante notar que o número de citações se refere à soma de todas as citações dos trabalhos do autor, sem distinguir quantas citações cada trabalho individualmente obteve, e que o filtro utilizado foi de ao menos 2 trabalhos por autor.

Tabela 3 - Autores mais relevantes no segmento dos bioplásticos comestíveis

Autores	Documentos	Citações
de souza, el	8	144
guo, y	7	466
aouada, fa	5	246
de moura, mr	5	246
magnani, m	5	95
otoni, cg	5	494
yang, x	5	394

Fonte: A autora com dados da *Web of Science* (2023).

É razoável que o autor Caio Gomide Otoni, embora não seja o mais prolífico no que se refere aos documentos diretamente relacionados ao escopo deste estudo, ostenta um número específico de instruções. Seu corpo de trabalho acumula mais de 4.300 citações, englobando uma ampla variedade de pesquisas, desde polímeros e bioplásticos até ciência de materiais e outras áreas afins. Em contrapartida, o autor Evandro Souza tem um maior número de artigos publicados que abordam bioplásticos contendo óleos essenciais. Ele mantém uma extensa lista

de estudos sobre o sinergismo de diferentes óleos essenciais e seus efeitos antioxidantes em produtos alimentícios. O trabalho desses autores, ambos brasileiros, entre tantos outros que estudam o desenvolvimento de novos materiais, é extremamente importante para o avanço científico na área dos bioplásticos e suas utilizações.

5.2 PATENTES

Para examinar as patentes relacionadas à pesquisa deste estudo, uma busca foi conduzida usando os termos listados na Tabela 4. Os termos em inglês foram escolhidos para identificar patentes ou famílias de patentes focadas no desenvolvimento de bioplásticos comestíveis incorporando óleos essenciais de diversas naturezas, abrangendo um período de 10 anos (2013-2022). Após uma avaliação detalhada de todas as patentes, 166 famílias foram identificadas. Em seguida, foram selecionadas as 40 famílias que apresentaram maior profundidade com os objetivos deste estudo.

Uma família de patentes compreende várias patentes registradas em diferentes países para proteger uma mesma invenção. Uma característica fundamental de uma família de patentes é que o direito de prioridade do primeiro depósito se estende a todas as outras patentes depositadas em diversos países.

Tabela 4 - Pesquisa das famílias de patentes no Orbit com as palavras-chave

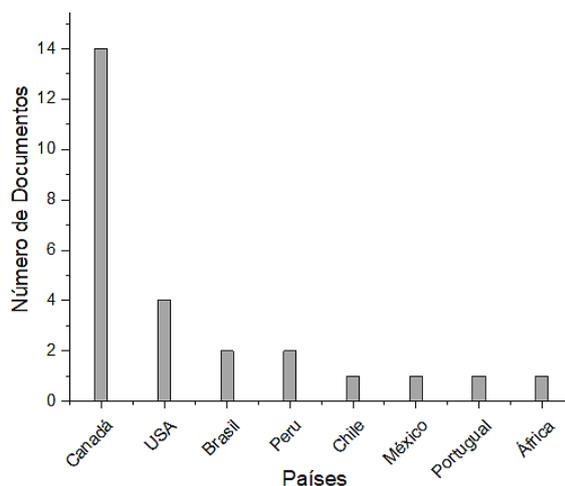
Pesquisa	n° documentos
(((Biofilm* OR Edible Biofilm* OR Edible Bioplastic* OR Edible Film OR Edible Coating* OR Edible Biocomposite* OR Edible Composite*) AND (Essential Oil*) AND (Eapd=2013-01-01:2022-12-31))	156
Após alinhamento	40

Fonte: A autora com dados de *Orbit* (2023).

É possível observar os países onde essas famílias de patentes estão depositadas. Na Figura 20, observa-se que no Canadá é onde detém maior número desses depósitos, seguidos dos Estados Unidos e do Brasil.

Nos últimos anos o governo do canadense mudou as regras para o depósito das patentes, as mudanças visam incentivar o depósito de pedidos de patente de alta qualidade, tornando o processo mais rápido e eficiente. Essas mudanças podem ter corroborado para um aumento de depósitos no país (LexLatin, 2022).

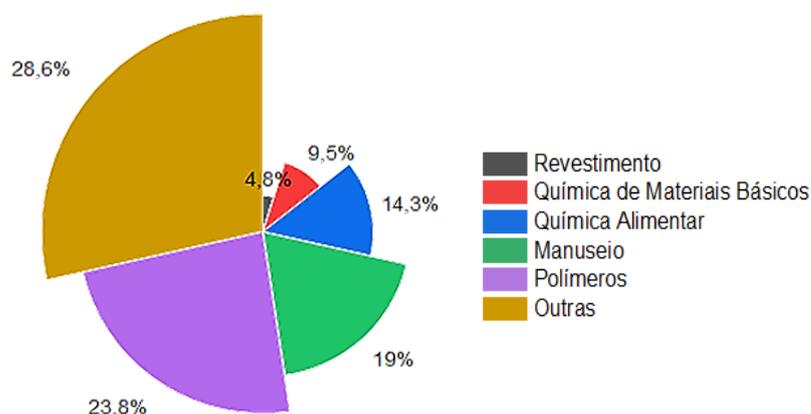
Figura 20 - Número de famílias de patentes registradas nos últimos 10 anos por países



Fonte: A autora com dados de Orbit (2023).

Os depósitos de patentes englobam várias categorias, com destaque para Polímeros, representando mais de 23 % dos registros, uma vez que os bioplásticos comestíveis pertencem a essa categoria de polímeros biodegradáveis. Em seguida, encontramos as categorias de Química Alimentar, Química de Materiais Básicos e Revestimentos, conforme ilustrado na Figura 21. A categorização por áreas foi realizada utilizando o *software Orbit Intelligence*.

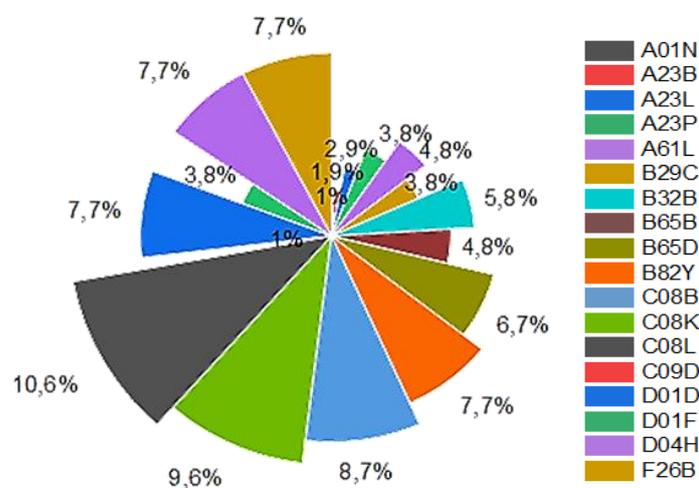
Figura 21 - Categorias das famílias de patentes registradas



Fonte: A autora com dados de *Orbit* (2023).

Além disso, fez-se uma análise das áreas em que as famílias de patentes estavam distribuídas, com o objetivo de avaliar sua contribuição real para as tecnologias relacionadas aos bioplásticos comestíveis incorporados com óleos essenciais. Isso proporcionou uma visão geral das tecnologias. Para esta análise, utilizou-se a Classificação Internacional de Patentes (CIP) para determinar a área tecnológica a qual os documentos estão associados, conforme Figura 22.

Figura 22 - Classes de patentes



Fonte: A autora com dados de *Orbit* (2023).

Observe-se que as áreas mais representativas em termos de quantidade de patentes estão divididas nas classes C08, que engloba Compostos Macromoleculares Orgânicos, com 28,9 % das patentes, e A23, relacionadas a Alimentos ou Produtos Alimentícios e seu Tratamento, que compreende 13,4 % do total. Em seguida, a classe B65, referente a Transporte, Embalagem, Armazenamento e Manipulação de Material Delgado ou Filamento, representa 11,5 % das patentes. Logo após, a classe B32, que envolve Produtos em Camadas, com 5,8 %. Nas classes A01 e C09, conforme detalhado na Tabela 5, é possível identificar as principais classes e subclasses que essa distribuição representa, de acordo com as categorias determinantes pela CIP disponibilizada pela Organização Mundial de Propriedade Intelectual (WIPO - World Organization of Propriedade Intelectual).

Tabela 5 - Definição da classificação por CIP de acordo com o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) das subseções encontradas na Figura 22

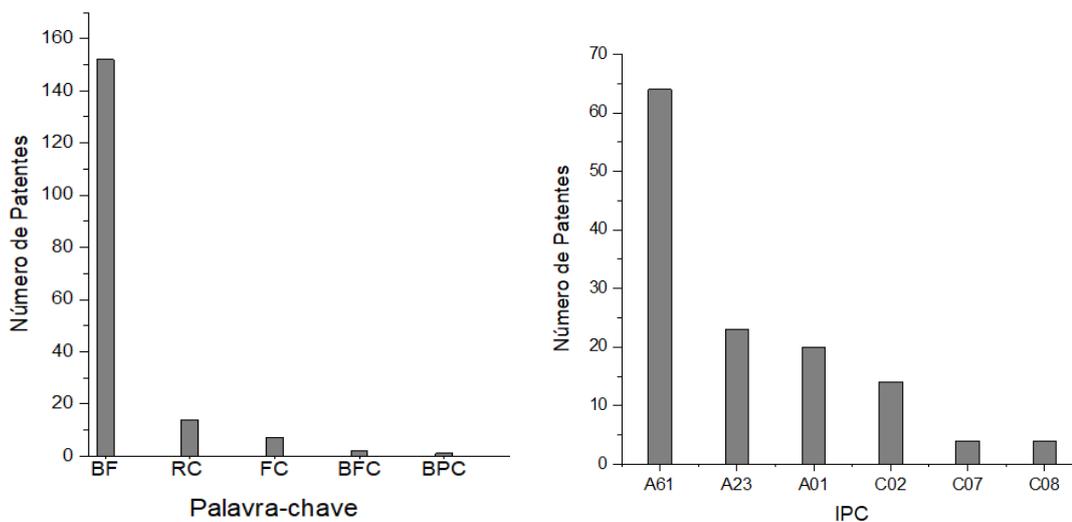
Classe	Descrição	Subclasse	Atribuição
A01	Agricultura; silvicultura; pecuária; caça; captura em armadilhas; pesca	N	Conservação de corpos de seres humanos ou animais ou plantas ou partes dos mesmos; biocidas
A23	Alimentos ou Produtos Alimentícios; Tratamento Dos Mesmos, Não Abrangido Por Outras Aulas	B	Conservação
		L	Alimentos, produtos alimentícios ou bebidas não alcoólicas; conservação de alimentos ou produtos alimentícios, em geral
		P	Modelagem ou processamento de produtos alimentícios, não totalmente abrangidos por uma outra subclasse isolada
B32	Produtos em camadas	B	Produtos em camadas, ou seja, produtos estruturados com camadas de forma plana ou não plana
B65	Transporte; embalagem; armazenamento; manipulação de material delgado ou filamentar	B	Máquinas, aparelhos ou dispositivos para ou métodos de embalar artigos ou materiais; de embalagem
		D	Recipientes para armazenamento ou transporte de artigos ou materiais
C08	Compostos macromoleculares orgânicos; sua preparação ou seu processamento químico; composições baseadas nos mesmos	B	Polissacarídeos; seus derivados
		K	Uso de substâncias inorgânicas ou orgânicas não-macromoleculares como ingredientes de composições
		L	Composições de compostos macromoleculares
C09	Corantes; tintas; polidores; resinas naturais; adesivos; composições não abrangidas em outros locais; aplicações de materiais não abrangidos em outros locais	D	Composições de revestimento

Fonte: A autora com dados da WIPO (2023).

Para uma análise mais detalhada das patentes, foi realizada uma busca adicional no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) em fevereiro de 2024. Fundado em 1970, o

INPI é uma autarquia federal subordinada ao Ministério da Economia, incumbida do desenvolvimento, disseminação e administração do sistema brasileiro de concessão e proteção de direitos de propriedade intelectual para o setor industrial. As palavras-chave listadas na Tabela 4 foram pesquisadas individualmente, em língua portuguesa, visando localizar as patentes registradas sob os termos investigados. O resultado dessa busca está representado na Figura 23.

Figura 23 - (a) Número de patentes registradas no INPI por palavra-chave (b) Número de patentes registradas no INPI por classe



BF= Biofilme; RC= Revestimento Comestível FC= Filme Comestível; BFC= Biofilme Comestível e BPC = Bioplástico Comestível

Fonte: A autora com dados do INPI (2023).

Durante a busca utilizando o termo "Biofilme", foram identificados 152 registros de patentes. No entanto, é importante destacar que esses registros abrangem uma variedade de áreas, incluindo odontologia, farmácia, medicina e outros setores além do escopo específico deste estudo. Portanto, o termo "Biofilme" não se refere exclusivamente aos materiais abordados neste artigo. Por sua vez, ao pesquisar pelo termo "Revestimento Comestível", foram encontradas 17 patentes, das quais três estão fora do escopo do presente estudo, resultando em 14 patentes relevantes para o tema em questão.

A inclusão do termo "Filme Comestível" na busca resultou em sete patentes identificadas no banco de dados do INPI. Por outro lado, os termos "Biofilme Comestível" e "Bioplástico Comestível" apresentaram resultados mais modestos, com uma e duas patentes

encontradas, respectivamente. Nenhuma informação foi encontrada ao buscar pelos termos restantes listados na Tabela 4.

Durante a investigação conduzida no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), constatou-se que a classe mais preponderante de patentes é a A61, como evidenciado na Figura 23b. Esta categoria está associada à ciência médica ou veterinária, bem como à higiene. O volume substancial de patentes registradas sob esta classe pode estar correlacionado ao termo "Biofilme" empregado na pesquisa, abrangendo, conseqüentemente, diversas áreas do conhecimento. Em seguida, a segunda classe mais prevalente é a A23, que versa sobre Alimentos ou Produtos Alimentícios. É digno de nota que essa categoria também se destacou na busca conduzida na plataforma *Orbit Intelligence*, sugerindo uma concentração significativa de proteções no domínio alimentício. Adicionalmente, a classe A01 demonstra uma representatividade expressiva. Para uma análise mais minuciosa das classes foi mencionada na Tabela 4.

A análise de patentes realizada tanto por meio da plataforma *Orbit Intelligence* quanto do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) evidência claramente a predominância dos trabalhos investigados no âmbito alimentar e de embalagens. Este achado ressalta que o novo método de preparação de revestimentos está intrinsecamente ligado à melhoria do armazenamento de alimentos, viabilizando até mesmo uma extensão no tempo de prateleira. Tais materiais inovadores representam um avanço significativo para a ciência e a tecnologia, ao oferecerem uma solução prática e eficaz para um problema tão premente quanto o desperdício alimentar. A integração desses dois cenários representa uma abordagem mais sustentável, alinhada aos princípios da Economia Circular, uma vez que muitos dos trabalhos aqui analisados utilizavam biomassas como matéria prima. Esses revestimentos podem ser empregados tanto nas residências dos consumidores quanto no pós-colheita, minimizando as perdas durante o transporte, uma vez que os bioplásticos formam uma barreira física, química e biológica.

Além disso, a busca por soluções mais sustentáveis não se limita apenas ao aspecto ambiental, mas também engloba considerações econômicas e sociais. Os bioplásticos comestíveis ativos não apenas oferecem uma alternativa viável aos plásticos convencionais derivados de combustíveis fósseis, mas também representam uma oportunidade para a criação

de empregos e o estímulo à economia circular. A integração desses materiais na cadeia produtiva alimentar não apenas promove a redução do impacto ambiental, mas também impulsiona o desenvolvimento econômico local e fortalece a resiliência das comunidades.

Para concluir a investigação delineada neste estudo, elaborou-se uma tabela contendo informações extraídas dos 15 artigos mais relevantes, conforme determinado pelo método de *InOrdinatio*. É importante ressaltar que alguns artigos de revisão figuravam entre os primeiros na classificação de relevância, no entanto, para a compilação da tabela, considerou-se apenas os artigos que descreviam a preparação de revestimentos comestíveis. Os artigos selecionados foram submetidos a uma avaliação abrangente, levando em conta a matriz polimérica empregada, o componente ativo incorporado, a concentração deste componente, a técnica de aplicação utilizada e os objetivos finais do estudo, conforme Tabela 6.

Não há um padrão evidente na escolha da matriz polimérica e dos compostos ativos, nem mesmo em relação à concentração desses componentes na composição dos materiais. Essa diversidade demonstra a versatilidade e a ampla gama de aplicações desses materiais, uma vez que cada composição resulta em um material com propriedades distintas, abrindo caminho para inúmeras possibilidades de desenvolvimento. Nos últimos cinco anos, observa-se uma tendência crescente de aplicação dos bioplásticos comestíveis como revestimentos imediatamente após sua produção. Previamente, os pesquisadores se concentravam no desenvolvimento de soluções filmogênicas, caracterizando-as e destacando seus aspectos promissores. Entretanto, a análise do impacto desses materiais nos alimentos, quando utilizados como revestimentos, era limitada.

Essa abordagem evoluiu à medida que os pesquisadores começaram a aplicar esses revestimentos em diversos alimentos, como laranjas, investigadas por Nguyen *et al* (2021). Também foi proposto o revestimento de mangas, estudadas por Zhou *et al* (2021), e bananas examinadas por Lundgren *at al* (2022). Essa mudança permitiu uma análise mais aprofundada dos benefícios que os revestimentos ativos podem proporcionar aos alimentos, bem como sua eficácia em prolongar efetivamente o tempo de vida útil dos mesmo.

Tabela 6 - Artigos classificados como os mais relevantes no âmbito dos bioplásticos comestíveis ativos

Matriz	Composto Ativo	Concentração do Composto Ativo (%)	Técnica	Aplicação	Ano/Referência
Caseinato de Sódio	Canela e Gengibre	0,025; 0,050; 0,075 e 0,100	Emulsão	Filme	Atarés <i>et al.</i> , 2010
Soja solúvel	Zataria multiflora e Mentha pulegium	1; 2 e 3	Emulsão	Filme	Salarbashi <i>et al.</i> , 2013
Goma de Semente de Marmelo	Tomilho	0; 1; 1,5 e 2	Emulsão	Filme	Jouli <i>et al.</i> , 2014
Alginato de Sódio	Tomilho, capim-limão e sálvia	1	Nanoemulsão	Filme	Acevedo-fani <i>et al.</i> , 2015
Poli(ácido láctico)	Bergamota, Capim-limão, Alecrim e Cravo	9	Casting	Filme	Qin <i>et al.</i> , 2017
Goma de Semente de Manjeriço	Zataria multiflora	0; 1; 2 e 3	Nanoemulsão	Filme	Gahruie <i>et al.</i> , 2017
Pectina	Cravo-da-Índia	0,2	Emulsão	Filme	Nisar <i>et al.</i> , 2018

Quitosana-Gelatina	Canela, Citronela, Cravo rosa, Noz-moscada e Tomilho	1	<i>Casting</i>	Filme	Haghighi <i>et al.</i> , 2019
Carboximetilcelulose e Grãos de kefir	Satureja Khuzestanica,	0; 1; 1,5 e 2	<i>Casting</i>	Filme	Hasheminya <i>et al.</i> , 2019
Alginato de Sódio	Artemisia herba-alba e Manjeriço	1	Emulsão	Filme	Mahcene, Z. 2020
Álcool polivinílico/goma arábica/quitosana	Pimenta-do-reino e Gengibre	10; 15; 20; 25; 30; 40 e 50	Moldagem	Filme	Amalraj <i>et al.</i> , 2020
Goma de Cordia	Salvia mirzayanii	1; 1,5 e 2	Nanoemulsão	Filme	Hasheminya <i>et al.</i> , 2021
Quitosana	Piper betle Linn	0,4; 1 e 1,2	<i>Casting</i>	Revestimento em Laranja	Nguyen <i>et al.</i> , 2021
carboximetilquitosana-pullulan	Galangal	8	Moldagem	Revestimento em Manga	Zhou <i>et al.</i> , 2021
Goma arábica	Conyza bonariensis	0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1	Emulsão	Revestimento em Banana	Laudgren <i>et al.</i> , 2022

Fonte: A autora.

5.3 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO BAGAÇO DE MALTE E CARACTERIZAÇÃO

O bagaço de malte apresentou baixos teores de umidade, cinzas, lipídeos e elevado teor de fibras e proteínas, os valores podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição centesimal do bagaço de malte

Umidade (%)	Cinzas (%)	Proteína (%)	Lipídeos (%)	Fibras (%)	Referências
2,06 ± 0,05	3,35 ± 0,01	21,41 ± 0,3	5,96 ± 0,3	13,01 ± 0,3	A autora
8,8	2,40	23,3	-	14,7	Lukda <i>et al.</i> , (2022)
5,24	2,40	22,99	9,89	-	Viera <i>et al.</i> , (2022)
2,86	3,88	25,20	-	11,3	Naibaho <i>et al.</i> , (2021)
23,96	5,42	23,53	9,42	-	Figueiredo <i>et al.</i> , (2020)

Fonte: A autora.

O bagaço de malte utilizado neste estudo apresentou composição semelhante aos resultados relatados por Lukda *et al.* (2022), com diferença significativa apenas em relação ao teor de umidade, onde a autora obteve um resultado de 8,8 %, já neste trabalho o teor de umidade para o BM foi de 2,06 ± 0,05. Figueiredo *et al.* (2020) obteve valores ainda maiores para o teor de umidade, chegando a mais de 23 %.

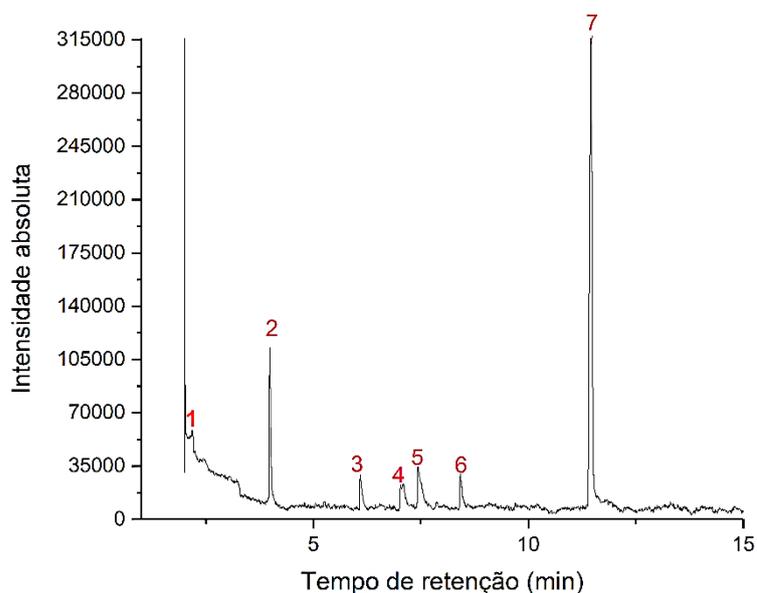
O teor de cinzas e proteínas está dentro dos valores encontrados na literatura. Para cinzas os valores variaram entre 2,40 % a 5,42 %, o valor encontrado neste trabalho está localizado dentro desta margem. Para proteínas os valores variaram de 21,41 % a 25,20 %, sendo o percentual mais baixo encontrado neste trabalho. A composição variável do bagaço de malte é influenciada por fatores como o tipo de malte e o processo de produção, conforme indicado por Saraiva *et al.* (2019), e embora a diversidade na composição centesimal desses subprodutos seja atribuída a vários elementos, como variedade da cevada, época da colheita, grãos utilizados, processo de mosturação, presença de resíduos de derivados e tipo de cerveja obtida, a gestão desses resíduos ainda segue predominantemente um modelo linear.

5.3.1 Caracterização do extrato de bagaço de malte

Após extração, o rendimento obtido foi de 13,78 % e pode ser considerado elevado ao compará-lo com estudos da literatura sobre extração de óleos essenciais de diferentes biomassas. Por exemplo, em um estudo realizado pela Embrapa, os teores de óleo essencial extraídos de diferentes tipos de biomassas vegetais variaram entre 4,1% e 6,7%, dependendo da umidade da amostra (Embrapa, 1999). Esses valores são inferiores ao rendimento encontrado para o EBM, o que pode ser explicado pela composição do bagaço de malte, que contém uma maior variedade de compostos orgânicos extraíveis, como polissacarídeos, proteínas e compostos fenólicos.

A Figura 24 demonstra os compostos identificados no cromatograma do EBM. Para interpretá-la a Tabela 8 contém o tempo de retenção e a similaridade percentual de cada composto encontrado. A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) é uma técnica poderosa para identificar e quantificar compostos voláteis e semivoláteis em uma amostra.

Figura 24 - Cromatograma de massas (CG-MS) para o EBM



EBM: Extrato de bagaço de malte

Fonte: A autora.

Tabela 8 - Lista de compostos identificados no cromatograma de massas do EBM

Pico	Composto	Tempo de retenção (min)	Similaridade (%)
1	Álcool isopropílico	2.020	96
2	2-Pentanol	3.985	97
3	4-metil-2-Pentanol	6.095	96
4	2-Hidroxi-3-pentanona	7.100	84
5	2,3-Butanodiol	7.435	97
6	Ácido propanóico	8.425	97
7	Ciclohexanol	11.465	98

Fonte: A autora.

O primeiro pico representa o álcool isopropílico que é um composto volátil conhecido por suas propriedades antimicrobianas e solventes. Sua presença no bagaço de malte sugere que ele contém componentes típicos de processos de fermentação ou extração, e a alta similaridade confirma uma identificação confiável (Pinto *et al.*, 2012).

No caso das bebidas alcoólicas, os álcoois superiores, como o 2-pentanol (pico 2), desempenham um papel importante no aroma. A produção de álcoois superiores é uma característica comum das leveduras, e a quantidade desses compostos pode variar com as condições de fermentação e com a linhagem utilizada. A presença de 2-pentanol no extrato indica que o bagaço de malte contém substâncias associadas à atividade microbológica ou à degradação de açúcares. Além disso, o 4-metil-2-pentanol (pico 3), que também pode ser um subproduto de fermentação, é comum em produtos fermentados e resulta de reações químicas envolvendo aminoácidos ou outros precursores durante a fermentação. A presença desses compostos sugere a atividade de fermentação e a formação de álcool, refletindo um perfil de compostos resultantes de processos metabólicos complexos durante a produção de malte (Cavalcante, 2009).

A 2-hidroxi-3-pentanona, que corresponde ao quarto pico encontrado, e seu isômero, são compostos com aromas amanteigados e notas de caramelo, encontrados em alimentos como queijo e vinho. Esses compostos, junto com o 2,3-butanodiol (pico 5), podem indicar processos fermentativos e atividade microbiana no bagaço de malte. Além disso, a presença de ácido

propanóico (pico 6) pode sinalizar fermentação ou degradação de lipídios, uma vez que o BM usado para esse estudo contém lipídios em torno de $5,96 \pm 0,3 \%$ (Dobiašová *et al.*, 2024).

Finalmente, o ciclohexanol, um álcool que pode ser produzido durante reações químicas com ciclohexano, pode refletir reações químicas no bagaço de malte ou a presença de contaminantes. É importante notar que o ciclohexano foi utilizado como solvente na extração do EBM (Steyer, 2010).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPLÁSTICOS COMESTÍVEIS ATIVOS

Os filmes foram nomeados de acordo com sua composição final, utilizando uma nomenclatura baseada nas etapas de preparação descritas no Quadro 1. Todos os filmes receberam uma numeração referente à Etapa 1 ou Etapa 2, seguida de uma letra para indicar o óleo essencial utilizado. Os filmes contendo óleo essencial de limão foram identificados com a letra "L", enquanto aqueles contendo óleo essencial de orégano receberam a letra "O". Esses materiais correspondem à Etapa 1 do processo de preparação. Já os filmes que contêm ambos os óleos essenciais foram identificados com a numeração correspondente à Etapa 2, seguida pela sigla "OL".

5.4.1 Umidade

Os valores de umidade dos filmes estão apresentados na Quadro 2. Os ensaios foram realizados em quadruplicata, com amostras coletadas de diferentes regiões dos filmes, incluindo a lateral e o centro do material. As médias das pesagens foram calculadas e os valores resultantes foram incorporados no cálculo final.

Quadro 2 - Teor de umidade dos filmes

Código da Amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Teor de Umidade (%)
B1	0,022	0,020	9,090
B2	0,021	0,019	9,523
B3	0,068	0,061	10,294
B4	0,055	0,047	14,545
1 L	0,017	0,016	5,882
2 L	0,029	0,027	6,899

Código da Amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Teor de Umidade (%)
1 OL	0,030	0,020	23,333
2 OL	0,035	0,029	20,000
3 OL	0,015	0,013	13,333
4 OL	0,034	0,028	17,647
5 OL	0,029	0,023	20,689
6 OL	0,027	0,024	11,111

3 L	0,028	0,024	14,285
4 L	0,016	0,015	6,250
5 L	0,019	0,016	15,789
6 L	0,027	0,023	14,814
7 L	0,025	0,024	4,000
8 L	0,026	0,023	11,538
9 L	0,022	0,020	9,090
10 L	0,016	0,015	6,250
11 L	0,024	0,021	12,500
12 L	0,047	0,046	2,127
13 L	0,030	0,026	13,333
1 O	0,029	0,026	10,344
2 O	0,028	0,024	14,285
3 O	0,035	0,026	25,714
4 O	0,022	0,020	9,090
5 O	0,016	0,013	18,750
6 O	0,018	0,015	16,666
7 O	0,013	0,012	7,692
8 O	0,016	0,014	12,500
9 O	0,025	0,022	12,000
10 O	0,012	0,011	8,333
11 O	0,015	0,020	25,000
12 O	0,020	0,013	35,000
13 O	0,011	0,009	18,181

7 OL	0,035	0,032	8,571
8 OL	0,021	0,019	9,524
9 OL	0,086	0,072	16,279
10 OL	0,027	0,022	18,518
11 OL	0,031	0,030	3,225
12 OL	0,037	0,034	8,108
13 OL	0,027	0,025	7,407
14 OL	0,022	0,020	9,090
15 OL	0,026	0,023	11,538
16 OL	0,031	0,026	16,129
17 OL	0,042	0,036	14,286
18 OL	0,059	0,055	6,779
19 OL	0,038	0,032	15,789

Fonte: A autora.

Na Etapa 1, os menores e maiores teores de umidade foram observados nas amostras 12L e 12O, respectivamente. A diferença substancial entre as amostras 12L (2,127 %) e 12O (35,000 %) destaca a influência crucial do tipo de óleo essencial na retenção de umidade. Apesar de ambos os materiais apresentarem a mesma composição e concentração de aditivos (3 % de OE e 7,5 % de EBM), a variação significativa no teor de umidade deve-se exclusivamente ao tipo de óleo essencial utilizado.

A retenção de umidade é fortemente afetada pela proporção entre as partes hidrofílicas e hidrofóbicas dos componentes. A umidade tende a se transferir através das regiões hidrofílicas. As diferenças no comportamento das amostras em relação à umidade podem ser atribuídas às características físico-químicas únicas de cada óleo essencial (Gonçalves & Soares, 2010). O OEL (amostra 12L) é composto predominantemente por monoterpenos, como limoneno, beta-pineno e gamma-terpinene, que são hidrofóbicos e têm baixa afinidade com água (Cano & García, 2008). Esses compostos hidrofóbicos resultam em menor retenção de umidade.

Por outro lado, o OEO (amostra 12O) contém compostos fenólicos, como carvacrol e timol, que são mais polares e, portanto, hidrofílicos (Gonçalves & Soares, 2010). A maior afinidade desses compostos com a água contribui para uma maior capacidade de retenção de umidade no material. Esse padrão pode ser observado em todas as outras amostras, onde as que contêm OEL possuem teor de umidade inferiores às que contêm OEO.

Esses resultados contrastam com os achados de De Menezes Filho *et al.* (2019), que observaram um teor de umidade de 8,45 % em biofilmes de resíduos de melancia, e de Altmann *et al.* (2018), que relataram teores de umidade variando de 22,59 % a 26,41 % em biofilmes de amido de milho. A diferença observada nos resultados pode ser atribuída ao uso de diferentes materiais de base e aditivos, como o glicerol, que é conhecido por seu alto caráter higroscópico, ou seja, sua grande afinidade com água (Altmann *et al.*, 2018). Conforme apontado por Müller *et al.* (2008), biofilmes produzidos a partir de materiais higroscópicos, como o glicerol, tendem a apresentar altos valores de umidade.

Nas amostras de controle B1, B2, B3 e B4, observa-se que o teor de umidade aumenta de forma significativa à medida que aditivos como EBM e OEs são adicionados. A amostra B1, que contém apenas 2 % de pectina e 20 % de glicerol, apresenta o menor teor de umidade. Em contraste, a amostra B4, composta por 2% de pectina, 20% de glicerol e 3 % de OEO, exibe o maior teor de umidade. Esse aumento é provavelmente atribuído à presença do OEO, comportamento que também é observado em outras amostras com adição deste óleo.

Observando as amostras 3OL (1,5 % de OEL; 0,5 % OEO e 10 % EBM) e 4OL, que possuem a mesma composição (1,5 % de OEO; 0,5 % de OEL e 10 % de EBM) e diferem apenas pelo tipo de óleo essencial, nota-se que o teor de umidade é de 13,333 % para 3OL e 17,647 % para 4OL. Esses resultados indicam que um maior teor de OEO está associado a um maior teor de umidade.

Similarmente, nas amostras 7OL (1% OEO; 2,5 % OEL e 10 % EBM), 8OL (1% OEL; 2,5 % OEO e 10 % EBM), 13OL (0,5 % OEO; 2,5 % OEL e 7,5% EBM) e 14OL (0,5 % OEL; 2,5 % OEO e 7,5 % EBM), o aumento na proporção de OEO resulta em um aumento no teor de umidade. As amostras 7OL e 8OL, com 1 % de OEO e 2,5 % de OEL, apresentaram um teor de umidade de 8,571 % e 9,524 %, respectivamente. Da mesma forma, as amostras 13OL e 14OL, com 0,5 % de OEO e 2,5 % de OEL, mostraram um aumento no teor de umidade de 7,407 % para 9,090 %.

Ao examinar as amostras com a mesma concentração de ambos os óleos essenciais e variando a concentração de EBM, observa-se que um aumento na quantidade de EBM também resulta em um aumento do teor de umidade. As amostras 11OL, 12OL e 18OL contêm 1% de cada óleo essencial, mas diferem na concentração de EBM, que é de 3,2 %, 7,5 % e 11,7 %, respectivamente. A amostra 18OL, com a maior concentração de EBM, apresenta o maior teor de umidade, aproximadamente 8,1 %. Em contraste, a amostra 11OL, com a menor concentração de EBM, tem o menor teor de umidade, em torno de 3,2 %.

A análise das amostras da Etapa 2 mostra que o tipo de óleo essencial e a concentração de EBM afetam significativamente o teor de umidade dos materiais. Amostras com maior proporção de OEO apresentam teores de umidade mais altos devido à maior afinidade dos compostos fenólicos do OEO com a água. Além disso, um aumento na concentração de EBM também eleva o teor de umidade, sugerindo que o extrato de EBM contribui para a retenção de umidade de forma mais eficaz. Essa tendência está de acordo com o observado por Müller *et al.* (2008), que apontam que materiais higroscópicos, como o glicerol presente nos biofilmes, resultam em altos valores de umidade.

As amostras que apresentaram teores de umidade abaixo de 20 % foram selecionadas para o teste de solubilidade, uma vez que a alta umidade dos filmes poderia comprometer suas propriedades físicas e mecânicas.

5.4.2 Solubilidade

A solubilidade em água é uma característica fundamental no desenvolvimento de biofilmes para embalagens, influenciando diretamente seu desempenho em ambientes úmidos e em contato com alimentos de alta atividade de água. Filmes com baixa solubilidade, são adequados para proteger alimentos, aumentando a integridade do produto e a resistência à água, o que é essencial em embalagens que evitam a manipulação em condições adversas. No entanto, em situações específicas, como durante a cocção em meio aquoso ou em produtos prontos para consumo, uma maior solubilidade pode ser inconveniente. Além disso, em aplicações como sacolas plásticas e canudos, onde a vida útil é curta e o descarte inadequado é comum, materiais mais solúveis podem ser preferíveis para facilitar a utilização (Gontard *et al.*, 1994; Matta Junior, 2009; Leites, Frick e Cristina, 2021).

Na Tabela 9 é possível avaliar a solubilidade dos filmes selecionados para essa análise. As amostras que apresentaram umidade acima de 20 % não foram avaliadas quanto sua solubilidade, além disso, as amostras foram selecionadas de forma estratégica para analisar a interferência de cada OE e do EBM no teor de solubilidade dos materiais.

Tabela 9 - Teor de solubilidade dos filmes

<i>Código da Amostra</i>	<i>Peso Inicial (g)</i>	<i>Peso Final (g)</i>	<i>Solubilidade (%)</i>
B1	0,015	0,007	53,3
B2	0,020	0,006	70,0
B3	0,033	0,012	63,6
B4	0,025	0,007	72,0
3 OL	0,023	0,018	21,73
4 OL	0,022	0,005	77,2
8 OL	0,019	0,015	21,0
9 OL	0,044	0,007	84,0
14 OL	0,027	0,022	18,5
17 OL	0,029	0,012	58,6
19 OL	0,041	0,013	68,2
10 L	0,015	0,010	33,3
10 O	0,022	0,019	13,6

L óleo essencial de limão; *O* óleo essencial de orégano; *OL* óleo essencial de orégano e óleo essencial de limão.

Fonte: A autora.

Ao comparar as amostras controle, observamos que as menores taxas de solubilidade foram encontradas nas amostras B1 e B3, com teores de 53,3 % e 63,3 %, respectivamente. A amostra B1 contém apenas pectina e glicerol, enquanto a amostra B3 possui uma adição de 3% de OEL. Por outro lado, as amostras com maiores solubilidade, 70 % e 72 %, foram B2 e B4 respectivamente, sendo que a amostra B2 contém 7,5 % de EBM e a amostra B4 apresenta 3 % de OEO, além de pectina e glicerol, respectivamente.

Os resultados obtidos no presente estudo são consistentes com algumas observações da literatura, mas apresentam diferenças notáveis. Rodrigues (2022), que utilizou farinha de bagaço de malte, relatou uma variação de solubilidade entre 8,85 % e 52,65 %, com um aumento na solubilidade à medida que a concentração de farinha aumentava. Em contraste, Vieira (2022), que usou extrato de bagaço de malte, encontrou valores de solubilidade entre 47 % e 54 %, sem diferença significativa entre as amostras com diferentes concentrações de extrato. Esses dados indicam que, embora o extrato de bagaço de malte possa aumentar a solubilidade em

comparação com a farinha do mesmo resíduo, o impacto é menos significativo do que o efeito da pectina e dos outros componentes nas nossas amostras. A pectina desempenha um papel crucial na solubilidade, e a adição de componentes como OEL e OEO influencia a interação com a matriz de pectina, resultando em diferenças significativas na solubilidade, conforme observado nas amostras B1, B2, B3 e B4.

Além disso, Ludka *et al.* (2021) relataram que os filmes sem extrato e aqueles contendo extrato de bagaço de malte apresentaram solubilidade em água entre 60,5 % e 69,2 %, sem diferença significativa entre as amostras. Essa alta solubilidade em água pode ser atribuída ao uso de extrato, que possui maior teor de compostos hidrossolúveis em comparação a matérias em pó. Leite, Frick e Cristina (2021) também mostraram que filmes de amido com incorporação de extrato aquoso de resíduos de laranja tiveram maior solubilidade em água em comparação com filmes contendo o pó dos mesmos resíduos, possivelmente devido ao maior teor de compostos hidrossolúveis na fração extraída. Essa observação sugere que a forma de incorporação (extrato versus pó) pode afetar a solubilidade devido à diferença no teor de compostos hidrossolúveis.

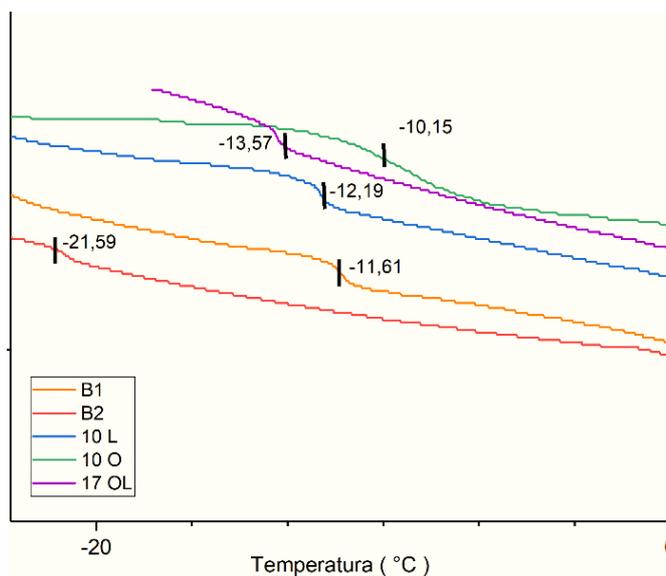
No presente estudo, as amostras contendo EBM e OEO mostraram variações na solubilidade, com amostras contendo EBM mostrando maior solubilidade, o que está alinhado com os dados de Vieira (2022) e Leite *et al.* (2021).

5.4.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A calorimetria diferencial de varredura (DSC) foi utilizada para obter os termogramas que revelam a temperatura de transição vítrea (T_g) dos filmes. A T_g, que é uma transição de segunda ordem, é identificada pela alteração na linha de base, relacionada à variação do calor específico sem que haja uma mudança significativa de temperatura ou de entalpia. Este parâmetro representa a máxima temperatura na faixa em que as cadeias poliméricas de um material amorfo ganham mobilidade durante o aquecimento. Abaixo da T_g, o material permanece em um estado vítreo, caracterizado por ser rígido e quebradiço, devido à falta de energia interna suficiente para permitir o deslocamento das cadeias poliméricas. Já acima da T_g, essas cadeias adquirem mobilidade, possibilitando rotações e movimentos difusionais, e o material se comporta como um elastômero. As temperaturas de transição vítrea dos filmes

analisados estão descritas na Figura 25 que mostra as curvas DSC para todos os filmes, nos quais as temperaturas de transição vítrea (T_g) são marcadas (Mota, Rejane Dias Pereira *et al.*, 2009).

Figura 25 - DSC da amostra B1, B2, 10 L, 10 O e 17 OL



B1= pectina 2% e glicerol 20%; B2= pectina 2%, glicerol 20% e 7,5 % EBM; 10L= 3% óleo de limão e 7,5% de EBM; 10O= 3% óleo de orégano e 7,5 % EBM e 17OL= 1% óleo limão 1% óleo orégano e 7,5% EBM.

Fonte: A autora.

Em geral, a adição de um agente plastificante, diminui a temperatura de transição vítrea dos polímeros, como todas as amostras contêm glicerol, os filmes apresentam transições vítreas abaixo de 0 °C. A adição do glicerol torna os filmes mais flexíveis, isso ocorre porque o glicerol interfere nas interações intermoleculares do polímero, aumentando a mobilidade das cadeias poliméricas, o que explica as T_g abaixo de 0 °C em todas as amostras. Desta forma não foi possível observar o comportamento sem o plastificante, uma vez que todas as amostras possuem 20 % do mesmo em sua composição, sendo assim possível analisar somente as mudanças causadas pela adição dos agentes antioxidantes como EBM e os OEs (Callister, 2002).

É possível observar que a amostra B2 possui a menor temperatura (-21,59) enquanto a amostra 10O apresenta maior temperatura (-10,15). Analisando somente as amostras controle B1 (-11,61) e B2 é perceptível que a adição de EBM a 7,5 % fez com que a temperatura de transição vítrea (T_g) abaixasse aproximadamente 10 °C, sugerindo que o EBM tem um efeito plastificante ainda mais forte que o glicerol sozinho. Isso pode ser devido à presença de

compostos no EBM que aumentam a mobilidade molecular do filme, resultando em uma diminuição significativa na Tg. Quando observamos as amostras que contêm OEs podemos notar que a diferença de temperatura entre elas é de aproximadamente 2 °C, sendo 10 L (-12,19) e 10 O (-10,15). A Tg mais elevada da amostra 10 O pode ser atribuída à diferença nas propriedades dos compostos presentes nos OEs. O óleo de orégano é mais polar e pode ter interações mais fortes com a matriz polimérica, limitando a mobilidade molecular e resultando em uma Tg mais alta em comparação ao óleo de limão.

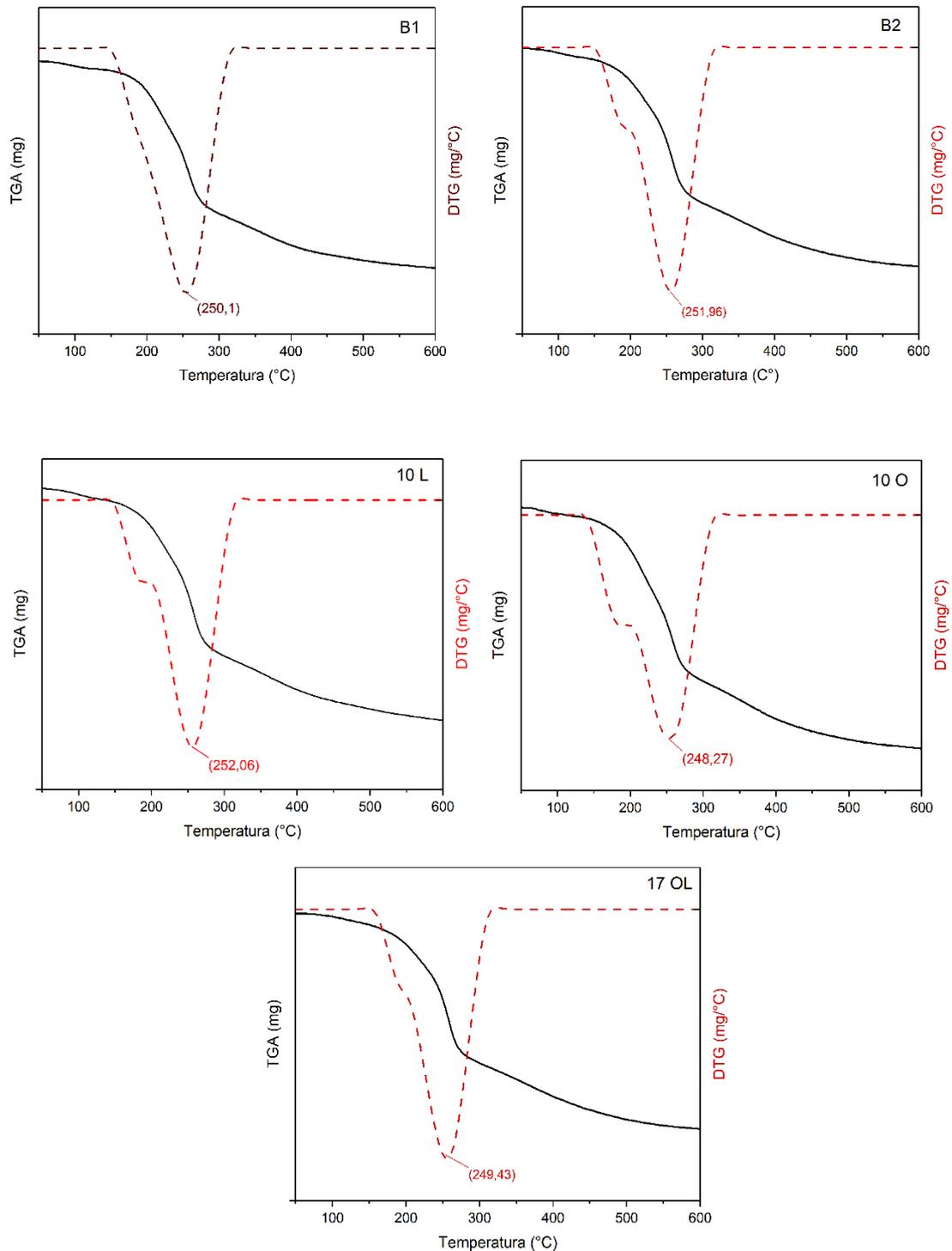
Já quando o EBM é adicionado novamente na composição do filme, como na amostra 17 OL (-13,57), que também possui a adição de 7,5% do composto mas possui a adição dos dois OEs nas concentrações de 1%. Embora essa Tg seja menor que a das amostras contendo apenas OEs, ela é maior que a da B2. Isso sugere que, embora o EBM tenha um forte efeito plastificante, a presença dos OEs, especialmente em concentrações mais baixas (1%), modera esse efeito ao aumentar ligeiramente a rigidez do material.

Valores negativos de Tg indicam que o material tem uma estabilidade relativamente reduzida, devido à alta mobilidade molecular, o que também implica uma maior reatividade dos seus componentes. No entanto, uma Tg baixa pode ser benéfica, pois proporciona ao filme uma flexibilidade significativa mesmo em temperaturas de refrigeração ou congelamento, o que pode ser uma vantagem importante para o uso como material de embalagem de alimentos (Souza, Silva e Druzian, 2012).

5.4.5 Termogravimetria (DTG)

As propriedades térmicas dos filmes também foram investigadas. As curvas derivadas de TGA (DTG) são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Gráficos TGA e DTG para as amostras: B1, B2, 10 L, 10 O e 17 OL



B1: pectina 2% e glicerol 20%; B2: pectina 2%, glicerol 20% e 7,5 % EBM; 10L: 3% óleo de limão e 7,5% de EBM; 10O: 3% óleo de orégano e 7,5 % EBM e 17OL: 1% óleo limão 1% óleo orégano e 7,5% EBM.

Fonte: A autora.

As curvas mostram duas etapas principais de degradação. A primeira, mais suave e ocorrendo abaixo de 200 °C, está associada à evaporação da água absorvida pelas amostras. A segunda etapa, com a maior taxa de degradação variando entre 248 °C e 252 °C, provavelmente

se deve à degradação simultânea da pectina e do plastificante. Esse comportamento pode estar relacionado à degradação das cadeias de resíduos de ácidos galacturônicos e à descarboxilação dos grupos ácidos, conforme descrito por Wang *et al.* (2016). A pectina comercial normalmente inicia sua degradação térmica em torno de 174 °C, alcançando a temperatura máxima de degradação em 234 °C (Santana, 2017). Já o glicerol apresenta apenas uma etapa de decomposição, em torno de 213 °C (Schlemmer, Sales, & Resck, 2010) (Wang *et al.* 2016; Santana, 2017; Schlemmer, Sales, & Resck, 2010).

Além disso, a faixa de temperatura entre 248 °C e 252 °C, observada em todas as amostras, pode também estar relacionada à volatilização dos componentes dos óleos essenciais presentes em algumas amostras (Lima, 2019). Em estudos anteriores, Merino e colaboradores (2022) observaram valores semelhantes para a primeira etapa de decomposição, ocorrendo em torno de 137 °C, e uma taxa máxima de degradação em 248°C para bioplásticos feitos com pectina e óleo essencial de nim.

A presença de EBM nas amostras B2 e 17OL, assim como dos óleos essenciais de limão e orégano nas amostras 10L, 10O e 17OL, pode afetar as contribuições observadas nas curvas, sugerindo uma sobreposição dessas curvas. A taxa máxima de decomposição próxima a 250°C sugere que os componentes dos óleos essenciais, em 10L, 10O e 17OL, estão se volatilizando ou degradando ao mesmo tempo que o polímero de pectina e o plastificante.

5.4.6 Atividade biológica

5.4.6.1 Microdiluição

Para compreender melhor a atividade biológica dos compostos, como o extrato de bagaço de malte (EBM) e os óleos essenciais, além das interações entre eles e as concentrações ideais para a produção de bioplásticos comestíveis ativos, foi utilizado o método de microdiluição em placas de poliestireno com 96 poços, avaliando 7 diferentes composições. As concentrações que apresentaram os melhores resultados de atividade biológica estão detalhadas na Tabela 10.

Agentes antimicrobianos são substâncias químicas produzidas por microrganismos, com a capacidade de matar ou inibir o crescimento de outros microrganismos. A eficácia de um agente antimicrobiano é geralmente avaliada pela Concentração Mínima Inibitória (MIC), que é a menor concentração capaz de impedir o crescimento de um microrganismo. Além disso, outro parâmetro importante é a Concentração Inibitória (IC), que mede a quantidade necessária de um composto inibidor para reduzir uma determinada atividade biológica em um percentual específico, como o IC50, que representa a concentração necessária para inibir 50% da atividade-alvo.

A principal diferença entre MIC e IC é que a MIC refere-se à concentração mínima para inibir o crescimento microbiano, enquanto o IC quantifica a concentração necessária para reduzir uma atividade biológica, como função enzimática ou crescimento celular, em uma proporção específica. Ambos os parâmetros são fundamentais para avaliar a eficácia de substâncias antimicrobianas e inibidoras, sendo aplicados em diferentes contextos científicos. Entretanto, o valor da MIC pode variar conforme diferentes fatores, como o tipo de microrganismo, tamanho do inóculo, composição do meio de cultura e condições de incubação (temperatura, pH, aeração) (Madigan, Martinko e Parker, 2003). Neste trabalho, foi avaliado o IC50 e o MIC, levando em consideração as concentrações que inibiam satisfatoriamente as bactérias testadas, mesmo que em proporções diferentes.

Tabela 10 - Atividade biológica

Teste	Concentração Inicial	<i>Staphylococcus aureus</i>		<i>Escherichia coli</i>	
		IC50 %	MIC µg/mL	IC50 %	MIC µg/mL
1	<i>Pectina 2% e Glicerol 20%*</i>	-	-	-	-
2	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%* e 7,5% de EBM aquecido</i>	-	-	-	-
3	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%* e 7,5% de EBM frio</i>	0,52 – 0,86	0,75	0,02 – 0,06	0,04
4	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%* e 75% de OEO</i>	1,2 – 5,1	3,1	0,02 – 0,31	0,1
5	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%* e 75% de OEL</i>	0,425 – 0,825	0,625	1,02 – 3,2	2,5
6	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%*, 25% de EBM e 25% de OEO</i>	0,07 – 0,036	0,1	0,05 – 0,17	0,01
7	<i>Pectina 2%, Glicerol 20%*, 25% de EBM e 25% de OEL</i>	0,12 – 0,52	0,39	0,08 – 0,25	0,19

* 20% de glicerol em relação a massa de pectina; IC= Concentração Inibitória; MIC= Concentração Mínima Inibitória; EBM= Extrato de bagaço de malte; OEO= Óleo essencial de orégano; OEL= Óleo essencial de limão

Fonte: A autora.

No primeiro teste, foi analisada a formulação base de todos os filmes produzidos, composta por 2 % de pectina e 20 % de glicerol (em relação a massa de pectina), para determinar se esses componentes isolados apresentariam alguma atividade inibitória. Os resultados não

mostraram inibição significativa, sugerindo que as propriedades antimicrobianas dos filmes são devidas aos aditivos incorporados nos testes subsequentes.

No segundo teste, 7,5 % de EBM foi adicionado à formulação base de pectina e glicerol durante o processo de aquecimento. Isso significa que o EBM foi misturado diretamente com a solução ainda quente, o que facilitou sua dissolução no meio, mas não apresentou atividade inibitória significativa, conforme observado pelos valores de IC50 e MIC que permaneceram indetectáveis. Essa ausência de atividade antimicrobiana sugere que o processo térmico pode ter degradado compostos ativos do EBM, reduzindo sua eficácia biológica.

No terceiro teste, o EBM foi adicionado à solução de pectina e glicerol já pronta e resfriada, sem passar por aquecimento. Para garantir que o EBM se integrasse completamente ao material, foi utilizado um processo de ultrassom, que auxilia na dispersão uniforme do extrato pela solução. Esse método de incorporação preservou as propriedades antimicrobianas do EBM, como indicado pelos valores de IC50 de 0,52–0,86 % para *S. aureus* e 0,02–0,06% para *E. coli*, mostrando uma inibição significativa de 50% da atividade biológica. Os resultados sugerem que o aquecimento prejudica a ação antimicrobiana do EBM, enquanto a adição do extrato em uma solução já resfriada e sua dispersão por ultrassom mantém ou potencializa seus efeitos inibitórios.

Essa comparação entre os dois métodos revela a importância do processo de preparo no desempenho antimicrobiano dos compostos, destacando que o uso de ultrassom, além de preservar a integridade dos compostos ativos do EBM, otimiza sua ação no bioplástico.

No quarto teste, o óleo essencial de orégano (OEO) apresentou um IC50 de 1,2–5,1% para *Staphylococcus aureus* e 0,02–0,31% para *Escherichia coli*, evidenciando a maior eficiência do OEO como agente inibitório contra *E. coli*. Para *S. aureus*, a MIC foi de 3,1 µg/mL e, para *E. coli*, a MIC foi de 0,1 µg/mL. Essa eficácia pode ser atribuída à estrutura celular das bactérias Gram-negativas, como *E. coli*, que possuem uma membrana externa composta de lipopolissacarídeos, tornando-as mais suscetíveis à ação dos compostos antimicrobianos do OEO, como carvacrol e timol. Cansian et al. (2010) destacam que esses compostos têm a capacidade de desestabilizar a membrana celular, facilitando a penetração do OEO e sua ação inibitória. Mellencamp et al. (2011) encontraram MICs que variam de 1,25 a 10,0 µg/mL para *E. coli* e *S. aureus*, corroborando a eficiência da inibição do OEO. Além disso, Walasek et al. (2024) relataram MICs variando de 0,125 a 0,06 µg/mL para *S. aureus* e de 0,06 a 1 µg/mL

para *E. coli* em diferentes óleos de orégano. Os valores encontrados neste estudo para as MICs de OEO estão dentro das faixas relatadas na literatura, porém, é crucial ressaltar que o OEO foi incorporado em uma matriz de bioplástico composta por 2% de pectina e 20% de glicerol, o que pode ter influenciado a biodisponibilidade e a atividade antimicrobiana do composto, e mesmo incorporado a composição de um novo material os resultados confirmam que o OEO é bactericida para as bactérias testadas, com a atividade atribuída principalmente ao carvacrol, um dos principais componentes do óleo.

Por outro lado, o óleo essencial de limão (OEL), testado no quinto experimento, apresentou um IC50 de 1,02–3,2% para *E. coli*, uma concentração significativamente maior em comparação ao OEO. Isso indica que o OEL é menos eficiente para inibir *E. coli*, possivelmente devido à menor concentração de compostos bioativos antimicrobianos, como o limoneno, que tem menor capacidade de penetrar ou desestabilizar a membrana bacteriana de *E. coli* em comparação ao carvacrol presente no OEO. O mesmo se aplica ao efeito do OEL sobre *S. aureus*, onde também é necessária uma concentração maior para inibir 50% da atividade microbiana, mostrando que, em ambos os casos, o OEO é mais eficiente que o OEL (Cansian et al., 2010; Kostyra et al., 2022). A diferença de eficiência entre os óleos essenciais para diferentes bactérias destaca a importância da composição química dos óleos e as características estruturais das bactérias-alvo ao escolher agentes antimicrobianos para aplicação em bioplásticos ativos.

No sexto teste, a combinação de 25% de EBM com 25% de OEO mostrou ser a mais eficiente para inibir o crescimento de ambas as bactérias, *S. aureus* e *E. coli*. Os valores de IC50 foram de 0,07–0,036% para *S. aureus* e 0,05–0,17% para *E. coli*, indicando que a combinação de EBM com OEO requer uma concentração muito baixa para alcançar 50% de inibição da atividade biológica. Esses resultados sugerem um forte efeito sinérgico entre o EBM e o OEO, em que os compostos antimicrobianos de ambos se potencializam mutuamente, aumentando sua eficácia contra diferentes tipos de bactérias.

Por outro lado, no sétimo teste, a combinação de EBM com OEL resultou em um efeito inibitório intermediário, com IC50 de 0,12–0,52% para *S. aureus* e 0,08–0,25% para *E. coli*. Embora essa combinação também apresente uma inibição considerável, ela exige concentrações mais altas em comparação com a combinação de EBM e OEO, sugerindo que o sinergismo entre EBM e OEL é mais fraco. Isso pode ser explicado pela composição química do OEL, que

contém compostos como o limoneno, que possui menor atividade antimicrobiana isolada, especialmente em comparação ao carvacrol e timol presentes no OEO, que são altamente eficazes contra microrganismos.

Dado o desempenho comparado, o OEO seria a melhor escolha para ser agregado ao EBM em formulações de bioplásticos com atividade antimicrobiana. A combinação de EBM e OEO demonstrou uma inibição mais eficaz para ambas as bactérias em concentrações mais baixas, indicando uma ação antimicrobiana otimizada. Essa sinergia maximiza o efeito dos compostos presentes nos dois materiais, sendo ideal para aplicações que exigem alta eficácia antimicrobiana com o uso de menores quantidades de aditivos, o que também pode reduzir custos e melhorar as propriedades do bioplástico.

5.4.6.2 Teste de Disco-Difusão

O teste de disco-difusão é prático e de fácil execução, principalmente para bactérias de crescimento rápido. Além de ser econômico e dispensar o uso de equipamentos especiais, permite grande flexibilidade na escolha dos antimicrobianos a serem testados. O método envolve a impregnação de um antimicrobiano em discos de papel-filtro, que são colocados sobre uma superfície de ágar. O antimicrobiano se espalha pelo ágar, formando um halo de inibição ao redor do disco, cujo tamanho é inversamente proporcional à CMI (Sejas *et al.*, 2003).

Esse método qualitativo permite classificar as bactérias em três categorias: suscetíveis, intermediárias ou resistentes ao antimicrobiano testado. Contudo, apesar das vantagens, o método possui algumas limitações. Uma das principais dificuldades é avaliar a eficácia de antimicrobianos que não se difundem bem no ágar, o que pode comprometer a formação adequada do halo de inibição (Sejas *et al.*, 2003).

Nas amostras analisadas, essa limitação foi exacerbada pela alta solubilidade dos filmes testados, que se dissolveram rapidamente na placa de ágar antes que as bactérias pudessem crescer. Como resultado, o processo de formação do halo foi interrompido, e a análise não pôde ser concluída de forma eficaz. Essa dissolução prematura impossibilitou a obtenção de resultados conclusivos, já que a eficácia antimicrobiana não pôde ser devidamente avaliada, comprometendo o experimento.

5.4.7 Biodegradabilidade

As amostras foram posicionadas e depois enterradas, regadas a cada 24h como demonstrado na Figura 27. As mudanças de peso estão registradas na Tabela 11.

Figura 27 - (a) Filmes posicionados na bandeja; (b) filmes enterrados com posições marcadas



Fonte: A autora.

Durante o período de quinze dias de teste para avaliar a biodegradabilidade dos filmes, foram registradas variações na perda de massa entre as diferentes amostras. A amostra B1, composta apenas por 2 % de pectina e 20 % de glicerol, sem adição de EBM ou óleos essenciais, apresentou uma perda de massa de 56,25 %. Essa taxa intermediária de biodegradabilidade sugere que a matriz básica do filme tem uma capacidade moderada de degradação, que pode ser significativamente influenciada pela adição de compostos bioativos, como observado nas demais amostras contendo os compostos.

Tabela 11 - Perda de massa dos filmes

Amostra	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Biodegradabilidade (%)
B1	0,016	0,007	56,2
B2	0,036	0,009	75,0
10 L	0,023	0,009	60,8
10 O	0,018	0,009	50,0
17 OL	0,036	0,008	77,7

B1= pectina 2% e glicerol 20%; B2= pectina 2%, glicerol 20% e 7,5 % EBM; 10L= 3% óleo de limão e 7,5% de EBM; 10^o= 3% óleo de orégano e 7,5 % EBM e 17OL= 1% óleo limão 1% óleo orégano e 7,5% EBM

Fonte: A autora.

As amostras B2 e 17OL destacaram-se por apresentar as maiores perdas de massa, com percentuais de 75,0 % e 77,7 %, respectivamente. Ambas contêm 7,5% de EBM, o que sugere que o EBM desempenha um papel significativo na aceleração da biodegradação. A amostra 17OL, que também inclui 3 % de óleos essenciais de limão e orégano, mostrou uma perda de massa ligeiramente superior à B2, indicando que a combinação de EBM com esses óleos essenciais pode intensificar o processo de degradação.

As amostras 10L e 10O, que contêm 3 % OEL e OEO, respectivamente, apresentaram comportamentos distintos. A amostra 10L teve uma perda de massa de 60,8%, sugerindo que o OEL pode contribuir para a biodegradabilidade, embora em um grau moderado. Por outro lado, a amostra 10O mostrou uma perda de massa de 50,0 %, indicando que o OEO tem um impacto menos pronunciado na biodegradabilidade em comparação ao OEL. Essa diferença sugere que o tipo de óleo essencial incorporado ao filme pode influenciar de forma significativa o comportamento degradativo do material. Enquanto o OEL parece acelerar o processo de biodegradação em maior grau, o OEO pode conferir ao material uma resistência ligeiramente maior à degradação.

Essa variação nos resultados pode ser atribuída às diferenças nas propriedades químicas dos óleos essenciais utilizados. O OEL, com suas características voláteis e composição rica em compostos como o limoneno, pode facilitar a desestruturação da matriz polimérica, promovendo uma maior perda de massa. Em contraste, o OEO, que contém carvacrol e timol como principais componentes, pode formar interações mais estáveis com a matriz polimérica, retardando o processo de biodegradação.

Apesar das diferenças observadas na taxa de perda de massa entre as amostras, todas as formulações apresentaram uma boa capacidade de biodegradação ao longo dos 15 dias de teste. Considerando que as amostras perderam entre 50 % e 77,7 % de sua massa nesse período, podemos estimar que a degradação total dos filmes poderia ocorrer entre 19 a 30 dias, dependendo da composição específica de cada amostra. Esse resultado está alinhado com os achados de De Sá Leite, Pinto Jr. e Silva (2019), que observaram uma perda de massa total durante 30 dias em biofilmes de gelatina e glicerol com íons de prata enterrados no solo.

Essa rápida degradação indica que os bioplásticos desenvolvidos, independentemente dos aditivos utilizados, são altamente promissores para aplicações que exigem materiais

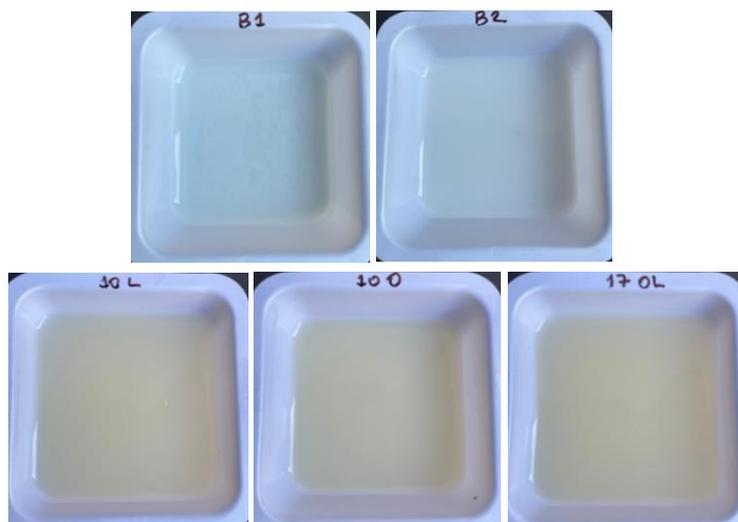
sustentáveis e de fácil degradação ambiental, reforçando o potencial de uso desses bioplásticos em diversas indústrias.

5.4.8 Uso dos bioplásticos comestíveis ativos como revestimento

5.4.8.1 Aspectos gerais dos filmes

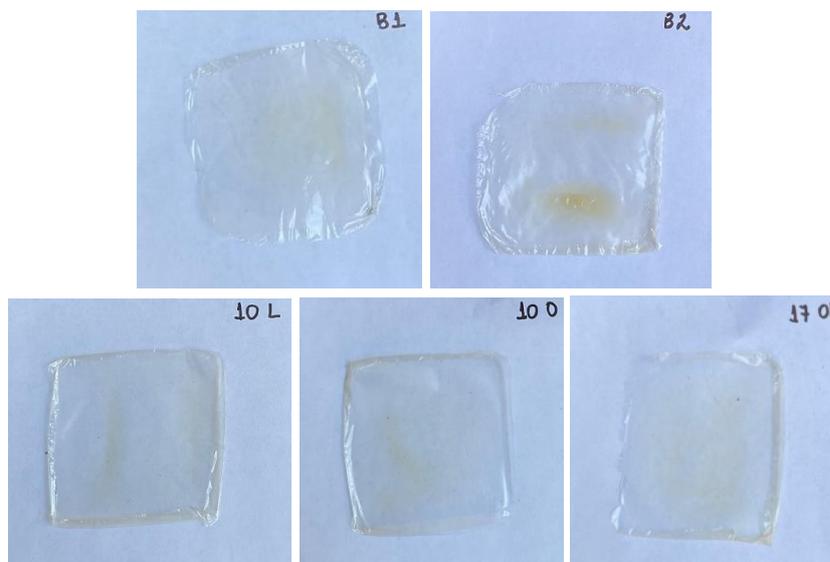
As amostras dos filmes foram registradas antes e após o processo de secagem. Na Figura 28, observa-se que as amostras B1 e B2 inicialmente não apresentam coloração significativa. Após a adição dos OEs, os filmes adquirem uma tonalidade amarelada, amostras 10L, 10O e 17OL, acompanhada por um odor característico dos óleos utilizados.

Figura 28 - Filmes antes da secagem



Fonte: A autora.

Após a secagem, os filmes exibem colorações similares entre si, como observado na Figura 29, e não apresentam mais odor residual relacionado aos compostos aromáticos utilizados. Todos os filmes mantêm um comportamento maleável.

Figura 29 - Filmes após secagem

Fonte: A autora.

5.4.8.2 REVESTIMENTO EM FRUTA

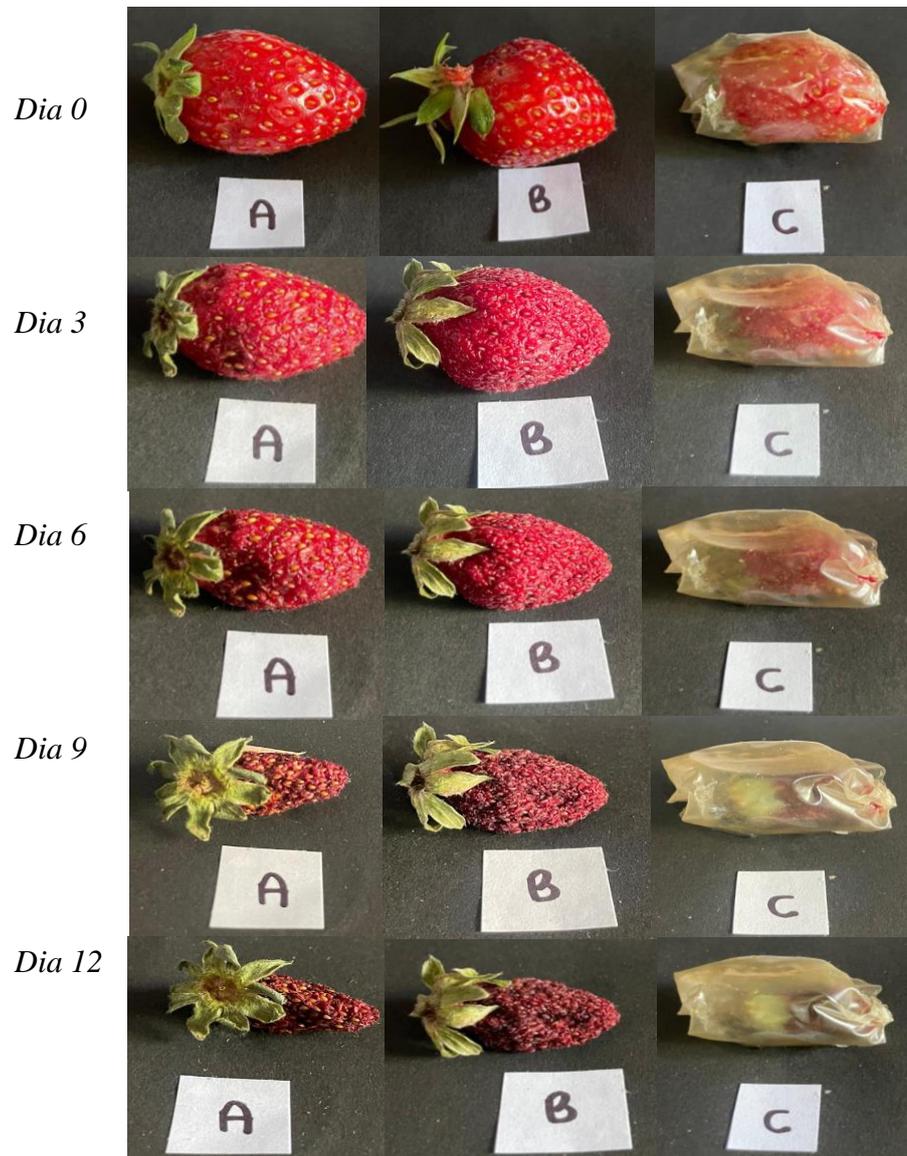
O morango foi escolhido como fruta para revestimento com o bioplástico produzido devido a vários fatores importantes. Primeiramente, o morango é uma fruta amplamente consumida e apreciada, caracterizada por sua fragilidade estrutural e alta perecibilidade. Devido ao alto teor de água e à fina casca, os morangos são especialmente suscetíveis a danos mecânicos, deterioração e contaminação por microrganismos, o que resulta em uma curta vida útil pós-colheita, e em temperatura ambiente, os frutos de morango podem ser armazenados por até três dias, podendo variar de acordo com as condições da fruta, o ambiente, e o tempo que levou da colheita até o consumidor (Andrade *et al.*, 2016).

Além disso, o morango está em plena safra, o que aumenta a oferta e, conseqüentemente, a necessidade de soluções eficazes para sua conservação. A alta perecibilidade da fruta impõe desafios logísticos significativos, como a necessidade de armazenamento em baixas temperaturas e transporte cuidadoso para evitar danos. Esses fatores tornam o morango um excelente modelo para testar a eficácia do bioplástico comestível desenvolvido, uma vez que uma melhora na conservação dessa fruta pode ter um impacto relevante tanto na redução de desperdício quanto na extensão de sua vida útil.

As Figuras 30 a 34 ilustram o comportamento dos filmes em contato com a fruta. Os morangos do grupo A representam as amostras de controle, sem qualquer tratamento. O grupo

B foi submetido à imersão na solução do filme, enquanto os morangos do grupo C foram revestidos com os filmes já secos. A Figura 30 refere-se à amostra B1, que não contém nenhum aditivo.

Figura 30 - Observação do comportamento da amostra B1

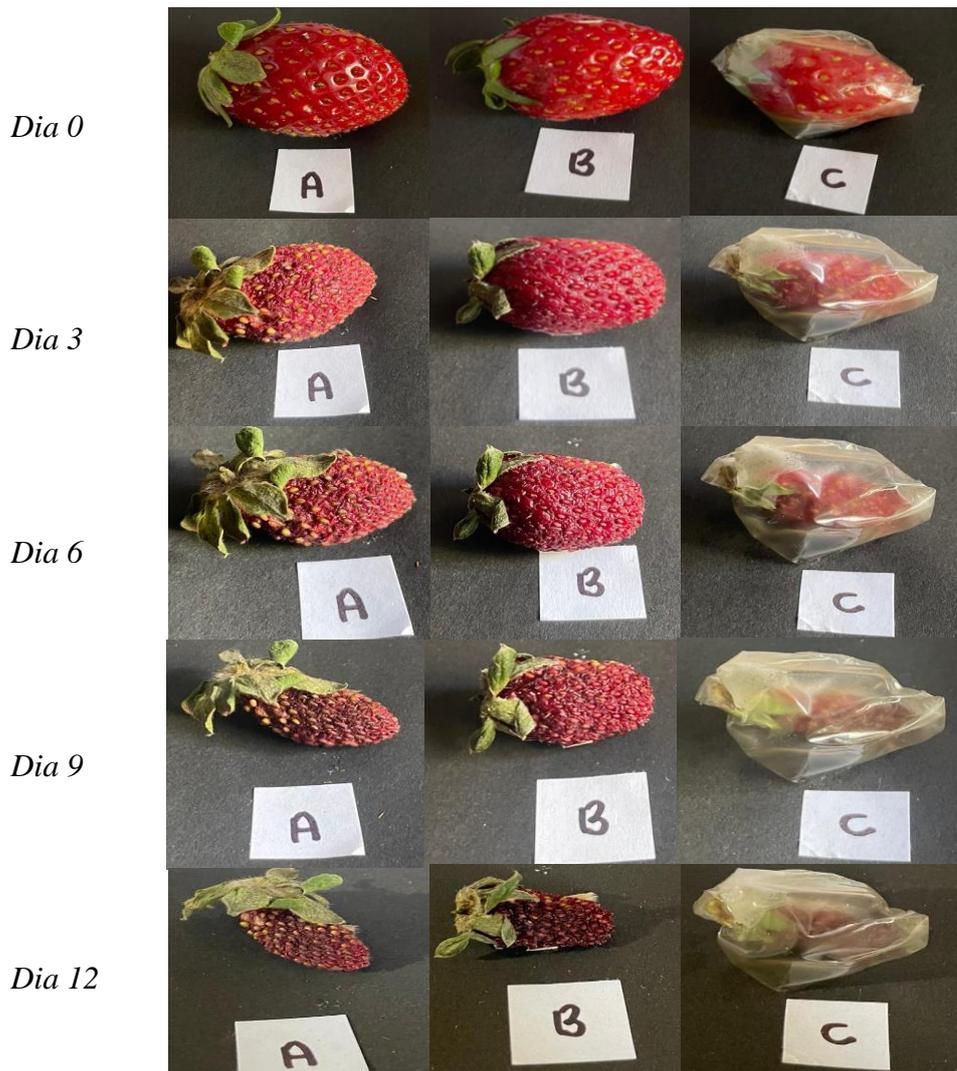


Fonte: A autora.

Os morangos, tanto os tratados quanto os não tratados, exibiram um comportamento visivelmente semelhante em relação à decomposição. Entre os dias 6 e 9, todos os morangos analisados apresentaram aparência inadequada para consumo, independentemente do tratamento aplicado.

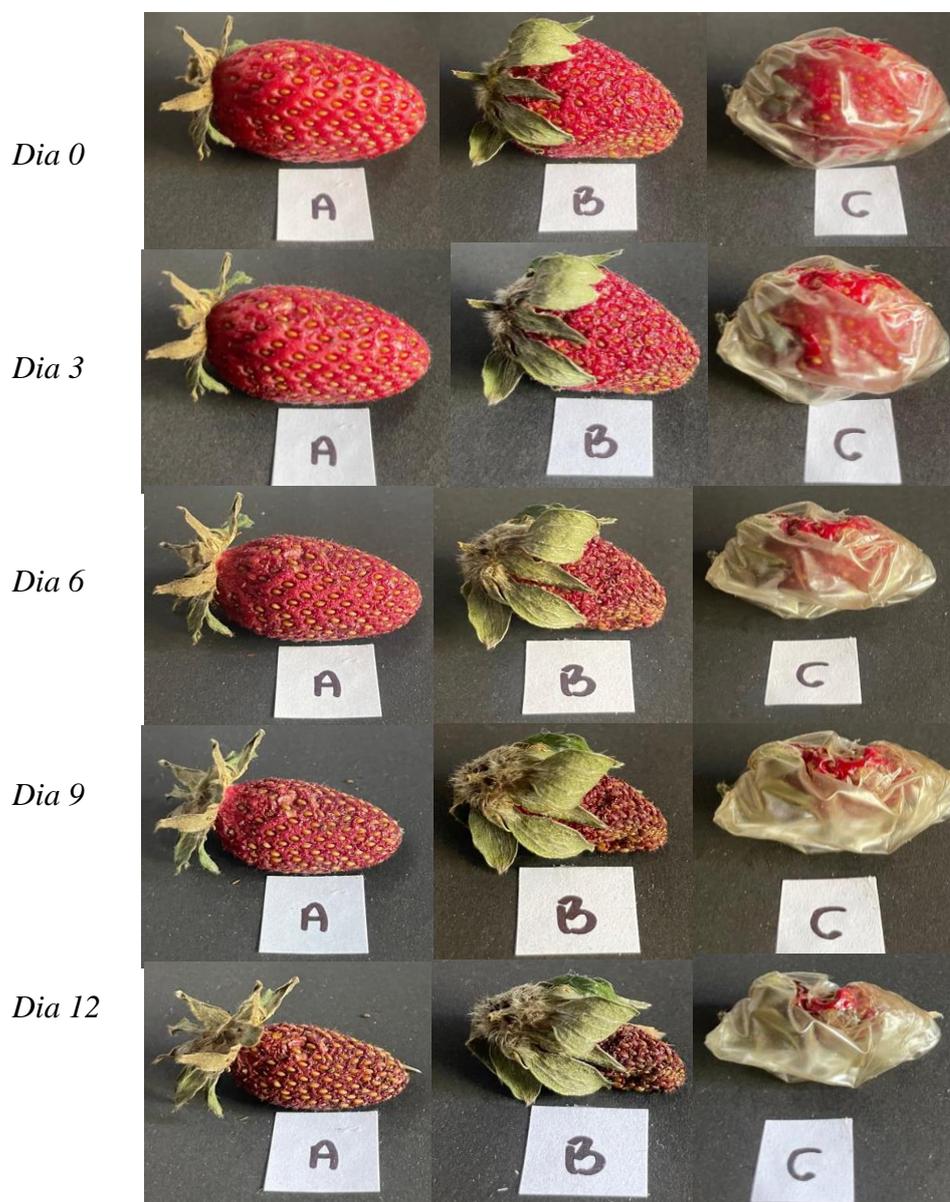
A figura 31 representa a amostra B2 que possui adição somente de EBM. A análise revelou que os morangos não tratados se tornaram impróprios, visualmente, para consumo após três dias de armazenamento. Em contraste, os morangos tratados por imersão permaneceram adequados para consumo até o sexto dia, evidenciando um aumento de 100% na vida útil devido a esse método de tratamento. No entanto, os morangos revestidos apresentaram uma perda gradual de massa sem uma extensão significativa do prazo de validade.

Figura 31- Observação do comportamento da amostra B2



Fonte: A autora.

O revestimento não conseguiu acompanhar as mudanças fisiológicas da fruta, indicando que o processo de decomposição do morango ocorreu enquanto o revestimento permanecia intacto, demonstrando uma interação ineficaz entre o revestimento e a fruta. Esse comportamento é observado em todas as análises do grupo C.

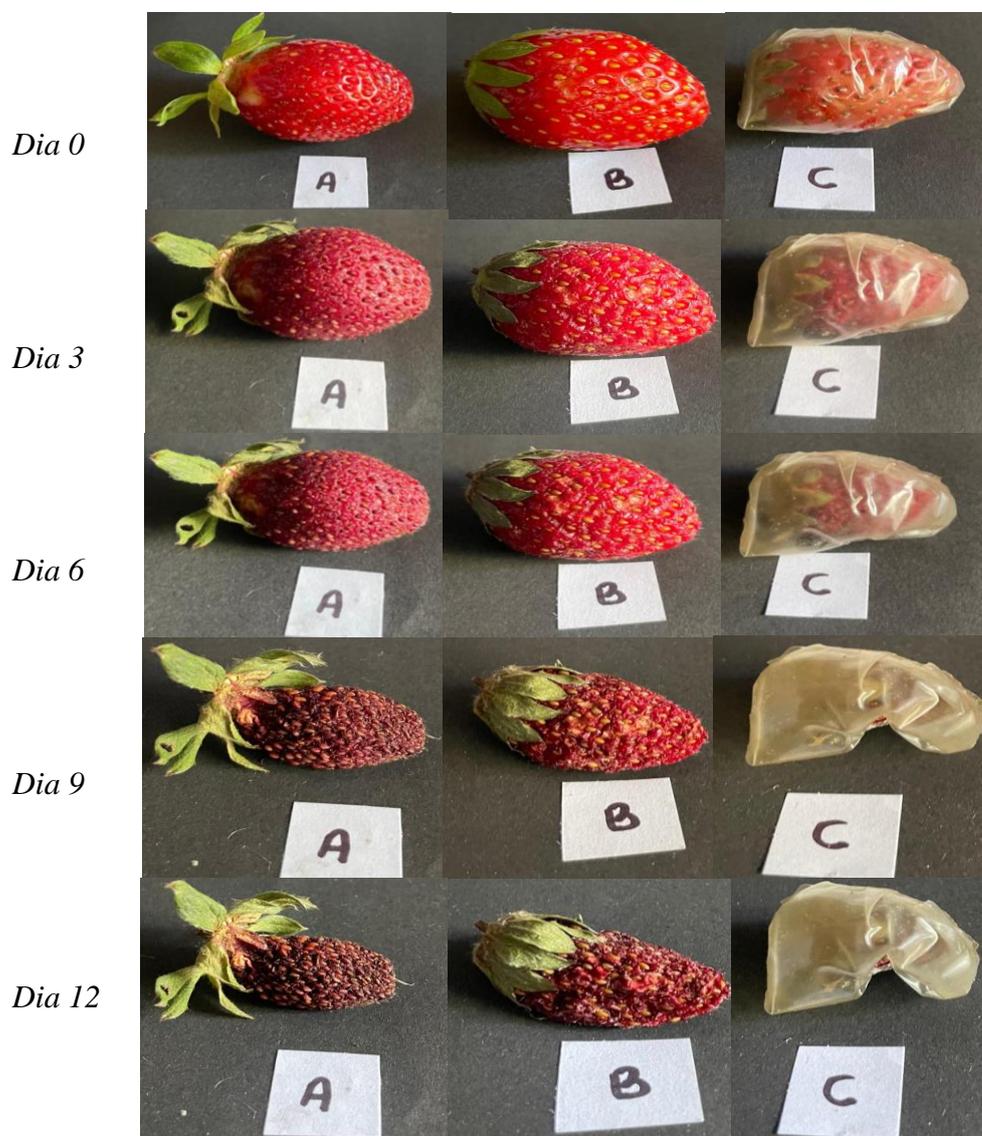
Figura 32 - Observação do comportamento da amostra 10L

Fonte: A autora.

A decomposição mais acelerada dos morangos tratados por imersão com filmes contendo OEL, em comparação aos filmes sem tratamento, observada na Figura 32, pode ser explicada por vários fatores. Em primeiro lugar, é possível que os morangos selecionados estivessem em diferentes estágios de maturação, o que poderia resultar em tempos distintos de decomposição. Além disso, a atividade biológica do OEL pode não ter sido suficientemente eficaz para inibir o crescimento de microrganismos responsáveis pela decomposição. Ao invés de proteger a fruta, o OEL pode ter criado um ambiente que, paradoxalmente, favoreceu a

proliferação de certos microrganismos, acelerando o processo de deterioração. O tratamento por imersão também pode ter afetado a permeabilidade do filme aplicado à fruta, comprometendo sua capacidade de formar uma barreira protetora eficaz contra agentes externos, o que contribuiu ainda mais para a rápida decomposição. Esses fatores, em conjunto, podem explicar por que os morangos tratados com OEL apresentaram uma decomposição mais rápida do que aqueles sem tratamento.

Figura 33 - Observação do comportamento da amostra 100

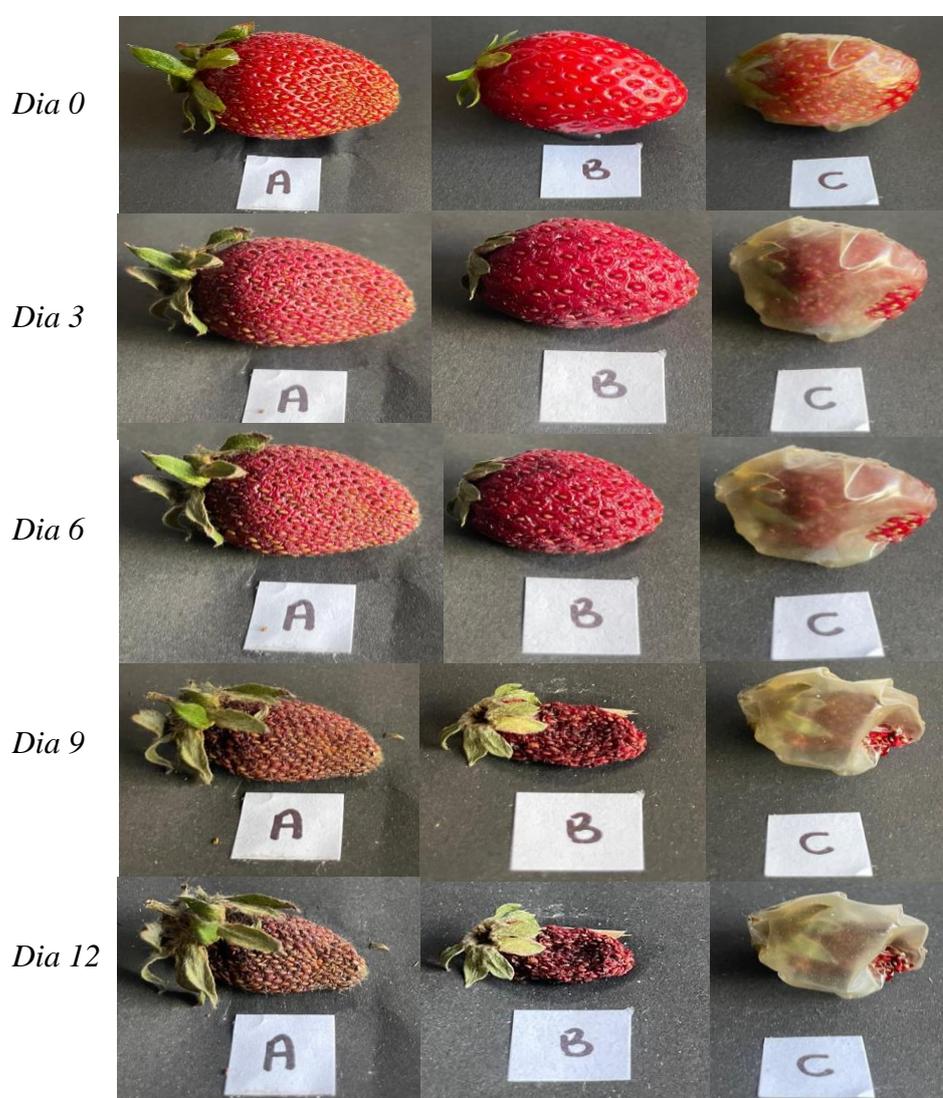


Fonte: A autora.

A ausência de diferenças significativas na decomposição entre a amostra 100, Figura 33, contendo OEO como composto ativo, e os morangos tratados e não tratados pode ser

justificada pela possível ineficácia do OEO em inibir o crescimento microbiano ou retardar os processos de degradação da fruta. Embora os óleos essenciais, como o OEO, sejam conhecidos por suas propriedades antimicrobianas, a concentração utilizada ou a forma de aplicação pode não ter sido suficiente para exercer um efeito protetor significativo. Além disso, fatores como a volatilidade do OEO, sua interação limitada com a superfície da fruta ou uma rápida degradação no ambiente podem ter contribuído para a falta de eficácia observada, resultando em um padrão de decomposição similar ao dos morangos não tratados.

Figura 34 - Observação do comportamento da amostra 17OL



Fonte: A autora.

A amostra 17 OL representado na Figura 34, que contém EBM e óleo de orégano e limão, teve um comportamento semelhante até o sexto dia entre as amostras tratadas por

imersão e as sem tratamento. Esse padrão pode ser atribuído à ação inicial dos componentes ativos, que possivelmente retardaram a decomposição. No entanto, após o sexto dia, houve uma aceleração na decomposição das amostras tratadas por imersão. Esse fenômeno pode estar relacionado à volatilidade dos óleos essenciais de orégano e limão. Embora possuam propriedades antimicrobianas, esses óleos podem ter perdido eficácia ao longo do tempo, especialmente se não estiverem bem incorporados ao filme protetor, o que deixou a fruta mais vulnerável à ação de microrganismos.

Após a análise dos resultados, é evidente que a amostra B2, que contém apenas o EBM, apresentou os melhores resultados. Isso indica que o EBM, por si só, já proporciona benefícios significativos no contexto de aplicação, sugerindo sua eficácia independente da adição de outros compostos. A utilização exclusiva do EBM não só demonstrou um desempenho superior, mas também implicou em uma redução nos custos e na quantidade de reagentes necessários.

A eficiência do EBM pode ser atribuída às suas propriedades naturais, que são eficazes na aplicação pretendida, seja como revestimento ou em outros usos propostos. Ao eliminar a necessidade de óleos adicionais, que podem aumentar os custos e complicar o processo de fabricação, o EBM revela-se uma alternativa mais econômica e prática. A redução nos custos operacionais e na complexidade do processo reforça a viabilidade do EBM como um componente independente, sugerindo que ele pode substituir outros aditivos sem comprometer a qualidade e a eficácia da aplicação. Assim, o uso exclusivo do EBM não só é eficiente, como também representa uma solução mais econômica e sustentável.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- ❖ **Eficácia do EBM:** A análise dos resultados demonstrou que o extrato de bagaço de malte (EBM) é um agente ativo eficaz em bioplásticos comestíveis, destacando-se por sua ação biológica positiva e por ser uma alternativa econômica a outros compostos.
- ❖ **Desempenho Superior:** O EBM, quando utilizado isoladamente, não só apresentou desempenho superior nas aplicações estudadas, como também resultou em redução de custos e na necessidade de reagentes adicionais, confirmando sua viabilidade como material de bioplástico independente.
- ❖ **Inovação e Sustentabilidade:** A utilização do EBM para produzir bioplásticos comestíveis representa um avanço importante em materiais sustentáveis. O reaproveitamento de subprodutos da indústria cervejeira não apenas reduz resíduos, mas também promove a economia circular e a sustentabilidade ambiental.
- ❖ **Desenvolvimento e Aplicação:** O desenvolvimento e a aplicação de bioplásticos à base de EBM são essenciais para enfrentar desafios como desperdício de alimentos e impactos ambientais, oferecendo soluções práticas e eficazes.
- ❖ **Prospecção Tecnológica:** A análise de patentes realizada foi fundamental para compreender o estado atual da tecnologia e identificar oportunidades de inovação. Esse processo permitiu identificar lacunas e tendências emergentes, orientando a pesquisa para áreas com potencial impacto.
- ❖ **Novas Perspectivas de Pesquisa,**
- ❖ **Otimização do EBM:** É crucial continuar investigando a otimização das propriedades do EBM para aprimorar sua eficácia e desempenho como bioplástico. Estudos futuros podem explorar modificações nas condições de processamento e a combinação do EBM com outros aditivos naturais.
- ❖ **Expansão das Aplicações:** Deve-se considerar a viabilidade do bioplástico comestível em diferentes tipos de alimentos e embalagens, avaliando sua eficácia em variados ambientes de armazenamento.

- ❖ **Integração com Outros Subprodutos:** A combinação do EBM com outros subprodutos da indústria alimentícia pode abrir novas oportunidades para o desenvolvimento de bioplásticos inovadores e sustentáveis.
- ❖ **Atualização Contínua:** A prospecção tecnológica e a análise de patentes devem ser constantemente atualizadas para acompanhar as últimas tendências e inovações, identificando novas tecnologias e oportunidades de colaboração.
- ❖ **Impacto e Futuro:** A implementação bem-sucedida dessas perspectivas contribuirá para a sustentabilidade ambiental e poderá estabelecer novos padrões na produção e uso de materiais de embalagem ecológicos e eficientes.

7 REFERÊNCIAS

ABDALLA, Fernando Antônio; SAMPAIO, Antônio Carlos Freire. **Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular**. Entorno Geográfico, n. 15, p. 82-102, 2018.

About MarketsandMarkets. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/AboutUs-8.html>>. Acesso em: 3 out. 2023.

ACEVEDO-FANI, A.; SALVIA-TRUJILLO, L.; ROJAS-GRAÜ, M. A.; MARTÍN-BELLOSO, O.; **Filmes comestíveis de nanoemulsões carregadas de óleos essenciais: Caracterização físico-química e propriedades antimicrobianas**. Hidrocolóides alimentares v. 47, p. 168-177, 2015.

AGENDA 2030. (2015). ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <<http://www.agenda2030.com.br/>>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

AGUILAR-SÁNCHEZ, R.; MUNGUÍA-PÉREZ, R.; REYES-JURADO, F.; NAVARRO-CRUZ, A. R.; CID-PÉREZ, T. S.; HERNÁNDEZ-CARRANZA, P.; BERISTAIN-BAUZA, S. d. C.; OCHOA-VELASCO, C. E.; Avila-Sosa, R.; **Structural, physical, and antifungal characterization of starch edible films added with nanocomposites and Mexican oregano (*Lippia berlandieri* Schauer) essential oil**. Molecules v. 24, n. 12, p. 2340, 2019.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Manole Ltda, 1969. p. 1-308.

ALIGIANNIS, Nektarios *et al.* **Composição e atividade antimicrobiana dos óleos essenciais de duas espécies de *Origanum***. Revista de química agrícola e alimentar, v. 9, pág. 4168-4170, 2001.

ALONSO, Laila *et al.* **Óleos essenciais como alternativa natural para a conservação de alimentos**. 2022.

ALTMANN, Ingrid; ATZ, Nara R.; ROSA, Simone ML. **Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis obtidos a partir de amido de milho: uma proposta experimental de produção de biofilmes em sala de aula**. Química Nova na Escola, v. 40, n. 1, p. 53-58,

ALVES, Jamila dos Santos *et al.* **Projeto de Filmes Biodegradáveis Utilizando Extratos de Bolo de Noz Pecan para Embalagem de Alimentos.** Alimentos, v. 12, n. 7, pág. 1405, 2023.

AMALRAJ, A.; HAPONIUK. J.; THOMAS.; Gopi . S.; **Preparação, caracterização e atividade antimicrobiana de filmes compósitos de álcool polivinílico/goma arábica/quitosana incorporados com óleo essencial de pimenta preta e óleo essencial de gengibre.** Jornal Internacional de Macromoléculas Biológicas v. 151, p. 366-375, 2020.

ANDRADE, Valter C. *et al.* **Conservação pós-colheita de frutos de morangueiro em diferentes condições de armazenamento.** Horticultura Brasileira, v. 34, n. 3, p. 405-411, 2016.

ARAUJO, Márcio Martins de; LONGO, Priscila Larcher. **Teste da ação antibacteriana in vitro de óleo essencial comercial de *Origanum vulgare* (orégano) diante das cepas de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*.** Arquivos do Instituto Biológico, v. 83, 2016.

ASSONI, Ravel Lazarini da Fonseca. **A produção de cervejas especiais no Distrito Federal e seu potencial uso turístico.** 2018.

ATARÉS, Lorena; CHIRALT, Amparo. **Óleos essenciais como aditivos em filmes e revestimentos biodegradáveis para embalagens ativas de alimentos.** Tendências em ciência e tecnologia de alimentos , v. 48, p. 51-62, 2016.

ATARÉS, L.; BONILLA, J.; CHIRALT, A.; **Caracterização de filmes comestíveis à base de caseinato de sódio incorporados com óleos essenciais de canela ou gengibre.** Revista de Engenharia de Alimentos v. 100, n. 4, pág. 678-687, 2010.

ATIWESH, Ghada *et al.* **Impacto ambiental do uso de bioplástico: uma revisão.** Heliyon , v. 9, 2021.

AZEVEDO, L. C.; DE SÁ, A. S. C.; ROVANI, S.; Fungaro, d. a. **propriedades do amido e suas aplicações em biopolímeros.** Cadernos de Prospecção [S. l.], v. 11, p. 351, 2018.

BONILLA, Jeannine; SOBRAL, Paulo JA. **Gelatin-chitosan edible film activated with Boldo extract for improving microbiological and antioxidant stability of sliced Prato cheese.** *International Journal of Food Science & Technology*, v. 54, n. 5, p. 1617-1624, 2019.

BISPO, Jorge; ESTILOS, David; LENS, Piet NL. **Comparação do desempenho ambiental de bioplásticos e plásticos petroquímicos:** Uma revisão das decisões metodológicas da avaliação do ciclo de vida (ACV). *Recursos, Conservação e Reciclagem*, v. 168, p. 105451, 2021.

BITENCOURT, Thais Cardoso *et al.* **Óleo Essencial De Limão Siciliano (*Citrus Limon*) E Limão Tahiti (*Citrus Latifolia*):** Quantificação De Limoneno E Avaliação Em Células Tumerais Humanas. In: 5º SALÃO DE PESQUISA, EXTENSÃO E ENSINO DO IFRS. 2020.

BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M.. **O mercado de óleos essenciais no brasil e no mundo na última década.** *Química Nova*, v. 45, n. 8, p. 949–958, ago. 2022. cite dentro do texto , exemplo: bizzo, 2022.

BIZZO, Humberto R.; HOVELL, Ana Maria C.; REZENDE, Claudia M. **Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas.** *Química nova*, v. 32, p. 588-594, 2009.

BIZZO, H. R.; HOVELL, A. M. C.; REZENDE, C. M.; **Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas.** *Química nova* v. 32, p. 588-594, 2009.

BRAIBANTE, M, STORGATTO, G.; **A Bioquímica do Glúten através de Oficinas Temáticas.** *Ciência e Natura*. 37. 10.5902/2179460X171117, 2015.

BRASIL – Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/>. Acesso em: 30 set. 2023.

BRASIL. Decreto no 9.902, de 8 de julho de 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9902.htm>. Acesso em: 30 set. 2023.

BRITO, Daniela Aguiar Penha *et al.* **Atividade antimicrobiana de óleo essencial de orégano frente a sorovares de salmonella enterica com resistência a antibióticos.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 12, p. 94029-94036, 2020.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 5ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CANO, M. P., & GARCÍA, J. (2008). **Hygroscopic behavior of essential oils and their impact on material properties.** Food Control, 19(4), 398-404.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2a edição., São Paulo: Artliber, 2002.

CANSIAN, RL *et al.* Atividade antioxidante e antimicrobiana de extratos de canela-sassafrás (*Ocotea odorifera* (Vell.) Rowher). **Perspectiva.** ↑ **Erechim** , v. 34, pág. 123-133, 2010.

CANTERI, Maria HG *et al.* **Pectina: da matéria-prima ao produto final.** Polímeros, v. 22, p. 149-157, 2012.

CARVALHO, J. M. *et al.* **Utilização do bagaço de malte como alimentação animal: uma alternativa para o pequeno produtor.** Cadernos UniFOA, v. 16, n. 46, 2021.

CASTANHA, Rafael Gutierrez; BUFREM, Leila Santiago; BOCHI, Fernanda. **Estudos relacionais de citação: cocitação, acoplamento bibliográfico e geneologia científica.** GRÁCIO, Maria Cláudia Cabrini; MARTÍNEZ-ÁVILA, D.; OLIVEIRA, EFT, p. 134-162, 2020.

CASTRO, L. E. N.; MEURER, F.; COLPINI, L. M. S. **Estudo da aplicação de bagaço de malte como adsorvente para remoção de óleo lubrificante em meio aquoso / Study of the application of brewers' spent grains as an adsorbent for the removal of lubricating oil in an aqueous medium.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 12, p. 120522–120527, 2021.

CAVALCANTI, Aline Ferreira. **Bidestilação em alambiques contendo dispositivos de prata e cobre e sua influência na qualidade da cachaça.** 2009.

CERVBRASIL: Disponível em: http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/o-setor-ervejeiro-mais-emprega-no-brasil/. Acesso: 20 de outubro de 2023.

CHAUDHARY, S.; KUMAR, S.; KUMAR, V.; SHARMA, R.; **Nanoemulsões de quitosana como revestimentos comestíveis avançados para frutas e vegetais: composição, fabricação e desenvolvimentos na última década.** Revista internacional de macromoléculas biológicas v. 152, p. 154-170, 2020.

CHOI, W. S.; SINGH, S.; LEE, Y. S.; **Caracterização de filme comestível contendo óleos essenciais em hidroxipropilmetilcelulose e seu efeito nos atributos de qualidade da ameixa 'Formosa' (Prunus salicina L.).** LWT v. 213-222, 2016.

COELHO NETO, Dorval M. *et al.* **Chemical concepts involved in beer production: A review.** Revista Virtual de Química, v. 12, n. 1, p. 120-147, 2020.

COPPOLA, Gerardo *et al.* **Bioplástico de biomassa renovável: uma solução fácil para um ambiente mais verde.** Sistemas terrestres e meio ambiente , v. 5, p. 231-251, 2021.

COSTA, E. K., ROCHA, I. S., SILVA, R. J., DRUZIAN, J. I.; **Estudo prospectivo relativo a depósitos de patentes relacionadas à produção de filmes elaborados pela técnica de casting.** Cadernos de Prospecção v. 9, n. 3, p. 280-280, 2016.

CRAVEIRO, Afranio Aragao; QUEIROZ, Danilo Caldas de. **Óleos essenciais e química fina.** Química nova, v. 16, n. 3, p. 224-228, 1993.

DE CARVALHO COSTA, Elia Karina *et al.* **Estudo prospectivo relativo a depósitos de patentes relacionadas à produção de filmes elaborados pela técnica de casting.** Cadernos de Prospecção, v. 9, n. 3, p. 280-280, 2016.

DE FIGUEIREDO, Maria José *et al.* **Development and characterization of roll bread with partial replacement of wheat flour by malt bagasse.** Research, Society and Development, v. 9, n. 11, p. e70291110468-e70291110468, 2020.

DE MELO PEQUENO, Andréa; PÔRTO JR, Gilson. **A prospecção tecnológica como ferramenta de desenvolvimento tecnológico e universidade e inovação: olhares sobre Propriedade Intelectual e a Transferência de Tecnologia**, p. 59.

DE MENEZES FILHO, Antonio Carlos Pereira; DE SOUZA, João Carlos Perbone; DE SOUZA CASTRO, Carlos Frederico. **Avaliação das características poliméricas do biofilme do resíduo de melancia**. Scientia Plena, v. 15, n. 8, 2019.

DE SÁ LEITE, Inácio; PINTO JR, Wilson Rodrigues; SILVA, LEONARDO DE ARAÚJO. **Biofilme a partir de gelatina e glicerol com a adição de íons de prata como agente antimicrobiano**. Latin American Journal of Energy Research, v. 6, n. 2, p. 1-11, 2019.

DEL RÉ, P. V.; JORGE, N. **Especiarias como antioxidantes naturais: aplicações em alimentos e implicação na saúde**. Revista brasileira de plantas medicinais, v. 14, p. 389-399, 2012.

DIAS, A. *et al.* **Produção de filme biodegradável a partir da fécula de mandioca com bagaço de cana-de-açúcar como fortificante**. 2019.

DILLMANN, L. **Estudos preliminares de extração e verificação da atividade antioxidante do extrato de bagaço de malte**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, dianteirara, 2018.

DOS SANTOS BERNARDI, G. *et al.* **Microfiltration for filtration and pasteurization of beers**. Em: Engineering Tools in the Beverage Industry. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 405–434.

DOS SANTOS CORDEIRO, Vanessa Maria Simplício *et al.* **Estratégias de Combate ao Desperdício Alimentar para o Consumidor Final**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa (Portugal).

DOS SANTOS COSTA, Lucas; BUENO, Silvia Messias. **Determinação dos componentes do óleo essencial de limão siciliano por cromatografia**. Revista Científica Unilago, v. 1, n. 1, 2020.

DOBIAŠOVÁ, Hana *et al.* **Carboligação para produção de hidroxipentanonas.** *Journal of Biotechnology*, v. 379, p. 209-220, 2024.

Embrapa. Teores de óleo essencial determinados em biomassa. 1999. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/402448/1/com.tec.99.pdf>. Acesso: 05 de agosto 2024.

ESPITIA, Paula Judith Pérez *et al.* **Filmes comestíveis de pectina: propriedades físico-mecânicas e antimicrobianas** - Uma revisão. *Hidrocolóides alimentares*, v. 35, p. 287-296, 2014.

EVARISTO, Rafael Benjamin Werneburg *et al.* **Biorefinery Development Based on Brewers' Spent Grain (BSG) Conversion: A Forecasting Technology Study in the Brazilian Scenario.** *Biomass*, v. 3, n. 3, p. 217-237, 2023.

FONSECA, Vanessa Maria Simplício dos Santos Cordeiro. **Estratégias de combate ao desperdício alimentar para o consumidor final.** 2018. Tese de Doutorado. ISA/UL.

GAHRUIE, H. H.; ZIAEE, E.; ESKANDARI, M. H.; HOSSEINI, S. M. H.; **Caracterização de filmes comestíveis à base de goma de semente de manjeriço incorporados à nanoemulsão de óleo essencial de *Zataria multiflora*.** *Polímeros de carboidratos* v. 166, p. 93-103, 2017.

GALUS, Sabina *et al.* **Novos materiais na preparação de filmes e revestimentos comestíveis – Uma revisão.** *Revestimentos*, v. 10, n. 7, pág. 674, 2020.

GHESTI, G. *et al.* **Análise Sensorial para Cervejas.** [s.l.] LaBCCERva - Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis - Instituto de Química - Universidade de Brasília, 2018.

GÓMEZ-CONTRERAS, Paula *et al.* **Effect of different essential oils on the properties of edible coatings based on yam (*Dioscorea rotundata* L.) starch and its application in strawberry (*Fragaria vesca* L.) preservation.** *Applied Sciences*, v. 11, n. 22, p. 11057, 2021.

GONTARD, N. *et al.* **Edible Composite Films of Wheat Gluten and Lipids** - Water-Vapor Permeability and Other Physical-Properties. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 29, p. 39-50, 1994.

GONTARD; S.GUILBERT; J.I Cuq *J.Food Sci.* 1992, 57, 190. International Organization for Standardization. **ISO 9235:2021**. Aromatic natural raw materials – Vocabulary. International Organization for Standardization: Genebra, 2021.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos Plásticos**. Editor Técnico, Revista Plástico Industrial. Universidade Federal da Bahia (UFBA).

GRUZ, A. P. G., SOUZA, C., TORRES, A. G., FREITAS, S. P., & CABRAL, L. M. C. **Recuperação de compostos bioativos a partir do bagaço de uva**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.35, n.4, 1147-1157, 2013.

HAGHIGHI, H.; BIARD, S.; BIGI, F., DE LEO, R.; BEDIN, E.; PFEIFER, F.; SIESLER, H. W., LICCIARDELLO, F.; PULVIRENTI, A.; **Caracterização abrangente de filmes ativos de mistura de quitosana-gelatina enriquecidos com diferentes óleos essenciais**. *Hidrocolóides Alimentares* v. 95, p. 33-42, 2019.

HASHEMI, S.M.; KHANEGHAH, A. M.; **Caracterização de novos filmes e revestimentos comestíveis ativos de goma de semente de manjeriço contendo óleo essencial de orégano**. *Progresso em Revestimentos Orgânicos* v. 110, p. 35-41, 2017.

HASHEMINYA, S. M.; MOKARRAM, R. R.; GHANBARZADEH, B.; HAMISHEKAR, H.; KAFIL, H. S.; DEHGHANNYA, J.; **Desenvolvimento e caracterização de filmes biocompósitos à base de kefiran, carboximetilcelulose e óleo essencial de Satureja Khuzestanica**. *Química Alimentar* v. 289, pág. 443-452, 2019.

HASHEMINYA, S. M; DEHGHANNYA, J.; **Desenvolvimento e caracterização de novos filmes comestíveis à base de goma *Cordia dichotoma* incorporada com nanoemulsão de óleo essencial de *Salvia mirzayanii***. *Polímeros de Carboidratos* v. 257, p. 117606, 2021.

JOUKI, M.; MORTAZAVI, S. A.; YAZDI, F. T.; KOOCHKIL, A.; **Characterization of antioxidant–antibacterial quince seed mucilage films containing thyme essential oil.** Carbohydrate polymers v. 99, p. 537-546, 2014.

JOVANOVIĆ, Jelena *et al.* **Filmes e revestimentos à base de quitosana e pectina com componentes ativos para aplicação em embalagens antimicrobianas de alimentos.** Progresso em Revestimentos Orgânicos , v. 158, p. 106349, 2021.

KARAN, Hakan *et al.* **Bioplásticos verdes como parte de uma bioeconomia circular. Tendências na ciência das plantas** , v. 24, n. 3, pág. 237-249, 2019.

KLIMEK-SZCZYKUTOWICZ; SZOPA; EKIERT. **Citrus limon (lemon) phenomenon—A review of the chemistry, pharmacological properties, applications in the modern pharmaceutical, food, and cosmetics industries, and biotechnological studies.** Plants, v. 9, n. 1, p. 119, 2020.

KODJOH, Elioce Mahugnon Wisdom. **Atividade terapêutica de óleo essencial de limão siciliano (*Citrus lemon (L) Burn*):** uma revisão da literatura. 2022.

LAMBERT, Scott; WAGNER, Martin. **Desempenho ambiental de plásticos de base biológica e biodegradáveis:** o caminho a seguir. Resenhas da Sociedade Química , v. 22, pág. 6855-6871, 2017.

LAUER, Moira K.; SMITH, Rhett C. **Avanços recentes em filmes à base de amido para aplicações em embalagens de alimentos:** propriedades físico-químicas, mecânicas e funcionais. Revisões Abrangentes em Ciência dos Alimentos e Segurança Alimentar , v. 19, n. 6, pág. 3031-3083, 2020.

LEITES, L. C.; FRICK, P. J. M; CRISTINA, T. I. **Influence of the incorporation form of waste from the production of orange juice in the properties of cassava starch-based films.** Food Hydrocolloids, v. 117, p. 106730, 2021.

LEXLATIN. **Modificações nas Regras de Patentes do Canadá entram em vigor em outubro.** Disponível em: <<https://br.lexlatin.com/reportagens/modificacoes-regras-patentes-canada>>. Acesso em: 10 nov 2023

LIMA, Láysa Rocha. **Caracterização e avaliação da atividade biológica de micropartículas de quitosana contendo óleos essenciais.** 2019.

LIN, Lin *et al.* **Preparação e caracterização de filme comestível de fécula de mandioca/carboximetilcelulose sódica incorporando polifenóis de maçã.** *Jornal Internacional de Macromoléculas Biológicas*, v. 212, p. 155-164, 2022.

LIU, Zhe *et al.* **How does circular economy respond to greenhouse gas emissions reduction: An analysis of Chinese plastic recycling industries.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 1162-1169, 2018.

LIU, Zhe.; ADAMS, M.; COTE, R. P.; CHEN, Q.; WU, R.; WEN, Z.; LIU, W., DONG, L.; **How does circular economy respond to greenhouse gas emissions reduction: An analysis of Chinese plastic recycling industries.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 91, p. 1162-1169, 2018.

LUDKA, Flávia Rafaela *et al.* **Filmes biodegradáveis contendo extrato de bagaço de malte: desenvolvimento e potencial antioxidante.** 2022.

LOPES, I. A. *et al.* **Characterization of pectin biofilms with the addition of babassu mesocarpo and whey protein concetrate.** *Ameri. Journal Mat. Sci*, v. 7, p. 64-70, 2017.

LUNDGREN, G. A.; BRAGA, S. P.; ALBUQUERQUE, T. M. R.; OLIVEIRA, K. A. R.; TAVARES, J. F.; VIEIRA, W. A. S.; CÂMARA, M. P. S.; SOUZA, E. L.; **Antifungal effects of *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist essential oil against pathogenic *Colletotrichum musae* and its incorporation in gum Arabic coating to reduce anthracnose development in banana during storage.** *Journal of Applied Microbiology* v. 132, n. 1, p. 547-561, 2022.

MACEDO, J. B.; SANFELICEB, R. C.; MERCANTEC, L. A.; SANTOS, D. M.; HABITZREUTERE, F.; Campana-Filho, S. P.; Pavinatto, A.; **Atividade antimicrobiana de quitosanas e seus derivados: Influência das características estruturais.** *Química Nova* v. 45, p. 690-704, 2022.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. **Brock biology of microorganisms.** 10. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

MAHCENE, Zineb *et al.* **Desenvolvimento e caracterização de filmes comestíveis ativos à base de alginato de sódio incorporados com óleos essenciais de algumas plantas medicinais.** *Jornal Internacional de Macromoléculas Biológicas*, v. 145, p. 124-132, 2020.

MELLENBAMP, Marnie *et al.* **Antibacterial and antioxidant activity of oregano essential oil.** 2011.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros.** 2.ed. São Paulo: E. Blücher, 1999.

MAPA. Anuário da Cerveja 2022. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Secretaria de Defesa Agropecuária; Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Vegetal; Coordenação-Geral de Vinhos e Bebidas, Brasília, 2023

MARAVEAS, Chrysanthos. **Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste.** *Polymers*, v. 12, n. 5, p. 1127, 2020.

MARTINS, GSO. **Caracterização Química e Atividade Inseticida de Óleos Essenciais Cítricos Sobre *Dysmicoccus Brevipes* (cockerell, 1893)(hemiptera: Pseudococcidae).** 2016.

MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. de J. **Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado.** *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Viçosa/MG, BR, v. 6, n. 1, p. 0083–0091, 2020. DOI: 10.18540/jcecvl6iss1pp0083-0091. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/9418>. Acesso em: 2 out. 2023.

MATTA JUNIOR, Manoel Divino da. **Caracterização de biofilmes obtidos a partir do amido de ervilha (*Pisum sativum*) associado à goma xantana e glicerol.** 2009. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

MENDES, Juliana Farinassi *et al.* **Desenvolvimento, otimização e avaliação sensorial de bionanocompósitos poliméricos comestíveis** 2020.

MERINO, Danila; ATHANASSIOU, Athanassia. **Filmes de cobertura morta biodegradáveis e ativos:** resíduos de casca de limão hidrolisada e misturas de pectina com baixo teor de metoxila com biochar incorporado e óleo essencial de nim. *ACS Química e Engenharia Sustentável*, v. 10, n. 33, p. 10789-10802, 2022.

MIRANDA, M.; **Atividade Antifúngica de Extratos e Óleo Essencial de Gengibre em Revestimentos Nanoestruturados de Cera de Carnaúba na Conservação Pós-colheita de Tangerina e Mamão**, 2020.

MOHANTY, AK; MISRA, M. e; HINRICHSEN, GI **Biofibras, polímeros biodegradáveis e biocompósitos:** Uma visão geral. *Materiais macromoleculares e Engenharia*, v. 276, n. 1, pág. 1-24, 2000.

MOHANTY, Amar Kumar; MISRA, Manjusri; DRZAL, LT **Biocompósitos sustentáveis provenientes de recursos renováveis: oportunidades e desafios no mundo dos materiais verdes.** *Revista de Polímeros e Meio Ambiente*, v. 10, p. 19-26, 2002.

MOTA, Rejane Dias Pereira *et al.* **Elaboração e caracterização de filmes biodegradáveis de blendas poliméricas de amido de lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*) e amido do fruto-do-lobo (*Solanum lycorcarpum st. Hill*).** 2009.

MÜLLER, C. M. O.; YAMASHITA, F.; LAURINDO, J. B. **Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach.** *Carbohydrate Polymers*, v. 72, p. 82–87, 2008.

NAIBAHO, Joncer; KORZENIOWSKA, Małgorzata. **A variabilidade das propriedades físico-químicas dos grãos de sobra de cervejaria de 8 cervejarias diferentes.** *Heliyon*, v. 3, 2021.

NAIR, M. Sneha; SAXENA, Alok; KAUR, Charanjit. **Caracterização e atividade antifúngica do extrato de casca de romã e sua utilização em revestimentos comestíveis**

à base de polissacarídeos para prolongar a vida útil do pimentão (*Capsicum annuum* L.). Tecnologia de alimentos e bioprocessos , v. 11, p. 1317-1327, 2018.

NCUBE, Lindani Koketso *et al.* **Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials.** Materials, v. 13, n. 21, p. 4994, 2020.

NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T.-T. T.; TRAN, T. V.; TAN, L. V.; DANH, L. T.; THAN, V. T.; **Development of antibacterial, antioxidant, and uv-barrier chitosan film incorporated with piper betle linn oil as active biodegradable packaging material.** Coatings v. 11, n. 3, p. 351, 2021.

NISAR, Tanzeela *et al.* **Caracterização de filmes de pectina cítrica integrados ao óleo essencial de cravo-da-índia:** Propriedades físicas, térmicas, de barreira, antioxidantes e antibacterianas. Revista internacional de macromoléculas biológicas , v. 106, p. 670-680, 2018.

OLIVEIRA, T. de F. *et al.* **Concentração Mínima Inibitória (CMI) de antibióticos para oito estirpes de bactérias diazotróficas da Coleção de Culturas da Embrapa Agrobiologia.** 2009.

OLIVEIRA, W. L.; **Desenvolvimento de nanoemulsões por técnica de baixo cisalhamento para incorporação de proteínas.** 2022.

OMBINI, C.; JACOSKI, C. A.; BARICHELLO, R.; LAJÚS, C. R.; DA LUZ, G. L.; DE MELLO, J. M. M.; DALCANTON, F. **Avaliação da capacidade inovativa e propriedade intelectual na utilização do bagaço de malte / Evaluation of the innovative capability and intellectual property in the use of malt residue.** Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 18973–18993, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-510. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/25192>. Acesso em: 2 oct. 2023

OTONI, Caio G. *et al.* **Recent advances on edible films based on fruits and vegetables—a review.** *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 16, n. 5, p. 1151-1169, 2017.

PINTRO, P. T. **Effect of brewing waste (malt bagasse) addition on the physicochemical properties of hamburgers.** *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 43, n. 10, p. e14135, 2019.

PINTO, Shirley de Souza *et al.* **Avaliação da eficácia da desinfecção de instrumentos usados durante o período transoperatório do tratamento endodôntico.** 2012.

POMBO, Joseane Cristina Pinheiro *et al.* **Efeito antimicrobiano e sinérgico de óleos essenciais sobre bactérias contaminantes de alimentos.** *Segurança Alimentar e Nutricional*, v. 25, n. 2, p. 108-117, 2018.

Porto Alegre: Artmed, 2008. **INSTITUTO ADOLFO LUTZ.** Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz.

PRABOWO, Andhika Suryo; MAWARANI, Lizda Johar. **Desenvolvimento de revestimento comestível de sementes de durião, amido e glucomanano, com adição de óleo essencial como antimicrobiano para aumentar a vida útil de tomate e couve-flor.** **In:** Série de Conferências IOP: Ciência e Engenharia de Materiais . Publicação IOP, 2020. p. 012034.

QIN, Y.; Li, W.; LIU, D.; YUAN, M.; Li, L.; **Development of active packaging film made from poly (lactic acid) incorporated essential oil.** *Progress in Organic Coatings* v. 103, p. 76-82, 2017.

QUIRÓS-SAUCEDA, A. E.; AYALA-ZAVALA, J. F.; OLIVAS, G. I.; GONZÁLEZAGUILAR, G. A. **Edible coatings as encapsulating matrices for bioactive compounds: a review.** *Journal of food science and technology*, v. 51, n. 9, p. 1674-1685, 2014.

REGATTIERI, A.B. & SENA, G.L. & SILVA FILHO, Eloi.; **Preparation and Characterization of Ternary Emulsion Chitosan/SDS/Hexane.** Revista Virtual de Química. 8. 10.5935/1984-6835.20160047, 2016.

REIS, J. B. *et al.* **Avaliação da atividade antimicrobiana dos óleos essenciais contra patógenos alimentares.** Brazilian Journal of Health Review, v. 3, n. 1, p. 342–363, 2020.

REIS, J. B. *et al.* **Evaluation of antimicrobial activity of essential oils against food Pathogens.** Brazilian Journal of Health Review, v. 3, p. 342-363, 2020.

ROBAZZA, W. S.; TELEKEN, Jhony T.; GOMES, Gilmar A. **Modelagem matemática do crescimento de microrganismos em alimentos.** Trends in Computational and Applied Mathematics, v. 11, n. 1, p. 101-110, 2010.

RODRIGUES, Camila Gonçalves *et al.* **Produção de filmes comestíveis biodegradáveis a partir de bagaço de malte ou subprodutos do processamento de mandioca.** 2022.

ROSENBOOM, Jan-Georg; LANGER, Roberto; TRAVERSO, Giovanni. **Bioplásticos para uma economia circular.** Nature Reviews Materials , v. 2, pág. 117-137, 2022.

SABERI, Bahareh *et al.* **Caracterização de filmes comestíveis biocompósitos de amido de ervilha e goma guar enriquecidos com agentes antimicrobianos naturais para embalagens ativas de alimentos.** Processamento de Alimentos e Bioprodutos , v. 105, p. 51-63, 2017.

SALARBASHI, D.; TAJIK, S.; GHASEMLOU, M.; SHOJAEI-ALIABADI, S.; NOGHABI, M. S.; KHAKSAR, R.; **Caracterização de filme solúvel de polissacarídeo de soja incorporado com óleo essencial destinado a embalagens de alimentos.** Polímeros de carboidratos v. 98, n. 1, pág. 1127-1136, 2013.

SANTANA, Ana Paula Reis. **Síntese e caracterização de um derivado da pectina para estudos de fenômenos de sorção de íons chumbo (II).** 2017.

SANTOS, Karin Luise dos *et al.* **Perdas e desperdícios de alimentos: reflexões sobre o atual cenário brasileiro.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 23, p. e2019134, 2020.

SARAIVA, Bianka Rocha *et al.* **Effect of brewing waste (malt bagasse) addition on the physicochemical properties of hamburgers.** Journal of Food Processing and Preservation, v. 43, n. 10, p. e14135, 2019.

SARANTI, T. F. D.; **Desenvolvimento de novos filmes comestíveis de gelatina contendo nanoemulsão de óleo essencial de pimenta preta ou manjerona reforçados com cloisite Na⁺.** 2019.

SATUROS, Michael Jayson O.; TAGUBASE, Jackie Lou J.; FUNDADOR, Noreen Grace V. **Propriedades antimicrobianas e mecânicas de filmes à base de amido de semente de jaca contendo carvacrol.** Revista Mindanao de Ciência e Tecnologia , v. 1, 2021.

SCHLEMMER, Daniela; SALES, Maria JA; RESCK, Inês S. **Preparação, caracterização e degradação de blendas PS/TPS usando glicerol e óleo de buriti como plastificantes.** Polímeros, v. 20, p. 6-13, 2010.

SEJAS, Lilian M. *et al.* **Avaliação da qualidade dos discos com antimicrobianos para testes de disco-difusão disponíveis comercialmente no Brasil.** Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial, v. 39, p. 27-35, 2003.

SGANZERLA, William Gustavo *et al.* **Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer's spent grains in a biorefinery concept.** Journal of Cleaner Production, v. 297, p. 126600, 2021

SHANMUGAM, Vigneshwaran *et al.* **Economia circular no desenvolvimento de biocompósitos: estado da arte, desafios e tendências emergentes.** Compósitos Parte C: Acesso Aberto , v. 5, p. 100138, 2021.

SHOPSKA, V.; DENKOVA-KOSTOVA, R.; DZHIVODEROVA-ZARCHEVA, M.; TENEVA, D.; DENEV, P.; KOSTOV, G. **Comparative study of phenolic content and antioxidant activity of different malt types.** Antioxidants, v. 10, p. 1-20, 2021.

SILVA, Janine Passos Lima *et al.* **Óleo essencial de orégano: interferência da composição química na atividade frente a *Salmonella Enteritidis*.** Food Science and Technology, v. 30, p. 136-141, 2010.

SINDICERV. Disponível em: <https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso: 30 outubro de 2023.

SOUZA, Carolina Oliveira de; SILVA, Luciana Tosta; DRUZIAN, Janice Izabel. **Estudo comparativo da caracterização de filmes biodegradáveis de amido de mandioca contendo polpas de manga e de acerola.** Química Nova, v. 35, p. 262-267, 2012.

STEYER, Frank. **Um novo processo de destilação reativa para a produção de ciclohexanol a partir de ciclohexeno .** 2010. Tese de Doutorado. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.y

SYAFIQ, R. *et al.* **Atividades antimicrobianas de biopolímeros e biocompósitos à base de amido incorporados com óleos essenciais de plantas: uma revisão.** Polímeros , v. 12, n. 10, pág. 2403, 2020

TAVARES, Nathalia Silva Maciel. **Uso de óleo essencial de orégano (*origanum vulgare l.*) como conservante de alimentos: uma revisão bibliográfica.** 2021.

TIOSSI, Fabiano Martin; SIMON, Alexandre Tadeu. **Economia Circular: suas contribuições para o desenvolvimento da Sustentabilidade.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 2, p. 11912-11927, 2021.

VIEIRA, Francisca Jussandra Alves *et al.* **Desenvolvimento de embalagem biodegradável ativa contendo extrato de bagaço de malte e sua aplicação em queijo tipo prato fatiado.** 2022.

VU, K. D.; HOLLINGSWORTH, R.G.; LEROUX, E.; SALMIERI, S.; LACROIXL, M.; **Desenvolvimento de revestimento bioativo comestível à base de quitosana modificada para aumento da vida útil de morangos.** Food Research International v. 1, pág. 198-203, 2011.

Walasek-Janusz, M.; Grzegorzcyk, A.; Malm, A.; Nurzyńska-Wierdak, R.; Zalewski, D. **Composição Química e Atividade Antioxidante e Antimicrobiana do Óleo Essencial de Orégano.** *Moléculas* 2024, 29 , 435. <https://doi.org/10.3390/molecules29020435>

WANG, Han-Min *et al.* **Materiais de filme compósito biodegradável derivados de lignina avançados e versáteis em direção a um mundo sustentável.** *Química Verde*, v. 11, pág. 3790-3817, 2021

WANG, W. *et al.* **Characterization of pectin from grapefruit peel: a comparison of ultrasoundassisted and conventional heating extractions.** *Food Hydrocolloids*, Oxford, v. 61, p. 730- 739, 2016.

WEETMAN, Catherine. **Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa.** Autêntica Business, 2019.

World Wildlife Fund, **WWF**. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/>. Acesso: 01 novembro de 2023.

ZHOU, W.; HE, Y.; LIU, F.; LIAO, L.; HUANG, X.; Li, R.; ZOU, Y.; ZHOU, L.; ZOU, L.; LIU, Y.; RUAN, R.; Li, J.; **Filmes comestíveis de carboximetilquitosana-pululana enriquecidos com óleo essencial de galanga: Caracterização e aplicação na preservação de manga.** *Polímeros de Carboidratos* v. 256, p. 117579, 2021.

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO OU TESE DE DOUTORADO

Declaro que a presente dissertação/tese é original, elaborada especialmente para este fim, não tendo sido apresentada para obtenção de qualquer título e que identifique e cito devidamente todas as autoras e todos os autores que contribuíram para o trabalho, bem como as contribuições oriundas de outras publicações de minha autoria.

Declaro estar ciente de que a cópia ou o plágio podem gerar responsabilidade civil, criminal e disciplinar, consistindo em grave violação à ética acadêmica.

Brasília, 09 de outubro de 2024.

Assinatura do/a discente: *Sandy Chaves da Silva*

Programa: Programa de Pós Graduação em Química

Nome completo: Sandy Chaves da Silva

Título do Trabalho: Bioplásticos à base de pectina e extrato de bagaço de malte: uma abordagem circular para o setor agroindustrial – desenvolvimento, caracterização, prospecção tecnológica e estado da arte

Nível: (X) Mestrado () Doutorado

Orientador/a: Prof^a Dr^a Grace Ferreira Ghesti