



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE AGRONOMIA (EA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS - PPGCTA

BÁRBARA NADINNE NEPOMOCENO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES BIOATIVOS CONTENDO
PROBIÓTICO (*Lactobacillus rhamnosus* GG.) E POLPA
DE MIRTILO (*Vaccinium myrtillus*)**

GOIÂNIA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Bárbara Nadinne Nepomoceno de Sousa

3. Título do trabalho

DESENVOLVIMENTO DE FILMES BIOATIVOS CONTENDO PROBIÓTICO (Lacticaseibacillus rhamnusus GG.) E POLPA DE MIRTILLO (Vaccinium myrtillus)

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Barbara Nadinne Nepomoceno De Sousa, Discente**, em 20/10/2025, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Buranelo Egea, Usuário Externo**, em 22/10/2025, às 12:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5735644** e o código CRC **FDA29E53**.

BÁRBARA NADINNE NEPOMOCENO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE FILMES BIOATIVOS CONTENDO
PROBIÓTICO (*Lacticaseibacillus rhamnusus* GG.) E POLPA
DE MIRTILO (*Vaccinium myrtillus*)**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestra em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Linha de pesquisa: Propriedades físicas, químicas, microbiológicas, nutricionais e funcionais de alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Buranelo Egea

Coorientador: Prof. Dr. Josemar Gonçalves de Oliveira Filho

GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Sousa, Bárbara Nadinne Nepomoceno de
DESENVOLVIMENTO DE FILMES BIOATIVOS CONTENDO
PROBIÓTICO (*Lactobacillus rhamnosus* GG.) E POLPA DE
MIRTILO (*Vaccinium myrtillus*) [manuscrito] / Bárbara Nadinne
Nepomoceno de Sousa. - 2025.
XC, 90 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Mariana Buranelo Egea; co-orientador Dr.
Josemar Gonçalves de Oliveira Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Filme. 2. Probiótico. 3. Alimento. 4. Funcional. 5. Mirtilo. I. Egea,
Mariana Buranelo, orient. II. Título.

CDU 664



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **64/2025** da sessão de Defesa de Dissertação de **Bárbara Nadinne Nepomoceno de Sousa**, que confere o título de Mestra em **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, na área de concentração em **Ciência e Tecnologia de Alimentos**.

Aos dezessete dias do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco, a partir das 09h30, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “DESENVOLVIMENTO DE FILMES BIOATIVOS CONTENDO PROBIÓTICO (*Lactiseibacillus rhamnusus* GG.) E POLPA DE MIRTILO (*Vaccinium myrtillus*)”. Os trabalhos foram instalados pela orientadora, Professora Doutora Mariana Buranelo Egea (IF Goiano), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Julio Cesar Colivet Briceno (EA/UFG), membro titular interno; e Professor Doutor Fabio Yamashita (UEL/CTA), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Mariana Buranelo Egea, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos dezessete dias do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Buranelo Egea, Usuário Externo**, em 17/09/2025, às 12:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Yamashita, Usuário Externo**, em 17/09/2025, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio Cesar Colivet Briceno, Usuário Externo**, em 17/09/2025, às 14:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5655347** e o código CRC **B2D21E6A**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo direcionamento em cada passo dessa jornada, pela provisão e cuidado nos momentos de dificuldade e pelas bênçãos que me permitiram chegar até aqui.

À minha família, pelo incentivo, apoio incondicional e pelo amor que me sustentou ao longo da minha vida. Sem vocês, essa conquista não teria o mesmo significado.

À minha professora orientadora Dra. Mariana B. Egea, pelo direcionamento, paciência e dedicação, que foram fundamentais para o resultado deste trabalho. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Josemar Gonçalves, por trazer clareza a cada desafio e pelas valiosas contribuições. Sou imensamente grata pelo aprendizado proporcionado.

À Universidade Federal de Goiás, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA) e ao IF Goiano (Rio Verde-GO), pelo ensino de qualidade e pelas oportunidades que me foram dadas ao longo dessa caminhada.

Ao LaBiN e ao LabFood, pela estrutura essencial para a realização das análises e experimentos desta pesquisa, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a execução do trabalho.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, Tainara Leal, Isabelly de Campos, Raquel Fernandes e Roberto Braz, minha profunda gratidão. Sem esperar nada em troca, dedicaram seu tempo para me ensinar os procedimentos de análise, um gesto de generosidade que não tem preço. Além disso, agradeço o apoio, incentivo e pelas conversas que tornaram essa jornada mais leve e especial.

À minha sócia, Nathália Marquez, por acreditar em mim, pelo suporte, parceria e compreensão nos momentos em que estive ausente do trabalho para me dedicar à esta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho, minha mais sincera gratidão.

“Bem melhor é obter sabedoria do que ouro!
Mais vale obter entendimento do que prata.”

Provérbios 16:16

RESUMO

A crescente demanda por alimentos funcionais, impulsionada pela busca por uma alimentação mais saudável, tem colocado em destaque ingredientes como o mirtilo (*Vaccinium myrtillus*), pois é uma fruta rica em compostos bioativos, como as antocianinas, que possuem notáveis propriedades antioxidantes e terapêuticas. Nesse contexto, a inserção de componentes ativos em filmes comestíveis tem sido amplamente estudada como uma maneira eficaz e prática de veicular essas substâncias de forma estável. Alinhado a essa tendência, o uso de probióticos em tais filmes visa não apenas sua viabilidade, mas também agregar valor nutricional. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de filmes bioativos à base de carboximetilcelulose (CMC), do probiótico *Lactobacillus rhamnosus* GG e de polpa de mirtilo liofilizada. A finalidade desses filmes é atuar como veículos para a entrega de compostos funcionais. Para avaliar sua eficácia, os filmes foram caracterizados quanto à morfologia, umidade, solubilidade, permeabilidade ao vapor de água, espessura, teor de vitamina C, antocianinas, cor e propriedades mecânicas, além das análises de viabilidade do probiótico ao longo de 45 dias nas temperaturas de 4 e 25°C. A incorporação da polpa de mirtilo, além de influenciar as características físicas e ópticas, conferiu aos filmes propriedades bioativas, como um aumento no teor de vitamina C. Observou-se uma redução da solubilidade em água e um aumento na espessura dos filmes, características desejáveis para sua aplicação como barreira protetora. Contudo, foi constatada uma diminuição na resistência mecânica e um aumento na permeabilidade ao vapor de água. Tais alterações podem estar relacionadas à estrutura irregular visualizada nas micrografias, que sugere uma maior difusividade das moléculas de água. A adição do probiótico *L. rhamnosus* GG representou um diferencial funcional para os filmes, com potencial para contribuir com benefícios à saúde humana.

Palavras-chave: Filmes, probióticos, alimento, funcional, mirtilo.

ABSTRACT

The growing demand for functional foods, driven by the pursuit of healthier eating habits, has brought attention to ingredients such as blueberry (*Vaccinium myrtillus*), a fruit rich in bioactive compounds like anthocyanins, which exhibit remarkable antioxidant and therapeutic properties. In this context, the incorporation of active components into edible films has been widely studied as an effective and practical method for delivering these substances in a stable form. Aligned with this trend, the use of probiotics in such films aims not only to ensure their viability but also to add nutritional value. This study aimed to develop bioactive films based on carboxymethylcellulose (CMC), the probiotic *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG, and freeze-dried blueberry pulp. The purpose of these films is to act as carriers for the delivery of functional compounds. To assess their effectiveness, the films were characterized in terms of morphology, moisture content, solubility, water vapor permeability, thickness, vitamin C content, anthocyanins, color, and mechanical properties. In addition, the viability of the probiotic was analyzed over 45 days at storage temperatures of 4°C and 25°C. The incorporation of blueberry pulp influenced not only the physical and optical characteristics but also endowed the films with bioactive properties, such as increased vitamin C content. A reduction in water solubility and an increase in film thickness were observed features that are desirable for protective barrier applications. However, a decrease in mechanical strength and an increase in water vapor permeability were also noted. These changes may be related to the irregular structure observed in the micrographs, suggesting greater diffusivity of water molecules. The addition of the probiotic *L. rhamnosus* GG represented a functional advantage for the films, with the potential to contribute to human health benefits.

Keywords: Films, probiotics, food, functional, blueberry.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Teor de umidade.

Equação 2. Teor de solubilidade em água.

Equação 3. Permeabilidade ao vapor de água (PVA)

Equação 4. Concentração de antocianinas (mg/L)

Equação 5. Diferença de absorbância (antocianinas)

Equação 6. Concentração de antocianinas (mg/100g)

Equação 7. Fator de correção de padronização da solução DCFI

Equação 8. Determinação de ácido ascórbico

Equação 9. Determinação de Chroma (C*)

Equação 10. Determinação de Hue (h°)

Equação 11. Variação de Luminosidade

Equação 12. Variação de cromacidade no eixo da cor verde para vermelha

Equação 13. Variação de cromacidade no eixo da cor azul para amarela

Equação 14. Variação perceptível de cor entre as amostras

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mirtilos (*Vaccinium spp.*) Fonte: A autora (2024).

Figura 2. Diagrama esquemático dos métodos de obtenção de biopolímeros, sendo (A) método seco (fundição com solvente), (B) semelhante ao método A, porém com fundição em fita contínua. (SAEZ-ORVIZ et.al., 2023).

Figura 3 – Diagrama esquemático do método do processo seco de obtenção de biopolímeros: extrusão e sopro. Fonte: LI et.al. (2015), com adaptações.

Análise de coloração de filmes no Espectrofotômetro ColorQuest XE, marca HunterLab. Fonte: A autora (2024).

Figura 4. Dados de produção global de plástico entre os anos de 2018 e 2023 (PLASTICS EUROPE, 2024).

Figura 5. Esquema da produção de solução filmogênica, sendo (1) Mistura de CMC sob aquecimento, (2) Adição de glicerol, (3) Mistura de polpa de mirtilo liofilizado, (4) Adição de probiótico e (5) Adição da solução preparada em placas de petri. Fonte: A autora (2024).

Figura 6. Análise de coloração de filmes no Espectrofotômetro XE, marca HurterLab. Fonte: A autora (2024).

Figura 7. Máquina universal de ensaios Instron utilizada para análise de resistência à tração de filmes. Fonte: A autora (2024).

Figura 8. Texturômetro utilizado para a análise de resistência à perfuração de filmes. Fonte: A autora (2024).

Figura 9. Micrografias das superfícies dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactocaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM), sendo, filme CMC (a), filme CMC/CP (b), filme CMC/CP/PM20 (c), CMC/CP/PM30 (d) e CMC/CP/PM40 (e).

Figura 10. Teor de ácido ascórbico (vitamina C) nos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactocaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Figura 11. Teor de antocianinas nos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactocaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Figura 12: Espectros FTIR para: (—) CMC, (—) CMC/CP, (—) CMC/CP/PM20, (—) CMC/CP/PM30 e (—) CMC/CP/PM40. Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

Figura 13: (a) Curvas TGA e (b) DTG para: (—) CMC, (—) CMC/CP, (—) CMC/CP/PM20, (—) CMC/CP/PM30 e (—) CMC/CP/PM40. Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

Figura 14: Viabilidade celular de LGG após a secagem dos filmes (A) e número de células viáveis durante o armazenamento a 4°C (B) e a 25°C (C). Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos encontrados na literatura que realizara a avaliação de atividades biológicas na suplementação de fruto e/ou polpa de mirtilo *in natura*, desidratado e congelado em seres humanos saudáveis (2020-2023).

Tabela 2 – Estudos encontrados na literatura que realizara a avaliação de atividades biológicas na suplementação de fruto e/ou polpa de mirtilo *in natura*, desidratado e congelado em seres humanos com síndromes metabólicas e suas condições (2019-2024)

Tabela 3 – Informações nutricionais de polpa de mirtilo liofilizado. Fonte: Liomel (2024).

Tabela 4 – Composição dos tratamentos analisados à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo liofilizada (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

Tabela 5 – Teor de umidade, solubilidade em água e espessura dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40)

Tabela 6 – Propriedades relacionadas à cor dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40)

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos filmes à base de Carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*L. Rhamnosus* GG.) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

CMC – Carboximetilcelulose

CP – Cultura Probiótica

PM – Polpa de Mirtilo

PM20 – Filme com 20% de Polpa de Mirtilo

PM30 - Filme com 30% de Polpa de Mirtilo

PM40 - Filme com 40% de Polpa de Mirtilo

PVA – Permeabilidade ao vapor d’gua

TGA – Termogravimetria

DTA – Análise térmica diferencial

DTG – Termogravimetria derivada

UFC – Unidades Formadoras de Colnias

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA.....	17
1.1 Introdução	17
1.2 Mirtilo (Vaccinium spp.)	18
1.3 Composição química dos frutos de mirtilo liofilizado	19
1.4 Propriedades biológicas dos frutos de mirtilo	21
1.4.1 Atividades biológicas em indivíduos saudáveis	29
1.4.2 Atividades biológicas em indivíduos com síndrome metabólica ou suas condições de risco	31
1.5 Microrganismos probióticos	34
1.6 Filmes e revestimentos comestíveis.....	37
1.7 Filmes como veículo para compostos bioativos	40
1.8 O uso de filmes comestíveis na transição para embalagens sustentáveis.....	42
1.9 Conclusões e perspectivas.....	45
1.10 Referências.....	47
CAPÍTULO 2	58
Filmes Comestíveis Bioativos à Base de Carboximetilcelulose Funcionalizados com Polpa de Mirtilo e Lacticaseibacillus rhamnosus GG.....	58
Resumo	58
2.1 Introdução	59
2.2 Material e métodos	60
2.2.1 Matéria-prima	60
2.2.2. Desenvolvimentos dos filmes comestíveis.....	61
2.2.3. Avaliação morfológica	62
2.2.4. Teor de umidade	63
2.2.5. Solubilidade em água.....	63
2.2.6. Permeabilidade ao vapor de água	63
2.2.7. Espessura	64
2.2.8. Propriedades Bioativas	64
2.2.8.1. Determinação do teor de antocianinas.....	64
2.2.8.2. Determinação de ácido ascórbico	65
2.2.9. Avaliação colorimétrica.....	66
2.2.10. Propriedades mecânicas	67

2.2.11. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	69
2.2.12. Análise de termogravimetria	69
2.2.13. Viabilidade da cultura probiótica.....	70
2.2.14. Análise Estatística	70
2.3. Resultados e discussão	70
2.3.1. Características morfológicas	70
2.3.2. Características físicas dos filmes comestíveis	72
2.3.3. Propriedades bioativas	74
2.3.4. Propriedades relacionadas à cor.....	76
2.3.5. Propriedades Mecânicas.....	77
2.3.6. Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e propriedades térmicas.....	78
2.3.7. Viabilidade da cultura probiótica – LGG.....	81
2.4 Conclusões	84
4.5 Referências	85

CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Introdução

Impulsionado pela tendência dos estilos de vida modernos, por uma alimentação mais adequada e balanceada, o setor de alimentos funcionais tem apresentado crescimento significativo. Alimentos funcionais naturais ou processados contêm compostos biologicamente ativos que fornecem inúmeros benefícios à saúde, além dos nutricionais básicos (MIN et al., 2019).

O mirtilo é um fruto conhecido por seu sabor característico e apreciado e seus vários componentes funcionais, tais como ácidos orgânicos, fenólicos, minerais e vitaminas, que proporcionam um valor multiterapêutico (propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, anticancerígenas, neuroprotetoras e de melhoria da visão) (DUAN et al., 2022).

É uma fruta que promove a saúde nutricional com substâncias bioativas ricas, como antocianinas e vitamina C (KIM et al., 2021). No entanto, o mirtilo fresco é propenso a perecibilidade devido ao alto teor de umidade, resultando em deterioração da qualidade e perda econômica (NOWAK, ZIELINSKA, & WASZKIELIS, 2019).

Embora os mirtilos sejam altamente consumidos, a possibilidade de consumo *in natura* é limitada devido à sua disponibilidade sazonal e curta vida útil (2 a 4 dias em temperatura ambiente e 5 a 10 dias a 4 °C) (ZIA & ALIBAS, 2021). Portanto, diferentes técnicas são usadas para conservá-los, como secagem por convecção, liofilização e desidratação osmótica. Tais técnicas servem para prolongar sua vida útil em temperatura ambiente, reduzindo assim os custos de armazenamento e transporte (SHARIF et al., 2018; SUN et al., 2019).

Os filmes comestíveis são constituídos de biopolímeros naturais, que podem ser constituídos de proteínas, polissacarídeos e lipídeos. Esses filmes são alternativas sustentáveis e podem ser enriquecidos com compostos com potencial bioativo, como os probióticos, permitindo o desenvolvimento de filmes funcionais para alimentos, com a capacidade de promover benefícios à saúde dos consumidores (SÁEZ-ORVIZ et al., 2023).

A inclusão de probióticos em filmes e coberturas comestíveis é uma forma de aumentar a sua viabilidade e sobrevivência durante os processos de produção de alimentos, uma vez que se trata de microrganismos vivos e existem vários fatores físicos e químicos que podem ameaçar a sua sobrevivência (MBYE et al., 2020).

Dado o exposto, o objetivo desta revisão é sintetizar as características funcionais do mirtilo, destacando seu potencial para ser incorporado em filmes potencialmente bioativos juntamente com probióticos. Essa abordagem representa uma alternativa ao consumo dessas substâncias bioativas, funcionando como veículo para a entrega de probióticos e para aproveitar as propriedades antioxidantes do mirtilo.

1.2 Mirtilo (*Vaccinium* spp.)

O mirtilo (Figura 1) pertence ao gênero *Vaccinium* e ao subgênero *Cyanococcus*. Em geral, os mirtilos *highbush* (HB, *V. corymbosum* L.) e os mirtilos *rabbiteye* (RB, *V. ashei* R.) são considerados tipos de mirtilo comercialmente importantes. Os mirtilos são ricos em compostos bioativos, principalmente flavonas e outros compostos polifenólicos (ZENG et al., 2021).



Figura 1. Mirtilos (*Vaccinium* spp.). Fonte: A autora (2024)

O mirtilo é um dos cinco alimentos considerados saudáveis para humanos que é certificado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (CHENG et al., 2020), destacando-se pelo seu conteúdo diversificado de compostos bioativos promotores da saúde (SATER et al., 2021). Devido à sua alta atividade antioxidante, quando comparado a outras bagas, o mirtilo tem despertado grande interesse no mercado de prebióticos fitogênicos (DUAN et al., 2022). São considerados prebióticos fitogênicos os substratos, de origem vegetal, utilizados seletivamente por microrganismos benéficos para promover benefícios à saúde do hospedeiro (DE SOUZA et al., 2019).

Os mirtilos se originaram no Canadá e na América do Norte e, posteriormente, se tornaram amplamente distribuídos em todo o mundo, principalmente na América do Norte,

Ásia, Europa e América do Sul. As zonas globais de cultivo de mirtilo aumentaram de 58 regiões em 2016 para 71 em 2020, com área cultivada e rendimento aumentando de 132.560 ha e 622.900 t para 205.670 ha e 850.900 t, respectivamente (ZIA & ALIBAS, 2021).

No Brasil, métodos de propagação para o mirtilo têm sido estudados há pelo menos uma década para aprimorar as técnicas de cultivo no país (SCHUCH et al., 2019). O cultivo de mirtilos da cultivar 'Biloxi' é favorecido em regiões de clima mais ameno, onde o arbusto pode ser cultivado sempre-verde, favorecendo a expansão do cultivo em países tropicais (FALL CREEK, 2023). No Cerrado essa cultivar apresenta um ciclo produtivo de 137 dias, contando desde a poda até o início da colheita, mantendo essa duração por 19 semanas consecutivas (LIMA, 2021).

Além da Biloxi, as cultivares Emerald e Jewel são cultivares que foram desenvolvidas para climas tropicais (SILVA et al., 2024). No Brasil, também são cultivadas as variedades americanas Snowchaser e Primadonna, embora a Biloxi continue sendo a mais plantada (ANTUNES et al., 2023).

Bons resultados de cultivo dessas variedades de mirtilos foram vistos nas regiões de Piracicaba (SP), no Vale do São Francisco, em Petrolina (PE), em Senador Amaral (MG), na Chapada Diamantina, em Nova Soure (BA) e também no Ceará. Apesar do interesse pela cultura ser crescente, estima-se que o Brasil ainda importa cerca de 80% do que é consumido no país, especialmente dos Estados Unidos, do Canadá e do Peru (SISTEMA FAEG, 2022).

1.3 Composição química dos frutos de mirtilo liofilizado

O mirtilo *in natura* apresenta alta perecibilidade devido ao seu elevado teor de umidade (MENG et al., 2012). A liofilização, por sua vez, é capaz de reduzir a umidade do mirtilo para uma média de 2,41 g/100 g (DÍAZ-ÁLVAREZ, 2024) (HUI et al., 2021). Quando se busca a máxima preservação dos componentes potencialmente funcionais dos mirtilos que são sensíveis ao calor, a liofilização é apontada como a estratégia mais eficiente para a desidratação dessa fruta em comparação à secagem convencional (SUN, 2019) (WAGHMARE et al., 2023).

Com o processo de secagem pela liofilização ocorre, conseqüentemente, a concentração dos nutrientes. Para a composição de proteínas foram relatados em mirtilos liofilizados valores entre 2,1 e 7,0 g/100 g (DÍAZ-ÁLVAREZ, 2024); (WOOD et al., 2023); (HUI et al., 2021); (ROUSSEAU et al., 2021); (WANG et al., 2022). Além disso, 19 tipos de aminoácidos já foram identificados (FENG et al., 2019), alguns destes já foram quantificados por ZHANG et al.

(2014), sendo: Aspartato (2,41 mg/g), treonina (9,33 mg/g), serina (6,49 mg/g), ácido glutâmico (14,35 mg/g), alanina (2,21), cisteína (78,20 mg/g), vanila (13,01 mg/g), metionina (35,74 mg/g), tirosina (11,16 mg/g), ácido gama-aminobutírico (89,27 µg/g), lisina (4,51 mg/g) e arginina (9,19 mg/g).

Em mirtilos liofilizados, foram relatadas quantidades de carboidratos entre 69,5 e 96 g/100 g (DÍAZ-ÁLVAREZ, 2024); (WOOD et al., 2023); (WANG et al., 2022); (ROUSSEAU et al., 2021) e lipídios entre 0,9 e 6,5 g/100 g (DÍAZ-ÁLVAREZ, 2024); (WOOD et al., 2023); (HUI et al., 2021); (WANG et al., 2022). Com relação às fibras em mirtilos liofilizados, resultados entre 6,43 e 26 g/100 g de fibras totais (HORASAN SAGBASAN et al. 2024); (DÍAZ-ÁLVAREZ, 2024); (WOOD et al. 2023); (HUI et al., 2021); (ROUSSEAU et al., 2021), com média de 6,37 g/100 g de fibras solúveis e 11,21 g/100 g de fibras insolúveis (WOOD et al. 2023); (HUI et al., 2021) já foram reportadas.

Mirtilos podem conter uma variedade de ácidos orgânicos com altas atividades biológicas, incluindo ácido fenólico, ácido ursólico, ácido clorogênico e ácido elágico (DUAN et al., 2021). Com relação à quantidade de compostos fenólicos totais, os mirtilos liofilizados demonstram entre 122 e 451 mg de ácido gálico equivalente/100 g (ANTAL, 2024); HELLSTRÖM et al. (2024); (LIOVIĆ, 2021). Os ácidos fenólicos são principalmente derivados dos ácidos hidroxibenzóico e p-hidroxicinâmico, que são amplamente aplicados nos campos de alimentos potencialmente funcionais, cosméticos e medicamentos (DUAN et al., 2021). HUI et al (2021) demonstraram em mirtilos liofilizados (µg ácido fenólico/100 g): ácido gálico (2702,76), ácido caféico (59,59), quercetina (13,56), ácido ferúlico (10,57), ácido siríngico (390,56), rutina (6,73), ácido protocatecuico (22,58), ácido hidrobenzóico (21,92), ácido p-cumárico (19,80), catequina (100,45), epicatequina (22,99) e ácido caftárico (16,59).

Já foram identificados em frutos de mirtilos 36 tipos de polifenóis e entre elas as antocianinas (MUSTAFÁ et al., 2022), apresentando média de 1597 mg/100 g em mirtilos liofilizados (WOOD et al., 2023); (HORASAN SAGBASAN et al., 2024); (HELLSTRÖM et al., 2024). É importante destacar que atualmente os métodos de extração para antocianinas de mirtilo incluem principalmente o uso de solventes orgânicos, assistência ultrassônica, pressão ultra alta, fluidos supercríticos e protocolos de extração enzimática e assistida por micro-ondas (FU et al., 2021) que podem alterar seu conteúdo na determinação. Além disso, o teor de antocianinas varia com o cultivo, a genética, o ambiente e as condições de processamento dos frutos (DUAN et al., 2022).

HELLSTRÖM et al. (2024) analisaram antocianinas em mirtilos liofilizados, obtendo os seguintes resultados (mg/100 g): delphinidina-3-galactosídeo (240 ± 130), delphinidina-3-glucosídeo (97 ± 91), delphinidina-3-arabinosídeo (170 ± 70), cianidina-3-galactosídeo (50 ± 35), cianidina-3-glucosídeo (27 ± 26), cianidina-3-arabinosídeo (19 ± 16), petunidina-3-galactosídeo (150 ± 80), petunidina-3-glucosídeo (78 ± 71), petunidina-3-arabinosídeo (80 ± 31), peonidina-3-galactosídeo (17 ± 11), peonidina-3-glucosídeo (23 ± 21), peonidina-3-arabinosídeo ($13 \pm 8,7$), malvidina-3-galactosídeo (290 ± 150), malvidina-3-glucosídeo (190 ± 70) e malvidina-3-arabinosídeo (141 ± 250). No entanto, as antocianinas do mirtilo são altamente suscetíveis a condições ambientais, como pH, temperatura, luz, oxigênio, íons metálicos e aditivos (KIM et al., 2021).

As antocianinas do mirtilo têm sido reportadas por suas propriedades antioxidantes, antiobesidade, anticancerígenas e anti-inflamatórias, além de auxiliarem no tratamento de doenças cardiovasculares e diabetes tipo 2, possuindo também efeito neuroprotetor, o que reforça seu potencial terapêutico (WU et al. 2023).

1.4 Propriedades biológicas dos frutos de mirtilo

O mirtilo é amplamente reconhecido como um dos principais frutos funcionais, devido à sua rica composição em flavonoides, antocianinas e outros fitoquímicos com comprovadas propriedades antioxidantes (MA et al., 2018; ZHOU et al., 2020; WU et al., 2023). Diante disso, diversos ensaios clínicos randomizados têm sido realizados para investigar os efeitos da suplementação de mirtilos em parâmetros relacionados à saúde humana (CARVALHO et al., 2021).

A Tabela 1 e 2 apresentam os trabalhos nos quais foram administrados frutos de mirtilo em suas diferentes formas de conservação (*in natura*, desidratado e congelado) para seres humanos e avaliados seus efeitos biológicos na saúde, sendo que a primeira demonstrou estudos realizados com indivíduos saudáveis e a segunda demonstrou estudos realizados com indivíduos com síndrome metabólica e/ou suas condições de risco, respectivamente. A busca de estudos foi realizada utilizando os termos buscadores: “*Vaccinium*”, “*Blueberry*”, “*biological activities of blueberry*” e “*blueberry clinical trials*”, em dezembro de 2024, e foram utilizadas plataformas como Pubmed, ScienceDirect e ResearchGate, selecionando estudos publicados nos últimos 5 anos (2019 – 2024) em revistas de alto impacto.

Como critério de seleção dos trabalhos, incluíram-se apenas estudos clínicos que investigaram os efeitos do consumo de mirtilo em seres humanos, utilizando o fruto ou a polpa liofilizada em doses padronizadas. Foram excluídos estudos que empregaram exclusivamente extratos isolados, suplementos em cápsulas ou formulações combinadas com outras frutas, a fim de assegurar a análise específica dos efeitos do mirtilo e de seus compostos bioativos. Dessa forma, buscou-se garantir maior comparabilidade entre os trabalhos selecionados quanto à forma de administração e à avaliação dos desfechos biológicos.

Tabela 1 – Estudos encontrados na literatura que realizara a avaliação de atividades biológicas na suplementação de fruto e/ou polpa de mirtilo *in natura*, desidratado e congelado em seres humanos saudáveis (2020-2023)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Homens e mulheres de 18 a 50 anos após 90 minutos de exercício físico (n=49)	Determinar se a suplementação com mirtilos em comparação com placebo poderia mitigar a dor e os danos musculares e melhorar a resolução da inflamação em resposta a uma sessão aguda de 90 minutos de exercício excêntrico.	Mirtilo liofilizado equivalente a 1 xícara de mirtilos frescos por dia/ 18 dias	↑ Processo de recuperação inflamatória, após atividade física; ↓ diHOMEs (oxilipinas pró-inflamatórias); ↑ Oxilipinas anti-inflamatórias derivadas de DHA e EPA.	(NIEMAN et al., 2023)
Mulheres saudáveis, divididas em dois grupos etários: jovens (25-40 anos) e idosas (60 - 75 anos) (n=17)	Avaliar como o consumo de mirtilos e suas frações ricas em polifenóis afetam a composição da microbiota intestinal.	38 g de mirtilo liofilizado por dia/6 semanas.	↑ Tóxons associados à saúde, aumentando da atividade antioxidante no sangue; Aumento moderado da diversidade da microbiota intestinal nas participantes mais velhas	(NTEMIRI et al., 2020)
Mulheres saudáveis, com idade de 45 a 70 anos e média de 7 anos após a menopausa. (n=13)	Estudar os efeitos do consumo de pó de mirtilo liofilizado na retenção de cálcio ósseo em mulheres pós-menopáusicas saudáveis.	Dosagens de mirtilo liofilizado a cada 6 semanas com intervalos de 6 semanas: Baixa: 17,5 g/dia Média: 35 g/dia Alta: 70 g/dia	↑ Retenção de cálcio maior com as doses baixa (+6%) e média (+4%); ↓ RANKL (marcador de reabsorção óssea) com a dose média. ↓ P1NP (marcador de formação óssea) com todas as doses.	(HODGES et al., 2023)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Mulheres grávidas (<20 semanas), com idade média de 27 anos (n=34)	Examinar os impactos da suplementação de mirtilo e fibra solúvel em parâmetros cardiometabólicos de mulheres grávidas com alto risco de diabetes gestacional (GDM).	280g de mirtilo congelado e 12g de fibra solúvel por dia/18 semanas	↓ Ganho de peso gestacional; ↑ Controle glicêmico e inflamação.	(BASU et al., 2021)
Homens e mulheres entre 18 e 60 anos (n=37)	Avaliar os efeitos do mirtilo inteiro e liofilizado em comparação com controle na saúde cardiovascular de adultos	160g de mirtilo fresco ou 20g de mirtilo liofilizado por 7 dias	= Consumo do mirtilo inteiro e liofilizado; ↑ Melhora nos níveis plasmáticos de NO ₂ ⁻ .	(WANG et al., 2022)
Homens e mulheres entre 20 e 35 anos sedentários (n=10)	Avaliar o efeito do consumo agudo de mirtilos nas respostas glicêmicas e insulinêmicas e no estado redox, após a ingestão de um alimento rico em carboidrato	150 g de mirtilos consumidos juntamente com 150g de pão branco em dose única (aguda) ou por 6 dias (suplementação)	↓ Glicose (agudo) ↑ Insulina (tendência a longo prazo)	(PALMA et al., 2021)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Indivíduos saudáveis com pelo menos 60 anos (n=20)	Avaliar a melhoria da função vascular com o consumo de mirtilos	250g de mirtilos congelados triturados por pelo menos 1 semana	↑ concentração sérica de antocianinas ↑ Índice de hiperemia reativa — RHI (índice de reatividade vascular)	(TUCCI et al., 2024)

Tabela 2 – Estudos encontrados na literatura que realizara a avaliação de atividades biológicas na suplementação de fruto e/ou polpa de mirtilo *in natura*, desidratado e congelado em seres humanos com síndromes metabólicas e suas condições (2019-2024)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Mulheres pós-menopáusicas com deficiência de estrogênio, com idade entre 45 e 65 anos com pressão arterial elevada ou hipertensão estágio 1 (n=48)	Examinar a eficácia dos mirtilos para melhorar a função endotelial e a pressão arterial em mulheres pós-menopáusicas com pressão arterial acima do normal.	22 g de pó de mirtilo liofilizado por dia/12 semanas	↑Função endotelial; ↓Estresse oxidativo vascular.	(WOOLF et al., 2023)
Homens e mulheres, com idades entre 18 e 60 anos e índice de massa corporal de 18,5 a 32,9 kg/m² e com distúrbios gastrointestinais funcionais (n=43)	Avaliar os efeitos de mirtilos em sintomas clínicos relacionadas à distúrbios gastrointestinais funcionais	30 g de pó de mirtilo liofilizado, tomados em duas doses de 15 g por dia/ 6 semanas.	↓Sintomas abdominais, como dor, inchaço, diarreia, flatulência e náuseas; ↑Bem-estar, qualidade de vida e funcionamento da vida nos pacientes.	(WILDER-SMITH et al., 2023)
Homens com diabetes tipo 2, com idade entre 51 e 74 anos (n=37)	Investigar os efeitos do consumo de mirtilo no estado de humor de homens com diabetes tipo 2.	22 g de mirtilos liofilizados por dia /8 semanas	↓ Perturbação total do humor e confusão-perplexidade	(STOTE et al., 2021)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Homens ou mulheres idosos sedentários, com idade a partir de 60 anos com sobrepeso ou obesidade (IMC \geq25 a 32 kg/m²) (n= 55)	Explorar o potencial da alta ingestão diária de mirtilos na modulação da microbiota intestinal de homens e mulheres idosos sedentários, com sobrepeso ou obesidade	Pó de mirtilo liofilizado, equivalente a $\frac{3}{4}$ xícara de mirtilos por dia/ 12 semanas	↑ <i>Coriobacteriales Incertae Sedis</i>	(STARR et al., 2024)
Homens e mulheres com síndrome metabólica, com idade de 50 a 75 anos e IMC \geq25 kg/m² (n=45)	Verificar se o consumo de mirtilos, ricos em antocianinas, pode atenuar os efeitos negativos de uma refeição altamente calórica e rica em gorduras e açúcares sobre marcadores cardiometabólicos de indivíduos com síndrome metabólica.	26 g de mirtilos liofilizados/24h	↓Níveis de glicose e insulina; ↑ Níveis de colesterol HDL e partículas grandes de HDL (L-HDL e XL-HDL) e Apo-A1; ↓Colesterol total; ↑Concentração de metabólitos derivados das antocianinas no sangue e na urina.	(CURTIS et al., 2022)
Homens e mulheres com declínio cognitivo, com idade de 50 a 65 anos, com sobrepeso e resistência à insulina (n=27)	Investigar os efeitos da suplementação diária de mirtilo em indivíduos de meia-idade com resistência à insulina e risco elevado de demência.	14 g de mirtilo liofilizado por dia/12 semanas.	↑ Função executiva, especialmente em tarefas de memória de trabalho; ↓ Níveis de glicose em jejum e melhora na sensibilidade à insulina; ↑ Função mitocondrial periférica.	(KRIKORIAN et al., 2022)

População	Objetivo	Dosagem/duração	Principais resultados	Referência
Homens que sofreram um infarto agudo do miocárdio (IAM) e idade média de 68 anos (n=50)	Avaliar os efeitos do consumo dietético de mirtilo liofilizado em pacientes após infarto agudo do miocárdio (IAM).	40 g de mirtilo liofilizado por dia/8 semanas.	↑ TC6M (teste de caminhada de 6 min.).	(AREVSTRÖM et al., 2019)
Homens e mulheres com síndrome metabólica e idade média de 63 anos (n=115)	Avaliar os efeitos do consumo de mirtilos sobre a resistência à insulina, função vascular e biomarcadores cardiometabólicos	1 ou 1/2 xícara de mirtilos por dia (150g ou 75g, respectivamente)/24 semanas	↑ Função endotelial (1,45% na dilatação mediada por fluxo) ↓ Rigidez arterial (-2,24%) ↑ HDL colesterol (+0,08 mmol/L) e na densidade de partículas de HDL em não usuários de estatinas; ↑ Metabólitos derivados de antocianinas em soro e urina.	(CURTIS et al., 2019)

1.4.1 Atividades biológicas em indivíduos saudáveis

Os sete estudos analisados incluíram vários grupos populacionais, principalmente pacientes adultos e idosos (idade entre 18 e 75 anos) em diferentes públicos a citar: homens e mulheres saudáveis, atletas, sedentários, mulheres pós-menopausa e mulheres grávidas.

A atividade anti-inflamatória e antioxidante do mirtilo foi observada em diferentes ensaios clínicos. Estudos com atletas (NIEMAN et al., 2023), microbiota intestinal (NTEMIRI et al., 2020) e gestantes (BASU et al., 2021) mostram redução de processos inflamatórios e/ou aumento da capacidade antioxidante. Nestes trabalhos, a ingestão diária de 38-280 g de mirtilo por 6 a 126 dias foi realizada.

NIEMAN et al. (2023) constataram que a suplementação com mirtilo liofilizado em indivíduos após 90 minutos de exercício físico reduziu marcadores pró-inflamatórios e aumentou oxilipinas com ação anti-inflamatória. Em gestantes com risco de diabetes gestacional, BASU et al. (2021) também observaram redução de marcadores inflamatórios após 18 semanas de consumo de mirtilos congelados e fibras solúveis. Além disso, WOOLF et al. (2023) reportaram diminuição do estresse oxidativo em mulheres pós-menopáusicas com hipertensão leve, após o consumo de mirtilo liofilizado durante doze semanas.

O efeito antioxidante do mirtilo pode ser relacionado aos polifenóis, que atuam tanto na neutralização direta de espécies reativas de oxigênio (ROS) quanto na modulação das vias endógenas de defesa antioxidante. Esses compostos estimulam a atividade de enzimas protetoras, reduzindo a peroxidação lipídica, preservando a integridade celular e atenuando danos oxidativos. Estudos demonstram ainda que as antocianinas presentes no mirtilo conferem proteção a células endoteliais, diminuem danos ao DNA e aumentam a expressão de genes antioxidantes. Tais efeitos resultam da ação sinérgica entre diferentes fitoquímicos da fruta, confirmando seu potencial no controle do estresse oxidativo (ASHIQUE et al., 2024; FELGUS-LAVEFVE et al., 2022).

Os polifenóis também podem estar relacionados com o efeito anti-inflamatório do mirtilo, que atua por múltiplos mecanismos celulares e moleculares. Estudos demonstram que esses compostos modulam vias de sinalização chave na resposta inflamatória, como a inibição da ativação do fator nuclear kappa B (NF- κ B) e a do inflamassoma NLRP3. Essa regulação resulta na consequente redução da expressão de citocinas pró-inflamatórias, como o TNF- α , atenuando processos inflamatórios crônicos. Além disso, os bioativos do mirtilo exercem uma

ação anti-inflamatória indireta ao modular a microbiota intestinal, promovendo a produção de ácidos graxos de cadeia curta, que também contribuem para a redução das respostas inflamatórias sistêmicas, reforçando o potencial da fruta como um alimento funcional no manejo de condições metabólicas (LIU & CHEN, 2025; FELGUS-LAVEFVE et al., 2022).

O estudo de PALMA et al. (2023) investigou os efeitos do mirtilo em indivíduos sedentários por meio de duas intervenções distintas. No ensaio agudo, o consumo de uma única dose de mirtilos frescos melhorou o controle glicêmico imediato, com redução da glicose pós-prandial e um pico de insulina aos 15 minutos, efeito atribuído à provável inibição de enzimas digestivas e ao estímulo da secreção de incretinas. Já na intervenção de curto prazo, a suplementação diária por seis dias resultou em uma melhora no controle da insulina, sugerindo um aumento na sensibilidade a este hormônio. Este efeito foi atribuído pelos autores às propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias mais amplas dos polifenóis do mirtilo.

Outro efeito dos mirtilos apontado nos estudos está relacionado à regulação da microbiota intestinal. NTAMIRI et al. (2020) demonstraram que o consumo diário de mirtilo liofilizado promoveu aumento de táxons benéficos, especialmente em mulheres acima de 60 anos, o que contribuiu para uma maior diversidade microbiana. STARR et al. (2024) também obtiveram resultados que associaram o consumo de mirtilos liofilizados ao aumento de bactérias envolvidas na metabolização de polifenóis, sugerindo possível efeito simbiótico.

O potencial antioxidante do mirtilo também se estende à saúde óssea. Nesse sentido, HODGES et al. (2023) verificaram aumento na retenção de cálcio e redução de marcadores de reabsorção óssea em mulheres que já passaram pela menopausa, após o consumo de mirtilo liofilizado, especialmente nas doses mais baixas (17,5 g/dia) e moderadas (35 g/dia). Os autores atribuíram esse efeito aos polifenóis do mirtilo e aos metabólitos produzidos pela microbiota intestinal, como o ácido hipúrico. A hipótese é que esses compostos atenuam o estresse oxidativo característico da menopausa, protegendo contra a perda de massa óssea por meio da modulação da atividade das células formadoras e reabsortivas do tecido ósseo. No entanto, o estudo apresenta algumas limitações, uma vez que não investigou diretamente a modulação mineral, o que abre espaço para discutir mecanismos complementares que podem justificar o efeito osteoprotetor atribuído ao mirtilo.

De acordo com ASHIQUE et al. (2024), os mirtilos exercem sua ação osteoprotetora principalmente por meio das antocianinas, reconhecidas como os principais fitoconstituintes responsáveis por esse benefício. O mecanismo envolve a diminuição dos níveis de mRNA do colágeno tipo I e da fosfatase alcalina na região femoral, modulando processos genéticos

cruciais para a remodelação óssea. Essa regulação resulta diretamente na redução da perda de tecido ósseo e no aumento da densidade mineral óssea, reforçando o papel das antocianinas na manutenção da saúde esquelética.

Os efeitos do consumo de mirtilo na saúde vascular também têm sido evidenciados em estudos agudos com diferentes populações. WANG et al. (2023) demonstraram em adultos até 60 anos de idade que, tanto o consumo de mirtilos inteiros quanto o de mirtilo em pó liofilizado foram capazes de melhorar a função endotelial poucas horas após a ingestão. De forma complementar, TUCCI et al. (2024) investigaram os efeitos em idosos e observaram que uma única porção de mirtilo (250 g) também foi eficaz em melhorar a função vascular periférica, indicando um potencial para neutralizar o declínio vascular relacionado ao envelhecimento. Esses achados agudos são consistentes com o pico de absorção das antocianinas, observado duas horas após o consumo.

1.4.2 Atividades biológicas em indivíduos com síndrome metabólica ou suas condições de risco

A síndrome metabólica (SM) não corresponde a uma doença específica, mas a um conjunto de fatores de risco para doenças cardiovasculares, acidente vascular cerebral (derrame) e diabetes tipo 2 (ZHANG et al., 2025). De acordo com a Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia e a *American Heart Association*, a SM é caracterizada por condições clínicas associadas a distúrbios metabólicos (FERREIRA DA SILVA et al., 2024), entre os quais se destacam a obesidade, a resistência à insulina, os baixos níveis de colesterol de lipoproteína de alta densidade (HDL-C), a hipertensão, a hipertrigliceridemia, a hiperglicemia e circunferência da cintura aumentada (LI et al., 2024; WANG et al., 2020).

A crescente prevalência da síndrome metabólica (SM) em escala global representa um desafio significativo para a saúde pública e para a economia (LIN et al., 2021). A SM é considerada uma pandemia mundial, configurando-se como uma das principais causas de redução da expectativa de vida e de invalidez. Nos Estados Unidos, sua prevalência atingiu o pico no início do século XXI e, atualmente, mais de um quinto da população americana, assim como da europeia, apresenta o distúrbio (SWARUP et al., 2024). Na América Latina, a SM afeta aproximadamente quatro em cada dez adultos, com maiores índices observados no México (61%) e no Equador (50%) (PARRA-GÓMEZ et al., 2025).

Os grupos mais impactados pela SM são as mulheres, idosos e indivíduos residentes em áreas urbanas. Sua prevalência aumenta progressivamente com a idade, alcançando quase 40% na sexta década de vida. O diagnóstico precoce e preciso é fundamental, para que ações urgentes, integradas e abrangentes sejam realizadas para reduzir o risco das doenças associadas (PARRA-GÓMEZ et al., 2025; GRUNDY, 2008).

Todos os fatores da SM estão intimamente associados ao estilo de vida, de modo que a adoção de hábitos saudáveis, especialmente uma alimentação equilibrada, constitui uma estratégia eficaz para a mitigação de riscos (MANOHARAN et al., 2022). Nesse contexto, o mirtilo destaca-se por sua composição rica em substâncias bioativas, como flavonoides e ácidos fenólicos, que apresentam potencial no controle da SM. Entre os efeitos atribuídos ao consumo dessa fruta estão a modulação da composição e da atividade metabólica da microbiota intestinal, com repercussões positivas sobre a saúde intestinal, o controle do peso corporal, a atenuação de processos inflamatórios, o aumento da capacidade antioxidante e a melhora do perfil metabólico geral (LIU & CHEN, 2025).

Oito estudos foram revisados e sintetizados na Tabela 2, os quais descrevem os possíveis impactos que o consumo do mirtilo sobre os efeitos da SM. Os trabalhos incluíram participantes, homens e mulheres, entre 18 e 70 anos, que apresentavam fatores como hipertensão, distúrbios gastrointestinais, diabetes tipo 2, sobrepeso, obesidade, resistência à insulina e histórico de infarto agudo do miocárdio.

No contexto cardiometabólico, os benefícios do mirtilo, conforme relatado por CURTIS et al. (2019, 2022), estão fortemente associados à sua atividade antioxidante e à consequente redução do estresse oxidativo. A melhora da função vascular observada nos estudos foi atribuída ao aumento da bioatividade do óxido nítrico (NO), uma molécula vasodilatadora fundamental. Esse efeito pode ter sido mediado pela ação das antocianinas, que potencializam a atividade de enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD), protegendo o NO da degradação oxidativa e favorecendo sua biodisponibilidade. Além disso, as antocianinas podem influenciar positivamente o estado redox celular, contribuindo para a atenuação do estresse oxidativo transitório induzido por refeições de alta densidade energética. Assim, a capacidade dos mirtilos de preservar a via do óxido nítrico e de modular o equilíbrio redox celular configura-se como um mecanismo plausível para explicar as melhorias relatadas na função vascular e no perfil cardiometabólico (BURTON-FREEMAN et al. de 2019; KUNTZ et al. de 2014).

Estudos relatam redução de estresse oxidativo (WOOLF et al., 2023) e melhora da sensibilidade à insulina (KRIKORIAN et al., 2022), sugerindo que o mirtilo atua modulando processos inflamatórios e oxidativos crônicos. Essa modulação é atribuída principalmente aos seus polifenóis, que exercem uma ação sinérgica. (ONUH et al., 2023). No combate ao estresse oxidativo, esses compostos atuam tanto na neutralização direta de radicais livres quanto na ativação das vias de defesa antioxidante do próprio organismo. Essa potente atividade antioxidante, somada à capacidade de suprimir mediadores inflamatórios, contribui para a melhora da sensibilidade à insulina, visto que a inflamação crônica é um fator chave na resistência a este hormônio (JOHNSON et al., 2017; KALT et al., 2020; ONUH et al., 2023).

Estudos indicam que o consumo de mirtilo pode trazer benefícios psicofisiológicos, como melhora do humor e redução da confusão mental em homens com diabetes tipo 2 (STOTE et al., 2021), sugerindo que seus efeitos vão além dos parâmetros cardiometabólicos. Esses resultados são atribuídos à potente ação anti-inflamatória dos polifenóis, já que a inflamação sistêmica está associada ao humor deprimido e à intensificação de sensações corporais negativas por meio do eixo intestino-cérebro (BENSON et al., 2023). Assim, ao reduzir a carga inflamatória, o mirtilo pode mitigar esse processo e contribuir diretamente para o bem-estar mental.

Os efeitos neuroprotetores do mirtilo também vêm sendo investigados. KRIKORIAN et al. (2022) demonstraram que a suplementação com mirtilo liofilizado por 12 semanas melhorou a função executiva e a função mitocondrial periférica, além de reduzir os níveis de glicose e aumentar a sensibilidade à insulina em indivíduos de meia-idade com resistência insulínica e risco elevado de demência, reforçando a hipótese de que seus compostos antioxidantes exercem benefícios tanto sobre o sistema nervoso central quanto sobre parâmetros metabólicos. Estudos pré-clínicos elucidam os mecanismos que fundamentam esses efeitos, mostrando que as antocianinas do mirtilo otimizam a saúde mitocondrial ao promover a biogênese e manter a dinâmica das mitocôndrias por meio da ativação da via SIRT1/PGC-1 α (MA et al., 2025), além de combater o estresse oxidativo, reduzir a apoptose neuronal e proteger o DNA contra danos genotóxicos. Essa proteção se estende à manutenção de níveis adequados de neurotransmissores essenciais, oferecendo uma base molecular consistente para explicar a melhora da função executiva observada em humanos (MA et al., 2025; SHAO et al., 2019).

Em relação à recuperação física, AREVSTRÖM et al. (2019) observaram melhora da capacidade funcional, medida pelo teste de caminhada de 6 minutos, em pacientes pós-infarto agudo do miocárdio após oito semanas de suplementação com mirtilo liofilizado, sem

alterações significativas nos principais biomarcadores inflamatórios. Esse efeito pode estar associado à ação vasodilatadora dos polifenóis do mirtilo, que aumentam a disponibilidade de óxido nítrico (NO), favorecendo o relaxamento da musculatura lisa vascular e o fluxo sanguíneo. Os metabólitos formados após a ingestão também se correlacionam com a dilatação mediada por fluxo (FMD), sugerindo efeitos aditivos e sinérgicos na modulação vascular. Em conjunto, esses mecanismos contribuem para a redução da disfunção endotelial e a melhora da saúde cardiovascular, inclusive em indivíduos com síndrome metabólica (ONUH et al., 2023).

Por fim, benefícios gastrointestinais também foram evidenciados por WILDER-SMITH et al. (2023), que observaram melhora significativa em indivíduos com distúrbios gastrointestinais funcionais (DGIF) após seis semanas de suplementação com mirtilo liofilizado. O tratamento reduziu um conjunto de sintomas abdominais, com destaque para a diminuição da dor abdominal, diarreia e constipação, além de promover melhora na qualidade de vida geral. Esses efeitos estão associados aos polifenóis e às fibras do mirtilo, que atuam de forma distinta dos açúcares da fruta. Em pacientes com DGIF, cuja patogênese envolve ativação imune e sensibilização do sistema nervoso, os polifenóis exercem ações anti-inflamatórias, antioxidantes e neuroprotetoras, modulando a interação intestino-cérebro e contribuindo para o alívio do desconforto.

Os resultados dos ensaios clínicos executados nos diferentes grupos populacionais sustentam a aplicabilidade do mirtilo como ingrediente funcional. Sua incorporação em matrizes tecnológicas, como filmes comestíveis bioativos, representa uma estratégia promissora para veiculação de compostos bioativos, agregando valor nutricional e funcional aos alimentos, além de potencializar sua ação terapêutica em diversos contextos fisiológicos (ASHIQUE et al., 2024; DE OLIVEIRA FILHO et al., 2023; BAMBACE et al., 2021).

1.5 Microrganismos probióticos

Em 2002, a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) definiram os probióticos como “microrganismos vivos que, quando administrados em quantidades adequadas, conferem benefícios à saúde do hospedeiro” (FAO, 2002). Os probióticos fornecem vários benefícios para o organismo humano, auxiliam no equilíbrio das bactérias intestinais, estimulam o sistema imunológico e promovem ajuda em casos como síndrome do intestino irritável e intolerância à lactose (XIE, 2023).

Os alimentos funcionais são uma tendência crescente de consumo, portanto, a demanda de probióticos vem aumentando. Várias espécies probióticas foram estudadas até agora e catalogadas como seguras, como por exemplo: *Lactobacillus acidophilus*, *Lacticaseibacillus casei*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus paracasei*, *Ligilactobacillus johnsonii*, *Lacticaseibacillus rhamnosus*, *Limosilactobacillus reuteri*, *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum subsp. infantis*, *Bifidobacterium animalis subsp. lactis*, *Saccharomyces boulardii* e *Propionibacterium freudenreichii* (GHASEMIAN et al., 2018).

Para serem considerados probióticos, os microrganismos devem seguir alguns requisitos como informações sobre identidades de gênero, espécie e cepa; ser nomeados usando uma nomenclatura cientificamente válida para a designação da cepa; depósito da cepa em coleção de cultura internacional; e propriedades benéficas para a saúde validadas por pelo menos um estudo humano (ISAPP, 2018). Além disso, um produto contendo probióticos deve fornecer uma quantidade suficiente de microrganismos vivos para fornecer o benefício de saúde alegado até a data de validade (PLAZA-DIAZ et al., 2019).

No Brasil, a regulamentação do uso de probióticos em alimentos é estabelecida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), através da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 241, de 26 de julho de 2018, atualizada pela RDC nº 839/2023, que dispõe sobre os requisitos para a comprovação de benefícios à saúde dos probióticos destinados ao uso em alimentos. De acordo com a norma, para que um microrganismo seja considerado probiótico, é necessário comprovar sua identificação taxonômica até o nível de linhagem, demonstrar sua segurança, e evidenciar benefícios à saúde humana por meio de estudos clínicos controlados. Além disso, é exigido que o microrganismo esteja depositado em coleção de cultura internacionalmente reconhecida (BRASIL, 2018).

Tais exigências reforçam a importância de se utilizar cepas como o *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG (LGG), anteriormente denominado de *Lactobacillus rhamnosus* GG, que recebeu essa nova nomenclatura a partir da reclassificação taxonômica proposta por ZHENG et al. (2020). Trata-se de um probiótico amplamente caracterizado e utilizado, cuja segurança já foi consolidada ao longo dos anos (OUWEHAND et al., 2004; SEGER et al., 2014). O LGG foi isolado a partir de amostras fecais de um adulto humano saudável pelos pesquisadores Sherwood Gorbach e Barry Goldwin, cujas iniciais deram origem à denominação “GG”. A cepa destacou-se por sua resistência ao ácido e à bile, pela boa capacidade de crescimento e por sua adesão à mucosa intestinal (DORON et al., 2005).

A administração do LGG tem sido amplamente estudada, demonstrando benefícios clínicos relevantes. CAPURSO (2019), reuniu evidências de três décadas de pesquisa, demonstrando a sua eficácia na redução da duração da diarreia aguda em crianças, especialmente por rotavírus, e na prevenção da diarreia associada ao uso de antibióticos e infecções. Além disso, o LGG contribui para o manejo de distúrbios gastrointestinais funcionais, reduzindo sintomas de dor abdominal, fortalece o sistema imunológico, atenua a gravidade de infecções respiratórias e apresenta efeitos adicionais, como a diminuição do risco de eczema atópico em bebês quando administrado a mães durante a gestação e lactação, e a melhora clínica em crianças com fibrose cística, com menor ocorrência de exacerbações pulmonares e hospitalizações.

Embora os benefícios do LGG sejam comprovados, a viabilidade desses probióticos tende a diminuir durante o processamento, armazenamento e condições gástricas dos alimentos (CALDERÓN-OLIVER & PONCE-ALQUIRA, 2022). A estabilidade das células probióticas pode ser influenciada por diversos fatores tecnológicos, entre os quais se destacam o pH e a acidez do alimento, a composição da matriz, a atividade de água, a presença de aditivos como cloreto de sódio, nitritos e nitratos, além da temperatura aplicada tanto no processamento quanto no armazenamento do produto (ASPRI et al., 2020).

COLAUTTI et al. (2024) avaliaram a resistência de 60 cepas de *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (LGG) frente a diferentes estressores e observaram que a maioria das cepas (98%) apresentou resistência ao pH 4,6; 48 cepas demonstraram tolerância até a concentração de 6,5% de NaCl; e houve sensibilidade progressiva ao etanol, com 36,7% das cepas afetadas a 12% e 55,0% a 15%. Em relação aos antibióticos, as cepas apresentaram resistência à canamicina, ofloxacina, estreptomicina, tobramicina e vancomicina, mantendo sensibilidade aos fármacos cefoperazona, cefazolina, cloranfenicol, clindamicina, eritromicina, quinupristina/dalfopristina, rifampicina e tetraciclina.

Para otimizar a viabilidade do LGG, algumas alternativas são necessárias, a encapsulação, por exemplo, surgiu como uma estratégia fundamental para aumentar a estabilidade e a sobrevivência dos probióticos (CHOUDHURY et al., 2021). BARAJAS-ALVAREZ et al. (2022) produziram microcápsulas de LGG com o intuito de aumentar a viabilidade desta cepa, obtendo resultados positivos, utilizando goma arábica e trealose com materiais de parede. SANTOS et al. (2025) demonstraram que a microencapsulação de LGG por secagem por atomização usando maltodextrina, proteína de ervilha e farinha de tapioca foi capaz não apenas por manter a viabilidade do probiótico durante a digestão, mas também

otimizou a estabilidade térmica da cepa. EUENFELDT et al. (2022) realizaram o encapsulamento da LGG junto ao extrato de mirtilo, resultando em alta resistência térmica, quando comparada às células livres e estabilidade de até 14 dias.

1.6 Filmes e revestimentos comestíveis

Os filmes comestíveis consistem em camadas finas, geralmente com espessura inferior a 0,3 mm, utilizadas para proteger produtos alimentícios e retardar o processo de deterioração. O desenvolvimento desses materiais tem ganhado destaque devido à sua característica biodegradável e ao potencial de enriquecimento com substâncias bioativas (PRAKASH, 2025).

O objetivo principal dos filmes e revestimentos comestíveis é criar uma barreira entre o alimento e ar ambiente, de modo a prolongar a vida de prateleira dos alimentos (POP et al., 2020). Como podem ser ingeridos junto com os alimentos, não há geração de lixo. No caso de não serem ingeridos, a degradação é mais rápida em comparação com as embalagens plásticas (KONG et al., 2024).

Além da função de proteção, esses materiais podem atuar como veículos de substâncias bioativas, promovendo a liberação gradual e controlada dos compostos incorporados, os quais podem oferecer benefícios ao consumidor ou, no caso dos revestimentos, funcionar como substitutos naturais de conservantes químicos para os alimentos revestidos (DE OLIVEIRA et al., 2025; PEI et al., 2024). Compostos bioativos comumente incorporados em filmes comestíveis incluem polifenóis, vitaminas, óleos essenciais, probióticos e antioxidantes, os quais conferem funcionalidade adicional à matriz (LU et al., 2025; PEI et al., 2024).

Os filmes comestíveis são geralmente utilizados envolvendo os alimentos, de forma semelhante a uma embalagem primária, ou como revestimentos aplicados diretamente sobre sua superfície, formando uma película protetora (CEYLAN & ATASOY, 2023). No segundo caso, a aplicação ocorre por meio da deposição direta da solução ao alimento, por meio de técnicas como pulverização, imersão ou escovação. Já os filmes são estruturas previamente formadas, obtidas por processos como extrusão ou fundição com solvente, e utilizadas posteriormente para envolver ou proteger os alimentos (RIBEIRO et al., 2024).

Os filmes e revestimentos comestíveis são comumente elaborados a partir de proteínas, carboidratos ou lipídios, ou a combinação destes. As proteínas utilizadas podem ter origem vegetal, como a proteína de soja e o glúten de trigo, ou animal, como a gelatina, queratina, caseína e proteínas do soro de leite. Entre os ingredientes lipídicos, destacam-se os

triglicerídeos, ceras, monoglicerídeos acetilados e ácidos graxos livres (AAYUSH et al., 2022). Já no caso de embalagens à base de carboidratos, predominam materiais como celulose, incluindo a celulose bacteriana, além de amido, quitina, quitosana, pectina, alginato e carragenina (ZHANG et al., 2014).

Tanto os filmes quanto os revestimentos podem ser classificados de acordo com os métodos empregados em sua produção (WANG et al., 2025), que incluem a fundição (figura 2) e a extrusão termoplástica e sopro (figura 3) (GUPTA et al., 2024).

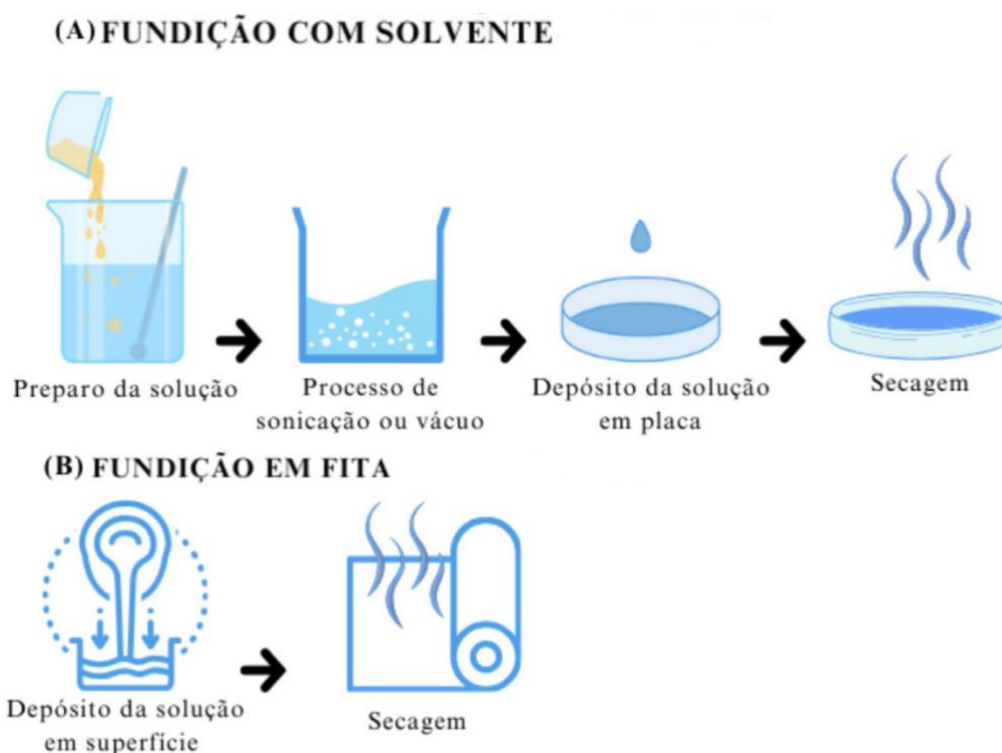


Figura 2. Diagrama esquemático dos métodos úmidos de obtenção de biopolímeros, sendo (A) método seco (fundição com solvente), (B) semelhante ao método A, porém com fundição em fita contínua. Fonte: SAEZ-ORVIZ et al. (2023), com adaptações.

O método de fundição é considerado o mais simples e amplamente adotado para a produção de filmes, principalmente em escalas laboratoriais e piloto (GUPTA et al., 2014). A preparação dos filmes por essa técnica envolve três etapas principais: (1) dissolução do biopolímero em um solvente apropriado; (2) distribuição da solução em um molde ou superfície lisa; e (3) secagem (SUHAG et al., 2020).

Na etapa de secagem, é possível utilizar diferentes técnicas, como estufas de circulação de ar, fornos, micro-ondas ou secadores a vácuo. A secagem promove a evaporação da água,

Entre as principais vantagens da extrusão estão a dispensa da utilização de solventes, o curto tempo de processamento (alta produtividade), a facilidade no manuseio de polímeros de alta viscosidade e o amplo controle das variáveis operacionais, como estrutura da matriz, teor de umidade, número e velocidade de parafusos e temperatura das zonas (XUE et al., 2025). Quando comparado ao método úmido, esse processo permite a obtenção de filmes com resistência mecânica superior, excelente flexibilidade e maior estabilidade, inclusive a partir de substâncias insolúveis (NILSUWAN, 2019).

No entanto, o método de extrusão apresenta limitações. A temperatura e estresse mecânico envolvido no processo pode degradar compostos bioativos sensíveis ao calor (CHENG et al., 2022). Além disso, a técnica é restrita a matérias-primas com baixa umidade e alta resistência térmica, o que limita sua aplicabilidade. Outro entrave é o elevado custo dos equipamentos e sua manutenção, o que pode inviabilizar seu uso em determinadas escalas produtivas (XUE et al., 2025).

De modo geral, um filme comestível ideal deve apresentar propriedades como não toxicidade, boa resistência mecânica, estabilidade microbiológica, viabilidade econômica e capacidade de atuar como sistema de liberação de compostos bioativos. Os avanços recentes têm buscado aprimorar características como propriedades mecânicas, ópticas, resistência à água e flexibilidade, ampliando o potencial de uso desses materiais como matrizes funcionais (KONG et al., 2024; KUMAR et al., 2022).

As aplicações tecnológicas desses filmes e revestimentos comestíveis têm sido relatadas em frutas, carnes, alimentos minimamente processados e outras preparações alimentícias onde atuam não apenas como barreira física, mas também como suporte funcional para extensão de vida útil e melhoria nutricional (USMAN, 2025).

1.7 Filmes como veículo para compostos bioativos

As embalagens inteligentes, de forma geral, têm a função de monitorar a vida útil dos alimentos com base em alterações químicas, reações enzimáticas e atividades microbianas, por meio da inclusão de componentes como indicadores, sensores ou etiquetas RFID (*Radio Frequency Identification*) (SEJANI & DHAMSANIYA, 2021). Por outro lado, as embalagens ativas são aquelas que contêm compostos ativos capazes de interagir diretamente com os alimentos, podendo contribuir para prolongar sua vida útil, prevenir contaminações e até melhorar sua qualidade nutricional (BARBOSA et al., 2021).

Os filmes podem funcionar como veículos para biomoléculas com funções ativas ou inteligentes. Os chamados filmes ativos, além de oferecerem proteção passiva, também atuam no transporte de compostos bioativos relevantes para a saúde humana, com isso, OLIVEIRA FILHO & EGEEA (2022) propuseram a definição destes como “filmes comestíveis funcionais”. Uma de suas principais vantagens é a capacidade de transportar os compostos ativos de maneira estável pelo trato gastrointestinal (TGI), permitindo que alcancem o intestino, onde podem se fixar na mucosa epitelial e, posteriormente, serem absorvidos pelo sistema linfático.

Os compostos bioativos também podem ser veiculados por meio de filmes de desintegração oral (FDOs), uma forma alternativa de administração já adotada pela indústria farmacêutica para entrega de nutrientes e fármacos (COSTA et al., 2025; PALEZI et al., 2023). MACIEL et al. (2021) desenvolveram e caracterizaram um FDO à base de carboximetilcelulose para administração oral de ferro de origem natural. Já ECKERMANN et al. (2025) desenvolveram e avaliaram filmes poliméricos mucoadesivos para a entrega local dos probióticos *Lactobacillus rhamnosus* e *Limosilactobacillus reuteri*, visando à promoção da saúde bucal.

Esses filmes se destacam por sua aplicabilidade em populações específicas, como crianças, idosos e pacientes com disfagia, sendo considerados uma alternativa promissora inclusive para formulações vacinais (PACHECO et al., 2021). Sua estrutura flexível, a facilidade de inserção na cavidade oral e a rápida desintegração tornam os FDOs mais convenientes do que formas tradicionais de administração, como comprimidos e cápsulas (GARCIA et al., 2020).

MCHUGH et al. (1996) foram os primeiros a explorar o uso de polpa de fruta na composição de filmes comestíveis, desenvolvendo filmes contendo purês de pêssego, pêra, damasco e maçã e verificaram que a inclusão das frutas não só agregou sensorialmente, mas melhorou a qualidade e a vida útil dos alimentos. Com isso, o potencial do uso de polpas, extratos, sucos e purês de frutas tem sido amplamente investigado nos últimos anos a citar-se com polpa de mangaba (DE OLIVEIRA FILHO et al., 2023), frutas tropicais (KUPERVASER et al., 2023), polpa de juá (LEANDRO et al., 2021), purê de mamão (RANGEL-MARRÓN et al., 2019), e purê de manga e goiaba (VIANA et al., 2018).

Além de frutas, outros vegetais também têm sido explorados. TRIANTI et al. (2024) desenvolveram e caracterizaram um filme que denominaram “Salada Grega”, constituído de purê de tomate, suco de pepino, pimentão, cebola, óleo de orégano e pectina de maçã, com ou

sem azeite de oliva e goma guar. O estudo obteve altas pontuações na avaliação sensorial, e as propriedades físicas e mecânicas demonstraram viabilidade no desenvolvimento desse filme.

Filmes comestíveis produzidos a partir de frutas e vegetais apresentam vantagens significativas em relação àqueles feitos exclusivamente com um único tipo de biomacromolécula comestível. Esses filmes preservam, em grande parte, os nutrientes, antioxidantes e outros compostos benéficos da matéria-prima, promovendo benefícios à saúde do consumidor (OTONI et al., 2017).

Além disso, os filmes e revestimentos comestíveis podem ser utilizados como veículo para carrear micro-organismos probióticos em alimentos, agregando tanto nutricionalmente como atuando na conservação do alimento revestido (SOUKOULIS et al., 2014). No desenvolvimento de filmes ou revestimentos comestíveis com probióticos, o ponto crítico é manter a viabilidade do microrganismo ao longo de toda a produção, independentemente do método (ZOGHI et al., 2020). Com isso, ao selecionar os métodos de produção de filmes ou coberturas comestíveis, é necessário considerar os parâmetros que podem afetar a viabilidade dos probióticos, tais como temperaturas altas ou baixas, pH ácido e alcalino, estresse oxidativo, alta pressão hidrostática e pressão osmótica (MBYE et al., 2020).

Adicionar componentes bioativos na matriz polimérica pode auxiliar na viabilidade do micro-organismo probiótico. Pesquisadores têm investigado a inclusão de probióticos em diferentes matrizes poliméricas, obtendo resultados promissores. No entanto, ainda é necessário aprofundar os estudos para otimizar as matrizes de biopolímeros, melhorar a viabilidade e estabilidade de bactérias probióticas e explorar os efeitos sinérgicos da combinação de diferentes componentes (SILVA et al., 2023).

Também é preciso considerar que a adição de probióticos nos revestimentos pode acarretar alterações entre os componentes da matriz biopolimérica, afetando sua estrutura, propriedades físicas e mecânicas (SAEZ-ORVIZ et al., 2023) e, por isso, deve ser previamente estudada.

1.8 O uso de filmes comestíveis na transição para embalagens sustentáveis

As embalagens de alimentos são projetadas para abranger todas as etapas do ciclo produtivo, incluindo o processamento, transporte, distribuição, comercialização, proteção e conservação dos alimentos. Seu propósito é atender simultaneamente às exigências da indústria e às preferências dos consumidores. Entre suas principais funções, destacam-se a garantia da segurança de alimentos, a proteção contra contaminantes externos e a execução dessas tarefas

de maneira econômica e eficiente (OUN et al., 2022). Além de oferecer proteção, a embalagem também desempenha um papel crucial na prevenção de adulterações e no aumento da rastreabilidade do produto, garantindo maior segurança e confiabilidade para consumidores e fabricantes (ABDULLAH et al., 2022)

Vidro, metal, papel, plástico e polímeros laminados são comumente utilizados como materiais de embalagem (DÍAZ-MONTES & CASTRO-MUÑOZ, 2021). De forma geral, as embalagens tradicionais são compostas por materiais descartáveis, como plásticos de uso único, que não possuem características biodegradáveis ou recicláveis. Esses materiais representam cerca de 42% dos resíduos de embalagens gerados globalmente (GEYER et al., 2017).

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais tem impulsionado uma transição gradual para o uso de materiais alternativos aos polímeros de origem petroquímica (KUMAR et al., 2022). Contudo, a produção global de plásticos continua a demonstrar uma trajetória de crescimento, tendo alcançado 413,8 milhões de toneladas em 2023, conforme relatório da PLASTICS EUROPE (2024). Este cenário evidencia que, apesar dos avanços no desenvolvimento de novos materiais, os plásticos de fontes fósseis ainda representam a maior fração da produção mundial, conforme ilustra a Figura 4, que detalha o volume produtivo de plásticos no período de 2018 a 2023, segmentado entre as categorias de origem fóssil, reciclados e de matéria-prima biológica.

Neste contexto, definem-se como plásticos de matéria-prima biológica aqueles polímeros fabricados a partir de biomassa renovável, o que exclui formação geológica e/ou fossilizada. As fontes de biomassa podem ser oriundas de culturas agrícolas de primeira geração ou subprodutos agrícolas, como resíduos agroindustriais e óleos de cozinha residuais (PLASTICS EUROPE, 2024).

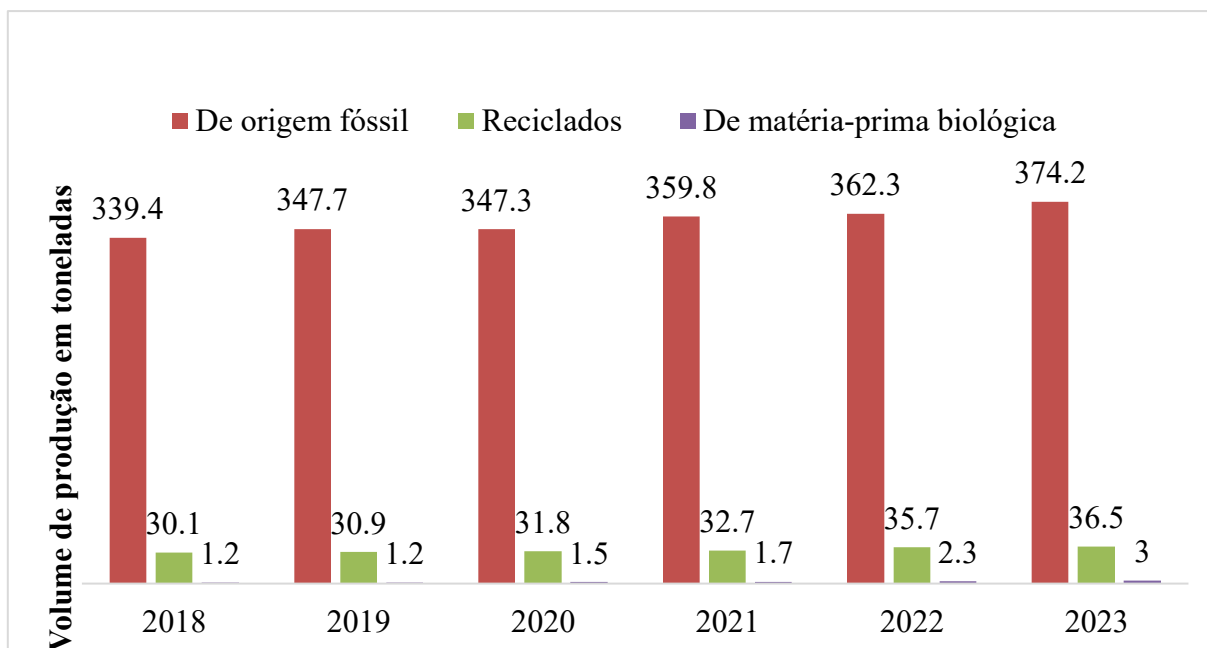


Figura 4 – Dados de produção global de plástico entre os anos de 2018 e 2023. (PLASTICS EUROPE, 2024).

Segundo a ONU, as embalagens plásticas representam cerca de 40% da produção global de plásticos (ASSOCIATED PRESS, 2024). Elas representam uma das categorias mais desafiadoras entre os resíduos plásticos, principalmente por serem, em sua maioria, projetadas para uso único e breve (CIEL, 2019).

No caso das embalagens alimentícias, a reciclagem é ainda mais limitada, tanto pela complexidade dos materiais quanto pelo risco de contaminação, o que inviabiliza seu reaproveitamento (PRATA et al., 2020), com isso, a preocupação ambiental tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de embalagens à base de plantas, alinhados às exigências da economia circular (KUMAR et al., 2022).

Dentre as alternativas mais promissoras, destacam-se os filmes e revestimentos comestíveis, que não apenas eliminam o resíduo pós-consumo, mas podem agregar valor ao alimento (RIBEIRO et al., 2024). Além dos aspectos econômicos e tecnológicos, a substituição de embalagens plásticas pelas películas comestíveis também atende a compromissos globais de sustentabilidade, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, principalmente os ODS 12, que trata sobre consumo e produção responsáveis (NAÇÕES UNIDAS DO BRASIL, 2025).

A regulamentação de materiais para embalagens em contato com alimentos no Brasil é de competência da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Duas normativas principais se aplicam: a RDC nº 91, de 11 de maio de 2001, que obriga a avaliação toxicológica

de seus componentes para prevenir migrações que afetem a segurança do alimento; e a Resolução nº 105, de 19 de maio de 1999, que define a lista de substâncias permitidas, principalmente em embalagens plásticas. Diante disso, e na ausência de uma legislação específica para filmes comestíveis, entende-se que os ingredientes de sua formulação devam ser previamente aprovados em listas positivas ou ter seu uso seguro comprovado, de modo a garantir a inocuidade e a proteção do consumidor contra riscos toxicológicos. (BRASIL, 2001; BRASIL, 1999).

Sobre os filmes e revestimentos comestíveis, é necessário ainda superar desafios relacionados à produção e aos custos. TASSINARI et al. (2023) realizaram uma avaliação econômica da produção de um filme à base de resíduos agroindustriais e observaram que, para essa embalagem de origem biológica, o custo variava entre 9,7 e 37,2 euros por quilograma. O estudo indicou que o ponto de equilíbrio do investimento poderia ser alcançado em quatro anos. Em comparação, o preço do plástico de origem fóssil varia entre 1 e 1,5 euro por quilograma, o que torna o filme biológico pouco atrativo para a indústria. Ainda assim, pesquisas adicionais podem contribuir para a viabilidade econômica dessa alternativa ao longo do tempo.

1.9 Conclusões e perspectivas

O mirtilo é uma fruta reconhecida por sua elevada qualidade nutricional, especialmente devido ao alto teor de flavonoides e atividades biológicas comprovadas. No entanto, sua alta umidade o torna altamente perecível com pequena vida útil para a comercialização. A incorporação de mirtilos em filmes ou revestimentos comestíveis permite prolongar a utilização de suas qualidades nutricionais de forma mais duradoura e eficaz.

Nesse contexto, o desenvolvimento de um filme comestível contendo mirtilo e microrganismos probióticos representa uma proposta inovadora, atuando como um veículo de compostos bioativos. No entanto, para viabilizar essa aplicação, é fundamental aprofundar os estudos sobre as interações entre os componentes da matriz polimérica, a estabilidade dos compostos bioativos ao longo do tempo e os parâmetros necessários à produção em escala industrial.

Considerando a crescente demanda por soluções ambientalmente sustentáveis, os filmes e revestimentos comestíveis destacam-se como alternativas viáveis à substituição das embalagens plásticas convencionais. Ainda assim, sua implementação em larga escala depende de avanços científicos e tecnológicos, bem como de investimentos que permitam superar os

desafios relacionados à viabilidade econômica, à estabilidade dos ingredientes e à adequação às exigências regulatórias.

1.10 Referências

- AAYUSH, Krishna et al. Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed Apple. **Food Control**, v. 141, p. 109188, 2022.
- ABDULLAH et al. Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 1000116, 2022.
- ANTAL, Tamás. The effect of refrigeration and room temperature storage conditions on the physico-chemical characteristics of hybrid and freeze-dried blueberries. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 16, p. 101083, 2024.
- ANTUNES, Luís Eduardo Corrêa et al. Cultivares de mirtilos para produção em vasos. 2023.
- ASHIQUE, Sumel et al. Blueberries in focus: Exploring the phytochemical potentials and therapeutic applications. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101300, 2024.
- ASPRI, Maria; PAPADEMÁS, Photis; TSALTAS, Dimitrios. Review on non-dairy probiotics and their use in non-dairy based products. **Fermentation**, v. 6, n. 1, p. 30, 2020.
- ASSOCIATED PRESS NEWS. What to know about the plastic pollution crisis as treaty talks conclude in South Korea: Associated Press, 2024. Disponível em: <https://apnews.com/article/plastic-pollution-crisis-treaty-south-korea-631960e4375aeec46517133348635a7d>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- AREVSTRÖM, Lilith et al. Freeze-dried bilberry (*Vaccinium myrtillus*) dietary supplement improves walking distance and lipids after myocardial infarction: an open-label randomized clinical trial. **Nutrition research**, v. 62, p. 13-22, 2019.
- BAMBACE, María F.; ALVAREZ, María V.; MOREIRA, María R. Ready-to-eat blueberries as fruit-based alternative to deliver probiotic microorganisms and prebiotic compounds. **LWT**, v. 142, p. 111009, 2021.
- BARAJAS-ALVAREZ, Paloma; GONZALEZ-AVILA, Marisela; ESPINOSA-ANDREWS, Hugo. Microencapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* HN001 by spray drying and its evaluation under gastrointestinal and storage conditions. **LWT**, v. 153, p. 112485, 2022.
- BARBOSA, Cássia H. et al. Embalagens comestíveis ativas. **Enciclopédia**, v. 1, n. 2, p. 360-370, 2021.
- BASU, Arpita et al. Dietary blueberry and soluble fiber supplementation reduces risk of gestational diabetes in women with obesity in a randomized controlled trial. **The Journal of nutrition**, v. 151, n. 5, p. 1128-1138, 2021.
- BELYAMANI, Imane; PROCHAZKA, Frederic; ASSEZAT, Gilles. Production and characterization of sodium caseinate edible films made by blown-film extrusion. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 39-47, 2014.

BENSON, Sven et al. Amplified gut feelings under inflammation and depressed mood: a randomized fMRI trial on interoceptive pain in healthy volunteers. **Brain, Behavior, and Immunity**, v. 112, p. 132-137, 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 241, de 26 de julho de 2018. Dispõe sobre os requisitos para comprovação dos benefícios à saúde dos probióticos para uso em alimentos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 27 jul. 2018. Atualizada pela RDC nº 839, de 14 de dezembro de 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 91, de 11 de maio de 2001. Dispõe sobre a avaliação toxicológica de materiais em contato com alimentos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 14 maio 2001. Disponível em: <https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RDC&numeroAto=00000091&valorAno=2001>. Acesso em: 19 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RE nº 105, de 19 de maio de 1999. Estabelece a lista positiva de substâncias permitidas para materiais plásticos em contato com alimentos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 20 maio 1999. Disponível em: <https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RES&numeroAto=00000105&valorAno=1999>. Acesso em: 19 jul. 2025.

BURTON-FREEMAN, Britt et al. A selective role of dietary anthocyanins and flavan-3-ols in reducing the risk of type 2 diabetes mellitus: a review of recent evidence. **Nutrients**, v. 11, n. 4, p. 841, 2019.

CALDERÓN-OLIVER, Mariel; PONCE-ALQUICIRA, Edith. The role of microencapsulation in food application. **Molecules**, v. 27, n. 5, p. 1499, 2022.

CAPURSO, Lucio. Thirty years of *Lactobacillus rhamnosus* GG: a review. **Journal of clinical gastroenterology**, v. 53, p. S1-S41, 2019.

CARVALHO, Marina Fernandes et al. Blueberry intervention improves metabolic syndrome risk factors: systematic review and meta-analysis. **Nutrition Research**, v. 91, p. 67-80, 2021.

CENTER FOR INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL LAW. Plastic & Climate: The hidden costs of a plastic planet. Washington, DC: CIEL, 2019. Disponível em: <https://www.ciel.org/plasticandclimate>. Acesso em: 14 jul. 2025.

CEYLAN, Huriye Gözde; ATASOY, Ahmet Ferit. New bioactive edible packing systems: synbiotic edible films/coatings as carriers of probiotics and prebiotics. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, n. 7, p. 1413-1428, 2023.

CHENG, Yue et al. Low temperature extrusion blown ϵ -polylysine hydrochloride-loaded starch/gelatin edible antimicrobial films. **Carbohydrate Polymers**, v. 278, p. 118990, 2022.

CHENG, Yuxin et al. Fermented blueberry pomace with antioxidant properties improves fecal microbiota community structure and short chain fatty acids production in an in vitro mode. **Lwt**, v. 125, p. 109260, 2020.

CHOUDHURY, Nitamani et.al. Microencapsulation: an overview on concepts, methods, properties and applications in foods. **Food Frontiers**, v. 2, n. 4, p. 426-442, 2021.

COLAUTTI, Andrea et al. Safety traits, genetic and technological characterization of *Lactocaseibacillus rhamnosus* strains. **LWT**, v. 207, p. 116578, 2024.

COSTA, Bianca S. et al. Pectin orally disintegrating films containing jambolan juice (*Syzygium cumini*) and ginger: Functional properties. **Industrial Crops and Products**, v. 226, p. 120590, 2025.

CURTIS, Peter J. et al. Blueberry anthocyanin intake attenuates the postprandial cardiometabolic effect of an energy-dense food challenge: Results from a double blind, randomized controlled trial in metabolic syndrome participants. **Clinical Nutrition**, v. 41, n. 1, p. 165-176, 2022.

CURTIS, Peter J. et al. Blueberries improve biomarkers of cardiometabolic function in participants with metabolic syndrome—results from a 6-month, double-blind, randomized controlled trial. **The American journal of clinical nutrition**, v. 109, n. 6, p. 1535-1545, 2019.

DE OLIVEIRA, Izamara et al. Development of bioactive edible coatings enriched with extracts of celery and banana inflorescence for the preservation of persimmons. **Food Research International**, p. 116608, 2025.

DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves et al. Next-generation food packaging: Edible bioactive films with alginate, mangaba pulp (*Hancornia speciosa*), and *Saccharomyces boulardii*. **Food Bioscience**, v. 54, p. 102799, 2023.

DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves et al. The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. **Food Research International**, v. 142, p. 110202, 2021.

DE SOUZA, Evandro Leite et al. Potential interactions among phenolic compounds and probiotics for mutual boosting of their health-promoting properties and food functionalities—A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 59, n. 10, p. 1645-1659, 2019.

DÍAZ-ÁLVAREZ, R. et al. Effect of high-voltage electrical discharge (HVED) at high frequency on vacuum freeze-drying time and physicochemical properties of blueberries. **Journal of Food Engineering**, v. 365, p. 111815, 2024.

DÍAZ-MONTES, Elsa; CASTRO-MUÑOZ, Roberto. Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 249, 2021.

DORON, Shira; SNYDMAN, David R.; GORBACH, Sherwood L. *Lactobacillus* GG: bacteriology and clinical applications. *Gastroenterology Clinics*, v. 34, n. 3, p. 483-498, 2005.

DUAN, Yumin et al. Apple orchard waste recycling and valorization of valuable product—A review. **Bioengineered**, v. 12, n. 1, p. 476-495, 2021.

DUAN, Yumin et al. Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review. **International Journal of Food Microbiology**, p. 109890, 2022.

ECKERMANN, Charlotte et al. Probiotics-Embedded Polymer Films for Oral Health: Development, Characterization, and Therapeutic Potential. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, p. 114886, 2025.

FALL CREEK. **Zero Chill**: Biloxi. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.fallcreeknursery.com/commercial-fruit-growers/varieties/biloxi>. Acesso em: 18 jun. 2023.

FAO/WHO WORKING GROUP et al. Guidelines for the evaluation of probiotics in food: report of a joint FAO/WHO working group on drafting guidelines for the evaluation of probiotics in food. **World Health Organization and Food and Agriculture organization of the United Nations, Rome, Italy**, 2002.

FELGUS-LAVEFVE, Laura et al. The effects of blueberry phytochemicals on cell models of inflammation and oxidative stress. **Advances in Nutrition**, v. 13, n. 4, p. 1279-1309, 2022.

FENG, Liyuan et al. Physicochemical and rheological characterization of pectin-rich fraction from blueberry (*Vaccinium ashei*) wine pomace. **International journal of biological macromolecules**, v. 128, p. 629-637, 2019.

FERREIRA DA SILVA, Carlos Vinicius et al. Prospecting Specific Protein Patterns for High Body Mass Index (BMI), Metabolic Syndrome and Type 2 Diabetes in Saliva and Blood Plasma From a Brazilian Population. **PROTEOMICS–Clinical Applications**, v. 18, n. 6, p. e202300238, 2024.

FU, Xizhe et al. Natural deep eutectic solvent enhanced pulse-ultrasonication assisted extraction as a multi-stability protective and efficient green strategy to extract anthocyanin from blueberry pomace. **LWT**, v. 144, p. 111220, 2021.

GARCIA, VA DOS S et al. Orally disintegrating films of biopolymers for drug delivery. **Biopolymer Membranes and Films**, p. 289-307, 2020.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GHASEMIAN, Abdolmajid et al. Probiotics and their increasing importance in human health and infection control. **Reviews and Research in Medical Microbiology**, v. 29, n. 4, p. 153-158, 2018.

GRUNDY, Scott M. Metabolic syndrome pandemic. **Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology**, v. 28, n. 4, p. 629-636, 2008.

GUPTA, Divyanshu et al. Plant based edible films and coatings for food packaging applications: Recent advances, applications, and trends. **Sustainable Food Technology**, 2024.

HELLSTRÖM, Jarkko et al. Phenolic profiles differentiate wild bilberry and cultivated blueberry fruit. **LWT**, v. 199, p. 116080, 2024.

HODGES, Joanna K. et al. Moderate consumption of freeze-dried blueberry powder increased net bone calcium retention compared with no treatment in healthy postmenopausal women: a

randomized crossover trial. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 118, n. 2, p. 382-390, 2023.

HORASAN SAGBASAN, Buket et al. Inulin and freeze-dried blueberry intervention lead to changes in the microbiota and metabolites within in vitro studies and in cognitive function within a small pilot trial on healthy children. **Microorganisms**, v. 12, n. 7, p. 1501, 2024.

HUI, X. et al. Bioactive compounds from blueberry and blackcurrant powder alter the physicochemical and hypoglycaemic properties of oat bran paste. **Lwt**, 143 (September 2020), 111167 [em linha]. 2021.

ISAPP. Minimum Criteria for Probiotics [Online]. 2018.

JOHNSON, Sarah A. et al. Effects of daily blueberry consumption on circulating biomarkers of oxidative stress, inflammation, and antioxidant defense in postmenopausal women with pre- and stage 1-hypertension: a randomized controlled trial. **Food & function**, v. 8, n. 1, p. 372-380, 2017.

KALT, Wilhelmina et al. Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins. **Advances in nutrition**, v. 11, n. 2, p. 224-236, 2020.

KIM, Ah-Na et al. Thermal processing under oxygen-free condition of blueberry puree: Effect on anthocyanin, ascorbic acid, antioxidant activity, and enzyme activities. **Food Chemistry**, v. 342, p. 128345, 2021.

KONG, Peifu; ROSNAN, Shalida Mohd; ENOMAE, Toshiharu. Carboxymethyl cellulose-chitosan edible films for food packaging: A review of recent advances. **Carbohydrate Polymers**, p. 122612, 2024.

KRIKORIAN, Robert et al. Blueberry supplementation in midlife for dementia risk reduction. **Nutrients**, v. 14, n. 8, p. 1619, 2022.

KUPERVASER, María Gabriela et al. Trends in starch-based edible films and coatings enriched with tropical fruits extracts: A review. **Food Hydrocolloids for Health**, v. 4, p. 100138, 2023.

KUMAR, Lokesh et al. Edible films and coatings for food packaging applications: A review. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-26, 2022.

KUNTZ, Sabine et al. Anthocyanins from fruit juices improve the antioxidant status of healthy young female volunteers without affecting anti-inflammatory parameters: results from the randomised, double-blind, placebo-controlled, cross-over ANTHONIA (ANTHOcyanins in Nutrition Investigation Alliance) study. **British Journal of Nutrition**, v. 112, n. 6, p. 925-936, 2014.

LEANDRO, Giliel Rodrigues et al. Quality and safety of the Coalho cheese using a new edible coating based on the Ziziphus joazeiro fruit pulp. **Future Foods**, v. 4, p. 100089, 2021.

LI, Z. et al. Global burden of dementia death from 1990 to 2019, with projections to 2050: an analysis of 2019 global burden of disease study. **The journal of prevention of Alzheimer's disease**, v. 11, n. 4, p. 1013-1021, 2024.

LI, Gaobin et al. Effects of preparation method on properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) films. **Food Science and Biotechnology**, v. 24, n. 5, p. 1679-1685, 2015.

LIMA, Firmino Nunes de. Cultivo do mirtilheiro'Biloxi'em função de fertirrigação nitrogenada e substratos. 2021.

LIN, Yi-Hsuan et al. Changes in metabolic syndrome affect the health-related quality of life of community-dwelling adults. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 20267, 2021.

LIOVIĆ, Nikolina et al. The effect of freeze-drying, pasteurisation and high-intensity ultrasound on gastrointestinal stability and antioxidant activity of blueberry phenolics. **International journal of food science & technology**, v. 56, n. 4, p. 1996-2008, 2021.

LISITSYN, Andrey et al. Approaches in animal proteins and natural polysaccharides application for food packaging: Edible film production and quality estimation. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1592, 2021.

LIU, Kexin; CHEN, Bing. Blueberry Bioactives in Metabolic Syndrome. **The Journal of Nutrition**, [S. l.], 2025.

LU, Jingzhu et al. Novel probiotic fermented edible film based on gum arabic/whey protein isolate/isomalt/glycerol incorporated with *Lactobacillus rhamnosus*: Physical, antibacterial, and fresh pork preservation properties. **Food Hydrocolloids**, v. 161, p. 110875, 2025.

MA, Luyao et al. Molecular mechanism and health role of functional ingredients in blueberry for chronic disease in human beings. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 9, p. 2785, 2018.

MACIEL, Vinicius BV et al. Carboxymethyl cellulose-based orally disintegrating films enriched with natural plant extract for oral iron delivery. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 66, p. 102852, 2021.

MBYE, Mustapha et al. Updates on understanding of probiotic lactic acid bacteria responses to environmental stresses and highlights on proteomic analyses. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 3, p. 1110-1124, 2020.

MA, Xinbo et al. Blueberry anthocyanins ameliorate arsenic-induced cognitive impairment in rats: mitigating mitochondrial damage and dysregulation. **Phytomedicine**, v. 145, p. 157062, 2025.

MANOHARAN, Mohana Priya et al. Obesity and coronary artery disease: an updated systematic review 2022. **Cureus**, v. 14, n. 9, 2022.

MENG, Xiangyong; ZHANG, Min; ADHIKARI, Benu. Extending shelf-life of fresh-cut green peppers using pressurized argon treatment. **Postharvest biology and technology**, v. 71, p. 13-20, 2012.

MCHUGH, T. H.; HUXSOLL, Charles C.; KROCHTA, John M. Permeability properties of fruit puree edible films. **Journal of food science**, v. 61, n. 1, p. 88-91, 1996.

MUSTAFA, Ahmed M. et al. A new HPLC-MS/MS method for the simultaneous determination of 36 polyphenols in blueberry, strawberry and their commercial products and determination of antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 367, p. 130743, 2022.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 19 jul. 2025.

NEUENFELDT, Naiara Hennig et al. Effects of blueberry extract co-microencapsulation on the survival of *Lactobacillus rhamnosus*. **Lwt**, v. 155, p. 112886, 2022.

NIEMAN, David C. et al. Blueberry intake elevates post-exercise anti-inflammatory oxylipins: a randomized trial. **Scientific reports**, v. 13, n. 1, p. 11976, 2023.

NILSUWAN, Krisana et al. Properties of fish gelatin films containing epigallocatechin gallate fabricated by thermo-compression molding. *Food Hydrocolloids*, v. 97, p. 105236, 2019.

NTEMIRI, A. et al. Whole Blueberry and Isolated Polyphenol-Rich Fractions Modulate Specific Gut Microbes in an In Vitro Colon Model and in a Pilot Study in Human Consumers. **Nutrients**. 2020; 12: 2800.

OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves; EGEA, Mariana Buranelo. Edible bioactive film with curcumin: a potential “functional” packaging?. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 10, p. 5638, 2022.

ONUH, John O.; DAWKINS, Norma L.; ALUKO, Rotimi E. Cardiovascular disease protective properties of blueberry polyphenols (*Vaccinium corymbosum*): A concise review. **Food Production, Processing and Nutrition**, v. 5, n. 1, p. 27, 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.

OUN, Ahmed A. et al. Avanços recentes em filmes compostos à base de álcool polivinílico e suas aplicações em embalagens de alimentos. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 34, p. 100991, 2022.

OUWEHAND, Arthur C.; SAXELINS, Maija; SALMINEN, Seppo. Phenotypic differences between commercial *Lactobacillus rhamnosus* GG and *L. rhamnosus* strains recovered from blood. **Clinical infectious diseases**, v. 39, n. 12, p. 1858-1860, 2004.

PACHECO, Murilo Santos et al. A review on orally disintegrating films (ODFs) made from natural polymers such as pullulan, maltodextrin, starch, and others. **International journal of biological macromolecules**, v. 178, p. 504-513, 2021.

PALEZI, Simone Canabarro; FERNANDES, Sibeles Santos; MARTINS, Vilásia Guimarães. Oral disintegration films: applications and production methods. **Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 10, p. 2539-2548, 2023.

PALMA, Ximena; THOMAS-VALDÉS, Samanta; CRUZ, Gonzalo. Acute consumption of blueberries and short-term blueberry supplementation improve glucose management and insulin levels in sedentary subjects. **Nutrients**, v. 13, n. 5, p. 1458, 2021.

PARRA GÓMEZ, Laura Alejandra et al. Prevalência da Síndrome Metabólica na América Latina: Uma Revisão Sistemática e Meta-Análise de Estudos Observacionais. **Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews**, [s. l.], v. 2025, p. 103282, 2025.

PAWASE, Prashant Anil et al. Recent advances in cellulose, chitosan, and protein-based edible films for sustainable food packaging: A comprehensive review. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 146172, 2025.

PEI, Jinjin et al. A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 274, p. 133332, 2024.

PLASTICS EUROPE. Bio-based and biodegradable plastics. [S.l.]: **Plastics Europe**, [2024]. Disponível em: <https://plasticseurope.org/sustainability/climate/circular-feedstocks/bio-based-and-biodegradable-plastics/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

PLASTICS EUROPE. Plastics – the fast facts 2024. Brussels: **Plastics Europe**, 2024. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts/>. Acesso em: 13 jul. 2025.

PLAZA-DIAZ, J. et al. Mechanisms of action of probiotics. **Advances in Nutrition**. v. 10, p. S49–S66, 2019.

POP, Oana L. et al. Edible films and coatings functionalization by probiotic incorporation: A review. **Polymers**, v. 12, n. 1, p. 12, 2019.

PRAKASH, Ruby et al. Recent advances on biopolymeric plant-based edible coatings and films: Antimicrobial strategies for enhanced food safety. **Progress in Organic Coatings**, v. 208, p. 109482, 2025.

PRATA, Joana C. et al. COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. **Environmental science & technology**, v. 54, n. 13, p. 7760-7765, 2020.

RANGEL-MARRÓN, M. et al. Effects of alginate-glycerol-citric acid concentrations on selected physical, mechanical, and barrier properties of papaya puree-based edible films and coatings, as evaluated by response surface methodology. **Lwt**, v. 101, p. 83-91, 2019.

RIBEIRO, Isabela Sampaio et al. Sustainable innovations in edible films and coatings: An overview. **Trends in Food Science & Technology**, v. 143, p. 104272, 2024.

ROUSSEAU, Michèle et al. An 8-week freeze-dried blueberry supplement impacts immune-related pathways: a randomized, double-blind placebo-controlled trial. **Genes & Nutrition**, v. 16, n. 1, p. 7, 2021.

SÁEZ-ORVIZ, S.; RENDUELES, M.; DÍAZ, M. Impact of adding prebiotics and probiotics on the characteristics of edible films and coatings-a review. **Food Research International**, p. 112381, 2023.

SANTOS, Newton Carlos et al. Microencapsulating *Lactobacillus rhamnosus* GG by spray drying using pea protein, pectin, and tapioca flour: Probiotic viability, digestibility and thermal stability. **Food and Bioproducts Processing**, v. 150, p. 207-216, 2025.

SATER, Haley et al. Exploring environmental and storage factors affecting sensory, physical and chemical attributes of six southern highbush blueberry cultivars. **Scientia Horticulturae**, v. 289, p. 110468, 2021.

SCHUCH, Márcia Wulff; TOMAZ, Zeni Fonseca Pinto. Advances in the spread of vegetative blueberry. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, n. 1, p. e-041, 2019.

SEGBERS, Marijke E.; LEBEER, Sarah. Towards a better understanding of *Lactobacillus rhamnosus* GG-host interactions. **Microbial cell factories**, v. 13, n. 1, p. 1-16, 2014.

SEJANI, V. M.; DHAMSANIYA, N. K. Intelligent Packaging for Food: A Review. **Chem. Sci. Rev. Lett.**, v. 10, p. 466-477, 2021.

SHAO, Xinxin et al. Neuroprotective effects of blueberry anthocyanins against perfluorooctanoic sulfonate on planarian *Dugesia japonica*. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 175, p. 39-47, 2019.

SILVA, Sofia PM; TEIXEIRA, José A.; SILVA, Célia CG. Recent advances in the use of edible films and coatings with probiotic and bacteriocin-producing lactic acid bacteria. **Food Bioscience**, p. 103196, 2023.

SISTEMA FAEG. Produtor de Cristalina tem boa produção de mirtilo com ATeG do Senar Goiás. *In: Notícias*. [S. l.]: SISTEMA FAEG, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://sistemafaeg.com.br/noticias/produtor-de-cristalina-tem-boa-producao-de-mirtilo-com-ateg-do-senar-goias>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVA, Sérgio HG et al. Avanço na caracterização nutricional foliar de variedades de mirtilo adaptadas a climas quentes, aprimorada por sensoriamento proximal. **AgriEngineering**, v. 6, n. 3, p. 3187, 2024.

SOUKOULIS, Christos et al. Probiotic edible films as a new strategy for developing functional bakery products: The case of pan bread. **Food Hydrocolloids**, v. 39, p. 231-242, 2014.

STARR, Kathryn N. Porter et al. Effects of Blueberry Consumption and Exercise on Gut Microbiome Composition in a Randomized Controlled Trial of Sedentary Older Adults With Overweight or Obesity. **Current Developments in Nutrition**, v. 8, 2024.

- STOTE, Kim et al. Effect of Blueberry Consumption on Mood States in Men With Type 2 Diabetes. **Current Developments in Nutrition**, v. 5, p. 371, 2021.
- SUHAG, Rajat et al. Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. **Food Research International**, v. 136, p. 109582, 2020.
- SUN, Yanan; ZHANG, Min; MUJUMDAR, Arun. Berry drying: Mechanism, pretreatment, drying technology, nutrient preservation, and mathematical models. **Food Engineering Reviews**, v. 11, p. 61-77, 2019.
- SWARUP, Supreeya et al. Metabolic syndrome. In: **StatPearls [internet]**. StatPearls Publishing, 2024.
- TASSINARI, Gianmaria et al. Do biodegradable food packaging films from agro-food waste pay off? A cost-benefit analysis in the context of Europe. **Science of the Total Environment**, v. 856, p. 159101, 2023.
- TRIANI, Myrto et al. Development and characterization of “Greek Salad” edible films. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 46, p. 101378, 2024.
- TUCCI, Massimiliano et al. A serving of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) improves peripheral vascular function but not metabolic and functional markers in older subjects: A randomized, controlled, crossover study. **Food Research International**, v. 197, p. 115189, 2024.
- USMAN, Ifrah et al. Recent Progress in Edible Films and Coatings: Toward Green and Sustainable Food Packaging Technologies. **Applied Food Research**, p. 101070, 2025.
- VIANA, Rayra Melo et al. Nanofibrillated bacterial cellulose and pectin edible films added with fruit purees. **Carbohydrate Polymers**, v. 196, p. 27-32, 2018.
- WAGHMARE, Roji et al. Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovative approach for the retention of nutraceutical quality in foods. **Food chemistry**, v. 404, p. 134571, 2023.
- WANG, Jiayi et al. Shellac-based films/coatings: Progress, applications and future trends in the field of food packaging. **Food Chemistry**, v. 467, p. 142326, 2025.
- WANG, Yueyue et al. Effects of blueberry consumption on cardiovascular health in healthy adults: a cross-over randomised controlled trial. **Nutrients**, v. 14, n. 13, p. 2562, 2022.
- WANG, Helen H. et al. Novel insights into the pathogenesis and management of the metabolic syndrome. **Pediatric gastroenterology, hepatology & nutrition**, v. 23, n. 3, p. 189, 2020.
- WILDER-SMITH, Clive H.; MATERNA, Andrea; OLESEN, Søren S. Blueberries improve abdominal symptoms, well-being and functioning in patients with functional gastrointestinal disorders. **Nutrients**, v. 15, n. 10, p. 2396, 2023.

WOOD, Eleanor et al. Wild blueberry (poly) phenols can improve vascular function and cognitive performance in healthy older individuals: a double-blind randomized controlled trial. **The American journal of clinical nutrition**, v. 117, n. 6, p. 1306-1319, 2023.

WOOLF, Emily K. et al. Daily blueberry consumption for 12 weeks improves endothelial function in postmenopausal women with above-normal blood pressure through reductions in oxidative stress: a randomized controlled trial. **Food & function**, v. 14, n. 6, p. 2621-2641, 2023.

WU, Yaqiong et al. Known and potential health benefits and mechanisms of blueberry anthocyanins: A review. **Food Bioscience**, p. 103050, 2023.

XIE, Aijun et al. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 124784, 2023.

XUE, Hongkun et al. Insights into the preparation, properties, application in food of polysaccharide-based edible films and coatings: An updated overview. **Current Research in Food Science**, p. 101123, 2025.

ZENG, Fansen et al. Preparation of acylated blueberry anthocyanins through an enzymatic method in an aqueous/organic phase: Effects on their colour stability and pH-response characteristics. **Food & Function**, v. 12, n. 15, p. 6821-6829, 2021.

ZHANG, Dingning et al. The impact of glucose and lipid metabolic parameters in patients with metabolic syndrome on the treatment response of glioblastoma: A retrospective case-control study. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 18, n. 3, p. 101589, 2025.

ZHANG, Hua et al. Determination of free amino acids and 18 elements in freeze-dried strawberry and blueberry fruit using an Amino Acid Analyzer and ICP-MS with micro-wave digestion. **Food chemistry**, v. 147, p. 189-194, 2014.

ZHANG, Yachuan; REMPEL, Curtis; MCLAREN, Derek. Edible coating and film materials: Carbohydrates. **Innovations in food packaging**, p. 305-323, 2014.

ZHENG, Jinshui et al. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**, v. 70, n. 4, p. 2782-2858, 2020.

ZHOU, Li et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota. **Lwt**, v. 117, p. 108621, 2020.

ZOGHI, Alaleh; KHOSRAVI-DARANI, Kianoush; MOHAMMADI, Reza. Application of edible films containing probiotics in food products. **Journal of Consumer Protection and Food Safety**, v. 15, n. 4, p. 307-320, 2020.

ZIA, Mahrukh Parveez; ALIBAS, Ilknur. Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro bioaccessibility of blueberry fruits. **Food Bioscience**, v. 42, p. 101179, 2021.

CAPÍTULO 2

Filmes Comestíveis Bioativos à Base de Carboximetilcelulose Funcionalizados com Polpa de Mirtilo e *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG

Bárbara Nadinne Nepomoceno de Sousa, Josemar Gonçalves de Oliveira Filho, Tainara Leal de Sousa, Isabelly de Campos Cabassa, Mariana Buranelo Egea

Resumo

Filmes comestíveis representam alternativas promissoras para a promoção da saudabilidade, atuando como veículos de compostos bioativos. Este trabalho evidencia a viabilidade de integrar polpa de fruta e probióticos em materiais comestíveis, promovendo inovações no consumo de substâncias funcionais. O estudo desenvolveu e caracterizou filmes comestíveis à base de carboximetilcelulose (CMC), combinados com polpa de mirtilo (PM) e o probiótico *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (LGG). A adição de polpa de mirtilo promoveu alterações na coloração, tornando os filmes mais escuros com tonalidade arroxeada, além de aumentar a espessura, o teor de vitamina C e o conteúdo de antocianinas. Por outro lado, observou-se redução na umidade, solubilidade em água e na resistência mecânica, bem como aumento da permeabilidade ao vapor d'água, provavelmente em razão da formação de estruturas mais irregulares, confirmadas pelas micrografias. A análise por FTIR evidenciou a incorporação dos componentes na matriz polimérica. A termogravimetria indicou maior estabilidade térmica nas formulações com polpa de mirtilo. A incorporação do probiótico resultou em viabilidade entre 68,65 a 86,45% após a secagem, e estabilidade acima de 7 log UFC/g durante 45 dias a 4 °C, com desempenho inferior a 25 °C. Os resultados confirmam o potencial da formulação como matriz funcional, com propriedades tecnológicas e bioativas promissoras para aplicação na indústria de alimentos.

Palavras-chave:

Filmes, carboximetilcelulose, mirtilo, probiótico.

2.1 Introdução

A ciência tem buscado propor alternativas de embalagens mais favoráveis do ponto de vista ambiental. A utilização de filmes e revestimentos comestíveis e biodegradáveis surge como uma alternativa inovadora e ambientalmente promissora, ao mesmo tempo em que promove a segurança alimentar e pode contribuir para a saúde humana (KUPERVASER et al., 2023). Estes filmes são produzidos a partir de biopolímeros, como lipídios, proteínas e polissacarídeos de plantas, animais, organismos marinhos ou de subprodutos do processamento de alimentos (KUMAR et al., 2022).

Dentre os biopolímeros, a carboximetilcelulose (CMC) é uma das substâncias que têm se destacado no desenvolvimento de filmes comestíveis (HORINAKA et al., 2018). Trata-se de um polissacarídeo derivado da celulose, conhecido por suas excelentes características, como capacidade de formação de filmes, biodegradabilidade e ausência de componentes tóxicos (ROMÃO et al., 2022).

A aplicação de filmes comestíveis tem ganhado destaque não apenas como alternativa sustentável às embalagens plásticas convencionais, mas também como estratégia inovadora para veiculação de compostos bioativos com potencial benéfico à saúde humana. Esses sistemas, elaborados a partir de biopolímeros naturais, podem atuar como matrizes funcionais capazes de incorporar e proteger substâncias como vitaminas, compostos fenólicos, pigmentos naturais, peptídeos, minerais, prebióticos e probióticos (BRION-ESPINOZA et al., 2021). Nesse sentido, os filmes comestíveis funcionais surgem como uma abordagem promissora para associar tecnologia de alimentos e promoção da saúde. Oliveira Filho e Egea (2022) propuseram o termo “filmes comestíveis funcionais” para definir os filmes comestíveis capazes de proporcionar benefícios à saúde humana.

Nesse contexto, o mirtilo (*Vaccinium* spp.) se destaca como um ingrediente promissor para formulações bioativas, devido ao seu alto potencial nutricional (ZHAO et al., 2015), destacando-se pela presença de ácidos orgânicos, especialmente ácido cítrico (3158,39 µg/g), ácido málico (657,84 µg/g), ácido quínico (735,80 µg/g) e ácido ascórbico (285,20 µg/g). Além disso, possui antocianinas, com destaque para a delphinidina-3-galactosídeo e a malvidina-3-galactosídeo, que juntas representam 71,59% do total, com valores superiores a 425 µg/g (ZHANG et al., 2025).

Outra classe de compostos bioativos que tem sido muito estudado por fornecer benefícios à saúde humana são os probióticos. Os probióticos são definidos, desde 2014, pela

Associação Científica Internacional de Probióticos e Prebióticos (ISAPP), como microrganismos vivos que, quando administrados em quantidades adequadas, conferem um benefício à saúde do hospedeiro (HILL et al., 2014). Nos últimos anos, a incorporação de probióticos vivos em polímeros tem se destacado como uma tecnologia emergente no desenvolvimento de filmes comestíveis funcionais. Esses filmes atuam como veículos para probióticos, auxiliando na regulação de seu crescimento e migração, além de garantir viabilidade e eficácia mesmo em condições de estresse ambiental (PAULO et al., 2021).

Entre os probióticos, destaca-se o *Lactobacillus rhamnosus* GG (LGG), uma das espécies de lactobacilos mais estudadas e aplicadas, principalmente devido ao seu potencial comercial, industrial e de promoção da saúde (HILL et al., 2018). O LGG é comumente utilizado para auxiliar na saúde intestinal e estudos recentes demonstraram seu potencial na prevenção e tratamento da depressão (HASANNEJAD-BIBALAN et al., 2020) (FENG, 2024). Além disso, a combinação sinérgica de LGG com compostos fenólicos vegetais pode resultar em produtos nutricionais mais eficazes para a saúde intestinal (SIRESWAR et al., 2020).

A combinação de um probiótico com polpa de mirtilo (PM) para o desenvolvimento de um veículo de substâncias bioativas é uma estratégia interessante devido às propriedades únicas da polpa de mirtilo e aos benefícios associados aos probióticos. Esses compostos não apenas melhoram a funcionalidade do filme, mas também podem contribuir para a cor e o sabor característico do mirtilo, tornando o produto final mais atraente sensorialmente. A incorporação de probióticos adiciona um valor funcional ao filme, promovendo benefícios à saúde intestinal e fortalecendo o sistema imunológico. Portanto, essa combinação resulta em um material inovador, que une propriedades tecnológicas, sensoriais e bioativas, ideal para aplicações como embalagens primárias comestíveis e/ou filmes de desintegração oral.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar um filme comestível à base de CMC, contendo PM e o probiótico LGG, avaliando sua viabilidade, propriedades físico-químicas e potenciais aplicações funcionais.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Matéria-prima

A PM foi adquirida da empresa Liomel (LBR – Liofilizações do Brasil) em julho de 2024, pelo valor de R\$58,00/100g. A Tabela 3 indica as informações nutricionais fornecidas pelo fabricante. A cepa probiótica de LGG foi adquirida na forma liofilizada da empresa Coana

Importação e Exportação LTDA, pelo valor de R\$ 324,6/50g, contendo a contagem de 100 x 10⁹ CFU/g de produto. Os demais insumos utilizados em grau analítico.

Tabela 3 – Informações nutricionais fornecidas pelo fabricante da PM

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL		
Porção: 100 g		
	100 g	%VD*
Valor energético (kcal)	374	19
Carboidratos (g)	92	31
Açúcares totais (g)	77	
Açúcares adicionados (g)	0	0
Proteínas (g)	4,7	9
Gorduras totais (g)	2,1	3
Gorduras saturadas (g)	0,2	1
Gorduras trans (g)	0	0
Fibras alimentares (g)	15	60
Sódio (mg)	6,2	0
Vitamina C (mg)	61	61
Potássio (mg)	487	14

* Percentual de valores diários fornecidos pela porção.

Fonte: Liomel (2024).

2.2.2. Desenvolvimentos dos filmes comestíveis

Para o preparo dos filmes, primeiramente CMC (20g/L) foi solubilizada em água destilada sob agitação constante em 2000 rpm de velocidade utilizando um agitador mecânico de hélice (711S, Fisatom, São Paulo, Brasil) sob temperatura de 70°C, proveniente de uma chapa de aquecimento (TMA10C, Thelga, Dom Bosco, Brasil) (Figura 5.1). Após 40 minutos de agitação, adicionou-se o plastificante glicerol (Merk) (8 g/L) à mistura e manteve-se a agitação por mais 20 minutos sob aquecimento (Figura 5.2). Em seguida, PM foi adicionada conforme os tratamentos descritos na Tabela 4 e a mistura foi homogeneizada por 5 minutos utilizando um homogeneizador do tipo mixer (BMC350V, Britânia, Guangzhou, China) (Figura 5.3). Para garantir a viabilidade do probiótico, aguardou-se o resfriamento da solução até 25 °C e então foram adicionadas as cepas probióticas na forma liofilizada em quantidade suficiente

para atingir 9 log UFC/mL (Figura 5.4). 50 ml da solução foi transferida para placas de Petri de 9 cm de diâmetro e secas em estufa de circulação de ar (TE-394/2-MP, TECNAL, Piracicaba, Brasil) a 35°C por 20 horas (Figura 5.5). Quando secas, as amostras adquirem consistência de filme e então são retiradas das placas.



Figura 5. Esquema de produção de solução filmogênica, sendo (1) Mistura da carboximetilcelulose sob aquecimento, (2) Adição de glicerol, (3) Mistura de polpa de mirtilo liofilizado, (4) Adição de probiótico e (5) Adição da solução preparada em placas de petri. Fonte: A autora (2024).

Tabela 4 – Composição dos tratamentos analisados à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactiseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo liofilizada (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40)

	CMC (%)	Glicerol (%)	CP (%)	PM (%)
CMC	71,59	28,41	-	-
CMC/CP	59,63	23,85	16,51	-
CMC/CP/PM20	53,17	21,21	14,88	10,74
CMC/CP/PM30	50,52	20,16	14,14	15,18
CMC/CP/PM40	48,13	19,20	13,47	19,20

2.2.3. Avaliação morfológica

Para analisar a morfologia da superfície dos filmes produzidos e a dispersão dos compostos ativos incorporados à matriz polimérica, bem como avaliar os efeitos de seus constituintes e correlacioná-los com outras propriedades, foi realizada a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram micrografadas por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, JSM – 6610VL, Tóquio, Japão), equipado com EDS, Thermo

Scientific NSS Spectral Imaging. Para cada amostra, foram obtidas sequências de imagens com ampliações variando de 100 a 2500 vezes. A micrografia foi realizada com uma voltagem de aceleração de 2,5 kV.

2.2.4. Teor de umidade

A análise de umidade foi realizada segundo metodologia AOAC (2010). Amostras dos filmes, logo após a produção, foram cortadas na dimensão de 2 cm² e pesadas antes e depois de secar em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/2-MP, TECNAL, Piracicaba, Brasil) a 100 °C por 24 h. O conteúdo de umidade foi calculado utilizando a Equação 1.

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa inicial}} * 100 \quad (1)$$

2.2.5. Solubilidade em água

A solubilidade em água foi realizada de acordo com a metodologia descrita por GONTARD et al. (1994). Foram cortadas amostras de filme em 2 cm² e secas a 100 ± 5 °C por 24 horas para obter a massa inicial. As amostras secas foram embebidas em 50 mL de água destilada e após 24 horas foram secas novamente a 100 ± 5 °C por 24 horas para obter a massa seca final.

A solubilidade em água foi calculada usando a Equação 2:

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa inicial}} \times 100 \quad (2)$$

2.2.6. Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes obtidos foi determinada por meio de uma adaptação do método gravimétrico (ASTM E96-92). Para isso, 6 mL de água destilada foram acrescentados em copos de fundo plano. Amostras circulares foram recortadas de cada filme e seladas nas bases dos copos, resultando em uma área efetiva de 28 cm² para cada filme. Os copos foram colocados em dessecadores mantidos a uma temperatura controlada de 40 °C, com umidade relativa interna de 50%. As pesagens dos copos foram realizadas a cada hora, ao longo de 34 horas, utilizando uma balança analítica. A PVA foi calculada com base na equação 10:

$$PVA = \frac{m}{t} \cdot \frac{x}{A\Delta p} \quad (3)$$

Sendo, PVA a permeabilidade ao vapor de água (g/ms·Pa), obtida a partir da variação de massa (m) devido à perda de vapor de água que atravessa o material polimérico com espessura (x) e área (A), durante o intervalo de tempo (t), sob uma diferença de pressão de vapor de água do meio interno para o externo (Δp).

2.2.7. Espessura

A espessura do filme foi determinada através da metodologia adaptada de AVILA-SOSA et al. (2010), utilizando um micrômetro digital portátil (XMSJ, ETOPOO, Shenzhen, China) com uma precisão de 0,001 mm. Foram realizadas doze repetições de medição para cada filme, e o valor médio da espessura foi calculado.

2.2.8. Propriedades Bioativas

2.2.8.1. Determinação do teor de antocianinas

A quantificação das antocianinas totais foi realizada pelo método do pH diferencial, conforme descrito na metodologia oficial AOAC 2005.02 (37.1.68), sendo aplicada a polpa de mirtilo e aos filmes bioativos desenvolvidos.

Para a análise, 1,0 g de amostra foi solubilizado em 25 mL de água destilada e mantidos em banho-maria a 55 °C por 10 minutos. Após esse período, o extrato foi filtrado e utilizado nas análises espectrofotométricas.

Em seguida, 0,2 mL do extrato foi adicionado a 4,8 mL das soluções tampão pH 1,0 e pH 4,5, obtendo-se dois sistemas: D_{pH1} e $D_{pH4,5}$. As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis nos comprimentos de onda de 520 nm e 700 nm.

A concentração de antocianinas totais foi calculada utilizando as Equações 4 e 5:

$$AT = \frac{A \times PM \times FD \times 10^3}{\epsilon} \quad (4)$$

$$A = [(A_{520} - A_{700})_{pH1,0}] - [(A_{520} - A_{700})_{pH4,5}] \quad (5)$$

Onde:

- AT é o teor total de antocianinas (mg/L), expresso como equivalente de cianidina-3-glicosídeo;
- A corresponde à diferença de absorvância;
- PM é o peso molecular da cianidina-3-glicosídeo (449,2 g/mol);
- FD é o fator de diluição (neste caso, 5,0 mL / 0,2 mL = 25);
- ϵ é o coeficiente de extinção molar da cianidina-3-glicosídeo (26.900 L·mol⁻¹·cm⁻¹);
- 10³ corresponde à conversão de gramas para miligramas.

O resultado obtido pela equação fornece a concentração de antocianinas na solução (mg/L). Para expressar os dados em função da massa do filme utilizado, os valores foram convertidos para mg de antocianinas por 100 g de filme ou polpa, conforme a equação 6, abaixo:

$$AT100g = \frac{AT \times V_{\text{Extrato}}}{m_{\text{filme}}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

- AT é o valor em mg/L obtido anteriormente;
- V extrato é o volume total do extrato preparado (50 mL = 0,05 L);
- m filme é a massa de filme utilizada (2,0 g).

2.2.8.2.Determinação de ácido ascórbico

O teor de ácido ascórbico (vitamina C) foi determinado através do método nº 967.21 da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2016) com adaptações. Previamente foi realizada a padronização da solução de 2,6-dicloro-indofenol (DCFI). Inicialmente, retirou-se 1 mL da solução padrão de ácido ascórbico e transferiu-se para um balão volumétrico de 25 mL, completando-se o volume com ácido oxálico a 2%. Em seguida, uma alíquota de 10 mL dessa solução foi pesada para determinar a quantidade exata de ácido ascórbico presente e, posteriormente, titulada com a solução de DCFI. O procedimento foi realizado em duplicata. E o fator de correção é dado pela Equação 7.

$$F = \frac{\text{mg de ácido ascórbico}}{\text{mL de DCFL utilizada até a viragem}} \quad (7)$$

Em seguida, pesou-se 2 g da amostra de filme e adicionou-se 4 g de ácido oxálico a 2%. A mistura foi triturada até a completa homogeneização. Logo após, pesou-se 2 g do extrato obtido (amostra + ácido oxálico 2%) em um balão volumétrico de 50 mL. O volume foi então completado até 50 mL com ácido oxálico a 2%. A solução resultante foi filtrada, e uma alíquota de 10 mL foi retirada com pipeta volumétrica. Essa alíquota foi pesada para determinação exata da massa de amostra analisada e, posteriormente, titulada com a solução de DCFI. O procedimento foi realizado em duplicata. A concentração de vitamina C foi então, determinada pela equação 8.

$$Vit\ C \left(\frac{mg}{100\ g} \right) = \frac{DCFI_{Amostra}}{DCFI_{padrão}} \times \frac{100g}{M_{Solvente + Amostra} (g)} \times \frac{M_{amostra} (g)}{M_{aliquota} (g)} \times \frac{V (50\ ml)}{V_{aliquota} (ml)} \quad (8)$$

Onde,

- DCFI_{amostra} (mL) = Quantidade (mL) utilizada para titular a amostra
- DCFI_{padrão} = Quantidade (mL) utilizada para titular a etapa de padronização
- M_{amostra} (g) = Quantidade da amostra que foi pesada inicialmente
- M_{solvente + AMOSTRA} (g) = Peso da (amostra +solvente)
- M_{aliquota} (g) = Peso da alíquota de 10 mL
- V (50 mL) = 50 mL
- V_{aliquota} (mL) = 10 mL que foi pipetado para titulação final.

2.2.9. Avaliação colorimétrica

Para análise de cor foi utilizado um espectrofotômetro (ColorQuest XE, HunterLab, Virgínia, USA), avaliando 10 pontos aleatórios na superfície de cada filme (Figura 6).

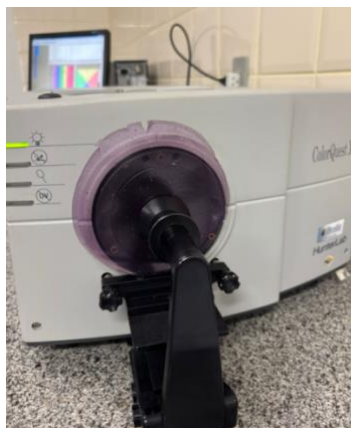


Figura 6 – Análise de coloração de filmes no Espectrofotômetro ColorQuest XE, marca HunterLab. Fonte: A autora (2024).

Foram avaliados os parâmetros instrumentais de cor luminosidade L^* (variação de claro para o escuro), cromaticidade a^* (cromaticidade no eixo da cor verde para vermelha), cromaticidade b^* (cromaticidade no eixo da cor azul para amarelo) e os parâmetros saturação Chroma (C^*) (Equação 9) e Hue (h°) (Equação 10). Além disso, foram determinadas as variações de coloração em relação à amostra controle (CMC): delta L (ΔL) (Equação 11), delta a^* (Δa^*) (Equação 12), delta b^* (Δb^*) (Equação 13) e delta E (ΔE) (Equação 14), conforme equações abaixo:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (9)$$

$$h^0 = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (10)$$

$$\Delta L = L - L_0 \quad (11)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad (12)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad (13)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (14)$$

2.2.10. Propriedades mecânicas

Para analisar as propriedades mecânicas dos filmes, foram realizados ensaios de tração, avaliando a resistência à tração até o rompimento, o alongamento (extensão máxima até a ruptura) e o módulo de elasticidade (módulo de *Young*), utilizado para determinar a rigidez dos filmes.

Foram preparados 12 corpos de prova para cada filme em formato de tiras com 100 mm de comprimento, sendo 80 mm de espaço entre os ganchos e 15 mm de largura, e acondicionados em câmara climática por 48 horas antes das análises, a temperatura de 25 °C e umidade controlada, conforme recomendado pela norma ASTM-D882-12 (2012).

Para realização dos ensaios utilizou-se o equipamento Instron (Instron, 3367, Grove City, EUA) (Figura 7) com controle pneumático de tração e equipado com célula de carga de 500 N, correspondente à capacidade máxima de força que pode ser medida pelo equipamento.



Figura 7. Máquina universal de ensaios Instron utilizada para análise de resistência à tração de filmes. Fonte: A autora (2024).

Os filmes foram submetidos à tração até o rompimento, utilizando uma velocidade de pré-teste de 1 mm/s para aplicar a carga de forma suave, evitando alongamentos excessivos antes do início do teste, e uma velocidade de teste de 0,5 mm/s, garantindo uma taxa de deformação controlada e permitindo a obtenção de dados precisos sobre resistência à tração e elasticidade do material.

Para realizar a análise de resistência à perfuração, foram preparados 12 corpos de prova de cada formulação do filme em formatos cilíndricos de 6,5 cm de diâmetro e acondicionados em dessecador e dentro de uma câmara climática por 48 horas antes das análises, a temperatura de 25 °C e umidade controlada, conforme recomendado pela norma ASTM-D882-12 (2012). Os ensaios foram realizados em um texturômetro (Texture Analysts, TA-XT Plus, Surrey, England) (Figura 8).



Figura 8. Texturômetro utilizado para a análise de resistência à perfuração de filmes. Fonte: A autora (2024).

As amostras foram perfuradas por uma probe esférica de 5 mm de diâmetro (P/5S), com três velocidades: 1 mm/s no pré-teste, garantindo o posicionamento sem deformações; 0,5 mm/s no teste, permitindo uma análise detalhada da resistência do material; e 10 mm/s no pós-teste, que não interfere nos resultados obtidos.

Foram determinados os valores de força máxima aplicada na perfuração (N) e deformação (%), através de curvas de força e deformação, para 12 repetições de cada tratamento.

2.2.11. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A investigação de possíveis interações moleculares entre os componentes dos filmes foi realizada em um espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR-ATR-NIRA, Frontier PerkinElmer, Waltham, EUA). O método de análise empregado foi o de Reflectância Total Atenuada (ATR), com as amostras sendo pressionadas diretamente sobre o sensor. As condições de análise foram definidas com uma faixa espectral de 600-4000 cm^{-1} , resolução de 4 cm^{-1} e a realização de 10 varreduras para cada amostra.

2.2.12. Análise de termogravimetria

Os perfis de degradação térmica das amostras de filme foram obtidos em um analisador termogravimétrico TGA Q500 (TA Instruments, Delaware, EUA), utilizando uma taxa de

aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, na faixa de temperatura de 10 a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os fluxos de nitrogênio e de ar sintético foram mantidos em $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e $60\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente. Os resultados foram expressos através de gráficos de perda de massa (%) e taxa de degradação ($\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) em função da temperatura.

2.2.13. Viabilidade da cultura probiótica

Foram realizadas análises para avaliar a viabilidade da cultura probiótica nas soluções filmogênicas e nos filmes imediatamente após sua produção (dia 0). Além disso, amostras desses filmes foram armazenadas em câmaras climáticas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo avaliadas quanto à viabilidade probiótica ao longo de 45 dias.

Para avaliar a viabilidade dos probióticos no 1 g de filme ou solução filmogênica, foi transferido para 9 mL de solução estéril de NaCl a 0,85% (p/v) e agitado numa incubadora a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h. As soluções foram diluídas em série com NaCl 0,85% (p/v), plaqueadas em meio ágar MRS e incubadas ($37\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h). As contagens microbiológicas foram medidas como unidades formadoras de colônias UFC/mL e os dados médios resultantes foram transformados para log UFC/mL (KHODAEI et al., 2020).

2.2.14. Análise Estatística

Os resultados dos experimentos foram analisados utilizando Análise de Variância (ANOVA) e o teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Os experimentos foram conduzidos em triplicata, e os dados são apresentados como média \pm desvio padrão.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Características morfológicas

A micrografia da superfície do filme CMC (Figura 9A) revelou uma estrutura lisa e regular, evidenciando a compatibilidade entre a carboximetilcelulose e o glicerol (plastificante). Com a adição da cepa probiótica (CP), o filme manteve sua estrutura lisa (Figura 9B). No entanto, foi possível observar a presença de pontos dispersos, possivelmente relacionados à dispersão da CP na matriz. Esses resultados estão em consonância com os de LU et al. (2025) que verificaram que a introdução do LGG em filme constituído de goma arábica, isolado de proteína de soro de

leite, isomalte e glicerol resultou em uma superfície lisa, porém ligeiramente mais áspera, com saliências e microaglomerados atribuídos à presença de células.

Com a adição de PM, o filme apresentou uma estrutura rugosa e irregular, conforme ilustrada nas Figuras 9C, 9D e 9E. A presença de irregularidades pode ser atribuída à formação de aglomerados do pó da polpa incorporada, que não se dispersam completamente devido à alta viscosidade da solução filmogênica. Características semelhantes foram relatadas em filmes contendo pó de cranberry (MATTA FAKHOURI et al., 2019) e amora-preta liofilizada (NOGUEIRA et al., 2019).

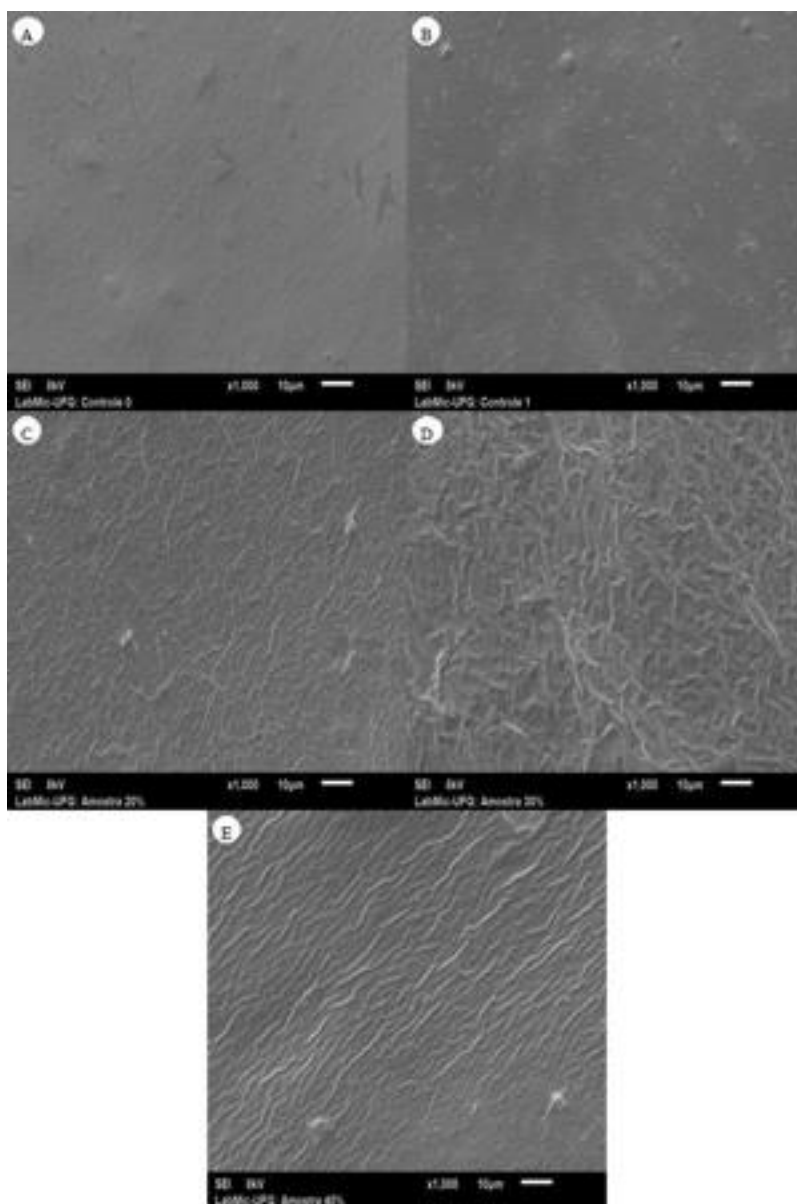


Figura 9. Micrografias das superfícies dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC), contendo cultura probiótica *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG (CP) e polpa de mirtilo (PM), obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1000x. Imagens: A) filme CMC; B) filme CMC/CP; C) filme CMC/CP/PM20; D) filme CMC/CP/PM30; E) filme CMC/CP/PM40.

A presença de irregularidades na matriz dos filmes com a adição de PM pode afetar as propriedades mecânicas que será discutida posteriormente (Tabela 6), além de facilitar a difusão de água na microestrutura, e conseqüentemente afetar a PVA que será discutida posteriormente (Tabela 4) (JIMÉNEZ et al., 2013; KOWALCZYK & BARANIAK, 2014).

2.3.2. Características físicas dos filmes comestíveis

A umidade é uma propriedade presente em filmes e revestimentos comestíveis, uma vez que a água geralmente desempenha o papel de solvente. Um dos principais benefícios da água na composição de filmes é sua capacidade de atuar como plastificante, conferindo maior flexibilidade; por outro lado, níveis elevados de umidade nos filmes podem comprometer a barreira contra o vapor de água e gases, tornando-os pouco adequados para o armazenamento de alimentos sensíveis (YOUSEFI et al., 2024).

Com isso, a redução do percentual de umidade no filme é crucial para estender a vida útil do alimento que será acondicionado (JAFARZADEH et al., 2021). A Tabela 3 mostra os valores de umidade dos filmes desenvolvidos neste estudo. As amostras controle (CMC), controle com probiótico (CMC/CP) e aquelas contendo 20% de PM (CMC/CP/PM20) apresentaram os maiores percentuais de umidade, sem diferenças significativas entre elas. Esse comportamento pode estar relacionado à alta presença de grupos hidrofílicos nas moléculas de CMC, que favorecem a retenção de umidade (ZHANG et al., 2019).

Contudo, as formulações contendo 30% e 40% de PM (CMC/CP/PM30 e CMC/CP/PM40) apresentaram menor teor de umidade em comparação às demais (Tabela 5). Esse resultado pode ser atribuído, principalmente, ao maior conteúdo de sólidos nessas formulações e, em menor proporção, a possíveis interações entre compostos fenólicos da PM, como as antocianinas, e os grupos hidrofílicos da CMC, por meio da formação de ligações de hidrogênio. Esse mecanismo reduz a interação das moléculas de água com a matriz polimérica, resultando, conseqüentemente, em menor teor de umidade nos filmes (CHEN et al., 2025). Com relação à solubilidade em água, de modo geral, uma maior solubilidade em água reflete menor resistência à água e maior hidrofílicidade dos componentes do filme. Assim, filmes com alta solubilidade não são recomendados para embalar alimentos de alta umidade (ZAHEDI, 2019). Com a inclusão da CP, houve diminuição da solubilidade de cerca de 50% na amostra CMC/CP/PM20 comparada ao filme controle, que demonstrou diminuição com o aumento da

concentração da PM até a concentração de 30%, que não demonstrou diferença significativa com o tratamento com 40% (Tabela 5).

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) aumentou com a adição da CP e continuou a crescer proporcionalmente à incorporação de PM. A PVA depende principalmente da solubilidade e da difusividade do vapor de água através da matriz (CHAKRAVARTULA et al., 2019). Considerando que os filmes se tornaram mais insolúveis com a presença da PM na matriz, o aumento observado da PVA pode ser atribuído, sobretudo, ao incremento da difusividade.

A difusividade está diretamente relacionada à microestrutura interna dos filmes. Estruturas menos compactas, com descontinuidades ou regiões heterogêneas, favorecem o transporte de moléculas de água através da matriz, resultando em maiores valores de PVA. Assim, irregularidades ou poros formados pela incorporação da PM podem ter facilitado o movimento do vapor de água, reduzindo a tortuosidade da barreira e aumentando sua permeabilidade (CHAKRAVARTULA et al., 2019; DASH et al., 2019).

ZORCĂ et al. (2025), ao avaliar filmes de carboximetilcelulose incorporados com pó de casca de pomelo, observaram aumento significativo da PVA devido à presença de partículas sólidas, que alteraram a microestrutura da matriz, tornando-a menos compacta e mais porosa, além de apresentarem alta afinidade com a água. De forma análoga, a incorporação da PM provavelmente modificou a organização interna dos filmes, favorecendo a difusão do vapor de água e, conseqüentemente, elevando os valores de PVA.

Tabela 5 – Teor de umidade, solubilidade em água e espessura dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactocaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40)

	Umidade (g/100 g)	Solubilidade (%)	PVA (x10⁻⁴ g-mm/kPa-h- m²)	Espessura (mm)
CMC	28,20±1 ^a	100 ^a	1,46±0,01 ^e	0,12±0,04 ^d
CMC/CP	27,49±4 ^{ab}	100 ^a	2,44±0,0 ^d	0,15±0,02 ^d
CMC/CP/PM20	25,04±0,43 ^{ab}	50,55±4,4 ^c	3,12±0,01 ^c	0,19±0,05 ^{cd}
CMC/CP/PM30	22,36±4,80 ^{bc}	64,42±7,0 ^b	4,59±0,16 ^b	0,22±0,07 ^{ac}
CMC/CP/PM40	17,05±0,47 ^c	63,47±4,8 ^b	6,36±0,38 ^a	0,28±0,09 ^a

Valores na mesma coluna seguidos pelo menos de uma letra comum não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p<0,05).

A determinação da espessura do filme é um parâmetro macroscópico crucial que impacta além das propriedades mecânicas, também várias propriedades físicas, como permeabilidade ao vapor de água, turbidez, bem como a vida útil e a qualidade dos alimentos (YOUSEFI et al., 2024).

Os filmes sem adição de PM (CMC e CMC/CP) e aqueles com 20% de PM (CMC/CP/PM20) não apresentaram diferenças significativas na espessura. Em contrapartida, os filmes contendo 30% e 40% de PM (CMC/CP/PM30 e CMC/CP/PM40) apresentaram aumento significativo em relação às amostras sem adição de PM, indicando que a partir de 30% na formulação a PM pode influenciar diretamente essa propriedade. Esse aumento na espessura provavelmente ocorreu devido à maior quantidade de conteúdo sólido proveniente da PM na solução formadora de filme (LEI et al., 2019).

Os filmes com adição de PM apresentaram resultados médios de espessura entre 0,19 e 0,28 mm, que aumentou significativamente após a adição de 20% de PM e não demonstrou diferença entre filmes que incorporaram 30 e 40% de PM, comportamento semelhante foi relatado por DE OLIVEIRA FILHO et al. (2023) para filmes a base de alginato incorporados com polpa de mangaba. SGANZERLA et al. (2021) relataram espessura média de 0,16 mm em filmes de carboximetilcelulose com extrato de amora-preta e consideraram esse resultado satisfatório para aplicação como embalagem primária e revestimento.

2.3.3. Propriedades bioativas

No presente estudo, a PM empregada apresentou, segundo declaração do fabricante, 61 mg de vitamina C por 100 g (Tabela 3). Além disso, análises laboratoriais revelaram um teor médio de $735,01 \pm 36,02$ mg/100 g de antocianinas na mesma amostra. Em comparação, ŠUMIĆ et al. (2015) relataram teores de vitamina C variando entre 28,15 e 67,59 mg/100 g em mirtilos liofilizados, enquanto WOOD (2023) estimou um valor médio de 1.597 mg/100 g para as antocianinas em mirtilos liofilizados.

A vitamina C nos filmes aumentou significativamente com a adição de PM, apresentando valores entre 1,69 e 3,99 mg/100 g de filme, em uma relação diretamente proporcional à quantidade de polpa incorporada na formulação (Figura 10). Tendência semelhante foi reportada por DE OLIVEIRA FILHO et al. (2023) ao avaliar filmes de alginato enriquecidos com polpa de mangaba (*Hancornia speciosa*).

Em relação ao teor de antocianinas, conforme demonstrado no gráfico da Figura 11, os valores encontrados variaram entre 13,67 e 49,91 mg/100 g, apresentando uma relação diretamente proporcional à concentração de PM incorporada, embora as formulações contendo 20% e 30% de PM não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

Tendência semelhante foi observada por NOGUEIRA et al. (2019), ao incorporarem polpa de amora liofilizada em diferentes concentrações (20%, 30% e 40%) em filmes à base de amido de araruta. De forma comparativa, YE et al. (2022) desenvolveram um filme bioativo à base de gelatina, no qual incorporaram pectina semirrefinada obtida do bagaço de suco de mirtilo (3%, p/v), contendo 6,72 mg/g de antocianinas na pectina e 1,68 mg/g no filme final.

Esses resultados reforçam que o mirtilo é uma fonte expressiva de compostos bioativos e que sua incorporação em matrizes poliméricas favorece o enriquecimento dos filmes com antocianinas e vitamina C. Além disso, a retenção de uma fração considerável desses compostos nos filmes evidencia o potencial dos biopolímeros como sistemas carreadores de substâncias bioativas, capazes de proteger e disponibilizar antocianinas e vitamina C de forma mais estável (DE OLIVEIRA et al., 2021).

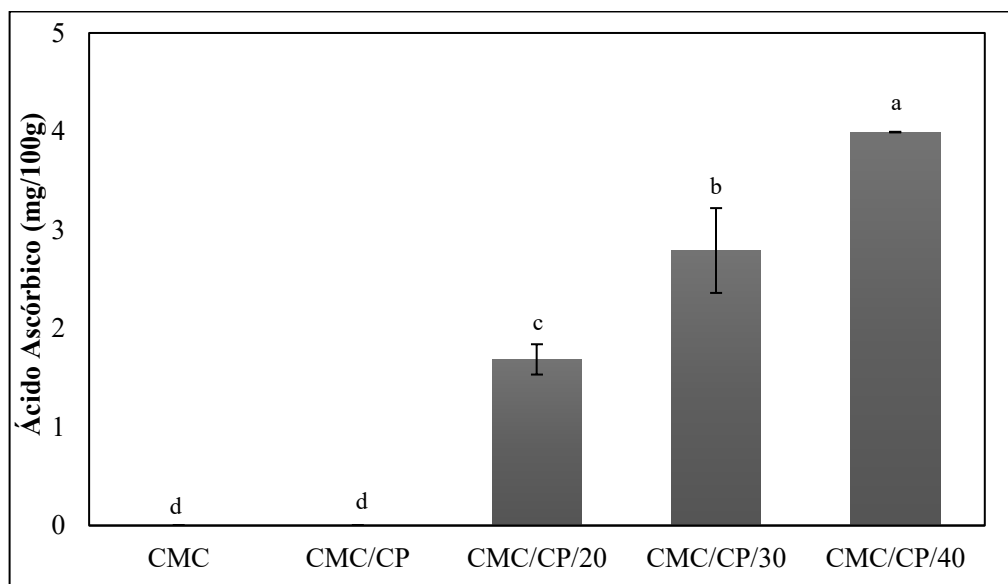


Figura 10. Teor de ácido ascórbico (vitamina C) nos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

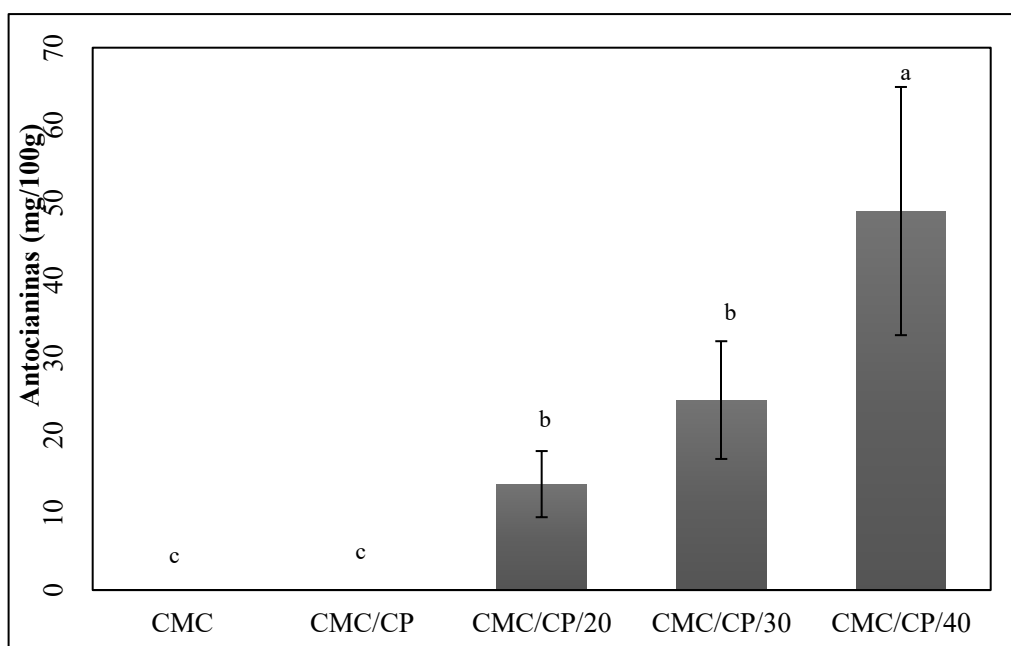


Figura 11. Teor de antocianinas nos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lactocaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de *Tukey*.

2.3.4. Propriedades relacionadas à cor

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros de cor dos filmes comestíveis estudados. O valor de L^* (luminosidade) dos filmes contendo a PM diminuiu significativamente em relação ao filme controle, indicando escurecimento dos filmes devido à sua adição. Essa diminuição de L^* também foi observada por LUCHESE et al. (2018) ao incorporar bagaço de mirtilo em filmes de amido de mandioca.

Para os filmes com PM, o parâmetro de cor a^* aumentou, refletindo uma tonalidade mais próxima ao vermelho, característica da polpa adicionada. O parâmetro b^* exibiu valores negativos em todas as amostras, indicando uma proximidade com a tonalidade azul. No entanto, ao aumentar a concentração de polpa de mirtilo em 40%, observou-se um aumento nos valores de b^* . Essa variação pode ser atribuída à distribuição heterogênea dos pigmentos na superfície do filme ou a uma leve alteração no pH da solução devido ao aumento da PM, uma vez que as antocianinas, principais responsáveis pela coloração, são sensíveis ao pH (XU, 2024).

O Chroma (C^*) revelou que a adição de PM aumentou a saturação da coloração dos filmes, enquanto o ângulo hue (h°) indicou tonalidades entre o azul e o vermelho em todos os tratamentos.

O ΔE analisou as diferenças de cor entre a amostra controle (CMC) e os demais tratamentos. Um ΔE é maior que 5,0 indica que as mudanças de cor são facilmente detectáveis a olho nu (QIN et al., 2020). No presente trabalho, o único filme que obteve valor de ΔE menor que 5,0 foi a amostra controle com adição de CP (CMC/CP); os demais obtiveram valores acima de 60, o que é justificado pela presença de PM nestes filmes, conferindo-lhes a cor roxa.

Tabela 6 – Propriedades relacionadas à cor dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*Lacticaseibacillus rhamnosus* GG) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40)

	L	a*	b*	C*	h°	ΔE
CMC	91,37±0,19 ^a	-1,33±0,02 ^d	0,33±0,11 ^b	1,38±0,03 ^d	346,14±4,30 ^a	-
CMC/CP	91,20±0,21 ^a	-1,51±0,04 ^d	1,20±0,40 ^a	1,95±0,25 ^c	322,85±9,7 ^d	0,96±0,46 ^d
CMC/CP/PM20	62,67±1,1 ^b	12,24±0,5 ^c	-9,87±0,39 ^c	15,73±0,63 ^b	321,11±0,88 ^d	33,34±1,19 ^c
CMC/CP/PM30	48,70±3,89 ^c	17,15±0,67 ^b	-9,97±0,22 ^c	19,84±0,55 ^a	329,80±1,26 ^c	47,65±3,61 ^b
CMC/CP/PM40	44,59±3,34 ^d	18,13±0,49 ^a	-7,90±0,25 ^d	19,78±0,45 ^a	336,47±0,93 ^b	51,34±1,90 ^a

Valores na mesma coluna seguidos pelo menos de uma letra comum não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p<0,05).

2.3.5. Propriedades Mecânicas

A Tabela 7 demonstra as propriedades mecânicas avaliadas no presente trabalho. Para os valores de resistência à tração houve diminuição acentuada pela adição da PM, demonstrando que os filmes se tornaram mais frágeis em relação às amostras controle. NOGUEIRA et al. (2019) também observaram a diminuição da resistência à tração, de 22,71 para 3,97 Mpa, ao adicionar polpa de amora-preta (*Rubus fruticosus*) em filmes de amido de araruta. Essa redução pode ser devida à presença da formação de aglomerados, resultando na descontinuidade na estrutura dos filmes com PM, que é possível evidenciar nas imagens de MEV (Figura 7) (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Os valores de extensão máxima (ou alongação máxima) dos filmes estudados aumentaram significativamente na formulação com 20% de polpa de mirtilo. No entanto, observaram-se reduções significativas na formulação com 40%, sugerindo que concentrações acima de 30% podem alterar a matriz polimérica de forma a comprometer esse parâmetro. O aumento da alongação pode ser devido a presença de açúcares na polpa que atua como plastificantes.

Quanto ao módulo de Young (Módulo de Elasticidade), houve diminuição significativa entre os filmes sem e com PM, indicando que a incorporação da PM tornou a matriz polimérica menos rígida, sugerindo um aumento na flexibilidade dos filmes. LUCHESE et al. (2018) adicionou resíduos em pó de mirtilo (partículas grandes) em filmes de amido de mandioca e houve diminuição nos valores de módulo de elasticidade.

Os valores médios de resistência à perfuração para os filmes desenvolvidos variaram de 19,69 a 65,20 N. A amostra controle (CMC) não mostrou diferença estatística significativa em relação ao controle com cepa probiótica (CMC/CP), indicando que a adição do probiótico não afetou significativamente esse parâmetro. Por outro lado, as amostras contendo PM apresentaram uma redução expressiva na força de perfuração. FARIAS et al. (2012) relataram que a adição de polpa de acerola liofilizada em filmes de amido de mandioca resultou em uma força de perfuração inversamente proporcional à concentração da PM, com valores variando entre 3,7 e 13,3 N.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos filmes à base de carboximetilcelulose (CMC) com cultura probiótica (*L. rhamnosus* GG.) (CP) e polpa de mirtilo (PM) em concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

	Resistência à tração (N/m²)	Extensão máxima (%)	Módulo Young (MPa)	Força para perfuração (N)
CMC	5,54 ^a ±5,19	51,70 ^{bc} ±16,38	24,26 ^a ±26,89	65,40 ^a ±11,05
CMC/CP	3,87 ^{ab} ±1,99	65,07 ^{ab} ±14,08	14,41 ^{ab} ±9,02	58,12 ^a ±24,60
CMC/CP/PM20	2,40 ^b ±0,47	66,46 ^a ±10,72	5,47 ^b ±1,01	24,36 ^b ±6,67
CMC/CP/PM30	1,83 ^b ±0,50	60,74 ^{abc} ±11,28	4,03 ^b ±0,66	29,27 ^b ±7,79
CMC/CP/PM40	1,12 ^b ±0,17	50,14 ^c ±9,66	3,02 ^b ±0,28	19,69 ^b ±4,18

Valores na mesma coluna seguidos pelo menos de uma letra comum (ou não seguidos de letra nenhuma) não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p<0,05).

2.3.6. Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e propriedades térmicas

Os espectros de FTIR obtidos para os filmes à base de CMC, contendo CP e diferentes concentrações de PM, estão apresentados na Figura 12, permitindo a avaliação de possíveis interações entre os componentes da matriz.

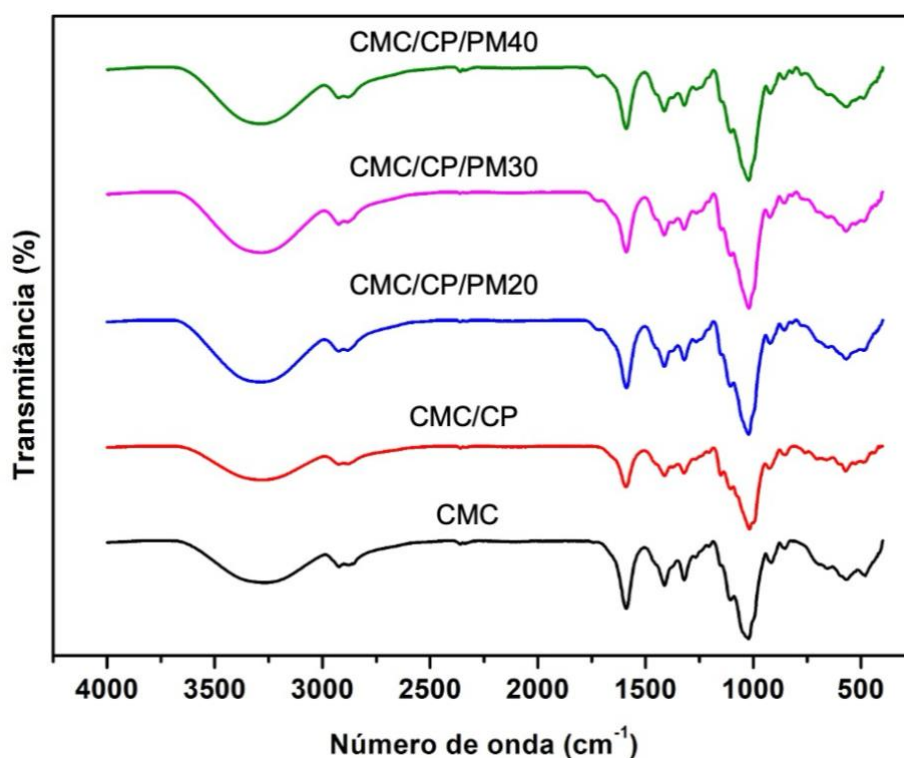


Figura 12: Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para: (—) CMC, (—) CMC/CP, (—) CMC/CP/PM20, (—) CMC/CP/PM30 e (—) CMC/CP/PM40. Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

O espectro do filme controle, constituído apenas de CMC, apresentou bandas de absorção características de sua estrutura polissacarídica. Observou-se uma banda larga e intensa em 3848 cm^{-1} , atribuída ao alongamento da ligação O–H, e um sinal em 2924 cm^{-1} , correspondente às vibrações de estiramento C–H (ZHANG et al., 2025). Além disso, foram observadas bandas de estiramento na região de $1200\text{ a }1000\text{ cm}^{-1}$, relacionadas às ligações C–O e C–O–C, típicas de estruturas de polissacarídeos (LEKSHMI et al., 2025).

Com a adição do probiótico LGG (CP), notam-se as primeiras alterações no espectro, indicando interação com a matriz, como a intensificação das bandas em 3811 , 3271 e 2924 cm^{-1} , sugerindo um aumento na densidade de grupos hidroxila e possíveis interações intermoleculares. Comportamento semelhante foi observado por LU et al. (2025) na adição de LGG em filmes à base de goma arábica.

A incorporação da PM promoveu alterações ainda mais expressivas nos espectros. Observou-se a presença de bandas em $3282\text{--}3288\text{ cm}^{-1}$, mais intensas e largas, reforçando a maior presença de grupos O–H e a formação de ligações de hidrogênio. Além disso, verificou-se intensificação de bandas nas regiões de $1450\text{--}1370\text{ cm}^{-1}$ e de $1200\text{ a }1000\text{ cm}^{-1}$, associadas

a estiramentos C–O/C–O–C, comuns em flavonoides, fenóis e açúcares presentes na polpa. Interações semelhantes também foram observadas por SHARMA *et.al.* (2022), ao encapsularem extrato de polpa de jamon preto, fruta rica em polifenóis e antocianinas, em filmes à base de alginato. Tais alterações espectrais, que aumentaram com a concentração de PM, sugerem uma incorporação eficiente dos compostos bioativos à matriz polimérica.

A figura 13 (a) mostra a perda de massa (%) em função da temperatura, enquanto a Figura 12(b) apresenta as taxas de degradação (%/°C) dos filmes à base de CMC, contendo cultura probiótica LGG (CP) e diferentes concentrações de PM.

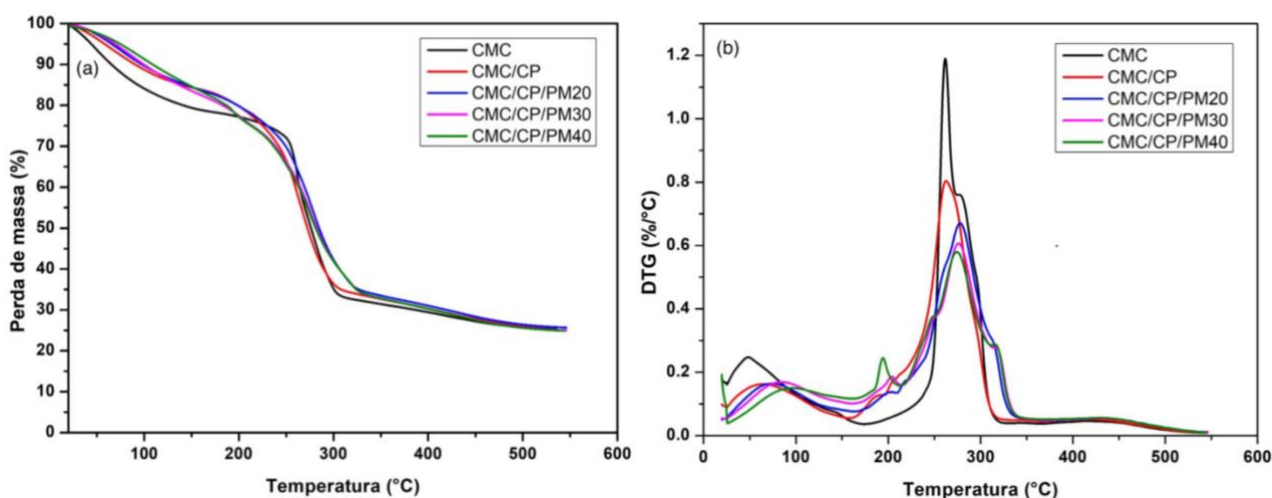


Figura 13: (a) Curvas TGA e (b) DTG para: (—) CMC, (—) CMC/CP, (—) CMC/CP/PM20, (—) CMC/CP/PM30 e (—) CMC/CP/PM40. Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40).

Na curva de TGA, observa-se, para todas as amostras, uma primeira etapa de degradação antes de 100 °C que é atribuída à perda de água da matriz polimérica (SURIPTO *et al.*, 2021).

A segunda etapa de degradação, mais expressiva, que ocorreu entre 220 e 350 °C está relacionada à decomposição térmica do CMC, por meio da combustão em altas temperaturas (HLAING *et al.*, 2025). Nessa faixa, a amostra controle, apenas com CMC, foi a que apresentou maior perda de massa e, conseqüentemente, menor resistência térmica. Na seqüência, o filme com LGG adicionado apresentou a segunda maior perda entre as amostras, já os filmes contendo PM demonstraram maior retenção de massa residual, indicando que uma melhoria na estabilidade térmica da matriz polimérica, com a presença da PM, retardou o processo de degradação.

A Figura 13(b), correspondente à análise DTG, complementa os resultados obtidos nas curvas de TGA ao indicar a temperatura de máxima taxa de degradação. A amostra controle, composta apenas por CMC, apresentou o pico mais acentuado, indicando maior taxa de degradação entre as formulações, com temperatura de início da degradação (T_{onset}) de 210,40 °C e temperatura de máxima taxa de perda de massa (T_{max}) de 261,34 °C. O filme com adição de LGG (CMC/CP) exibiu o segundo maior pico, com T_{onset} reduzido para 193,31 °C e T_{max} ligeiramente superior (263,39 °C), sugerindo que a presença da cepa pode ter facilitado o início da degradação, mas ao mesmo tempo conferiu pequena melhora na resistência térmica na etapa principal.

Em contrapartida, as amostras contendo PM apresentaram T_{onset} mais elevados (204,56–222,36 °C) e T_{max} deslocados para temperaturas superiores (274,38–277,92 °C), indicando aumento da estabilidade térmica inicial e melhora significativa da resistência térmica do material. Esses resultados evidenciam que a incorporação da polpa contribuiu para retardar tanto o início quanto o avanço da degradação, efeito que pode estar associado à presença de compostos fenólicos capazes de interagir com a matriz polimérica, promovendo maior rigidez estrutural. Padrão semelhante foi observado por DE OLIVEIRA FILHO et al. (2023) ao incorporar polpa de mangaba em filmes de alginato; segundo os autores, os componentes da polpa podem reduzir a mobilidade das cadeias poliméricas, impactando positivamente a estabilidade térmica.

2.3.7. Viabilidade da cultura probiótica – LGG

A Figura 14A apresenta os percentuais de viabilidade das células probióticas de LGG ao longo do processo de secagem dos filmes. Apesar da redução na contagem de células viáveis durante a etapa de secagem, os filmes demonstraram capacidade de proteger as células probióticas, apresentando valores de viabilidade entre 68,65% e 86,45%. Os filmes que continham polpa apresentaram os maiores valores, com o destaque para as formulações com 30 e 40% de PM, que obtiveram as melhores taxa de sobrevivência das células. De forma semelhante, SOUKOULIS et al. (2016) também relataram que um filme à base de amido protegeu as células de LGG durante a formação dos filmes.

O desempenho superior dos filmes com 30 e 40% de PM sugere que os compostos bioativos presentes na polpa, especialmente as antocianinas, possam ter contribuído para a preservação das células probióticas. Esses metabólitos apresentam reconhecida atividade

antioxidante, atuando na neutralização de radicais livres e atenuando o estresse oxidativo, o que reduz a perda de viabilidade celular. Além disso, os polifenóis podem interagir com íons metálicos, formando estruturas em rede capazes de reforçar a proteção das células durante a secagem (FAN et al., 2021).

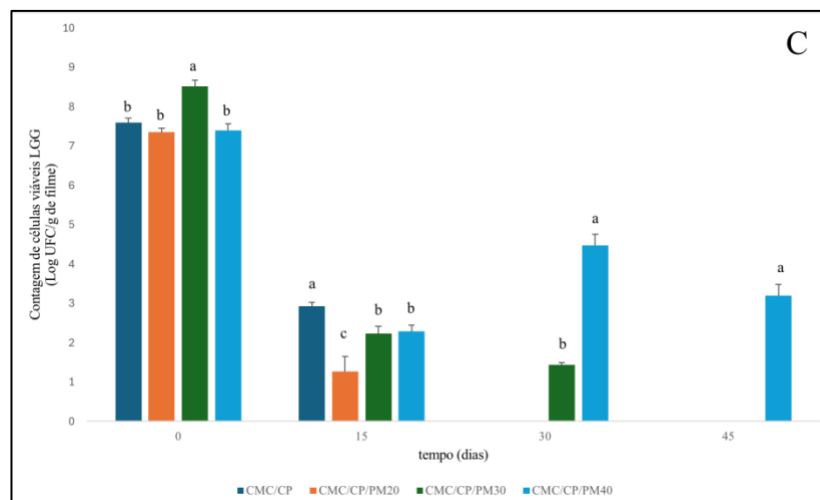
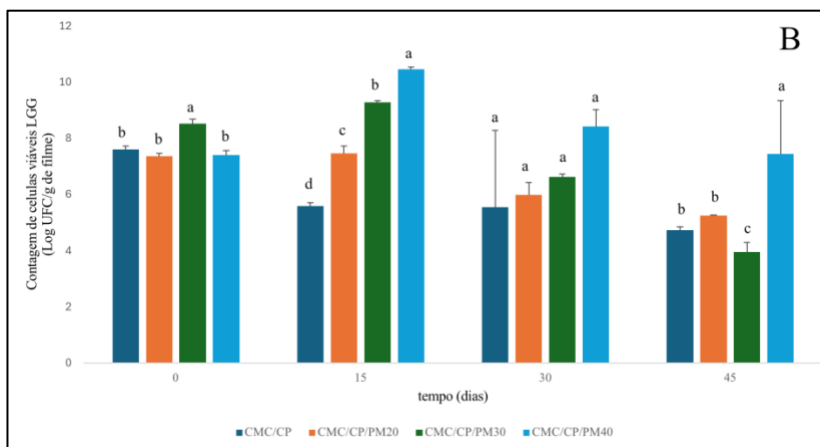
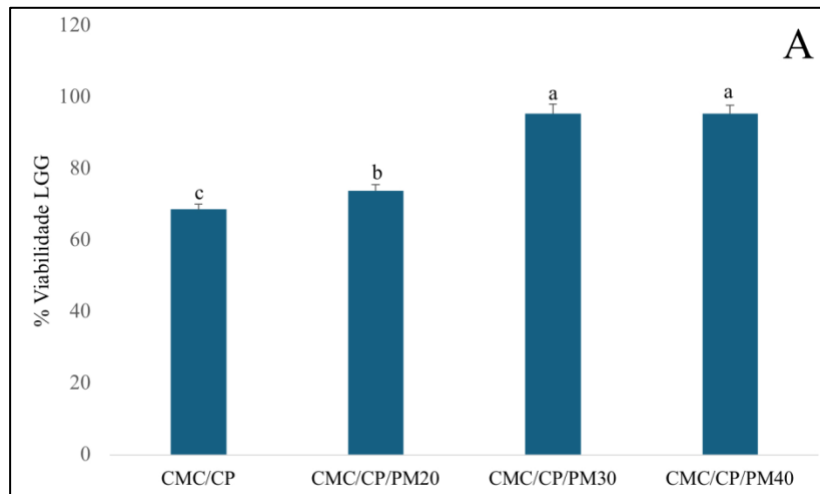


Figura 14: Viabilidade celular de LGG após a secagem dos filmes (A) e número de células viáveis durante o armazenamento a 4°C (B) e a 25°C (C). Os códigos de formulação referem-se aos principais componentes, sendo: CMC: carboximetilcelulose; CP: cultura probiótica (LGG); PM: polpa de mirtilo, nas concentrações de 20% (PM20), 30% (PM30) e 40% (PM40). Letras diferentes apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

As Figuras 14B e 14C apresentam a contagem de células viáveis de LGG nos filmes ao longo de 45 dias de armazenamento nas temperaturas de 4 °C e 25 °C, respectivamente.

No tempo 0, observou-se maior contagem de células viáveis na amostra contendo 30% de PM (8,52 log UFC/g de filme), sugerindo que essa concentração de PM favoreceu a viabilidade inicial do probiótico.

Durante o armazenamento a 4 °C (Figura 14B), observou-se que, aos 15 dias, houve aumento na contagem de células viáveis em todas as amostras contendo PM, enquanto a amostra controle, sem adição de PM, apresentou redução dessa contagem. Esse comportamento sugere que a presença de PM pode ter favorecido a recuperação celular, atuando possivelmente como substrato para as células probióticas. Estudos recentes demonstram que o bagaço de mirtilo pode atuar como substrato para cepas probióticas, incluindo *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG, favorecendo seu crescimento em razão da presença de açúcares simples, fibras solúveis e compostos fenólicos que podem ser utilizados como fontes de carbono e energia (HURTADO-ROMERO et al., 2024).

A partir de 30 dias, verificou-se um declínio gradual na viabilidade, embora, aos 45 dias, ainda tenham sido detectadas células viáveis em todas as formulações, possivelmente em razão da baixa temperatura de armazenamento, que contribuiu para a estabilidade celular. Destaca-se a amostra contendo 40% de PM, que apresentou a maior média, mantendo valores superiores a 7 Log UFC/g de filme ao final de 45 dias, o que indica um possível efeito protetor da PM sobre o probiótico.

Por outro lado, os filmes armazenados a 25 °C (figura 14C) apresentaram uma maior perda de viabilidade ao longo do tempo. Resultados semelhantes foram observados por EBRAHIMI et al. (2018), que também relataram a redução da viabilidade de *L. acidophilus*, *L. casei*, *L. rhamnosus* e *B. bifidum* em filme de carboximetilcelulose submetidos às mesmas condições de temperatura.

Após 15 dias de armazenamento, observou-se uma queda expressiva na viabilidade celular em todas as amostras, sendo mais acentuada na formulação com 20% de PM (CMC/CP/PM20), que apresentou redução superior a 7 log no período. Aos 30 dias, apenas as

formulações contendo 30% e 40% de polpa de mirtilo mantiveram células viáveis detectáveis, destacando-se, inclusive, um aumento na contagem celular no filme com 40% de PM. Ao final de 45 dias, somente a amostra com 40% de PM apresentou viabilidade (3,2 log UFC/g), sugerindo que a presença de PM nessa concentração contribuiu para a proteção do probiótico durante o armazenamento a 25 °C.

De forma semelhante, COIMBRA et.al. (2023) relataram que filmes de amido com adição de resíduos agroalimentares apresentaram perda mais lenta de viabilidade probiótica durante o armazenamento, em comparação aos filmes de amido simples, atribuindo esse efeito à presença de compostos antioxidantes. Além disso, DE OLIVEIRA FILHO et al. (2023) também observaram que filmes à base de alginato contendo polpa de mangaba contribuíram para a manutenção da viabilidade do probiótico *Saccharomyces boulardii*.

Portanto, a conservação dos filmes probióticos elaborados neste estudo em condições refrigeradas (≤ 4 °C) é indicada como estratégia eficaz para a manutenção da viabilidade celular ao longo do armazenamento.

2.4 Conclusões

O desenvolvimento de filmes bioativos à base de CMC, LGG e PM demonstrou-se uma alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais comestíveis com propriedades bioativas. A incorporação da PM contribuiu significativamente com a adição de compostos bioativos, como a vitamina C, além de reduzir a solubilidade em água e melhorar a estabilidade térmica. Apesar disso, ela modificou a morfologia dos filmes, resultando em superfícies mais irregulares, o que impactou negativamente na resistência mecânica e na permeabilidade ao vapor de água. A presença da PM também conferiu coloração arroxeadada e reduziu a solubilidade dos filmes.

As análises espectroscópicas (FTIR) indicaram que, embora o probiótico tenha promovido interações iniciais com a matriz polimérica, foi a adição da PM que gerou alterações estruturais mais expressivas na composição química dos filmes, favorecendo a formação de uma rede polimérica mais complexa, sustentada principalmente por interações físico-químicas, como ligações de hidrogênio entre os grupos funcionais dos biocomponentes. Os resultados da análise termogravimétrica evidenciaram ainda o potencial da PM em retardar o processo de degradação térmica dos filmes.

Em relação à viabilidade da CP, os filmes demonstraram capacidade protetora das células de LGG, especialmente quando armazenados sob refrigeração (4 °C), condição que favoreceu a manutenção da viabilidade ao longo do tempo.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam o potencial da combinação entre PM e LGG na formulação de filmes comestíveis, abrindo novas perspectivas para a otimização dessas formulações e sua aplicação em sistemas de revestimento com propriedades funcionais no setor de alimentos.

4.5 Referências

ABEYSURIYA, Hashini I.; BULUGAHAPITIYA, Vajira P.; JAYATISSA, L. P. Variation of vitamin C content and antioxidant capacities during the post-harvest storage of fresh fruits under different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 109, p. 102426, 2024.

ASTM INTERNATIONAL. *Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*. ASTM D882-12. **West Conshohocken**: ASTM International, 2012.

BRION-ESPINOZA, Irving Antonio et al. Edible pectin film added with peptides from jackfruit leaves obtained by high-hydrostatic pressure and pepsin hydrolysis. **Food Chemistry: X**, v. 12, p. 100170, 2021.

CHAKRAVARTULA, S. S. N. et al. Characterization of composite edible films based on pectin/alginate/whey protein concentrate. **Materials**. 12: 2454. 2019.

CHEN, Han et al. Development of chitosan-carboxymethyl cellulose edible films loaded with blackberry anthocyanins and tea polyphenols and their application in beef preservation. **Food Hydrocolloids**, [s.l.], v. 2025, p. 111198, 2025.

CHOI, Ji-Young et al. Técnica de imagem hiperespectral para monitorar o teor de umidade do mirtilo durante o processo de secagem. **Korean Journal of Food Preservation** , v. 28, n. 4, p. 445-455, 2021.

CHU, Liwei et al. Integrative Transcriptomic and Metabolomic Analyses of the Mechanism of Anthocyanin Accumulation and Fruit Coloring in Three Blueberry Varieties of Different Colors. **Horticulturae**, v. 10, n. 1, p. 105, 2024.

COIMBRA, Patrícia et al. Sustainable starch-based edible films with agrifood residues as potential carriers for the probiotic *Lactobacillus rhamnosus*. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 88, p. 103452, 2023.

DASH, Kshirod K. et al. Thorough evaluation of sweet potato starch and lemon-waste pectin based-edible films with nano-titania inclusions for food packaging applications. *International journal of biological macromolecules*, v. 139, p. 449-458, 2019.

DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves et al. Next-generation food packaging: Edible

bioactive films with alginate, mangaba pulp (*Hancornia speciosa*), and *Saccharomyces boulardii*. **Food Bioscience**, v. 54, p. 102799, 2023.

DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves et al. The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. **Food Research International**, v. 142, p. 110202, 2021.

DE OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves et al. New approach in the development of edible films: The use of carnauba wax micro-or nanoemulsions in arrowroot starch-based films. **Food Packaging and Shelf Life**, 26, 100589, 2020.

EBRAHIMI, Behzad et al. Survival of probiotic bacteria in carboxymethyl cellulose-based edible film and assessment of quality parameters. **Lwt**, v. 87, p. 54-60, 2018.

FAN, Gang et al. Protection of anaerobic microbes from processing stressors using metal-phenolic networks. **Journal of the American Chemical Society**, v. 144, n. 6, p. 2438-2443, 2021.

FARIAS, Mônica Guimarães et al. Physicochemical characterization of edible starch films with barbados cherry (*Malpighia emarginata* DC). **Quimica Nova**, v. 35, p. 546-552, 2012.

FENG, Jing et al. *Lactobacillus rhamnosus*: Um probiótico emergente com potencial terapêutico para depressão. **Pharmacological Research**, p. 107541, 2024.

FENG, Shuhan et al. Cell wall polysaccharides and mono-/disaccharides as chemical determinants for the texture and hygroscopicity of freeze-dried fruit and vegetable cubes. **Food Chemistry**, v. 395, p. 133574, 2022.

GUPTA, Prashant; TOKSHA, Bhagwan; RAHAMAN, Mostafizur. A review on biodegradable packaging films from vegetative and food waste. **The Chemical Record**, v. 22, n. 7, p. e202100326, 2022.

GUTIÉRREZ, Tomy J., et al. Structural and mechanical properties of edible films made from native and modified cush-cush yam and cassava starch. **Food Hydrocolloids**, 45: 211-217, 2015.

HASANNEJAD-BIBALAN, Meysam et al. O efeito de cepas selecionadas de *Lactobacillus* no modelo de colite induzida por dextrano sulfato de sódio em camundongos. **Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica**, v. 67, n. 2, p. 138-142, 2020.

HILL, Daragh et al. O grupo *Lactobacillus casei*: história e aplicações relacionadas à saúde. **Frontiers in microbiology**, v. 9, p. 2107, 2018.

HILL, Colin et al. Declaração de consenso da Associação Científica Internacional para Probióticos e Prebióticos sobre o escopo e uso apropriado do termo probiótico. **Nature reviews Gastroenterology & hepatology**, v. 11, n. 8, p. 506-514, 2014.

HLAING, Khin Su Su et al. Preparation of edible films from pectin/carboxymethyl chitosan incorporating polyphenol-rich roselle leaf extracts for food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 143351, 2025.

HORINAKA, Jun-ichi; CHEN, Kai; TAKIGAWA, Toshikazu. Entanglement properties of carboxymethyl cellulose and related polysaccharides. **Rheologica Acta**, v. 57, p. 51-56, 2018.

HURTADO-ROMERO, Alejandra et al. Characterization of berry by-products as fermentable substrates: Proximate and phenolic composition, antimicrobial activity, and probiotic growth dynamics. **LWT**, v. 204, p. 116468, 2024.

JAFARZADEH, Shima; JAFARI, Seid Mahdi. Impact of metal nanoparticles on the mechanical, barrier, optical and thermal properties of biodegradable food packaging materials. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 61, n. 16, p. 2640-2658, 2021.

JIMÉNEZ, A., FABRA, M. J., TALENS, P., & CHIRALT, A. Physical properties and antioxidant capacity of starch–sodium caseinate films containing lipids. *Journal of Food Engineering*, 116(3), 695-702, 2013.

JORGE, Alexandre MS et al. Edible films produced from agrifood by-products and wastes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 88, p. 103442, 2023.

KHODAEI, Diako; HAMIDI-ESFAHANI, Zohreh. Influence of bioactive edible coatings loaded with *Lactobacillus plantarum* on physicochemical properties of fresh strawberries. **Postharvest Biology and Technology**, v. 156, p. 110944, 2019.

KOWALCZYK, D., & BARANIAK, B. Effect of candelilla wax on functional properties of biopolymer emulsion films—a comparative study. **Food Hydrocolloids**, 41, 195-209, 2014.

KUMAR, Lokesh et al. Filmes e revestimentos comestíveis para aplicações de embalagens de alimentos: Uma revisão. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-26, 2022.

KUPERVASER, María Gabriela et al. Trends in starch-based edible films and coatings enriched with tropical fruits extracts: A review. **Food Hydrocolloids for Health**, v. 4, p. 100138, 2023.

LEI, Yanlin et al. Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of pectin-konjac glucomannan composite edible films incorporated with tea polyphenol. **Food Hydrocolloids**, v. 94, p. 128-135, 2019.

LEKSHMI, S. G. et al. Comprehensive characterization of biodegradable edible films activated with rose and marigold extracts and application of active edible coatings to extend the postharvest storage life of guava. **Food Research International**, v. 203, p. 115895, 2025.

LIOMEAL. *Mirtilo liofilizado em pó 100g*. Disponível em: <https://www.liomeal.com.br/produto/mirtilo-liofilizado-em-po-100g/>. Acesso em: 08 dez. 2024.

LIU, Wenchao et al. A novel combination of LF-NMR and NIR to intelligent control in pulse-spouted microwave freeze drying of blueberry. **Lwt**, v. 137, p. 110455, 2021.

LU, Jingzhu et al. Novel probiotic fermented edible film based on gum arabic/whey protein isolate/isomalt/glycerol incorporated with *Lactobacillus rhamnosus*: Physical, antibacterial, and fresh pork preservation properties. **Food Hydrocolloids**, v. 161, p. 110875, 2025.

LUCHESE, Cláudia Leites et al. Development and characterization of cassava starch films incorporated with blueberry pomace. **International journal of biological macromolecules**, v. 106, p. 834-839, 2018.

MATTA FAKHOURI, Farayde et al. Bioactive edible films based on arrowroot starch incorporated with cranberry powder: Microstructure, thermal properties, ascorbic acid content and sensory analysis. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1650, 2019.

MICHALSKA, Anna; ŁYSIAK, Grzegorz. Bioactive compounds of blueberries: Post-harvest factors influencing the nutritional value of products. **International journal of molecular sciences**, v. 16, n. 8, p. 18642-18663, 2015.

MORENO, Olga; ATARÉS, Lorena; CHIRALT, Amparo. Effect of the incorporation of antimicrobial/antioxidant proteins on the properties of potato starch films. **Carbohydrate polymers**, v. 133, p. 353-364, 2015.

MUELLER, Eduarda et al. Development of ternary polymeric films based on cassava starch, pea flour and green banana flour for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 256, p. 128436, 2024.

NAPPER, Imogen E.; THOMPSON, Richard C. Marine plastic pollution: Other than microplastic. In: **Waste**. Academic Press, 2019. p. 425-442.

NIKMANESH, Ali; BAGHAEI, Homa; MOHAMMADI NAFCHI, Abdorreza. Development and characterization of antioxidant and antibacterial films based on potato starch incorporating *Viola odorata* extract to improve the oxidative and microbiological quality of chicken fillets during refrigerated storage. **Foods**, v. 12, n. 15, p. 2955, 2023.

NOGUEIRA, Gislaíne Ferreira et al. Bioactive films of arrowroot starch and blackberry pulp: Physical, mechanical and barrier properties and stability to pH and sterilization. **Food chemistry**, v. 275, p. 417-425, 2019.

OLIVEIRA FILHO, Josemar Gonçalves; EGEA, Mariana Buranelo. Edible bioactive film with curcumin: a potential “functional” packaging?. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 10, p. 5638, 2022.

PAULO, Ana Flávia Sampaio et al. Edible coatings and films with incorporation of prebiotics—A review. **Food Research International**, v. 148, p. 110629, 2021.

PEANO, Cristiana et al. Evolution of qualitative characteristics during blueberry fruit storage in a modified atmosphere. **Acta Horticult.**, v. 1071, pp. 343-348, 2015.

ROMÃO, Sofia; BETTENCOURT, Ana; RIBEIRO, Isabel AC. Novel features of cellulose-based films as sustainable alternatives for food packaging. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4968, 2022.

- RUIZ-NAVAJAS, Y. et al. In vitro antibacterial and antioxidant properties of chitosan edible films incorporated with *Thymus moroderi* or *Thymus piperella* essential oils. **Food control**, v. 30, n. 2, p. 386-392, 2013.
- SGANZERLA, William Gustavo et al. Bioactive and pH-sensitive films based on carboxymethyl cellulose and blackberry (*Morus nigra* L.) anthocyanin-rich extract: A perspective coating material to improve the shelf life of cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme*). **Biocatalysis and agricultural biotechnology**, v. 33, p. 101989, 2021.
- SHARMA, Maanas; DASH, Kshirod K.; BADWAIK, Laxmikant S. Physicochemical and release behaviour of phytochemical compounds based on black jamun pulp extracts-filled alginate hydrogel beads through vibration dripping extrusion. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 194, p. 715-725, 2022.
- SHI, Junyan et al. Physiological and biochemical changes during fruit maturation and ripening in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). **Food Chemistry**, v. 410, p. 135299, 2023.
- SIRESWAR, Srijita; BISWAS, Sutapa; DEY, Gargi. Adhesion and anti-inflammatory potential of *Lactobacillus rhamnosus* GG in a sea buckthorn based beverage matrix. **Food & function**, v. 11, n. 3, p. 2555-2572, 2020.
- SIRIPATRAWAN, Ubonrat; HARTE, Bruce R. Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract. **Food hydrocolloids**, v. 24, n. 8, p. 770-775, 2010.
- SIVAPRAGASAM, Nilushni; MAQSOOD, Sajid; RUPASINGHE, HP Vasantha. Berry bioactive compounds immobilized in starch matrix for active and intelligent packaging: A review. **Future Foods**, v. 10, p. 100397, 2024.
- SOUKOULIS, Christos et al. Compositional and physicochemical factors governing the viability of *Lactobacillus rhamnosus* GG embedded in starch-protein based edible films. **Food hydrocolloids**, v. 52, p. 876-887, 2016.
- ŠUMIĆ, Zdravko M. et al. Optimization of frozen wild blueberry vacuum drying process. **Hemijaska industrija**, v. 69, n. 1, p. 77-84, 2015.
- SUN, Yanan; ZHANG, Min; MUJUMDAR, Arun. Berry drying: Mechanism, pretreatment, drying technology, nutrient preservation, and mathematical models. **Food Engineering Reviews**, v. 11, p. 61-77, 2019.
- SURIPTO, Suripto et al. Similarity characterization of carboxymethyl cellulose (CMC) synthesized from microcellulose of cassava peel. 2021.
- WANG, Li et al. Effect of vacuum freeze drying and hot air drying on dried mulberry fruit quality. **Plos one**, v. 18, n. 6, p. e0283303, 2023.
- XU, Mengyang et al. Recent advances in anthocyanin-based films and its application in sustainable intelligent food packaging: A review. **Food Control**, p. 110431, 2024.

YOUSEFI, Nazanin et al. Development of carboxymethyl cellulose-based nanocomposite incorporated with ZnO nanoparticles synthesized by cress seed mucilage as green surfactant. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, p. 130849, 2024.

ZAHEDI, Younes. Edible/biodegradable films and coatings from natural hydrocolloids. **Emerging Natural Hydrocolloids: Rheology and Functions**, p. 571-599, 2019.

ZHANG, Jinhua et al. Preparation And Characterization Of Carboxymethyl Cellulose-Based Edible Thin Films Loaded With Rosmarinic Acid And Citral Nanoparticles. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, p. 100821, 2025.

ZHANG, Qiang et al. A systematic study on composition and antioxidant of 6 varieties of highbush blueberries by 3 soil matrixes in China. **Food Chemistry**, p. 142974, 2025.

ZHANG, Xin et al. Desenvolvimento de filmes multifuncionais para embalagens de alimentos baseados em quitosana, nanopartículas de TiO₂ e extrato de casca de ameixa preta rico em antocianina. **Food hydrocolloids** , v. 94, p. 80-92, 2019.

ZENDEBOODI, Fatemeh et al. Probiotic: conceptualization from a new approach. **Current Opinion in Food Science**, v. 32, p. 103-123, 2020.

ZHAO, Mengyao et al. Blueberry anthocyanins extract inhibits acrylamide-induced diverse toxicity in mice by preventing oxidative stress and cytochrome P450 2E1 activation. **Journal of Functional Foods**, v. 14, p. 95-101, 2015.

ZORCĂ, Andra-Gabriela et al. Fabrication of functional edible packaging materials based on Carboxymethyl Cellulose and Pomelo Peel Powder supplemented with Nisin as active compound. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, p. 100836, 2025.