UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS

BIOPOLÍMEROS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA*: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COM POTENCIAL DE IMPACTO SOCIAL E ECONÔMICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

SHÊNIA SANTOS MONTEIRO

Campina Grande, PB
Abril – 2025

SHÊNIA SANTOS MONTEIRO

BIOPOLÍMEROS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DE OPUNTIA COCHENILLIFERA: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COM POTENCIAL DE IMPACTO SOCIAL E ECONÔMICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Orientador (a): Matheus Augusto de Bittencourt Pasquali

Campina Grande - PB

Abril - 2025

M775b Monteiro, Shênia Santos.
Biopolímeros sustentáveis a partir de opuntia cochenillifera: inovação tecnológica com potencial de impacto social e econômico em regiões semiáridas / Shênia Santos Monteiro. - Campina Grande, 2025.
201 f. : il. color

Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.
"Orientação: Prof. Dr. Matheus Augusto de Bittencourt Pasquali."
Referências.

1. Opuntia. 2. Segurança Biológica. 3. Mucilagem. 4. Fermentação. 5. Probióticos. I. Pasquali, Matheus Augusto de Bittencourt. II. Título.

CDU 582.661.56(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Shênia Santos Monteiro

"BIOPOLÍMEROS SUSTENTÁVEIS A PARTIR DE OPUNTIA COCHENILLIFERA: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COM POTENCIAL DE IMPACTO SOCIAL E ECONÔMICO EM REGIÕES SEMIÁRIDAS"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Doutor(a) Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 14 de Abril de 2025

Dr.(a.) **Matheus Augusto de Bittencourt Pasquali** (Orientador PPGEGRN).

Dr.(a.) **Viviane Farias Silva/PPGEGRN**(Examinador Interno).

Dr.(a.) **Thaisa Abrantes da Silva Souza/PPGEGRN**(Examinador Interno).

Dr.(a.) **Rodrigo Juliani Siqueira Dalmolin/UFRN** (Examinador Externo).

Dr.(a.) **Juciano Gasparotto/UFSCPA**(Examinador Externo).

Documento assinado eletronicamente por **MATHEUS AUGUSTO DE BITTENCOURT PASQUALI**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2025, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Juliani Siqueira Dalmolin**, **Usuário Externo**, em 05/05/2025, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **Juciano Gasparotto**, **Usuário Externo**, em 05/05/2025, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE FARIAS SILVA**, **COORDENADORA DE PÓS GRADUAÇÃO**, em 06/05/2025, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

Documento assinado eletronicamente por **THAISA ABRANTES SOUZA GUSMAO**, **PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/05/2025, às 23:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade, informando o código verificador **5350448** e o código CRC **21B65B65**.

Referência: Processo nº 23096.012038/2025-75 SEI nº 5350448

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional, e aos meus mentores, que me ensinaram a importância da busca pelo conhecimento. A todos que acreditam no poder transformador da ciência, esta conquista é também um tributo à inspiração que vocês representam.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese representa o esforço coletivo de muitas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Expresso minha mais profunda gratidão à minha família, cujo incentivo e apoio incondicional foram indispensáveis ao longo desta jornada. Vocês foram minha força e minha motivação para persistir.

Ao meu orientador, Matheus Augusto de Bittencourt Pasquali, agradeço pela orientação excepcional, pela confiança depositada em meu trabalho e pelas contribuições inestimáveis que enriqueceram tanto esta pesquisa quanto minha formação profissional. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

Aos colegas e amigos que dividiram comigo momentos de estudo, debate e aprendizado, sou grato pela troca de ideias, pelo apoio mútuo e pela amizade que tornou esse percurso mais enriquecedor.

Aos professores e membros da Universidade Federal de Campina Grande, por compartilharem conhecimento e promoverem um ambiente de pesquisa desafiador e inspirador, minha sincera admiração e agradecimento.

Agradeço também às agências de fomento, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa, viabilizando as etapas necessárias para sua realização.

Por fim, registro minha gratidão a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, seja por meio de palavras, gestos ou mesmo pela inspiração que trouxeram ao meu caminho. Em especial, agradeço ao Instituto Nacional do Semiárido – INSA, Laboratório de Engenharia de Alimentos – LEA/UEALI/UFCG, Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste – CERTBIO/UAEMa/UFCG e Laboratório de Estresse Oxidativo – Departamento de Bioquímica/UFRGS pela colaboração e parceria.

RESUMO

A utilização de cactos na alimentação humana emerge como uma promissora abordagem para o desenvolvimento de alimentos funcionais. A exploração tecnológica dos cactos como aditivos e ingredientes na indústria alimentícia não apenas valoriza as espécies nativas do semiárido brasileiro, mas também impulsiona o crescimento econômico da região, incentivando a agricultura de cactos. Esta tese investigou as propriedades físico-químicas, biológicas e aplicacionais da mucilagem de *Opuntia cochenillifera*, abrangendo sua extração, modificação por fermentação e uso em revestimentos comestíveis. A mucilagem foi extraída de cladódios utilizando água à temperatura ambiente e agitação contínua, sem o uso de solventes agressivos, apresentando viabilidade celular superior a 70% em concentrações de 0,05 a 5000 µg/mL, conforme ensaios de MTT (3-[4,5-dimetiltiazol-2-il]-2,5 difenil-tetrazólio) e SRB (sulforrodamina B). Os estudos reológicos mostraram comportamento reológico não newtoniano com afinamento por cisalhamento e sensibilidade a variações de temperatura, pH e concentração. Apesar da segurança biológica, revelou insuficiência no potencial antioxidante contra o estresse oxidativo. A fermentação com *Lactobacillus gasseri* a 37 °C por 24 horas promoveu redução de monossacarídeos como galactose (-21,9%), arabinose (-20,5%) e glicose (-0,8%). As partículas da mucilagem fermentada (MOCF) tornaram-se mais densas, com menor tamanho médio (48,36 ± 48,57 µm) em comparação à mucilagem não fermentada (57,77 ± 21,96 µm).), maior solubilidade, estabilidade térmica e capacidade de emulsificação (60% no MOCF contra 40% no MOC). Na aplicação prática, a mucilagem fermentada foi combinada com amido para desenvolver revestimentos comestíveis, avaliados em melões minimamente processados armazenados a 5 °C por 12 dias. Os filmes apresentaram alta solubilidade em água (96,43%) e maior permeabilidade ao vapor de água (6,13 g/kPa.h.m²), enquanto os frutos revestidos mantiveram firmeza, menor perda de massa e maior retenção de compostos fenólicos e antioxidantes, prolongando a vida útil e preservando a qualidade. Os resultados destacam a mucilagem de *O. cochenillifera* como um biopolímero sustentável, seguro e versátil, com aplicações promissoras em alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos, contribuindo significativamente para soluções inovadoras e ambientalmente corretas. Além disso, essas descobertas demonstram que a fermentação modifica efetivamente a mucilagem, expandindo seu uso em diversas aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: *Opuntia*, mucilagem, probióticos, segurança biológica, fermentação.

ABSTRACT

The use of cacti in human nutrition is emerging as a promising approach for the development of functional foods. The technological exploration of cacti as additives and ingredients in the food industry not only enhances the value of native species from the Brazilian semiarid region, but also boosts the region's economic growth by encouraging cactus farming. This thesis investigated the physicochemical, biological and application properties of *Opuntia cochenillifera* mucilage, including its extraction, modification by fermentation and use in edible coatings. The mucilage was extracted from cladodes using water at room temperature and continuous stirring, without the use of aggressive solvents, showing cell viability greater than 70% at concentrations of 0.05 to 5000 μg/mL, according to MTT (3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5 diphenyltetrazolium) and SRB (sulforhodamine B) assays. Rheological studies showed non-Newtonian rheological behavior with shear thinning and sensitivity to variations in temperature, pH and concentration. Despite biological safety, it revealed insufficient antioxidant potential against oxidative stress. Fermentation with *Lactobacillus gasseri* at 37 °C for 24 h promoted a reduction of monosaccharides such as galactose (-21.9%), arabinose (-20.5%) and glucose (-0.8%). The fermented mucilage particles (MOCF) became denser, with a smaller average size (48.36 ± 48.57 μm) compared to the unfermented mucilage (57.77 ± 21.96 μm), greater solubility, thermal stability and emulsification capacity (60% in MOCF versus 40% in MOC). In practical application, the fermented mucilage was combined with starch to develop edible coatings, evaluated in minimally processed melons stored at 5 °C for 12 days. The films showed high water solubility (96.43%) and greater water vapor permeability (6.13 g/kPa.h.m²), while the coated fruits maintained firmness, less mass loss and greater retention of phenolic compounds and antioxidants, extending shelf life and preserving quality. The results highlight *O. cochenillifera* mucilage as a sustainable, safe and versatile biopolymer with promising applications in food, cosmetics and pharmaceuticals, contributing significantly to innovative and environmentally friendly solutions. Furthermore, these findings demonstrate that fermentation effectively modifies mucilage, expanding its use in diverse technological applications.

Keywords: Opuntia, mucilage, probiotics, biosafety, fermentation.

Sumário

RESUMO **8**

ABSTRACT **9**

LISTA DE TABELAS **16**

LISTA DE FIGURAS **18**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS **22**

CAPÍTULO I - CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA **24**

1. INTRODUÇÃO GERAL **24**

1.1. Inovação a ineditismo 25

1.2. Aspectos socioeconômicos e ambientais 26

1.3. Objetivos do desenvolvimento sustentável 27

1.3.1. ODS 2: Fome zero e Agricultura Sustentável 27

1.3.2. ODS 3: Saúde e Bem-Estar 28

1.3.3. ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura 28

1.3.4. ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis 28

1.3.5. ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima 28

2. OBJETIVOS **29**

2.1 Geral 29

2.2. Específicos 29

3. REVISÃO DE LITERATURA **30**

3.1. Desafios do presente e futuro para a produção sustentável de alimentos funcionais 30

3.1.1. Potencial de plantas subutilizadas para o desenvolvimento de alimentos funcionais 31

3.1.1.1. Importância dos cactos no semiárido 32

3.1.1.2. Desafios sobre o uso de alimentos não convencionais e a relação com os ODS nas Nações Unidas 33

3.1.1.3. Composição e bioatividade dos componentes de cactos 35

3.1.1.4. Potencial prebiótico de componentes de cactos 37

3.1.1.5. Tendências futuras para aplicação tecnológica de ingredientes derivados de cactos 43

3.2.1. Paraprobióticos e postbióticos - Panorama da literatura atual 45

3.2.1.1. O caminho para o uso de postbióticos e paraprobióticos na segurança alimentar 48

3.3. Biopreservação usando filmes com mucilagem 51
4. REFERÊNCIAS 52

CAPÍTULO II - METODOLOGIA GERAL 68
1. METODOLOGIA GERAL 68
1.1. Extração e caracterização da mucilagem 69
1.1.1. Extração da mucilagem 69
1.1.2. Composição química e propriedades tecnológicas 69
1.1.3. Propriedades reológicas da mucilagem 70
1.1.4. Viabilidade celular e atividade antioxidante 70
1.2. Fermentação com *Lactobacillus gasseri* 71
1.2.1. Caracterização físico-químicas e propriedades térmicas 71
1.2.2. Perfil de textura e propriedades funcionais 71
1.3. Avaliação e aplicação de filmes comestíveis a base de mucilagem 71
1.3.1. Preparo dos filmes e caracterização 71
1.3.2. Aplicação dos filmes comestíveis em melões minimamente processados 72
1.4. Análise estatística 72
2. REFERÊNCIAS 73

CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO DA MUCILAGEM DE CLADÓDIOS DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA*: COMPORTAMENTO REOLÓGICO, CITOTOXICIDADE E POTENCIAL ANTIOXIDANTE 76
RESUMO 76
ABSTRACT 77
1. INTRODUÇÃO 78
2. MATERIAIS E MÉTODOS 80
2.1. Materiais 80
2.2. Extração de mucilagem 80
2.3. Composição química 81
2.4. Propriedades tecnológicas 81
2.4.1. Densidade aparente e compactada 81
2.4.2. Fluidez e coesão 81
2.4.3. Capacidade de absorção de água 81
2.4.4. Índice de inchaço 82

2.5. Propriedades reológicas da mucilagem 82
2.6. Viabilidade celular 84
2.6.1. Ensaio de redução de MTT 84
2.6.2. Ensaio de incorporação da sulfarrodamina B (SRB) 84
2.7. Determinação da peroxidação lipídica 85
2.8. Atividade de eliminação de radicais hidroxila 85
2.9. Análise estatística 85
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 86
3.1. Composição centesimal da mucilagem em pó 86
3.2. Propriedades físicas do pó de mucilagem 88
3.3. Viscosidade de cisalhamento 89
3.3.1. Modelo de viscosidade de Cross 90
3.3.2. Modelagem polinomial de segunda ordem 96
3.4. Varredura de frequência oscilatória 99
3.5. Viabilidade celular 102
3.6. Peroxidação lipídica 104
3.7. Atividade de eliminação de radicais hidroxilo 105
4. CONCLUSÕES 106
5. REFERÊNCIAS 107

CAPÍTULO IV - FERMENTAÇÃO DE MUCILAGEM DE CLADÓDIOS DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA* COM *LACTOBACILLUS GASSERI*: MODIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TECNO-FUNCIONAIS 119
RESUMO 119
ABSTRACT 120
1. INTRODUÇÃO 121
2. MATERIAIS E METODOS 123
2.1. Materiais 123
2.2. Extração da mucilagem 123
2.3. Características físico-químicas da mucilagem em pó 125
2.3.1. Composição química 125
2.3.2. Conteúdo de água e cor 125
2.4. Morfologia por microscopia eletronica de varredura (MEV) 126
2.5. Análise térmica 126

2.6. Calorimetria diferencial de varredura (DSC) 126
2.7. Análise de difração de raios X 126
2.8. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) 126
2.9. Análise de textura 127
2.10.Propriedades funcionais 127
2.10.1.Solubilidade 127
2.10.2.Propriedades de espuma 127
2.10.3.Propriedade emulsificante 128
2.11.Análise estatística 129
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 129
3.1. Viabilidade celular 129
3.2. Parâmetros físico-químicos 130
3.3. Composição de monossacarídeos e ácidos carboxílicos 132
3.4. Microscopia eletronica de varredura (MEV) 134
3.5. Analise de difração raio-X 136
3.6. Análise FTIR 137
3.7. Análise térmica 139
3.8. Calorimetria diferencial de varredura (DSC) 141
3.9. Características de textura 143
3.10.Propriedades tecnológicas 144
3.10.1.Solubilidade 145
3.10.2.Capacidade e estabilidade de espuma 146
3.10.3.Capacidade e estabilidade de emulsão 147
4. CONCLUSÃO 148
5. REFERÊNCIAS 149

CAPÍTULO V - APLICAÇÃO DE FILMES COMESTÍVEIS DE MUCILAGEM FERMENTADA DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA* NA CONSERVAÇÃO DE FRUTAS MINIMAMENTE PROCESSADAS 161
RESUMO 161
ABSTRACTS 162
1. INTRODUÇÃO 163
2. MATERIAIS E MÉTODOS 165
2.1. Materiais 165

2.2. Extração da mucilagem e fermentação 165
2.3. Preparação dos filmes com MOC e MOCF 166
2.4. Caracterização dos filmes 166
2.4.1. Medida da espessura e teor de umidade dos filmes 166
2.4.2. Solubilidade em água 167
2.4.3. Permeabilidade ao vapor de água (WVP) 167
2.4.4. Medidas de cor e opacidade 167
2.5. Microscopia eletronica de varredura (MEV) 168
2.6. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) 168
2.7. Propriedades mecânicas 168
2.8. Atividade antibacteriana 169
2.9. Aplicabilidade do filme comestível no revestimento de fruto pronto para consumo durante armazenamento refrigerado 169
2.10. Determinação dos parâmetros de qualidade do fruto minimamente processado ... 170
2.10.1. Perda de massa, firmeza, aspecto visual, sólidos solúveis totais, pH e acidez titulável 170
2.10.2. Compostos fenólicos e atividade antioxidante 170
2.11. Análise estatística 171
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 172
3.1. Propriedades físicas dos filmes 172
3.1.1. Espessura 172
3.1.2. Teor de água e solubilidade 173
3.1.3. Permeabilidade ao vapor de água 173
3.1.4. Análise de cor e opacidade 174
3.2. Microscopia eletronica de varredura (MEV) 175
4.3. FTIR 177
4.4. Propriedades mecânicas 179
4.5. Atividade antibacteriana 180
4.6. Aplicação dos filmes em melão minimamente processado 182
4.6.1. Análise de cor e aspecto visual 182
4.6.2. Perda de massa e firmeza 183
4.6.3. Características físico-químicas, compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante 185
4. CONCLUSÃO 188

CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS 198
1. CONSIDERAÇÕES FINAIS 198
APÊNDICES 200
1. APÊNDICE I 200
2. APÊNDICE II 201

LISTA DE TABELAS

Capítulo I - Contextualização da pesquisa

Pág.

Tabela 1. Estudos sobre o potencial prebiótico de cactos..... 39

Tabela 2. Evidências de potenciais efeitos benéficos à saúde do uso de derivados de cactos..... 41

Capítulo III Caracterização da mucilagem de cladódios de *Opuntia cochenillifera*: Comportamento reológico, citotoxicidade e potencial antioxidante

Tabela 1. Composição centesimal e propriedades tecnológicas do MOC..... 86

Tabela 2. Parâmetros de Cross do gel MOC sob a influência de diferentes valores de pH, temperatura e concentração, determinados pelo teste de taxa de cisalhamento constante..... 92

Tabela 3. Coeficientes do modelo de regressão polinomial de segunda ordem para parâmetros de viscosidade..... 97

Capítulo IV - Fermentação de mucilagem de cladódios de *Opuntia cochenillifera* com *Lactobacillus gasseri*: Modificação de propriedades físico-químicas e tecno-funcionais

Tabela 1. Composição química e bioquímica da mucilagem controlada (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF)..... 130

Tabela 2. Diferenças estruturais na área de absorbância e FWHM das bandas de FTIR da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF)..... 138

Tabela 3. Propriedades texturais de soluções de 2% de mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF) de *O. cochenillifera*..... 143

Capítulo V - Aplicação de filmes comestíveis de mucilagem fermentada de *Opuntia cochenillifera* na conservação de frutas minimamente processadas

Tabela 1. Propriedades físicas dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido..... 172

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido..... 179

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I - Contextualização da pesquisa

Pág.

Figura 1. Diversidade morfológica das principais espécies de cactos..... 33

Figura 2. Principais compostos presentes em cactos. As estruturas químicas foram desenhadas utilizando o PubChem (https://pubchem-ncbi-nlm-nih.ez292.periodicos.capes.gov.br)..... 36

Figura 3. Visualização da rede de palavras-chave. A) cluster das principais temáticas e B) evolução do tema por ano..... 47

Capítulo II – Metodologia geral

Figura 1. Fluxograma esquemático das etapas de processamento da mucilagem de *Opuntia cochenillifera* e sua aplicação como revestimento comestível em melão minimamente processado (*Cucumis melo* var. inodorus). Etapa 1: Coleta dos cladódios no INSA, seguida por sanitização, remoção de espinhos e casca, corte e extração da mucilagem. Etapa 2: Precipitação da mucilagem, secagem (50 °C/24 h), tratamento térmico (80 °C/15 min) e fermentação com *Lactobacillus gasseri* (37 °C/48 h). Etapa 3: Processamento mínimo do melão, produção das soluções de revestimento com diferentes formulações e aplicação dos revestimentos nos cubos de melão para avaliação da conservação pós-processamento. 68

Capítulo III - Caracterização da mucilagem de cladódios de *Opuntia cochenillifera*: Comportamento reológico, citotoxicidade e potencial antioxidante

Figura 1. Curvas de fluxo de amostras MOC sob condições variáveis de temperatura, pH e concentração: (A) Viscosidade de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento; (B) Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento..... 90

Figura 2. Curvas de fluxo de géis MOC mostrando viscosidade de cisalhamento em função das taxas de cisalhamento com ajuste de modelo de Cross para diferentes condições de temperatura, pH e concentração..... 91

Figura 3. Gráficos tridimensionais representando a superfície de resposta para os efeitos combinados de temperatura, pH e concentração em A) Viscosidade a taxa de cisalhamento zero (Pa.s), B) Taxa de cisalhamento crítica (s^{-1}) e C) índice de fluxo..... 95

Figura 4. Espectros mecânicos de géis de mucilagem MOC sob temperaturas, valores de pH e concentrações variados, mostrando (A) módulo de armazenamento (G′) e (B) módulo de perda (G") como funções da frequência angular em todas as amostras e (C) módulo de armazenamento, módulo de perda e viscosidade complexa para amostras individuais. Círculos preenchidos indicam módulo de armazenamento (G'), círculos vazios indicam módulo de perda (G") e triângulos indicam viscosidade complexa..... 100

Figura 5. Impacto do MOC na viabilidade celular SH-SY5Y. Avaliação da redução de MTT (A) e assimilação de SRB (B) em células SH-SY5Y tratadas com concentrações crescentes (0,05–5000,0 μg/mL) por 24 h. Os valores apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=6. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA one-way com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$. Não houve diferença significativa entre as concentrações de mucilagem e o grupo controle para o ensaio de MTT..... 103

Figura 6. Taxa de geração de malondialdeído (MDA) induzida pela ação da AAPH. A oxidação lipídica foi desencadeada pela presença do radical livre AAPH, tanto na ausência (controle induzido) quanto na presença de concentrações crescentes de extratos MOC. Trolox® na concentração de 200 nM foi empregado como composto antioxidante de referência. Os valores apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=3. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA one-way com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ e *** $p < 0,001$, em comparação com o grupo controle..... 104

Figura 7. Atividade de eliminação de radicais hidroxila medida pela degradação oxidativa da 2-desoxi-D-ribose (2-DR) mediada por radicais hidroxila. O controle induzido é a produção de MDA a partir da oxidação de 2-DR com $FeSO_4$ e H_2O_2. Outro grupo representa a produção de MDA por Trolox 200 nM como antioxidante padrão. Concentrações crescentes de MOC foram avaliadas neste ensaio. Os valores 105

apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=3. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA de duas vias com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001 e **** p < 0,0001, em comparação com o grupo controle.....

Capítulo IV - Fermentação de mucilagem de cladódios de *Opuntia cochenillifera* com *Lactobacillus gasseri*: Modificação de propriedades físico-químicas e tecno-funcionais

---

Figura 1. Viability of *L. gasseri* in the mucilage of *O. cochenillifera* at three distinct time points: (i) initial (0 h), (ii) following 24 h of fermentation, and (iii) after heat treatment at 80 °C for 15 minutes..... 130

Figura 2. Microestruturas da mucilagem controle (MOC) (A, B) e mucilagem fermentada (MOCF) (C, D)..... 135

Figura 3. Difratograma de raios X da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF)..... 136

Figura 4. Espectros de FTIR do controle de mucilagem (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF)..... 137

Figura 5. Curvas TGA e DTG da mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF). As linhas sólidas representam a análise TGA e as linhas pontilhadas representam as curvas DTG..... 139

Figura 6. Curvas DSC para mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF..... 141

Figura 7. Propriedades funcionais da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF): (A) solubilidade, (B) capacidade de formação de espuma e estabilidade, (C) capacidade emulsificante e (D) estabilidade da emulsão preparada com diferentes proporções (óleo/mucilagem). Letras diferentes entre MOC e MOCF representam diferença estatisticamente significativa (p < 0,05)..... 145

Capítulo V - Filmes comestíveis de mucilagem fermentada de *Opuntia cochenillifera* para extensão da vida útil de frutas minimamente processadas

---

Figura 1. Micrografias das superfícies dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S, A,B), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S, C,D) e apenas amido (E,F), com ampliação de 500× e 2000×..... 176

Figura 2. Espectros FTIR dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido..... 178

Figura 3. Halo de inibição dos filmes de mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido contra as bactérias E. coli e S. aureus. Discos de vancomicina 30 foram usados como controle positivo e discos de papel filtro foram utilizados como controle negativo (controle). Letras diferentes denotam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey..... 181

Figura 4. Aspecto visual (A) e o ângulo de Hue (B) de melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) ao longo de 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C)..... 182

Figura 5. Perda de massa e firmeza em melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) ao longo de 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C). * Significa que o controle foi estatisticamente diferente ($p < 0,05$) de todas as amostras tratadas, pelo teste de Tukey.. 184

Figura 6. Parâmetros físico-químicos, compostos fenólicos e capacidade antioxidantes de melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) durante 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C). pH (6A), acidez titulável (TTA, 6B), sólidos solúveis totais (TSS, 6C), compostos fenólicos totais (6D), $ABTS^+$ (6E) e FRAP (6F)..... 186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2-DR – 2-desoxirribose

CE – Capacidade emulsificante

DSC – Calorimetria diferencial de varredura

DRX – Difração por raio X

EE – Estabilidade da espuma

FE – Capacidade de formação de espuma

FTIR – Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

HCl – Ácido clorídrico

HPLC – Cromatografia líquida de alta eficiência

HR – Coeficiente de Hausner

IC – Índice de Carr

INSA – Instituto Nacional do Semiárido

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MOC – Mucilagem de *Opuntia cochenillifera*

MOC-S – Filme de mucilagem de *Opuntia cochenillifera* com amido de milho

MOCF – Mucilagem de *Opuntia cochenillifera* fermentada

MOCF-S – Filme de mucilagem de *Opuntia cochenillifera* fermentada com amido de milho

MTT – 3-[4,5-dimetiltiazol-2-il]-2,5 difenil-tetrazólio

NaOH – Hidróxido de sódio

ODS – Objetivos do desenvolvimento sustentável

PET – Polietileno tereftalato

SE – Estabilidade da emulsão

SI – Índice de inchamento

SRB – Sulforrodamina B

TGA – Análise por termogravimétrica

TBARS – Substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico

TPA – Análise do perfil de textura

UFC – Unidade formadora de colônia

WRC – Capacidade de absorção de água

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescente interesse por estilos de vida mais saudáveis também tem promovido a disseminação de abordagens sustentáveis na gestão de recursos naturais. Novas concepções sobre o papel humano no mundo têm influenciado os consumidores a fazer escolhas que incluam regularmente alimentos funcionais em suas dietas. Isso significa que esses alimentos têm o potencial de impactar positivamente a saúde, além de fornecer nutrientes essenciais, contribuindo para a promoção da saúde ideal, o que é particularmente importante em regiões onde problemas de saúde relacionado à dieta são prevalentes (Granato et al., 2017).

Os cactos podem representar uma importante fonte de matéria-prima para produção de alimentos funcionais, pois seu consumo contribui para a ingestão de fibras dietéticas, minerais, compostos fenólicos, ácido ascórbico, e outros componentes antioxidantes relacionados a efeitos hipoglicêmicos, antiobesogênicos e anti-inflamatórios (Albuquerque et al., 2022). Além disso, os cactos desempenham um papel ecológico na proteção do solo e têm potencial para absorver CO_2, contribuindo para a redução do aquecimento global (Hernández-Becerra et al. 2022). Valorizar essas plantas é fundamental para o futuro da produção de alimentos sustentáveis.

No entanto, na alimentação humana, os cactos são considerados por muitos, um alimento não convencional, ou seja, plantas comestíveis desconhecidas ou subutilizadas, especialmente por pessoas de áreas urbanas, o que resulta em baixa popularidade e conhecimento sobre suas propriedades (Barbosa et al. 2021). Assim, a introdução dessa planta no desenvolvimento de alimentos funcionais pode ajudar a gerar interesse e estimular o consumo. Os cladódios, por exemplo, podem ser utilizados pela indústria de alimentos para extração da mucilagem, um heteropolissacarídeo linear formando um hidrocoloide, cujo monossacarídeo principal é o ácido galacturônico (Caldera-Villalobos et al. 2022). Outros monossacarídeos da mucilagem de cactos, especialmente do gênero *Opuntia*, inclui xilose, rhamnose, galactose e arabinose (Cruz-Rubio et al. 2021). A mucilagem é um sistema líquido coloidal, lipofílico e hidrogel que fornece propriedades funcionais e reológicas únicas a produtos nos quais são usados, devido a viscosidade de seu gel. Seu uso permite a modificação

da textura de alimentos, evita a floculação e reduz a tensão superficial e interfacial em alimentos (Lozano et al. 2020).

Embora o potencial de mucilagens extraída de cactos tenha sido documento, poucos estudos avaliaram a mucilagem de *O. cochenillifera* e suas características físico-químicas, reológicas, bioativas e tecnológicas. A escassez de pesquisas detalhadas, especialmente sobre a modificação da mucilagem por fermentação com microrganismos probióticos, destaca uma lacuna relevante no conhecimento cientifico e tecnológico, justificando a realização de estudos aprofundados para explorar suas propriedades e ampliar suas aplicações práticas.

Este trabalho se propõe a investigar as propriedades reológicas, citotóxicas e antioxidantes da mucilagem de *O. cochenillifera*, bem como o impacto da fermentação com *Lactobacillus gasseri* sobre suas características químicas, tecnológicas e morfológicas. A fermentação é uma abordagem sustentável que pode melhorar a funcionalidade e o valor nutricional da mucilagem, possibilitando o desenvolvimento de sistemas alimentares mais saudáveis e ambientalmente responsáveis. Além disso, o uso da mucilagem para o desenvolvimento de filmes comestíveis representa uma solução promissora para a conservação de alimentos frescos.

Nesse contexto, a aplicação da mucilagem fermentada no desenvolvimento de biofilmes comestíveis se justifica, especialmente diante da curta vida útil de frutas minimamente processadas, que são altamente perecíveis e suscetíveis à degradação microbiológica e oxidativa (Flórez et al., 2022). A utilização de filmes comestíveis atua como uma barreira protetora, contribuindo para a preservação da qualidade sensorial e nutricional dos alimentos, além de prolongar sua vida de prateleira (Chettri; Sharma; Mohite, 2023). Essa extensão da durabilidade reduz significativamente a geração de resíduos orgânicos, promovendo uma cadeia produtiva mais sustentável e alinhada com os princípios da economia circular (Sapna et al., 2024). Ao integrar a exploração de uma matéria-prima subutilizada, a aplicação de biotecnologia e a busca por soluções sustentáveis, este estudo contribui para o avanço da ciência dos alimentos funcionais e para o cumprimento de objetivos globais de sustentabilidade. A utilização de *Opuntia cochenillifera* como base para o desenvolvimento de produtos inovadores, incluindo revestimentos comestíveis para a extensão da vida útil de frutas, reforça seu potencial como alternativa versátil, sustentável e funcional para a indústria alimentícia moderna.

1.1. Inovação a ineditismo

A mucilagem de cactos, rica em oligossacarídeos e polissacarídeos naturais, apresenta um notável potencial para aplicações inovadoras na indústria de alimentos funcionais. Estudos

como os de Cruz-Rubio et al. (2020) investigaram os efeitos de técnicas de secagem de cladódios de espécies do gênero *Opuntia* sobre o potencial prebiótico dessa mucilagem, constatando que todas as amostras avaliadas promoveram o crescimento de cepas probióticas. Os autores também destacaram que parâmetros como temperatura e tempo de secagem influenciam significativamente as características do pó e seu potencial prebiótico. Posteriormente, Cruz-Rubio et al. (2021) demonstraram que as características estruturais e a composição de monossacarídeos da mucilagem impactam mais a sua fermentabilidade por cepas probióticas do que as dimensões das moléculas.

Esses avanços evidenciam a possibilidade de desenvolvimento de novos produtos funcionais, obtidos por meio da fermentação da mucilagem com probióticos, com consequente adição de paraprobióticos e postbióticos. Essa abordagem tem o potencial de gerar produtos com propriedades inéditas e alegações de benefícios à saúde, expandindo o portfólio de ingredientes funcionais disponíveis para a indústria. Até o momento, a literatura tem se concentrado no estudo das propriedades funcionais da mucilagem extraída, enquanto a introdução de novos elementos, como paraprobióticos e postbióticos, pode ampliar consideravelmente o escopo de aplicações e funcionalidades desse insumo.

Do ponto de vista cientifico e tecnológico, a transformação de cactos em alimentos ou insumos funcionais exige o desenvolvimento de métodos de processamento inovadores, como a fermentação com probióticos. Esse processo não apenas promove a criação de novos produtos, mas também gera conhecimentos inéditos sobre alimentos funcionais derivados de cactos. Além disso, a exploração do potencial funcional e nutricional desses alimentos alinha-se à crescente demanda por soluções sustentáveis. Os cactos, por sua capacidade de crescer em ambientes áridos e sua resistência à seca, apresentam-se como uma alternativa sustentável, reduzindo a pressão sobre recursos naturais e contribuindo para a segurança alimentar.

Portanto, este projeto propõe a utilização de cactos como matéria-prima na indústria de alimentos funcionais, visando à promoção da saúde e à inovação tecnológica. Essa abordagem não apenas beneficia as comunidades locais e dinamiza a economia regional, mas também reforça o compromisso com soluções alimentares saudáveis e sustentáveis, respondendo aos desafios da indústria alimentícia moderna.

1.2. Aspectos socioeconômicos e ambientais

O uso de cactos como insumo para a indústria de alimentos pode contribuir socialmente com regiões pouco desenvolvidas, tornando os alimentos funcionais mais acessíveis às populações, incluindo aquelas que vivem em áreas onde os cactos são abundantes. Isso pode

melhorar a qualidade da dieta de comunidades carentes. Em termos econômicos, o cultivo de cactos para a produção de alimentos funcionais pode diversificar a economia local e reduzir a dependência de setores econômicos tradicionais. Com isso, a indústria de alimentos funcionais cria oportunidades para a comercialização de produtos inovadores e diferenciados, contribuindo para a economia local e nacional.

Ambientalmente, a *O. cochenillifera* destaca-se por sua resistência a climas áridos e necessidade reduzida de água, contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e mitigando os efeitos da desertificação. Seu cultivo em solos degradados promove práticas agrícolas sustentáveis, enquanto sua utilização reduz o desperdício de recursos naturais. Além disso, a produção de alimentos funcionais a partir desse cacto apresenta uma pegada de carbono significativamente menor quando comparada a culturas convencionais, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade.

Essa abordagem não apenas agrega valor a uma planta subutilizada, mas também promove inovação na indústria de alimentos funcionais, integrando benefícios sociais, econômicos e ambientais. A *O. cochenillifera*, assim, torna-se um exemplo promissor de como a utilização sustentável de recursos naturais pode contribuir para soluções saudáveis e ecológicas na alimentação moderna.

1.3. Objetivos do desenvolvimento sustentável

A exploração de cactos subutilizados, como *O. cochenillifera*, para alimentação humana e extração de mucilagem e posterior fermentação com probióticos alinha-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especialmente em relação à promoção de práticas sustentáveis, combate à fome e inovação industrial. Este trabalho atende aos seguintes ODS:

1.3.1. ODS 2: Fome zero e Agricultura Sustentável

A valorização da *O. cochenillifera* promove a segurança alimentar em regiões áridas e semiáridas, onde o cacto é uma fonte abundante e subutilizada. Seu cultivo, adaptado a condições de seca, pode contemplar a dieta de populações vulneráveis e melhorar a nutrição por meio de produtos inovadores com benefícios para a saúde.

1.3.2. ODS 3: Saúde e Bem-Estar

O desenvolvimento de alimentos funcionais a partir da mucilagem fermentada oferece benefícios diretos para a saúde, como a modulação da microbiota intestinal, fortalecimento do sistema imunológico e redução do risco de doenças crônicas.

1.3.3. ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura

A pesquisa e desenvolvimento de novos produtos a partir de cactos subutilizados fomentam a inovação tecnológica na indústria de alimentos funcionais. Essa abordagem incentiva o uso de biotecnologias, como a fermentação com probióticos, para agregar valor à recursos naturais locais, criando oportunidades econômicas e industriais.

1.3.4. ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis

A valorização de recursos subutilizados, como a *O. cochenillifera*, reduz o desperdício e promove o uso eficiente de recursos naturais. A produção de insumos funcionais com baixa pegada ambiental é uma estratégia alinhada ao consumo e produção responsáveis.

1.3.5. ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima

O cultivo de cactos, que requer menos água e insumos do que culturas tradicionais, contribui para a redução da pegada de carbono na produção de alimentos. Além disso, o uso dessa planta em regiões vulneráveis à desertificação ajuda na adaptação às mudanças climáticas e na preservação ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Investigar as propriedades da mucilagem extraída de *Opuntia cochenillifera*, com ênfase na avaliação dos efeitos da fermentação com *Lactobacillus gasseri* sobre suas características químicas, tecnológicas e biológicas, bem como seu potencial de aplicação como componente de filmes comestíveis voltados à conservação de alimentos minimamente processados. A pesquisa visa o desenvolvimento de soluções sustentáveis com viabilidade de escalabilidade industrial, contribuindo para o fortalecimento da bioeconomia regional e promovendo impactos positivos em comunidades do semiárido brasileiro.

2.2. Específicos

- Avaliar as propriedades físico-químicas, reológicas e biológicas da mucilagem extraída de *O. cochenillifera*, considerando a influência de temperatura, pH e concentração, bem como seu potencial antioxidante e citotóxico.
- Investigar os efeitos da fermentação com *Lactobacillus gasseri* nas características químicas, morfológicas, térmicas e tecnológicas da mucilagem, explorando seu potencial para aplicações mais sustentáveis e saudáveis.
- Desenvolver filmes comestíveis baseados em mucilagem fermentada e não fermentada combinada com amido de milho, avaliando suas propriedades físicas, ópticas, químicas, mecânicas e microestruturais.
- Avaliar a eficácia dos filmes como revestimentos comestíveis em melões minimamente processados, analisando sua capacidade de conservar a qualidade e prolongar a vida útil dos frutos durante o armazenamento refrigerado

.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, como resultado da revisão da literatura realizada, foram publicados dois artigos científicos de revisão, apresentados a seguir:

Monteiro, S. S.; Almeida, R. L.; Santos, N. C.; Pereira, E. M.; Silva, A. P.; Oliveira, H. M. L.; Pasquali, M. A. de B. New Functional Foods with Cactus Components: Sustainable Perspectives and Future Trends**. Foods**, vol. 12, no. 13, p. 2494, 27 Jun. 2023. https://doi.org/10.3390/foods12132494.

Monteiro, S. S.; Schnorr, C. E.; Pasquali, M. A. de B. Paraprobiotics and Postbiotics—Current State of Scientific Research and Future Trends toward the Development of Functional Foods. **Foods**, vol. 12, no. 12, p. 2394, 16 Jun. 2023. https://doi.org/10.3390/foods12122394.

3.1. Desafios do presente e futuro para a produção sustentável de alimentos funcionais

Existe uma necessidade global e urgente de transformar o sistema de produção de alimentos, para produzir em quantidades suficientes para a população mundial de forma sustentável e contribuindo para a redução de doenças relacionadas à alimentação, isso porque a taxa de crescimento populacional está pressionando um planeta com recursos finitos, impactado por mudanças climáticas (Meléndez-Martínez et al. 2021). Nesse sentido, a sustentabilidade envolve passivos relacionados ao meio ambiente, perspectivas sociais e preocupações financeiras (Amui et al. 2017). As preocupações ecológicas enfatizam a redução da pegada de carbono, enquanto os valores sociais indicam a saúde e segurança alimentar para todos, e os valores econômicos apontam para um retorno sobre o investimento, que deve ser alto (Almuflih et al. 2022).

O crescimento do conhecimento sobre questões ambientais, tem conduzido os consumidores a mudar seus hábitos de compra para reduzir o impacto ambiental negativo (Lee et al., 2021), em termo de alimentação esse cenário é mais evidente, devido ao reconhecimento dos grandes impactos ao meio ambiente oriundos da produção de alimentos. Portanto, é necessário reduzir as perdas e o desperdício de alimentos e diversificar a nutrição humana para culturas ou ingredientes ainda subutilizados (Aschemann-Witzel; Peschel 2019). Nesse passo, é importante tornar esse processo de produção de alimentos também sustentável, do ponto de vista dos impactos sobre recursos naturais, e isso se tornou uma prioridade nas agendas de todos os formuladores de

políticas (Capozzi, 2022). Para isso, recomenda-se a utilização de todos os resíduos adequados para consumo humano e utilização de materiais subutilizados a serem inseridos ou reintroduzidos na cadeia alimentar (EUROPEAN UNION 2008).

Esforços tem sido feito para o desenvolvimento de alimentos funcionais, uma vez que as matérias-primas utilizadas na produção desses alimentos são geralmente oriundas de resíduos, plantas subutilizadas e/ou produtos de origem vegetal, ou animal (Putnik; Kovacevic, 2021). Alimentos funcionais são alimentos com compostos bioativos adicionados que proporcionam um benefício clinicamente comprovado para a saúde (Martirosyan et al., 2021). Segundo Essa et al. (2021), os alimentos funcionais são classificados em três categorias: (1) alimentos convencionais, como frutas, vegetais, peixes, grãos que não sofrem modificações e que têm potentes benefícios para à saúde. (2) alimentos modificados, são aqueles que foram enriquecidos ou fortificados com um nutriente específico, com a finalidade de promover benefícios à saúde. (3) ingredientes alimentares, são produtos prebióticos, definidos como componentes alimentares que servem de substrato para o crescimento e a atividade de um único ou um grupo específico de microrganismos resistentes ao trato gastrointestinal, com capacidade de melhorar a condição de saúde do hospedeiro.

3.1.1. Potencial de plantas subutilizadas para o desenvolvimento de alimentos funcionais

A exploração de espécies vegetais subutilizadas é uma forma de garantir o fornecimento de alimentos em quantidade e de qualidade assegurada (Araújo et al. 2021). Espécies de cactos como do gênero *Opuntia* são utilizadas como comida e na medicina popular, devido a sua composição química que lhe dá um enorme potencial para aplicação como alimento funcional (Hernández-Becerra et al. 2022). O gênero *Opuntia* é retratado por Daniloski et al. (2022), como uma das espécies de cactos mais importantes na agricultura comercial por possuir muitos benéficos que estão relacionadas a seu alto teor de fibras, características fitoquímicas, composição nutricional e presença de diferentes aminoácidos livre, encontrados no caule, frutos e flores (Daniloski et al. 2022). No entanto, os cactos em geral são explorados especialmente como recurso de forragem e para a alimentação animal (Cardoso et al. 2019; Gusha et al. 2015; Mayer; Cushman 2019).

Como alimentos para humanos, o uso de cactos ainda é pouco explorado, parte disso se dá pelo pouco conhecimento das propriedades tecnológicas e nutricionais da

planta, que em muitos locais é considerada um alimento exótico ou não tradicional. Portanto, conhecer as características e potencias funcionais dessas plantas para uso na indústria é um caminho para valorização e desenvolvimento socioeconômico de regiões com baixo acesso a alimentos diversificados.

Várias revisões de literatura demonstram os efeitos benéficos à saúde de partes da planta e seus extratos, reivindicando propriedade antioxidantes, cicatrizante, protetora da pele, hepatoprotetores, anticâncer, anticético, anti-hipercolesterolêmico e anti-obesidade (Abbas et al. 2022; Angulo-Bejarano et al. 2019; Zeghbib et al. 2022). Portanto, o gênero *Opuntia* é uma fonte valiosa e diversificada de compostos e nutrientes biologicamente ativos que podem ser utilizados na elaboração de alimentos funcionais (Daniloski et al. 2022). Neste sentido, nos tópicos seguintes são apresentados aspectos que tornam promissores a utilização de cactos nas indústrias alimentícias, abordando aspectos sustentáveis da produção vegetal, nutricionais e funcionais, bem como para utilização na elaboração de produtos prébióticos, probióticos, postbióticos e paraprobióticos.

3.1.1.1.Importância dos cactos no semiárido

As terras secas do mundo cobrem quase 47% da superfície da Terra e sustentam 39% da população mundial (Koutrolis, 2019). O Brasil se destaca com uma área terrestre semiárida com 1.128.697 km², onde vivem uma população de aproximadamente 27.9 milhões de pessoas (Cavalcante; Sampaio 2022). Nessa região são registradas uma população na maioria de baixa renda, onde um dos principais meios de sobrevivência está na agricultura.

Como as mudanças climáticas já causam alterações expressivas no planeta, e a agricultura compõem uma parcela significativa na degradação ambiental, projeções futuras indicam temperaturas mais altas, chuvas reduzidas, e uma tendência de aumento da aridificação, (Sales et al. 2015). Dessa forma, alterações ambientais certamente culminam para impactos no bioma florestal seco da América do Sul. Nesse cenário uma alternativa mitigadora para as mudanças já observadas é a expansão da atual vegetal, bem como a substituição parcial por vegetação mais adequada para as regiões áridas e semiáridas, como os cactos (Cavalcante; Sampaio 2022).

O cacto é um importante recurso de forragem para regiões áridas e semiáridas, no entanto, em países como Brasil, Tunísia, África do Sul e Marrocos, os pomares de cactos poderiam ter uma finalidade multiuso, seja na alimentação humana e animal (Dubeux et al. 2021). Os cactos fazem parte de um grupo de plantas xerófilas, da família *Cactaceae*

que tem uma grande variedade de formas e tamanhos (Figura 1), desde arbóreos, arbustos, globulares, colunares, rastreadores, altos ou anões, caule suculento, que lhes permite acumular grandes quantidades de água em seus tecidos, além de suas frutas comestíveis (Abidi et al. 2009; Araújo et al. 2021; Ramírez-Rodríguez et al. 2020).

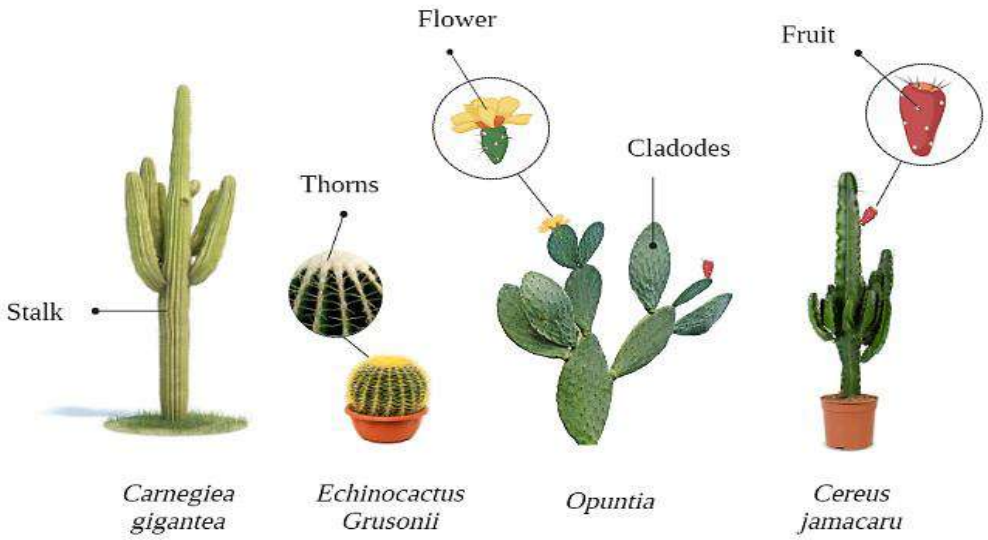

Figura 1. Diversidade morfológica das principais espécies de cactos. **Fonte:** Autoria própria.

A importância desta planta é particularmente evidente em ambientes árido e semiárido onde a acessibilidade à maioria dos vegetais é relativamente pobre (Mabotja et al. 2021). Utilizados principalmente como forragem na alimentação animal. Algumas espécies são hoje cultivadas e avaliadas para a produção de frutas (du Toit et al., 2018). Já na América Latina, os cladódios da *Opuntia fícus-indica* e *Opuntia robusta* são seguros para o consumo humano (Cantwell et al., 1992). No entanto, algumas espécies de cactos brasileiros ainda pouco estudadas podem ser fonte de alimentos e componentes com propriedades tecnológicas para possíveis aplicações na indústria de alimentos, como é o caso das *Opuntia cochenillifera, Cereus jamacaru, Cereus hildmannianus, Pilosocereus gounellei, Tacinga inamoena* e *Pilosocereus pachycladus* (Vieira et al. 2021).

3.1.1.2. Desafios sobre o uso de alimentos não convencionais e a relação com os ODS nas Nações Unidas

Em 2015, em resposta a desafios relacionados a crise global de biodiversidade e ao fato de 795 milhões de pessoas sofrem com insegurança alimentar, líderes mundiais se comprometeram com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que busca

entre outros objetivos, erradicar a fome e a pobreza do planeta até 2030 (Zhang et al. 2021). No entanto, o desafio de eliminar a fome até 2030 é ainda maior para muitos países, principalmente na África, Ásia e América Latina, onde devido às turbulências econômicas causadas pelo COVID-19, e na ausência de ações rápidas e eficazes, mais de 265 milhões de pessoas podem se tornar severamente inseguras (Mottaleb et al. 2021).

A segurança alimentar compreende quatro dimensões interrelacionadas: produção ou disponibilidade de alimentos suficientes para atender a demanda, utilização adequada dos alimentos e estabilidade desses fatores ao longo do tempo (Kent et al. 2022). Além disso, para garantir a segurança alimentar básica é preciso entender a percepção de diferentes populações em relação às escolhas alimentares. A aceitação de alimentos que não estão inseridos diretamente no contexto alimentar de uma determinada população reflete diferentes perspectivas para um mesmo objeto de estudo que se refere a fatores históricos, geográficos, climáticos e culturais que influencia diretamente nos interesses afetivos e cognitivos da população (Albuquerque et al. 2022).

Os alimentos estão associados a uma necessidade biológica, sendo avaliados do ponto de vista nutricional, e de saúde, além do prazer e do sabor dos alimentos que interagem na experiencia de consumo (Son et al. 2014). Os cactos como alimento humano tem um grande potencial econômico e funcional. No México os cladódio e frutas têm sido usados como alimento tradicional desde o Império Asteca em mais de 200 preparações culinárias, e nos EUA e em países europeus e asiáticos, o cladódio e frutas são considerados exóticos, já no Brasil, é considerado um alimento não tradicional (Albuquerque et al. 2022). Embora questões sociais e culturais relacionadas a alimentação são um dos principais obstáculos para o desenvolvimento de produtos inovadores utilizando fontes de alimentos não tradicionais, a valorização desses produtos levanta perspectivas promissora para a produção sustentável de alimentos. E com o crescente interesse da população por alimentos saudáveis, os produtos inovadores tendem a serem bem aceitos quando apresentado as qualidades nutricionais e potenciais benefícios a saúde e bem-estar dos consumidores.

Vencer os obstáculos enfrentados para inserir alimentos não convencionais nos hábitos alimentares de uma população é uma tarefa árdua que necessita ações para disseminar o conhecimento sobre os benefícios na nutrição e saúde humana. Contudo, o uso de espécies de cactos na alimentação humana apresenta grandes possibilidades para o desenvolvimento sustentável da agricultura, uma vez apresentam vantagens sobre outras atividades agrícolas devido a práticas que atenuam, evitam e até mesmo melhoram

danos causados no ecossistema (Andreu-Coll et al. 2020). A produção de cactos comercialmente, adotando práticas agrícolas sustentáveis junto a estratégias de bioeconomia circular apresenta um potencial promissor e uma solução que busca a tender os ODS definido pelas Nações Unidas. Isso só é possível com a utilização de recursos biológicos renováveis para transformá-los em mercadorias de ponta, e para conservar o valor dos recursos por um período mais longo com o objetivo de geração zero de resíduos e redução da emissão de gases de efeito estufa (Sharma et al. 2021).

3.1.1.3. Composição e bioatividade dos componentes de cactos

Espécies do gênero *Opuntia* apresentam um vasto potencial para uso não alimentares, explorando suas propriedades biofuncionais, medicinais, nutracêuticas e cosméticas (Andreu-Coll et al. 2020). As espécies de *Opuntia* têm sido usadas durante séculos como recursos alimentares e na medicina popular para o tratamento de doenças crônicas, como a obesidade, doenças cardiovasculares e inflamatórias, diabetes e úlceras gástricas (Díaz et al. 2017). Também são uma fonte de agentes de coloração de alimentos e apresenta possibilidades interessantes para a produção de bioetanol e biogás a partir dos cladódios (Andreu-Coll et al. 2020).

A relação entre o potencial de frutas e cladódios de cactos com benéficos à saúde se deve a presença de metabólitos secundários como os compostos fenólicos, carotenoides e betalaínas (Montiel-Sánchez et al. 2021) (Figura 2). Nas frutas de cactos, a pera espinhosa (*Opuntia fícus-indica*) é uma das frutas da família *Cactaceae* mais estudadas, especialmente quando as atividades biológicas de betalaínas e flavonoides, que tem mostrado alto potencial antioxidante, atividade anti-hiperglicêmicas e anti-inflamatória (Gómez-Maqueo et al., 2019). No entanto, outras espécies também tem sido exploradas nesse sentido com o objetivo de possibilitar a produção sustentável de compostos bioativos como belalaínas seguros (Montiel-Sánchez et al. 2021) e extração de outros compostos polifenólicos (Laguna et al. 2022).

Os frutos contêm alcaloides fenólicos, como batacianina e betaxantina, e flavonoides glicosilados que exibem várias atividades farmacológicas, e, além disso, as betalaínas vermelhas e amarelas, por serem solúveis em água, são usados como corante natural de alimentos (El-Hawary et al. 2020). Portanto, variedades de *Opuntias* pode ser usada como fonte de antioxidantes naturais adequados para o desenvolvimento de diferentes produtos alimentícios funcionas, pois além dos componentes já aqui citados, variedades da *Opuntia* são ricas em outros antioxidantes presentes em todas as partes da

planta, como lignans, esteróis, ésteres, saponinas e alcaloides, todos os quais têm mostrado potenciais efeitos protetores contra várias doenças crônicas (Daniloski et al. 2022).

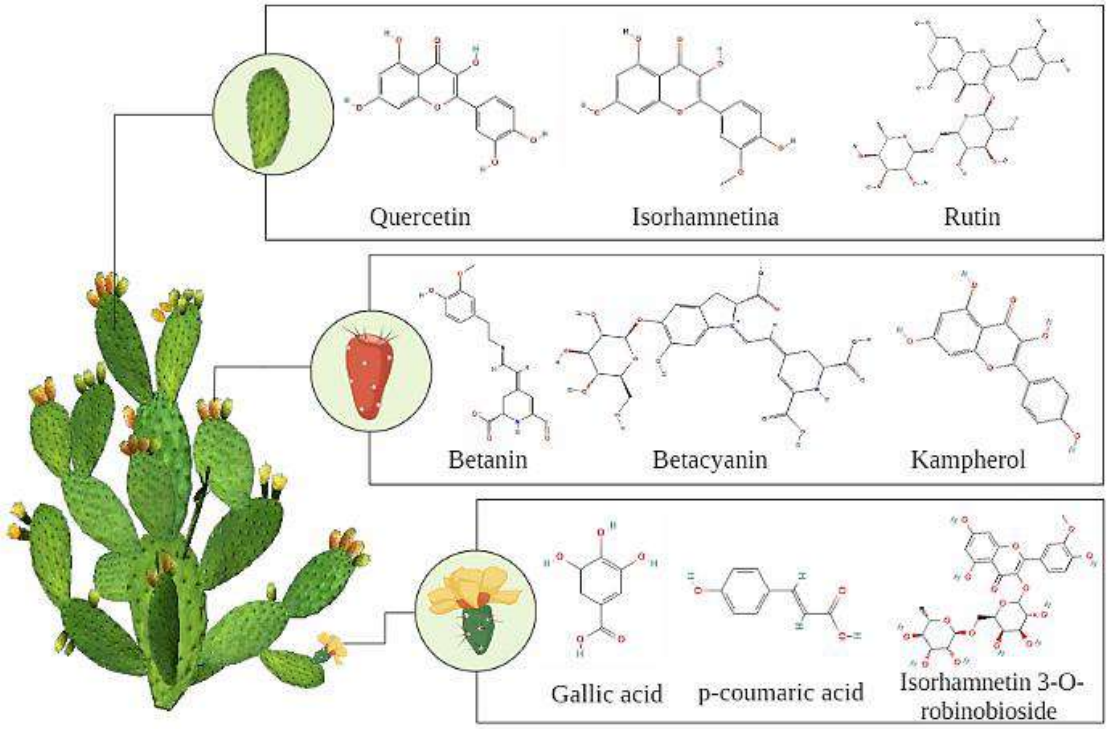

Figura 2. Principais compostos presentes em cactos. As estruturas químicas foram desenhadas utilizando o PubChem (https://pubchem-ncbi-nlm-nih.ez292.periodicos.capes.gov.br). **Fonte:** Autoria própria.

Nos cladódios de cactos, os componentes encontrados são conhecidos por combater o estresse oxidativo, além disso, é fonte de fibras solúvel e insolúvel que não são absorvidas pelo sistema digestivo humano, portanto, são usados para regular o peso, aumentar a ingestão de fibras ou controlar o diabetes mellitus e como fonte natural de potássio (du Toit et al., 2018). Além de fibras, a composição dos cladódios de cactos inclui pectina, mucilagem, lignina, celulose e hemicelulose (Rocchetti et al. 2018). A composição dos cladódios de cactos varia diante de muitos fatores, como idade, estação, variedade, tipo de solo, condições de crescimento e clima (El Otmani et al. 2019). É o caso dos compostos bioativos, como polifenóis e carotenoides com atividade antioxidante relevante (Dick et al. 2020). Os flavonoides são os principais polifenóis em cladódios de cactos, representando cerca de 85% do total de polifenóis, constituído por flavonol como a isorhamnetina presente em maior abundância, seguido por uma quantidade menor de quercetina e karmpferol (Santiago et al., 2021).

Os flavonoides são um grupo de compostos polifenólicos produzidos em plantas como metabólitos secundários, com efeitos bioquímicos favoráveis em múltiplas doenças, bem como outras bioatividades, como anti-inflamatória e antienvelhecimento (Shen et al. 2022). Na estrutura química, os flavonoides têm três anéis C6-C3-C6, e são geralmente classificados em sete subclasses de acordo com suas diferenças estruturais, são elas: flavonóis, flavonas, isoflavonas, antocianidinas, flavanonas e flavanóis e chalconas (Shen et al. 2022).

Nos cladódios de cactos, o composto mais abundante é a isorhamnetina que também pode ser encontrada nas flores. A isorhamnetina tem muitas ações farmacológicas envolvendo antioxidantes, anti-inflamatório, antimicrobiano, anticancerígeno, hepatoprotetor, protetor do sistema reprodutivo, antiobesidade e antidiabético (Matboli et al. 2021). Os efeitos farmacológicos da isorhamnetina estão relacionados à sua regulação de NF-kB, PI3K/AKT, MAPK e outras vias de sinalização e seus fatores a jusante (Gong et al. 2020). Esse componente presente na planta das espécies de *Opuntia* são alvo de grande interesse entre os pesquisadores de diversas áreas, especialmente de alimentos de farmacologia, devido às ações benéficas para o ser humano, o que impulsiona a exploração desse e outros componentes para a produção de alimentos funcionais e drogas para auxílio no tratamento de doenças.

Outros componentes presentes nos cactos com grande potencial de exploração é a mucilagem. As mucilagens, ou hidrocoloides naturais, são carboidratos complexos com capacidade de absorção de água que podem atuar como agente espessante e estabilizadores, com aplicações em diversos segmentos, como material base para revestimentos comestíveis, bioplástico, agente encapsulante e na formulação de alimentos sem glúten (Vieira et al. 2021). Além disso, a presença de monossacarídeos como xilose indicam um potencial prebiótico da mucilagem de algumas espécies de cactos. Portanto, é importante descrever exaustivamente todos os compostos desses subprodutos e suas propriedades biológicas relacionadas para fomentar sua aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêuticas e cosmética, promovendo uma economia circular (Ayuso et al. 2022).

3.1.1.4. Potencial prebiótico de componentes de cactos

Um número cada vez maior de pessoas tem percebido que micróbios intestinais podem afetar positivamente as funções fisiológicas dos hospedeiros, produzindo metabólitos benéficos e promovendo a regulação imunológica e isso ocorre através de

interações complexas, mas dinâmicas, entre a microbiota intestinal e a imunidade do hospedeiro (Liu et al., 2022). A microbiota intestinal desempenha um papel vital na saúde humana, regulando a imunidade do hospedeiro, mantendo a integridade da barreira intestinal, inibindo patógenos intestinais, promovendo a síntese de vitaminas e eliminando toxinas exógenas, entre outras funções que indicam que manter a diversidade da microbiota intestinal pode ser uma estratégia importante para regular a imunidade do homem (Zhang, et al., 2022; Schroeder; Bäckhed, 2016).

Nas últimas duas décadas, os oligossacarídeos foram amplamente estabelecidos como prebióticos para exercer benefícios à saúde através da formação de metabólitos microbianos bioativos e modulação da composição da microbiota intestinal (Cruz-Rubio et al. 2021). No ano de 2000, o comitê da American Association of Cereal Chemists (AACC) reconheceu os oligossacarídeos não digeríveis como prebióticos devido à sua melhor utilização pela microflora intestinal devido ao seu menor comprimento (DP 3 a 10) e maior solubilidade (Mondal et al. 2022).

Recentemente têm sido discutido o potencial da mucilagem de cladódios de *Opuntia* spp. como alimento funcional, devido à presença principalmente de arabinose, glicose, rhamnose, frutose, galactose, xilose, sisão e ácido galacturônico (Liu et al., 2022). Alguns estudos mostram o potencial prebióticos de produtos obtidos de espécies de cactos, e um resumo é apresentado na Tabela 1.

A mucilagem surge nos estudos voltado para a pesquisa do potencial probiótico dos componentes dos cactos das várias espécies. No entanto, pouco ainda se conhece sobre os efeitos do processamento, ambiente de cultivo, espécies e método de obtenção da mucilagem sobre as propriedades tecnológicas e efeitos no potencial promissor desse material como prebiótico. Mesmo assim, nota-se que os cactos, a planta como um todo, apresenta grande potencial para ser absorvido e aproveitado na biotecnologia e produção de alimentos funcionais, uma vez que todas as partes da planta pode ser aproveitada.

Tabela 1. Estudos sobre o potencial prebiótico de cactos.

Espécie	Cepa probiótica	Resultados	Publicação	Referência
Opuntia fícus-indica e *Opuntia joconostle*	*Lactobacillus rhmnosus*, *Lactobacillus acidophilus* e *Bifidobacterium longum* subsp. *Infantis*	Todas as cepas foram capazes de utilizar a mucilagem como substrato, embora com crescimento máximo menor que a glicose.	The Effect of Cladode Drying Techniques on the Prebiotic Potential and Molecular Characteristics of the Mucilage Extracted from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*	(Cruz-Rubio et al. 2020)
Opuntia ficus-indica	Microbiota do colón obtida por uma amostra fecal de um voluntário adulto saudável	A mucilagem aumentou o crescimento de lactobacilos em até 23.8% e diminuiu enterococos, enterobactérias, estafilococos e clostrídios.	Prebiotic Effect of Mucilage and Pectic-derived Oligosaccharides from Nopal (*Opuntia ficus-indica*)	(Guevara-Aruaza et al., 2012)
Opuntia fícus-indica e *Opuntia joconostle*	*Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium longum* ssp. *Infantis* e *Bifidobacterium animalis* ssp. *Lactis*	A fermentabilidade por espécies probióticas pode ser atribuída mais às suas características estruturais e a composição de monossacarídeos do que às suas dimensões.	Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*	(Cruz-Rubio et al. 2021)
Pilosocereus gounellei	*Lactobacillus acidophilus* LA-05, *Lactobacillus casei* L-26 e *Lactobacillus paracasei* L-10	O suco dos cladódios de *Pilosocereus gounellei* apresentou escores positivos de atividade prebiótica em todos os probióticos examinados, indicando um efeito estimulador seletivo sobre esses microrganismos em detrimento de patógenos entéricos.	In vitro evaluation of potential prebiotic effects of a freeze-dried juice from Pilosocereus gounellei (A. Weber ex K. Schum. Bly. Ex Rowl) cladodes, an unconventional edible plant from Caatinga biome	(Ribeiro et al. 2020)
Opuntia streptacantha	*Lactobacillus acidphilus*, *Lactobacillus casei* e *Bifidobacterium animalis* subsp. *Lactis*	As frações de mucilagem estimularam o crescimento *in vitro* de probióticos comerciais, com comportamento semelhante ao obtido com a inulina comercial.	In vitro fermentation of oligosaccharides obtained from enzymatic hydrolysis *of Opuntia streptacantha* mucilag	(Reyes-Reyes et al. 2019)

Fonte: Autoria própria.

Na aplicação de componentes de cactos como prebióticos, os compostos fenólicos encontrados nos frutos, flores e caule da planta se somam as possibilidades de aplicação da planta para o desenvolvimento de alimentos funcionais e princípios ativos bioativo. Isso é possível porque em 2016, a Associação Cientifica Internacional de Probióticos e Prebióticos (ISAPP) atualizou a definição de prebióticos para "um substrato que é seletivamente utilizado por microrganismos hospedeiros, conferindo um benefício à saúde" (Gibson et al. 2017). Essa definição expande o conceito de prebióticos para possivelmente incluir substâncias não-carboidratos, como ácidos graxos poli-insaturados e fenólicos (Liu et al., 2022). No entanto, os efeitos benéficos à saúde devem ser documentados para que uma substância seja considerada um prebiótico (Gibson et al. 2017). Os efeitos benéficos de produtos derivados de cactos na microbiota intestinal vêm sendo documentado em uma série de estudos (Tabela 2).

Nota-se nos estudos apresentados na Tabela 2, que os efeitos modulatório na microbiota intestinal geralmente avaliado são devido à ingestão dos cladódios de cactos ou extratos desses, compostos por oligossacarídeos, aminoácidos e diversos compostos fenólicos, além do conteúdo de fibras, diretamente associadas a melhorias do sistema gastrointestinal. A relação entre composição fenólica de um alimento e à sua capacidade de modular a microbiota intestinal tem sido investigada. E nesse cenário, existem uma expectativa para valorização da agricultura comercial de cactos, de maneira que diversas variedades de cactos podem ser estudadas como fonte de componentes funcionais e fomentar o desenvolvimento de produtos funcionais e princípios ativos, com potencial para serem absorvidos pelos setores de alimentos, farmacológico e na biotecnologia.

Tabela 2. Evidências de potenciais efeitos benéficos à saúde do uso de derivados de cactos. (continua)

Material	**Estudo**	**Resultados**	**Referências**
Polissacarídeos extraídos do Tibet *Opuntia fícus-indica* (Linn.) Mill.	Camundongos imunocomprometidos induzidos por ciclofosfamato	A ingestão dos polissacarídeos regulou significativamente a abundância relativa de *Lactobacillus, Bacterioide*s e *Akkermansia*. Os polissacarídeos podem afetivamente aumentar o nível de metabólico de síntese e decomposição de lisina, regular o nível de expressão gênica após distúrbios imunológicos e melhorar a saúde geral dos camundongos imunodeficientes.	(Liu et al., 2022)
Opuntia ficus-indica cozida	Amostra com 25 mulheres com obesidade e 11 mulheres de peso normal.	Intervenções na dieta de mulheres com a *Opuntia Ficus-indica* induziu alterações na microbiota intestinal nos dois grupos de mulheres, associadas a parâmetros bioquímicos e antropométricos.	(Corona-Cervantes et al. 2022)
Cladódios secos de *Opuntia fícus-indica*	Ratos obesos alimentados com dieta com alta gordura e sacarose	A adição de cladódios de *Opuntia fícus-indica* na dieta de ratos pode amenizar parâmetros bioquímicos específicos da obesidade. Logo, de cladódios secos de *Opuntia fícus-indica* tem capacidade de modificar a microbiota intestinal e reduzir a endotoxemia metabólica e outras anormalidade bioquímicas relacionadas à obesidade, apoiando o seu uso como alimento funcional e prebiótico.	(Sánchez-Tapia et al. 2017)
Betacianins de pitaya vermelha	Camundongos masculinos alimentados com dieta com baixo teor de gordura, dieta rica em gordura e dieta rica em gordura mais *Hylocereus polyrhizus*	A dieta adicionada de betacianinos de pitaya vermelha protegem da obesidade induzida pela dieta e as doenças metabólicas relacionadas, associado a melhoria do estado inflamatório e modulação da microbiota intestinal, diminuindo a proporção de *Firmicutes* e *Bacteroidetes*, e aumentar a abundância relativa de *Akkermansia* no nível de gênero.	(Song et al. 2016)
Extratos de *Opuntia fícus-indica*	Atividade antioxidante, atividade in vitro antitumor e atividade antimicrobiana	Atividade antimicrobiana contra vírus patogênicos e bactérias foi observado nos extratos de *Opuntia fícus-indica*. Citotoxicidade seletiva em relação às células cancerosas.	(Ali et al. 2022)

Tabela 2**.** Evidências de potenciais efeitos benéficos à saúde do uso de derivados de cactos.

Material	**Estudo**	**Resultados**	**Referências**
Extratos hidroetanólicos de frutas de *Butia* e *Opuntia*	Capacidade antioxidante *in vitro* e *in vivo*	Os extratos hidroetanólicos de frutas de *Butia* e *Opuntia* apresentaram efeitos antioxidantes *in vitro* e *in vivo*, assim como não apresentaram efeito toxico *in vivo*.	(Rockett et al. 2020)
Extratos de frutas de *Opuntia robusta* e *Opuntia streptacantha*	Estudo *in vitro* e *in vivo* com ratos	Tratamentos terapêuticos com extratos de *Opuntia* reduziram marcadores bioquímicos, moleculares e histológicos de lesão hepática (*in vivo*) e hepatócitos (*in vitro*). Os extratos de *Opuntia* reduziram a expressão aumentada do gene APAP, Sod2, Gclc e Hmox1, independente de sua capacidade de eliminação do ROS.	(Gonzáles-Ponce et al., 2020)
Extratos de pitaya branca e vermelha	Estudo do efeito da hidrólise do suco gástrico humano artificial, hidrólise α-amilase humana e do crescimento de probióticos (*Lactobacillus delbrueckii* e *Bifidobacterium bifidum*)	Foi observado propriedades prebióticas nos extratos que incluíam resistência às condições ácidas do estômago humano, resistência parcial à α-amilase salivar humana e capacidade de estimular o crescimento de lactobacilos e bifidobactérias.	(Wichienchot et al., 2010)
Extratos padronizados de cladódios de *Opuntia fícus-indica* e *Olea europaea*	Estudo realizado com cem participantes saudáveis com desconforto gastrointestinal	O grupo trata com o extrato apresentou uma melhora significativa na qualidade de vida gastrointestinal (GIQLI) e na Escala de Avaliação de Sintomas de doença de refluxo gastroesofágico.	(Malfa et al. 2021)
Fibra de *Opuntia fícus-indica*	60 pacientes com diagnóstico de síndrome do intestino irritável	A suplementação da dieta com fibras de *Opunia fícus-indica* foi associada à melhora de curto prazo nos sintomas da síndrome do intestino irritável.	(Remes-Troche et al. 2021)

Fonte: Autoria própria**.**

3.1.1.5. Tendências futuras para aplicação tecnológica de ingredientes derivados de cactos

Ainda que o uso de ingredientes derivados de cactos apresente desafios tecnológicos e mercadológicos, os mesmos apresentam algumas vantagens nutricionais, funcionais e tecnológicas quando comparados a outros ingredientes, como, por exemplo: trigo, corantes artificiais e hidrocoloides (Daniloski et al. 2022 e Dantas et al. 2022). E com o crescimento populacional, os recursos naturais enfrentam o contínuo esgotamento e, como tal, há um interesse renovado em mobilizar de forma sustentável fontes de ingredientes funcionais, evitando assim a perda de bioatividade e o uso sustentável do ecossistema terrestre (Ayuso et al. 2022). Portanto, essas características conferem a essa matriz alimentar um alto potencial para elaboração de produtos na indústria alimentícia.

Nesse sentido, a incorporação de ingredientes alternativos em produtos alimentícios representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de produtos nutritivos, sustentáveis e agroecológicos (Dick et al. 2020). Machado et al. (2021) afirmaram que biscoitos de xique-xique podem ser considerados um produto inovador para a indústria de alimentos funcionais, principalmente por suas características bioativas e nutricionais, sendo excelentes fontes de fibras e minerais, nutrientes essenciais para a população em geral. Além da riqueza de biomoléculas ativas e funcionais, a presença de fibras e polifenóis favorecem aos biscoitos propriedades tecnológicas como a aptidão para amassar, a retenção de sabor e a capacidade antioxidante (Bouazizi et al. 2020).

Segundo Msaddak et al., (2017), cladódios de *Opuntia ficus-indica* podem ser considerados um potencial ingrediente funcional promotor da saúde em produtos de panificação, neste estudo, os autores observaram que a substituição da farinha de trigo pelo pó de cladódios a 5%, melhorou o teor de fenólicos totais e o potencial antioxidante do pão sem afetar negativamente sua aceitabilidade sensorial.

Na indústria de alimentos, há um interesse crescente no uso de corantes alimentares naturais para substituir os corantes sintéticos prejudiciais à saúde (Huang et al. 2022). Dessa forma, alguns estudos utilizando ingredientes derivados dos cactos como pigmentos naturais, estão disponíveis na literatura. Pigmentos da polpa de *Hylocereus polyrhizus* na forma encapsulada foram obtidos por Utpott et al. (2020), mostrando-se como potenciais corantes naturais com características adequadas para aplicação em alimentos. Carmona et al. (2021) utilizaram micropartículas de polpa de palma amarelo-alaranjada (*Opuntia ficus-indica*) como um corante amarelo natural em iogurtes. Ruiz-Gutiérrez et al., (2017), utilizaram pó encapsulado de palma de cacto vermelho *(Opuntia ficus-indica)* para pigmentar cereal

extrusado, mostrando neste estudo, que o pó encapsulado da palma vermelha pode ser uma alternativa natural aos corantes sintéticos e pode ser utilizado para desenvolver alimentos funcionais com possíveis benefícios à saúde. Lugo-Zarate et al., (2021), afirmaram que a adição de pó de palma roxa pode fornecer uma cor intensa como aditivo natural para produtos lácteos, como iogurte, que pode ser uma alternativa aos aditivos sintéticos, uma vez que desempenham um papel importante na qualidade do produto e aceitação do consumidor. Além disso, o iogurte adicionado de pó de suco de palma roxa também proporciona teor antioxidante e alta bioacessibilidade, com leves alterações em suas características físico-químicas.

De acordo com Nunes et al. (2022) as aplicações tecnológicas com potencial econômico destas espécies, também podem ser encontradas e consumidas na forma de balas de goma, doces e sucos. Na literatura atual, Oliveira et al. (2021) elaboraram uma nova bebida mista formulada com suco do cladódio de xique-xique (*Pilosocereus gonellei*), os autores relataram que a incorporação do suco de cladódio de xique-xique nestas bebidas mistas potencializou suas propriedades bioativas, principalmente de compostos antioxidantes, possibilitando o desenvolvimento de um novo produto com potenciais propriedades funcionais para a indústria de bebidas. Moussa-Ayoub et al., (2017), ao desenvolverem suco de cacto *Opuntia dillenii*, os autores expuseram que os sucos elaborados tinham alto potencial bioativo e características promissoras benéficas à saúde humana.

Balas de goma adicionadas de betalaínas encapsuladas de *Opuntia ficus-indica* foram desenvolvidas por Otálora et al. (2019), estas balas apresentaram propriedades gelificantes e morfológicas adequadas para serem utilizadas na indústria de confeitaria. Além disso, a amostra do sistema alimentar armazenada a 4°C durante 30 dias, não alterou significativamente sua cor. Moussa-Ayoub et al., (2015) avaliaram o uso do fruto amarelo-alaranjado inteiro da palma *forrageira O. ficus-indica* como ingrediente de snacks à base de arroz e milho. Este estudo mostrou que o perfil único de flavonóis dos frutos do cacto *O. ficus-indica* pode servir como marcador bioquímico para a avaliação da autenticidade de produtos elaborados a partir de frutos de palma inteiros ou da casca do fruto. Outra possibilidade de possível aplicação foi relatada por Tabarestani et al. (2022), no qual, utilizaram a polpa da *Opuntia* como ingrediente clean label no desenvolvimento de hambúrguer sem carne. A incorporação deste ingrediente como uma grande fonte de componentes fenólicos influenciou consideravelmente o rendimento de cozimento, retenção de umidade, suculência e estabilidade oxidativa de hambúrgueres sem carne, além disso, o uso deste ingrediente fornece um hambúrguer sustentável, benéfico para a saúde pública, meio ambiente e bem-estar animal.

Em termos de produtos probióticos, Panda et al., (2017) mostrou que a adição de *Lactobacillus fermentum* no suco de pera espinhosa através da fermentação fornece um novo produto funcional com vários antioxidantes e fitoquímicos benéficos à saúde. O suco de pera de cacto fermentado por *Lactobacillus plantarum* quando administrado em camundongos obesos causou uma diminuição significativa no ganho de peso corporal e amenizou a resistência à insulina, mostrando o potencial da bebida funcional para a prevenção da obesidade e patologias relacionadas (Verón et al. 2019). Apesar desses relatos, o desenvolvimento de produtos probiótico com cactos é escasso, e o estudo da adição de postbióticos e paraprobióticos na formulação de novos ingredientes alimentícios dessa matéria-prima é inexistente na literatura, portanto, merece mais estudos que possam contribuir para o desenvolvimento cientifico e tecnológicos do campo de alimentos funcionais.

3.2.1. Paraprobióticos e postbióticos - Panorama da literatura atual

No grupo de alimentos funcionais existem os alimentos probióticos. Os probióticos são microrganismos com propriedades benéficas ao consumidor, que são comumente adicionados em alimentos funcionais (Küçükgöz; Trząskowska 2022). Recentemente, surgiu preocupações com problemas de segurança associado à administração de bactérias probióticas (Teame et al. 2020). Para lidar com tais questões e limitações dos probióticos, como mecanismos moleculares desconhecidos, comportamentos específicos de tensão, ação de curta duração, desenvolvimento de resistência a antibióticos, efeitos benéficos ambíguos, manutenção da viabilidade e estabilidade no processo de produção; os paraprobióticos e postbióticos derivados de probióticos são alternativas favoráveis para o desenvolvimento de novos produtos com benefícios para a saúde e bem-estar do homem (Nataraj et al. 2020).

Os paraprobióticos são células intactas (inviáveis) microbianas inativadas, previamente referidos na literatura como “probióticos inativados” e probióticos fantasmas”, ou frações celulares, que perderam completamente sua viabilidade após a exposição a fatores que alteram estruturas celulares microbianas, como quebra de filamento de DNA, interrupção da membrana celular ou danos mecânicos ao envelope celular, mas que conferi benéficos à saúde do consumidor (Almada et al., 2016). Já os postbióticos, são fatores solúveis, como produtos ou subprodutos metabólicos, ou secretados por bactérias vivas, ou ainda liberados após lise bacteriana que podem oferecer efeito positivo ao consumidor (Cuevas-Gonzalez et al., 2020). Esses componentes apresentam vantagens de produção frente os probióticos, uma vez que a viabilidade celular não é requerida. Portanto, torna o desenvolvimento tecnológico e aplicação em alimentos mais favorável.

Para entender melhor o interesse atual dos pesquisadores, uma análise de co-ocorrências de palavras-chave foi empregada para identificar os principais temas de pesquisa relacionados a paraprobióticos e postbióticos. Segundo Sawada et al., (2022) existem dois campos para palavras-chave no banco de dados da Web of Science; conhecidos como palavras-chave do autor e palavras-chave plus, que desempenham um papel importante na bibliometria, revelando tendências através da frequência de palavras usadas. A análise da co-ocorrência realizada nesta revisão recuperou um total de 463 palavras-chave do autor, e a análise foi realizada com o mínimo de ocorrência de 3 palavras-chave, resultado em 33 palavras-chave, conforme foi método relatado por Fasogbon and Adebo (2022).

Na Figura 3, visualiza-se a rede de similaridade das palavras-chave dos autores, nos estudo escolhidos para análise. No geral, nota-se que diferentes termos são utilizados para conceituar os metabólitos secundários produzidos na fermentação por bactérias probióticas e células probióticas inativadas, como é o caso dos termos “ghost probiotics” e “inactivated probiotics”. A definição e conceitualização de termos para uso global no estudo desses produtos de bactérias lácticas benéficos para à saúde é uma das principais discussões apresentadas pela comunidade científica nessa área, notando-se sempre a necessidade de definição previa em cada estudo. Em termos de temática, na Figura 3A, identificamos a formação de 5 (cinco) clusters.

Cluster 1, em vermelho, consiste em palavras-chave direcionadas principalmente para as propriedades benéficas à saúde dos postbióticos (por exemplo, antioxidante, imunomoduladora e anti-inflamatória), voltadas para componentes produzidos por bactérias do gênero *Lactobacillus*. Nesse cluster as palavras que mais ocorre são, postbióticos, bactéria do ácido láctico e imunomoduladora, respectivamente.

Cluster 2, em verde, pode ser chamado de “Alimentos funcionais”. Esse cluster apresenta os alimentos como uma promessa para a entrega de paraprobióticos e postbióticos, também definido pelos termos “ghost probiotics” e “inactivated probiotics”. Além da perspectiva voltada para o desenvolvimento de alimentos funcionais, uma outra vertente é representada pela palavra “Food safety”. Os postbióticos apresentam propriedades antimicrobianas significativas, o que permite que postbióticos possam ser aplicados como ferramentas promissoras na prática de segurança alimentar, com aplicações na inibição de deterioração alimentar e microrganismos patogênicos, biopreservação alimentar e controle de biofilmes (Rad et al., 2022).

Cluster 3, em azul, a interação prebiótico, paraprobiótico e microbiota intestinal está relacionado aos benéficos alcançados no tratamento e prevenção de doenças não transmissíveis, como a obesidade e doenças inflamatórias associadas à obesidade. Porém, nota-se uma alta

necessidade de ensaios humanos/clínicos com foco de validar essas alegações voltadas à saúde (Nataraj et al. 2020).

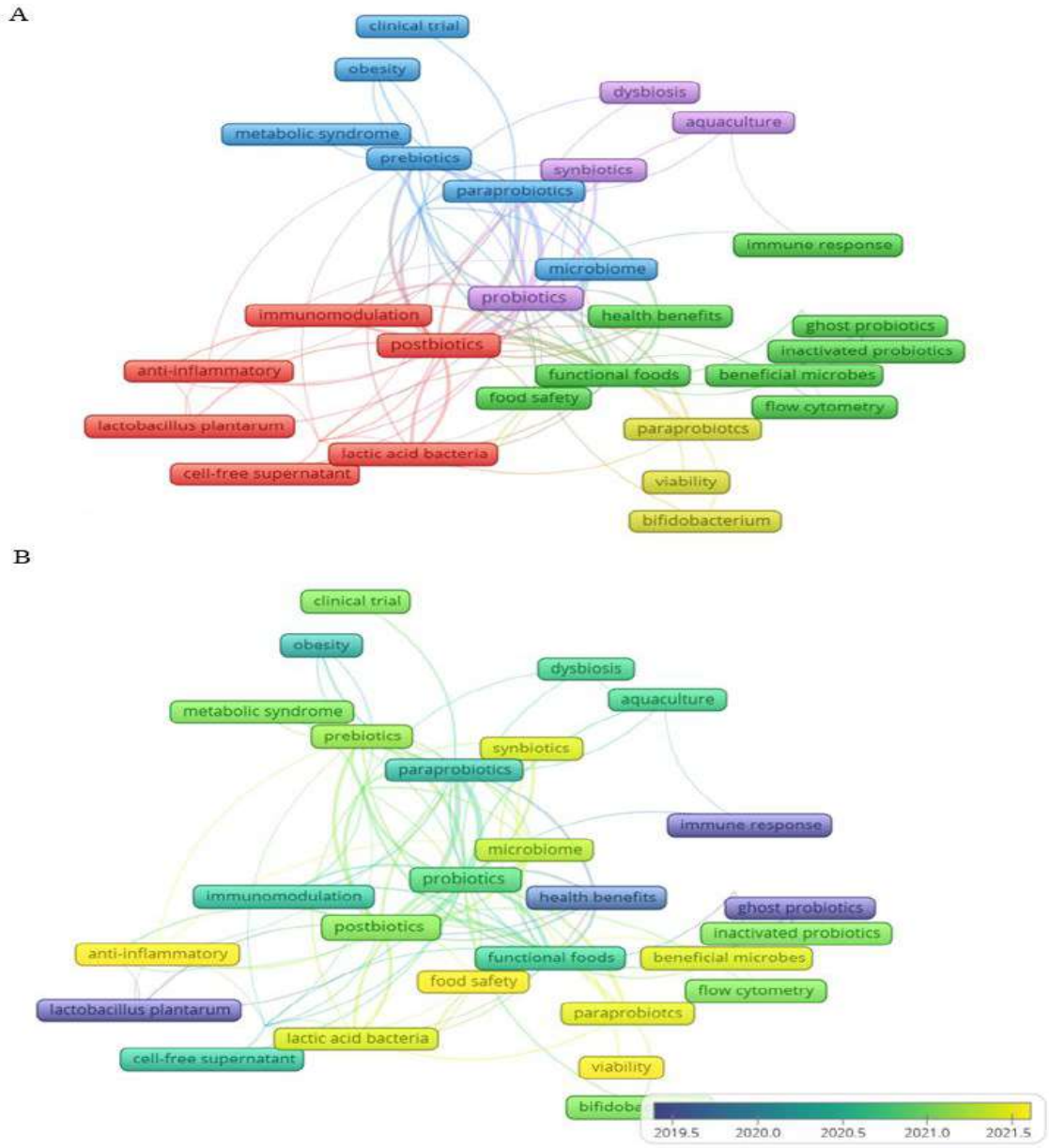

Figura 3. Visualização da rede de palavras-chave. A) cluster das principais temáticas e B) evolução do tema por ano. **Fonte:** Autoria própria.

Cluster 4, em amarelo, destaca-se os paraprobióticos produzidos por *Bifidobacterium* e a relação com a alteração nos compostos bioativos em alimentos. Nesse cluster, observa-se um indicativo de que o processo de inativação para obter paraprobióticos é um campo de novas pesquisas, logo visto que a tecnologia empregada pode contribuir para modificar a disponibilidades desses componentes funcionais no alimento ou produtos a ser desenvolvido.

Cluster 5, em roxo, mostra o probióticos e simbióticos voltados para a aquicultura. Em termos de produção de alimentos, os probióticos nesse cluster mostram uma aplicação voltada para a melhoria de práticas de criação de peixes e camarões, através de estratégias de modulação terapêutica da microbiota intestinal, como é proposto por Vargas-Albores et al. (2021). Nesse estudo, os probióticos postbióticos, paraprobióticos e simbióticos são apresentados como os agentes mais influentes para resolver a disbiose, que afeta a saúde dos peixes e desempenho produtivo.

Em termos de evolução da temática ao longo dos anos, na Figura 3B observa-se uma tendência futura em torno da segurança alimentar, identificação de componentes bioativos com atividade benéficas à saúde, destacando as propriedades anti-inflamatórias e os benéficos das bactérias do ácido láticos no geral. Enfim, a análise de palavras-chave ao longo dos anos, serviram de suporte para identificação de um dos tópicos mais relevante relativo a postbióticos e paraprobióticos na indústria de alimentos, que é a importância da qualidade e segurança dos alimentos produzidos e consumidos pelo mundo. Insights sobre o futuro dos paraprobióticos e postbióticos para contribuir com a segurança alimentar é apresentado no item abaixo.

3.2.1.1. O caminho para o uso de postbióticos e paraprobióticos na segurança alimentar

A segurança alimentar é uma questão importante para os consumidores e produtores de alimentos. O conceito de segurança alimentar tornou-se cada vez mais autocentrado porque alimentos não seguros causam problemas de patogenicidade, especialmente em pessoas sensíveis, como lactantes, crianças pequenas, idosos e pacientes (Rad et al. 2021). Portanto, segurança alimentar significa garantir que o alimento não prejudique o consumidor ao preparar e consumir de acordo com o seu uso pretendido (Freitas et al., 2019).

A segurança do uso dos probióticos se tornou uma preocupação atual; e levou a um maior interesse no desenvolvimento de postbióticos e paraprobióticos. Nos últimos anos vários efeitos colaterais potenciais foram documentados para algumas cepas de bactérias do ácido lático viáveis, incluindo crescimento excessivo de probióticos intestinal, sintomas gastrointestinais, infecção da corrente sanguínea, produção de D-lactase em excesso, disbiose e transferência de genes horizontais (Porfiri et al. 2022). Por isso, houve um aumento nas pesquisas sobre os postbióticos e paraprobióticos, bem como o interesse comercial e médico, os quais se tornaram uma alternativa para o desenvolvimento de alimentos funcionais com muitas vantagens (por exemplo, facilidade de armazenamento e aumento da vida útil) sobre os probióticos vivos (Mi et al. 2022).

Zhang et al. (2022), mostraram que *Lacticaseibacillus* N1115 inativado por calor pode aliviar danos causados por antibióticos na microbiota intestinal e a função cognitiva, que causa ansiedade e depressão, isso através da modulação do eixo microbiota-intestino-cérebro. Porfiri et al. (2022), mostraram a capacidade imunomoduladora de cepas de bactérias do ácido láctico, e que essa capacidade pode ser impactada não apenas pelos diferentes métodos de inativação como pela cepa seleciona. O efeito anti-adiposidade do *Lactobacillus brevis* KB290 morto pelo calor foi estudado por Watanabe et al. (2021) usando um modelo de obesidade induzido pela dieta rica em gordura e, foi visto que o *Lactobacillus brevis* KB290 é indicado para uso como paraprobiótico para desenvolver alimentos funcionais que atenuam o acúmulo de gordura visceral. Almada et al. (2021) mostraram que o consumo de massas de trigo duro, adicionada de *Bifidobacterium animalis* inativada, por ratos saudáveis, reduziu os níveis de glicose e colesterol total, revelando que a massa de trigo duro é um veículo potencial para a entrega de paraprobióticos de *Bifidobacterium animalis*. Portanto, observa-se que o uso de paraprobióticos é uma promessa para o futuro, de interesse em diversas áreas da ciência. Para o setor de alimentos, o uso de paraprobióticos é uma alternativa e um caminho para incluir no mercado, produtos com benéficos para saúde seguros.

O interesse no uso de postbióticos e paraporbióticos na indústria de alimentos vão além do interesse de agregar propriedades funcionais aos alimentos e caminha no sentido de contribuir para reduzir o risco da presença de contaminante. O gênero *Lactobacillus* é o mais estudado, e os paraprobióticos e postbióticos produzidos por bactérias desse gênero consistem em uma ampla gama de polissacarídeos de parede celular, proteínas secretadas, bacteriocinas e ácidos orgânicos (Teame et al. 2020). Esses componentes estruturais e metabólitos produzidos por probióticos podem apresentar diversas bioatividades, incluindo as substâncias com atividade antimicrobiana que podem ser usados para contribuir com a segurança alimentar (Moradi et al. 2020).

Mohammadi et al. (2022) estudaram a aplicação de postbióticos para desenvolver uma membrana antimicrobiana por nanocelulose bacteriana, e mostraram que os postbióticos revelaram atividade antibacteriana em todas as cepas investigadas de forma dependente da concentração, sendo que na concentração de 50%, a zona de inibição para todos os patógenos bacterianos excedeu 20 mm, assim, classificados como “microrganismos extremamente sensíveis” aos postbióticos, indicando ao final que o material fabricado pode servir como uma membrana antimicrobiana para aplicações em alimentos.

Segundo Chang et al. (2021), a produção de ácidos orgânicos por *Lactobacillus plantarum* durante o crescimento, como o ácido láctico, relatado como predominante,

promoveu ações antimicrobiana contra o crescimento de *Salmonella*. Além disso, há o relato que a secreção de pirrol e compostos cíclicos nos postbióticos aumentou a atividade antimicrobiana contra várias bactérias patogênicas e a capacidade de inibir e prevenir o processo de oxidação (Chang et al. 2021). Os principais produtos químicos antimicrobianos produzidos por *Lactobacillus* compreendem peptídeos sintetizados ribossomicamente (bacteriocinas), subprodutos metabólicos de várias naturezas químicas, como peróxido de hidrogênio, ácido lático e outros ácidos orgânicos e compostos fenólicos (Rocchetti et al. 2021). O uso eficaz e promissor de postbióticos produzidos por bactérias do ácido láctico também foi evidenciado por Toushik et al. (2022), onde foi relatado atividade bactericida dos postbióticos como alternativa ao uso de peptídeos antimicrobianos purificados, como bacteriocinas. Além disso, foi visto nesse artigo que quando combinado o postbióticos derivados de *Leuconostoc Mesenteroides* (LAB J.27) a óleos essenciais, obteve-se um excelente potencial antimicrobiano contra uma gama de microrganismos patogênicos e eficácia como antibiofilme.

Moradi et al. (2020) destacou em uma revisão, as aplicações mais recentes dos postbióticos para a garantia de segurança alimentar. O destaque é apresentado no uso potencial de postbióticos na biopreservação de alimentos, embalagem de alimentos e preservação e controle de biofilme. A biopreservação tem sido descrita como uma alternativa sustentável, segura e ecológica, por isso têm-se observado uma demanda crescente por estudos que esclareça as principais estratégias de aplicação e os principais modos de ação, especialmente para o uso em produtos lácteos, carnes e produtos de origem vegetal (Hernández et al. 2022). Em termos de embalagem, visto que a deterioração de grande parte dos alimentos ocorrem de fora para dentro, como pela ação de microrganismo patogênicos, os postbióticos apresentam um grande potencial para o uso em sistemas de embalagens ativas de alimentos, como revestimento ou absorção de uma fina camada de postbióticos na superfície do polímero, imobilização de postbióticos individuais por polímeros por ligações iônicas ou covalentes, incorporação direta em matriz polimérica de embalagens e laminação do filme ativo carregado de postbióticos entre duas camadas externas, que aumentam a estabilidade dos postbióticos e controlam a migração (Moradi et al. 2020). Outro problema importante relacionado à segurança alimentar e qualidade de alimentos estar na formação de biofilme, com maior capacidade de sobreviver em condições rigorosas (Zhu et al. 2022). Além das propriedades antimicrobianas dos postbióticos de bactérias do ácido láctico, também podem ser usados como potenciais agentes antibiofilme devido aos seus componentes, incluindo bacteriocinas, ácidos orgânicos, biossurfactantes, e EPS, em que cada um desses componentes pode afetar um estágio particular da formação de biofilme, devido a sua função especial (Moradi et al. 2020).

Apesar do diversificado potencial para o uso de paraprobióticos e postbióticos, nota-se a necessidade de mais estudos que explorem a aplicação e as alegações de propriedades benéficas para à saúde dessas estruturas celulares e componentes produzidos por bactérias do ácido láctico em produtos, como avaliações sobre os efeitos da adição de alimentos paraprobióticos e postibioticos na dieta de humanos e suas evidências clínicas, além das características químicas, bioquímica, sensoriais e de qualidade e segurança alimentar. No geral, a partir desta pesquisa, a perspectiva é de aumento da aplicação de paraprobióticos e postbióticos na indústria de alimentos. No entanto, novos estudo são necessários para entender quais as melhores estratégias para o processo de produção.

3.3. Biopreservação usando filmes com mucilagem

O uso de plantas subutilizadas para a extração de mucilagem e outros polissacarídeos tem sido utilizada como uma nova fonte de material que podem ser usados para produzir filmes e revestimentos comestíveis (Mousavi et al., 2021). Semwal et al. (2022), incorporaram ao filme probiótico produzido à base de caseinato de sódio, a mucilagem de chia como protetor de bactérias probióticas empregado posteriormente como revestimento de pães, e observaram que a mucilagem pode atuar como um protetor de probiótico, sendo ainda uma alternativa natural para produzir produtos de padaria funcional. A vida útil do abacaxi fresco aumentou com a aplicação de revestimentos com mucilagem de juá (*Ziziphus joazeiro* Mart.), reduzindo a atividade enzimática e mantendo parâmetros de qualidade, compostos fenólicos e atividade antioxidante (Silva et al. 2022). Ağçeli (2022), destacou que os filmes produzidos com mucilagem de sementes de chia e levan têm o potencial e serem usados em campos industriais e médicos, visto que foi relatado que os filmes preservaram suas propriedades antibacterianas e, além disso, foi destacado a importância da natureza amigável desses filmes, contribuído para atender o objetivo de produção sustentável global. Além das aplicações na área de alimentos, os filmes produzidos baseados em mucilagem, como a de sementes de *Ocimum basilicum* podem ser utilizados na formulação de drogas, contribuído para a entrega de medicamentos (Hosseini et al., 2022). A mucilagem de cladódios de cactos vem sendo alvo de estudo sobre suas propriedades, como apresentado nos Itens anteriores. Portanto, o uso como revestimento comestível é um potencial aplicação para a indústria de alimentos.

Atualmente, os paraprobióticos e postbióticos produzidos por bactérias do ácido láctico são conhecidos por possuir atividade antimicrobiana, como foi apresentado nos Itens anteriores deste trabalho, além de outros benéficos à saúde. Portanto, são um produto adequado para uso na indústria de alimentos como um conservante natural e com boa funcionalidade, que podem

ser incorporados a revestimentos comestíveis, fornecendo características únicas e contribuído para conservação da qualidade de frutas frescas.

4. REFERÊNCIAS

Abbas, E. Y.; Ezzat, M. I.; El Hefnawy, H. M.; Abdel-Sattar, E. An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. **Journal of Food Biochemistry**, 2 Jul. 2022. https://doi.org/10.1111/jfbc.14310.

Abidi, S.; Ben Salem, H.; Vasta, V.; Priolo, A. Supplementation with barley or spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. inermis) cladodes on digestion, growth and intramuscular fatty acid composition in sheep and goats receiving oaten hay. **Small Ruminant Research**, vol. 87, no. 1–3, p. 9–16, Nov. 2009. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.09.004.

Ağçeli, G. K. A new approach to nanocomposite carbohydrate polymer films: Levan and chia seed mucilage. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 218, p. 751–759, Oct. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.157.

Albuquerque, J. G. de; Escalona-Buendía, H. B.; Aquino, J. de S.; Vasconcelos, M. A. da S. Nopal beverage (*Opuntia ficus-indica*) as a non-traditional food: Sensory properties, expectations, experiences, and emotions of low-income and food-insecure Brazilian potential consumers. **Food Research International**, vol. 152, p. 110910, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110910.

Ali, S. K.; Mahmoud, S. M.; El-Masry, S. S.; Alkhalifah, D. H. M.; Hozzein, W. N.; Aboel-Ainin, M. A. Phytochemical screening and characterization of the antioxidant, anti-proliferative and antibacterial effects of different extracts of *Opuntia ficus-indica* peel. **Journal of King Saud University - Science**, p. 102216, Jul. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102216.

Almada, C. N; Almada-Erix, C. N; Costa, W. K. A.; Silva, J.; Cabral, L.; Noronha, M. F; Goncalves, A. E. S. S.; Santos, A.; Lollo, P.; C.; Magnani, M.; Sant'ana, A. S. Wheat-durum pasta added of inactivated *Bifidobacterium animalis* decreases glucose and total cholesterol levels and modulates gut microbiota in healthy rats. **International Journal ff Food Sciences and Nutrition,** vol. 72, no. 6, p. 781–793, Aug. 2021. https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1877261.

Almada, C. N.; Almada, C. N.; Martinez, R. C. R.; Sant'ana, A. S. Paraprobiotics: Evidences on their ability to modify biological responses, inactivation methods and perspectives on their

application in foods. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 58, p. 96–114, Dec. 2016. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.011.

Almuflih, A. S.; Sharma, J.; Tyagi, M.; Bhardwaj, A.; Qureshi, M. R. N. M.; Khan, N. Leveraging the Dynamics of Food Supply Chains towards Avenues of Sustainability. **Sustainability**, vol. 14, no. 12, p. 6958, 7 Jun. 2022. https://doi.org/10.3390/su14126958.

Amui, L. B. L.; Jabbour, C. J. C.; Jabbour, A. B. L. De Sousa; Kannan, D. Sustainability as a dynamic organizational capability: a systematic review and a future agenda toward a sustainable transition. **Journal of Cleaner Production**, vol. 142, p. 308–322, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.103.

Andreu-Coll, L.; Cano-Lamadrid, M.; Noguera-Artiaga, L.; Lipan, L.; Carbonell-Barrachina, Á. A.; Rocamora-Montiel, B.; Legua, P.; Hernández, F.; López-Lluch, D. Economic estimation of cactus pear production and its feasibility in Spain. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 103, p. 379–385, Sep. 2020. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.003.

Angulo-Bejarano, P. I.; Gómez-García, M. Del R.; Valverde, M. E.; Paredes-López, O. Nopal (*Opuntia* spp.) and its Effects on Metabolic Syndrome: New Insights for the Use of a Millenary Plant. **Current Pharmaceutical Design**, vol. 25, no. 32, p. 3457–3477, 15 Nov. 2019. https://doi.org/10.2174/1381612825666191010171819.

Araújo, F. F. de; Farias, D. de P.; Neri-Numa, I. A.; Pastore, G. M. Underutilized plants of the Cactaceae family: Nutritional aspects and technological applications. **Food Chemistry**, vol. 362, p. 130196, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130196.

Aschemann-Witzel, J.; Peschel, A. O. How circular will you eat? The sustainability challenge in food and consumer reaction to either waste-to-value or yet underused novel ingredients in food. **Food Quality and Preference**, vol. 77, p. 15–20, Oct. 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.04.012.

Ayuso, M.; Carpena, M.; Taofiq, O.; Albuquerque, T. G.; Simal-Gandara, J.; Oliveira, M. B. P.P.; Prieto, M. A.; Ferreira, I. C.F.R.; Barros, L. Fig "Ficus carica L." and its by-products: A decade evidence of their health-promoting benefits towards the development of novel food formulations. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 127, p. 1–13, Sep. 2022. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.010.

Barbosa, D. M.; Santos, G. M. C. dos; Gomes, D. L.; Santos, É. M. da C.; Silva, R. R. V. da; Medeiros, P. M. de. Does the label 'unconventional food plant' influence food acceptance by

potential consumers? A first approach. **Heliyon,** vol. 7, no. 4, p. e06731, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06731.

Bouazizi, S.; Montevecchi, G.; Antonelli, A.; Hamdi, M. Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation. **LWT**, vol. 124, p. 109155, Apr. 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109155.

Caldera-Villalobos, M.; Álvarez-Venicio, V.; Arenas-Sáenz, M.; Leal-Acevedo, B.; Carreón-Castro, M. Del P. Radiochemical transformation of mucilage extracted from Opuntia ficus-índica using gamma radiation. **Applied Radiation and Isotopes**, p. 110430, Aug. 2022. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110430.

Cantwell, M.; Rodríguez-Felix, A.; Robles-Contreras, F. Postharvest physiology of prickly pear cactus stems. **Scientia Horticulturae**, vol. 50, no. 1–2, p. 1–9, Apr. 1992. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(05)80003-2.

Capozzi, F. Food Innovation in the Frame of Circular Economy by Designing Ultra-Processed Foods Optimized for Sustainable Nutrition. **Frontiers in Nutrition**, vol. 9, 3 May 2022. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.886220.

Cardoso, D. B.; Carvalho, F. F. R. de; Medeiros, G. R. De; Guim, A.; Cabral, A. M. D.; Véras, R. M. L.; Santos, K. C. dos; Dantas, L. C. N.; Nascimento, A. G. de O. Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Animal Feed Science and Technology**, vol. 247, p. 23–31, Jan. 2019. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.016.

Carmona, J. C.; Robert, P.; Vergara, C.; Sáenz, C. Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt. **LWT**, vol. 138, p. 110672, Mar. 2021. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110672.

Cavalcante, A. de M. B.; Sampaio, A. C. Praciano. Modeling the potential distribution of cacti under climate change scenarios in the largest tropical dry forest region in South America. **Journal of Arid Environments**, vol. 200, p. 104725, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104725.

Chang, H. M.; Foo, H. L.; Loh, T. C.; Lim, E. T. C.; Abdul Mutalib, N. E. Comparative Studies of Inhibitory and Antioxidant Activities, and Organic Acids Compositions of Postbiotics Produced by Probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* Strains Isolated From Malaysian Foods. **Frontiers In Veterinary Science**, vol. 7, Jan. 2021. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.602280.

Chettri, S.; Sharma, N.; Mohite, A. M. Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables. **Biomaterials Advances**, vol. 154, p. 213632, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213632.

Corona-Cervantes, K.; Parra-Carriedo, A.; Hernández-Quiroz, F.; Martínez-Castro, N.; Vélez-Ixta, J. M.; Guajardo-López, D.; García-Mena, J.; Hernández-Guerrero, C. Physical and Dietary Intervention with *Opuntia ficus-indica* (Nopal) in Women with Obesity Improves Health Condition through Gut Microbiota Adjustment. **Nutrients**, vol. 14, no. 5, p. 1008, 27 Feb. 2022. https://doi.org/10.3390/nu14051008.

Cruz-Rubio, J. M.; Mueller, M.; Viernstein, H.; Loeppert, R.; Praznik, W. Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. **Food Chemistry**, vol. 362, p. 130167, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130167.

Cruz-Rubio, J. M.; Mueller, M.; Loeppert, R.; Viernstein, H.T; Praznik, W. The Effect of Cladode Drying Techniques on the Prebiotic Potential and Molecular Characteristics of the Mucilage Extracted from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. **Scientia Pharmaceutica**, vol. 88, no. 4, p. 43, 2 Oct. 2020. https://doi.org/10.3390/scipharm88040043.

Cuevas-Gonzalez, P F; Liceaga, A M; Aguilar-Toala, J E. Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications. **Food Research International**, vol. 136, Oct. 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109502.

Daniloski, D.; D'cunha, N. M.; Speer, H.; Mckune, A. J.; Alexopoulos, N.; Panagiotakos, D. B.; Petkoska, A. T.; Naumovski, N. Recent developments on *Opuntia* spp., their bioactive composition, nutritional values, and health effects. **Food Bioscience**, vol. 47, p. 101665, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101665.

Dantas, D. L. da S.; Viera, V. B.; Soares, J. K. B.; dos Santos, K. M. O.; Egito, A. S. do; Figueirêdo, R. M. F. de; Lima, M. dos S.; Machado, N. A. F.; Souza, M. de F. V. de; Conceição, M. L. da; Queiroga, R. De C. R. do E.; Oliveira, M. E. G. de. *Pilosocereus gounellei* (xique-xique) flour: Improving the nutritional, bioactive, and technological properties of probiotic goat-milk yogurt. **LWT**, vol. 158, p. 113165, Mar. 2022. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113165.

Dias, J. V. B.; Costa, W. K. A.; Melo, D. de S.; Oliveira, K. Á. R. De; Batista, A. U. D.; de Souza, E. L.; Schwan, R. F.; Pimentel, T. C.; Magnani, M. Probiotic and synbiotic edible

coatings: Effects on *Lacticaseibacillus casei* viability and general quality of minimally processed fruit during storage. **Food Bioscience,** vol. 56, p. 103144, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103144.

Díaz, M. Del S. S.; La Rosa, A.-P. B. De; Héliès-Toussaint, C.; Guéraud, F.; Nègre-Salvayre, A. *Opuntia* spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, vol. 2017, p. 1–17, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/8634249.

Dick, M.; Limberger, C.; Thys, R. C. S.; Rios, A. De O.; Flôres, S. H. Mucilage and cladode flour from cactus (*Opuntia monacantha*) as alternative ingredients in gluten-free crackers. **Food Chemistry**, vol. 314, p. 126178, Jun. 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126178.

Du Toit, A.; De Wit, M.; Osthoff, G.; Hugo, A. Antioxidant properties of fresh and processed cactus pear cladodes from selected *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* cultivars. **South African Journal of Botany**, vol. 118, p. 44–51, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.014.

Dubeux, J. C. B.; Santos, M. V. F. dos; Cunha, M. V. Da; Santos, D. C. dos; Souza, R. T. de A.; Mello, A. C. L. de; Souza, T. C. de. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, vol. 275, p. 114890, May 2021. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890.

El Otmani, S.; Chentouf, M.; Hornick, J. L.; Cabaraux, J. F. Chemical composition and in vitro digestibility of alternative feed resources for ruminants in Mediterranean climates: olive cake and cactus cladodes**. The Journal of Agricultural Science**, vol. 157, no. 03, p. 260–271, 27 Apr. 2019. https://doi.org/10.1017/S0021859619000558.

El-Hawary, S. S.; Sobeh, M.; Badr, W. K.; Abdelfattah, M. A.O.; Ali, Z. Y.; El-Tantawy, M. E.; Rabeh, M. A.; Wink, M. HPLC-PDA-MS/MS profiling of secondary metabolites from *Opuntia ficus-indica* cladode, peel and fruit pulp extracts and their antioxidant, neuroprotective effect in rats with aluminum chloride induced neurotoxicity. **Saudi Journal of Biological Sciences**, vol. 27, no. 10, p. 2829–2838, Oct. 2020. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.07.003.

Essa, M. M.; Bishir, M.; Bhat, A.; Chidambaram, S. B.; Al-Balushi, B.; Hamdan, H.; Govindarajan, N.; Freidland, R. P.; Qoronfleh, M. W. Functional foods and their impact on health. **Journal of Food Science and Technology**, 8 Jul. 2021. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3.

EUROPEAN UNION. Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 november 2008 on waste and repealin certain directives. **Official Journal of the European Union,** vol. 312, no. 3, p. 22, 2008.

Fasogbon, B. M.; Adebo, O. A. A bibliometric analysis of 3D food printing research: A global and African perspective. **Future Foods**, vol. 6, p. 100175, Dec. 2022. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100175.

Flórez, M.; Guerra-Rodríguez, E.; Cazón, P.; Vázquez, M. Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. **Food Hydrocolloids**, vol. 124, p. 107328, Mar. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328.

Freitas, R. S.G. de; Cunha, D. T. da; Stedefeldt, E. Food safety knowledge as gateway to cognitive illusions of food handlers and the different degrees of risk perception. **Food Research International**, vol. 116, p. 126–134, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.058.

Gibson, G. R.; Hutkins, R.; Sanders, M. E.; Prescott, S. L.; Reimer, R. A.; Salminen, S. J.; Scott, K; Stanton, C.; Swanson, K. S.; Cani, P. D.; Verbeke, K.; Reid, G. Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, vol. 14, no. 8, p. 491–502, 14 Aug. 2017. https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75.

Gómez-Maqueo, A.; García-Cayuela, T.; Fernández-López, R.; Welti-Chanes, J.; Cano, M. P. Inhibitory potential of prickly pears and their isolated bioactives against digestive enzymes linked to type 2 diabetes and inflammatory response. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, vol. 99, no. 14, p. 6380–6391, 12 Nov. 2019. https://doi.org/10.1002/jsfa.9917.

Gong, G.; Guan, Y.-Y.; Zhang, Z.-L.; Rahman, K.; Wang, S.-J.; Zhou, S.; Luan, X.; Zhang, H. Isorhamnetin: A review of pharmacological effects. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, vol. 128, p. 110301, Aug. 2020. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110301.

González-Ponce, H. A.; Martínez-Saldaña, M. C.; Tepper, P. G.; Quax, W. J.; Buist-Homan, M.; Faber, K. N.; Moshage, H. Betacyanins, major components in *Opuntia* red-purple fruits, protect against acetaminophen-induced acute liver failure. **Food Research International**, vol. 137, p. 109461, Nov. 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109461.

Granato, D.; Nunes, D. S.; Barba, F. J. An integrated strategy between food chemistry, biology, nutrition, pharmacology, and statistics in the development of functional foods: A proposal.

Trends in Food Science & Technology, vol. 62, p. 13–22, Apr. 2017. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.010.

Guevara-Arauza, J. C.; Ornelas-Paz, J. de J.; Pimentel-González, D. J.; Rosales Mendoza, S.; Soria Guerra, R. E.; Paz Maldonado, L. M. T. Prebiotic effect of mucilage and pectic-derived oligosaccharides from nopal (*Opuntia ficus-indica*). **Food Science and Biotechnology**, vol. 21, no. 4, p. 997–1003, 31 Aug. 2012. https://doi.org/10.1007/s10068-012-0130-1.

Gusha, J.; Halimani, T. E.; Katsande, S.; Zvinorova, P. I. The effect of *Opuntia ficus indica* and forage legumes based diets on goat productivity in smallholder sector in Zimbabwe. **Small Ruminant Research,** vol. 125, p. 21–25, Apr. 2015. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.02.018.

Hernández, A.; Rodríguez, A.; Córdoba, M. G; Martín, A.; Ruiz-Moyano, S. Fungal control in foods through biopreservation. **Current Opinion in Food Science**, vol. 47, p. 100904, Oct. 2022. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100904.

Hernández-Becerra, E.; Aguilera-Barreiro, M. de L. A.; Contreras-Padilla, M.; Pérez-Torrero, E.; Rodriguez-Garcia, M. E. Nopal cladodes *(Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. **Journal of Functional Foods**, vol. 95, p. 105183, Aug. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105183.

Hosseini, M. S.; Kamali, B.; Nabid, M. R. Multilayered mucoadhesive hydrogel films based on *Ocimum basilicum* seed mucilage/thiolated alginate/dopamine-modified hyaluronic acid and PDA coating for sublingual administration of nystatin. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 203, p. 93–104, Apr. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.031.

Huang, J.; Hu, Z.; Li, G.; Hu, L.; Chen, J.; Hu, Y. Make your packaging colorful and multifunctional: The molecular interaction and properties characterization of natural colorant-based films and their applications in food industry. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 124, p. 259–277, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.028.

Kent, K.; Murray, S.; Penrose, B.; Auckland, S.; Godrich, S.; Lester, E.; Visentin, D. Food insecure households faced greater challenges putting healthy food on the table during the COVID-19 pandemic in Australia. **Appetite,** vol. 169, p. 105815, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105815.

Koutroulis, A. G. Dryland changes under different levels of global warming. **Science of The Total Environment**, vol. 655, p. 482–511, Mar. 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215.

Küçükgöz, K.; Trząskowska, M. Nondairy Probiotic Products: Functional Foods That Require More Attention. **Nutrients,** vol. 14, no. 4, p. 753, 10 Feb. 2022. https://doi.org/10.3390/nu14040753.

Laguna, B. Del C. C.; Gallegos, A. C. F.; Valdés, J. A. A.; Iliná, A.; Galindo, A. S.; Facio, A. O. C.; González, Sandra C. E.; Herrera, R. R. Physicochemical and functional properties of the undervalued fruits of cactus *Cylindropuntia imbricate* ("xoconostle") and antioxidant potential. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, vol. 39, p. 102245, Jan. 2022. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102245.

Lee, A.; Wang, Y.; Lo, S.-F. Life Cycle Assessment of Functional Food: Improving Sustainability in the Biotechnology Industry through Transparency. **Processes**, vol. 9, no. 12, p. 2130, 25 Nov. 2021. https://doi.org/10.3390/pr9122130.

Liu, Z.; Zhang, J.; Zhao, Q.; Wen, A.; Li, L.; Zhang, Y. The regulating effect of Tibet *Opuntia ficus-indica* (Linn.) Mill. polysaccharides on the intestinal flora of cyclophosphamide-induced immunocompromised mice. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 207, p. 570–579, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.039.

Liu, Z.; Vincken, J.-P.; De Bruijn, W. J.C. Tea phenolics as prebiotics. **Trends in Food Science & Technology**, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.007.

Lozano, E.; Salcedo, J.; Andrade, R. Evaluation of yam (*Dioscorea rotundata*) mucilage as a stabilizer in the production of mango nectar. **Heliyon**, vol. 6, no. 6, p. e04359, Jun. 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04359.

Lugo-Zarate, L.; Cruz-Cansino, N. Del S.; Ramírez-Moreno, E.; Zafra-Rojas, Q. Y.; Calderón-Ramos, Z. G.; Delgado-Olivares, L.; Arias-Rico, J.; Cervantes-Elizarrarás, A. Evaluation of physicochemical, microbiological, and antioxidant properties of a drinkable yogurt added with ultrasonicated purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, vol. 45, no. 9, 20 Sep. 2021. https://doi.org/10.1111/jfpp.15720.

Mabotja, M. B.; Gerrano, A. S.; Venter, S. L.; Du Plooy, C. P.; Kudanga, T.; Amoo, S. O. Nutritional variability in 42 cultivars of spineless cactus pear cladodes for crop improvement.

South African Journal of Botany, vol. 142, p. 140–148, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.022.

Machado, T. A. D. G.; Pacheco, M. T.B.; Queiroga, R. De C. R. Do E.; Cavalcante, L. M.; Bezerril, F. F.; Ormenese, R. De C. S. C.; Garcia, A. De O.; Nabeshima, E. H.; Pintado, M. M. E.; De Oliveira, M. E. G. Nutritional, physicochemical and sensorial acceptance of functional cookies enriched with xiquexique (*Pilosocereus gounellei*) flour. **PLOS ONE**, vol. 16, no. 8, p. e0255287, 10 Aug. 2021. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255287.

Malfa, G. A.; Di Giacomo, C.; Cardia, L.; Sorbara, E. E.; Mannucci, C.; Calapai, G. A standardized extract of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill and *Olea europaea* L. improves gastrointestinal discomfort: A double-blinded randomized-controlled study. **Phytotherapy Research**, vol. 35, no. 7, p. 3756–3768, 16 Jul. 2021. https://doi.org/10.1002/ptr.7074.

Martirosyan, D.; Von Brugger, J.; Bialow, S. Functional food science: Differences and similarities with food science**. Functional Foods in Health and Disease**, vol. 11, no. 9, p. 408, 2 Sep. 2021. https://doi.org/10.31989/ffhd.v11i9.831.

Matboli, M.; Saad, M.; Hasanin, A. H.; A. Saleh, L.; Baher, W.; Bekhet, M. M.; Eissa, S. New insight into the role of isorhamnetin as a regulator of insulin signaling pathway in type 2 diabetes mellitus rat model: Molecular and computational approach. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, vol. 135, p. 111176, Mar. 2021. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.111176.

Mayer, J. A.; Cushman, J. C. Nutritional and mineral content of prickly pear cactus: A highly water-use efficient forage, fodder and food species. **Journal of Agronomy and Crop Science**, vol. 205, no. 6, p. 625–634, 16 Dec. 2019. https://doi.org/10.1111/jac.12353.

Meléndez-Martínez, A. J.; Böhm, V.; Borge, G. I. A.; Cano, M. P.; Fikselová, M.; Gruskiene, R.; Lavelli, V.; Loizzo, M. R.; Mandić, A. I.; Brahm, P. M.; Mišan, A. Č.; Pintea, A. M.; Sereikaitė, J.; Vargas-Murga, L.; Vlaisavljević, S. S.; Vulić, J. J.; O'brien, N. M. Carotenoids: Considerations for Their Use in Functional Foods, Nutraceuticals, Nutricosmetics, Supplements, Botanicals, and Novel Foods in the Context of Sustainability, Circular Economy, and Climate Change. **Annual Review of Food Science and Technology**, vol. 12, no. 1, p. 433–460, 25 Mar. 2021. https://doi.org/10.1146/annurev-food-062220-013218.

Mi, X.-J.; Tran, T. H. M.; Park, H.-R.; Subramaniyam, S. X. X. Y.; Choi, H. S.; Kim, J.; Koh, S. C.; Kim, Y. J. Immune-enhancing effects of postbiotic produced by *Bacillus velezensis* Kh2-

2 isolated from Korea Foods. **Food Research International**, vol. 152, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110911.

Mohammadi, R.; Moradi, M.; Tajik, H.; Molaei, R. Potential application of postbiotics metabolites from bioprotective culture to fabricate bacterial nanocellulose based antimicrobial packaging material. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 220, p. 528–536, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.108.

Mondal, S.; Balasubramanian, A.; Biswas, P.; Agrawal, S.; Ghosh, S.; Dey, S. Characterization of pearl millet oligosaccharides and evaluation of their prebiotic potential. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, vol. 28, p. 100324, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2022.100324.

Montiel-Sánchez, M.; García-Cayuela, T.; Gómez-Maqueo, A.; García, H. S.; Cano, M. P. In vitro gastrointestinal stability, bioaccessibility and potential biological activities of betalains and phenolic compounds in cactus berry fruits (*Myrtillocactus geometrizans*). **Food Chemistry**, vol. 342, p. 128087, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128087.

Moradi, M.; Kousheh, S. A.; Almasi, H.; Alizadeh, A.; Guimaraes, J. T; Yilmaz, N.; Lotfi, A. Postbiotics produced by lactic acid bacteria: The next frontier in food safety. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, vol. 19, no. 6, p. 3390–3415, Nov. 2020. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12613.

Mottaleb, K. A.; Fatah, F. A.; Kruseman, G.; Erenstein, O. Projecting food demand in 2030: Can Uganda attain the zero hunger goal?. **Sustainable Production and Consumption**, vol. 28, p. 1140–1163, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.027.

Mousavi, S. R.; Rahmati-Joneidabad, M.; Noshad, M. Effect of chia seed mucilage/bacterial cellulose edible coating on bioactive compounds and antioxidant activity of strawberries during cold storage. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 190, p. 618–623, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.213.

Moussa-Ayoub, T. E.; Jäger, H.; Knorr, D.; El-Samahy, S. K.; Kroh, L. W.; Rohn, S. Impact of pulsed electric fields, high hydrostatic pressure, and thermal pasteurization on selected characteristics of *Opuntia dillenii* cactus juice. **LWT - Food Science and Technology**, vol. 79, p. 534–542, Jun. 2017. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.061.

Moussa-Ayoub, T. E.; Youssef, K.; El-Samahy, S. K.; Kroh, L. W.; Rohn, S. Flavonol profile of cactus fruits (*Opuntia ficus-indica*) enriched cereal-based extrudates: Authenticity and

impact of extrusion. **Food Research International**, vol. 78, p. 442–447, Dec. 2015. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.019.

Msaddak, L.; Abdelhedi, O.; Kridene, A.; Rateb, M.; Belbahri, L.; Ammar, E.; Nasri, M.; Zouari, N. *Opuntia ficus-indica* cladodes as a functional ingredient: bioactive compounds profile and their effect on antioxidant quality of bread**. Lipids in Health and Disease**, vol. 16, no. 1, p. 32, 7 Dec. 2017. https://doi.org/10.1186/s12944-016-0397-y.

Nataraj, B. H; Ali, S. A.; Behare, P.; Yadav, H. Postbiotics-parabiotics: the new horizons in microbial biotherapy and functional foods. **Microbial Cell Factories**, vol. 19, no. 1, Aug. 2020. https://doi.org/10.1186/s12934-020-01426-w.

Nunes, A. R. Da C.; Mangolin, C. A.; Braz De Oliveira, A. J.; Gonçalves, R. A. C.; Avincola, A. Da S.; Almeida, R. T. R. De; Pilau, E. J.; Machado, M. De F. P. Da S. *Cereus peruvianus* Mill. (Cactaceae) as a source of natural antioxidants: Phenolic compounds and antioxidant activity of cladode extracts in two collection periods. **Current Research in Food Science**, vol. 5, p. 984–991, 2022. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.05.014.

Oliveira, J. M. C.; Souza, E. L.; Lima, Kaíque Y. G.; Lima, M. dos S.; Viera, V.B.; Queiroga, R. de C. R. do E.; Oliveira, M. E. G. Physicochemical Parameters, Phytochemical Profile and Antioxidant Properties of a New Beverage Formulated with Xique-Xique (*Pilosocereus gounellei*) Cladode Juice. **Foods**, vol. 10, no. 9, p. 1970, 24 Aug. 2021. https://doi.org/10.3390/foods10091970.

Otálora, M. C.; Barbosa, H. De J.; Perilla, J. E.; Osorio, C.; Nazareno, M. A. Encapsulated betalains (*Opuntia ficus-indica*) as natural colorants. Case study: Gummy candies. **LWT**, vol. 103, p. 222–227, Apr. 2019. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.074.

Panda, S. K.; Behera, S. K.; Witness Qaku, X.; Sekar, S.; Ndinteh, D. T.; Nanjundaswamy, H. M.; Ray, R. C.; Kayitesi, E. Quality enhancement of prickly pears (*Opuntia* sp.) juice through probiotic fermentation using *Lactobacillus fermentum* - ATCC 9338. **LWT**, vol. 75, p. 453–459, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.026.

Porfiri, L.; Burtscher, J.; Kangethe, R. T; Verhovsek, D.; Cattoli, G.; Domig, K. J; Wijewardana, V. Irradiated Non-replicative Lactic Acid Bacteria Preserve Metabolic Activity While Exhibiting Diverse Immune Modulation. **Frontiers In Veterinary Science**, vol. 9, May 2022. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.859124.

Putnik, P.; Kovačević, D. B. Sustainable Functional Food Processing. **Foods**, vol. 10, no. 7, p. 1438, 22 Jun. 2021. https://doi.org/10.3390/foods10071438.

Rad, A. H.; Aghebati-Maleki, L.; Gilani, N. K. H. S.; Abbasi, A.; Khani, N. Postbiotics, as Dynamic Biomolecules, and Their Promising Role in Promoting Food Safety. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, vol. 11, no. 6, p. 14529–14544, Dec. 2021. https://doi.org/10.33263/BRIAC116.1452914544.

Rad, A. H.; Hosseini, S.; Pourjafar, H. Postbiotics as Dynamic Biological Molecules for Antimicrobial Activity: A Mini-Review. **Biointerface Research In Applied Chemistry**, vol. 12, no. 5, p. 6543–6556, Oct. 2022. https://doi.org/10.33263/BRIAC125.65436556.

Ramírez-Rodríguez, Y.; Martínez-Huélamo, M.; Pedraza-Chaverri, J.; Ramírez, V.; Martínez-Tagüeña, N.; Trujillo, J. Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae Fruits: Recent findings and research opportunities. **Food Chemistry**, vol. 312, p. 126073, May 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073.

Remes-Troche, J. M.; Taboada-Liceaga, H.; Gill, S.; Amieva-Balmori, M.; Rossi, M.; Hernández-Ramírez, G.; García-Mazcorro, J. F.; Whelan, K. Nopal fiber (*Opuntia ficus - indica*) improves symptoms in irritable bowel syndrome in the short term: a randomized controlled trial. **Neurogastroenterology & Motility**, vol. 33, no. 2, 16 Feb. 2021. https://doi.org/10.1111/nmo.13986.

Reyes-Reyes, M.; Salazar-Montoya, J. A.; Rodríguez-Páez, L. I; Ramos-Ramírez, E. G. *In vitro* fermentation of oligosaccharides obtained from enzymatic hydrolysis of *Opuntia streptacantha* mucilage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, vol. 99, no. 6, p. 2883–2891, 31 Apr. 2019. https://doi.org/10.1002/jsfa.9501.

Ribeiro, T. S.; Sampaio, K. B.; Menezes, F. N. D. D.; De Assis, P. O. A.; Lima, M. Dos S.; Oliveira, M. E. G.; Souza, E. L.; Queiroga, R. De C. R. Do E. In vitro evaluation of potential prebiotic effects of a freeze-dried juice from *Pilosocereus gounellei* (A. Weber ex K. Schum. Bly. Ex Rowl) cladodes, an unconventional edible plant from Caatinga biome. **3 Biotech,** vol. 10, no. 10, p. 448, 24 Oct. 2020. https://doi.org/10.1007/s13205-020-02442-8.

Ribes, S.; Grau, R.; Talens, P. Use of chia seed mucilage as a texturing agent: Effect on instrumental and sensory properties of texture-modified soups. **Food Hydrocolloids**, vol. 123, p. 107171, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107171.

Rocchetti, G.; Pellizzoni, M.; Montesano, D.; Lucini, L. Italian *Opuntia ficus-indica* Cladodes as Rich Source of Bioactive Compounds with Health-Promoting Properties. **Foods**, vol. 7, no. 2, p. 24, 18 Feb. 2018. https://doi.org/10.3390/foods7020024.

Rocchetti, M. T.; Russo, P.; Capozzi, V.; Drider, D.; Spano, G.; Fiocco, D. Bioprospecting Antimicrobials from *Lactiplantibacillus plantarum*: Key Factors Underlying Its Probiotic Action. **International Journal of Molecular Sciences**, vol. 22, no. 21, Nov. 2021. https://doi.org/10.3390/ijms222112076.

Rockett, F. C.; Schmidt, H. de O. de O.; Schmidt, L.; Rodrigues, E.; Tischer, B.; Oliveira, V. R. de; Silva, V. L. da; Augusti, P. R.; Flôres, S. H.; Rios, A. Phenolic compounds and antioxidant activity in vitro and in vivo of Butia and *Opuntia* fruits. **Food Research International**, vol. 137, p. 109740, Nov. 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109740.

Ruiz-Gutiérrez, M. G.; Amaya-Guerra, C. A.; Quintero-Ramos, A.; Pérez-Carrillo, E.; Meléndez-Pizarro, C. O. Use of Red Cactus Pear *(Opuntia ficus-indica)* Encapsulated Powder to Pigment Extruded Cereal. **Journal of Food Quality**, vol. 2017, p. 1–12, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/7262464.

Sales, D. C.; Costa, A. A.; Silva, E. M. da; Vasconcelos Júnior, F. das C.; Cavalcante, A. de M. B.; Medeiros, S. de S.; Marin, A. M. P.; Guimarães, S. O.; Araújo Junior, L. M. De; Pereira, J. M. R. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 30, no. 4, p. 435–456, Dec. 2015. https://doi.org/10.1590/0102-778620140075.

Santiago, E.; Juániz, I.; Cid, C.; De Peña, M.-P. Extraction of (Poly)phenolic Compounds of Cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) Cladodes. **Food Analytical Methods**, vol. 14, no. 6, p. 1167–1175, 17 Jun. 2021. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01946-6.

Sánchez-Tapia, M.; Aguilar-López, M.; Pérez-Cruz, C.; Pichardo-Ontiveros, E.; Wang, M.; Donovan, S. M.; Tovar, A. R; Torres, N. Nopal (*Opuntia ficus indica*) protects from metabolic endotoxemia by modifying gut microbiota in obese rats fed high fat/sucrose diet. **Scientific reports**, vol. 7, no. 1, p. 4716, 2017. https://doi.org/10.1038/s41598-017-05096-4.

Sapna; S., Chhavi; P., Puneet; Y., Shashi P.; Gautam, S. Potential of emerging “all-natural” edible coatings to prevent post-harvest losses of vegetables and fruits for sustainable agriculture. **Progress in Organic Coatings**, vol. 193, p. 108537, Aug. 2024. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108537.

Schroeder, B. O; Bäckhed, F. Signals from the gut microbiota to distant organs in physiology and disease. **Nature Medicine**, vol. 22, no. 10, p. 1079–1089, 6 Oct. 2016. https://doi.org/10.1038/nm.4185.

Semwal, A.; Ambatipudi, K.; Navani, N. K. Development and characterization of sodium caseinate based probiotic edible film with chia mucilage as a protectant for the safe delivery of probiotics in functional bakery. **Food Hydrocolloids for Health**, vol. 2, p. 100065, Dec. 2022. https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100065.

Sharma, P.; Gaur, V. K.; Sirohi, R.; Varjani, S.; Kim, S. H.; Wong, J. W. C. Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. **Bioresource Technology**, vol. 325, p. 124684, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124684.

Shen, N.; Wang, T.; Gan, Q.; Liu, S.; Wang, L.; Jin, B. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. **Food Chemistry**, vol. 383, p. 132531, Jul. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531.

Silva, R. De S.; Fernandes, F. G.; Dantas, A. M.; Carvalho, L. M. De; Costa, W. K. A. Da; Lima, M. Dos S.; Magnani, M.; Borges, G. Da S. C. Juá (*Ziziphus joazeiro* Mart.) mucilage and juá by-product phenolic extract improve quality parameters and retain bioactive compounds in fresh-cut pineapple during storage. **Food Research International**, vol. 161, p. 111826, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111826.

Son, J.-S.; Do, V. B.; Kim, K.-O.; Cho, M. S.; Suwonsichon, T.; Valentin, D. Understanding the effect of culture on food representations using word associations: The case of “rice” and “good rice.” **Food Quality and Preference**, vol. 31, p. 38–48, Jan. 2014. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.07.001.

Song, H.; Chu, Q.; Yan, F.; Yang, Y.; Han, W.; Zheng, X. Red pitaya betacyanins protects from diet-induced obesity, liver steatosis and insulin resistance in association with modulation of gut microbiota in mice. **Journal of Gastroenterology and Hepatology**, vol. 31, no. 8, p. 1462–1469, Aug. 2016. https://doi.org/10.1111/jgh.13278.

Souza, W. F. C. De; Almeida, F. L. C.; Castro, R. J. S. De; Sato, H. H. Isomaltulose: From origin to application and its beneficial properties – A bibliometric approach. **Food Research International**, vol. 155, p. 111061, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111061.

Suo, S.-K.; Zheng, S.-L.; Chi, C.-F.; Luo, H.-Y.; Wang, B. Novel angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from tuna byproducts—milts: Preparation, characterization, molecular docking study, and antioxidant function on H_2O_2-damaged human umbilical vein endothelial cells. **Frontiers in Nutrition**, vol. 9, 22 Jul. 2022. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.957778.

Sawada, D.; Sugawara, T.; Hirota, T.; Nakamura, Y. Effects of *Lactobacillus gasseri* CP2305 on Mild Menopausal Symptoms in Middle-Aged Women. **Nutrients,** vol. 14, no. 9, May 2022. https://doi.org/10.3390/nu14091695.

Tabarestani, P. S.; Kashiri, M.; Maghsoudlou, Y.; Tabarestani, H. S.; Ghorbani, M. Effect of *Opuntia* pulp as a clean label ingredient on techno-functional properties of meat-free burger. **International Journal of Food Science & Technology**, vol. 57, no. 7, p. 3982–3989, 24 Jul. 2022. https://doi.org/10.1111/ijfs.15657.

Teame, T.; Wang, A.; Xie, M.; Zhang, Z.; Yang, Y.; Ding, Q.; Gao, C.; Olsen, R. E.; Ran, C.; Zhou, Z. Paraprobiotics and Postbiotics of Probiotic *Lactobacilli*, Their Positive Effects on the Host and Action Mechanisms: A Review. **Frontiers In Nutrition**, vol. 7, Oct. 2020. https://doi.org/10.3389/fnut.2020.570344.

Toushik, S. H.; Park, J.-H.; Kim, K.; Ashrafudoulla, M..; Ulrich, M. S. Isaie; Mizan, M. Furkanur Rahman; ROY, Pantu Kumar; SHIM, Won-Bo; KIM, Young-Mog; PARK, Si Hong; HA, Sang-Do. Antibiofilm efficacy of *Leuconostoc mesenteroides* J.27-derived postbiotic and food-grade essential oils against Vibrio parahaemolyticus, Pseudomonas aeruginosa, and *Escherichia coli* alone and in combination, and their application as a green preservative in the seafood industry. **Food Research International**, vol. 156, p. 111163, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111163.

Utpott, M.; Assis, R. Q.; Pagno, C. H.; Krigger, S. P.; Rodrigues, E.; Rios, A. De O.; Flôres, S. H. Evaluation of the Use of Industrial Wastes on the Encapsulation of Betalains Extracted from Red Pitaya Pulp (*Hylocereus polyrhizus*) by Spray Drying: Powder Stability and Application. **Food and Bioprocess Technology**, vol. 13, no. 11, p. 1940–1953, 2 Nov. 2020. https://doi.org/10.1007/s11947-020-02529-3.

Vargas-Albores, F.; Martinez-Cordova, L. R.; Hernandez-Mendoza, A.; Cicala, F.; Lago-Leston, A.; Martinez-Porchas, M. Therapeutic modulation of fish gut microbiota, a feasible

strategy for aquaculture?. **Aquaculture**, vol. 544, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737050.

Verón, H. E.; Cano, P. G.; Fabersani, E.; Sanz, Y.; Isla, M. I.; Espinar, M. T. F.; Ponce, J. V. G.; Torres, S. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice fermented with autochthonous *Lactobacillus plantarum* S-811. **Food & Function**, vol. 10, no. 2, p. 1085–1097, 2019. https://doi.org/10.1039/C8FO01591K.

Vieira, É. De A.; Alcântara, M. A.; Santos, N. A. Dos; Gondim, A. D.; Iacomini, M.; Mellinger, C.; Cordeiro, A. M. T. De M. Mucilages of cacti from Brazilian biodiversity: Extraction, physicochemical and technological properties. **Food Chemistry**, vol. 346, p. 128892, Jun. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128892.

Watanabe, J.; Hashimoto, N.; Yin, T.; Sandagdorj, B.; Arakawa, C.; Inoue, T.; Suzuki, S. Heat-killed *L actobacillus brevis* KB290 attenuates visceral fat accumulation induced by high-fat diet in mice. **Journal of Applied Microbiology**, vol. 131, no. 4, p. 1998–2009, 5 Oct. 2021. https://doi.org/10.1111/jam.15079.

Wichienchot, S.; Jatupornpipat, M.; Rastall, R. A. Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties. **Food Chemistry**, vol. 120, no. 3, p. 850–857, Jun. 2010. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.026.

Zeghbib, W.; Boudjouan, F.; Vasconcelos, V.; Lopes, G. Phenolic Compounds' Occurrence in *Opuntia* Species and Their Role in the Inflammatory Process: A Review. **Molecules**, vol. 27, no. 15, p. 4763, 25 Jul. 2022. https://doi.org/10.3390/molecules27154763.

Zhang, Y.; Runting, R. K.; Webb, E. L.; Edwards, D. P.; Carrasco, L. R. Coordinated intensification to reconcile the 'zero hunger' and 'life on land' Sustainable Development Goals. **Journal of Environmental Management**, vol. 284, p. 112032, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112032.

Zhang, Y.; Liang, H.; Wang, Y.; Cheng, R.; Pu, F.; Yang, Y.; Li, J.; Wu, S.; Shen, X.; He, F. Heat-inactivated *Lacticaseibacillus paracasei* N1115 alleviates the damage due to brain function caused by long-term antibiotic cocktail exposure in mice. **BMC Neuroscience**, vol. 23, no. 1, Jun. 2022. https://doi.org/10.1186/s12868-022-00724-w.

Zhu, T.; Yang, C.; Bao, X.; Chen, F.; Guo, X. Strategies for controlling biofilm formation in food industry. **Grain & Oil Science and Technology**, Jun. 2022. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.06.003.

CAPÍTULO II

METODOLOGIA GERAL

1. METODOLOGIA GERAL

Esta pesquisa foi conduzida em três etapas principais: A extração e caracterização da mucilagem de *O. cochenillifera*, a modificação desta mucilagem pela fermentação com *L. gasseri*, e a elaboração e avaliação de filmes comestíveis derivados da mucilagem fermentada. Cada etapa foi realizada com métodos específicos para fornecer uma compreensão abrangente das propriedades e potenciais aplicações da mucilagem de *O. cochenillifera*. A Figura 1 esquematiza as etapas do processamento e aplicação.

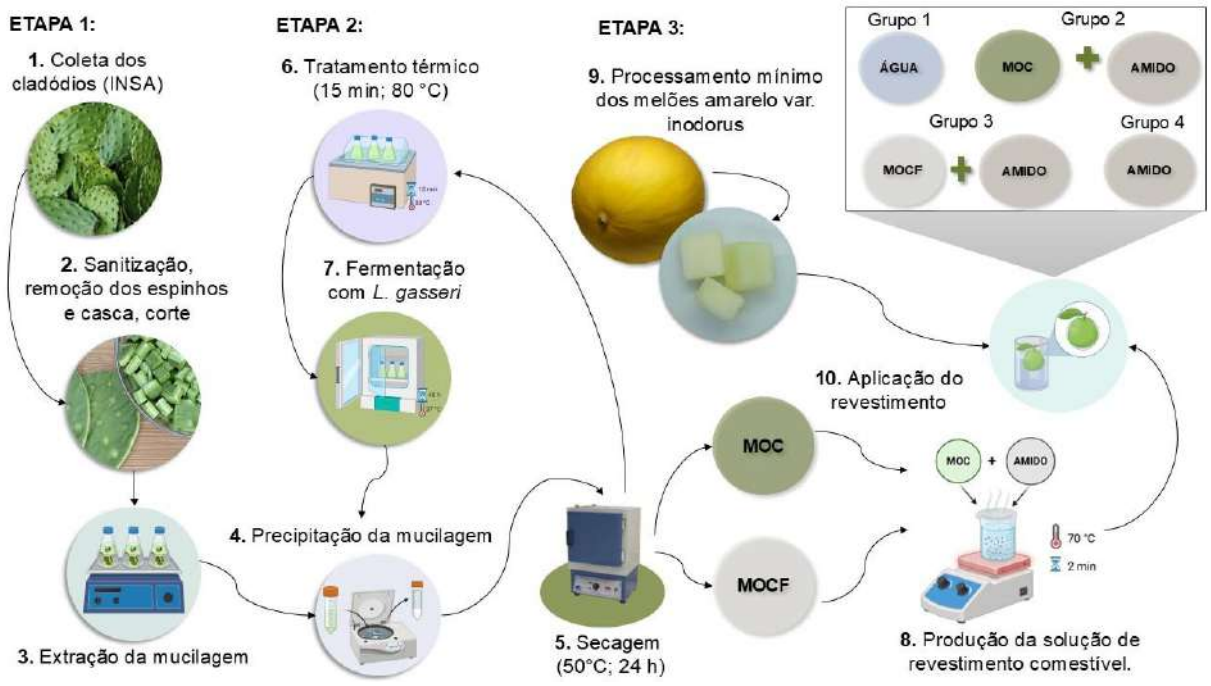

Figura 1. Fluxograma esquemático das etapas de processamento da mucilagem de *Opuntia cochenillifera* e sua aplicação como revestimento comestível em melão minimamente processado (*Cucumis melo* var. inodorus). Etapa 1: Coleta dos cladódios no INSA, seguida por sanitização, remoção de espinhos e casca, corte e extração da mucilagem. Etapa 2: Precipitação da mucilagem, secagem (50 °C/24 h), tratamento térmico (80 °C/15 min) e fermentação com *Lactobacillus gasseri* (37 °C/48 h). Etapa 3: Processamento mínimo do melão, produção das soluções de revestimento com diferentes formulações e aplicação dos revestimentos nos cubos de melão para avaliação da conservação pós-processamento.

1.1. Extração e caracterização da mucilagem

Os cladódios de *O. cochenillifera* foram colhidos na área experimental do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizada em Campina Grande, Paraíba, Brasil. Os cladódios tinham idade média de 20 dias e peso médio de 51,1 g. As dimensões médias dos cladódios foram de 17,1 × 6,9 × 0,6 cm. Todos os outros reagentes químicos de grau analítico foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Brasil).

1.1.1. Extração da mucilagem

A extração da mucilagem de *O. cochenillifera* (MOC) foi realizada utilizando cladódios frescos. Os cladódios foram lavados em solução de hipoclorito de sódio (200 ppm por 30 minutos). Em seguida, uma ferramenta de corte de aço removeu a camada de clorofila, espinhos e glochídeos. O parênquima foi usado para extração de mucilagem. O procedimento de extração envolveu a redução do parênquima em cubos de tamanho médio de 1 cm^3, que foram imersos em água destilada a 1:3 (p/v) e deixados de molho durante a noite sob agitação constante a 185 rpm. Em seguida, a mistura foi filtrada com tecido de náilon para extrair o máximo de mucilagem possível, espremendo o material vegetal. A mucilagem obtida foi precipitada com etanol a 95%, utilizando-se três vezes o volume de mucilagem. O precipitando foi separado e seco em estufa a 50 °C por 24 horas. O pó foi armazenado em temperatura ambiente em sacos laminados, o que se alinha com considerações práticas de escalabilidade industrial e preservação do produto.

1.1.2. Composição química e propriedades tecnológicas

A composição química da mucilagem foi determinada por meio da quantificação de carboidratos (Miller, 1959), proteínas totais (Lowry, 1951), teor de umidade (método 934.06), teor de cinzas (método 940.26) e medição de pH utilizando um medidor calibrado (AOAC, 2016). Quanto às propriedades tecnológicas, foram avaliadas a densidade aparente e compactada do pó (Fonseca *et al.*, 2024), a fluidez e a coesão utilizando o Índice de Carr (IC) (Carr, 1965) e o Coeficiente de Hausner (HR) (Hausner, 1967), além da capacidade de absorção de água e índice de inchamento (Ramos *et al.*, 2021). A capacidade de retenção de água (WRC) foi determinada com a dispersão de 1% do pó em água destilada, seguida de centrifugação e medição do peso do precipitado. O índice de inchamento (SI) foi calculado após a adição do pó a água destilada, repouso e centrifugação, com posterior pesagem do precipitado úmido.

1.1.3. Propriedades reológicas da mucilagem

Para investigar as propriedades reológicas da mucilagem de *O. cochenillifera* (MOC), a mucilagem foi dispersa em água destilada e tratada termicamente a 80 °C por 15 minutos para melhorar a solubilidade e dispersão, preservando as propriedades reológicas. O pH das amostras foi ajustado para 3,0, 5,0 e 7,0 usando HCl (2 M) e NaOH (4 M). As propriedades reológicas foram analisadas utilizando um reômetro com geometria de placa paralela, avaliando a viscosidade de cisalhamento constante em taxas variando de 0,1 a 1000 s^{-1} e as propriedades viscoelásticas por meio de testes de varredura de deformação. O módulo de armazenamento (G') e o módulo de perda (G") foram medidos com escoamentos de cisalhamento oscilatórios de pequena amplitude (0,1 a 100 rad/s). Os dados experimentais foram ajustados ao modelo Cross, (1965) para determinar a viscosidade aparente, viscosidade de cisalhamento zero, viscosidade de cisalhamento infinita, constante de tempo de Cross e índice de fluxo de Cross.

1.1.4. Viabilidade celular e atividade antioxidante

A viabilidade celular foi avaliada utilizando dois ensaios: o de redução de MTT (Mosmann, 1983; Suo et al., 2022) e o de incorporação de Sulforhodamina B (SRB) (Vichai; Kirtikara, 2006). No ensaio de MTT, células SH-SY5Y cultivadas em meio DMEM F12 suplementado com 10% de soro fetal bovino foram tratadas com diferentes concentrações de mucilagem (5000, 500, 50, 5, 0,5 e 0,05 μg/mL) por 24 horas. Após incubação, a solução de MTT foi adicionada e incubada a 37°C por 2 horas, seguida de dissolução dos cristais de formazan com isopropanol e leitura de absorbância a 560 nm e 630 nm. No ensaio SRB, as células foram tratadas da mesma forma, fixadas com tricloroacético a 10%, coradas com SRB e a absorbância foi medida a 510 nm e 620 nm, expressando a viabilidade celular em relação ao controle.

Além disso, a peroxidação lipídica foi quantificada utilizando o método de TBARS, que envolve a medição espectrofotométrica da coloração formada durante a reação do ácido tiobarbitúrico com produtos da peroxidação lipídica (Draper *et al.*, 1993). A atividade scavenger de radicais hidroxila foi determinada pela degradação oxidativa de 2-desoxirribose (2-DR), que é degradada pelos radicais hidroxila gerados no sistema de Fenton, com quantificação do produto final a 532 nm. O resultado foi expresso como uma porcentagem de inibição (Levine *et al.*, 1990).

1.2. Fermentação com *Lactobacillus gasseri*

Para modificar as propriedades e adicionar postbióticos e paraprobióticos, a mucilagem foi fermentada com *L. gasseri* a 37 °C por 24 horas, após reidratação a 2%. O processo incluiu tratamento térmico a 80 °C por 15 minutos para inativar as células bacterianas, com subsequente precipitação e secagem. A viabilidade celular foi monitorada durante o processo de fermentação por plaqueamento em profundidade.

1.2.1. Caracterização físico-químicas e propriedades térmicas

A caracterização físico-química da mucilagem envolveu a quantificação de monossacarídeos e ácidos carboxílicos por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), com análise adicional de glicose, xilose e galactose. O conteúdo de proteína, cinzas, umidade e pH foi determinado pelos métodos Lowry, (1951) e AOAC, (2016). As propriedades de cor foram avaliadas por coordenadas CIELAB. A morfologia dos pós de mucilagem foi examinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), enquanto as características térmicas foram analisadas por termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC). A cristalinidade das amostras foi avaliada por DRX usando XRD_7000 X-ray diffractometer (Shimadzu, Kyoto, Japan). O método de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi usado para detectar as bandas típicas e estruturas químicas existentes nas amostras.

1.2.2. Perfil de textura e propriedades funcionais

A análise de textura das mucilagens foi realizada por meio de um perfil de textura, usando um analisador TA-XT2, medindo firmeza, consistência e coesividade (Ribes; Grau; Talens, 2022). As propriedades funcionais, como solubilidade, capacidade de formação de espuma, estabilidade da espuma e capacidade emulsificante, foram avaliadas a diferentes temperaturas e condições de preparação, com cálculos de eficiência baseados no volume e estabilidade das espumas e emulsões formadas (Dick *et al.*, 2019).

1.3. Avaliação e aplicação de filmes comestíveis a base de mucilagem

1.3.1. Preparo dos filmes e caracterização

A preparação de filmes comestíveis consistiu na utilização de mucilagens controle e fermentada, combinadas com amido de milho, em concentrações de 1 g/100 mL, e com a adição de glicerol como plastificante. A mucilagem foi dissolvida e deixada em repouso para solubilização, enquanto o amido foi aquecido para formar a solução. Após a mistura, os filmes

foram secos em temperatura ambiente por 4 dias. Vários testes de caracterização dos filmes foram realizados, incluindo medição de espessura e teor de umidade (AOAC, 2016), solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água (Abedi; Sayadi; Oliyaei, 2024), cor, opacidade (Khodaman et al., 2022), morfologia (por MEV), e propriedades químicas (por FTIR). Além disso, a avaliação das propriedades mecânicas (ASTM, 1997), como resistência à tração, módulo de Young e alongamento, também foram realizadas para compreender a integridade estrutural dos filmes. A atividade antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli* foi investigada usando o método de disco difusão em ágar (NCCLS, 2003).

1.3.2. Aplicação dos filmes comestíveis em melões minimamente processados

A aplicabilidade dos filmes comestíveis foi testada em melão amarelo (*Cucumis melo* var. inodorus). Os frutos foram selecionados com base na uniformidade, aparência e ausência de defeitos, sendo sanitizados em solução de hipoclorito e cortados em cubos de 20 mm. Os cubos foram divididos em 4 grupos, com o primeiro grupo sendo imerso em água destilada como controle. Os outros grupos foram imersos nas respectivas misturas de MOC-S, MOCF-S e amido. Após secagem e formação de filme na superfície, as amostras foram armazenadas em embalagens PET a 5 °C por 12 dias (Dias *et al.*, 2023). As análises de qualidade das frutas foram realizadas em intervalos de 0, 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento, avaliando parâmetros como perda de massa, firmeza, aspecto visual, pH, acidez titulável e sólidos solúveis totais (Oliveira et al., 2020). A atividade antioxidante e o conteúdo de compostos fenólicos também foram determinados utilizando os métodos de Folin-Ciocalteu (Marinova; Ribarova; Atanassova, 2005; Singletton; Orthofer; Lamuela-Raventós, 1999), ABTS (Re *et al.*, 1999) e FRAP (Benzie; Strain, 1996).

1.4. Análise estatística

Na primeira etapa, o software OriginPro (OriginPro 2018 SR1 b9.5.1.195, OriginLab Corporation, Northampton, EUA) foi usado para o ajuste não linear do modelo Cross aos dados de viscosidade de cisalhamento constante. O software Statistica (Statistica versão 7.0, StatSoft, Inc., Tursa, EUA) foi utilizado para modelar os resultados com base nas variáveis experimentais independentes (pH, temperatura e concentração de mucilagem). Nas etapas seguintes, todos os dados experimentais foram interpretados e expressos como média e desvio padrão. Os valores obtidos em triplicata foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste múltiplo de

Tukey, considerando um nível de significância e $p < 0,05$, utilizando o software GraphPad Prism (GraphPad Software, version 8.0.1, United States of America).

2. REFERÊNCIAS

Abedi, E.; Sayadi, M.; Oliyaei, N. Fabrication and characterization of emulsion-based edible film containing cinnamon essential oil using chia seed mucilage. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 266, p. 131173, May 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131173.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. [*S. l.*]: AOAC International: Rockville, MD, 2016.

ASTM. **ASTM D882-97., ASTM. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting.** [*S. l.*]: ASTM book of standards, 1997.

Benzie, I. F.F.; Strain, J.J. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. **Analytical Biochemistry**, vol. 239, no. 1, p. 70–76, Jul. 1996. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292.

Carr, R. L. **Evaluating flow properties of solids**. 1965.

Cross, M. M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. **Journal of Colloid Science**, vol. 20, no. 5, p. 417–437, Jun. 1965. https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90022-X.

Oliveira, L. I. G.; Oliveira, K. Á. R.; Medeiros, E. S.; Batista, A. U. D.; Madruga, M. S.; Lima, M. Dos S.; Souza, E. L.; Magnani, M. Characterization and efficacy of a composite coating containing chitosan and lemongrass essential oil on postharvest quality of guava. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, vol. 66, p. 102506, Dec. 2020. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102506.

Dias, J. V. B.; Costa, W. K. A.; Melo, D. de S.; Oliveira, K. Ár. R. de; Batista, A. U. D.; Souza, E. L.; Schwan, R. F.; Pimentel, T. C.; Magnani, M. Probiotic and synbiotic edible coatings: Effects on *Lacticaseibacillus casei* viability and general quality of minimally processed fruit during storage. **Food Bioscience,** vol. 56, p. 103144, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103144.

Dick, M.; Dal Magro, L.; Rodrigues, R. C.; Rios, A. de O.; Flôres, S. H. Valorization of *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw. cladodes to obtain a mucilage with hydrocolloid features:

Physicochemical and functional performance. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 123, p. 900–909, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.126.

Draper, H. H.; Squires, E. J.; Mahmoodi, H.; Wu, J.; Agarwal, S.; Hadley, M. A comparative evaluation of thiobarbituric acid methods for the determination of malondialdehyde in biological materials. **Free Radical Biology and Medicine**, vol. 15, no. 4, p. 353–363, Oct. 1993. https://doi.org/10.1016/0891-5849(93)90035-S.

Fonseca, M. T.; Vital, A. C.; Silva, M. B.; Monteiro, S. S.; Nascimento, A.; Trindade, A. P.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. B. Improving the stability of spray-dried probiotic acerola juice: A study on hydrocolloids' efficacy and process variables. **Food and Bioproducts Processing**, vol. 147, p. 209–218, Sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.07.003.

Hausner, H. H. **Friction conditions in a mass of metal powder**. [*S. l.*]: Polytechnic Inst. of Brooklyn. Univ. of California, Los Angeles, 1967.

Khodaman, E.; Barzegar, H.; Jokar, A.; Jooyandeh, H. Production and evaluation of Physicochemical, Mechanical and Antimicrobial Properties of Chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage-gelatin based Edible Films Incorporated with Chitosan Nanoparticles. **Journal of Food Measurement and Characterization**, vol. 16, no. 5, p. 3547–3556, 7 Oct. 2022. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01470-7.

Levine, R. L.; Garland, D.; Oliver, C. N.; Amici, A.; Climent, I.; Lenz, A.-G.; Ahn, B.-W.; Shaltiel, S.; Stadtman, E. R. [49] Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins. In: **Methods in enzymology**, [*s. n.*], 1990. p. 464–478. https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)86141-H.

Lowry, O. H. Protein measurement with the Folin phenol reagent. **Journal of Biological Chemistry**, vol. 193, p. 265–275, 1951.

Marinova, D.; Ribarova, F.; Atanassova, M. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. **J. Univ. Chem. Technol. Metall.**, vol. 40, p. 255–260, 2005.

Miller, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical chemistry**, vol. 31, p. 426–428, 1959. .

Mosmann, T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. **Journal of Immunological Methods**, vol. 65, no. 1–2, p. 55–63, Dec. 1983. https://doi.org/10.1016/0022-1759(83)90303-4.

NCCLS. **Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests; Approved Standard—Eighth Edition.** NCCLS document M2-A8 (ISBN 1-56238-485-6). NCCLS, 940 West Valley Road, Suite 1400, Wayne, Pennsylvania 19087-1898 USA. [*S. l.*: *s. n.*], 2003.

Ramos, I. F. da S.; Magalhães, L. M.; Pessoa, C. do O.; Ferreira, P. M. P.; Rizzo, M. dos S.; Osajima, J. A.; Silva-Filho, E. C.; Nunes, C.; Raposo, F.; Coimbra, M. A.; Ribeiro, A. B.; Costa, M. P. New properties of chia seed mucilage (*Salvia hispanica* L.) and potential application in cosmetic and pharmaceutical products**. Industrial Crops and Products**, vol. 171, p. 113981, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113981.

Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, vol. 26, no. 9–10, p. 1231–1237, May 1999. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

Ribes, S.; Grau, R.; Talens, P. Use of chia seed mucilage as a texturing agent: Effect on instrumental and sensory properties of texture-modified soups**. Food Hydrocolloids**, vol. 123, p. 107171, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107171.

Singletton, V. L.; Orthofer, R.; Lamuela-Raventós, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In Methods in Enzymology; Elsevier: Amsterdam, **The Netherlands**, vol. 299, p. 152–178, 1999. .

Suo, S.-K.; Zheng, S.-L.; Chi, C.-F.; Luo, H.-Y.; Wang, B. Novel angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from tuna byproducts—milts: Preparation, characterization, molecular docking study, and antioxidant function on H_2O_2-damaged human umbilical vein endothelial cells. **Frontiers in Nutrition**, vol. 9, 22 Jul. 2022. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.957778.

Vichai, V.; Kirtikara, K. Sulforhodamine B colorimetric assay for cytotoxicity screening. **Nature Protocols,** vol. 1, no. 3, p. 1112–1116, 17 Aug. 2006. https://doi.org/10.1038/nprot.2006.179.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DA MUCILAGEM DE CLADÓDIOS DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA*: COMPORTAMENTO REOLÓGICO, CITOTOXICIDADE E POTENCIAL ANTIOXIDANTE

Monteiro, S. S.; Queiroz, J. V. S. De A.; Gomes, H. M.; Santos, L.; Moreira, J. C. F.; Gelain, D. P.; Fook, M. V. L.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. A. De B. Characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes: Rheological behavior, cytotoxicity, and antioxidant potential. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 707, p. 135824, Feb. 2025. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135824.

RESUMO: Este estudo explora a extração de mucilagem de cladódios de *Opuntia cochenillifera*, uma espécie subutilizada do gênero *Opuntia*, em água à temperatura ambiente e sob agitação contínua, evitando solventes agressivos e altas temperaturas para preservar suas propriedades físico-químicas e biológicas. A avaliação da segurança biológica da mucilagem revelou viabilidade celular superior a 70% em várias concentrações (0,05 – 5000 μg/mL) através de ensaios de 3-[4,5-dimetiltiazol-2-il]-2,5 difenil-tetrazólio (MTT) e sulforrodamina B (SRB). No entanto, as análises do potencial antioxidante revelaram efeitos protetores insuficientes contra o estresse oxidativo em todas as concentrações testadas, indicando a necessidade de um estudo mais complexo para entender completamente a capacidade antioxidante da amostra. Além disso, um comportamento fluido não newtoniano foi observado durante estudos reológicos e foi caracterizado por afinamento por cisalhamento. Variações significativas na viscosidade foram observadas em resposta à temperatura, pH e concentração, destacando a sensibilidade da mucilagem às condições ambientais e de composição. Este trabalho não apenas expande a compreensão da viabilidade biológica e das propriedades físicas da mucilagem de *O. cochenillifera*, mas também destaca sua potencial aplicação como um biopolímero multifuncional, sustentável e seguro para as indústrias alimentícia, cosmética e biomédica. Esses resultados estabelecem uma base científica robusta para futuras investigações sobre o desenvolvimento de aditivos naturais e biocompatíveis, contribuindo significativamente para o avanço de alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas em vários setores industriais.

Palavras-chave: *Opuntia*; Hidrocoloides; Propriedades viscoelásticas; Segurança biológica.

CHARACTERIZATION OF MUCILAGE FROM *OPUNTIA COCHENILLIFERA* CLADODES: RHEOLOGICAL BEHAVIOR, CYTOTOXICITY, AND ANTIOXIDANT POTENTIAL

ABSTRACT: This study explores the extraction of mucilage from cladodes of *Opuntia cochenillifera*, an underutilized species of the Opuntia genus, in water at room temperature and under continuous stirring, avoiding harsh solvents and high temperatures to preserve its physicochemical and biological properties. Biological safety evaluation of the mucilage revealed cell viability exceeding 70 % at various concentrations (0.05 – 5000 μg/mL) through 3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5 diphenyl-tetrazolium (MTT) and sulforhodamine B (SRB) assays. However, the analyses of antioxidant potential revealed insufficient protective effects against oxidative stress across all tested concentrations, indicating the need for a more complex study to understand the sample's antioxidant capacity fully. Additionally, a non-Newtonian fluid behavior was observed during rheological studies and was characterized by shear thinning. Significant variations in viscosity were noted in response to temperature, pH, and concentration, highlighting the mucilage's sensitivity to environmental and compositional conditions. This work not only expands the understanding of the biological viability and physical properties of *O. cochenillifera* mucilage but also highlights its potential application as a multifunctional, sustainable, and safe biopolymer for the food, cosmetic, and biomedical industries. These results establish a robust scientific foundation for future investigations into the development of natural and biocompatible additives, significantly contributing to the advancement of sustainable and environmentally friendly alternatives across multiple industrial sectors.

Key words: Opuntia; Hydrocolloid; Viscoelastic properties; Biological safety.

1. INTRODUÇÃO

A exploração de recursos naturais renováveis e sustentáveis para o desenvolvimento de novos materiais bioativos tem atraído um interesse crescente nos campos científico e industrial. Dentre esses recursos, espécies do gênero *Opuntia* se destacam por sua adaptabilidade a ambientes áridos e sua capacidade de retenção de água e produção de mucilagem em seus cladódios (Kassem et al., 2021). Embora *Opuntia ficus-indica* seja a espécie mais estudada e amplamente consumida deste gênero, seu cultivo enfrenta desafios significativos devido aos ataques de *Dactylopius opuntiae*, que ameaça os ecossistemas e a produtividade agrícola (Bezerra et al., 2022). Em contraste, outras espécies do gênero *Opuntia* permanecem subutilizadas, mas exibem características vantajosas. Um exemplo promissor é *O. cochenillifera*, que, além de compartilhar aspectos composicionais com espécies mais estudadas do gênero, é resistente a ataques de *D. opuntiae*, tornando-se uma alternativa valiosa para exploração industrial e biotecnológica (Pérez-Viveros et al., 2024).

A mucilagem de *Opuntia*, um hidrocolóide natural composto principalmente de polissacarídeos, destaca-se por suas propriedades estabilizantes, texturizantes e estruturantes - características desejáveis em formulações alimentícias, farmacêuticas e cosméticas - agregando valor funcional aos produtos (Solanki et al., 2024). As mucilagens derivadas de plantas exibem viscosidade característica e são frequentemente descritas como sistemas coloidais líquidos com uma composição rica em pectinas, açúcares e ácidos orgânicos, cujas propriedades podem variar dependendo da espécie botânica e do método de extração (Renard et al., 2012). Essas mucilagens possuem uma estrutura amorfa e translúcida formada pela polimerização de monossacarídeos, que podem estar associados aos ácidos urônicos, conferindo características únicas para diversas aplicações (Andrade; Silva; Pereira, 2024).

Além de suas funções tecnológicas, esses monossacarídeos oferecem benefícios potenciais à saúde, como regular o trânsito intestinal e reduzir os níveis de colesterol (Abbas et al., 2022; Cruz Filho et al., 2019). Por exemplo, a galactose é essencial para a formação de cerebrosídeos e gangliosídeos, que são importantes para o tecido nervoso cerebral (Silva et al., 2022). A manose é usada em suplementos dietéticos e cosméticos para melhorar a saúde do trato urinário devido às suas propriedades hidratantes e anti-inflamatórias. Outros componentes, como xilose, ramnose e arabinose, também têm diversas aplicações industriais: a xilose é fundamental na produção de furfural, a ramnose é usada como precursor farmacêutico e em aromatizantes, e a arabinose está presente em polissacarídeos de alta funcionalidade (Badui Dergal, 2006; Waldron, 2009). O ácido galacturônico, por sua vez, é amplamente utilizado

como agente acidificante em alimentos e como monômero na estruturação de pectinas (Waldron, 2009).

Embora esses monossacarídeos possam fornecer benefícios à saúde em certos contextos, é importante considerar sua digestibilidade e as interações microbianas específicas que ocorrem em diferentes sistemas digestivos quando fazem parte de matrizes complexas, como a mucilagem. Notavelmente, estudos como o de Rocha et al., (2024) demonstraram o potencial da mucilagem dos cladódios de *Opuntia dillenii* para modular a microbiota intestinal, ressaltando ainda mais o potencial funcional dessas mucilagens para aplicação em produtos alimentícios.

O comportamento reológico dos hidrocoloides é fundamental para a modificação da textura e avaliação de suas aplicações em várias indústrias, incluindo os setores alimentício, farmacêutico e cosmético. Estudos anteriores caracterizaram o comportamento reológico da mucilagem de espécies relacionadas, como *O. ficus-indica* (Medina-Torres, 2000; Quintero-García et al., 2021). A mucilagem desta espécie exibe comportamento não newtoniano, de afinamento por cisalhamento, com aumento da pseudoplasticidade à medida que sua concentração aumenta de 1% para 10% (p/p) (Medina-Torres, 2000). Além da influência da fonte vegetal, a caracterização reológica dos hidrocoloides em solução depende de fatores como temperatura, concentração, pH, grau de dispersão, tempo de armazenamento e presença de outros coloides liofílicos, íons e pequenas moléculas (Ma et al., 2021).

No entanto, poucos estudos exploram o potencial de *O. cochenillifera*. Um estudo de Pérez-Viveros et al., (2024) investigou as propriedades físico-químicas e funcionais de farinhas obtidas a partir de cladódios de *O. cochenillifera* e *O. ficus-indica*, submetidas a diferentes condições de extrusão, observando diferenças significativas na composição química, propriedades físicas, funcionais e fitoquímicas entre as duas espécies. Da mesma forma, Cruz Filho et al. (2019) compararam ligninas isoladas de cladódios de ambas as espécies para avaliar a ação imunomoduladora em esclerócitos de camundongos. No entanto, até o presente estudo, nenhuma pesquisa foi encontrada sobre as propriedades reológicas, citotóxicas e antioxidantes da mucilagem de *O. cochenillifera*.

A escassez de estudos sobre *O. cochenillifera*, particularmente sobre as características de sua mucilagem, destaca a necessidade de uma investigação aprofundada de suas propriedades reológicas, citotóxicas e bioativas. Nesse contexto, justifica-se estudar a influência da temperatura, pH e concentração na mucilagem extraída de *O. cochenillifera* e explorar sua potencial atividade antioxidante e citotóxica. Tais investigações expandirão nosso conhecimento de suas propriedades reológicas e facilitarão aplicações práticas, identificando

condições ideais para seu uso. Esta pesquisa pode, em última análise, levar a aplicações inovadoras em vários setores, aproveitando as características únicas das mucilagens derivadas de cactos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os cladódios de *O. cochenillifera* foram colhidos na área experimental do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizada em Campina Grande, Paraíba, Brasil. Os cladódios tinham idade média de 20 dias e peso médio de 51,1 g. As dimensões médias dos cladódios foram de 17,1 × 6,9 × 0,6 cm. Todos os outros reagentes químicos de grau analítico foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Brasil).

2.2. Extração de mucilagem

A extração da mucilagem de *O. cochenillifera* (MOC) foi realizada utilizando cladódios frescos. Os cladódios foram lavados em solução de hipoclorito de sódio (200 ppm por 30 minutos). Em seguida, uma ferramenta de corte de aço removeu a camada de clorofila, espinhos e glochídeos. O parênquima foi usado para extração de mucilagem. O procedimento de extração envolveu a redução do parênquima em cubos de tamanho médio de 1 cm^3, que foram imersos em água destilada a 1:3 (p/v) e deixados de molho durante a noite sob agitação constante a 185 rpm. Em seguida, a mistura foi filtrada com tecido de náilon para extrair o máximo de mucilagem possível, espremendo o material vegetal. A mucilagem obtida foi precipitada com etanol a 95%, utilizando-se três vezes o volume de mucilagem. O precipitando foi separado e seco em estufa a 50 °C por 24 horas. Essa temperatura foi escolhida com base em testes preliminares (dados não publicados) e uma análise criteriosa da estabilidade térmica dos polissacarídeos, que geralmente demonstram boa estabilidade nessa temperatura. Embora temperaturas mais altas tenham sido usadas em outros estudos, como 60 ° C para secagem de mucilagem de *O. cochenillifera* (Monrroy et al., 2017) e 105 °C para secagem de mucilagem de cladódio de *O. ficus-indica* (Otálora; Wilches-Torres; Castaño, 2021), a escolha de 50 °C teve como objetivo minimizar o risco de degradação térmica. Além disso, o período de secagem de 24 horas foi considerado adequado para reduzir o teor de umidade a níveis apropriados para armazenamento de longo prazo, evitando assim o crescimento microbiano e mantendo a integridade do produto. Dessa forma, as condições de secagem foram cuidadosamente selecionadas para equilibrar a remoção eficaz da umidade com a preservação da estabilidade do

polissacarídeo. O pó foi armazenado em temperatura ambiente em sacos laminados, o que se alinha com considerações práticas de escalabilidade industrial e preservação do produto.

2.3. Composição química

A composição química da mucilagem foi determinada pela quantificação de carboidratos usando o (Miller, 1959), proteínas totais pelo método de Lowry (Lowry, 1951), teor de umidade seguindo o método AOAC 934.06 (AOAC, 2016), teor de cinzas de acordo com o método 940.26 (AOAC, 2016) e medição de pH usando um medidor de pH calibrado.

2.4. Propriedades tecnológicas

2.4.1. Densidade aparente e compactada

A densidade aparente e compactada do pó foi determinada de acordo com o método descrito por Fonseca et al., (2024). Uma quantidade de 1 g foi transferida para um cilindro graduado de 10 mL. O volume ocupado foi registrado e o resultado para a densidade aparente foi expresso em g/cm³. Na mesma amostra, foi realizado a compactação (30 toques por minuto), o volume ocupado pela amostra foi registrado e a densidade compactada foi expressa em g/cm³.

2.4.2. Fluidez e coesão

A fluidez e a coesão foram avaliadas usando o Índice de Carr (IC) (Carr, 1965) e o Coeficiente de Hausner (HR) (Hausner, 1967) usando os resultados de densidade aparente e compactada, de acordo com as Equações (1), (2).

$$IC = \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \times 100 \quad (1)$$

$$Hausner = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (2)$$

onde, IC é o Índice de Carr (%), Hausner é o índice de Hausner, ρ_c é a densidade compactada (g/cm^3) e ρ_a é a densidade aparente (g/cm^3).

2.4.3. Capacidade de absorção de água

A capacidade de retenção de água (WRC) (RAMOS, Igor Frederico da Silveira et al., 2021) foi determinada usando uma amostra preparada da seguinte forma: 1% (peso/volume) do

pó MOC foi disperso em água destilada e colocado em tubos de centrífuga pré-pesados. Os tubos foram submetidos à agitação sob aquecimento constante a 80 °C até a dissolução completa do material. Os tubos foram centrifugados por 15 minutos a 500×g. Em seguida, o sobrenadante foi descartado e o peso do precipitado foi medido. A capacidade de absorção de água foi calculada usando a Equação 3.

$$WRC = \frac{M_p - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

em que WRC é a capacidade de retenção de água (g/100 g), M_p é o peso do precipitado (g) e M_s é o peso amostral (g).

2.4.4. Índice de inchaço

Para determinar o índice de inchamento (IS), 0,05 g do pó MOC foi adicionado a 100 mL de água destilada sem homogeneização e deixado em repouso por 24 horas (Ramos et al., 2021). Posteriormente, a solução foi centrifugada por 5 minutos a 3300 rpm. O sobrenadante foi descartado e o peso do precipitado úmido foi registrado para calcular o índice de inchamento usando a Equação 4.

$$IS = \frac{M_{WP} - M_{DP}}{M_{DP}} \times 100 \quad (4)$$

em que IS é o índice de inchaço (g/100g), M_{WP} é o peso do precipitado úmido (g) e o M_{DP} é o peso do pó seco (g).

2.5. Propriedades reológicas da mucilagem

Para investigar as propriedades reológicas da mucilagem de *O. cochenillifera* (MOC), a mucilagem foi dispersa em água destilada e tratada termicamente aquecendo as amostras a 80 °C por 15 minutos. O aquecimento prévio da mucilagem foi realizado durante o processo de dispersão para aumentar a solubilidade, melhorar a dispersão em meio aquoso e garantir propriedades reológicas ideais para análises subsequentes. Além disso, manter essa temperatura por um período limitado minimiza o risco de degradação térmica, que pode ocorrer se os polissacarídeos forem expostos ao calor excessivo por períodos prolongados. Estudos como os

de Gillet et al., (2017) e Sébastien et al., (2014), indicam que polissacarídeos como os galactomananas apresentam boa estabilidade térmica a 80 °C, formando géis mais fortes em dispersão aquosa com comportamento elástico, preservando assim suas propriedades funcionais necessárias para aplicação industrial. O pH das amostras foi então ajustado usando HCl (2 M) para baixá-lo para 3,0 e 5,0 e NaOH (4 M) para atingir um pH de 7,0. O ácido forte padronizado ou a base forte foram baseados no princípio de que os tampões são normalmente recomendados apenas quando o controle preciso do pH não pode ser mantido (Marković et al., 2019). Em nosso estudo, usamos ácidos e bases fortes, permitindo ajustes rápidos e precisos, garantindo que o comportamento da mucilagem fosse efetivamente avaliado em condições específicas de pH. Essa abordagem minimiza os potenciais efeitos de confusão dos agentes tampão, que podem alterar a força iônica ou introduzir variáveis adicionais no sistema. As amostras foram posteriormente resfriadas e preparadas para medições reológicas. Um $3^{(3-1)}$ foi empregado para caracterizar as propriedades reológicas da mucilagem sob diferentes condições, precisamente temperatura (°C), pH e concentração de mucilagem (%). Essa abordagem forneceu uma maneira eficiente e eficaz de otimizar as propriedades reológicas, permitindo uma exploração abrangente dos efeitos desses fatores, minimizando o número de execuções experimentais necessárias. O planejamento fatorial também facilitou a identificação de condições ótimas por meio da análise estatística dos principais efeitos e suas interações. A viscosidade de cisalhamento constante foi caracterizada usando um fluxo de cisalhamento constante unidirecional, com taxas de cisalhamento variando de 0,1 a 1000 s^{-1}. A região viscoelástica linear foi determinada por meio de um teste de varredura de deformação para explorar ainda mais as propriedades viscoelásticas. O módulo de armazenamento (G') e o módulo de perda (G") foram medidos usando escoamentos de cisalhamento oscilatórios de pequena amplitude com frequências variando de 0,1 a 100 rad/s. A tensão de deformação na região viscoelástica linear foi de 0,01 Pa.

Todas as medidas reológicas foram realizadas por meio de um reômetro (HAAKE RheoWin 4.50.0017, Thermo Fisher Scientific, Alemanha), com geometria de placa paralela. O modelo Cross (Cross, 1965) se ajusta aos dados experimentais Equação 5.

$$\eta_{app} = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \left(t \times \gamma\right)^m} \quad (5)$$

onde η_{app} é a viscosidade aparente (Pa.s), γ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}), η_0 é a viscosidade de cisalhamento zero (Pa.s), η_∞ é a viscosidade de cisalhamento infinita (Pa.s), t representa a constante de tempo de Cross (s) e m representa o índice de fluxo de Cross.

2.6. Viabilidade celular

2.6.1. Ensaio de redução de MTT

O método de ensaio de redução de 3-[4,5-dimetiltiazol-2-il]-2,5 difenil-tetrazólio (MTT) consiste em quantificar a viabilidade celular quando tratada com diferentes concentrações da amostra (Mosmann, 1983; Suo et al., 2022). Para o ensaio da mucilagem, foram utilizadas células SH-SY5Y cultivadas em meio DMEM F12 suplementado com 10% de soro fetal bovino em placa de 96 poços. A mucilagem foi hidratada com água ultrapura na concentração necessária para obter a curva de concentração de 5000, 500, 5, 0,5 e 0,05 μg/mL. A placa foi então incubada por 24 horas a 37 °C em uma incubadora de 5% de CO2. Posteriormente, o meio foi aspirado e as células foram lavadas com solução salina tamponada com fosfato (PBS). Às células, foram adicionados 200 μL de solução de MTT (3 mg/mL) e a placa foi incubada a 37 °C por 2 horas a 5% de CO2. Após 2 horas, a solução de MTT foi aspirada e 100 μL de isopropanol foram adicionados a cada poço da placa, usados para dissolver os cristais de formazan. As leituras de absorbância foram feitas em 560 nm e 630 nm usando um espectrofotômetro (SpectraMax i3, San Jose, Estados Unidos).

2.6.2. Ensaio de incorporação da sulfarrodamina B (SRB)

O ensaio de incorporação da sulforrodamina B (SRB) é baseado na ligação do corante SRB à proteína celular total (Vichai; Kirtikara, 2006). Para o efeito, as células tratadas com a mucilagem, tal como descrito no ponto 2.6.1 para o ensaio MTT, são fixadas com 200 μl de ácido tricloroacético (TCA) a 10 % e incubadas a 4 °C durante 1 hora. Os poços da placa que contém as células são então lavados com água fria e o excesso de água é decantado e seco. Em cada poço com células, 100 μL de corante SRB (0,4% SRB em ácido acético a 1%) são adicionados e incubados por 60 minutos. As células são subsequentemente lavadas com ácido acético a 1 % quatro vezes. Em seguida, 200 μL de TRIS 10 mM são adicionados para diluir o corante. As placas são agitadas e a absorbância é lida em 510 nm e 620 nm. A sobrevivência celular é expressa como a diferença na absorbância obtida em relação ao controle (SpectraMax i3, San Jose, Estados Unidos).

2.7. Determinação da peroxidação lipídica

A quantificação da peroxidação lipídica foi determinada usando as substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS). O método envolve a medição espectrofotométrica da coloração produzida durante a reação do ácido tiobarbitúrico com produtos de peroxidação lipídica (Draper et al., 1993).

2.8. Atividade de eliminação de radicais hidroxila

O ensaio de degradação oxidativa da 2-desoxirribose (2-DR) quantificou os radicais hidroxila da reação de Fenton. Neste ensaio, o 2-DR é incubado com um sistema gerador de radicais hidroxila. O 2-DR é degradado em malondialdeído (MDA), que então se condensa com ácido tiobarbitúrico (TBA) para formar um cromóforo rosa (Levine et al., 1990). A quantificação é efetuada utilizando um espectrofotómetro a 532 nm. O resultado é expresso em porcentagem.

2.9. Análise estatística

O software OriginPro (OriginPro 2018 SR1 b9.5.1.195, OriginLab Corporation, Northampton, EUA) foi usado para o ajuste não linear do modelo Cross aos dados de viscosidade de cisalhamento constante. O software Statistica (Statistica versão 7.0, StatSoft, Inc., Tursa, EUA) foi utilizado para modelar os resultados com base nas variáveis experimentais independentes (pH, temperatura e concentração de mucilagem). Uma equação polinomial (Equação 6) foi ajustada aos dados para determinar os coeficientes de regressão. A ANOVA então verificou os modelos. Os gráficos apresentados neste artigo foram elaborados utilizando o software GraphPad Prism (GraphPad Software, versão 8.0.1, Estados Unidos da América).

$$\eta_{app} = b_0 + b_1\times(T) + b_2\times(T)^2 + b_3\times(pH) + b_4\times(pH)^2 + b_5\times(C) + b_6\times(C)^2 + b_7\times(T)\times(pH) + b_8\times(T)\times(C) + b_9\times(pH)\times(C) \quad (6)$$

a equação η_{app} é a viscosidade aparente (Pa.s), T é a temperatura em °C, pH é o potencial de hidrogênio, C é a concentração de mucilagem em (g/100 g) e b_n são os parâmetros de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição centesimal da mucilagem em pó

O rendimento de pó de mucilagem de cladódios de *O. cochenillifera* medido em 1,32 % é notavelmente maior do que aqueles relatados para outras espécies de *Opuntia* (Tabela 1). Este valor excede os relatados anteriormente para o pó de mucilagem de *Opuntia monacantha* (1,20%) (Dick et al., 2019) e para a mucilagem de *O. ficus-indica* (Espino-Díaz et al., 2010), ambos medidos em relação ao peso fresco dos cladódios. Rendimentos mais altos foram relatados para mucilagem de *O. dillenii* (Kalegowda; Chauhan; Nanjaraj Urs, 2017) e *Opuntia stricta* (Di Napoli et al., 2023). As discrepâncias de rendimento podem ser atribuídas a variações genéticas, fatores ambientais que influenciam o crescimento das plantas ou mesmo adaptações específicas dessa espécie para reter mais água em seus cladódios, a principal fonte de mucilagem. Além disso, os métodos de extração também influenciam o rendimento. No entanto, nossos resultados, baseados na massa fresca de cladódios, sugerem que *O. cochenillifera* produzida na região semiárida do Brasil é particularmente eficiente para a produção de mucilagem para fins comerciais. Essa eficiência não apenas aumenta seu valor econômico, mas também o posiciona como um candidato atraente para indústrias que dependem de hidrocoloides naturais, como as indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética, onde a mucilagem é valorizada por suas propriedades espessantes e estabilizadoras (Monrroy et al., 2017).

Tabela 1. Composição centesimal e propriedades tecnológicas do MOC.

Parâmetros	**Resultados**
Rendimento (%)	1,32 ± 0,20
Teor de água (%)	8,82 ± 0,23
Cinzas (%)	4,15 ± 0,06
Proteínas (g BSA/100g)	3,44 ± 0,01
Carboidratos redutores (g glicose/100g)	8,63 ± 0,14
pH (solução 1%)	5,50 ± 0,01
Densidade aparente (g/mL)	0,57 ± 0,02
Densidade compactada (g/mL)	0,69 ± 0,02
Índice de Carr (g/mL)	16,0 ± 2,38
Relação de Hausner	1,20 ± 0,03
Índice de inchaço (g/g)	55,0 ± 15,33
Capacidade de absorção de água (g/g)	3,45 ± 0,72

Fonte: Autoria própria.

Devido à sua natureza hidrofílica e propriedades estruturais, a mucilagem retém uma quantidade significativa de água, mesmo após ser seca a 50 °C por 24 horas, apresentando um teor de água de 8,8%. Seu principal componente, polissacarídeos, contém muitos grupos hidroxila que formam ligações de hidrogênio com a água, aumentando a retenção de água (Liu et al., 2014). Além disso, a mucilagem forma estruturas semelhantes a gel que prendem as moléculas de água, ainda mais apoiadas por sua estrutura porosa, que aumenta a área de superfície (Warrand et al., 2005). As condições de secagem moderadas são escolhidas especificamente para reduzir a umidade a um nível estável sem desidratá-la totalmente, garantindo que a mucilagem permaneça funcional e estável para uso em várias aplicações.

O teor de cinzas a 4,15% reflete a quantidade de minerais presentes na mucilagem, como cálcio, magnésio e potássio, melhorando significativamente sua funcionalidade, especialmente nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Esses minerais contribuem para a força iônica, afetando a solubilidade, a viscosidade e a interação da mucilagem com outras moléculas. Eles também reforçam sua capacidade de tampão, garantindo a estabilidade do pH sob várias condições, o que é fundamental para manter a eficácia e a estabilidade dos ingredientes ativos em produtos farmacêuticos e a segurança e o sabor dos produtos alimentícios (Munir et al., 2021).

O teor de proteína de 3,44 g de BSA/100 g na mucilagem de *O. cochenillifera* aumenta significativamente seus atributos funcionais e utilidade em várias aplicações. As proteínas aumentam a viscosidade da mucilagem por meio de interações com polissacarídeos, tornando-a um agente espessante eficaz em alimentos e produtos farmacêuticos (Dick et al., 2019). Além disso, suas propriedades tensoativas melhoram as capacidades estabilizadoras de emulsão da mucilagem, o que é benéfico para produtos cosméticos e alimentícios (Du Toit et al., 2018). Este nível de teor de proteína se alinha com estudos semelhantes, confirmando a consistência e confiabilidade dos níveis de proteína na mucilagem derivada de cactos para usos industriais.

O teor de glicose de 8,63 g/100 g na mucilagem, superando os relatos anteriores, ressalta o impacto dos métodos de extração em sua composição. Diferentes técnicas, desde a quebra agressiva usando altas temperaturas ou ácidos até métodos mais suaves que preservam carboidratos mais complexos, podem variar significativamente o rendimento de glicose, como relataram Felkai-Haddache et al. (2016). De acordo com Pérez-Cadena et al. (2021), a atividade enzimática durante a extração pode aumentar ou reduzir ainda mais os níveis de glicose, influenciada por fatores como presença de enzimas e condição da matéria-prima, incluindo a idade e o estado fisiológico dos cladódios de *Opuntia*.

A mucilagem dos cladódios de *O. cochenillifera* apresenta um pH de 5,5 devido à sua complexa mistura de polissacarídeos e outros fitoquímicos com vários grupos funcionais. De acordo com Cruz-Rubio et al. (2020), a presença de grupos carboxila em polissacarídeos, como o ácido galacturônico, é um dos principais contribuintes para a acidez da mucilagem. Os grupos fenólicos podem se dissociar parcialmente sob certas condições, e os grupos sulfato em algumas mucilagens derivadas do mar aumentam a natureza ácida liberando íons de hidrogênio (Procacci et al., 2021). Esses grupos afetam o pH e a solubilidade, viscosidade e reatividade da mucilagem, que são essenciais para suas aplicações em indústrias como alimentícia e farmacêutica.

3.2. Propriedades físicas do pó de mucilagem

A densidade aparente do MOC foi medida em 0,57 g / mL, um valor inferior aos registrados para mucilagens de *Opuntia monacantha* (0,785 g / mL) (Dick et al., 2019), *Opuntia dillenii* (0,67 g / mL) (Kalegowda; Chauhan; Nanjaraj Urs, 2017) e também para goma xantana (0,839 g / mL), um polímero amplamente utilizado na indústria (Kang; Pettitt, 1993). No entanto, pós com menor densidade aparente pode ser vantajosa para promover uma melhor desintegração devido ao aumento da absorção de água das partículas por meio da ação capilar através dos poros (Boiarkina et al., 2016).

A maior densidade compactada de 0,69 g/mL em comparação com a densidade aparente de 0,57 g/mL indica que o MOC apresenta boa compressibilidade e pode ser efetivamente compactado. Isso provavelmente é atribuído à natureza coesiva do MOC, permitindo que as partículas se aproximem quando submetidas a batidas ou vibrações (Gebresamuel; Gebre-Mariam, 2012; Otálora; Wilches-Torres; Castaño, 2021). A maior densidade compactada sugere que o MOC possui boas propriedades de manuseio, coesão e fluxo, indicando características desejáveis do biomaterial, como evidenciado pelo índice de Carr variando entre 12% e 18% e o índice de Hausner < 1,25 (Tabio-García et al., 2023).

O MOC demonstrou um alto índice de inchamento de 55,25 g/g e uma boa capacidade de absorção de água de 3,45 g/g. De acordo com Rindengan; Abdassah; Chaerunisaa (2018), o índice de inchaço e a capacidade de absorção de água são influenciados pela capacidade da mucilagem de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água, levando a uma expansão significativa. As propriedades micrométricas, como densidade aparente e densidade compactada, também desempenham um papel em sua capacidade de absorver água e inchar Mukherjee et al. (2019).

O alto índice de inchamento demonstra uma forte capacidade de expansão em contato com o líquido, o que sustenta seu potencial como agente espessante e meio para sistemas de liberação controlada. Além disso, sua notável capacidade de absorção de água aumenta a retenção de umidade e suporta a liberação gradual de compostos ativos. Essas propriedades são atribuídas principalmente à estrutura molecular da mucilagem, particularmente grupos hidroxila e uma proporção substancial de unidades de galactose, conforme documentado na literatura. Essas propriedades permitem extensa retenção e ligação de água (Kalegowda; Chauhan; Nanjaraj Urs, 2017).

3.3. Viscosidade de cisalhamento

As propriedades reológicas da mucilagem de *O. cochenillifera* foram investigadas por meio de experimentos desenhados para avaliar os efeitos da temperatura, pH e concentração em sua viscosidade. Os experimentos foram realizados a 25 °C, 32,5 °C e 40 °C em níveis de pH de 3,0, 5,0 e 7,0 e concentrações de 1,0, 3,5 e 6,0% (p/v). As temperaturas de 25 °C, 32,5 °C e 40 °C foram selecionadas para caracterização reológica com base em sua relevância para as condições ambientais e de aplicação típicas. Essas temperaturas permitem uma avaliação abrangente de como a temperatura influencia a viscosidade e o comportamento de fluxo da mucilagem, o que é particularmente importante, dado que muitas aplicações, como em alimentos e produtos farmacêuticos, ocorrem dentro dessa faixa de temperatura. Os resultados, apresentados na Figura 1, mostram que as amostras de mucilagem exibiram diferentes comportamentos de fluxo, pois a taxa de cisalhamento variou em todas as condições testadas. Observou-se que a viscosidade diminuiu progressivamente com o aumento da taxa de cisalhamento após uma taxa de cisalhamento específica, indicando uma transição do comportamento de fluxo newtoniano para não newtoniano. Esse comportamento inicial pode ser atribuído à leve instabilidade do equipamento durante a fase de ajuste antes da estabilização completa das amostras. Esse comportamento resulta do alinhamento induzido por cisalhamento das cadeias de polissacarídeos na direção do fluxo de cisalhamento, levando a interações reduzidas entre as cadeias e, consequentemente, a uma diminuição da viscosidade (Methacanon; Kongjaroen; Gamonpilas, 2023). Este resultado é consistente com estudos anteriores usando mucilagem de quiabo (Zhu; Obara, 2022), mucilagem de sementes de manjericão (Methacanon; Kongjaroen; Gamonpilas, 2023) e mucilagem de cladódio de *O. dillenii* (Kalegowda; Chauhan; Nanjaraj Urs, 2017).

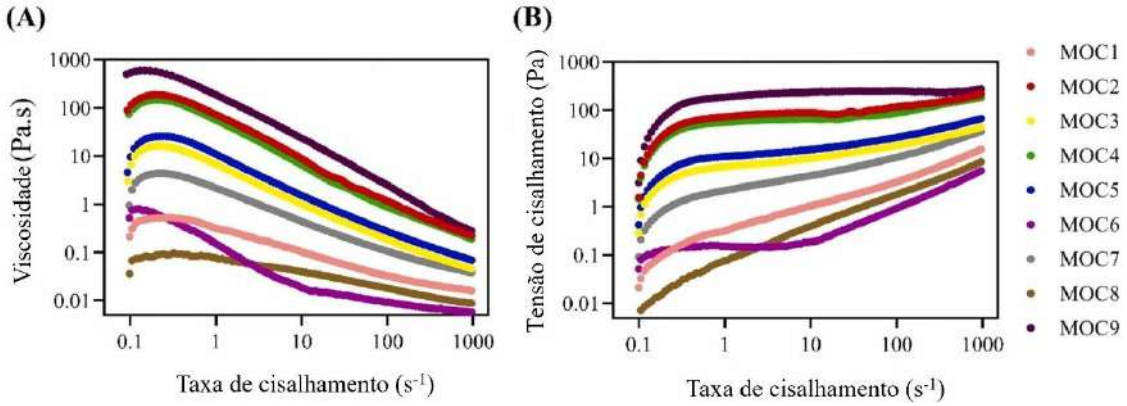

Figura. 1. Curvas de fluxo de amostras MOC sob condições variáveis de temperatura, pH e concentração: (A) Viscosidade de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento; (B) Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento. **Fonte:** Autoria própria.

3.3.1. Modelo de viscosidade de Cross

Nove condições diferentes (MOC1 a MOC9) foram testadas, e os dados de viscosidade foram ajustados usando o modelo Cross, com resultados apresentados na Figura 2 e Tabela 2. Este modelo fornece parâmetros reológicos relevantes, incluindo a viscosidade de cisalhamento zero (η_0), viscosidade de cisalhamento infinito (η_∞), a constante de tempo de Cross (t), recíproca da constante de tempo (taxa de cisalhamento crítica), índice de fluxo de Cross (m) e índice de fluxo (n). O coeficiente de determinação (R^2) também foi calculado para avaliar o ajuste do modelo.

A viscosidade de cisalhamento zero (η_0) variou significativamente de 0,097 Pa.s a 596,929 Pa.s, indicando uma forte dependência da concentração das soluções de mucilagem. Em concentrações mais altas, como observado em MOC9 (concentração de 6,0%, 40 °C, pH 7,0) com η_0 de 596,929 Pa.s, a viscosidade aumentou devido ao maior emaranhamento e interação das cadeias poliméricas, que conferem resistência ao escoamento em baixas taxas de cisalhamento (Boudaghi; Edwards; Khomami, 2023; Mohagheghi; Khomami, 2016). No entanto, essa alta viscosidade inicial não se traduz em uma viscosidade complexa igualmente alta devido ao comportamento de afinamento por cisalhamento típico de fluidos complexos.

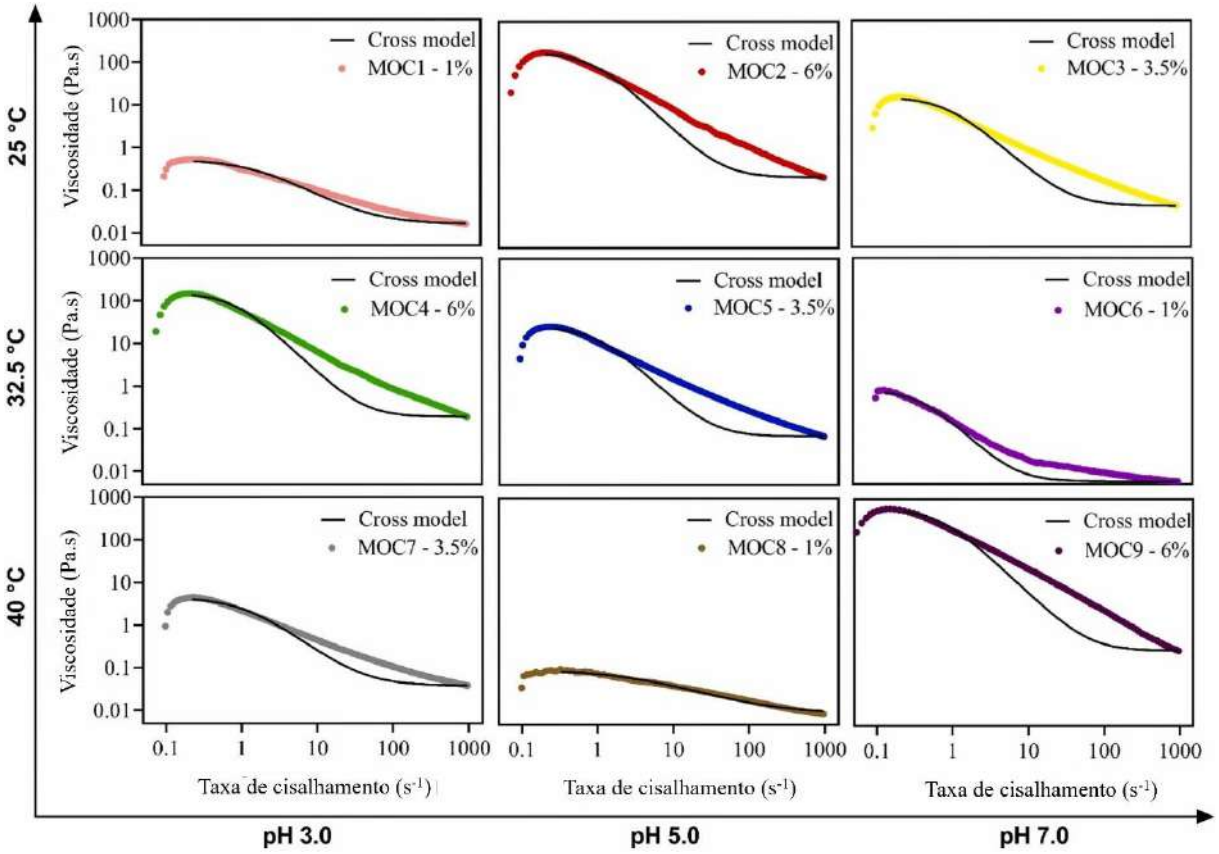

Figura 2. Curvas de fluxo de géis MOC mostrando viscosidade de cisalhamento em função das taxas de cisalhamento com ajuste de modelo de Cross para diferentes condições de temperatura, pH e concentração. **Fonte:** Autoria própria.

Tabela 2. Parâmetros de Cross do gel MOC sob a influência de diferentes valores de pH, temperatura e concentração, determinados pelo teste de taxa de cisalhamento constante.

Experimento	**Temperatura (°C)**	**pH**	**Concentração (%)**	η_0	η_∞	**Constante de tempo de Cross "t"**	**Recíproco da constante de tempo**	**Índice de fluxo de Cross "m"**	**Índice de fluxo "n"**	**Coeficiente de determinação (R^2)**
				Pa.s	**Pa.s**	**S**	**s^{-1}**	**-**	**-**	
MOC1	25	3,0	1,0	0,531 ± 0,000	0,016 ± 0,000	0,554 ± 0,018	1,810 ± 0,037	1,099 ± 0,037	0,099 ± 0,037	0,9797
MOC2	25	5,0	6,0	183,934 ± 0,000	0,226 ± 0,000	1,137 ± 0,025	0,880 ±0,016	1,715 ± 0,059	0,715 ± 0,059	0,9845
MOC3	25	7,0	3,5	16,170 ± 0,000	0,046 ± 0,000	1,094 ± 0,022	0,910 ± 0,015	1,590 ± 0,049	0,590 ± 0,049	0,9861
MOC4	32,5	3,0	6,0	147,270 ± 0,000	0,189 ± 0,000	1,189 ± 0,023	0,840 ± 0,013	1,719 ± 0,0055	0,719 ± 0,055	0,9858
MOC5	32,5	5,0	3,5	25,932 ± 0,000	0,069 ± 0,000	1,064 ± 0,022	0,940 ± 0,016	1,686 ± 0,054	0,686 ± 0,054	0,9853
MOC6	32,5	7,0	1,0	0,793 ± 0,000	0,006 ± 0,000	2,493 ± 0,037	0,400 ± 0,005	1,760 ± 0,045	0,760 ± 0,045	0,9897
MOC7	40	3,0	3,5	4,385 ± 0,000	0,038 ± 0,000	0,868 ± 0,021	1,150 ± 0,022	1,361 ± 0,043	0,361 ± 0,043	0,9839
MOC8	40	5,0	1,0	0,097 ± 0,000	0,009 ±0,000	0,225 ± 0,007	4,440 ± 0,100	0,757 ± 0,017	-	0,9861
MOC9	40	7,0	6,0	596,929 ± 0,000	0,283 ± 0,000	1,460 ± 0,032	0,680 ± 0,010	1,701 ± 0,062	0,701 ± 0,062	0,9792

Fonte: Autoria própria.

À medida que a taxa de cisalhamento aumenta, a reorganização e o alinhamento interno da cadeia polimérica ocorrem na direção do fluxo, resultando em interações e emaranhamentos reduzidos. Este processo diminui a resistência ao movimento e, consequentemente, a viscosidade em altas taxas de cisalhamento. Assim, a viscosidade complexa é menor do que a viscosidade de cisalhamento zero devido à perda de interações estruturais sob cisalhamento, uma característica comum em sistemas poliméricos densos (Faustino; Pinheiro, 2021).

Da mesma forma, a viscosidade de cisalhamento infinito (η_0) apresentaram variações em diferentes condições, variando de 0,006 Pa.s a 0,283 Pa.s. A menor $\eta\infty$ foi observada em MOC6 (concentração de 1,0%, 32,5 °C, pH 7,0), sugerindo resistência mínima ao escoamento em condições de alto cisalhamento em concentrações mais baixas. Em taxas de cisalhamento infinitas, as cadeias poliméricas se alinham com o fluxo, reduzindo o emaranhamento e, portanto, a viscosidade.

De uma perspectiva macromolecular, a viscosidade e o comportamento do fluxo das soluções de mucilagem são governados pelas interações e emaranhamentos das cadeias poliméricas. Em baixas taxas de cisalhamento, a viscosidade de cisalhamento zero reflete a resistência inerente ao fluxo devido a essas interações. Concentrações mais altas aumentam o número de emaranhamentos, levando a valores mais altos de η_0. A temperatura também desempenha um papel crítico; Temperaturas mais altas podem reduzir a viscosidade aumentando o movimento térmico das cadeias poliméricas, reduzindo assim a densidade de emaranhamento. No entanto, algumas cadeias poliméricas podem degradar parcialmente ou alterar a conformação em temperaturas mais altas, o que também pode influenciar a viscosidade. O índice de fluxo (n) e o índice de fluxo de Cross (m) descrevem como as soluções de mucilagem fazem a transição do comportamento newtoniano para o não newtoniano. Valores mais baixos de índice de fluxo indicam um comportamento de afinamento por cisalhamento mais forte, típico para polímeros com alto peso molecular e emaranhamento significativo. O peso molecular da mucilagem de *O. dillenii* foi relatado como sendo de aproximadamente 1,9 × 10^3 kDa, indicando uma estrutura de alto peso molecular com potencial para extenso emaranhamento de cadeias (Kalegowda; Chauhan; Nanjaraj Urs, 2017). Para *O. ficus-indica*, várias frações de mucilagem mostraram uma ampla gama de pesos moleculares, de 3,4 × 10^6 Da a 2,4 × 10^2 Da (Espino-Díaz et al., 2010), sugerindo uma mistura de componentes de alto e baixo peso molecular. Essa diversidade no peso molecular se alinha com os relatórios sobre mucilagens de espécies do gênero *Opuntia*, que contêm frações de alto e baixo peso molecular que contribuem de maneira diferente para as propriedades de viscosidade (Di Lorenzo et al.,

2017). Essa faixa de valores apoia a ideia de que a complexa composição molecular da mucilagem extraída de cladódios de espécies de *Opuntia*, incluindo frações de peso molecular substancialmente alto, facilita o comportamento de afinamento por cisalhamento devido ao aumento do emaranhamento da cadeia.

A taxa de cisalhamento crítica, dada pelo recíproco da constante de tempo Cross, representa a taxa de cisalhamento na qual a solução polimérica começa a exibir comportamento não newtoniano. Soluções com taxas de cisalhamento crítico mais altas (por exemplo, MOC8) são menos sensíveis ao cisalhamento devido a concentrações mais baixas ou interações mais fracas entre as cadeias poliméricas.

Em relação à influência da temperatura nas propriedades reológicas da mucilagem de *O. cochenillifera*, como mostrado na Figura 3, os dados indicam uma dependência sutil da viscosidade na variação da temperatura. Essa tendência sugere que, à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade também aumenta, um comportamento que contradiz os achados relatados para outras mucilagens (Ma et al., 2017; Medina-Torres, 2000; Pérez-Orozco; Sánchez-Herrera; Ortiz-Basurto, 2019). No entanto, é essencial notar que o desenho experimental utilizado neste estudo não permitiu uma análise isolada do efeito da temperatura para calcular a energia de ativação. Portanto, embora nossos achados sugiram uma dependência positiva da viscosidade da temperatura nas amostras analisadas, estudos adicionais são necessários para elucidar completamente essa dinâmica e suas implicações no comportamento térmico do MOC.

Uma hipótese para o aumento observado na viscosidade com a temperatura pode envolver dois fenômenos complementares. O primeiro está relacionado a interações aprimoradas entre os componentes da mucilagem, compostos principalmente de proteínas e polissacarídeos (Martin et al., 2017). O aumento da temperatura pode levar ao desdobramento dessas macromoléculas, alterando sua conformação e, consequentemente, afetando as interações intermoleculares em solução (Molodenskiy et al., 2017; Wang et al., 2017). Essas mudanças são impulsionadas por mudanças na entropia e entalpia, resultando em agregação e diminuição da estabilidade molecular (Khechinashvili; Janin; Rodier, 1995). Essas mudanças conformacionais podem aumentar a viscosidade da solução (Mutlu; Kopuk; Palabiyik, 2023).

O segundo fenômeno potencialmente envolvido é a evaporação. A análise termogravimétrica (TGA) (Capitulo IV) do pó de mucilagem indica que a perda de massa inicial ocorre a partir de 36,86 °C, o que pode estar associado à evaporação da água livre, influenciando a concentração e a viscosidade da mucilagem residual em solução.

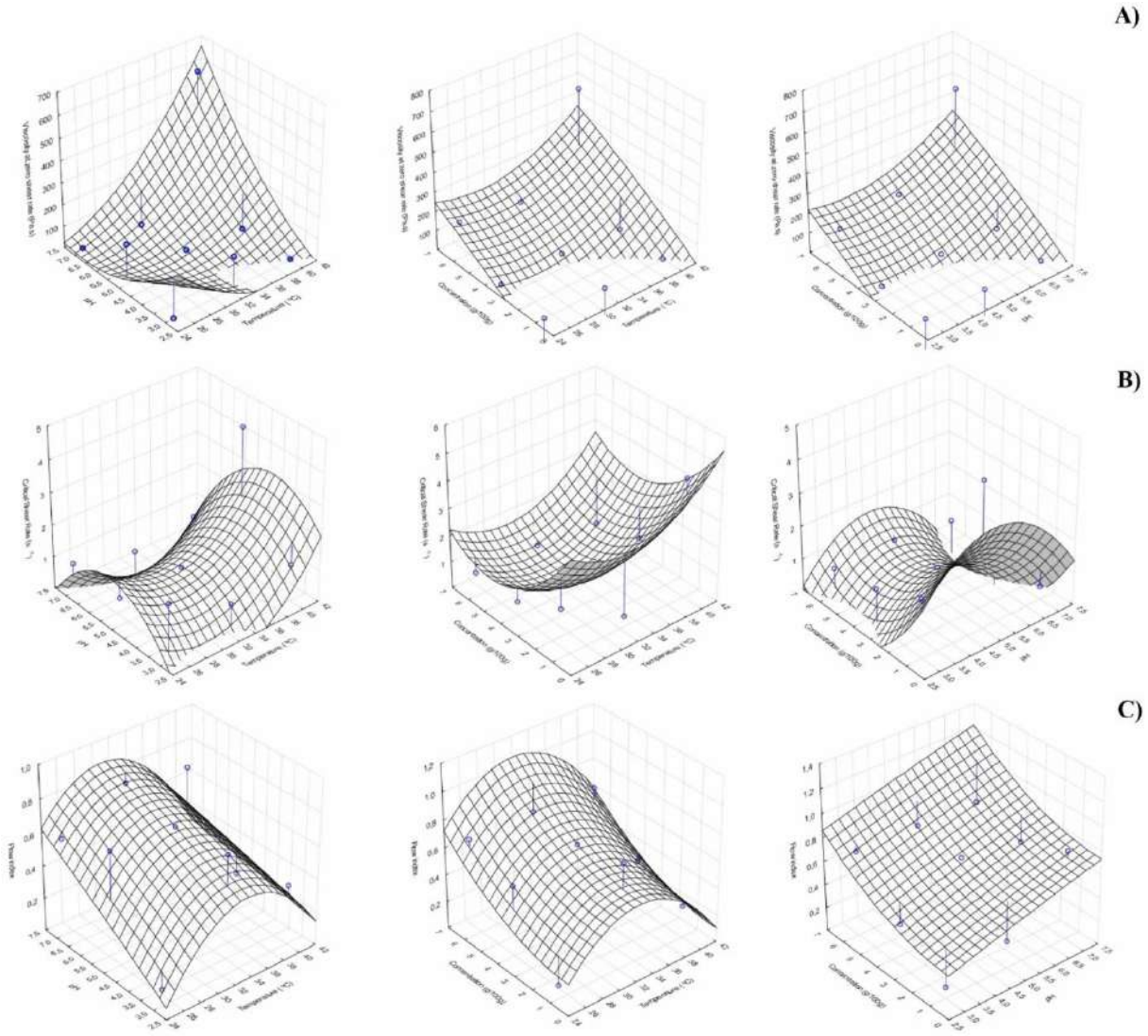

Figura 3. Gráficos tridimensionais representando a superfície de resposta para os efeitos combinados de temperatura, pH e concentração em A) Viscosidade a taxa de cisalhamento zero (Pa.s), B) Taxa de cisalhamento crítica (s^{-1}) e C) índice de fluxo. **Fonte:** Autoria própria.

O aumento combinado do pH e da temperatura resultou em um aumento significativo na viscosidade da mucilagem. Com o aumento do pH, houve uma maior tendência de ionização dos grupos funcionais nas moléculas de mucilagem, como ionização do grupo carboxila e mais agregados, resultando em interações eletrostáticas mais intensas entre as moléculas e uma estrutura molecular mais organizada. Simultaneamente, o aumento da temperatura forneceu energia térmica capaz de quebrar ligações de hidrogênio entre moléculas de mucilagem e entre essas moléculas e a água, afetando sua conformação molecular (Pérez-Orozco; Sánchez-Herrera; Ortiz-Basurto, 2019). Como resultado, essas alterações induzidas pelo aumento do pH e da temperatura aumentaram a viscosidade da mucilagem devido à combinação de interações moleculares mais fortes e uma estrutura molecular mais complexa e resistente ao fluxo.

A viscosidade das amostras de mucilagem aumentou com o aumento da concentração da solução; Esse comportamento é típico de soluções poliméricas, onde concentrações mais altas levam ao aumento das interações e emaranhamentos intermoleculares. À medida que a concentração aumenta, as cadeias poliméricas ficam mais próximas, resultando em uma rede mais densa de interações moleculares, contribuindo para maior resistência ao fluxo e aumento da viscosidade. Além disso, mais segmentos de polímero em concentrações mais altas também podem levar a uma reticulação física aprimorada e forças intermoleculares, elevando ainda mais a viscosidade da solução (Ma et al., 2021; Ma et al., 2021). À medida que a concentração aumentava, as soluções de MOC passaram de diluídas para semidiluídas, onde as moléculas de polímero se entrelaçam e formam uma rede tridimensional (Shao et al., 2019). Assim, concentrações mais altas de mucilagem intensificaram a formação dessa rede entre as moléculas. Apesar dessa observação, estudos futuros devem explorar uma faixa mais ampla de concentrações e determinar com precisão a concentração crítica e a viscosidade intrínseca. Isso permitirá uma compreensão mais profunda do comportamento reológico da mucilagem em função de sua concentração.

3.3.2. Modelagem polinomial de segunda ordem

O modelo de regressão polinomial de segunda ordem foi utilizado para analisar os efeitos da temperatura, pH e concentração em vários parâmetros de viscosidade das soluções de mucilagem. A Tabela 3 resume os coeficientes de regressão para cada variável dependente: viscosidade de cisalhamento zero, viscosidade de cisalhamento infinito, constante de tempo de Cross, taxa de cisalhamento crítico, índice de fluxo de Cross e índice de fluxo. Os números em negrito na tabela indicam resultados estatisticamente significativos com valores de p menores que 0,05. Além disso, a Figura 3 apresenta o gráfico de resposta de superfície das equações polinomiais de segunda ordem.

A viscosidade de cisalhamento zero (η_0) é significativamente influenciada por vários fatores, como indicado pelo alto valor de R^2 de 0,9956. A interceptação é de 2704 Pa.s, sugerindo uma alta viscosidade de linha de base. Os termos lineares para temperatura (-128,2) e pH (-428,6) são significativos e negativos, indicando que o aumento desses fatores reduz a viscosidade de cisalhamento zero. Os termos quadráticos positivos para temperatura (1,350) e pH (14,43) sugerem que a viscosidade aumenta novamente em níveis mais altos. A interação entre temperatura e pH (9,931) enfatiza ainda mais a natureza complexa dessas dependências.

Tabela 3. Coeficientes do modelo de regressão polinomial de segunda ordem para parâmetros de viscosidade.

Parâmetros do modelo polinomial de segunda ordem	**Viscosidade a taxa de cisalhamento zero**	**Viscosidade na taxa de cisalhamento infinito**	**Constante de tempo de Cross**	**Taxa de cisalhamento crítica**	**Índice de fluxo de Cross**	**Índice de fluxo**
	(Pa.s)	**(Pa.s)**	**(s)**	**(s^{-1})**		
Interceptar	**2704***	**0,562***	**-10,91***	9,381	**-4,318***	**-5,613***
Temperatura	**-128,2***	**-0,028***	**0,842***	-0,904	**0,389***	**0,334***
Temperatura × Temperatura	**1,350***	**0,0003***	**-0,012***	**0,016***	**-0,006***	-0,005
pH	**-428,6***	**-0,060***	-0,659	**3,288***	-0,333	**0,236***
pH × pH	**14,43***	-0,001	**0,117***	**-0,280***	0,038	-0,002
Concentração	**72,50***	0,007	-0,312	-1,181	0,212	0,002
Concentração × Concentração	**-1,530***	**0,005***	0,046	0,128	-0,016	0,009
Temperatura × pH	**9,931***	**0,002***	-0,009	-0,019	0,0008	-0,005
Coeficiente de determinação (R^2)	0,9956	0,9987	0,7933	0,803	0,8987	0,9702

*Os números em negrito são estatisticamente significativos para um $p < 0,05$.

Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista macromolecular, temperaturas mais altas aumentam o movimento térmico, reduzindo inicialmente o emaranhamento e a viscosidade. Ainda assim, temperaturas muito altas podem causar degradação parcial ou alterações conformacionais nas cadeias poliméricas, aumentando a viscosidade (Lima et al., 2018). Em níveis de pH mais altos, a ionização de grupos funcionais, como grupos carboxila e hidroxila, aumenta a solubilidade e diminui a viscosidade, aumentando a repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas, reduzindo assim as interações intermoleculares (Yang; Chen; Fang, 2009). Por outro lado, em pH extremamente alto, o aumento da densidade de carga ao longo das cadeias poliméricas pode levar a atrações eletrostáticas mais fortes, como reticulação ou agregação iônica, que podem aumentar a viscosidade (Wang et al., 2016). Além disso, à medida que a concentração da solução aumenta, a frequência de interações e emaranhamentos polímero-polímero aumenta, levando a uma viscosidade mais alta e a uma rede mais interconectada.

Para viscosidade de cisalhamento infinito (η_∞), o valor de R^2 é 0,9987, indicando um ajuste muito bom. O intercepto (0,562 Pa.s) e vários termos são estatisticamente significativos, incluindo a temperatura linear (-0,028), a temperatura quadrática (0,0003), o pH linear (-0,060) e o termo de interação entre temperatura e pH (0,002). Isso indica que a temperatura e o pH influenciam significativamente a viscosidade de cisalhamento infinito. Em taxas de cisalhamento infinitas, as cadeias poliméricas se alinham com o fluxo, minimizando os emaranhamentos, e esses resultados sugerem que mesmo pequenas mudanças na temperatura e no pH podem influenciar esse alinhamento (Graham et al., 2003).

A constante de tempo de Cross (t) tem uma interceptação de −10,91 s e um valor de R^2 de 0,7933, com coeficientes significativos para a temperatura linear (0,842), temperatura quadrática (-0,012), pH quadrático (0,117) e pH quadrático (-0,2800). Esses achados indicam que o comportamento de relaxamento das soluções de mucilagem é influenciado pela temperatura e pH, mas não pela concentração. Isso sugere que a temperatura e o pH afetam diretamente a forma como as cadeias poliméricas de mucilagem relaxam após a deformação. Da mesma forma, a taxa de cisalhamento crítico tem uma interceptação de 9,381 s^{-1} e um valor R^2 de 0,803. Fatores significativos incluem temperatura quadrática (0,016) e pH linear (3,288). Isso indica que esses fatores influenciam a transição do comportamento newtoniano para o não newtoniano, sugerindo uma relação complexa entre a dinâmica do polímero e as condições externas (Zare; Rhee, 2019).

O índice de fluxo de Cross (m), que indica o grau de desbaste por cisalhamento, tem uma interceptação de −4,318 e um valor de R^2 de 0,8987. Fatores significativos incluem

temperatura linear (0,389) e temperatura quadrática (-0,006). Isso sugere que o comportamento de afinamento por cisalhamento é influenciado principalmente pela temperatura, com temperaturas mais altas potencialmente reduzindo o grau de afinamento por cisalhamento devido ao aumento do movimento do polímero. O índice de fluxo (n) tem uma interceptação de −5,613 e um valor R^2 de 0,9702. Fatores significativos incluem temperatura linear (0,334) e pH (0,236). Isso implica ainda que a transição para o comportamento não newtoniano é influenciada pela temperatura e pelo pH, destacando o papel desses fatores na alteração das características de fluxo da mucilagem.

3.4. Varredura de frequência oscilatória

Testes de varredura de frequência foram realizados para pequenas deformações de tensão, garantindo que todas as varreduras fossem realizadas dentro da região viscoelástica linear. Foi aplicada uma amplitude de deformação de 0,01 %. As propriedades viscoelásticas dos géis MOC são apresentadas na Figura 4 em termos de módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G") e viscosidade complexa em função da frequência. Observa-se que todas as amostras mucilaginosas exibiram um comportamento elástico com G' maior que G" acima de uma frequência específica investigada. Este comportamento viscoelástico é consistente com as características de afinamento de cisalhamento observadas nos resultados da varredura de fluxo à medida que a estrutura da rede se desintegra e as cadeias poliméricas se alinham com o fluxo de cisalhamento (Methacanon; Kongjaroen; Gamonpilas, 2023). Além disso, ao examinar os dados apresentados na Figura 4, ocorreu reticulação entre o módulo de armazenamento e o módulo de perda. Essa relação sugere que a escala de tempo empregada no experimento foi menor do que o tempo de relaxamento das macromoléculas polissacarídicas presentes no MOC (Zhu; Obara, 2022).

O módulo de armazenamento (G′) representa o comportamento elástico ou sólido dos géis de mucilagem. Indica a energia armazenada no material durante a deformação (ARAB *et al.*, 2023). De acordo com os critérios propostos por Câmara et al., (2020), as amostras são classificadas como géis sólidos quando a relação $G''/G' \leq 0,1$, indicando que o comportamento elástico prevalece sobre o comportamento viscoso. Quando $0,1 < G''/G' < 1$, os géis são considerados fracos, com equilíbrio entre o comportamento sólido e líquido, e para $G''/G' \geq 1$, são classificados como géis viscosos, onde o comportamento viscoso domina sobre o comportamento elástico. Em nossos resultados, a relação $G''/G' \geq 1$ foi observada na maioria das condições testadas, sugerindo que as amostras apresentam características mais viscosas do que elásticas. Além disso, como mostrado na Figura 4, os valores de G' geralmente diminuem

com o aumento da temperatura, indicando uma redução no comportamento elástico dos géis. Esse efeito pode ser atribuído ao aumento do movimento térmico, que interfere nas ligações e interações entre as cadeias poliméricas de mucilagem, resultando em uma rede menos coesa e mais fluida (Câmara et al., 2020). Esses dados indicam que essas amostras não mantêm uma estrutura de gel forte.

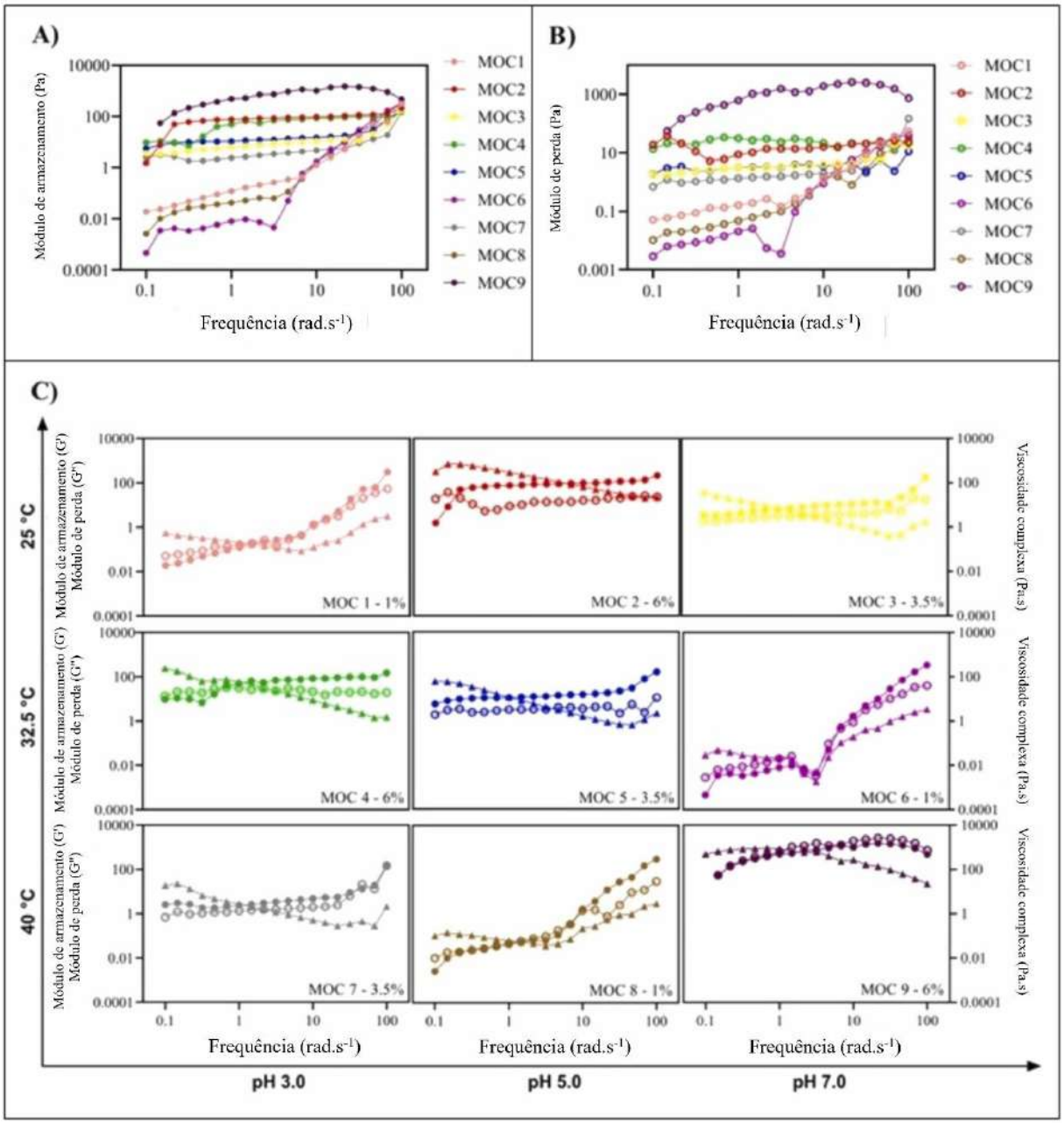

Figura 4. Espectros mecânicos de géis de mucilagem MOC sob temperaturas, valores de pH e concentrações variados, mostrando (A) módulo de armazenamento (G′) e (B) módulo de perda (G") como funções da frequência angular em todas as amostras e (C) módulo de armazenamento, módulo de perda e viscosidade complexa para amostras individuais. Círculos

preenchidos indicam módulo de armazenamento (G'), círculos vazios indicam módulo de perda (G") e triângulos indicam viscosidade complexa. **Fonte:** Autoria própria.

Mudanças no pH podem afetar a ionização de grupos funcionais dentro das moléculas de mucilagem. Os espectros mostram que níveis mais altos de pH levam a valores mais baixos de G ', indicando que a ionização reduz as propriedades elásticas do gel, aumentando a solubilidade e diminuindo as interações moleculares (Curnutt et al., 2020; Wang et al., 2016). Concentrações mais altas resultam em valores mais altos de G 'devido ao aumento da densidade das cadeias poliméricas, o que aumenta os emaranhamentos e interações, tornando o gel mais elástico (Medina-Torres et al., 2003).

O módulo de perda (G") representa o comportamento viscoso ou líquido dos géis de mucilagem. Indica a energia dissipada como calor durante a deformação (Ramos et al., 2023). Os dados mostram que, à medida que a temperatura aumenta, os valores de G" também aumentam em frequências mais altas, indicando um comportamento viscoso aprimorado. Isso sugere que os géis de mucilagem exibem características mais líquidas em temperaturas elevadas devido ao aumento da mobilidade do polímero (Koocheki et al., 2009; Medina-Torres, 2000). Níveis mais altos de pH resultam em valores mais altos de G", particularmente em frequências mais altas, indicando que os géis se tornam mais viscosos e dissipam mais energia à medida que o pH aumenta. Por outro lado, as soluções de mucilagem mostram um aumento significativo nos módulos viscoelásticos (G' e G") à medida que o pH diminui de condições neutras para ácidas, indicando uma transição de uma solução viscoelástica para um gel (Celli et al., 2007; Curnutt et al., 2020). Concentrações mais altas produzem valores mais altos de G " em todas as frequências, destacando o aumento do comportamento viscoso devido à rede polimérica mais densa, que aumenta o atrito molecular e a dissipação de energia (León-Martínez et al., 2011; Quinzio et al., 2018).

A viscosidade complexa mede a resistência geral ao fluxo sob cisalhamento oscilatório (Hyun et al., 2002). Níveis mais altos de pH geralmente resultam em maior viscosidade complexa. O aumento da ionização em pH mais alto reduz as interações moleculares, tornando o gel menos resistente ao fluxo. Geralmente, níveis mais altos de pH tendem a aumentar a viscosidade da mucilagem, como observado em *Alyssum homolocarpum* (Koocheki et al., 2009), *O. ficus indica* (Trachtenberg; Mayer, 1980) e mucilagem de sementes de tamarindo (Alpizar-Reyes et al., 2018). Os níveis de pH neutro também suportam maior viscosidade em algumas mucilagens, como linhaça e *Dioscorea opposite* (Ma et al., 2021; Ma et al., 2021). Concentrações mais altas levam a valores de viscosidade complexos mais altos, indicando

maior resistência ao fluxo. Isso é consistente com o aumento das interações polímero-polímero e emaranhamentos em concentrações mais altas.

Ao analisar o módulo de armazenamento e perda de cada curva MOC (Figura 4), nossos resultados indicam que a diluição das amostras mucilaginosas pode enfraquecer o comportamento elástico. Ao comparar diferentes concentrações de mucilagem, observamos que concentrações mais baixas requerem menos energia para distorcer esse comportamento (Zhu; Obara, 2022). Além disso, considerando os módulos de armazenamento e perda, eles exibiram alguma dependência de frequência, assemelhando-se a um gel reticulado, semelhante aos resultados discutidos para a mucilagem de sementes de manjericão (Methacanon; Kongjaroen; Gamonpilas, 2023).

3.5. Viabilidade celular

Para avaliar a segurança da mucilagem de *O. cochenillifera* para potenciais aplicações biomédicas ou relacionadas a alimentos, os ensaios MTT e SRB foram realizados em um modelo de célula SH-SY5Y (Figura 5). As células aderentes foram incubadas com concentrações crescentes de MOC (5000, 500, 5, 5, 0,5 e 0,05 μg/mL) por 24 horas. Figura 5A mostra que o MOC, independentemente da concentração, não apresentou efeitos citotóxicos, e a viabilidade celular de acordo com o método MTT não diferiu estatisticamente do grupo controle, permanecendo assim próximo a 100%. O efeito não citotóxico foi relatado para a mucilagem de *Coccinia grandis* (Ilango et al., 2022) e mucilagem de chia pelo ensaio LDH (Sacco et al., 2021). Como o MOC compreende predominantemente polissacarídeos naturais, os resultados do nosso ensaio de MTT sugerem que a mucilagem pode ser compatível com as células SH-SY5Y, não mostrando efeitos nocivos ou tóxicos nas células neurais específicas testadas. Isso indica que esta substância é potencialmente segura para aplicações médicas ou farmacêuticas, especialmente relacionadas ao sistema nervoso.

Para confirmar o resultado negativo para citotoxicidade da mucilagem, realizamos o ensaio de incorporação de sulforrodamina B (SRB) (Figura 5B) em células SH-SY5Y, seguindo as mesmas condições utilizadas no ensaio MTT. Em contraste com o ensaio MTT, que se baseia principalmente na conversão enzimática do corante tetrazólio em cristais de formazan que ocorrem em várias organelas, como mitocôndrias e retículo endoplasmático, onde compostos endógenos e exógenos podem catalisar essa reação, o ensaio SRB avalia o conteúdo total de proteína celular, independentemente da funcionalidade celular (Knorr et al., 2021).

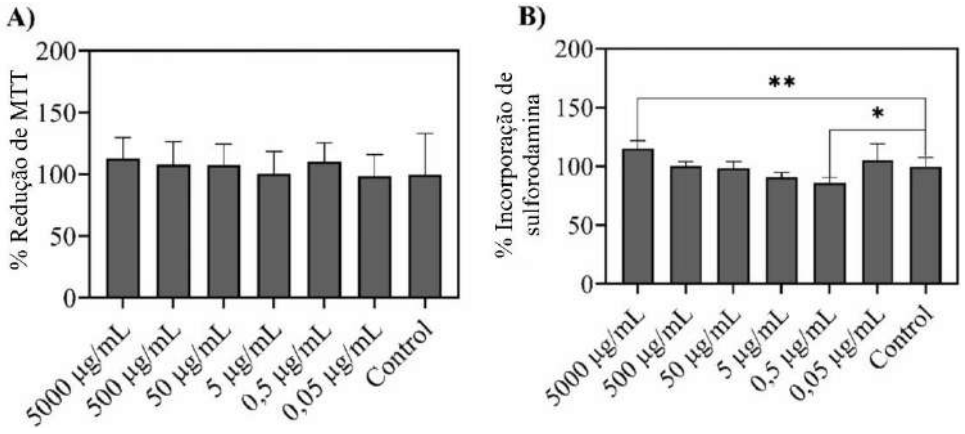

Figura 5. Impacto do MOC na viabilidade celular SH-SY5Y. Avaliação da redução de MTT (A) e assimilação de SRB (B) em células SH-SY5Y tratadas com concentrações crescentes (0,05–5000,0 µg/mL) por 24 h. Os valores apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=6. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA one-way com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$. Não houve diferença significativa entre as concentrações de mucilagem e o grupo controle para o ensaio de MTT. **Fonte:** Autoria própria.

Examinando os dados da Figura 5B, observa-se uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre a concentração de 5000 µg/mL e o grupo controle. A viabilidade celular foi maior do que o grupo controle nessa concentração, atingindo 115,05%. Outra discrepância significativa em relação ao grupo controle foi encontrada na concentração de 0,5 µg/mL, apresentando uma média de 85,73%

Este resultado indica uma ligeira tendência de redução da viabilidade celular após a diluição da amostra, embora todas as concentrações demonstrem uma viabilidade superior a 70%. Essa variação pode ser atribuída a potenciais interferências da mucilagem de *O. cochenillifera* com processos celulares específicos, especialmente em concentrações mais baixas. Além disso, o aumento da concentração de mucilagem e consequente presença de monossacarídeos podem desempenhar papéis essenciais em vários processos biológicos, incluindo o sistema nervoso (Silva et al., 2022).

No entanto, a realização de estudos adicionais é crucial para uma compreensão mais abrangente dos efeitos da mucilagem em diferentes concentrações, levando em consideração o tipo específico de células. Esses estudos são essenciais para identificar os mecanismos exatos que contribuem para essa tendência de redução da viabilidade celular em concentrações mais baixas no ensaio SRB.

3.6. Peroxidação lipídica

A análise dos níveis de peroxidação lipídica, indicada pelo TBARS, para MOC não revelou diferença estatisticamente significativa em relação ao grupo controle, exceto na concentração de 0,05 μg/mL, onde o MOC aumentou significativamente a extensão da peroxidação lipídica no modelo de homogeneizado de ovo. Este achado, ilustrado na Figura 6, sugere uma falta de efeito protetor do MOC contra a peroxidação lipídica.

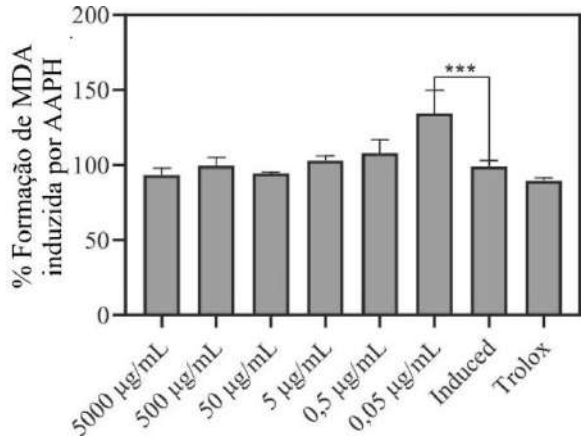

Figura 6. Taxa de geração de malondialdeído (MDA) induzida pela ação da AAPH. A oxidação lipídica foi desencadeada pela presença do radical livre AAPH, tanto na ausência (controle induzido) quanto na presença de concentrações crescentes de extratos MOC. Trolox® na concentração de 200 nM foi empregado como composto antioxidante de referência. Os valores apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=3. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA one-way com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ e *** $p < 0,001$, em comparação com o grupo controle. **Fonte:** Autoria própria.

Estudar o potencial efeito protetor do MOC contra a peroxidação lipídica é crucial para garantir a estabilidade dos produtos alimentícios, evitando a deterioração causada pela oxidação lipídica. Essa oxidação pode resultar na formação de compostos indesejáveis, como aldeídos e cetonas, contribuindo para a degradação da qualidade dos alimentos. É importante notar que os peróxidos, considerados produtos de oxidação precoce, têm períodos de indução relativamente curtos durante os quais se formam, se acumulam e se dissipam (Imran et al., 2015). Além disso, a peroxidação lipídica está associada a mudanças na palatabilidade, textura e propriedades sensoriais dos produtos alimentícios (Oriente et al., 2020).

A peroxidação lipídica pode comprometer a estabilidade e a eficácia de medicamentos sensíveis à oxidação em formulações farmacêuticas. No entanto, nossos resultados indicam que o MOC não apresenta um potencial protetor contra a peroxidação lipídica, o que pode ser

atribuído à sua composição predominantemente polissacarídica e proteica. Essa descoberta sugere explorar outras estratégias ou ingredientes com propriedades antioxidantes para garantir a estabilidade e eficácia de alimentos e produtos farmacêuticos sensíveis à oxidação.

3.7. Atividade de eliminação de radicais hidroxilo

Os radicais hidroxila são os mais reativos e comumente produzidos endogenamente durante o metabolismo aeróbico (Cai et al., 2022; Sihag et al., 2022). Realizamos um ensaio de oxidação in vitro de 2-desoxirribose (2-DR) usando a reação de Fenton para avaliar a capacidade do MOC de neutralizar esses radicais.

Como evidenciado na Figura 7, o MOC em várias concentrações (5000, 500, 50, 5, 0,5 e 0,05 μg/mL) não demonstrou potencial para neutralizar os radicais hidroxila, mostrando uma discrepância significativa entre todas as concentrações e o grupo controle. Esse achado sugere que o sistema de ensaio pode ativar vias oxidativas induzidas por componentes MOC. Esse fenômeno pode resultar no aumento da produção de radicais hidroxila e, consequentemente, no aumento do MDA como subproduto da peroxidação lipídica (Ayala; Muñoz; Argüelles, 2014).

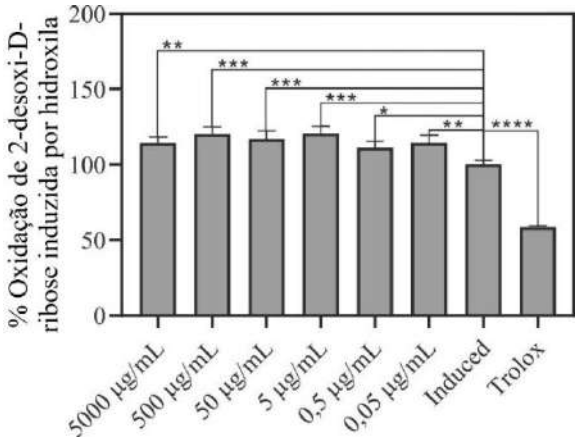

Figura 7. Atividade de eliminação de radicais hidroxila medida pela degradação oxidativa da 2-desoxi-D-ribose (2-DR) mediada por radicais hidroxila. O controle induzido é a produção de MDA a partir da oxidação de 2-DR com $FeSO_4$ e H_2O_2. Outro grupo representa a produção de MDA por Trolox 200 nM como antioxidante padrão. Concentrações crescentes de MOC foram avaliadas neste ensaio. Os valores apresentados são a média ± desvio padrão (DP) com n=3. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA de duas vias com comparações múltiplas de Sidak. Os valores de significância foram representados como * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$ e **** $p < 0,0001$, em comparação com o grupo controle. **Fonte:** Autoria própria.

4. CONCLUSÕES

A mucilagem extraída de *O. cochenillifera* exibe uma gama de propriedades físico-químicas que se alinham com as características estabelecidas da mucilagem derivada de plantas, confirmando seu potencial como um biopolímero versátil. Sua composição química é consistente com a literatura anterior, apresentando um rico conteúdo de polissacarídeos essencial para aplicações funcionais. Notavelmente, a mucilagem demonstra comportamento de fluido não newtoniano, caracterizado por propriedades de afinamento por cisalhamento, indicando que sua viscosidade diminui sob tensão aplicada, enquanto a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura, pH e concentração. Testes de frequência oscilatória revelam propriedades elásticas significativas, sugerindo sua eficácia como agente espessante ou estabilizante em produtos alimentícios e outras formulações. Portanto, este estudo se destaca por fornecer uma caracterização mais aprofundada e técnica da mucilagem de *O. cochenillifera*, distinguindo-se de estudos anteriores por avaliar o impacto de variáveis físico-químicas específicas em suas propriedades funcionais e caracterizar uma nova mucilagem extraída de uma planta subutilizada e pouco explorada e abundantemente presente em regiões semiáridas.

Além disso, os ensaios de viabilidade celular não indicam toxicidade para as células neurais, o que é promissor para aplicações biomédicas; no entanto, a ausência de efeitos antioxidantes demonstrados justifica mais pesquisas para explorar a capacidade antioxidante dessa mucilagem. Estudos futuros devem se concentrar em uma caracterização antioxidante abrangente da mucilagem de *O. cochenillifera*, explorando compostos específicos e seus mecanismos de ação para elucidar seu potencial bioativo. Além disso, é essencial avaliar o desempenho dessa mucilagem em formulações aplicadas em diferentes setores, como alimentos, cosméticos e farmacêuticos, investigando sua estabilidade e funcionalidade em condições reais de uso. Estudos que analisem a sustentabilidade e o impacto ambiental de sua extração, em comparação com alternativas sintéticas, também são necessários para validar seu uso como biopolímero ecologicamente correto. Finalmente, pesquisas sobre interações sinérgicas com outros hidrocoloides podem melhorar suas propriedades gelificantes e emulsificantes, ampliando suas funcionalidades. Ao explorar essas direções, investigações futuras podem desbloquear todo o potencial da mucilagem de *O. cochenillifera* como um ingrediente multifuncional para diversas aplicações industriais e biológicas.

5. REFERÊNCIAS

Abbas, E. Y.; Ezzat, M. I.; El Hefnawy, H. M.; Abdel-Sattar, E. An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. **Journal of Food Biochemistry**, vol. 46, no. 11, 2 Nov. 2022. https://doi.org/10.1111/jfbc.14310.

Alpizar-Reyes, E.; Román-Guerrero, A.; Gallardo-Rivera, R.; Varela-Guerrero, V.; Cruz-Olivares, J.; Pérez-Alonso, C. Rheological properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed mucilage obtained by spray-drying as a novel source of hydrocolloid. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 107, p. 817–824, Feb. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.048.

Andrade, L. A.; da Silva, A. C.; Pereira, J. Chemical composition of taro mucilage from different extraction techniques found in literature. **Food Chemistry Advances**, vol. 4, p. 100648, Jun. 2024. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100648.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. [*S. l.*]: AOAC International: Rockville, MD, 2016.

Arab, K.; Ghanbarzadeh, B.; Karimi, S.; Ebrahimi, B.; Hosseini, M. Gelling and rheological properties of a polysaccharide extracted from *Ocimum album* L. seed. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 246, p. 125603, Aug. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125603.

Ayala, A.; Muñoz, M. F.; Argüelles, S. Lipid Peroxidation: Production, Metabolism, and Signaling Mechanisms of Malondialdehyde and 4-Hydroxy-2-Nonenal. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, vol. 2014, p. 1–31, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/360438.

Bezerra, J. D. C.; Andrade, A. P.; Rêgo, M. M.; Silva, D. S.; Nascimento Júnior, J. R. S.; Araújo, F. dos S.; Valença, R. de L.; Rêgo, E. R.; Pessoa, A. M. dos S.; Bruno, R. De L. A.; Medeiros, A. N. Genetic diversity and relationships among *Nopalea* sp. and *Opuntia* spp. accessions revealed by RAPD, ISSR and ITS molecular markers. **Molecular Biology Reports**, vol. 49, no. 7, p. 6207–6213, 8 Jul. 2022. https://doi.org/10.1007/s11033-022-07416-y.

Boiarkina, I.; Sang, C.; Depree, N.; Prince-Pike, A.; Yu, W.; Wilson, D. I.; Young, B. R. The significance of powder breakdown during conveying within industrial milk powder plants. **Advanced Powder Technology**, vol. 27, no. 6, p. 2363–2369, Nov. 2016. https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.10.019.

Boudaghi, M.; Edwards, B. J.; Khomami, B. Microstructural evolution and reverse flow in shear-banding of entangled polymer melts. **Soft Matter**, vol. 19, no. 3, p. 410–429, 2023. https://doi.org/10.1039/D2SM01337A.

Cai, W.-W.; Hu, X.-M.; Wang, Y.-M.; Chi, C.-F.; Wang, B. Bioactive Peptides from Skipjack Tuna Cardiac Arterial Bulbs: Preparation, Identification, Antioxidant Activity, and Stability against Thermal, pH, and Simulated Gastrointestinal Digestion Treatments. **Marine Drugs**, vol. 20, no. 10, p. 626, 30 Sep. 2022. https://doi.org/10.3390/md20100626.

Câmara, A. K. F. I.; Okuro, P. K.; Cunha, R. L; Herrero, A. M.; Ruiz-Capillas, C.; Pollonio, M. A. R. Chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage as a new fat substitute in emulsified meat products: Technological, physicochemical, and rheological characterization. **LWT**, vol. 125, p. 109193, May 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109193.

Carr, R. L. **Evaluating flow properties of solids**. 1965.

Celli, J. P.; Turner, B. S.; Afdhal, N. H.; Ewoldt, R. H.; Mckinley, G. H.; Bansil, R.; Erramilli, S. Rheology of Gastric Mucin Exhibits a pH-Dependent Sol−Gel Transition. **Biomacromolecules**, vol. 8, no. 5, p. 1580–1586, 1 May 2007. https://doi.org/10.1021/bm0609691.

Cross, M. M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. **Journal of Colloid Science**, vol. 20, no. 5, p. 417–437, Jun. 1965. https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90022-X.

Cruz Filho, I. J.; Barros, B. R. Da S.; Aguiar, L. M. De S.; Navarro, C. D. C.; Ruas, J. S.; Lorena, V. M. B.; Rocha, G. J. De M.; Vercesi, A. E.; Melo, C. M. L.; Maior, A. M. S. Lignins isolated from Prickly pear cladodes of the species *Opuntia fícus-indica* (Linnaeus) Miller and *Opuntia cochenillifera* (Linnaeus) Miller induces mice splenocytes activation, proliferation and cytokines production. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 123, p. 1331–1339, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.120.

Cruz-Rubio, J. M.; Mueller, M.; Loeppert, R.; Viernstein, H.; Praznik, W. The Effect of Cladode Drying Techniques on the Prebiotic Potential and Molecular Characteristics of the Mucilage Extracted from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. **Scientia Pharmaceutica**, vol. 88, no. 4, p. 43, 2 Oct. 2020. https://doi.org/10.3390/scipharm88040043.

Curnutt, A.; Smith, K.; Darrow, E.; Walters, K. B. Chemical and Microstructural Characterization of pH and [Ca^{2+}] Dependent Sol-Gel Transitions in Mucin Biopolymer.

Scientific Reports, vol. 10, no. 1, p. 8760, 29 May 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65392-4.

Dergal, S. B. Química de los alimentos. México: Alhambra Mexicana. [*S. l.*: *s. n.*], 2006.

Di Lorenzo, F.; Silipo, A.; Molinaro, A.; Parrilli, M.; Schiraldi, C.; D'agostino, A.; Izzo, E.; Rizza, L.; Bonina, A; Bonina, F; Lanzetta, R. The polysaccharide and low molecular weight components of *Opuntia ficus indica* cladodes: Structure and skin repairing properties. **Carbohydrate Polymers**, vol. 157, p. 128–136, Feb. 2017. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.073.

Di Napoli, M.; Badalamenti, N.; Castagliuolo, G.; Merra, R.; Varcamonti, M.; Zanfardino, A.; Bruno, M.; Sottile, F. Chemical composition, antimicrobial, and antioxidant activities of *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. mucilage collected in Sicily, Italy. **Natural Product Research**, p. 1–9, Nov. 2023. https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2272781.

DICK, M.; DAL MAGRO, L.; RODRIGUES, R. C.; RIOS, A. de O.; FLÔRES, S. H. Valorization of *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw. cladodes to obtain a mucilage with hydrocolloid features: Physicochemical and functional performance**. International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 123, p. 900–909, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.126.

Draper, H. H.; Squires, E. J.; Mahmoodi, H.; Wu, J.; Agarwal, S.; Hadley, M. A comparative evaluation of thiobarbituric acid methods for the determination of malondialdehyde in biological materials. **Free Radical Biology and Medicine**, vol. 15, no. 4, p. 353–363, Oct. 1993. https://doi.org/10.1016/0891-5849(93)90035-S.

Du Toit, A.; Wit, M.; Osthoff, G.; Hugo, A. Antioxidant properties of fresh and processed cactus pear cladodes from selected *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* cultivars. **South African Journal of Botany**, vol. 118, p. 44–51, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.014.

Espino-Díaz, M.; Ornelas-Paz, J. J.; Martínez-Téllez, M. A.; Santillán, C.; Barbosa-Cánovas, G. V.; Zamudio-Flores, P. B.; Olivas, G. I. Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). **Journal of Food Science**, vol. 75, no. 6, 17 Aug. 2010. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x.

Faustino, C.; Pinheiro, L. Analytical Rheology of Honey: A State-of-the-Art Review. **Foods**, vol. 10, no. 8, 23 Jul. 2021. https://doi.org/10.3390/foods10081709.

Felkai-Haddache, L.; Remini, H.; Dulong, V.; Mamou-Belhabib, K.; Picton, L.; Madani, K.; Rihouey, C. Conventional and Microwave-Assisted Extraction of Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes: Physico-Chemical and Rheological Properties. **Food and Bioprocess Technology**, vol. 9, no. 3, p. 481–492, 14 Mar. 2016. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1640-7.

Fonseca, M. T.; Vital, A. C.; Silva, M. B.; Monteiro, S. S.; Nascimento, A.; Trindade, A. P.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. B. Improving the stability of spray-dried probiotic acerola juice: A study on hydrocolloids' efficacy and process variables. **Food and Bioproducts Processing**, vol. 147, p. 209–218, Sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.07.003.

Gebresamuel, N.; Gebre-Mariam, T. Comparative Physico-Chemical Characterization of the Mucilages of Two Cactus Pears (*Opuntia* Spp.) Obtained from Mekelle, Northern Ethiopia. **Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology**, vol. 03, no. 01, p. 79–86, 2012. https://doi.org/10.4236/jbnb.2012.31010.

Gillet, S.; Aguedo, M.; Petrut, R.; Olive, G.; Anastas, P.; Blecker, C.; Richel, A. Structure impact of two galactomannan fractions on their viscosity properties in dilute solution, unperturbed state and gel state. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 96, p. 550–559, Mar. 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.057.

Graham, R. S.; Likhtman, A. E.; Mcleish, T. C. B.; Milner, S. T. Microscopic theory of linear, entangled polymer chains under rapid deformation including chain stretch and convective constraint release. **Journal of Rheology**, vol. 47, no. 5, p. 1171–1200, Sep. 2003. https://doi.org/10.1122/1.1595099.

Hausner, H. H. **Friction conditions in a mass of metal powder**. [*S. l.*]: Polytechnic Inst. of Brooklyn. Univ. of California, Los Angeles, 1967.

Hyun, K.; Kim, S. H.; Ahn, K. H.; Lee, S. J. Large amplitude oscillatory shear as a way to classify the complex fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, vol. 107, no. 1–3, p. 51–65, Dec. 2002. https://doi.org/10.1016/S0377-0257(02)00141-6.

Ilango, K. B.; Gowthaman, S.; Seramaan, K. I.; Chidambaram, K.; Bayan, M. F.; Rahamathulla, M.; Balakumar, C. Mucilage of *Coccinia grandis* as an Efficient Natural Polymer-Based Pharmaceutical Excipient. **Polymers**, vol. 14, no. 1, p. 215, 5 Jan. 2022. https://doi.org/10.3390/polym14010215.

Imran, M.; Anjum, F. M.; Ahmad, N.; Khan, M. K.; Mushtaq, Z.; Nadeem, M.; Hussain, S. Impact of extrusion processing conditions on lipid peroxidation and storage stability of full-fat flaxseed meal. **Lipids in Health and Disease**, vol. 14, no. 1, p. 92, 19 Dec. 2015. https://doi.org/10.1186/s12944-015-0076-4.

Kalegowda, P.; Chauhan, A. S.; Nanjaraj Urs, S. M. *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw cladode mucilage: Physico-chemical, rheological and functional behavior. **Carbohydrate Polymers**, vol. 157, p. 1057–1064, Feb. 2017. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.070.

Kang, K. S.; Pettitt, D. J. Xanthan, gellan, welan, and rhamsan. **Industrial Gums.** [*S. l.*]: Elsevier, 1993. p. 341–397. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092654-4.50017-6.

Kassem, I. A. A.; Ashaolu, T. J.; Kamel, R.; Elkasabgy, N. A.; Afifi, S. M.; Farag, M. A. Mucilage as a functional food hydrocolloid: ongoing and potential applications in prebiotics and nutraceuticals. **Food & Function**, vol. 12, no. 11, p. 4738–4748, 2021. https://doi.org/10.1039/D1FO00438G.

Khechinashvili, N. N.; Janin, J.; Rodier, F. Thermodynamics of the temperature-induced unfolding of globular proteins. **Protein Science**, vol. 4, no. 7, p. 1315–1324, 31 Jul. 1995. https://doi.org/10.1002/pro.5560040707.

Knorr, A.; Mestieri, L. B.; Pinheiro, L. S.; Mendes, R. A.; Hernandez, P. A. G.; Barletta, F. B.; Grecca, F. S. Cytotoxicity and Bioactivity of Calcium Silicate-based Cements in a Culture of Stem Cells from the Apical Papilla. **Iranian endodontic journal**, vol. 16, no. 4, p. 225–231, 2021. https://doi.org/10.22037/iej.v16i4.30747.

Koocheki, A.; Mortazavi, S. A.; Shahidi, F.; Razavi, S. M. A.; Taherian, A. R. Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. **Journal of Food Engineering**, vol. 91, no. 3, p. 490–496, Apr. 2009. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.09.028.

León-Martínez, F. M.; Rodríguez-Ramírez, J.; Medina-Torres, L. L.; Méndez Lagunas, L. L.; Bernad-Bernad, M. J. Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus-indica*). **Carbohydrate Polymers**, vol. 84, no. 1, p. 439–445, Feb. 2011. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.004.

Levine, R. L.; Garland, D.; Oliver, C. N.; Amici, A.; Climent, I.; Lenz, Anke-G.; Ahn, B.-W.; Shaltiel, S.; Stadtman, E. R. [49] Determination of carbonyl content in oxidatively modified

proteins. In: **Methods in enzymology**, [*s. n.*], 1990. p. 464–478. https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)86141-H.

Lima, D. B.; Almeida, R. D.; Pasquali, M.; Borges, S. P.; Fook, M. L.; Lisboa, H. M. Physical characterization and modeling of chitosan/peg blends for injectable scaffolds. **Carbohydrate Polymers**, vol. 189, p. 238–249, Jun. 2018. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.045.

Liu, P.; Liu, Y.; Yang, Y.; Chen, Z.; Li, J.; Luo, J. Mechanism of Biological Liquid Superlubricity of *Brasenia schreberi* Mucilage. **Langmuir**, vol. 30, no. 13, p. 3811–3816, 8 Apr. 2014. https://doi.org/10.1021/la500193n.

Lowry, O. H. Protein measurement with the Folin phenol reagent. **Journal of Biological Chemistry,** vol. 193, p. 265–275, 1951.

Ma, F.; Li, X.; Ren, Z.; Särkkä-Tirkkonen, M.; Zhang, Y.; Zhao, D.; Liu, X. Effects of concentrations, temperature, pH and co-solutes on the rheological properties of mucilage from *Dioscorea opposita* Thunb. and its antioxidant activity. **Food Chemistry**, vol. 360, p. 130022, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130022.

Ma, F.; Zhang, Y.; Liu, N.; Zhang, J.; Tan, G.; Kannan, B.; Liu, X.; Bell, A. E. Rheological properties of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb. **Food Chemistry**, vol. 227, p. 64–72, Jul. 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.072.

Ma, J. J.; Huang, X. N.; Yin, S. W.; Yu, Y. G.; Yang, X. Q. Bioavailability of quercetin in zein-based colloidal particles-stabilized Pickering emulsions investigated by the in vitro digestion coupled with Caco-2 cell monolayer model. **Food Chemistry**, vol. 360, 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130152.

Marković, O. S.; Pešić, M. P.; Shah, A. V.; Serajuddin, A. T.M.; Verbić, T. Ž.; Avdeef, A. Solubility-pH profile of desipramine hydrochloride in saline phosphate buffer: Enhanced solubility due to drug-buffer aggregates. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, vol. 133, p. 264–274, May 2019. https://doi.org/10.1016/j.ejps.2019.03.014.

Martin, A. A.; Freitas, R. A.; Sassaki, G. L.; Evangelista, P. H. L.; Sierakowski, M. R. Chemical structure and physical-chemical properties of mucilage from the leaves of *Pereskia aculeata*. **Food Hydrocolloids**, vol. 70, p. 20–28, Sep. 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.020.

Medina-Torres, L. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). **Food Hydrocolloids**, vol. 14, no. 5, p. 417–424, 1 Sep. 2000. https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1.

Medina-Torres, L.; Brito-De La Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Alonso, S. Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus indica*) and carrageenans. **Carbohydrate Polymers**, vol. 52, no. 2, p. 143–150, May 2003. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00269-2.

Methacanon, P.; Kongjaroen, A.; Gamonpilas, C. Structural and shear and extensional rheological properties of hairy basil seed mucilage for potential application as oropharyngeal dysphagia diets. **Food Hydrocolloids**, vol. 143, p. 108903, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108903.

Miller, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical chemistry**, vol. 31, p. 426–428, 1959.

Mohagheghi, M.; Khomami, B. Elucidating the flow-microstructure coupling in the entangled polymer melts. Part I: Single chain dynamics in shear flow. **Journal of Rheology**, vol. 60, no. 5, p. 849–859, Sep. 2016. https://doi.org/10.1122/1.4961481.

Molodenskiy, D.; Shirshin, E.; Tikhonova, T.; Gruzinov, A.; Peters, G.; Spinozzi, F. Thermally induced conformational changes and protein–protein interactions of bovine serum albumin in aqueous solution under different pH and ionic strengths as revealed by SAXS measurements. **Physical Chemistry Chemical Physics**, vol. 19, no. 26, p. 17143–17155, 2017. https://doi.org/10.1039/C6CP08809K.

Monrroy, M.; García, E.; Ríos, K.; García, J. R. Extraction and Physicochemical Characterization of Mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. **Journal of Chemistry**, vol. 2017, p. 1–9, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/4301901.

Mosmann, T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. **Journal of Immunological Methods**, vol. 65, no. 1–2, p. 55–63, Dec. 1983. https://doi.org/10.1016/0022-1759(83)90303-4.

Mukherjee, S.; Avlani, D.; Majee, S. B.; Biswas, G. R. Physicochemical and pharmaceutical characterisation of mucilage from sweet basil seed. **Int. J. App. Pharm**, vol. 11, p. 12–17, 2019.

Munir, A.; Youssef, F. S.; Ishtiaq, S.; Kamran, S. H.; Sirwi, A.; Ahmed, S. A.; Ashour, M. L.; Elhady, S. S. Malva parviflora Leaves Mucilage: An Eco-Friendly and Sustainable Biopolymer with Antioxidant Properties. **Polymers**, vol. 13, no. 23, p. 4251, 3 Dec. 2021. https://doi.org/10.3390/polym13234251.

Mutlu, S.; Kopuk, B.; Palabiyik, I. Effect of Cold Atmospheric Pressure Argon Plasma Jet Treatment on the Freeze-Dried Mucilage of Chia Seeds (*Salvia hispanica* L.). **Foods**, vol. 12, no. 8, p. 1563, 7 Apr. 2023. https://doi.org/10.3390/foods12081563.

Oriente, S. F.; Barreto, F.; Tomaszewski, C. A.; Barnet, L. S.; Souza, N. C.; Oliveira, H. M. L.; Pasquali, M. A. de B. Retention of vitamin A after goat milk processing into cheese: a nutritional strategy. **Journal of Food Science and Technology**, vol. 57, no. 12, p. 4364–4370, 28 Dec. 2020. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04473-8.

Otálora, M. C.; Wilches-Torres, A.; Castaño, J. A. G. Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study. **Polymers**, vol. 13, no. 11, p. 1689, 22 May 2021. https://doi.org/10.3390/polym13111689.

Pérez-Cadena, R.; Espinosa-Solares, T.; Medina-Moreno, S. A.; Martínez, A.; Lizardi-Jiménez, M. A.; Téllez-Jurado, A. Effect of the age of *Opuntia ficus-indica* cladodes on the release of simple sugars. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, vol. 33, p. 102010, May 2021. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102010.

Pérez-Orozco, J. P.; Sánchez-Herrera, L. M.; Ortiz-Basurto, R. I. Effect of concentration, temperature, pH, co-solutes on the rheological properties of *Hyptis suaveolens* L. mucilage dispersions. **Food Hydrocolloids**, vol. 87, p. 297–306, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.004.

Pérez-Viveros, D. J.; Díaz-Batalla, L.; Navarro-Cortez, R. O.; Palma-Rodríguez, H. M.; Hernández-Uribe, J. P. Effect of extrusion on physicochemical and functional properties of cladode flour from *Opuntia cochenillifera* and *Opuntia ficus-indica*. **Applied Food Research**, vol. 4, no. 2, p. 100568, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100568.

Procacci, S.; Bojórquez-Quintal, E.; Platamone, G.; Maccioni, O.; Vecchio, V. L.; Morreale, V.; Alisi, C.; Balducchi, R.; Bacchetta, L. *Opuntia ficus-indica* Pruning Waste Recycling: Recovery and Characterization of Mucilage from Cladodes. **Natural Resources**, vol. 12, no. 04, p. 91–107, 2021. https://doi.org/10.4236/nr.2021.124008.

Quintero-García, M.; Gutiérrez-Cortez, E.; Bah, M.; Rojas-Molina, A.; Cornejo-Villegas, M. de L. A.; Del Real, A.; Rojas-Molina, I. Comparative Analysis of the Chemical Composition and Physicochemical Properties of the Mucilage Extracted from Fresh and Dehydrated *Opuntia ficus indica* Cladodes. **Foods**, vol. 10, no. 9, p. 2137, 10 Sep. 2021. https://doi.org/10.3390/foods10092137.

Quinzio, C.; Ayunta, C.; Alancay, M.; Mishima, B. L.; Iturriaga, L. Physicochemical and rheological properties of mucilage extracted from *Opuntia ficus indica* (L. Miller). Comparative study with guar gum and xanthan gum. **Journal of Food Measurement and Characterization**, vol. 12, no. 1, p. 459–470, 27 Mar. 2018. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9659-2.

Ramos, I. F. da S.; Magalhães, L. M.; Pessoa, C. do O.; Ferreira, P. M. P.; Rizzo, M. dos S.; Osajima, J. A.; Silva-Filho, E. C.; Nunes, C.; Raposo, F.; Coimbra, M. A.; Ribeiro, A. B.; Costa, M. P. New properties of chia seed mucilage (*Salvia hispanica* L.) and potential application in cosmetic and pharmaceutical products. **Industrial Crops and Products**, vol. 171, p. 113981, Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113981.

Ramos, N. J. Da S.; Rocha, E. B. M.; Gusmão, T. A. S.; Nascimento, A.; Lisboa, H. M.; Gusmão, R. P. Optimizing gluten-free pasta quality: The impacts of transglutaminase concentration and kneading time on cooking properties, nutritional value, and rheological characteristics. **LWT**, vol. 189, p. 115485, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115485.

Renard, D.; Garnier, C.; Lapp, A.; Schmitt, C.; Sanchez, C. Structure of arabinogalactan-protein from Acacia gum: From porous ellipsoids to supramolecular architectures. **Carbohydrate Polymers,** vol. 90, no. 1, p. 322–332, Sep. 2012. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.046.

Rindengan, E. R.; Abdassah, M.; Chaerunisaa, A. Y. Isolation And Characterization of Physicochemical Properties of Mucilago Gedi Leaf (*Abelmoschus manihot* L. Medik). **Indonesian Journal of Pharmaceutical Science and Technology**, vol. 5, no. 3, p. 100–106, 2018.

Rocha, S. de S.; Silva, S. R. F. da; Silva, J. Y. P. da; Medeiros, V. P. B.; Aburjaile, F. F.; Carvalho, R. D. de O.; Silva, M. S.; Tavares, J. F.; Nascimento, Y. M.; Lima, M. dos S.; Sassi, C. F. C.; Monteiro, M.; Alves, J. L. de B.; Albuquerque, T. M. R.; Oliveira, M. E. G.; Souza, E. L. Exploring the potential prebiotic effects of *Opuntia dillenii* (Ker Gawl). Haw (Cactaceae)

cladodes on human intestinal microbiota. **Journal of Functional Foods**, vol. 118, p. 106259, Jul. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106259.

Sacco, P.; Lipari, S.; Cok, M.; Colella, M.; Marsich, E.; Lopez, F.; Donati, I. Insights into Mechanical Behavior and Biological Properties of Chia Seed Mucilage Hydrogels. **Gels**, vol. 7, no. 2, p. 47, 20 Apr. 2021. https://doi.org/10.3390/gels7020047.

Sébastien, G.; Christophe, B.; Mario, A.; Pascal, L.; Michel, P.; Aurore, R. Impact of purification and fractionation process on the chemical structure and physical properties of locust bean gum. **Carbohydrate Polymers**, vol. 108, p. 159–168, Aug. 2014. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.092.

Shao, H.; Zhang, H.; Tian, Y.; Song, Z.; Lai, P.; Ai, L. Composition and Rheological Properties of Polysaccharide Extracted from Tamarind (*Tamarindus indica* L.) Seed. **Molecules**, vol. 24, no. 7, p. 1218, 28 Mar. 2019. https://doi.org/10.3390/molecules24071218.

Sihag, S.; Pal, A.; Ravikant; Saharan, V. Antioxidant properties and free radicals scavenging activities of pomegranate (*Punica granatum* L.) peels: An in-vitro study. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, vol. 42, p. 102368, Jul. 2022. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102368.

Silva, V. G.; Aguilar, M. S. C.; Ascanio, G.; Aguayo, J. P.; Pérez-Salas, K. Y.; Notario, A. del C. S. Acid Hydrolysis of Pectin and Mucilage from Cactus (*Opuntia ficus indica*) for Identification and Quantification of Monosaccharides. **Molecules**, vol. 27, no. 18, p. 5830, 8 Sep. 2022. https://doi.org/10.3390/molecules27185830.

Solanki, D.; Dhungana, P.; Tan, Q. Y.; Badin, R.; Bhandari, B.; Sahu, J. K.; Prakash, S. Assessing the functional and physicochemical properties of chia seed mucilage extracted using an innovative extraction method. **Food Hydrocolloids**, vol. 156, p. 110342, Nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110342.

Suo, S.-K.; Zheng, S.-L.; Chi, C.-F.; Luo, H.-Y.; Wang, B. Novel angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from tuna byproducts—milts: Preparation, characterization, molecular docking study, and antioxidant function on H_2O_2-damaged human umbilical vein endothelial cells. **Frontiers in Nutrition**, vol. 9, 22 Jul. 2022. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.957778.

Tabio-García, D.; Paraguay-Delgado, F.; Lardizabal Gutiérrez, D.; Quintero-Ramos, A.; Meléndez-Pizarro, C. O.; Ochoa-Martínez, L. A.; Sánchez-Madrigal, M. Á.; Ruiz-Gutiérrez,

M. G.; Espinoza-Hicks, J. C. Effectiveness of *Opuntia ficus-indica* mucilage as a carrier agent in microencapsulation of bioactive compounds of Amaranthus hypochondriacus var. **Nutrisol. Food Bioscience**, vol. 52, p. 102368, Apr. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102368.

Trachtenberg, S.; Mayer, A. M. Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. **Phytochemistry**, vol. 21, no. 12, p. 2835–2843, Jan. 1980. https://doi.org/10.1016/0031-9422(80)85052-7.

Vichai, V.; Kirtikara, K. Sulforhodamine B colorimetric assay for cytotoxicity screening. **Nature Protocols**, vol. 1, no. 3, p. 1112–1116, 17 Aug. 2006. https://doi.org/10.1038/nprot.2006.179.

Waldron, K. W. **Handbook of waste management and co-product recovery in food processing**. [*S. l.*]: Elsevier, 2009.

Wang, K.-Q.; Luo, S.-Z.; Zhong, X.-Y.; Cai, J.; Jiang, S.-T.; Zheng, Z. Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation. **Food Chemistry**, vol. 214, p. 393–399, Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.037.

Wang, S.; Tang, H.; Guo, J.; Wang, K. Effect of pH on the rheological properties of borate crosslinked hydroxypropyl guar gum hydrogel and hydroxypropyl guar gum. **Carbohydrate Polymers**, vol. 147, p. 455–463, Aug. 2016. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.029.

Warrand, J.; Michaud, P.; Picton, L.; Muller, G.; Courtois, B.; Ralainirina, R.; Courtois, J. Contributions of Intermolecular Interactions between Constitutive Arabinoxylans to the Flaxseeds Mucilage Properties. **Biomacromolecules**, vol. 6, no. 4, p. 1871–1876, 1 Jul. 2005. https://doi.org/10.1021/bm049249p.

Yang, J.; Chen, S.; Fang, Y. Viscosity study of interactions between sodium alginate and CTAB in dilute solutions at different pH values. **Carbohydrate Polymers**, vol. 75, no. 2, p. 333–337, Jan. 2009. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.037.

Zare, Y.; Rhee, K. Y. Prediction of loss factor (tan δ) for polymer nanocomposites as a function of yield tress, relaxation time and the width of transition region between Newtonian and power-law behaviors. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, vol. 96, p. 136–143, Aug. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.04.045.

Zhu, W.; Obara, H. The pre-shearing effect on the rheological properties of okra mucilage. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 648, p. 129257, Sep. 2022. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129257.

CAPÍTULO IV

FERMENTAÇÃO DE MUCILAGEM DE CLADÓDIOS DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA* COM *LACTOBACILLUS GASSERI*: MODIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E TECNO-FUNCIONAIS

Monteiro, S. S., Almeida, R. L. J., Santos, N. C., Medeiros, W. R. D. B., Fook, M. V. L., Lisboa, H. M., Pasquali, M. A. B. Fermentation of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes with *Lactobacillus gasseri*: Modification of physicochemical and techno-functional properties. **Food Bioscience**, vol. 68, p. 106424, 2025. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106424

RESUMO: A mucilagem de *Opuntia cochenillifera* ganhou atenção por seu potencial em aplicações alimentícias, cosméticas e farmacêuticas devido às suas propriedades funcionais únicas. Este estudo explorou o impacto da fermentação com *Lactobacillus gasseri* ATCC 33323 na modificação de suas características físico-químicas e tecno-funcionais. A mucilagem de controle (MOC) foi obtida por extração aquosa, enquanto a mucilagem fermentada (MOCF) foi incubada a 37 °C por 24 horas. A fermentação reduziu os monossacarídeos, particularmente galactose (-21,9%), arabinose (-20,5%) e glicose (-0,8%), identificando a galactose como a principal fonte de carbono. O MOCF exibiu partículas mais densas e compactas com um tamanho médio menor (48,36 ± 48,57 µm) do que o MOC (57,77 ± 21,96 µm), aumentando a solubilidade. A análise espectroscópica revelou mudanças bioquímicas em polissacarídeos e proteínas, enquanto a análise térmica indicou maior estabilidade térmica. A fermentação diminuiu a firmeza, a consistência e a coesão. A capacidade de emulsificação melhorou na proporção de 50:50 (60% para MOCF vs. 40% para MOC), enquanto a estabilidade permaneceu semelhante na proporção de 10:90. A viscosidade mais alta do MOC favorece aplicações de espessamento, enquanto a solubilidade e estabilidade aprimoradas do MOCF são adequadas para bebidas e produtos de baixa viscosidade. Essas descobertas demonstram que a fermentação é uma ferramenta valiosa para adaptar as propriedades da mucilagem a diferentes aplicações industriais.

Palavras-chave: Probiótico; Modificação estrutural; Fermentação; Mucilagem.

FERMENTATION OF MUCILAGE FROM *OPUNTIA COCHENILLIFERA* CLADODES WITH *LACTOBACILLUS GASSERI*: MODIFICATION OF PHYSICOCHEMICAL AND TECHNOFUNCTIONAL PROPERTIES

ABSTRACT: Mucilage from *Opuntia cochenillifera* has gained attention for its potential in food, cosmetic, and pharmaceutical applications due to its unique functional properties. This study explored the impact of fermentation with *Lactobacillus gasseri* ATCC 33323 on the modification of its physicochemical and techno-functional characteristics. The control mucilage (MOC) was obtained through aqueous extraction, while the fermented mucilage (MOCF) was incubated at 37 °C for 24 hours. Fermentation reduced monosaccharides, particularly galactose (-21.9 %), arabinose (-20.5 %), and glucose (-0.8 %), identifying galactose as the primary carbon source. MOCF exhibited denser, more compact particles with a smaller average size (48.36 ± 48.57 µm) than MOC (57.77 ± 21.96 µm), enhancing solubility. Spectroscopic analysis revealed biochemical changes in polysaccharides and proteins, while thermal analysis indicated greater thermal stability. Fermentation decreased firmness, consistency, and cohesiveness. Emulsifying capacity improved at a 50:50 ratio (60 % for MOCF vs. 40 % for MOC), while stability remained similar at a 10:90 ratio. MOC's higher viscosity favors thickening applications, whereas MOCF's enhanced solubility and stability suit beverages and low-viscosity products. These findings demonstrate that fermentation is a valuable tool for tailoring mucilage properties to different industrial applications.

Keywords: Probiotic; Structural modification; Fermentation; Mucilage.

1. INTRODUÇÃO

A crescente conscientização sobre nutrição e saúde entre os consumidores está remodelando a indústria alimentícia, impulsionando a demanda por opções alimentares mais saudáveis e sustentáveis (Ağagündüz et al., 2023). Essa mudança é caracterizada por uma preferência por ingredientes naturais e alimentos funcionais que não apenas saciam a fome, mas também contribuem para o bem-estar geral. Nesse contexto, as mucilagens surgem como uma rota nessa transformação. As mucilagens alimentares são polissacarídeos e proteínas de alto peso molecular que desempenham um papel crucial na produção de alimentos, aumentando a viscosidade, a gelificação e o espessamento, o que por sua vez afeta a reologia e as propriedades sensoriais (Goff; Guo, 2019; Irondi et al., 2023). Os termos hidrocoloides e gomas também podem ser usados como sinônimos para mucilagens (Amiri et al., 2021).

A maior parte das mucilagens utilizadas na indústria brasileira precisa ser importada para atender à demanda interna (Dick et al., 2019). Em 2021, o Brasil importou aproximadamente 3,86 milhões de quilos de mucilagem e espessantes, refletindo uma tendência contínua de dependência desses insumos (WITS, 2021). Em anos anteriores, os volumes de importação também foram significativos, como os 4,09 milhões de quilos registrados, destacando a baixa disponibilidade de alternativas nacionais. No entanto, dados específicos sobre a produção doméstica de mucilagem no Brasil são escassos (WITS, 2020).

Essa situação cria oportunidades para a exploração e identificação de novas fontes de mucilagens, com funcionalidades específicas e potenciais interações sinérgicas. Essas novas fontes podem proporcionar benefícios tanto para a saúde do consumidor quanto para o desenvolvimento tecnológico do setor alimentício. A biodiversidade brasileira apresenta grandes possibilidades para a exploração de novas mucilagens, como a mucilagem encontrada em *O. cochenillifera*, uma cactácea prevalente no Brasil e em diferentes regiões áridas do planeta, mas pouco explorada para consumo humano (Monteiro et al., 2023). Apesar de seu potencial significativo, a mucilagem de O. *cochenillifera* permanece pouco explorada devido a estudos científicos limitados, desafios na extração e padronização, baixa conscientização comercial e competição com hidrocoloides estabelecidos.

O. cochenillifera é um cacto endêmico da família Cactaceae, cujos cladódios e frutos são consumidos como parte da dieta em países como o México. No Brasil, no entanto, é usado principalmente como forragem animal. Além de seu papel como fonte de alimento, estudos sugerem que espécies de *Opuntia* possuem potencial terapêutico para várias doenças, incluindo distúrbios intestinais e diabetes (Malfa et al., 2021; Mellai et al., 2024; Remes-Troche et al., 2021; López-Romero et al., 2014; Magaña-Cerino et al., 2022). Além disso, pesquisas indicam

suas propriedades imunomoduladoras e efeitos hipoglicemiantes, destacando seu potencial para o desenvolvimento de produtos alimentícios funcionais (Cruz Filho et al., 2019; Godard et al., 2010).

Para uso industrial, essas novas mucilagens passam por processos de extração e estabilização de mucilagem que incluem precipitação e secagem. Durante a precipitação, por exemplo, as mucilagens podem se agregar ou formar complexos com outras substâncias, levando a mudanças em sua integridade estrutural que podem dificultar a capacidade da mucilagem de se reidratar efetivamente. Da mesma forma, isso também ocorre durante o processo de secagem, o que pode afetar a funcionalidade geral da mucilagem (Brütsch et al., 2019). Nesse contexto, estudos recentes mostraram que polissacarídeos e proteínas modificados exibiram maior atividade biológica e melhores propriedades tecnofuncionais do que sua forma original (Huang et al., 2019; Qi et al., 2024; Stone et al., 2024). Como consequência dessas descobertas, vários métodos para modificar polissacarídeos e proteínas foram testados para melhorar sua bioatividade e propriedades tecnológicas desses materiais.

Os processos de transformação biológica, particularmente a fermentação, têm atraído considerável interesse devido à sua especificidade, alta eficiência e baixa incidência de efeitos adversos (Qi et al., 2024). A fermentação é um processo de biotransformação no qual microrganismos convertem nutrientes (carboidratos, proteínas e lipídios) do substrato em novos produtos (enzimas e metabólitos) (Christensen et al., 2022).

O uso de *Lactobacillus* para fermentação pode afetar a estrutura e a função dos polissacarídeos e proteínas que compõem as mucilagens, devido às enzimas e ácidos orgânicos secretados por esses microrganismos. A maioria das espécies de *Lactobacillus* possui propriedades probióticas, que também melhoram a funcionalidade e o valor nutricional dos alimentos (Wang et al., 2024a). Durante a fermentação, os compostos secretados por *Lactobacillus* podem degradar polissacarídeos em oligossacarídeos ou monossacarídeos, bem como reduzir o peso molecular de moléculas grandes (Su et al., 2023; Wan et al., 2021; Wang et al., 2024a). Essas modificações contribuem para melhorar a solubilidade e estabilidade da mucilagem, abordando desafios associados à sua extração e aplicação em formulações alimentícias. Além disso, a fermentação pode aumentar a funcionalidade antidiabética e o potencial imunorregulador, oferecendo benefícios potenciais para o gerenciamento de doenças (Liang et al., 2024; Tian et al., 2019).

A modificação de proteínas por fermentação ainda é uma área de pesquisa pouco explorada. No entanto, estudos indicam que a fermentação de proteínas por cepas de *Lactobacillus* resulta em efeitos variáveis na qualidade funcional e nutricional dos produtos

proteicos (Gammoh et al., 2020; Stone et al., 2024). Estudos como o desenvolvido por Chi et al. (2024) mostraram que a fermentação pode alterar a estrutura proteica da mistura de glúten de milho e farelo de trigo, o que resultou em aumento da digestibilidade da proteína bruta. Portanto, a fermentação com cepas de *Lactobacillus* melhora as propriedades nutricionais e funcionais da mucilagem, tornando-a valiosa para aplicações alimentícias, farmacêuticas e biomédicas.

A composição do substrato afeta muito o crescimento e o metabolismo dos microrganismos (Stone et al., 2024). *L. gasseri* foi escolhido devido à sua capacidade de produzir enzimas e ácidos orgânicos que modificam polissacarídeos, melhorando suas propriedades funcionais e influenciando as características estruturais da mucilagem (Wang et al., 2024b). Portanto, neste estudo, *L. gasseri* foi selecionado para fermentar a mucilagem extraída de cladódios de *O. cochenillifera*. A fermentabilidade da cepa foi avaliada, juntamente com os efeitos da fermentação nas propriedades químicas, morfológicas e tecnológicas da mucilagem. Isso pode contribuir para o desenvolvimento de sistemas alimentares mais saudáveis e sustentáveis, em oposição aos processos de modificação química e física que têm um maior impacto ambiental. Esse benefício vem da redução do uso da terra, redução das emissões de gases de efeito estufa e redução do consumo de água associado à fermentação (Siddiqui et al., 2023). Além disso, esse processo é geralmente mais econômico do que os métodos de síntese química e pode melhorar o valor nutricional dos alimentos, promovendo a adição de microrganismos benéficos e a conversão de moléculas complexas em formas mais biodisponíveis (Sharma et al., 2020).

2. MATERIAIS E METODOS

2.1. Materiais

Os cladódios de *O. cochenillifera*, com aproximadamente 15 dias de idade, foram coletados na área experimental do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), localizado em Campina Grande, PB, Brasil. A cepa *Lactobacillus gasseri* (ATCC 33323) foi obtida da Tropical Culture Collection – Fundação André Tosello e foi utilizada para fermentação. O pré-cultivo de L. gasseri em meio MRS (KASVI, Brasil) foi realizado em incubadora bacteriológica SL-101 (SOLAB, Brasil) a 37 °C por 24 h.

2.2. Extração da mucilagem

A mucilagem foi extraída de cladódios higienizados, com espinhos e gloquídeos previamente removidos. O processo de remoção ocorreu de acordo com o protocolo descrito

em nosso estudo anterior (Monteiro et al., 2025). Os cladódios foram cortados em pequenos cubos (aproximadamente 1 cm^3) denominados material vegetal, que foram imersos em água destilada na proporção de 1:3 (material vegetal/água) e colocados sob agitação constante (185 rpm) em mesa vibratória orbital SL 180 (SOLAB, Brasil) por 15 h à temperatura ambiente (26 ± 2 °C). A proporção de material vegetal para água e o tempo de agitação foram selecionados com base em testes preliminares (dados não publicados) que demonstraram maior rendimento de mucilagem. A mistura obtida foi filtrada para extrair a quantidade máxima de mucilagem. A precipitação da mucilagem ocorreu utilizando etanol 95% três vezes o volume de mucilagem extraída. O precipitado foi seco a 50 °C por 24 h.

1.3. Fermentação da mucilagem

A modificação das propriedades da mucilagem de *O. cochenillifera* foi realizada por fermentação mediada pela ação de *L. gasseri*. Para o processo de fermentação, o pó de mucilagem foi reidratado em água destilada estéril na concentração de 2%. A concentração de mucilagem para fermentação foi definida com base no estudo de viscosidade anterior (dados não mostrados), onde a 2%, a viscosidade foi de 10,42 Pascal-segundo (Pa.s) a 25 °C, medida usando um reômetro (HAAKE RheoWin 4.50.0017, Thermo Fisher Scientific, Alemanha). A cultura de *L. gasseri* foi reativada em caldo MRS suplementado com 0,05% de L-cisteína por 24 h. O *L. gasseri* reativado foi inoculado na solução mucilaginosa na concentração de 6,0 ± 0.6 UFC/mL e incubado a 37 °C por 24 h. Amostras foram coletadas antes e depois de 24 horas de fermentação, sem monitoramento cinético durante todo o processo. O pH foi medido no início e no final da fermentação. Após o período de incubação, a mucilagem fermentada foi tratada termicamente (80 °C por 15 min) para inativar células viáveis de *L. gasseri*, e então a mucilagem fermentada foi precipitada usando etanol 95% três vezes o volume de mucilagem. O precipitado foi seco a 50 °C por 24 h. A viabilidade celular foi determinada no momento da inoculação de *L. gasseri* na solução mucilaginosa, após 24 h de fermentação e após tratamento térmico seguido de precipitação e secagem da mucilagem fermentada. O método usado para determinar a viabilidade celular foi o plaqueamento em profundidade. Para o plaqueamento em profundidade, 1 mL da amostra fermentada foi seriamente diluído e adicionado a um meio MRS sólido.

2.3. Características físico-químicas da mucilagem em pó

2.3.1. Composição química

Para quantificar a composição de monossacarídeos e ácidos carboxílicos, as amostras de mucilagem foram hidrolisadas seguindo o método descrito por Dick et al. (2019) com modificações. As modificações incluíram o uso de carbonato de sódio em vez de carbonato de cálcio para neutralização e uma força de centrifugação ajustada. Para hidrólise ácida da amostra, 30 mg de mucilagem seca foram dissolvidos em 2 mL de ácido sulfúrico e deixados reagir por 2 h em banho fervente. A suspensão hidrolisada resfriada à temperatura ambiente foi neutralizada usando carbonato de sódio até a efervescência cessar e então centrifugada (800×g, 10 min). O sobrenadante foi recuperado, filtrado através de uma membrana de 0,22 µm e usado para quantificação de carboidratos totais. As amostras de MOC e MOCF hidrolisadas foram avaliadas quanto à concentração de glicose e xilose por um método enzimático colorimétrico (K-xilose, Megazyme; Glucose Monoreagent, Bioclin).

Para caracterizar açúcares (celobiose, galactose, arabinose e xilose) e ácidos glucurônico, as amostras hidrolisadas foram analisadas por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). As condições para separação cromatográfica foram as seguintes: um cromatógrafo Shimadzu equipado com um detector de índice de refração, coluna Shim-Pack SCR-101H (300×7,8 mm, Shimadzu, Japão), ácido sulfúrico 5,0 mM como fase móvel, uma vazão de 0,6 mL/min, uma temperatura do forno de 50 °C e 20,0 µL de amostra (Bezerra et al., 2021).

Para determinar a galactose, foi necessário combinar ambos os métodos (enzimático colorimétrico e cromatográfico) considerando que os cromatogramas apresentaram picos de galactose e xilose sobrepostos. Portanto, o teor de xilose pelo método enzimático foi utilizado para obter um teor de galactose corrigido. A área do cromatograma correspondente à sobreposição de xilose e galactose foi subtraída do teor de xilose obtido pelo método enzimático. O teor de proteína total foi determinado pelo método de Lowry (Lowry, 1951), cinzas (método 940.26) e pH (AOAC, 2016).

2.3.2. Conteúdo de água e cor

O teor de água foi determinado pelo método 934.06 (AOAC, 2016). Para avaliar os atributos de cor, os pós foram despejados em um fundo branco, e a medição das coordenadas CIELAB (a*, b* e L*) foi realizada usando um colorímetro (Konica Minolta Chroma Meter CR-400, Osaka, Japão).

2.4. Morfologia por microscopia eletronica de varredura (MEV)

A morfologia dos pós de mucilagem foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando um microscópio VEGA (TESCAN, República Tcheca). As amostras foram fixadas em adesivo condutor de dupla face e as micrografias foram capturadas com o microscópio operando a 15 kV. As observações foram realizadas em ampliações de 250× e 2000×.

2.5. Análise térmica

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada usando um instrumento Pyris 1 TGA Thermogravimetric Analyzer (PerkinElmer, Inc., Waltham, MA EUA). Para análise, as amostras foram colocadas em panelas de alumínio abertas sob uma atmosfera de nitrogênio com uma vazão de 20 mL/min e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em uma faixa de temperatura de 25 °C a 900 °C.

2.6. Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Amostras de mucilagem foram submetidas a DSC usando um dispositivo Pyris DSC (PerkinElmer, Inc., Waltham, MA EUA) equipado com uma unidade de sistema de resfriamento de nitrogênio líquido. As amostras (entre 12–17 mg) foram colocadas em uma panela de alumínio e hermeticamente seladas. A varredura térmica das amostras seladas foi realizada sob um fluxo de nitrogênio de 25 mL/min em temperaturas variando de 20 °C a 370 °C a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.7. Análise de difração de raios X

A difração de raios X (DRX) foi usada para verificar a cristalinidade das amostras. O teste foi realizado usando um difratômetro de raios X DRX_7000 (Shimadzu, Kyoto, Japão) com radiação Cu Kα (1,54), 40 kV e corrente de 30 mA na faixa de 10-70° e resolução de 2°/min. Os resultados foram processados com o software Origin (disponível como freeware em: http://www.OriginLab.com).

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

Os pós de mucilagem de controle (MOC) e mucilagem modificada por fermentação (MOCF) foram submetidos à espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) usando um Perkin Elmer’s Spectrum 400 (Waltham, MA, EUA). O método de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier foi usado para detectar as bandas

típicas e estruturas químicas existentes nas amostras. A faixa de comprimento de onda analisada cobriu 4000 a 400 cm^{-1}, com uma resolução de 16 cm^{-1}.

2.9. Análise de textura

O teste de análise de perfil de textura MOC e MOCF foi conduzido usando um analisador de textura TA-XT2 (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Foi utilizada uma sonda cilíndrica (A/BE-d35) com diâmetro de 35 mm. Durante o procedimento, a velocidade da sonda nas etapas de carga e descarga foi constante e igual a 1 mm/s.

As amostras foram preparadas em um cilindro, enchendo-o até uma altura de 30 mm, e posteriormente foram prensadas até uma profundidade de 15 mm. O gráfico gerado de força versus distância foi usado para obter a força máxima, que está relacionada à firmeza da amostra, a área sob a curva, que está relacionada à consistência da amostra, e a coesividade (Ribes; Grau; Talens, 2022).

2.10. Propriedades funcionais

2.10.1. Solubilidade

A solubilidade das mucilagens foi determinada em diferentes temperaturas (25, 40, 55 e 70 °C), seguindo um método modificado de Dick et al. (2019). Para análise, dispersões de mucilagem foram preparadas com 0,3 g de pó de mucilagem em 60 mL de água (0,5%). Essas dispersões foram hidratadas por 2 h em temperatura ambiente (25 °C). Após o período de hidratação, 10 mL foram coletados em tubos de centrífuga e aquecidos a 40, 55 e 70 °C por 30 min sob agitação. Cada solução foi centrifugada a 2000×g por 15 min. O sobrenadante foi seco em estufa a 80 °C por 24 h. A porcentagem de solubilidade foi calculada usando a Equação 1:

$$\text{Solubilidade}(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

onde W_2 é o peso seco da alíquota e W_1 é o peso da amostra.

2.10.2. Propriedades de espuma

Avaliamos a capacidade de formação de espuma (FE) e a estabilidade da espuma (EE) de pós de mucilagem usando o método descrito por Dick et al. (2019), com adaptações. Primeiramente, dispersões de mucilagem foram preparadas em água destilada (100 mL) na concentração de 0,2% (p/v) e deixadas refrigeradas (4 °C) durante a noite para hidratação

completa. A albumina sérica bovina na concentração de 0,2% (p/v) foi usada como referência. Em seguida, as soluções foram batidas a uma velocidade de 13.000 rpm por 10 min. A suspensão batida foi rapidamente transferida para um cilindro graduado e o volume de espuma foi registrado após 30 segundos. A capacidade de formação de espuma (FE) foi calculada de acordo com a Equação 2:

$$FE(\%) = \frac{FV_1}{SV_T} \times 100 \quad (2)$$

onde FV_1 é o volume inicial da espuma e SV_T é o volume total da suspensão.

A estabilidade da espuma (EE) foi calculada como as mudanças de volume da espuma registradas em intervalos de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 min.

2.10.3. Propriedade emulsificante

A capacidade emulsificante (CE) e a estabilidade da emulsão (SE) foram avaliadas para pós de mucilagem controle e fermentados com base em um método modificado de Dick et al. (2019). A mucilagem (0,2% p/v) foi dissolvida em água destilada com agitação contínua por 2 h; então foi deixada durante a noite a 4 °C para garantir a hidratação completa. Emulsões de óleo em água sob diferentes proporções (50:50 e 10:90 v/v) de óleo para mucilagem foram preparadas adicionando lentamente o óleo à solução de mucilagem usando um homogeneizador de alta velocidade a 13.000 rpm por 2 min. As emulsões foram centrifugadas a 2000×g por 5 min. O volume restante da emulsão foi medido e a CE foi quantificada usando a Equação 3:

$$CE(\%) = \frac{EV_1}{V_T} \times 100 \quad (3)$$

onde EV_1 é o volume da emulsão e V_T é o volume total do fluido.

Para avaliar a estabilidade da emulsão (SE), amostras previamente preparadas para CE foram aquecidas em banho-maria a 80 °C por 30 min. Posteriormente, as emulsões foram resfriadas à temperatura ambiente (25 °C) e então centrifugadas a 2000 × g por 5 min. A estabilidade da emulsão foi determinada usando a Equação 4:

$$SE(\%) = \frac{EV_2}{EV_1} \times 100 \quad (4)$$

onde EV_2 é o volume da emulsão após aquecimento e EV_1 é o volume da emulsão obtida para CE.

2.11. Análise estatística

O software Statistica (Statistica versão 7.0, Statsoft, Inc., Tursa, EUA) foi utilizado para verificar diferenças significativas entre as amostras, calculadas pelo teste ANOVA unidirecional com comparação de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Viabilidade celular

As alterações nas contagens bacterianas durante a fermentação da mucilagem são mostradas na Figura 1. No grupo controle (MOC), nenhuma bactéria foi observada, indicando que o grupo não foi contaminado e não passou pelo processo de fermentação. Na mucilagem que passou pelo processo de fermentação, observou-se que a contagem bacteriana aumentou de 5,5 para 8,2 Log UFC/mL após 24 h de fermentação. Este resultado sugeriu que *L. gasseri* cresceu bem na mucilagem de *O. cochenillifera*. O crescimento pronunciado de *L. gasseri* durante o período de fermentação indica o uso de nutrientes pelo microrganismo para a produção principalmente de ácidos orgânicos, como evidenciado pela redução do pH de 5,51 (MOC) para 4,72 (MOCF) (Yu et al., 2024). A presença de enzimas de ácidos orgânicos e outros metabólitos produzidos durante a fermentação contribui para a modificação da mucilagem de *O. cochenillifera*. Após a fermentação e o tratamento térmico, foi detectada uma concentração microbiana residual de 3,3 log UFC/mL. Embora o *L. gasseri* ATCC 33323 seja classificado como um microrganismo GRAS (Generally Recognized as Safe), o processo térmico aplicado reduziu efetivamente sua população, evitando a proliferação excessiva durante o armazenamento e mantendo a estabilidade do produto para aplicações futuras. Além disso, apesar da segurança reconhecida dos probióticos, há preocupações quanto à potencial transferência horizontal de genes de resistência a antibióticos para bactérias patogênicas. Estudos relataram tais ocorrências em *Lactobacillus* spp., particularmente em indivíduos submetidos a tratamento com antibióticos, com casos documentados de bacteremia, infecções localizadas e endocardite (Yolmeh et al., 2024). Dadas essas considerações, a implementação de estratégias de controle microbiano adequadas, como tratamento térmico, é crucial na indústria alimentícia para garantir a segurança microbiológica e a funcionalidade do produto

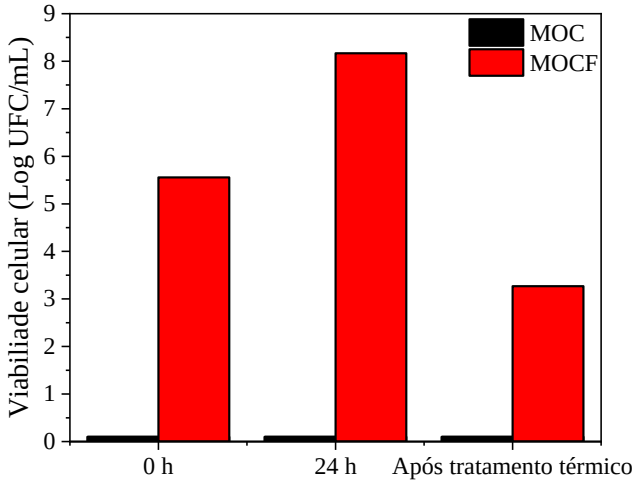

Figura 1. Viability of *L. gasseri* in the mucilage of *O. cochenillifera* at three distinct time points: (i) initial (0 h), (ii) following 24 h of fermentation, and (iii) after heat treatment at 80 °C for 15 minutes. **Fonte:** Autoria própria.

3.2. Parâmetros físico-químicos

A composição química da mucilagem controle (MOC) e fermentada (MOCF) de *O. cochenillifera* é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química e bioquímica da mucilagem controlada (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF).

Parâmetros	**MOC**	**MOCF**
Parâmetros físico-químicos		
Conteúdo de água (%)	8,82 ± 0,23^{b}	13,00 ± 1,20^{a}
Cinzas (%)	4,15 ± 0,06^{a}	2,61 ± 1,36^{a}
Proteinas (g BSA/100 g)	3,44 ± 0,01^{b}	3,55 ± 0,01^{a}
pH (2% solution)	5,51 ± 0,01^{a}	4,72 ± 0,01^{b}
Componente a*	-2,0 ± 0,1^{b}	-1,4 ± 0,1^{a}
Componente b*	10,0 ± 0,1^{a}	3,8 ± 0,01^{b}
Luminosidade L*	98,4 ± 0,01^{b}	99,8 ± 0,01^{a}
Monossacarídeos e ácidos carboxílicos		
Celobiose (g/100 g)	5,53 ± 0,85^{a}	3,73 ± 0,07^{b}
Ácido glucurônico (g/100 g)	1,93 ± 0,38^{a}	1,48 ± 0,43^{a}
Ácido acético	4,17 ± 0,05^{a}	2,79 ± 0,62^{b}
Galactose (g/100 g)	24,40 ± 0,15^{a}	19,05 ± 0,03^{b}
Arabinose (g/100 g)	16,03 ± 2,31^{a}	12,74 ± 0,58^{b}
Glicose (g/100 g)	2,60 ± 0,03^{a}	2,58 ± 0,01^{a}
D-xylose (g/100 g)	8,50 ± 0,15^{a}	6,85 ± 0,02^{a}

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autoria própria.

Quando a mucilagem passou pelo processo de fermentação com *L. gasseri*, observou-se que a mucilagem fermentada apresentou maior teor de água (13,0% $p < 0,05$). A maior retenção de água na amostra modificada pela fermentação pode ser resultado das mudanças estruturais, químicas e físicas que ocorrem durante a fermentação, assim como a presença de biomassa bacteriana na matriz da mucilagem após a fermentação pode ter contribuído para aumentar a capacidade da mucilagem de absorver e reter água em comparação com sua forma não modificada.

Foi observada uma redução não significativa ($p > 0,05$) no teor de cinzas do MOCF. Essa redução observada pode estar relacionada aos ácidos orgânicos produzidos durante a fermentação, que atuam diretamente no aumento da acidez do meio, como demonstrado pela mudança do pH de 5,51 no MOC para 4,72 no MOCF, e podem promover a solubilização de minerais presentes na mucilagem (Lodi et al., 2022). Esses minerais solubilizados podem ser perdidos em etapas subsequentes do processo, como a precipitação da mucilagem, mostrando que a mucilagem fermentada possui maior pureza.

Um aumento significativo no conteúdo de proteína foi observado entre as mucilagens ($p < 0,05$). O aumento do conteúdo de proteína observado em MOCF em comparação com MOC pode ser atribuído à presença de proteínas derivadas de células de *L. gasseri*. Membros do gênero *Lactobacillus* são conhecidos por produzir proteínas da camada superficial (SLPs) com massas moleculares variando de 25 a 71 kDa, correspondendo a aproximadamente 10-15% do total de proteínas celulares (Meng; Zhang; Lu, 2018). Além disso, *L. gasseri* possui genes que codificam proteínas promotoras de agregação (APF), especificamente apf1 e apf2. Esses genes, organizados na mesma orientação, codificam proteínas com 257 a 326 aminoácidos, o que pode contribuir para a sutil diferença observada no conteúdo de proteína, atuando na adesão e agregação celular. Valores muito próximos aos encontrados neste estudo foram relatados por Dick et al. (2019) para a mucilagem extraída de cladódios de *Opuntia monacantha* (3,55 g/100g).

Além disso, a fermentação pode aumentar significativamente o teor de proteína solúvel em água (WSP), como demonstrado na fermentação do farelo de soja, onde a presença de *Bacillus amyloliquefaciens* ZBZB aumentou a concentração de WSP em até 473,7% após 96 horas (Wang et al., 2021). Esse aumento no teor de proteína pode proporcionar benefícios nutricionais, melhorando a digestibilidade do produto fermentado. Além disso, altos níveis de proteína podem melhorar a capacidade de retenção de água da mucilagem, promovendo maior hidratação. Esse efeito é particularmente relevante em aplicações alimentícias que exigem

maior retenção de umidade, influenciando diretamente na textura e estabilidade do produto final (Orifici et al., 2018).

Nos componentes de cor, os dados apresentados na Tabela 1 mostram variações nos componentes a*, b* e luminosidade L* entre MOC e MOCF. O valor a* em MOC (-2,0) indica uma leve tendência à cor verde. Essa tendência à cor verde observada no MOC controle pode ser residual da clorofila presente em grandes quantidades nos cladódios de *O. cochenillifera*. No entanto, em MOCF, o valor a* é -1,4, o que sugere uma leve mudança para uma cor menos esverdeada após a fermentação. As alterações químicas que ocorrem durante a fermentação podem afetar os pigmentos presentes na mucilagem. Li; Wei; Xue (2021) explicam que as clorofilas são afetadas por ácidos e enzimas durante a fermentação, tornando-se suscetíveis à desmetalização e alomerização, o que resulta na formação de feofitinas. Além disso, mudanças de cor após a fermentação foram observadas no componente b*. O valor de b* diminuiu de 10 (MOC) para 3,8 (MOCF), indicando uma redução significativa na intensidade da cor amarela após a fermentação. Essas mudanças provavelmente ocorrem devido a variações no pH durante a fermentação que podem ter induzido a formação de novos compostos derivados da clorofila e carotenoides, contendo grupos 5,8-epóxido, ou causado a oxidação química de compostos fenólicos, resultando na produção de pigmentos marrons, como o-quinonas (Degrain et al., 2020).

Um aumento em L* de 98,4 (MOC) para 99,8 (MOCF) também foi observado. O ligeiro aumento no valor de L* após a fermentação sugere que o processo aumentou a clareza ou brilho do material, possivelmente devido à remoção de partículas ou compostos que poderiam estar obscurecendo a luz. Portanto, a fermentação em nossos resultados sugere um impacto significativo nas características de cor e luminosidade da mucilagem, tornando-a menos esverdeada, menos amarela e ligeiramente mais clara.

3.3. Composição de monossacarídeos e ácidos carboxílicos

A análise de monossacarídeos mostrou que a mucilagem extraída dos cladódios de *O. cochenillifera* é um heteropolissacarídeo composto principalmente de galactose, glicose e arabinose, seguido de xilose e uma proporção menor de ácido glucurônico (Tabela 1). A presença de arabinose e galactose foi relatada anteriormente na mucilagem de *Opuntia fícus-indica* e *Opuntia quimilo* (García et al., 2024). Na mucilagem de *O. monacantha*, Dick et al. (2019) relataram a galactose como o principal monossacarídeo presente na mucilagem. Este resultado foi semelhante aos nossos resultados, que mostram a galactose como o principal componente presente na mucilagem de *O. cochenillifera*. Esses resultados mostram que

arabinogalactanas, assim como arabinoxilanas, podem ser os principais polissacarídeos em várias espécies de cactos, especialmente no gênero *Opuntia*.

Em relação ao efeito da fermentação, observamos uma diferença estatisticamente significativa ($p<0,05$) entre o conteúdo de celobiose, galactose, glicose e ácido acético após a fermentação. O conteúdo de galactose apresentou uma redução de mais de 20% (de 24,40 g/100 g para 19,05 g/100 g), mostrando que *L. gasseri* utilizou preferencialmente a galactose como fonte primária de carbono. Segundo Francl; Thongaram; Miller (2010), *L. gasseri* ATCC 33323 é capaz de metabolizar 17 carboidratos, incluindo D-galactose, D-frutose, D-manose e outros açúcares estruturais. Em muitos lactobacilos, os transportadores de carboidratos dominantes são os sistemas de fosfatase (PTS), que facilitam a internalização e a modificação inicial dos açúcares (Francl; Thongaram; Miller, 2010).

A galactose é metabolizada principalmente pela via de Leloir, que foi amplamente documentada em bactérias do ácido láctico, incluindo *L. gasseri*. Esta via envolve enzimas-chave, incluindo galactoquinase, galactose-1-fosfato uridililtransferase e UDP-galactose 4-epimerase, que são responsáveis pela conversão de galactose em glicose-1-fosfato, permitindo sua entrada na glicólise (Iskandar et al., 2019). Além disso, *L. gasseri* utiliza a via Tagatose-6P, que converte galactose-6-fosfato em intermediários metabólicos que também alimentam a glicólise (Ruiz-Ramírez; Jiménez-Flores, 2023). A presença dessas vias metabólicas complementares confere flexibilidade e eficiência ao metabolismo da galactose por *L. gasseri*. No entanto, nem todas as bactérias do ácido láctico são capazes de metabolizar galactose. Por exemplo, as cepas de *Lactobacillus delbrueckii* ATCC 11482 e BAA-365 carregam genes putativos galP e lacLM e metabolizam principalmente glicose enquanto liberam galactose no meio extracelular (Iskandar et al., 2019). Portanto, a seleção de *L. gasseri* foi apropriada, pois a mucilagem forneceu galactose para fermentação, e *L. gasseri* possui as vias metabólicas necessárias para utilizá-la eficientemente. Além disso, estudos anteriores, como o de Kim et al. (2019), demonstraram que produtos fermentados obtidos a partir de galactose utilizando *L. gasseri* apresentam propriedades funcionais, como efeitos anti-inflamatórios em células RAW 264.7 estimuladas por lipopolissacarídeos, corroborando os achados do presente estudo e destacando o potencial funcional da fermentação da mucilagem de *O. cochenillifera*.

Além da galactose, também foi observada redução nos níveis de arabinose e glicose após a fermentação. Embora a galactose seja o substrato preferencial, *L. gasseri* metaboliza arabinose e glicose em proporções menores. A hidrólise de polissacarídeos como arabinogalactanas, catalisada por enzimas extracelulares, libera esses açúcares, que podem ser utilizados no processo de fermentação (Francl; Thongaram; Miller, 2010). Essa atividade

enzimática não apenas aumenta a disponibilidade de açúcares fermentáveis, mas também modifica a composição química da mucilagem, aumentando potencialmente suas propriedades bioativas e tornando-a um ingrediente promissor para a obtenção de produtos funcionais.

O ácido acético foi um componente encontrado na mucilagem extraída dos cladódios de *O. cochenillifera*. No entanto, não foram encontrados relatos na literatura mencionando a presença de ácido acético em mucilagens extraídas de outras espécies do gênero *Opuntia*. É possível que, durante o processo de extração da mucilagem dos cladódios de *O. cochenillifera*, tenha ocorrido uma fermentação espontânea mediada pela microbiota natural da planta, resultando na produção de ácido acético. A presença deste composto pode ser responsável pelo pH levemente ácido observado na mucilagem obtida (MOC). Após a fermentação, o pH da mucilagem diminuiu de 5,51 para 4,72. Em contraste, o teor de ácido acético diminuiu após a fermentação. A produção de ácido láctico durante a fermentação resultou na diminuição do pH observado no MOCF. Níveis mais baixos de pH podem afetar o equilíbrio de dissociação do ácido acético, potencialmente levando a um aumento na proporção de ácido acético não dissociado (Van Ginkel; Logan, 2005). Essa mudança pode alterar a solubilidade e a disponibilidade do ácido na mucilagem fermentada.

3.4. Microscopia eletronica de varredura (MEV)

As micrografias obtidas por MEV (Figura 2) mostram a morfologia da superfície das mucilagens controle (MOC) e fermentada (MOCF) com *L. gasseri*, analisadas em ampliações de 250× e 2000×. A MOC (Figura 2A e 2B) apresentou superfície irregular, com geometria multifacetada e maior homogeneidade no tamanho das partículas (diâmetro das partículas 57,77 ± 21,96 µm). Além disso, a superfície rugosa sugere a presença de uma estrutura mais porosa, o que pode estar relacionado à organização dos polímeros naturais presentes na mucilagem antes da fermentação. Essas observações são apoiadas por estudos anteriores de Otálora et al. (2021) que observaram as mesmas características para a mucilagem de cladódios de O. fícus-indica usando etanol como solvente para precipitação e por Kalegowda et al. (2017) que notaram agregados irregulares e ásperos na mucilagem de *Opuntia dilleniid*.

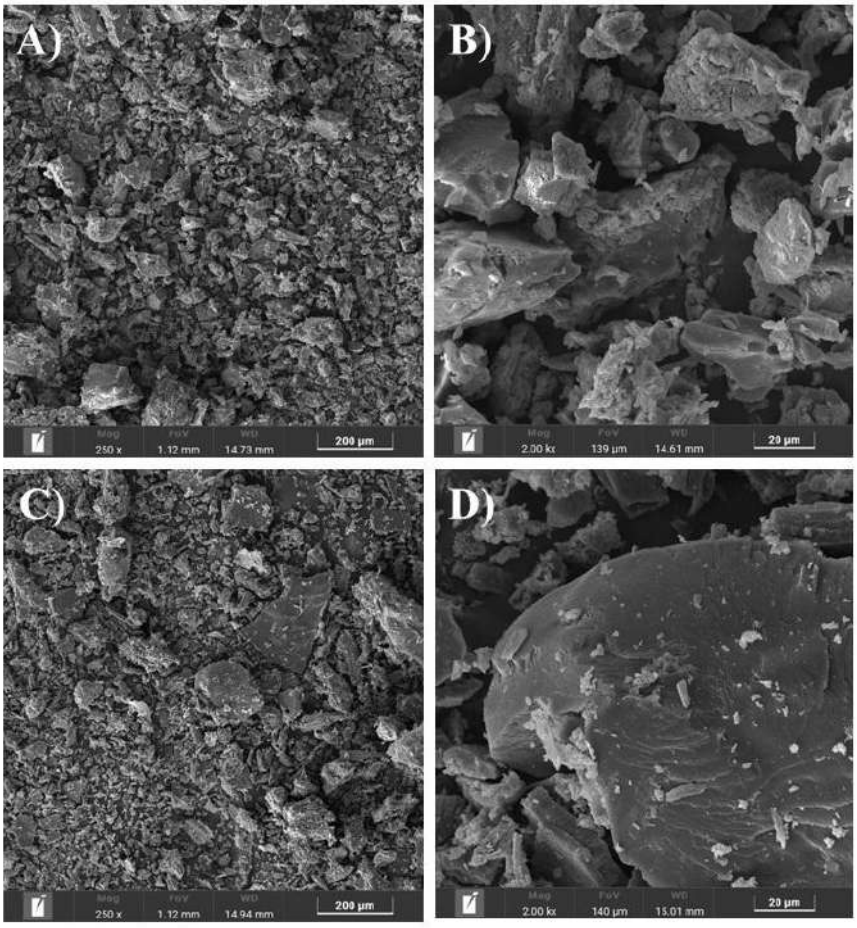

Figura 2. Microestruturas da mucilagem controle (MOC) (A, B) e mucilagem fermentada (MOCF) (C, D). **Fonte:** Autoria própria.

Por outro lado, o MOCF (Figura 2C e 2D) apresentou uma morfologia mais compacta e densa, com menor rugosidade superficial e maior heterogeneidade no tamanho das partículas (diâmetro das partículas 48,36 ± 48,57 µm). Essas alterações estruturais podem ser explicadas, primeiramente, pelas características da mucilagem, incluindo sua composição química, o método de extração e a técnica de secagem empregada, uma vez que esses fatores influenciam diretamente na aglomeração e no formato das partículas (Madera-Santana et al., 2018). Além disso, a fermentação com *L. gasseri* também desempenhou um papel fundamental nessas modificações. Durante esse processo, a atividade metabólica da bactéria pode ter promovido a degradação parcial dos polissacarídeos da mucilagem, levando a alterações na organização estrutural do material. Além disso, a provável produção de exopolissacarídeos por *L. gasseri* pode ter favorecido a formação de uma matriz mais densa, redução da porosidade e aumento da agregação de partículas no MOCF (Wang et al., 2024a).

3.5. Analise de difração raio-X

A análise de difração de raios X (DRX) é usada para determinar se uma amostra tem uma estrutura cristalina ou amorfa. Normalmente, substâncias cristalinas exibem picos distintos no difratograma de raios X, enquanto substâncias amorfas exibem picos mais amplos e um padrão amplo (Shahmoradi; Alizadeh Khaledabad; Amiri, 2023). A Figura 3 mostra os espectros de DRX das mucilagens. Pode-se observar que as amostras de mucilagem apresentaram um pico amplo em aproximadamente 2θ ≈ 20°, o que confirma que ambas as amostras têm uma natureza relativamente amorfa. Um resultado semelhante foi observado para filmes baseados em carboximetilcelulose (Yousefi et al., 2024).

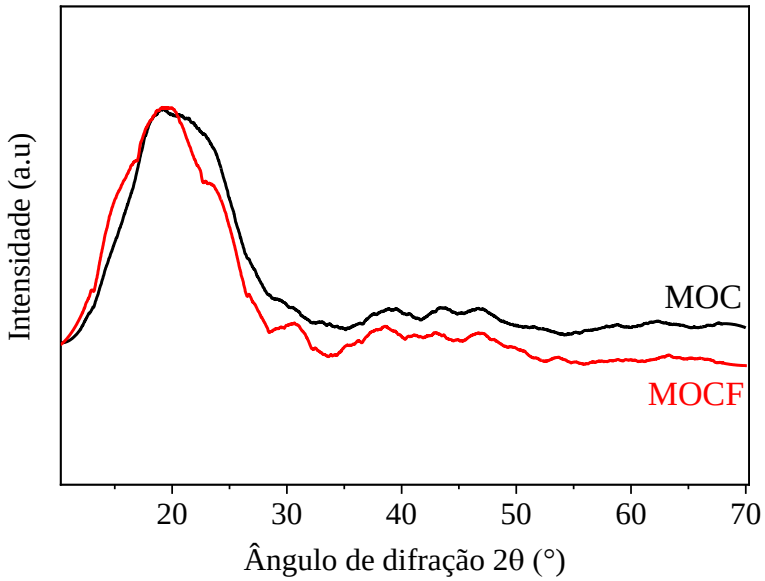

Figura 3. Difratograma de raios X da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF). **Fonte:** Autoria própria.

Estudos com mucilagem de agrião, examinando espectros de DRX observaram um pico de difração em torno de 20-22°, o que confirma a estrutura amorfa das amostras (Pirsa; Mahmudi; Ehsani, 2023; Razavi et al., 2024). Ao comparar os espectros de DRX de MOC e MOCF, uma mudança no pico característico de materiais amorfos é notada, com um pico mais amplo sendo observado para MOCF. Picos mais estreitos refletem a natureza mais cristalina da amostra, enquanto picos mais amplos mostram uma estrutura mais amorfa (Shahmoradi; Alizadeh Khaledabad; Amiri, 2023). Portanto, pode-se sugerir que a fermentação da mucilagem com *L. gasseri* diminuiu ligeiramente a estrutura amorfa da mucilagem. Isso pode ocorrer devido à quebra de polissacarídeos complexos presentes na mucilagem, liberando açúcares simples no meio que podem ser consumidos por *L. gasseri* para crescimento e metabolismo. As

enzimas produzidas por *Lactobacillus* durante a fermentação podem atuar nas regiões amorfas da mucilagem, levando a alterações em suas propriedades físicas e químicas (Janiszewska-Turak et al., 2022; Vivek et al., 2023). Isso também pode explicar o pico observado em 30° no MOCF. A ação das enzimas pode degradar polissacarídeos amorfos, aumentando a proporção relativa de regiões cristalinas, o que neste processo poderia gerar novos arranjos moleculares responsáveis pelo pico em 30°.

3.6. Análise FTIR

A Figura 4 mostra os espectros de FTIR de MOC e MOCF. Os espectros obtidos apresentam bandas de absorção características de compostos orgânicos.

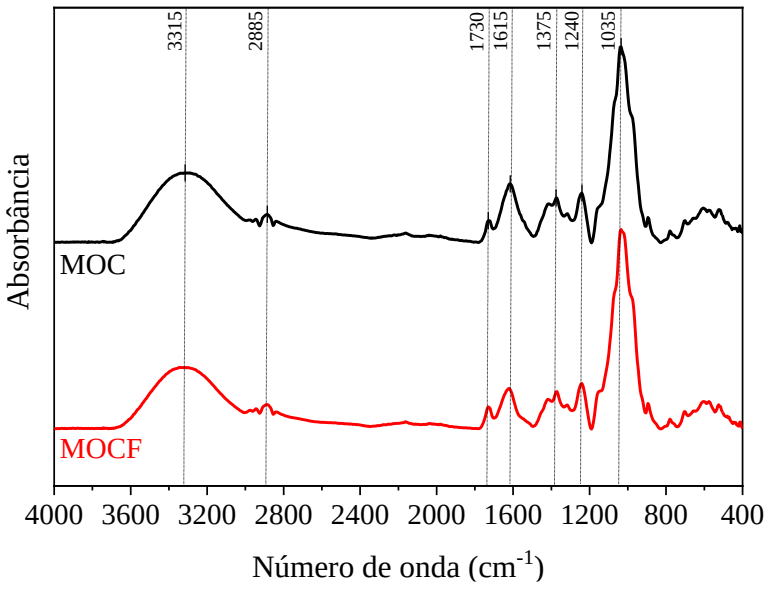

Figura 4. Espectros de FTIR do controle de mucilagem (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF). **Fonte**: Autoria própria.

Na Figura 4, os espectros da mucilagem apresentam uma banda entre 3000 e 3500 cm^{-1}, correspondente ao grupo funcional (O-H). Picos de vibração de estiramento da ligação C-H são observados entre 2800 e 3000 cm^{-1} (Bourkaib; Hadjsadok; Djedri, 2024). No espectro da mucilagem fermentada (MOCF), uma diminuição na intensidade da banda do grupo funcional O-H é observada em comparação à mucilagem de controle (MOC). Essa redução pode ser atribuída a modificações bioquímicas que ocorrem durante a fermentação, incluindo o consumo de grupos hidroxila em polissacarídeos e alterações estruturais induzidas pelo metabolismo bacteriano. Especificamente, *L. gasseri* e outros microrganismos fermentativos podem hidrolisar polissacarídeos, levando à clivagem de ligações glicosídicas e à conversão de

compostos contendo hidroxila em ácidos orgânicos, como o ácido láctico. A produção desses ácidos não apenas modifica a matriz do polissacarídeo, mas também promove interações de ligação de hidrogênio que podem alterar as vibrações de alongamento O-H, reduzindo assim sua intensidade espectral. Comportamento semelhante foi relatado para bandas espectrais da fermentação do café lavado (Sousa et al., 2023).

Os picos na região de 1730 cm^{-1} e 1615 cm^{-1} são atribuídos aos grupos amida I e II, respectivamente. A posição exata desses picos pode variar dependendo da estrutura química da proteína, bem como do ambiente químico das amostras. As mudanças conformacionais da proteína são evidentes nas mudanças na área e FWHM das bandas amida I e II em MOCF em comparação com MOC (Tabela 2). Durante a fermentação, as bactérias produzem metabólitos e enzimas que quebram as proteínas em peptídeos e aminoácidos menores, que podem modificar a estrutura da proteína e influenciar a intensidade desses grupos amida. Mudanças particularmente pronunciadas no grupo amida I podem ser atribuídas à formação de estruturas de folha β incorporadas em proteínas durante a fermentação (Akpabli-Tsigbe et al., 2023). Além disso, a síntese de aminoácidos e a atividade enzimática, incluindo proteases e amilases, durante a fermentação podem contribuir para modificações na composição da proteína. Isso, por sua vez, pode impactar a intensidade dos grupos amida I e II no produto final (Oliveira et al., 2022b).

Tabela 2. Diferenças estruturais na área de absorbância e FWHM das bandas de FTIR da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF).

Grupo funcional	**Área de Pico**		**FWHM**	
	MOC	**MOCF**	**MOC**	**MOCF**
O-H	113.7×10^{7}	113.8×10^{7}	128.9	126.0
Amida I	663.0×10^{6}	475.2×10^{6}	103.2	58.4
Amida II	397.4×10^{5}	392.7×10^{5}	41.2	44.5
C-O	181.5×10^{7}	144.7×10^{7}	440.7	411.1

Nota: FWHM (largura total na metade do máximo).

Fonte: Autora própria.

O pico em 1375 cm^{-1} está associado às vibrações dos grupos C–OH (Souza et al., 2023). Os picos em 1315 cm^{-1} e 1240 cm^{-1} estão associados às vibrações de deformação e alongamento de C–O (Bourkaib; Hadjsadok; Djedri, 2024). O pico em 1035 cm^{-1} pode ser atribuído às vibrações relacionadas às ligações C-O e C-O-C presentes na estrutura dos polissacarídeos presentes nas amostras (Sousa et al., 2023). A redução na intensidade do pico do grupo C-O em MOCF em comparação com MOC sugere a clivagem da ligação glicosídica durante o processo

de fermentação, o que pode resultar em uma diminuição nos grupos C-O e O-H (Sharma et al., 2025). Os picos na faixa de 670 e 460 cm^{-1} surgem das vibrações de flexão C-H (Surekha et al., 2020). As mudanças observadas nos picos também podem ser atribuídas às transformações bioquímicas que ocorrem devido à ação metabólica de *L. gasseri* na mucilagem (Oliveira et al., 2022a). Durante o processo de fermentação, mudanças no ambiente químico da amostra também podem ocorrer, como mudanças no pH, concentrações de íons e interações moleculares. Essas mudanças podem afetar a intensidade e a posição exata dos picos no espectro FTIR.

3.7. Análise térmica

As propriedades térmicas de MOC e MOCF durante o aquecimento de 25 a 900 °C são mostradas na Figura 5. As curvas TGA mostraram uma diferença entre as amostras de MOC e MOCF. Em MOC, três estágios diferentes foram observados, semelhantes ao relatado por Yu et al. (2024) para a curva TGA para polissacarídeos fermentados por *Lactiplantibacillus plantarum* FM 17. O estágio inicial ocorreu na faixa de temperatura de 36,86–248,74 °C, resultando em uma perda de peso de 9,47%, possivelmente devido à evaporação da água. O segundo estágio resultou em uma perda de peso de 53,85% na faixa de 248,74–384,77 °C. Esses resultados corroboram outros estudos, que indicaram que o principal estágio de decomposição das frações de polissacarídeos tende a ocorrer em temperaturas entre 210 e 320 °C (Mannai et al., 2024). No estágio final, observado no MOC, a taxa de perda de peso foi de 29,07%, atingindo o equilíbrio à medida que as estruturas estáveis anteriores racharam e carbonizaram, resultando em apenas 7,67% dos resíduos persistindo a 900 °C.

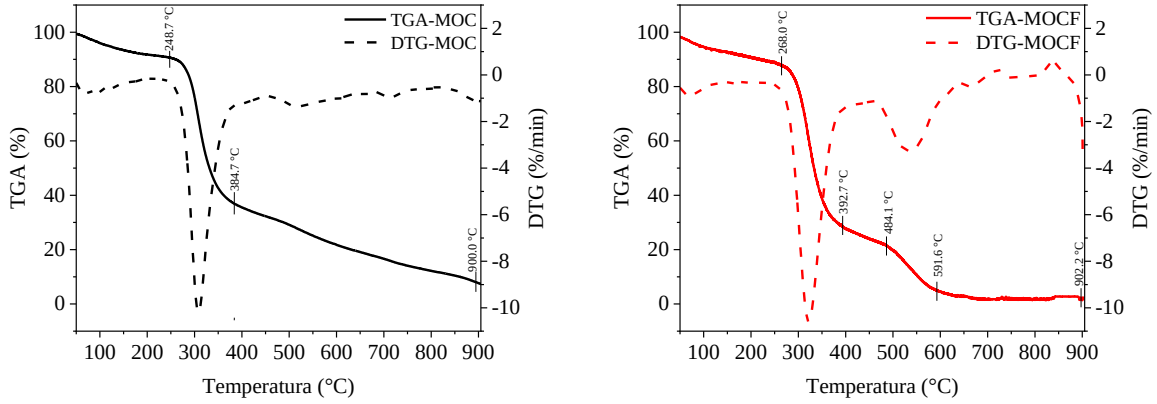

Figura 5. Curvas TGA e DTG da mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF). As linhas sólidas representam a análise TGA e as linhas pontilhadas representam as curvas DTG. **Fonte:** Autoria própria.

Para MOCF, cinco estágios distintos de degradação térmica foram observados, demonstrando variações nas características de estabilidade e decomposição em comparação ao MOC. O estágio inicial foi observado na faixa de temperatura de 41,88 – 268,03 °C, onde houve uma perda de peso de 12,55%, comumente atribuída à remoção de água livre e componentes voláteis. O segundo estágio resultou em uma perda de peso de 58,98% na faixa de temperatura de 268,03–392,72 °C, principalmente atribuída à degradação de componentes orgânicos, como polissacarídeos. O terceiro estágio foi observado na faixa de temperatura de 392,72–484,11 °C, resultando em uma perda de peso de 6,79%. Este estágio aponta diferenças estruturais entre as mucilagens e pode estar relacionado à despolimerização e volatilização da maioria das frações de polissacarídeos (Mannai et al., 2024). No quarto estágio, entre 484,11 – 591,61 °C, a perda de peso foi de 16,63%, associada à degradação de ramificações residuais, cadeias quebradas, estruturas cristalinas e impurezas inorgânicas, conforme observado em estudos anteriores (Mannai et al., 2023). Nessa faixa de temperatura, também foi observada leve estabilidade térmica, indicando a complexidade do processo de decomposição. No quinto estágio, foi observada redução da perda de peso até o equilíbrio, com peso residual de 2,12% a 900 °C. Esse valor é significativamente menor que o resíduo MOC restante (7,67%), o que sugere que o processo de fermentação mediado por *L. gasseri*, incluindo a ação de enzimas como a amilase, resultou em danos estruturais, incluindo a degradação de ligações glicosídicas e estruturas cristalinas (Wang et al., 2024a). Os resultados encontrados são consistentes com os resultados de DRX, reforçando a influência do tratamento fermentativo na estrutura e estabilidade térmica da mucilagem.

As curvas DTG (Figura 5) revelam que as taxas máximas de decomposição de mucilagens ocorreram a 308 °C para MOC (evento 2) e a 322 °C para MOCF (evento 2), indicando uma maior estabilidade térmica de MOCF em comparação com MOC. Esse comportamento é consistente com os resultados observados por Qin et al. (2021), que relataram maior estabilidade térmica dos polissacarídeos do chá Liupao após a fermentação. Além disso, em MOCF, um segundo evento térmico foi identificado a 534,47 °C.

O primeiro pico de decomposição pode estar relacionado principalmente à perda de água presente no material, enquanto o segundo pico é atribuído à decomposição de subprodutos gerados durante a fermentação, alterações estruturais na mucilagem e liberação de água fortemente ligada, conforme discutido por Degrain et al. (2020). No MOCF, o acúmulo de componentes estruturais modificados pode ser mais evidente, resultante da ação metabólica de *L. gasseri* durante a fermentação. Em contrapartida, o MOC apresenta uma decomposição mais

uniforme, com menor quantidade de resíduos sujeitos a processos de degradação em temperaturas mais elevadas. Essa diferença explica a presença de um segundo pico térmico no MOCF e sua ausência no MOC, reforçando o impacto do processo de fermentação na estabilidade e nas características térmicas da mucilagem.

3.8. Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A análise DSC é uma técnica termoanalítica empregada para examinar reações ou transições exotérmicas e endotérmicas dependentes da temperatura (Punia; Dhull, 2019). As mucilagens exibiram transições endotérmicas e exotérmicas (Figura 6), que podem estar associadas à decomposição de mucilagens e lixiviação de água devido ao calor (Punia; Dhull, 2019; Solanki et al., 2024).

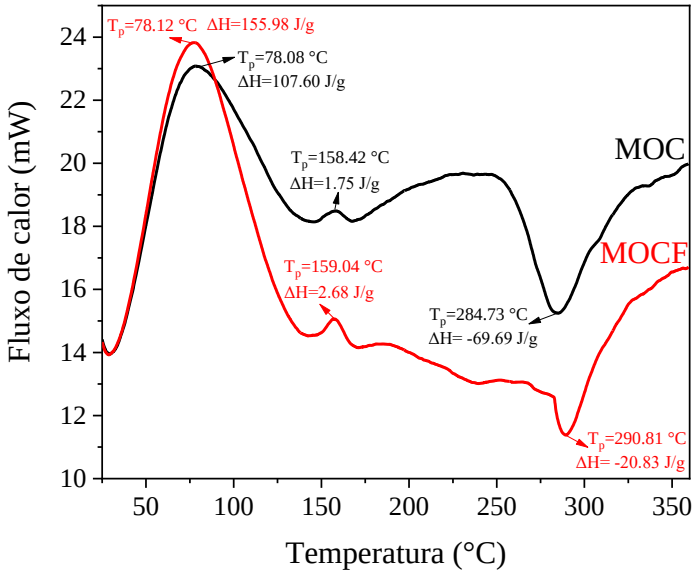

Figure 6. Curvas DSC para mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF). **Fonte:** Autoria própria.

Uma diferença no início das transições endotérmicas foi observada entre as mucilagens MOC e MOCF. Em MOC, a temperatura de início (T_0) do primeiro pico endotérmico foi registrada em 51,01 °C, com a temperatura de pico (T_p) em 78,08 °C e a temperatura final (T_e) em 127,43 °C, acompanhada por uma mudança de entalpia (ΔH) de 107,60 J/g. Em contraste, MOCF apresentou um primeiro pico endotérmico mais estreito, com T_0 em 41,71 °C, T_p em 78,12 °C, T_e em 124,91 °C e uma mudança de entalpia maior de 155,98 J/g.

A diminuição da temperatura de início do primeiro evento térmico no MOCF pode ser atribuída a reações enzimáticas que ocorrem durante a fermentação, produzindo e decompondo componentes na mucilagem, alterando a capacidade de resistência ao calor (Guo et al., 2019). Além disso, o pico mais amplo observado no MOCF sugere um aumento na interação hidrofílica dos grupos funcionais, possivelmente devido a uma estrutura de empacotamento menos ordenada. Essa reorganização estrutural se reflete na maior energia necessária para o MOCF liberar água, evidenciando mudanças na cristalinidade e na quebra de ligações de hidrogênio (Punia; Dhull, 2019).

Um segundo pico endotérmico começou em T_0 de 148,61 °C e terminou em T_e de 165,07 °C para MOC, com temperatura de pico T_p 158,42 °C e mudança de entalpia de 1,75 J/g. Para MOCF, o segundo pico endotérmico foi observado em uma temperatura de início (T_o) de 150,19 °C e terminou em uma temperatura de deslocamento (T_e) de 167,37 °C, com uma temperatura de pico (T_p) de 159,04 °C e uma mudança de entalpia de 2,68 J/g. Este segundo evento térmico foi associado à evaporação da água e ao início da decomposição da amostra, durante a qual as ligações glicosídicas são clivadas (Davachi et al., 2021).

Outro pico intenso importante registrado nos termogramas DSC foi uma transição exotérmica observada com T_0, T_p e Te de 260,49 °C, 284,73 °C e 313,97 °C, respectivamente para MOC, com uma mudança de entalpia de -69,69 J/g. Em contraste, para MOCF, esse evento exotérmico ocorreu com T_0, T_p e T_e de 281,69 °C, 290,81 °C e 309,93 °C, respectivamente, com uma mudança de entalpia de -20,83 J/g. Nessas faixas de alta temperatura, geralmente ocorrem reações de desidratação, decomposição pirolítica e despolimerização, resultando na formação de H_2O, CH_4 e CO (Punia; Dhull, 2019). O aumento da temperatura para o início dos picos 2 e 3 no MOCF pode indicar que a modificação causada pela fermentação, com a liberação de subprodutos pelo microrganismo, pode aumentar a estabilidade térmica do MOCF. As mudanças resultantes da fermentação exigiram mais energia para passar por transições de fase ou decomposição.

As entalpias de transição (ΔH) refletem as mudanças de energia associadas às transições de fase, incluindo a quebra de interações intermoleculares, como ligações de hidrogênio, que são cruciais na estabilidade das mucilagens (Sobanwa et al., 2022). Valores de entalpia mais altos geralmente indicam interações mais fortes dentro do material, o que pode exigir mais energia durante as transições de fase, e refletem maior estabilidade térmica (Rownaghi; Niakousari, 2024). O ΔH do MOCF aumentou em comparação ao MOC, o que significa que a estabilidade de gelatinização das amostras aumentou com o processo de fermentação com L. gasseri. Resultados semelhantes foram relatados por Yang et al. (2024) em um estudo sobre

amido de triticale submetido à fermentação. Neste caso, o aumento do ΔH foi atribuído ao processo de hidratação contínua induzida pelo calor, que promoveu a formação de um gel coloidal com maior capacidade de retenção de água. Assim, o comportamento observado no MOCF sugere que a fermentação afeta significativamente as propriedades estruturais e funcionais da mucilagem por meio de mecanismos como ruptura de ligações de hidrogênio, aumento da retenção de água e alterações na composição química.

3.9. Características de textura

A análise do perfil de textura (TPA) permite uma avaliação objetiva e quantitativa das propriedades reológicas e estruturais das formulações, sendo crucial para a otimização de processos e desenvolvimento de novos produtos (Lu et al., 2024). Parâmetros como firmeza, consistência e coesividade em mucilagens a 2% fornecem informações relevantes sobre o comportamento textural, o que influencia diretamente a funcionalidade e a percepção sensorial em aplicações alimentícias (Bolhuis; Forde, 2020).

Essas características texturais são decisivas na interação do consumidor com o produto, pois durante o consumo, o tamanho da mordida e o esforço de mastigação são ajustados de acordo com a resistência e a necessidade de incorporação de saliva para formar um bolo alimentar coeso (Bolhuis; Forde, 2020). Nesse contexto, entender as propriedades texturais das mucilagens fornece uma base técnica valiosa para formular produtos que atendam às expectativas sensoriais do consumidor e aos requisitos de desempenho em diferentes aplicações industriais. Esses dados também são indispensáveis para fabricantes que buscam melhorar processos e desenvolver produtos com características texturais específicas e desejáveis.

A Tabela 3 mostra os resultados para as características texturais da mucilagem controle e fermentada de *O. cochenillifera.* O processo de fermentação influenciou as propriedades de textura, com redução significativa ($p<0,05$) dos valores observados na mucilagem fermentada (MOCF) em comparação à mucilagem controle (MOC).

Tabela 3. Propriedades texturais de soluções de 2% de mucilagem controle (MOC) e mucilagem fermentada (MOCF) de *O. cochenillifera.*

Parâmetros	**MOC**	**MOCF**
Firmeza (N)	$20,44 \pm 0,56^{a}$	$18,33 \pm 0,42^{b}$
Consistência	$208,87 \pm 5,27^{a}$	$180,02 \pm 1,86^{b}$
Coesividade	$13,64 \pm 0,42^{a}$	$11,89 \pm 0,30^{b}$

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autoria própria.

Firmeza e consistência estão associadas à resistência máxima do material à deformação, e essas medidas estão relacionadas à força necessária para comprimir amostras de produtos semissólidos entre a língua e o palato (Salahi; Razavi; Mohebbi, 2024). A coesão, por sua vez, refere-se à capacidade do material de resistir ao fluxo e é fortemente influenciada por interações moleculares no sistema polimérico, como ligações de hidrogênio, ligações cruzadas entre componentes estruturais e grupos carboxila livres, além da mobilidade da água (Ross et al., 2019; Salahi; Razavi; Mohebbi, 2024). Em sistemas formados por combinações de proteínas e polissacarídeos, pode ocorrer a formação de uma rede polimérica coesiva, aumentando a dureza e a estabilidade do gel, como observado na mucilagem controle (MOC) (Razi et al., 2018).

Durante o processo de fermentação, espécies de *Lactobacillus* secretam hidrolases e ácidos orgânicos, que atuam na degradação de polissacarídeos, reduzindo o peso molecular dessas macromoléculas (Liang et al., 2024). Essa redução resulta em mudanças significativas nas propriedades texturais, como diminuição da firmeza. A quebra das cadeias moleculares de polissacarídeos e proteínas, juntamente com a consequente redução do peso molecular, pode explicar as diferenças observadas nas características texturais entre o MOCF e sua versão não fermentada (MOC).

3.10. Propriedades tecnológicas

As propriedades tecnológicas de MOC e MOCF são mostradas na Figura 7. Esta figura mostra as alterações causadas pela fermentação por *L. gasseri* na solubilidade (Figura 7A), capacidade de formação de espuma e estabilidade (Figura 7B), capacidade de emulsificação (Figura 7C) e estabilidade da emulsão (Figura 7D).

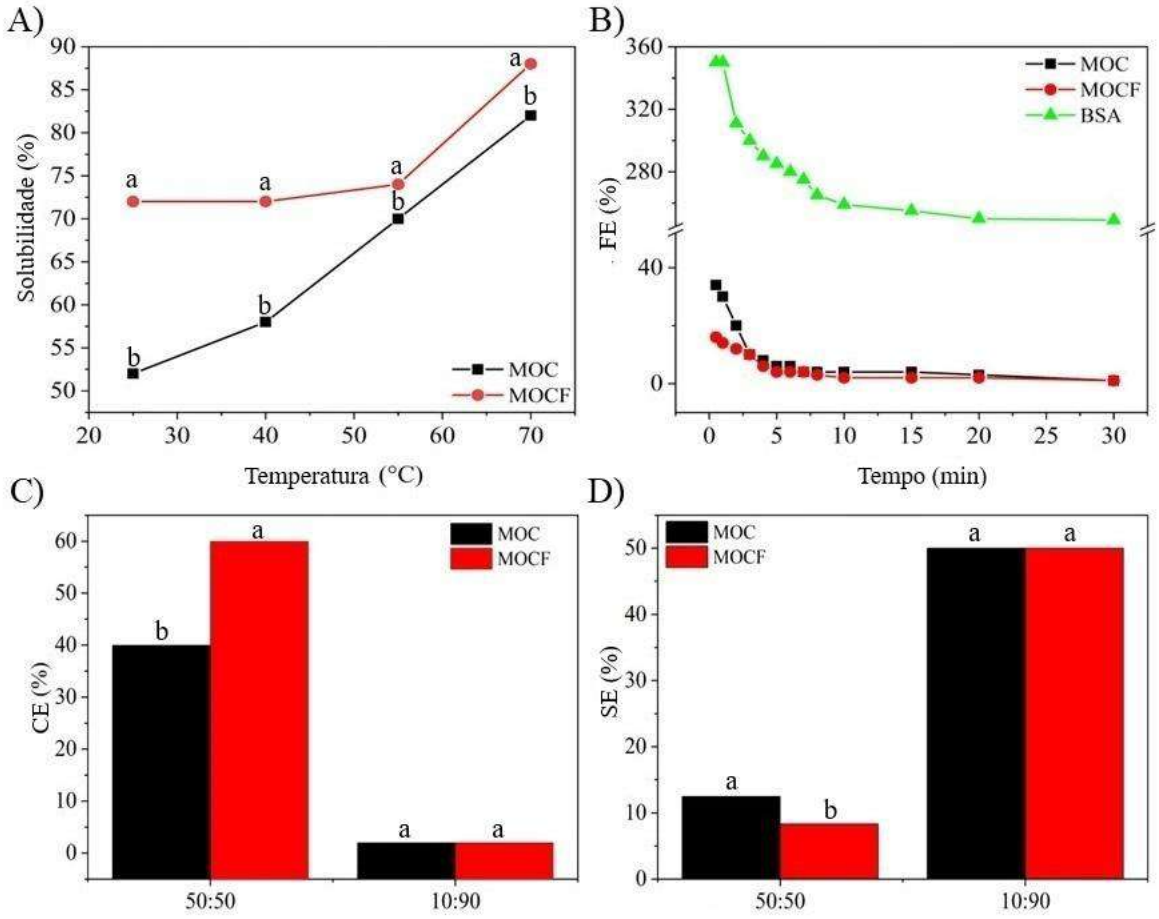

Figura 7. Propriedades funcionais da mucilagem controle (MOC) e da mucilagem fermentada (MOCF): (A) solubilidade, (B) capacidade de formação de espuma e estabilidade, (C) capacidade emulsificante e (D) estabilidade da emulsão preparada com diferentes proporções (óleo/mucilagem). Letras diferentes entre MOC e MOCF representam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$). **Fonte:** Autoria própria.

3.10.1. Solubilidade

A solubilidade é um parâmetro crucial, pois a funcionalidade máxima de qualquer mucilagem só pode ser alcançada após sua dissolução completa em água. Esse atributo está diretamente relacionado à intensidade das interações entre o polissacarídeo e as moléculas de água, mediadas por ligações de hidrogênio formadas por grupos hidrofílicos presentes ao longo da cadeia polimérica (Dick et al., 2019). Nesse sentido, a solubilidade das mucilagens foi avaliada em diferentes temperaturas (25, 40, 55 e 70 °C) e os resultados são mostrados na Figura 7A, com MOCF apresentando valores significativamente maiores ($p < 0,05$) em todas as condições em comparação com MOC. Notavelmente, em MOCF, temperaturas de 25, 40 e 55 °C resultaram em solubilidades semelhantes, na faixa de 70-75%, enquanto em MOC a

solubilidade aumentou linearmente com a temperatura. Ambos atingiram solubilidade máxima a 70 °C, com valores de 82% para MOC e 88% para MOCF. García et al. (2024) relataram que mucilagens extraídas dos cladódios de *O. ficus-indica* e *O. quimilo* atingem solubilidade máxima a 65 °C.

O comportamento distinto do MOCF pode ser atribuído a modificações estruturais induzidas pela fermentação. Durante esse processo, *L. gasseri* promove a degradação parcial de polissacarídeos e proteínas da mucilagem em moléculas menores e outros compostos solúveis, resultando na fragmentação da matriz e redução do diâmetro médio das partículas (de 57,77 ± 21,96 µm no MOC para 48,36 ± 48,57 µm no MOCF). Esse tamanho reduzido aumenta a área superficial específica das partículas, facilitando a interação com a água e promovendo uma dissolução mais eficiente, especialmente em temperaturas mais baixas. Além disso, a atividade enzimática da bactéria pode gerar oligossacarídeos e outros compostos solúveis, contribuindo para a dispersão mais rápida do MOCF na solução. Elkhalifa et al. (2005) atribuíram a alta solubilidade da farinha de sorgo fermentada à atividade proteolítica durante a fermentação, resultando na produção de peptídeos e aminoácidos livres que aumentam a solubilidade em água.

No geral, em nossos resultados, MOC e MOCF atingiram pico de solubilidade a 70 °C, ambos os materiais demonstrando que o calor facilita a interação entre moléculas de água e os grupos hidrofílicos de polissacarídeos (Dick et al., 2019). No entanto, MOCF ainda se dissolve de forma mais eficiente devido não apenas às transformações químicas promovidas pela fermentação. Assim, a fermentação não apenas altera a composição da mucilagem, mas também melhora sua funcionalidade ao modificar sua morfologia e propriedades físico-químicas, tornando-a mais solúvel e potencialmente mais versátil para aplicações industriais.

3.10.2. Capacidade e estabilidade de espuma

A capacidade de formação de espuma (FE) e a estabilidade da espuma (SE) das soluções de MOC, MOCF e albumina sérica bovina (BSA) na concentração de 0,2% são mostradas na Figura 7B. A BSA foi utilizada como referência, apresentando valores de CE de 350% e após 30 min em repouso, 249%.

Os resultados indicaram que a capacidade de formação de espuma (FE) da mucilagem controle (MOC) foi ligeiramente maior do que a da mucilagem fermentada (MOCF) nos primeiros 5 min. Esse comportamento inicial pode estar relacionado à estrutura bioquímica intacta da MOC, que pode fornecer melhores propriedades surfactantes antes de quaisquer alterações resultantes da fermentação. A fermentação com *L. gasseri* pode ter modificado

parcialmente os componentes da mucilagem, como polissacarídeos ou proteínas associadas, reduzindo sua eficiência inicial na formação de espuma (Hassan et al., 2022). Com o tempo, a FE de ambas as amostras tornou-se semelhante, diminuindo que os efeitos da fermentação não alteraram significativamente a estabilidade da espuma a longo prazo. Esse resultado sugere que, embora a modificação introduza alterações nos componentes da mucilagem, essas modificações não são suficientes para alterações significativas na estabilidade da espuma em períodos mais longos.

Além disso, para ambas as amostras (MOC e MOCF), o FE foi significativamente menor do que o da albumina na mesma concentração (0,2%). A albumina, uma proteína globular, tem propriedades estruturais otimizadas para formação e estabilização de espuma devido à sua capacidade de reduzir a tensão superficial e formar filmes resistentes em interfaces líquido-ar (Kapp; Bamforth, 2002). Por outro lado, a mucilagem de *O. cochenillifera*, composta predominantemente por polissacarídeos e outros compostos bioativos de origem vegetal, apresenta limitações naturais na formação de espuma quando comparada às proteínas globulares (Martinez et al., 2005).

3.10.3. Capacidade e estabilidade de emulsão

As características emulsificantes, incluindo capacidade emulsificante (CE) e estabilidade da emulsão (ES), são apresentadas nas Figuras 7C e 7D, respectivamente. A CE foi significativamente maior ($p < 0,05$) nas emulsões preparadas com proporção 50:50 (óleo/mucilagem 0,2%) em comparação à proporção 10:90 (óleo/mucilagem 0,2%). A MOCF apresentou CE de 60%, maior que a da MOC, que apresentou valor de 40%. Entretanto, na proporção 10:90, não houve diferenças significativas entre as mucilagens, ambas com CE de apenas 2% (Figura 7C).

A fermentação teve impacto positivo na capacidade emulsificante, o que pode ser atribuído a modificações estruturais nos componentes da mucilagem. Durante esse processo, os microrganismos hidrolisam polissacarídeos e proteínas, gerando moléculas menores, como oligossacarídeos, peptídeos e aminoácidos livres, que têm maior afinidade com a interface óleo/água (Lindemann, 2020). Essa modificação estrutural favorece a adsorção dessas moléculas na interface, contribuindo para a formação de uma camada emulsificante mais densa e eficiente (Ricardo et al., 2021).

Por outro lado, o ES apresentou comportamento oposto ao EC após aquecimento a 80 °C por 30 min (Figura 7D). No sistema 50:50, o ES foi menor para MOCF (8,3%) do que para MOC (12,5%), enquanto na proporção 10:90, ambas as mucilagens apresentaram maior ES

(50%). Essa redução na estabilidade em emulsões com maior teor de óleo pode estar relacionada à reestruturação da interface emulsificante sob aquecimento. Embora a fermentação melhore o EC, os compostos formados podem ser menos resistentes à temperatura, reduzindo a coesão da camada emulsificante e favorecendo a coalescência de gotículas de óleo.

A relação entre EC e ES em sistemas emulsionados é complexa. A capacidade emulsificante depende da eficiência na formação da camada estabilizadora ao redor das gotículas de óleo, impedindo sua coalescência. As cadeias poliméricas da mucilagem atuam como compostos anfifílicos, adsorvendo-se à interface óleo/água e reduzindo a tensão interfacial (Yang et al., 2023). No sistema 50:50, a maior quantidade de óleo proporciona uma interface mais extensa para interação com os compostos emulsificantes, permitindo uma emulsificação eficiente. Em contrapartida, na proporção 10:90, o excesso de mucilagem em relação ao óleo pode limitar a formação da emulsão, uma vez que a interface óleo/mucilagem disponível é reduzida, deixando parte do emulsificante inativa.

O ES depende não apenas da composição inicial, mas também da resistência térmica da camada estabilizadora. No sistema 50:50, a menor estabilidade das emulsões com MOCF sugere que os componentes gerados pela fermentação têm menor resistência à temperatura. Na proporção 10:90, a maior quantidade de mucilagem compensou esse efeito, garantindo estabilidade térmica mesmo após aquecimento. Estudos anteriores demonstram que as mucilagens podem ser eficientes na estabilização de emulsões com baixas concentrações de óleo, mas sua estabilidade pode ser comprometida em sistemas com alta fase oleosa quando submetidos a altas temperaturas (Dick et al., 2019).

Em resumo, a fermentação melhorou a capacidade emulsificante da mucilagem, tornando-a mais eficiente na formação de emulsões, mas reduziu a estabilidade térmica da emulsão na proporção 50:50, possivelmente devido à menor resistência dos compostos hidrolisados ao aquecimento. Esse impacto deve ser considerado no desenvolvimento de produtos funcionais, dependendo da necessidade de emulsificação ou estabilidade térmica do sistema.

4. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a fermentação da mucilagem de *O. cochenillifera* por *L. gasseri* alterou significativamente suas propriedades físico-químicas e funcionais, aumentando suas potenciais aplicações em sistemas alimentares. O metabolismo seletivo da galactose por *L. gasseri* induziu modificações estruturais, levando à formação de partículas mais densas e compactas e mudanças em grupos funcionais associados a polissacarídeos e proteínas. Essas

transformações influenciaram diretamente o comportamento funcional da mucilagem, melhorando sua estabilidade térmica, solubilidade e capacidade emulsificante, ao mesmo tempo em que reduziram seus parâmetros de viscosidade e textura.

Como resultado, a mucilagem fermentada exibiu estabilidade aprimorada sob altas temperaturas, tornando-a mais adequada para aplicações em alimentos processados termicamente, como molhos e sopas. As propriedades emulsificantes aumentadas sugerem seu potencial como um agente estabilizador em produtos emulsificados como maioneses e cremes, enquanto a redução na viscosidade amplia sua aplicabilidade em formulações que exigem parâmetros de textura mais baixos. Além disso, a solubilidade aprimorada e a estabilidade da emulsão posicionam a mucilagem fermentada como um ingrediente valioso em produtos lácteos e formulações de baixo teor de gordura, alinhando-se com as tendências atuais em ciência e tecnologia de alimentos.

No geral, esta pesquisa destaca a fermentação microbiana como uma abordagem eficaz para modificar biopolímeros derivados de plantas, expandindo suas propriedades funcionais para aplicações industriais. Estudos futuros devem investigar mais profundamente os mecanismos que impulsionam essas modificações e avaliar seu impacto em formulações de alimentos em larga escala.

5. REFERÊNCIAS

Ağagündüz, D.; Özata-Uyar, G.; Kocaadam-Bozkurt, B.; Özturan-Şirin, A.; Capasso, R.; Al-Assaf, S.; Özoğul, F. A comprehensive review on food hydrocolloids as gut modulators in the food matrix and nutrition: The hydrocolloid-gut-health axis. **Food Hydrocolloids**, vol. 145, p. 109068, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109068.

Akpabli-Tsigbe, N. D. K.; Osabutey, J.; Mintah, B. K.; Tano-Debrah, K.; Ma, Y. Cleavage of macromolecule (protein/polysaccharide)-phenolic bond in soybean cell wall through *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus helviticus* mixed culture solid-state fermentation for chlorogenic acid extraction. **Food Bioscience**, vol. 55, p. 102903, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102903.

Amiri, M. S., Mohammadzadeh, V., Yazdi, M. E. T., Barani, M., Rahdar, A., Kyzas, G. Z. Plant-Based Gums and Mucilages Applications in Pharmacology and Nanomedicine: A Review. **Molecules,** vol. 6, p. 26, 2021. https://doi.org/10.3390/molecules26061770

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International.** [*S. l.*]: AOAC International: Rockville, MD, 2016.

Bezerra, P. K. S. de B., Silva, O. L. da, Oliveira Júnior, S. D. de, Padilha, C. E. de A., Santos, E. S. dos. Cellulolytic enzymes behavior in delignified green coconut residues and enzymatic hydrolysis with enzyme recovery. **Industrial Crops and Products**, vol. 172, p. 114037, 2021. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114037

Bolhuis, D. P.; Forde, C. G. Application of food texture to moderate oral processing behaviors and energy intake. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 106, p. 445–456, Dec. 2020. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.021.

Bourkaib, K.; Hadjsadok, A.; Djedri, S. Synergistic Effect of *Opuntia ficus-indica* Cladode mucilage on Physicochemical and Rheological properties of HPAM polymer solutions for EOR Application. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 691, p. 133794, Jun. 2024. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133794.

Brütsch, L.; Stringer, F. J.; Kuster, S.; Windhab, E. J.; Fischer, P. Chia seed mucilage – a vegan thickener: isolation, tailoring viscoelasticity and rehydration. **Food & Function**, vol. 10, no. 8, p. 4854–4860, 2019. https://doi.org/10.1039/C8FO00173A.

Chi, Z.; Feng, Y.; Wei, X.; Yang, H.; Fang, X.; Cheng, B.; Li, Z.; Shi, B.; Gu, Z. A co-fermentation technology based on small peptide production and protein structure modification increases the edible value of corn gluten meal. **LWT,** vol. 198, p. 116054, Apr. 2024. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116054.

Christensen, L. F.; García-Béjar, B.; Bang-Berthelsen, C. H.; Hansen, E. B. Extracellular microbial proteases with specificity for plant proteins in food fermentation. **International Journal of Food Microbiology**, vol. 381, p. 109889, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109889.

Cruz Filho, I. J.; Barros, B. R. da S.; Aguiar, L. M. de S.; Navarro, C. D. C.; Ruas, J. S.; Lorena, V. M. B.; Rocha, G. J. De M.; Vercesi, A. E.; Melo, C. M. L.; Maior, A. M. S. Lignins isolated from Prickly pear cladodes of the species *Opuntia fícus-indica* (Linnaeus) Miller and *Opuntia cochenillifera* (Linnaeus) Miller induces mice splenocytes activation, proliferation and cytokines production. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 123, p. 1331–1339, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.120.

Davachi, S. M.; Pottackal, N.; Torabi, H.; Abbaspourrad, A. Development and characterization of probiotic mucilage based edible films for the preservation of fruits and vegetables. **Scientific reports**, vol. 11, no. 1, p. 16608, 16 Aug. 2021. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95994-5.

Degrain, A.; Manhivi, V.; Remize, F.; Garcia, C.; Sivakumar, D. Effect of Lactic Acid Fermentation on Color, Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in African Nightshade. **Microorganisms**, vol. 8, no. 9, p. 1324, 30 Aug. 2020. https://doi.org/10.3390/microorganisms8091324.

Dick, M.; Dal Magro, L.; Rodrigues, R. C.; Rios, A. De O.; Flôres, S. H. Valorization of *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw. cladodes to obtain a mucilage with hydrocolloid features: Physicochemical and functional performance. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 123, p. 900–909, Feb. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.126.

Elkhalifa, A. E. O.; Schiffler, B.; Bernhardt, R. Effect of fermentation on the functional properties of sorghum flour. **Food Chemistry**, vol. 92, no. 1, p. 1–5, Aug. 2005. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.058.

Francl, A. L; Thongaram, T.; Miller, M. J. The PTS transporters of *Lactobacillus gasseri* ATCC 33323**. BMC microbiology**, vol. 10, p. 77, 12 Mar. 2010. https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-77.

Gammoh, S.; Alu'datt, M. H.; Tranchant, C. C.; Al-U'datt, D. G.; Alhamad, M. N.; Rababah, T.; Kubow, S.; Haddadin, M. S.Y.; Ammari, Z.; Maghaydah, S.; Banat, H. Modification of the functional and bioactive properties of camel milk casein and whey proteins by ultrasonication and fermentation with *Lactobacillus delbrueckii* subsp. lactis**. LWT**, vol. 129, p. 109501, Jul. 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109501.

García, A. L.; Zamora, C. M. Pérez; Michaluk, A. G.; Nuñez, M. B.; Gonzalez, A. M.; Torres, C. A. Physicochemical and functional characterization of the mucilage obtained from cladodes of two *Opuntia* species. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 137802, Nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137802.

Godard, M. P; Ewing, B. A; Pischel, I.; Ziegler, A.; Benedek, B.; Feistel, B. Acute blood glucose lowering effects and long-term safety of *Opuntia* supplementation in pre-diabetic males and females. **Journal of ethnopharmacology**, vol. 130, no. 3, p. 631–4, 9 Aug. 2010. https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.05.047.

Goff, H. D.; Guo, Q. The Role of Hydrocolloids in the Development of Food Structure. **Handbook of Food Structure Development.** [*S. l.*], 2019. p. 1–28. https://doi.org/10.1039/9781788016155-00001.

Guo, L.; Li, H.; Lu, L.; Zou, F.; Tao, H.; Cui, B. The Role of Sequential Enzyme Treatments on Structural and Physicochemical Properties of Cassava Starch Granules. **Starch - Stärke**, vol. 71, no. 7–8, 28 Jul. 2019. https://doi.org/10.1002/star.201800258.

Hassan, I.; Gani, A.; Ahmad, M.; Banday, J. Extraction of polysaccharide from Althea rosea and its physicochemical, anti-diabetic, anti-hypertensive and antioxidant properties. **Scientific reports**, vol. 12, no. 1, p. 17116, 12 Oct. 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20134-6.

Huang, Y; Wu, D; Bao, M; Li, B; Liang, H. Coordination driven self-assembly for enhancing the biological stability of nobiletin. **Journal of Molecular Liquids**, vol. 292, 2019. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111420.

Irondi, E. A.; Imam, Y. T.; Ajani, E. O.; Alamu, E. O. Natural and modified food hydrocolloids as gluten replacement in baked foods: Functional benefits. **Grain & Oil Science and Technology**, vol. 6, no. 4, p. 163–171, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2023.10.001.

Iskandar, C. F.; Cailliez-Grimal, C.; Borges, F.; Revol-Junelles, A.-M. Review of lactose and galactose metabolism in Lactic Acid Bacteria dedicated to expert genomic annotation. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 88, p. 121–132, Jun. 2019. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.020.

Janiszewska-Turak, E.; Tracz, K.; Bielińska, P.; Rybak, K.; Pobiega, K.; Gniewosz, M.; Woźniak, Ł.; Gramza-Michałowska, A. The Impact of the Fermentation Method on the Pigment Content in Pickled Beetroot and Red Bell Pepper Juices and Freeze-Dried Powders. **Applied Sciences**, vol. 12, no. 12, p. 5766, 7 Jun. 2022. https://doi.org/10.3390/app12125766.

Kalegowda, P.; Chauhan, A. S.; Nanjaraj Urs, S. M. *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw cladode mucilage: Physico-chemical, rheological and functional behavior. **Carbohydrate Polymers**, vol. 157, p. 1057–1064, Feb. 2017. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.070.

Kapp, G. R; Bamforth, C. W. The foaming properties of proteins isolated from barley. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, vol. 82, no. 11, p. 1276–1281, 25 Sep. 2002. https://doi.org/10.1002/jsfa.1177.

Kim, H.; Chun, S.-H.; Oh, N. S.; Lee, J. Y.; Lee, K.-W. Anti-inflammatory activities of Maillard reaction products from whey protein isolate fermented by *Lactobacillus gasseri* 4M13 in lipopolysaccharide-stimulated RAW264.7 cells. **Journal of dairy science**, vol. 102, no. 9, p. 7707–7716, Sep. 2019. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15774.

Li, D; Wei, Z; Xue, C. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,** vol. 20, no. 6, p. 5345–5369, 2021. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12840.

Liang, J.; Zhang, M.; Li, X.; Yue, Y.; Wang, X.; Han, M.; Yue, T.; Wang, Z.; Gao, Z. Structure and immunomodulatory activity of *Lentinus edodes* polysaccharides modified by probiotic fermentation. **Food Science and Human Wellness**, vol. 13, no. 1, p. 421–433, Jan. 2024. https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250036.

Lindemann, S. R. A piece of the pie: engineering microbiomes by exploiting division of labor in complex polysaccharide consumption. **Current Opinion in Chemical Engineering**, vol. 30, p. 96–102, Dec. 2020. https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.08.004.

Lodi, L. A; Klaic, R.; Bortoletto-Santos, R.; Ribeiro, C.; Farinas, C. S. Unveiling the Solubilization of Potassium Mineral Rocks in Organic Acids for Application as K-Fertilizer. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, vol. 194, no. 6, p. 2431–2447, 2022. https://doi.org/10.1007/s12010-022-03826-7.

López-Romero, P.; Pichardo-Ontiveros, E.; Avila-Nava, A.; Vázquez-Manjarrez, N.; Tovar, A. R.; Pedraza-Chaverri, J.; Torres, N. The Effect of Nopal (*Opuntia Ficus Indica*) on Postprandial Blood Glucose, Incretins, and Antioxidant Activity in Mexican Patients with Type 2 Diabetes after Consumption of Two Different Composition Breakfasts. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics**, vol. 114, no. 11, p. 1811–1818, Nov. 2014. https://doi.org/10.1016/j.jand.2014.06.352.

Lowry, O. H. Protein measurement with the Folin phenol reagent. **Journal of Biological Chemistry**, vol. 193, p. 265–275, 1951.

Lu, W.-C.; Chan, Y.-J.; Li, Z.-E.; Li, P.-H. Influence of different hydrocolloids on the pasting, rheological, and morphological characteristics of heat gelatinized cassava starch. **Food Chemistry**, p. 140933, Aug. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140933.

Madera-Santana, T. J.; Vargas-Rodríguez, L.; Núñez-Colín, C. A.; González-García, G.; Peña-Caballero, V.; Núñez-Gastélum, J. A.; Gallegos-Vázquez, C.; Rodríguez-Núñez, J. R. Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. **Cyta - Journal of food,** vol. 16, no. 1, p. 650–657, Jan. 2018. https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1454988.

Mannai, F.; Elhleli, H.; Ben Mosbah, M.; Khiari, R.; Nacer, S. N.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Comparative study of conventional and combined ultrasound-assisted methods on the quality of mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* cladodes. **Industrial Crops and Products**, vol. 214, p. 118566, Aug. 2024. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118566.

Mannai, F.; Elhleli, H.; Yilmaz, M.; Khiari, R.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Precipitation solvents effect on the extraction of mucilaginous polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): Structural, functional and rheological properties. **Industrial Crops and Products**, vol. 202, p. 117072, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117072.

Martinez, K; Baeza, R; Millan, F; Pilosof, A. Effect of limited hydrolysis of sunflower protein on the interactions with polysaccharides in foams. **Food Hydrocolloids**, vol. 19, no. 3, p. 361–369, May 2005. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.10.002.

Magaña-Cerino, J. M., Guzmán, T. J., Soto-Luna, I. C., Betanzos-Cabrera, G., Gurrola-Díaz, C. M. Cladodes from *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck (Cactaceae) attenuate postprandial glycaemia without markedly influencing α-glucosidase activity. **Natural Product Research**, vol. 36, p. 1105–1108, 2022. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1851223

Malfa, G. A., Di Giacomo, C., Cardia, L., Sorbara, E. E., Mannucci, C., Calapai, G. A standardized extract of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill and *Olea europaea* L. improves gastrointestinal discomfort: A double-blinded randomized-controlled study. **Phytotherapy Research**, vol. 35, p. 3756–3768, 2021. https://doi.org/10.1002/ptr.7074

Mellai, M.; Allesina, M.; Edoardo, B.; Cascella, F.; Nobile, V.; Spina, A.; Amone, F.; Zaccaria, V.; Insolia, V.; Perri, A.; Lofaro, D.; Puoci, F. A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Trial: Efficacy of *Opuntia ficus-indica* Prebiotic Supplementation in Subjects with Gut Dysbiosis. **Nutrients**, vol. 16, no. 5, p. 586, 21 Feb. 2024. https://doi.org/10.3390/nu16050586.

Meng, J.; Zhang, Q.-X.; Lu, R.-R. Identification and analysis of the function of surface layer proteins from three *Lactobacillus* strains. **Annals of Microbiology**, vol. 68, no. 4, p. 207–216, 17 Apr. 2018. https://doi.org/10.1007/s13213-018-1335-1.

Monteiro, S. S.; Queiroz, J. V. S. De A.; Gomes, H. M.; Santos, L.; Moreira, J. C. F.; Gelain, D. P.; Fook, M. V. L.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. A. De B. Characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes: Rheological behavior, cytotoxicity, and antioxidant potential.

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 707, p. 135824, Feb. 2025. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135824.

Monteiro, S. S., Almeida, R. L., Santos, N. C., Pereira, E. M., Silva, A. P., Oliveira, H. M. L., Pasquali, M. A. de B. New Functional Foods with Cactus Components: Sustainable Perspectives and Future Trends. **Foods**, vol. 12, p. 2494, 2023. https://doi.org/10.3390/foods12132494

Oliveira, E. C. Da S.; Da Luz, J. M. R.; Castro, M. G.; Filgueiras, P. R.; Guarçoni, R. C.; Castro, E. V. R.; Silva, M. De C. S.; Pereira, L. L. Chemical and sensory discrimination of coffee: impacts of the planting altitude and fermentation. **European Food Research and Technology**, vol. 248, no. 3, p. 659–669, 24 Mar. 2022a. https://doi.org/10.1007/s00217-021-03912-w.

Oliveira, N. S.; Ha, N.; Cunha, L.; Cipriani, L. A.; Thaler Neto, A.; Skoronski, E.; Gisbert, E.; Perez Fabregat, T. El H. Fermentation of Soybean Meal with *Lactobacillus acidophilus* Allows Greater Inclusion of Vegetable Protein in the Diet and Can Reduce Vibrionacea in the Intestine of the South American Catfish (Rhamdia quelen). **Animals**, vol. 12, no. 6, 9 Mar. 2022b. https://doi.org/10.3390/ani12060690.

Orifici, S. C., Capitani, M. I., Tomás, M. C., Nolasco, S. M. (2018). Optimization of mucilage extraction from chia seeds (*Salvia hispanica* L.) using response surface methodology. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, vol. 98, p. 4495–4500, 2018. https://doi.org/10.1002/jsfa.8974

Otálora, M. C.; Wilches-Torres, A.; Castaño, J. A. G. Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study. **Polymers**, vol. 13, no. 11, p. 1689, 22 May 2021. https://doi.org/10.3390/polym13111689.

Pirsa, S.; Mahmudi, M.; Ehsani, A. Biodegradable film based on cress seed mucilage, modified with lutein, maltodextrin and alumina nanoparticles: Physicochemical properties and lutein controlled release. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 224, p. 1588–1599, Jan. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.244.

Punia, S.; Dhull, S. B. Chia seed (*Salvia hispanica* L.) mucilage (a heteropolysaccharide): Functional, thermal, rheological behaviour and its utilization. **International Journal of Biological Macromolecules,** vol. 140, p. 1084–1090, Nov. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.205.

Qi, J.; Zhang, J.; Wang, K.; Cheng, Y.; Sheng, Q.; Kurtovic, I.; Yuan, Y.; Yue, T. Tibetan kefir grains fermentation alters physicochemical properties and improves antioxidant activities of *Lycium barbarum* pulp polysaccharides. **Food Chemistry**, vol. 453, p. 139659, Sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139659.

Razavi, S. Z.; Saljoughi, E.; Mousavi, S. M.; Matin, M. M. Polycaprolactone/cress seed mucilage based bilayer antibacterial films containing ZnO nanoparticles with superabsorbent property for the treatment of exuding wounds. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 256, p. 128090, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128090.

Razi, S. M.; Motamedzadegan, A.; Shahidi, A.; Rashidinejad, A. The effect of basil seed gum (BSG) on the rheological and physicochemical properties of heat-induced egg albumin gels. **Food Hydrocolloids**, vol. 82, p. 268–277, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.013.

Remes-Troche, J. M.; Taboada-Liceaga, H.; Gill, S.; Amieva-Balmori, M.; Rossi, M.; Hernández-Ramírez, G.; García-Mazcorro, J. F; Whelan, K. Nopal fiber (*Opuntia ficus-indica*) improves symptoms in irritable bowel syndrome in the short term: a randomized controlled trial. **Neurogastroenterology & Motility**, vol. 33, no. 2, 16 Feb. 2021. https://doi.org/10.1111/nmo.13986.

Ribes, S.; Grau, R.; Talens, P. Use of chia seed mucilage as a texturing agent: Effect on instrumental and sensory properties of texture-modified soups. **Food Hydrocolloids**, vol. 123, p. 107171, Feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107171.

Ricardo, F.; Pradilla, D.; Cruz, J. C; Alvarez, O. Emerging Emulsifiers: Conceptual Basis for the Identification and Rational Design of Peptides with Surface Activity. **International journal of molecular sciences**, vol. 22, no. 9, 28 Apr. 2021. https://doi.org/10.3390/ijms22094615.

Ross, A. I. V.; Tyler, P.; Borgognone, M. G.; Eriksen, B. M. Relationships between shear rheology and sensory attributes of hydrocolloid-thickened fluids designed to compensate for impairments in oral manipulation and swallowing. **Journal of Food Engineering**, vol. 263, p. 123–131, Dec. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.040.

Rownaghi, M.; Niakousari, M. Assessing physicochemical characteristics of a shear-thinning polysaccharide mucilage extracted from marshmallow root (*Althaea officinalis* L.) by an ohmic

heating system**. International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 277, p. 134274, Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134274.

Ruiz-Ramírez, S.; Jiménez-Flores, R. Invited review: Properties of β-galactosidases derived from *Lactobacillaceae* species and their capacity for galacto-oligosaccharide production. **Journal of Dairy Science**, vol. 106, no. 12, p. 8193–8206, Dec. 2023. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23392.

Salahi, M. R.; Razavi, S. M. A.; Mohebbi, M. Impact of *Lallemantia royleana* seed mucilage on the physicochemical, textural, rheological, and in-mouth breakdown behavior properties of cold-set whey protein isolate emulsion-filled gel. **LWT**, vol. 191, p. 115691, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115691.

Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S. K., Kulshrestha, S. Microbial Fermentation and Its Role in Quality Improvement of Fermented Foods. **Fermentation**, vol. 6, p. 106, 2020. https://doi.org/10.3390/fermentation6040106

Sharma, M.; Sadh, P. K.; Dhull, S. B.; Ali, N.; Ansari, M. A.; Bains, A. *Lactobacillus plantarum* LP1 fermentation effects on Aegle marmelos mucilage: Physicochemical, structural, and bioactive properties. **Food and Bioproducts Processing**, vol. 149, p. 82–91, Jan. 2025. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.11.003.

Shahmoradi, Z.; Alizadeh Khaledabad, M.; Amiri, S. Effect of co-encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* LA5 and selenium in hydrogelated matrix of basil seed mucilage/sodium caseinate on properties of set yogurt. **Food Bioscience**, vol. 55, p. 103039, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103039.

Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V., Musa, L., Di Giacinto, G., Bahmid, N. A., Mehdizadeh, M., Castro-Muñoz, R. An overview of fermentation in the food industry- looking back from a new perspective. **Bioresources and Bioprocessing**, vol. 10, p. 85, 2023. https://doi.org/10.1186/s40643-023-00702-y

Sobanwa, M.; Foster, T. J.; Yakubov, G.; Watson, N. J. How hydrocolloids can control the viscoelastic properties of acid-swollen collagen pastes. **Food Hydrocolloids**, vol. 126, p. 107486, May 2022. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107486.

Solanki, D.; Dhungana, P.; Tan, Q. Y.; Badin, R.; Bhandari, B.; Sahu, J. K.; Prakash, S. Assessing the functional and physicochemical properties of chia seed mucilage extracted using

an innovative extraction method. **Food Hydrocolloids**, vol. 156, p. 110342, Nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110342.

Sousa, L. H. B. P.; Luz, J. M. R.; Silva, M. De C. S.; Moreli, A. P.; Veloso, T. G. R.; Guarçoni, R. C.; Moreira, T. R.; Barros, M. V. P.; Kasuya, M. C. M.; Marcate, J. P. P.; Brioschi Júnior, D.; Gomes, W. dos S.; Pereira, L. L.; Oliveira, E. C. Da S. Relationship between sensory and microbial profiles of fermented coffee by dry and washed methods. **Food Chemistry Advances**, vol. 2, p. 100259, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100259.

Souza, M. F., Silva, H. N., Rodrigues, J. F. B., Macêdo, M. D. M., Sousa, W. J. B., Barbosa, R. C., Fook, M. V. L. Chitosan/Gelatin Scaffolds Loaded with *Jatropha mollissima* Extract as Potential Skin Tissue Engineering Materials. **Polymers,** vol. 15, p. 603, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15030603

Stone, A. K.; Shi, D.; Liu, E.; Jafarian, Z.; Xu, C.; Bhagwat, A.; Lu, Y.; Akhov, L.; Gerein, J.; Han, X.; Zaharia, L. I.; Rajagopalan, N.; Tanaka, T.; Korber, D. R.; Nickerson, M. T. Effect of solid-state fermentation on the functionality, digestibility, and volatile profiles of pulse protein isolates. **Food Bioscience**, vol. 61, p. 104580, Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104580.

Su, Y.; Li, H.; Hu, Z.; Zhang, Y.; Guo, L.; Shao, M.; Man, C.; Jiang, Y. Research on degradation of polysaccharides during *Hericium erinaceus* fermentation. **LWT**, vol. 173, p. 114276, Jan. 2023. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114276.

Surekha, G.; Krishnaiah, K. V.; Ravi, N.; Suvarna, R. P. FTIR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method. **Journal of Physics: Conference Series**, vol. 1495, no. 1, p. 012012, 1 Mar. 2020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012012.

Tian, W.; Dai, L.; Lu, S.; Luo, Z.; Qiu, Z.; Li, J.; Li, P.; Du, B. Effect of *Bacillus* sp. DU-106 fermentation on Dendrobium officinale polysaccharide: Structure and immunoregulatory activities. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 135, p. 1034–1042, Aug. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.203.

Van Ginkel, S.; Logan, B. E. Inhibition of Biohydrogen Production by Undissociated Acetic and Butyric Acids. **Environmental Science & Technology**, vol. 39, no. 23, p. 9351–9356, 1 Dec. 2005. https://doi.org/10.1021/es0510515.

Vivek, K.; Mishra, S.; Pradhan, R. C.; Nagarajan, M.; Kumar, P. K.; Singh, S. S.; Manvi, D.; Gowda, N. N. A comprehensive review on microencapsulation of probiotics: technology, carriers and current trends. **Applied Food Research**, vol. 3, no. 1, p. 100248, Jun. 2023. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100248.

Wan, Y.-J.; Hong, T.; Shi, H.-F.; Yin, J.-Y.; Koev, T.; Nie, S.-P.; Gilbert, R. G.; Xie, M.-Y. Probiotic fermentation modifies the structures of pectic polysaccharides from carrot pulp. **Carbohydrate Polymers**, vol. 251, p. 117116, Jan. 2021. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117116.

Wang, Z., Zhang, S., Wang, H., Huang, J., Wang, L. Effect of synergistic fermentation of Saccharomyces cerevisiae and Lactobacillus plantarum on thermal properties of hyaluronic acid-wheat starch system. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 267, p. 131542, 2024a. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131542

Wang, Z.; Zheng, Y.; Zhou, X.; Wang, X.; Liu, X.; Wang, Q.; Zhao, R.; Gao, M.; Li, Z.; Feng, Y.; Xu, Y.; Li, N.; Xu, M.; Sun, Q.; Wang, Q.; Yang, J.; An, L. Effect of *Lactobacillus* fermentation on the structural feature, physicochemical property, and bioactivity of plant and fungal polysaccharides: A review. **Trends in Food Science & Technology**, vol. 148, p. 104492, Jun. 2024b. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104492.

Wang, R., Dong, P., Zhu, Y., Yan, M., Liu, W., Zhao, Y., Huang, L., Zhang, D., Guo, H. Bacterial community dynamics reveal its key bacterium, *Bacillus amyloliquefaciens* ZB, involved in soybean meal fermentation for efficient water-soluble protein production. **LWT**, vol. 135, p. 110068, 2021. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110068

WITS, W. I. T. S. Brazil Mucilages and thickeners, derived from vegetabl imports by country in 2020. World Bank. 2020. https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/BRA/year/2020/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/130239

WITS, W. I. T. S. Brazil Mucilages and thickeners, derived from vegetabl imports by country in 2021. World Bank. 2021. https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/BRA/year/2021/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/130239

(www.OriginLab.com. (2018). OriginPro 2018 (b9.5.1.195). OriginLab Corporation.

Yang, Y.; Gupta, V. K.; Du, Y.; Aghbashlo, M.; Show, P. L.; Pan, J.; Tabatabaei, M.; Rajaei, A. Potential application of polysaccharide mucilages as a substitute for emulsifiers: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 242, p. 124800, Jul. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124800.

Yang, Y.; Zhang, Q.; Weng, Y.; Jiao, A.; Jin, Z. Effects of hydrocolloids on the structure and physicochemical properties of triticale starch during fermentation. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 282, p. 137327, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137327.

Yolmeh, M., Xavier-Santos, D., & Sant'Ana, A. S. Modulating gut microbiota by paraprobiotics: Mechanisms, advantages, and challenges. **Food Bioscience**, vol. 60, p. 104305, 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104305

Yousefi, N.; Zahedi, Y.; Yousefi, A.; Hosseinzadeh, G.; Jekle, M. Development of carboxymethyl cellulose-based nanocomposite incorporated with ZnO nanoparticles synthesized by cress seed mucilage as green surfactant. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 265, p. 130849, Apr. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130849.

Yu, Y.; Zhu, Z.; Xu, Y.; Wu, J.; Yu, Y. Effects of *Lactobacillus plantarum* FM 17 fermentation on jackfruit polysaccharides: Physicochemical, structural, and bioactive properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 258, p. 128988, Feb. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128988.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DE FILMES COMESTÍVEIS DE MUCILAGEM FERMENTADA DE *OPUNTIA COCHENILLIFERA* NA CONSERVAÇÃO DE FRUTAS MINIMAMENTE PROCESSADAS

RESUMO: Este estudo avaliou um revestimento à base de mucilagem de *Opuntia cochenillifera* fermentada com *Lactobacillus gasseri* e amido (MOCF-S) para prolongar a vida útil de melões minimamente processados sob refrigeração. Os filmes foram caracterizados quanto à espessura, solubilidade, permeabilidade ao vapor d'água, propriedades ópticas, morfologia, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e propriedades térmicas e mecânicas. O filme de MOCF-S apresentou alta solubilidade (96,43%), maior permeabilidade ao vapor d'água (6,13 g/kPa h m²) e superfície lisa e uniforme, sugerindo compatibilidade entre mucilagem fermentada e amido. Demonstrou também maior resistência à tração e presença de bandas de amida I no FTIR, indicando interações estruturais. Foi detectada atividade antimicrobiana na área de contato contra *Escherichia coli* (6,7 a 7,3 mm) e *Staphylococcus aureus* (6,7 a 7,7 mm). Após 12 dias a 5°C, os frutos revestidos mantiveram melhor acidez titulável e compostos antioxidantes em comparação ao controle, demonstrando o potencial do filme MOCF-S na conservação pós-colheita.

Palavras-chave: Mucilagem fermentada, *Opuntia cochenillifera*, filme comestível, melão amarelo, prazo de validade.

APPLICATION OF EDIBLE FILMS FROM FERMENTED *OPUNTIA COCHENILLIFERA* MUCILAGE IN THE PRESERVATION OF MINIMALLY PROCESSED FRUITS

ABSTRACTS: This study evaluated a coating based on *Opuntia cochenillifera* mucilage fermented with *Lactobacillus gasseri* and starch (MOCF-S) to extend the shelf life of minimally processed melons under refrigeration. The films were characterized according to thickness, solubility, water vapor permeability, optical properties, morphology, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and thermal and mechanical properties. The MOCF-S film showed high solubility (96.43%), greater water vapor permeability (6.13 g/kPa h m²), and a smooth and uniform surface, suggesting compatibility between fermented mucilage and starch. It also demonstrated greater tensile strength and the presence of amide I bands in FTIR, indicating structural interactions. Antimicrobial activity was detected in the contact area against *Escherichia coli* (6.7 to 7.3 mm) and *Staphylococcus aureus* (6.7 to 7.7 mm). After 12 days at 5°C, the coated fruits maintained better titratable acidity and antioxidant compounds compared to the control, demonstrating the potential of the MOCF-S film in postharvest conservation.

Keywords: Fermented mucilage, *Opuntia cochenillifera*, edible film, yellow melon, shelf life.

1. INTRODUÇÃO

A embalagem desempenha um papel essencial na manutenção da qualidade e segurança dos alimentos ao longo do armazenamento e transporte. Sua principal função é criar uma barreira protetora que impede a contaminação por microrganismos deteriorantes e a interação com agentes externos, como poluentes químicos, oxigênio, umidade e luz (Li et al., 2022). A eficácia de uma embalagem está diretamente relacionada às suas propriedades mecânicas, ópticas e térmicas, que são determinantes para sua funcionalidade e desempenho na preservação dos alimentos (Hamedi et al., 2024). Entretanto, o uso intensivo de plásticos na indústria alimentícia tem gerado preocupações sobre o impacto ambiental associado ao descarte inadequado desses materiais. Como resposta, o desenvolvimento de filmes biodegradáveis à base de biopolímeros, como polissacarídeos, lipídeos, proteínas e seus compósitos, vem ganhando destaque. Esses materiais apresentam vantagens como renovabilidade, ampla disponibilidade e menor impacto ambiental, transformando o setor de embalagens e oferecendo alternativas sustentáveis para a conservação de alimentos (Lindi et al., 2024).

Avanços recentes têm destacado o uso de polímeros naturais e nanocompósitos no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis com propriedades funcionais superiores. Filmes à base de mucilagem de agrião com nanopartículas de luteína, maltodextrina e alumina (Pirsa et al., 2023) e de carboximetilcelulose com resíduos de casca de cebola roxa e nanopartículas de nitreto de boro (Pirsa et al., 2024) apresentaram melhorias nas propriedades físico-químicas e antimicrobianas, bem como na liberação controlada de compostos ativos. Nanopartículas de cloreto de prata e espirulina também demonstraram atividade antioxidante, antimicrobiana e comportamento fotocrômico em filmes de PVA (Erfani et al., 2023). Além disso, filmes ativos de LDPE com nanopartículas metálicas e de argila organofílica apresentaram eficácia na preservação microbiológica de queijos, destacando o potencial dos nanocompósitos em embalagens de alimentos (Pirsa et al., 2020).

A *Opuntia cochenillifera* é uma espécie de cacto menos conhecida e utilizada, mas presente em várias regiões do mundo. Está espécies subutilizada apresenta semelhanças em sua composição química com as espécies mais estudadas, como *Opuntia fícus-indica*, podendo variar de acordo com fatores do solo, condições climáticas, estação de crescimento e idade dos cladódios (Pérez-Viveros et al., 2024). Os cladódios de cactos são caules modificados suculento, articulados, responsáveis pela fotossíntese (Gheribi; Habibi; Khwaldia, 2019). Os cladódios tem a capacidade de produção de mucilagem, que pode ser aplicada como revestimentos e filmes. A mucilagem é um hidrocoloide biocompatível, não tóxico e de baixo

custo, composto principalmente de polissacarídeos de alto peso molecular com uma desejável capacidade de formação de filme (León-Martínez e Cano-Barrita, 2024).

Os filmes comestíveis funcionam como barreiras protetoras, oferecendo controle de permeabilidade ao vapor de água, proteção mecânica e outras propriedades que contribuem para a preservação da qualidade e o prolongamento da vida útil dos alimentos (Pinheiro et al., 2024). Apesar do potencial das mucilagens no desenvolvimento de filmes e revestimentos comestíveis, limitações como baixa resistência mecânica, fragilidade e rápida solubilidade restringem sua aplicação. Para superar esses desafios, uma alternativa é a combinação com outros polímeros, especialmente carboidratos e proteínas, a fim de melhorar suas propriedades funcionais (Hamedi et al., 2024).

Estudos recentes têm demonstrado estratégias eficazes para aprimorar as características dos filmes à base de mucilagem. Teshager; Atlabachew; Alene (2024) relataram que o uso de mucilagem de *O. fícus indica* combinada com caulim lixiviado em ácido e reticulado com ureia resultou em filmes com maior resistência a tração. MannaI et al. (2023) observaram que as propriedades dos filmes baseados em mucilagem de *O. fícus indica* variam sistematicamente de acordo com sua concentração. Além disso, a incorporação de látex de borracha de estireno-butadieno (SBL) conferiu hidrofobicidade, flexibilidade, rigidez e melhores propriedades de barreira. Gheribi et al. (2018) também destacaram que a adição de sorbitol como plastificante melhorou significativamente a barreira ao vapor de água dos filmes de mucilagem, ampliando seu potencial de aplicação industrial.

Considerando a crescente demanda por alternativas de embalagens sustentáveis e a limitada valorização da mucilagem de *O. cochenillifera*, há uma clara necessidade de explorar seu potencial na formulação de filmes comestíveis. Enquanto mucilagens semelhantes de outras espécies de cactos demonstraram resultados promissores, *O. cochenillifera* permanece subutilizada, apesar de sua composição química comparável e disponibilidade em regiões áridas e semiáridas. Além disso, a bioconversão de mucilagem por fermentação com cepas probióticas como *Lactobacillus gasseri* oferece uma estratégia nova e ecologicamente correta para aprimorar suas propriedades físico-químicas e funcionais, o que pode contribuir para melhorar a resistência mecânica e a compatibilidade com matrizes de amido (Monteiro et al., 2025a). Portanto, investigar o desenvolvimento e a aplicação de filmes à base de amido incorporando mucilagem fermentada de *O. cochenillifera* aborda tanto uma preocupação ambiental quanto uma lacuna tecnológica, justificando a relevância e a originalidade do presente estudo no contexto de soluções de embalagens de alimentos biodegradáveis e funcionais.

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver filmes comestíveis à base de mucilagem de cladódios de *O. cochenillifera* modificada por fermentação com *L. gasseri*, em combinação com amido de milho, e avaliar os efeitos da mucilagem fermentada e não fermentada (controle) sobre as propriedades físicas, ópticas, químicas, mecânicas, térmicas e microestruturais dos filmes produzidos. Adicionalmente, foi investigada a eficácia desses filmes quando aplicados como revestimento comestíveis em melões minimamente processados. O estudo também buscou avaliar o impacto dos revestimentos na preservação da qualidade dos melões durante o armazenamento refrigerado, destacando o potencial desses materiais para a extensão da vida útil de frutas frescas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os cladódios de *O. cochenillifera* foi coletado da área experimental do Instituto Nacional do Semiárido (INSA), Campina Grande, Brasil. O melão amarelo (*Cucumis Melo* var. inodorus) foi adquirido no mercado local da cidade de Campina Grande. O *Lactobacillus gasseri* (ATCC 33323) foi obtido da Coleção de Culturas Tropical – Fundação André Tosello (Campinas, Brasil). O glicerol de grau analítico (PA, 99,5%)) foi obtido da Êxodo cientifica (Sumaré, Brasil). O amido de milho modificado de grau alimentício foi adquirido da Maisena® (Unilever Brasil, São Paulo). As cepas *Escherichia coli* (ATCC 25422) e *Staphylococcus aureus* (ATCC 13656) foram adquiridas da Pensabio - Instrumentos de Biotecnologia Eireli (São Paulo, Brasil). O caldo Mueller Hinton (ref. M391-500G) foi adquirido da marca HIMEDIA (Mumbai, Índia), o meio MRS (ref. K25-1215) e o Ágar bacteriológico (ref. K25-1800) foram adquiridos da marca KASVI (Curitiba, Brasil).

2.2. Extração da mucilagem e fermentação

A extração e fermentação da mucilagem de *O. cochenillifera* foi realizada de acordo com o método descrito no pedido de patente BR102024006352-0 (Monteiro; Pasquali, 2024). Os cladódios de *O. cochenillifera* foram colhidos com até 15 dias de idade. Após a colheita, os cladódios foram lavados com água clorada (200 ppm) para remoção das impurezas e o clorênquima foi removido para extrair a mucilagem pura do parênquima. O processo de extração envolveu o corte do parênquima em cubos de aproximadamente 1 cm^3, imersão do material vegetal em água destilada (1:3 p/v) e agitação constante (185 rpm) por 15 h, seguido de filtração para obtenção da mucilagem. Esta mucilagem foi precipitada com etanol 95% três vezes o volume da mucilagem e o precipitado seco em estufa a 50 °C por 24 h (Monteiro et al.,

2025b). Posteriormente, a mucilagem controle (MOC) foi hidratada e submetida a tratamento térmico para inativação de possíveis microrganismos presentes (80 °C, 15 min), seguido da inoculação com *Lactobacillus gasseri* previamente reativado (6 Log UFC/mL). A fermentação da mucilagem ocorreu por 24 h a 37 °C. Após a fermentação, um tratamento térmico adicional foi aplicado para evitar o crescimento excessivo da cultura, garantindo a segurança alimentar. A mucilagem modificada pela fermentação (MOCF) foi precipitada com etanol 95% três vezes o volume da mucilagem (Monteiro et al., 2025a). O precipitado foi seco novamente e a contagem de células viáveis foi realizada.

2.3. Preparação dos filmes com MOC e MOCF

As formulações utilizadas para a produção dos filmes comestíveis foram preparadas na concentração de 1 g/100 mL, incluindo combinações de mucilagem controle com amido de milho (MOC-S) e mucilagem fermentada com amido de milho (MOCF-S). Adicionalmente, misturas contendo exclusivamente mucilagens, sem a adição de amido, também foram avaliadas na mesma concentração. No entanto, estas últimas apresentaram propriedades inadequadas para a formação de filmes, resultando em películas com alta pegajosidade. Devido a essas limitações, tais formulações foram descartadas e não incluídas nas análises deste estudo. Os filmes com mucilagem e amido foram comparados ao filme elaborado com amido de milho na concentração de 1 g/100 mL.

A mucilagem foi dissolvida em água destilada e homogeneizada em agitador magnético (Quimis®, modelo Q261-22, Brasil) em velocidade máxima por 30 minutos. A solução foi então mantida refrigerada a 4 °C durante a noite para garantir a solubilização completa. A solução de amido foi preparada aquecendo a solução 70 °C por 2 minutos. As misturas foram preparadas usando a proporção de 1:2 de MOC-S e MOCF-S. Glicerol (0,4 g/100mL) foi adicionado como plastificante. A mistura do filme foi transferida para uma placa de Petri para secar em temperatura ambiente por 4 dias a 25 ± 2 °C.

2.4. Caracterização dos filmes

2.4.1. Medida da espessura e teor de umidade dos filmes

A espessura dos filmes foi medida utilizando um micrômetro, repetindo a medição em diversas regiões da amostra para garantir a precisão dos resultados. O teor de água foi determinado pelo método 934,06 (AOAC, 2016).

2.4.2. Solubilidade em água

A solubilidade dos filmes produzidos foi avaliada através da imersão de pedados de filme em água destilada (30 mL) à temperatura ambiente, com agitação constante por 1h. Após esse período, os filmes não dissolvidos forma secos em estufa de ar forçado a 70 °C por 24 h e posteriormente pesados. A taxa de solubilidade em água foi determinada segundo a Equação 1:

$$\text{Solubilidade em água}\left(\%\right) = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100 \quad (1)$$

onde, W_i é o peso seco inicial do filme e W_f é peso final do filme seco não dissolvido.

2.4.3. Permeabilidade ao vapor de água (WVP)

A permeabilidade ao vapor de água (WVP) dos filmes foi avaliada seguindo o método gravimétrico ASTM, conforme descrito por Abedi; Sayadi; Oliyaei (2024). Os filmes foram colocados e selados na parte superior de tubos com diâmetro interno de 12 mm, os quais continham cloreto de cálcio anidro (LabSynth, Diadema-SP, Brasil). Esses tubos foram então armazenados em um dessecador com saturação de cloreto de sódio para manter uma umidade relativa de 75% a 25 °C, criando uma pressão de vapor de água de 1753,55 Pa entre os dois lados do filme.

Os tubos foram pesados em intervalos de 7 dias durante 21 dias, e a transmitância do vapor de água (WVTR) e a permeabilidade ao vapor de água (WVP) dos filmes foram calculados usando as Equações 2 e 3:

$$\text{WVTR} = \frac{\text{slope}}{A} \quad (2)$$

$$\text{WVP} = \frac{\text{WVTR} \times L}{\Delta P} \quad (3)$$

onde, WVTR (g/m^2) é a inclinação medida, A é a área do filme (m^2), L é a espessura média do filme (m) e ΔP é a diferença parcial de pressão de vapor de água (Pa).

2.4.4. Medidas de cor e opacidade

A cor dos filmes foi medida usando um colorímetro. As medidas formam expressas em luminosidade (L*), vermelho – verde (a*) e amarelo – azul (b*). A opacidade dos filmes foi

determinada utilizando o espectrofotômetro, seguindo o protocolo descrito por Khodaman et al. (2022). Para isso, o filme foi cortado em dimensões de 1cm por 4 cm e posicionado diretamente dentro de cubetas de vidro. Uma cubeta vazia serviu como referência. A absorbância foi medida a 600 nm e a opacidade do filme foi calculada pela Equação 4:

$$\text{Opacidade} = \frac{\text{A600}}{\text{X}} \quad (4)$$

onde A600 é o valor da absorbância da amostra a 600 nm, X é a espessura do filme em mm.

2.5. Microscopia eletronica de varredura (MEV)

A morfologia e as características superficiais das amostras de filme foram examinadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com um microscópio modelo VEGA (TESCAN, República Tcheca). Antes da análise, os espécimes de filme foram cortados em tamanhos apropriados e montados em suportes de alumínio usando fita adesiva dupla face condutiva de carbono. As amostras foram analisadas sem a aplicação de um revestimento condutor, sob condições de baixo vácuo para preservar a integridade da superfície do filme. A imagem de MEV foi realizada a uma voltagem de aceleração de 3 kV, e as micrografias foram capturadas com ampliações de 500× e 2000× para avaliar tanto a uniformidade geral da superfície quanto os detalhes microestruturais mais finos.

2.6. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os filmes foram submetidos à espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) utilizando o equipamento Perkin Elmer’s Spectrum 400 (Waltham, MA, EUA). O método de espectroscopia por transformada de Fourier no infravermelho foi empregado para detectar as bandas típicas e as estruturas químicas existentes nas amostras. O intervalo de comprimento de onda analisado abrangeu de 4000 a 400 cm^{-1}, com uma resolução de 16 cm^{-1}.

2.7. Propriedades mecânicas

A resistência à tração (TS, Mpa), Young's modulus (MPa) (YM, MPa) e a porcentagem de alongamento na ruptura (E, %), foram medidos usando um Analisador de Textura TA XT Plus (Stable Micro System, Surrey, United Kingdom), de acordo com a ASTM D882 (ASTM, 1997). Para análise, os filmes foram cortados em tiras retangulares de 30×15 mm, com espessura variando entre 0,05 e 0,08 mm, e posicionados no equipamento de tração utilizando

o probe A/TG (Tensile Grips), com distância de retorno de 20 mm. Os ensaios de tração foram realizados utilizando uma célula de carga estática de 50 N, operando a uma velocidade de 0,1 mm/s. Os parâmetros foram calculados usando as Equações 5, 6 e 7.

$$\text{TS (MPa)} = \frac{W_{max}}{A_0} \quad (5)$$

$$\text{E}\ (\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{YM (MPa)} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (7)$$

onde W_{max} corresponde à maior força de tração registrada antes da ruptura, A_0 refere-se à área da seção transversal do filme, ΔL representa a variação no comprimento inicial da bitola no instante da ruptura, e L_0 é o comprimento inicial da bitola. O módulo de Young é definido como a relação entre a tensão aplicada $(\sigma_2 - \sigma_1)$ e a deformação resultante $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$, sendo representado pela inclinação da curva tensão-deformação.

2.8. Atividade antibacteriana

A atividade antibacteriana dos filmes foi determinada pelo método de disco difusão em ágar (NCCLS, 2003). A atividade antibacteriana foi estudada contra *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*, Gram-positivo) e *Escherichia coli* (*E. coli*, Gram-negativo). Foi usado na análise discos de 6 mm cortados dos filmes pré-formados. Os discos dos filmes foram colocados em placas com Ágar Mueller Hinton inoculadas, e incubadas a 37°C por 48h. A atividade antimicrobiana foi determinada medindo o diâmetro da zona de inibição do crescimento.

2.9. Aplicabilidade do filme comestível no revestimento de fruto pronto para consumo durante armazenamento refrigerado

Para estudo da aplicabilidade do filme comestível, foi usado o melão amarelo (*Cucumis Melo* var. inodorus). Os frutos foram selecionados considerando como parâmetros a uniformidade, aparência e ausência de defeitos físicos ou apodrecimento. Os frutos foram sanitizados inteiros em solução de hipoclorito (200 ppm) por 10 min, enxaguados com água destilada, descascados e cortados em cubos de aproximadamente 20 mm. Os cubos de cada fruto foram divididos em 7 grupos de aproximadamente 200 g de fruto. O primeiro grupo foi

imerso em água destilada estéril por 1 mim, após o mergulho a água foi drenada e as amostras secas ao ar. Essa amostra representa o grupo de amostra não tratadas (controle). Da mesma forma os demais grupos foram imersos nas respectivas misturas de MOC-S, MOCF-S e amido. Após secagem a temperatura ambiente e formação da película de filme na superfície dos frutos, as amostras foram acondicionadas em embalagens PET e armazenadas a 5 °C por 12 dias (Dias et al., 2023). As análises foram conduzidas em cinco momentos, 0, 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento refrigerado.

2.10. Determinação dos parâmetros de qualidade do fruto minimamente processado

2.10.1. Perda de massa, firmeza, aspecto visual, sólidos solúveis totais, pH e acidez titulável

A diferença entre o peso inicial e o peso final nos intervalos de tempo foi considerado a perda de peso (WL) do fruto (Oliveira et al., 2020). Os resultados foram expressos em porcentagem (Equação 8):

$$WL\ (\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (8)$$

onde W_i é o peso inicial e W_f é o peso final.

A firmeza (N) dos frutos foi avaliada utilizando-se um texturômetro modelo TA-XT2 (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), equipado com uma sonda cilíndrica de 2 mm de diâmetro (P/2). O ensaio foi realizado utilizando uma célula de carga estática de 500 N, operando a uma velocidade de 2,0 mm/s.

O aspecto visual foi avaliado por registros fotográficos das amostras durante o período de armazenamento. O ângulo Hue foi medido nos frutos usando um colorimetro (Konica Minolta Chroma Meter CR-400, Osaka, Japão). O pH, acidez titulável (TTA, g/100g) e sólidos solúveis totais (TSS, °Brix) foram determinados de acordo com os métodos 981,12, 942,15 e 932.12, respectivamente (AOAC, 2016).

2.10.2. Compostos fenólicos e atividade antioxidante

O teor total dos compostos fenólicos foi determinado utilizando o reagente Folin-Ciocalteu (Marinova; Ribarova; Atanassova, 2005; Singletton; Orthofer; Lamuela-Raventós,

1999), usando o ácido gálico como padrão para calibração (y = 2,307x + 0,005, R^2 = 0,9998). Para analise, foi preparado um extrato com aproximadamente 2 g de amostra para 1 mL de etanol. Posteriormente, 100 µL do extrato foi misturado com 1500 µL de água destilada, 100 µL do Reagente de Folin Ciocalteau 1N (NEON, Suzano-SP, Brasil) e 200 µL da solução de carbonato de sódio 35% (NEON, Suzano-SP, Brasil). A mistura foi agitada e mantida em repouso durante 15 min. A leitura das absorbâncias foi realizada em espectrofotômetro à 725 nm.

A atividade antioxidante foi determinada a partir do mesmo extrato preparado para determinação de TPC, através dos métodos ABTS (Re et al., 1999) e FRAP (Benzie; Strain, 1996). No ensaio ABTS, as soluções estoquem foram preparadas com 7,0 mM de ácido 2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico) ($ABTS^+$) (pureza ≥ 98%) e 140 mM de persulfato de potássio (pureza ≥ 99%), ambos adquiridos da Sigma Aldrich (Brasil). A solução de trabalho foi obtida pela mistura em proporções iguais das soluções estoque, seguida de incubação por 12 horas à temperatura ambiente, em ausência de luz. Posteriormente, a solução resultante foi diluída em tampão salino fosfato 1X (pH 8,0) até alcançar uma absorbância de aproximadamente 0,7 a 0,8 nm a 734 nm. A curva de calibração foi gerada usando uma solução de ácido ascórbico (PA) (Êxodo scientific, Sumaré, Brasil) com concentrações variando de 0,4 a 4,4 µg (y = - 0,0824x + 0,5546, R^2 = 0,9985). O ensaio FRAP foi conduzido para avaliar a capacidade redutora de íons férricos das amostras. O reagente FRAP foi preparado na proporção de 10:1:1, utilizando uma solução tampão de acetato 300 mM (pureza ≥ 98%), uma solução 10 mM de 2,4,6-tripiridil-s-triazina (TPTZ, pureza ≥ 98%) e uma solução 20 mM de cloreto férrico ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$, pureza ≥ 98%). Todos os reagentes foram obtidos da Sigma-Aldrich (Brasil). A curva de calibração foi gerada usando uma solução de ácido ascórbico com concentrações variando de 2,5 a 13,6 µg (y = 0,0703x + 0,02, R^2 = 0,9978). Os resultados foram expressos em mg de equivalentes de ácido ascórbico por grama de peso fresco (mg/100g).

2.11. Análise estatística

Todos os resultados experimentais foram expressos como valores médios acompanhados de seus respectivos desvios-padrão. Os dados foram obtidos de pelo menos três réplicas independentes. A análise estatística foi realizada usando análise de variância (ANOVA) unidirecional para determinar diferenças significativas entre os grupos amostrais. Quando a ANOVA indicou significância, o teste post hoc de Tukey foi aplicado para comparar as médias. Um nível de significância de $p < 0,05$ foi adotado para todas as análises. Todos os

procedimentos estatísticos foram conduzidos usando o software GraphPad Prism (versão 8.0.1, GraphPad Software Inc., San Diego, CA, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades físicas dos filmes

Os filmes comestíveis desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido de milho (MOC-S), mucilagem fermentada com amido de milho (MOCF-S) e amido de milho foram avaliados quanto à espessura, teor de água, solubilidade em água, permeabilidade ao vapor de água, além de parâmetros de cor e opacidade (Tabela 1). Por outro lado, os filmes preparados exclusivamente com mucilagem controle (MOC) ou fermentada (MOCF), sem a adição de amido de milho, não foram submetidos à caracterização devido à ausência de propriedades mecânicas adequadas, como resistência e integridade estrutural, que comprometeram a manipulação e avaliação, atribuídas principalmente à elevada higroscopicidade das mucilagens.

Tabela 1. Propriedades físicas dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido.

Parâmetros	**MOC-S**	**MOCF-S**	**AMIDO**
Espessura (mm)	$0,07 \pm 0,01^{b}$	$0,10 \pm 0,02^{a}$	$0,05 \pm 0,01^{b}$
Teor de água (%)	$8,14 \pm 1,10^{a}$	$9,83 \pm 4,98^{a}$	$9,61 \pm 2,99^{a}$
Solubilidade (%)	$85,29 \pm 14,71^{b}$	$96,43 \pm 3,57^{a}$	$27,05 \pm 0,73^{c}$
WVP (g/kPa.h.m²)	$4,52 \pm 0,65^{a}$	$6,13 \pm 2,75^{a}$	$2,48 \pm 1,31^{a}$
a*	$0,10 \pm 0,56^{a}$	$0,17 \pm 0,65^{a}$	$0,80 \pm 0,87^{a}$
b*	$4,33 \pm 1,53^{a}$	$2,07 \pm 0,76^{a}$	$3,57 \pm 2,18^{a}$
L*	$66,23 \pm 2,43^{a}$	$69,67 \pm 4,25^{a}$	$64,83 \pm 4,22^{a}$
Opacidade	$7,68 \pm 1,34^{a}$	$7,58 \pm 1,55^{a}$	$7,56 \pm 1,33^{a}$

[a,b,c] Letras diferentes na linha denotam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

WVP: Permeabilidade ao vapor de água

Fonte: Autoria própria.

3.1.1. Espessura

Os filmes comestíveis analisados apresentaram espessura variando entre 0,05 e 0,10 mm (Tabela 1). A combinação de mucilagens com amido de milho não resultou em diferenças significativas ($p < 0,05$) na espessura, o que pode ser atribuído ao uso da mesma concentração de sólido em todas as formulações. Esses resultados se alinham com as expectativas, pois a espessura de filmes é geralmente influenciada pela concentração de sólidos na matriz formadora (Hasheminya; Dehghannya, 2021).

Os valores obtidos neste estudo estão em consonância com os relatados por Abedi; Sayadi; Oliyaei (2024), que observaram espessuras entre 0,06 e 0,14 mm em filmes comestíveis contendo mucilagem de sementes de chia (1% p/v) combinada com nanoemulsões de óleo essencial de canela, onde o aumento na concentração da nanoemulsão foi associado ao aumento da espessura dos filmes. Da mesma forma, Lindi et al. (2024) relataram valores de espessura variando de 0,03 a 0,07 mm em filmes comestíveis à base de mucilagem de sementes de Fenugreek combinada com diferentes concentrações de óleo de alecrim.

3.1.2. Teor de água e solubilidade

O teor de água dos filmes não diferiu significativamente entre as formulações ($p > 0,05$) (Tabela 1). O teor de água semelhante entre os filmes produzidos com mucilagem e amido comparado ao filme produzido apenas com amido pode ser atribuído às propriedades hidrofílicas inerente de ambos os componentes. A mucilagem, sendo um polissacarídeo solúvel em água, tem alta afinidade com a umidade, o que permite reter água de forma eficaz, formando uma rede polimérica estável que encapsula grânulos de amido sem alterar significativamente o teor de água (Tosif et al., 2021).

A solubilidade em água dos filmes foi significativamente ($p < 0,05$) influenciada com a presença de mucilagem na composição (Tabela 1). A adição de mucilagem resultou em filmes com solubilidade relativamente alta (> 85%), comparado com o filme produzido apenas com amido de milho (27,05 ± 0,73 %). O filme produzido com a mucilagem fermentada apresentou o valor mais alto de solubilidade (96,43 ± 3,57 %). A natureza altamente hidrofílica da mucilagem foi relacionada ao aumento da solubilidade dos filmes (Abedi; Sayadi; Oliyaei, 2024). No entanto, o aumento mais expressivo no filme produzido com a mucilagem fermentada mostra que a fermentação com *L. gasseri* induziu modificações significativas na estrutura na MOCF e, portanto, as moléculas de água penetraram facilmente no filme MOCF-S.

3.1.3. Permeabilidade ao vapor de água

A avaliação da permeabilidade ao vapor de água (WVP) é um parâmetro crucial para avaliar a capacidade dos filmes em tolerar ambientes úmidos (Koc-Bilican, 2024). Os filmes MOC-S, MOCF-S e de amido de milho não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as formulações. Na Tabela 1, nota-se que o valor mais alto de cerca de 6,13 g/kPa.h.m² foi observado no filme produzido com a mucilagem fermentada com amido de milho (MOCF-S), seguido do filme com a mucilagem controle com amido de milho (MOC-S, 4,52 g/kPa.h.m²).

O menor valor foi observado no filme elaborado apenas com amido de milho (2,48 g/kPa.h.m²). Embora não tenha sido observado alterações significativas entre os filmes produzidos na proporção 1:1 (mucilagem/amido), é possível observar uma tendência ao aumento da permeabilidade do vapor de água quando adicionado mucilagem na composição. Isso pode indicar que a proporção de mucilagem na composição de filmes pode interferir na interação dos filmes com moléculas de água. Essas observações sugerem que a composição com mucilagem pode gerar filmes com mais espaços livres na matriz, aumentando o fator de permeação (Aaliya et al., 2024). Enquanto o filme apenas com amido se mostrou mais compacto e mais resistente à água.

3.1.4. Análise de cor e opacidade

A cor é uma característica crítica de filmes comestíveis adequados para aplicação em alimentos porque afeta a aparência dos produtos e a preferência do consumidor (Davoudi; Zandi; Ganjloo, 2024). A análise de cor dos filmes comestíveis à base de mucilagem e amido revelou variações especificas nos parâmetros a*, b* e L*, indicando características visuais neutras, porém consistentes. O parâmetro a*, relacionado ao componente vermelho-verde, apresentou valores variando de 0,1 ± 0,56 no filme MOC-S a 0,8±0,87 no filme apenas com amido. Essa faixa sugere uma leve tendência em direção ao vermelho, embora os valores próximos de zero indiquem predominantemente uma tonalidade neutra, sem influência visual significativa no espectro vermelho-verde entre os filmes.

O parâmetro b*, associado ao componente amarelo-azul, variou de 2,07±0,76 no filme apenas com amido a 4,33 ± 1,53 no MOC-S. Esse aumento no filme com a mucilagem controle comparado ao filme só com amido reflete uma modesta presença de tonalidades amarela nos filmes, possivelmente derivada dos componentes presentes na *O. cochenillifera* a qual foi extraída a mucilagem e no amido de milho utilizado na formulação. Os tons de vermelho e amarelo observados nos filmes especialmente compostos com mucilagem podem ser atribuídos à presença de carotenóides, betacinaninas e possivelmente aos derivados da clorofila, juntamente com interações envolvendo carboidratos, incluindo arabinose e galactose, que podem interagir com pigmentos e afetar a aparência geral dos filmes produzidos (Monteiro et al., 2023). Apesar disso, os valores relativamente baixos de b* indicam que a intensidade do amarelo é moderada.

A luminosidade (L*), que representa o brilho ou claridade dos filmes, apresentou valores entre 64,83 ± 4,22 e 69,67 ± 4,25, indicando que os filmes possuem uma aparência relativamente clara, sem excesso de brilho. Embora as análises de cor tenham identificado

variações médias nos parâmetros de cor, não foram detectadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as amostras. Esse resultado indica que as diferentes formulações com mucilagem e amido não influenciaram de maneira perceptível a cor dos filmes. Essa característica, aliada à tonalidade neutra e à potencial transparência, é um atributo desejável para aplicações em alimentos, pois contribui para a aceitação estética dos produtos.

A opacidade dos filmes variou de 7,56 ± 1,33 no filme contendo apenas amido para 7,68 ± 1,34 no filme MOC-S. A opacidade está diretamente relacionada à quantidade de luz bloqueada pelos filmes, sendo inversamente proporcional à luz que os atravessa (Nikoomanesh; Zandi; Ganjloo, 2024). Comparativamente, os valores de opacidade observados neste estudo são superiores aos relatados por Davoudi; Zandi; Ganjloo (2024) para filmes à base de mucilagem de sementes de tomate e gelatina (0,82 – 2,01), bem como por Aaliya et al. (2024) para filmes de amido de talipot com mucilagens vegetais (1,67 – 3,52). A maior opacidade dos filmes produzidos neste estudo pode ser atribuída às diferenças nas fontes vegetais dos materiais utilizados, bem como ao método de fundição empregado durante a preparação. Além disso, a presença de partículas ou componentes insolúveis na matriz polimérica pode ter contribuído para uma maior dispersão ou absorção da luz, elevando a opacidade.

Embora valores mais elevados de opacidade possam reduzir a transparência dos filmes, esse atributo pode ser vantajoso para certas aplicações em alimentos, como o revestimento de frutos minimamente processados. Filmes com maior opacidade podem oferecer proteção contra a penetração de luz, reduzindo o risco de reações fotoquímicas, como a oxidação de lipídios e compostos bioativos, que comprometem a qualidade dos alimentos embalados (Candra et al., 2023). Portanto, a opacidade observada reforça o potencial dos filmes desenvolvidos neste estudo para uso em embalagens alimentícias, especialmente em contextos onde a barreira à luz é uma propriedade essencial.

3.2. Microscopia eletronica de varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliar a uniformidade e suavidade da superficie dos filmes. A Figura 1 apresenta micrográfias das superficies dos filmes com ampliações de 500× e 2000×.

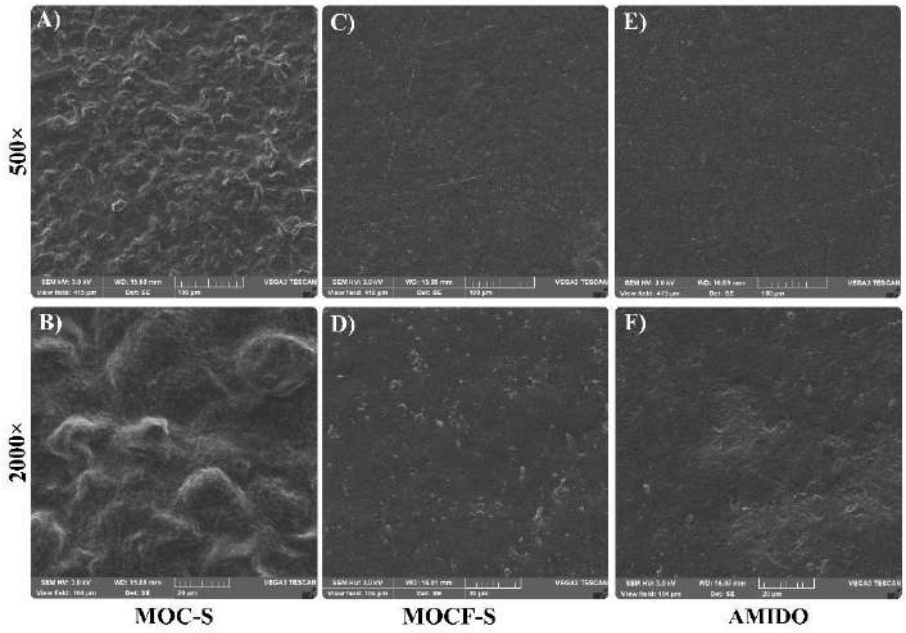

Figura 1. Micrografias das superfícies dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S, A,B), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S, C,D) e apenas amido (E,F), com ampliação de 500× e 2000×. **Fonte:** Autoria própria.

Os filmes MOCF-S (Figura 1C, 1D) e amido de milho (Figura 1E, 1F) apresentaram superficies lisas e unifromes, sem presença de rachaduras ou fraturas, indicando excelente compatibilidade entre os componentes e uma elevada capacidade de formação de filme. Essas caracteristicas podem ser atribuidas às interações sinérgicas entre MOCF, amido de milho e glicerol durante o processo de gelatinização (Lindi et al., 2024).

Por outro lado, o filme MOC-S (Figura 1A, 1B) apresentou uma superficie distinta, caracterizada por uma superficie irregular com grânulos de amido bem evidente. Apesar disso, a parência geral do filme foi homogenea e live de cavidades e rachaduras. Resultados semelhante foram relatados por Wang et al. (2020), ao analisar filmes comestiveis à base de mucilagem de *Diocorea opposita* Thunb. e amido. A presença de grânulos de amido evidentes no filme MOC-S pode estar associada à influência da MOC, que é rica em polissacarídeos e possui propriedades espessantes. Essas propriedades podem restringir a disponibilidade de água para o inchaço completo dos grânulos de amido durante o aquecimento, limitando o grau de gelatinização (Zhang et al., 2018). Essa interação resulta na preservação parcial da estrutura dos grânulos no filme MOC-S.

A diferença observada entre morfologia dos filmes MOC-S e MOCF-S pode ser explicada pelas alterações físico-químicas e funcionais promovidas pela fermentação por *L. gasseri* da mucilagem. Durante a fermentação, *L. gasseri* metabolizou alguns componentes da

mucilagem, como galactose, arabinose e glicose. Essas tranformações alteraram as propriedades da mucilagem, como a consitência e solubilidade, conforme evidenciado em estudos preliminares realizados por nosso grupo, que caracterizaram as alterações induzidas pela fermentação na mucilagem de *O. cochenillifera* (dados não publicados). Como resultado, a modificação promovida por *L. gasseri* facilitou o completo inchaço e gelatinização dos grânulos de amido durante o aquecimento para preparação do filme MOCF-S. Isso resultou na ausência de grânulos de amido evidente no filme, em contraste com o observado no filme MOC-S.

4.3. FTIR

Os grupos funcionais dos filmes compostos e apenas de amido de milho foram identificados por espectros FTIR (Figura 2). Comparando todos os espectros dos diferentes filmes, não foi encontrado novos picos, indicando que pode não haver novas ligações químicas formadas com a interação do amido e as mucilagens. No entanto, as diferentes intensidades dos picos sugerem diferenças entre os conteúdos dos grupos funcionais (Li et al., 2021). As bandas em torno de 3285,6 cm^{-1} estão associadas a água e ao glicerol, indicado a presença de grupos hidroxila -OH (Daei; Mohtarami; Pirsa, 2022) e o pico a 2926,4 cm^{-1} pode ser devido a vibrações de alongamento alifático C-H do grupo $-CH_2^-$ de hidrocarbonetos alifáticos (Lindi et al., 2024). O filme MOC-S apresentou uma banda em 1741,4 cm^{-1} correspondente ao grupo amida I, principalmente relacionados as ligações C=O (carbonila) e N-H (ligações peptídicas) (Li et al., 2021), porque pequenas quantidades de proteína foram encontradas na mucilagem de *O. cochenillifera* em um estudo anterior do nosso grupo de pesquisa (Monteiro et al., 2025). Essa banda diminuiu de intensidade no filme MOCF-S e não apareceu no filme com amido. A diminuição da banda relacionada ao grupo amida I no filme MOCF-S pode ser atribuída à formação de estruturas de folha β nas proteínas durante a fermentação, o que altera sua conformação (Akpabli-Tsigbe et al., 2023). Além disso, a atividade enzimática, como a ação de proteases e amilases, pode modificar a composição proteica, impactando a intensidade das bandas amida I e II (Oliveira et al., 2022). A ausência dessa banda no filme compostos apenas por amido de milho reflete a ausência de proteínas.

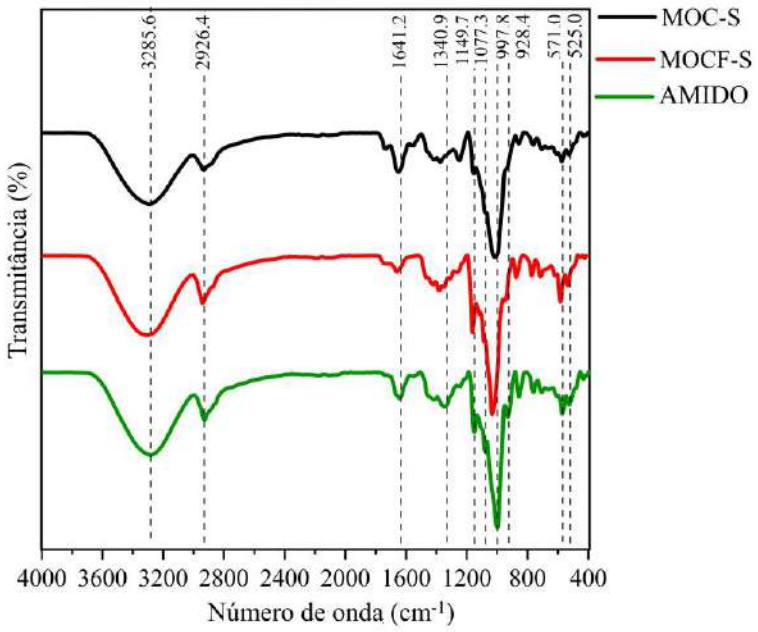

Figura 2. Espectros FTIR dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido. **Fonte:** Autoria própria.

A banda atribuída ao grupo amida II observada em torno de 1641,2 cm^{-1} diminui consideravelmente no filme MOCF-S, o que é explicada pelas alterações induzidas pela fermentação com *L. gasseri*. Enquanto, a presença de um pico acentuado em torno de 1641,2 cm^{-1} no filme apenas de amido de milho é atribuída à vibração de flexão -OH da água na molécula de amido (Yilmaz; Tugrul, 2023). O pico em torno de 1340,9 cm^{-1} pode ser atribuído à banda amida III que surge dos efeitos combinados da flexão N-H e das vibrações C-H (Rawat; Saini, 2024). As vibrações de alongamento C-O-H da ligação glicosídica, particularmente do amido, foram observadas nas bandas a 1149,7 cm^{-1} e a 1077,3 cm^{-1} (Wang et al., 2020). No filme MOC-S, essas bandas diminuíram consideravelmente, o que sugere uma interação química insuficiente ou certa incompatibilidade entre os componentes da mucilagem controle e do amido. As bandas de vibração de alongamento C-O-C foram observadas a 997,8 cm^{-1} (Dai; Zhang; Cheng, 2019). O pico na região de 928,4 cm^{-1} é associado à vibração de estiramento do anel de piranose, que é frequentemente observada em filmes à base de amido (Wang et al., 2020).

4.4. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes foram avaliadas quanto a resistência a tração, modulo de Young e percentual de alongamento da ruptura (Tabela 2). A resistência à tração de um filme, é um dos parâmetros mais importantes para descrever o comportamento dos filmes sob forças (Wang et al., 2020). Mudanças significativas ($p < 0,05$) foram observadas nos valores de resistência a tração entre os filmes MOC-S e o MOCF-S, e entre MOC-S e o filme produzido apenas com o amido. No filme MOC-S, foi observado no espectro FTIR uma diminuição significativa da intensidade das bandas em 1149,7 cm^{-1} e 1077,3 cm^{-1}, atribuídas às vibrações de estiramento C-O-H das ligações glicosídicas. Essa redução indica uma menor integridade estrutural das ligações presentes nas cadeias de amido, sugerindo que a mucilagem controle interferiu na organização molecular do amido (Dong et al., 2025). Consequentemente, essa alteração molecular pode explicar a menor resistência a tração observada nesse filme (11,7 ± 1,25 MPa), devido à formação de uma matriz menos coesa e mais suscetível à fratura. Além disso, as micrografias obtidas por MEV destacaram diferenças significativas na morfologia dos filmes, indicando que a mucilagem controle não se integrou de forma eficiente à matriz do amido. Os grânulos de amido expostos no filme MOC-S podem atuar como pontos de fraqueza, comprometendo a distribuição uniforme de tensões durante a aplicação de forças, que contribui para a menor resistência a tração observada no filme MOC-S.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos filmes desenvolvidos a partir de mucilagem controle com amido (MOC–S), mucilagem fermentada com amido (MOCF–S) e apenas amido.

Parâmetros	**MOC-S**	**MOCF-S**	**AMIDO**
Resistência a tração (Mpa)	$11,70 \pm 1,25^{b}$	$14,59 \pm 1,44^{a}$	$14,88 \pm 1,64^{a}$
Modulo de Young (Mpa)	$32,50 \pm 0,81^{a}$	$23,16 \pm 1,60^{b}$	$21,19 \pm 2,10^{b}$
Alongamento na ruptura (%)	$2,48 \pm 0,51^{a}$	$2,90 \pm 0,28^{a}$	$3,74 \pm 0,11^{a}$

[a,b] Letras diferentes na linha denotam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Fonte: autoria própria.

Por outro lado, o filme MOCF-S apresentou superfície mais homogênea, sem evidências de grânulos de amido expostos, semelhante ao observado no filme de amido. Além de uma maior estabilidade nas mesmas regiões espectrais, sugerindo que a fermentação contribuiu para uma melhor compatibilidade entre os polissacarídeos da mucilagem fermentada e o amido. Essa compatibilidade e maior dispersão da matriz polimérica pode ter favorecido a formação da

matriz mais homogênea e integrada, resultando uma resistência à tração semelhante ao observado no filme de amido.

O decréscimo da resistência a tração resultou também em menores valores de alongamento na ruptura, o que mostra que a interação entre a mucilagem controle e o amido pode ter criado uma rede polimérica mais fraca. Uma tendência de enfraquecimento da rede polimérica com a adição de mucilagem também foi observada no filme MOCF-S, embora não significativa, comparado ao filme de amido.

A inclinação da curva tensão-deformação indica elasticidade ou módulo de Young, que denota como o material se deforma sob uma determinada quantidade de tensão (Khatreja; Santhiya, 2024). O aumento do módulo de Young nos filmes adicionados de mucilagem, especialmente significativo ($p < 0,05$) no filme MOC-S, sugere que a matriz ganhou rigidez devido à presença de aglomerados substanciais, indicando compatibilidade inadequada entre os componentes do filme (Wang et al., 2025).

4.5. Atividade antibacteriana

O ensaio de difusão em ágar foi realizado para testar a atividade antibacteriana *in vitro* dos filmes MOC-S, MOCF-S e o filme de amido de milho contra bactérias gram-positivas (*S. aureus*) e gram-negativas (*E. coli*). A atividade antibacteriana foi expressa através do diâmetro (mm) da zona de inibição (Figura 3). Todos os filmes apresentaram zona de inibição menor que a vancomicina 30, usando como controle positivo no ensaio (APÊNDICE I). Foi observado uma atividade bacteriostática em todos os filmes, com zonas de inibição entre 6,7 ± 0,6 mm para MOC-S e 7,3 ± 0,6 mm para MOCF-S contra a bactéria *E. coli*. Para a bactéria *S. aureus*, a zona de inibição ficou entre 6,7 ± 0,6 mm para o filme de amido (S) e 7,7 ± 0,6 mm para MOC-S. Ambos, não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os filmes. O efeito bacteriostático observado nos filmes pode estar relacionado a presença de polissacarídeos. Os polissacarídeos podem alterar a permeabilidade das paredes celulares bacterianas e das membranas celulares, e essa mudança, por sua vez leva a alguma consequência nas células bacterianas, como o rápido aumento de proteínas intracelulares solúveis em água ou a inibição do crescimento (Lu et al. 2024). Portanto, a matriz de polissacarídeos presentes nos filmes pode servir como uma barreira para inibir o crescimento bacteriano, bloqueando a entrada de nutrientes (Li et al., 2018).

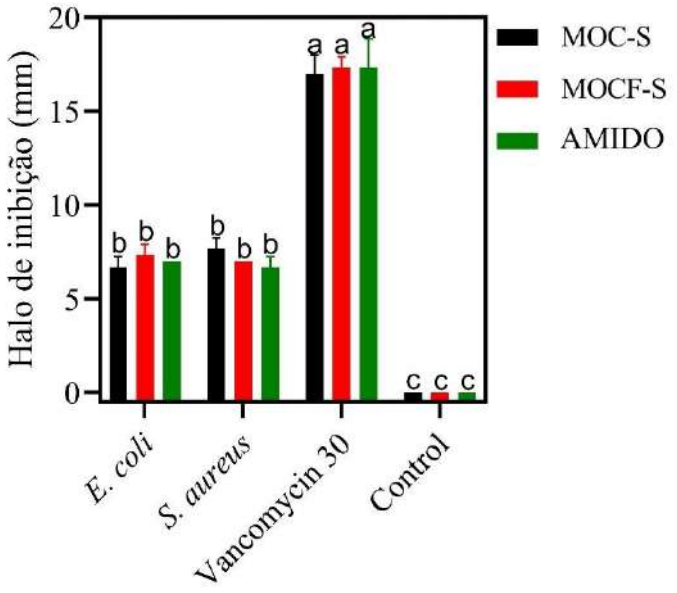

Figura 3. Halo de inibição dos filmes de mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido contra as bactérias *E. coli* e *S. aureus*. Discos de vancomicina 30 foram usados como controle positivo e discos de papel filtro foram utilizados como controle negativo (controle). Letras diferentes denotam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. **Fonte:** Autoria própria.

A atividade antimicrobiana de polissacarídeos, particularmente contra *S. aureus*, tem sido amplamente documentada na literatura. Zhang et al. (2024) observaram que os polissacarídeos extraídos de Kudzu intensificaram a ação antibacteriana da berberina. Esse efeito foi atribuído às propriedades bioadesivas dos polissacarídeos, que facilitam sua adesão à superfície bacteriana, promovendo a liberação gradual da berberina. Além disso, Lu et al. (2024) demonstraram que os polissacarídeos provenientes do pericarpo de lichia exibem propriedades bacteriostáticas, com maior eficiência contra *S. aureus* em comparação a *E. coli*. Esse efeito foi associado a múltiplos mecanismos, incluindo interferência no crescimento bacteriano, alterações na condutividade elétrica, inibição de proteínas e ácidos nucleicos, redução de açúcares redutores, supressão da atividade da cadeia respiratória desidrogenase e da fosfatase alcalina extracelular, além de indução de peroxidação lipídica e redução nos níveis intracelulares de trifosfato de adenosina em *S. aureus* (Lu et al., 2024).

4.6. Aplicação dos filmes em melão minimamente processado

4.6.1. Análise de cor e aspecto visual

O ângulo de Hue (Figura 4B) foi avaliado durante o armazenamento refrigerado como um dos parâmetros relacionado a qualidade e está associados à evolução visual (Figura 4A) da cor do fruto no período de armazenamento. O ângulo de matiz representa o tipo ou tom da cor perceptível, derivado dos valores de a* e b* no espaço cromático. Este parâmetro varia de 0° a 360°, correspondendo, por exemplo, a 0° para tons de vermelho, 90° para amarelo, 180° para verde e 270° para azul (Ghazal et al., 2021). A análise deste ângulo permite a identificação de alterações na cor natural da fruta, refletindo processos como escurecimento, degradação de pigmentos e amadurecimento, sendo, portanto, uma ferramenta importante na avaliação da estabilidade visual e da aceitação sensorial do produto ao longo do armazenamento.

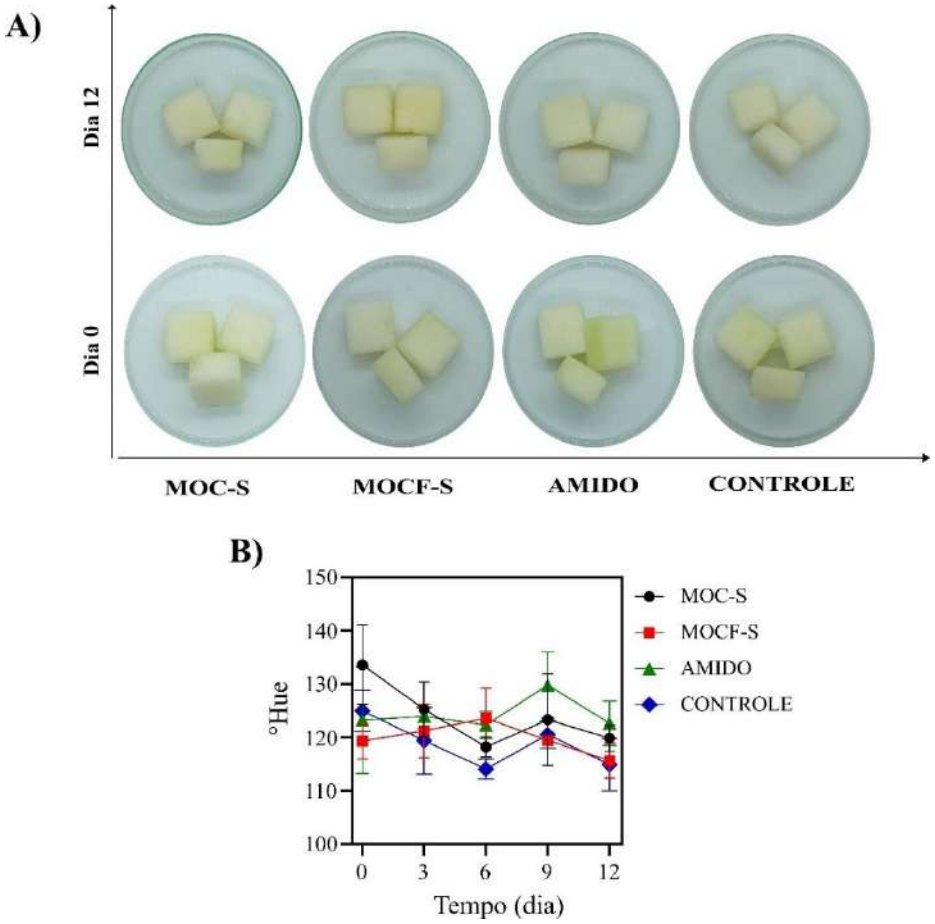

Figura 4. Aspecto visual (A) e o ângulo de Hue (B) de melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) ao longo de 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C). **Fonte:** Autoria própria.

Os resultados obtidos para o ângulo de Hue dos melões minimamente processados armazenados a 5 °C por 12 dias não mostram diferenças significativa ($p > 0,05$) durante o tempo de armazenamento. Entre os tratamentos, a MOC-S e o revestimento com amido apresentam uma diferença significativa ($p < 0,05$) comparado a amostra controle. Os tratamentos MOC-S e amido de milho apresentaram aumento no ângulo de matiz no 9º dia de armazenamento, o que pode estar relacionado à continuidade do amadurecimento e à conversão de clorofila em carotenoides, resultando em coloração mais amarela, comportamento comumente relatado durante o armazenamento de frutas, como relatado para manga (Saikaew et al., 2025) e *Capsicum annum* L. (Pal et al., 2025). Esses resultados indicam que frutas minimamente processadas se tornaram mais escuras, com coloração verde menos intensa, característica de reações de escurecimento enzimático associadas à atividade de oxidases nos tecidos do fruto (Moon et al., 2020). Durante o processamento, como descascamento e corte, as células do tecido vegetal se rompem, levando à liberação de polifenol oxidase (PPO), que interage com substratos fenólicos e desencadeia reações de escurecimento (Dias et al., 2023).

Melões revestidos com amido e filmes de MOCF-S geralmente apresentaram maior estabilidade de cor, com valores de ângulo de tonalidade mais elevados ao longo do armazenamento. Esses resultados indicam que os revestimentos aplicados foram mais eficientes, atuando como barreiras semipermeáveis, reduzindo a difusão de oxigênio e a perda de umidade, o que contribuiu para menor degradação dos pigmentos e retardando o escurecimento dos frutos. Em contraste, o controle apresentou os menores valores, sugerindo que a ausência de revestimento acelerou as mudanças de cor devido à exposição ao oxigênio e à perda de umidade, resultando em degradação mais rápida.

Apesar das alterações observadas na Figura 4, elas foram sutis. Isso sugere que, embora tenham ocorrido alterações cromáticas, elas não foram suficientes para impactar visivelmente a aparência geral da fruta minimamente processada, preservando sua aparência límpida e uniforme durante o armazenamento refrigerado por 12 dias.

4.6.2. Perda de massa e firmeza

A Figura 5A mostra a evolução da perda de peso durante o período de armazenamento. A perda de peso apresentou diferenças significativas entre a amostra controle e as revestidas a partir do 3º dia ($p < 0,05$). Nota-se que o efeito da barreira do revestimento foi evidente, uma vez que a maior perda de massa (17,87%) foi observada na amostra controle (sem aplicação de revestimento). A perda de massa continuou quase que linearmente até o final do período de armazenamento. A menor perda de massa foi observada para os frutos revestidos com MOC-S

(7,37%), seguidos do revestido com amido (7,75%) e MOCF-S (8,84%). Vale destacar que o filme MOC-S apresentou menor permeabilidade ao vapor de água comparado ao filme MOCF-S, o que condiz com o observado para os resultados de perda de massa.

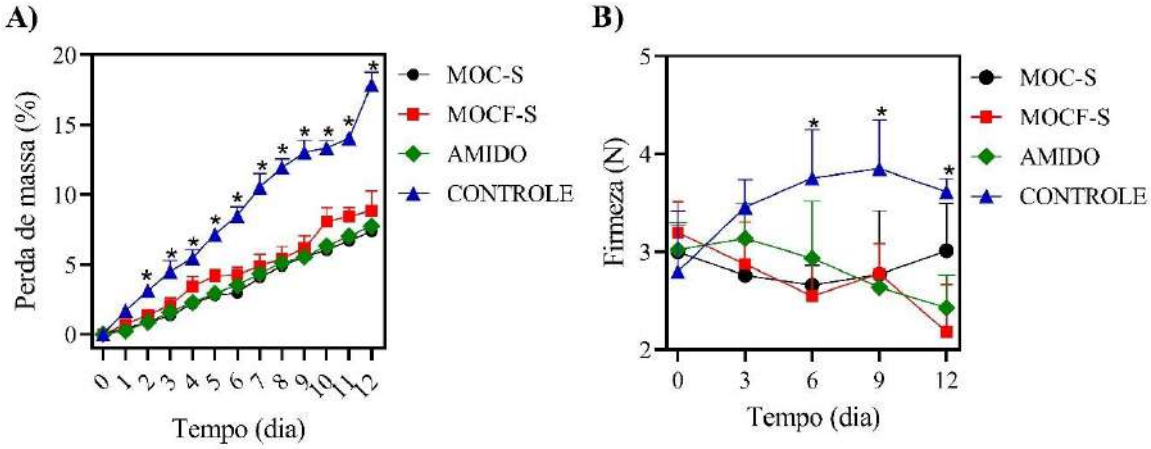

Figura 5. Perda de massa e firmeza em melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) ao longo de 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C). * Significa que o controle foi estatisticamente diferente ($p < 0,05$) de todas as amostras tratadas, pelo teste de Tukey. **Fonte:** Autoria própria.

A perda de peso é inevitável, principalmente quando a superfície do fruto é privada de proteção, como na amostra controle (Cofelice; Lopez; Cuomo, 2019). Essa perda é associada principalmente a desidratação superficial e degradação durante o armazenamento, o que implica perda de qualidade e consequente rejeição do consumidor (Dias et al., 2023). A aplicação dos revestimentos comestíveis pode reduzir a perda de peso, pois ajudam a reduzir a perda de água (Basaglia et al., 2021). A capacidade de reter água dos filmes, especialmente os compostos por mucilagem pode explicar a redução da perda de peso durante o armazenamento.

A firmeza dos melões minimamente processados apresentou uma tendência diferente entre o controle e as amostras revestidas (MOC-S, MOCF-S e amido) (Figura 5B). No controle, foi observado um aumento da firmeza dos cubos com o decorrer do período de armazenamento. Esse aumento pode estar relacionado a desidratação das amostras, como pode ser confirmado pelos dados da perda de peso, que foi significativamente maior. A concentração dos componentes sólidos com a perda, principalmente de água pode conferir essa maior resistência a força aplicada. Todas as amostras revestidas diferiram significativamente da amostra controle a partir do 6º dia de armazenamento refrigerado.

Nas amostras revestidas, foi observada uma tendência à redução da firmeza ao longo do armazenamento, embora essa mudança não tenha sido estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Um comportamento semelhante foi relatado por Ortiz-Duarte et al. (2019) em melões minimamente processados revestidos com nanocompósitos de Ag-quitosana. O amolecimento de produtos minimamente processados pode ser causado pela ação de enzimas pectinolíticas, que promovem a solubilização da pectina presente nas paredes celulares vegetais, resultando em alterações composicionais e estruturais nos polímeros pécticos e, consequentemente, perda de adesão entre as células (Mohebbi et al., 2020). Esse mecanismo de degradação estrutural está em concordância com o comportamento observado para ângulo de Hue, sugerindo uma atividade enzimática e oxidativa que influenciou tanto a coloração quanto a textura dos melões revestidos.

4.6.3. Características físico-químicas, compostos fenólicos totais e capacidade antioxidante

A qualidade dos melões minimamente processados e com revestimento comestível foi avaliada através de parâmetros importantes, como o pH (Figura 6A), acidez titulável (TTA, Figura 6B) e sólidos solúveis totais (SST, Figura 6C). Também foi avaliado o teor de compostos fenólicos totais (TCP, Figura 6D) e atividade antioxidante pelos métodos $ABTS^{+}$ (Figura 6E) e FRAP (Figura 6F), durante o armazenamento refrigerado a 5 °C por 12 dias.

A incorporação do revestimento não alterou significativamente ($p > 0,05$) o pH dos melões, comparado a amostra controle (APÊNDICE II). No entanto, em relação ao tempo de armazenamento, foi observado um aumento significativo ($p < 0,05$) a partir do 6º dia para os melões revestidos com MOC-S e controle. Para os melões revestidos com MOCF-S e amido, o aumento significativo ocorreu a partir do 3º dia. O aumento do pH reflete na diminuição da TTA. As mudanças na TTA dos melões foram significativamente menores nos melões revestidos com amido e no controle do que nos revestidos com MOC-S e MOCF-S. Os valores de SST aumentaram significativamente ($p < 0,05$) com o período de armazenamento.

A amostra controle apresentou o maior teor de SST ao longo do período de armazenamento, variando de 7,2 a 9,3 °Brix. Esses valores maiores podem ser atribuídos ao amadurecimento natural do fruto e à perda de água, que resulta na concentração dos SST (Queiroz et al., 2025). Em contraste, todas as amostras revestidas apresentaram teores de SST significativamente menores em relação à amostra controle ($p < 0,05$).

Ao final no período de armazenamento, os menores valores de SST foram observados nas amostras revestidas com MOCF-S e amido, respectivamente. Esses resultados indicam que

os revestimentos comestíveis foram eficazes em reduzir o padrão respiratório característicos de frutos climatéricos, como o melão. A redução da atividade respiratória proporcionou a manutenção de um metabolismo mais estável durante o armazenamento, possivelmente devido à capacidade dos revestimentos de restringir as trocas gasosas e minimizar a perda de água. Esse efeito contribuiu para o atraso do amadurecimento e a preservação da qualidade do fruto (Queiroz et al., 2025; Shi; Liu; Wang, 2024).

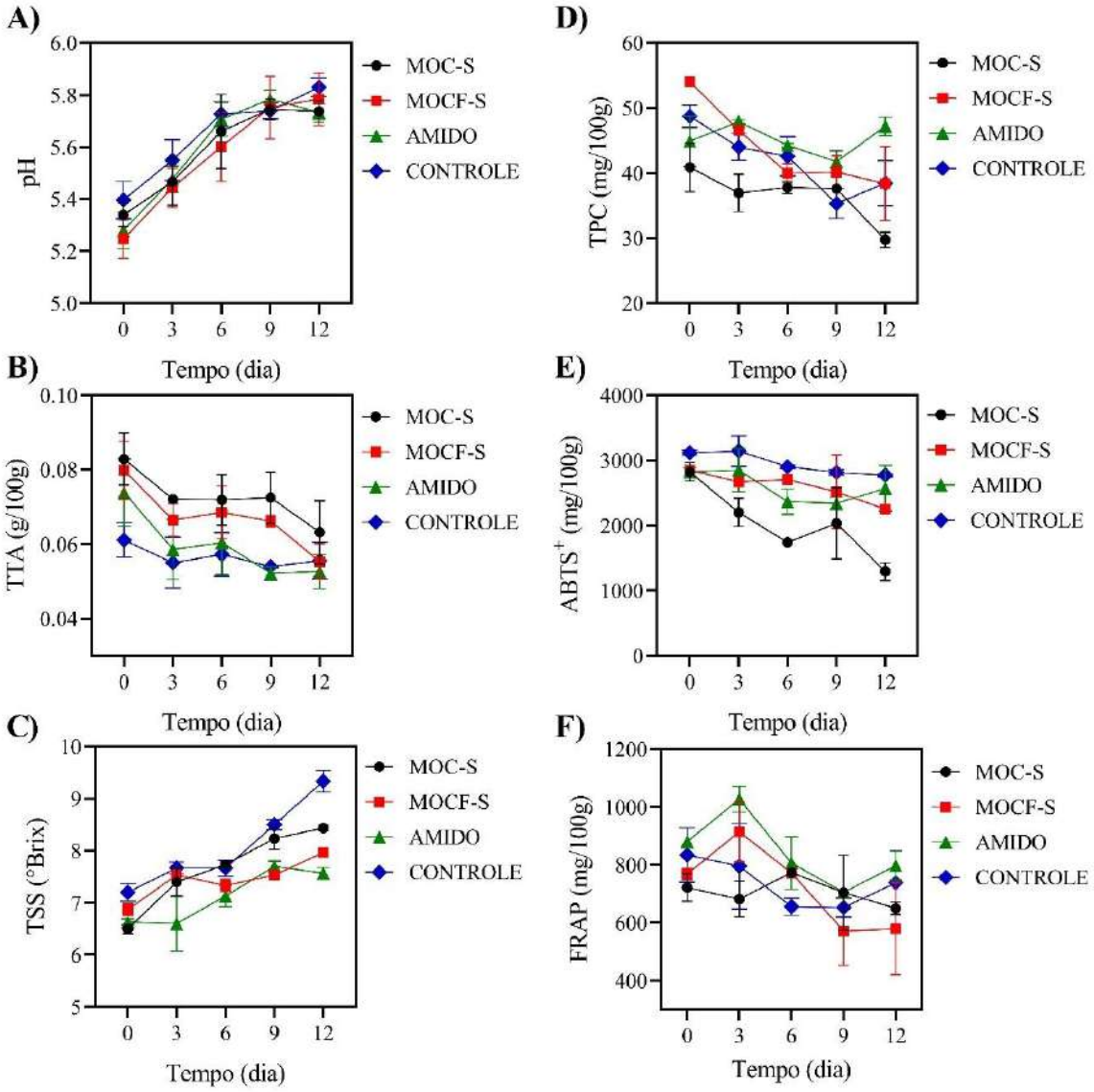

Figura 6. Parâmetros físico-químicos, compostos fenólicos e capacidade antioxidantes de melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) durante 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C). pH (6A), acidez titulável (TTA, 6B), sólidos solúveis totais (TSS, 6C), compostos fenólicos totais (6D), $ABTS^{+}$ (6E) e FRAP (6F). **Fonte:** Autoria própria.

O teor de compostos fenólicos totais (TPC) dos frutos revestidos e a amostra controle ao longo do armazenamento refrigerado foram apresentados na Figura 7D. Os teores de TPC foram significativamente ($p < 0,05$) menores na amostra revestida com MOC-S desde o processamento. Esses valores inferiores podem ser explicados pela possível variação na composição entre os frutos processados, devido a fatores como estádio de maturação. Durante o armazenamento, o TPC diminuiu. A diminuição do teor de compostos fenólicos observada durante o armazenamento está relacionada ao metabolismo pós-colheita, que envolve reações oxidativas e enzimáticas que degradam os compostos fenólicos presentes no melão (Dias et al., 2023).

Nos melões revestidos com MOC-S, a diminuição significativa ($p < 0,05$) do TPC foi detectada apenas no 12º dia de armazenamento. Esse resultado aliado aos parâmetros de cor observado nessas amostras, sugerem que o MOC-S mostrou certa eficácia em retardar reações oxidativas ao longo do tempo, possivelmente devido à formação de uma barreira mais eficiente contra a difusão de oxigênio, que é essencial para as reações catalisadas por polifenol oxidase (PPO) (Moon et al., 2020). Por outro lado, nos melões revestido com MOCF-S e na amostra controle, a diminuição significativa ($p < 0,05$) do TPC foi observada já a partir do 3º e 6º dia de armazenamento, respectivamente. Esse resultado pode indicar uma menor eficiência do MOCF-S em criar barreiras físicas contra reações oxidativas. No caso do controle, a ausência de qualquer revestimento expôs diretamente os tecidos do fruto ao oxigênio atmosférico acelerando a degradação fenólica, principalmente por enzimas como PPO e peroxidase (POD) (Queiroz et al., 2025). Para o MOCF-S, é possível que as modificações induzidas pela fermentação da mucilagem com *L. gasseri* tenha permitido maior permeabilidade ao oxigênio, comparado a MOC-F, composto pela mucilagem não fermentada. Em contraste, para os melões revestidos com amido, não foi observado diferenças significativas ($p > 0,05$) no TPC durante o armazenamento. Esse comportamento pode estar relacionado a formação de uma barreira moderada de proteção, que limita parcialmente a entrada de oxigênio e a atividade de enzimas oxidativas.

A atividade antioxidante dos melões revestidos e amostra controle foi medida usando dois diferentes métodos: o ensaio $ABTS^{+}$ e o ensaio de eficácia redutora de Fe (III) (FRAP). A atividade antioxidante seguiu a mesma tendência de redução ao longo do armazenamento para ambos os métodos analisados. A redução da atividade antioxidante pode ser explicada pela degradação do conteúdo fenólico, assim como do teor de ácido ascórbico. O teor de ácido ascórbico nos cubos de melão pode diminuir rapidamente com o processamento mínimo

aplicado. O ácido ascórbico pode ser oxidado e degradado facilmente quando exposto à luz solar, oxigênio, enzimas oxidativas e na presença de catalisadores metálicos (Fe^{+3}, Ag e Cu^{++2}) (Khan et al., 2021).

A aplicação dos revestimentos comestíveis influenciou a proteção dos compostos antioxidantes de formas distintas, conforme o método de avaliação empregado. No método FRAP (Figura 7F), que mede a capacidade de doar elétrons e reduzir íons férricos (Fe^{3+}) a ferrosos (Fe^{2+}) dos antioxidantes (Munteanu; Apetrei, 2021), os maiores valores foram observados nos melões revestidos com amido (1027,1 – 705,1 mg/100g), seguidos pelos controle (834,2 – 652,7 mg/100g), MOCF-S (915,0 – 572,1 mg/100g) e MOC-S (722,0– 649,7 mg/100g), sem diferenças significativas ($p > 0,05$) entre MOC-S, MOCF-S e controle.

Em contraste, pelo método $ABTS^{+}$ (Figura 7E), a maior capacidade antioxidante foi observada nos melões da amostra controle. Essa observação pode ser atribuída ao aumento da exposição dos tecidos da fruta ao oxigênio e ao estresse oxidativo na ausência de um revestimento protetor. O estresse oxidativo elevado pode estimular o metabolismo oxidativo, levando à produção de compostos antioxidantes secundários como uma resposta adaptativa às condições de deterioração (Chang et al., 2023). O sistema de defesa antioxidante desempenha um papel essencial na preservação de frutas e vegetais ao eliminar espécies reativas de oxigênio (ROS) e retardar os processos de envelhecimento e degradação. Enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutationa redutase (GR) trabalham de forma sinérgica para manter o equilíbrio metabólico das ROS, desempenhando funções antioxidantes críticas (Meitha; Pramesti; Suhandono, 2020; Yuan et al., 2023).

Em geral, avaliando os dois métodos aplicados para medir a capacidade antioxidante das amostras, nota-se que os melões revestidos com MOCF-S e amido apresentaram alta capacidade antioxidante. A eficácia dos revestimentos na proteção dos compostos antioxidantes observada em conjunto nos métodos $ABTS^{+}$ e FRAP reflete a capacidade aprimorada dessas formulações de mitigar o estresse oxidativo e preservar a estabilidade metabólica do melão minimamente processado durante o armazenamento.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a incorporação da mucilagem controle e fermentada por *L. gasseri* de *O. cochenillifera* em filmes comestíveis de amido. A adição das mucilagens aumentou o teor de água, solubilidade e permeabilidade ao vapor de água dos filmes. Os filmes apresentaram coloração neutra, levemente opaca. O filme com mucilagem controle (MOC-S) apresentou superfície irregular e menor resistência à tração, enquanto a mucilagem fermentada

(MOCF-S) proporcionou uma superfície lisa e uniforme, com maior resistência mecânica. A análise de FTIR identificou alterações espectrais e a presença de um pico característico do grupo amida I, sugerindo interações estruturais entre os componentes. A atividade antimicrobiana contra *E. coli* e *S. aureus* foi mínima e possivelmente relacionada à presença de polissacarídeos bioativos.

A aplicação dos filmes como revestimento em melões minimamente processados e armazenados a 5 °C por 12 dias demonstrou eficácia na preservação da qualidade, redução da perda de massa e manutenção da firmeza. Os revestimentos, especialmente o contendo mucilagem fermentada (MOCF-S), contribuíram para a estabilidade do pH, redução da acidez titulável, controle do aumento de sólidos solúveis totais e maior retenção de compostos fenólicos e atividade antioxidante ($ABTS^+$ e FRAP), retardando o amadurecimento e mantendo as características físico-químicas durante o armazenamento. O filme contendo MOCF-S destacou-se na manutenção da qualidade dos frutos. Conclui-se que a fermentação da mucilagem aprimorou as propriedades dos filmes, resultando em uma estrutura mais homogênea e flexível, além de melhor compatibilidade com o amido. Estudos futuros devem explorar aspectos sensoriais, permeabilidade a gases e a incorporação de compostos antioxidantes para otimizar as propriedades antimicrobianas e de barreira, ampliando o potencial de aplicação desses filmes.

5. REFERÊNCIAS

Aaliya, B.; Sunooj, K. V.; Vijayakumar, A.; Krina, P.; Navaf, M.; Parambil Akhila, P.; Raviteja, P.; Mounir, S.; Lackner, M.; George, J.; Nemțanu, M. R. Fabrication and characterization of talipot starch-based biocomposite film using mucilages from different plant sources: A comparative study. **Food Chemistry**, vol. 438, p. 138011, Apr. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138011.

Abedi, E.; Sayadi, M.; Oliyaei, N. Fabrication and characterization of emulsion-based edible film containing cinnamon essential oil using chia seed mucilage. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 266, p. 131173, May 2024. DOI 10.1016/j.ijbiomac.2024.131173.

Akpabli-Tsigbe, N. D. K.; Osabutey, J.; Mintah, B. K.; Tano-Debrah, K.; Ma, Y. Cleavage of macromolecule (protein/polysaccharide)-phenolic bond in soybean cell wall through *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus helviticus* mixed culture solid-state fermentation for

chlorogenic acid extraction. **Food Bioscience**, vol. 55, p. 102903, Oct. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102903.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. [*S. l.*]: AOAC International: Rockville, MD, 2016.

ASTM. **ASTM D882-97., ASTM. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting.** [*S. l.*]: ASTM book of standards, 1997.

Basaglia, R. R.; Pizato, S.; Santiago, N. G.; Almeida, M. M. M.; Pinedo, R. A.; Cortez-Vega, W. R. Effect of edible chitosan and cinnamon essential oil coatings on the shelf life of minimally processed pineapple (*Smooth cayenne*). **Food Bioscience**, vol. 41, p. 100966, Jun. 2021. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100966.

Benzie, I. F. F.; Strain, J. J. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. **Analytical Biochemistry**, vol. 239, no. 1, p. 70–76, Jul. 1996. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292.

Candra, A.; Tsai, H.-C.; Saragi, I. R.; Hu, C.-C.; Yu, W.-T.; Krishnamoorthi, R.; Hong, Z.-X.G; Lai, J.-Y. Fabrication and characterization of hybrid eco-friendly high methoxyl pectin/gelatin/TiO2/curcumin (PGTC) nanocomposite biofilms for salmon fillet packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 232, p. 123423, Mar. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123423.

Chang, S.; Guo, Q.; Du, G.; Tang, J.; Liu, B.; Shao, K.; Zhao, X. Probiotic-loaded edible films made from proteins, polysaccharides, and prebiotics as a quality factor for minimally processed fruits and vegetables: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 253, p. 127226, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127226.

Chettri, S.; Sharma, N.; Mohite, A. M. Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables. **Biomaterials Advances**, vol. 154, p. 213632, 2023. https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213632

Daei, S.; Mohtarami, F.; Pirsa, S. A biodegradable film based on carrageenan gum/Plantago psyllium mucilage/red beet extract: physicochemical properties, biodegradability and water absorption kinetic. **Polymer Bulletin**, vol. 79, no. 12, p. 11317–11338, 18 Dec. 2022. https://doi.org/10.1007/s00289-021-04067-0.

Davoudi, S.; Zandi, M.; Ganjloo, A. Fabrication and characterization of novel biodegradable films based on tomato seed mucilage and gelatin plasticized with polyol mixtures. **Food and Bioproducts Processing**, vol. 148, p. 187–197, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.015.

Dias, J. V. B.; Costa, W. K. A.; Melo, D. De S.; Oliveira, K. Á. R. De; Batista, A. U. D.; Souza, E. L.; Schwan, R. F.; Pimentel, T. C.; Magnani, M. Probiotic and synbiotic edible coatings: Effects on *Lacticaseibacillus casei* viability and general quality of minimally processed fruit during storage. Food Bioscience, vol. 56, p. 103144, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103144.

Dong, Y.; Li, Z.; Kong, H.; Ban, X.; Gu, Z.; Zhang, H.; Hong, Y.; Cheng, L.; Li, C. Correlation analysis of starch molecular structure and film properties via rearrangements of glycosidic linkages by 1,4-α-glucan branching enzyme. **Carbohydrate Polymers**, vol. 348, p. 122908, Jan. 2025. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122908.

Erfani, A.; Pirouzifard, M. K.; Pirsa, S. Photochromic biodegradable film based on polyvinyl alcohol modified with silver chloride nanoparticles and spirulina; investigation of physicochemical, antimicrobial and optical properties. **Food Chemistry**, vol. 411, p. 135459, 2023. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135459

Ghazal, S.; Qureshi, W. S.; Khan, U. S.; Iqbal, J.; Rashid, N.; Tiwana, M. I. (2021). Analysis of visual features and classifiers for Fruit classification problem. **Computers and Electronics in Agriculture**, vol. 187, p. 106267, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106267

Gheribi, R.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 126, p. 238–245, Apr. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.228.

Gheribi, R.; Puchot, L.; Verge, P.; Jaoued-Grayaa, N.; Mezni, M.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Development of plasticized edible films from *Opuntia ficus-indica* mucilage: A comparative study of various polyol plasticizers. **Carbohydrate Polymers**, vol. 190, p. 204–211, Jun. 2018. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.085.

Hamedi, S.; Mahmoodi-Barmesi, M.; Kermanian, H.; Ramezani, O.; Razmpour, Z. Investigation of physicochemical and biological properties of bacterial cellulose & zein-reinforced edible nanocomposites based on flaxseed mucilage containing *Origanum vulgare* L.

essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 254, p. 127733, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127733.

Hasheminya, S.-M.; Dehghannya, J. Development and characterization of novel edible films based on Cordia dichotoma gum incorporated with Salvia mirzayanii essential oil nanoemulsion. **Carbohydrate Polymers**, vol. 257, p. 117606, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117606.

Khan, M. R.; Di Giuseppe, F. A.; Torrieri, E.; Sadiq, M. B. Recent advances in biopolymeric antioxidant films and coatings for preservation of nutritional quality of minimally processed fruits and vegetables. **Food Packaging and Shelf Life**, vol. 30, p. 100752, Dec. 2021. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100752.

Khatreja, K.; Santhiya, D. Physicochemical characterization of novel okra mucilage/hyaluronic acid-based oral disintegrating films for functional food applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 278, p. 134633, Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134633.

Khodaman, E.; Barzegar, H.; Jokar, A.; Jooyandeh, H. Production and evaluation of Physicochemical, Mechanical and Antimicrobial Properties of Chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage-gelatin based Edible Films Incorporated with Chitosan Nanoparticles. **Journal of Food Measurement and Characterization**, vol. 16, no. 5, p. 3547–3556, 7 Oct. 2022. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01470-7.

Koc-Bilican, B. Linden-based mucilage biodegradable films: A green perspective on functional and sustainable food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 261, p. 129805, Mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129805.

León-Martínez, F. M.; Cano-Barrita, P. F. de J. Cactus mucilage: A review of its rheological and physicochemical properties and use as bio-admixture in building materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 279, p. 135111, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135111

Li, N.; Zhou, S.; Yang, X.; Lin, D. Applications of natural polysaccharide-based pH-sensitive films in food packaging: Current research and future trends. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, vol. 82, p. 103200, Dec. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103200.

Li, X.; Ren, Z.; Wang, R.; Liu, L.; Zhang, J.; Ma, F.; Khan, M. Z. H.; Zhao, D.; Liu, X. Characterization and antibacterial activity of edible films based on carboxymethyl cellulose, *Dioscorea opposita* mucilage, glycerol and ZnO nanoparticles. **Food Chemistry**, vol. 349, p. 129208, Jul. 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129208.

Li, X.-L.; Thakur, K.; Zhang, Y.-Y.; Tu, X.-F.; Zhang, Y.-S.; Zhu, D.-Y.; Zhang, J.-G.; Wei, Z.-J. Effects of different chemical modifications on the antibacterial activities of polysaccharides sequentially extracted from peony seed dreg. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 116, p. 664–675, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.082.

Lindi, A. M.; Gorgani, L.; Mohammadi, M.; Hamedi, S.; Darzi, G. N.; Cerruti, P.; Fattahi, E.; Moeini, A. Fenugreek seed mucilage-based active edible films for extending fresh fruit shelf life: Antimicrobial and physicochemical properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 269, p. 132186, Jun. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132186.

Lu, Y.; Qin, L.; Mao, Y.; Lnong, X.; Wei, Q.; Su, J.; Chen, S.; Wei, Z.; Wang, L.; Liao, X.; Zhao, L. Antibacterial activity of a polysaccharide isolated from litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp against *Staphylococcus aureus* and the **mechanism investigation. International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 279, p. 134788, Nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134788.

Mannai, F.; Mechi, L.; Alimi, F.; Alsukaibi, A. K. D.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Biodegradable composite films based on mucilage from *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): Microstructural, functional and thermal properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 252, p. 126456, Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126456.

Marinova, D.; Ribarova, F.; Atanassova, M. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables. **J. Univ. Chem. Technol. Metall.**, vol. 40, p. 255–260, 2005.

Meitha, K.; Pramesti, Y.; Suhandono, S. Reactive Oxygen Species and Antioxidants in Postharvest Vegetables and Fruits. **International Journal of Food Science**, vol. 2020, p. 1–11, 11 Dec. 2020. https://doi.org/10.1155/2020/8817778.

Mohebbi, S.; Babalar, M.; Zamani, Z.; Askari, M. A. Influence of early season boron spraying and postharvest calcium dip treatment on cell-wall degrading enzymes and fruit firmness in

‘Starking Delicious’ apple during storage. **Scientia Horticulturae**, vol. 259, p. 108822, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108822

Monteiro, S. S.; Almeida, R. L.; Santos, N. C.; Pereira, E. M.; Silva, A. P.; Oliveira, H. M. L.; Pasquali, M. A. de B. New Functional Foods with Cactus Components: Sustainable Perspectives and Future Trends. **Foods**, vol. 12, no. 13, p. 2494, 27 Jun. 2023. https://doi.org/10.3390/foods12132494.

Monteiro, S. S.; Pasquali, M. A. de B. **Método de produção de mucilagem modificada pela fermentação com *Lactobacillus gasseri* para aplicações industriais.** BR 10 2024 006352 0, [*S.I.*], 2024.

Monteiro, S. S.; Almeida, R. L. J.; Santos, N. C.; Medeiros, W. R. D. B.; Fook, M. V. L.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. A. B. Fermentation of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes with *Lactobacillus gasseri*: Modification of physicochemical and techno-functional properties. **Food Bioscience**, vol. 68, p. 106424, 2025a. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106424

Monteiro, S. S.; Queiroz, J. V. S. De A.; Gomes, H. M.; Santos, L.; Moreira, J. C. F.; Gelain, D. P.; Fook, M. V. L.; Lisboa, H. M.; Pasquali, M. A. de B. Characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* cladodes: Rheological behavior, cytotoxicity, and antioxidant potential. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 707, p. 135824, Feb. 2025b. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135824.

Moon, K. M.; Kwon, E.-B.; Lee, B.; Kim, C. Y. Recent Trends in Controlling the Enzymatic Browning of Fruit and Vegetable Products. **Molecules**, vol. 25, no. 12, p. 2754, 15 Jun. 2020. https://doi.org/10.3390/molecules25122754.

Munteanu, I. G; Apetrei, C. Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, vol. 22, no. 7, p. 3380, 25 Mar. 2021. https://doi.org/10.3390/ijms22073380.

NCCLS. **Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests;** Approved Standard—Eighth Edition. NCCLS document M2-A8 (ISBN 1-56238-485-6). NCCLS, 940 West Valley Road, Suite 1400, Wayne, Pennsylvania 19087-1898 USA. [*S. l.*: *s. n.*], 2003.

Nikoomanesh, N.; Zandi, M.; Ganjloo, A. Development of eco-friendly cellulose acetate films incorporated with Burdock (*Arctium lappa* L.) root extract. **Progress in Organic Coatings**, vol. 186, p. 108009, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108009.

Oliveira, N. S.; Ha, N.; Cunha, L.; Cipriani, L. A.; Thaler Neto, A.; Skoronski, E.; Gisbert, E.; Perez Fabregat, T. El H. Fermentation of Soybean Meal with *Lactobacillus acidophilus* Allows Greater Inclusion of Vegetable Protein in the Diet and Can Reduce Vibrionacea in the Intestine of the South American Catfish (*Rhamdia quelen*). **Animals**, vol. 12, no. 6, 9 Mar. 2022. https://doi.org/10.3390/ani12060690.

Oliveira, L. I. G.; de Oliveira, K. Á. R.; de Medeiros, E. S.; Batista, A. U. D.; Madruga, M. S.; Lima, M. S.; de Souza, E. L., Magnani, M. Characterization and efficacy of a composite coating containing chitosan and lemongrass essential oil on postharvest quality of guava. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, vol. 66, p. 102506, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102506

Ortiz-Duarte, G.; Pérez-Cabrera, L. E.; Artés-Hernández, F.; Martínez-Hernández, G. B. Ag-chitosan nanocomposites in edible coatings affect the quality of fresh-cut melon. **Postharvest Biology and Technology**, vol. 147, p. 174–184, Jan. 2019. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.021.

Pal, S.; Das, A.; Roy, S.; Chakraborty, N.; Sarkar, T.; Sarkar, K.; Adak, M. K.; Sil, S. K. Nano selenium modulates ripening of Capsicum fruit under postharvest storage: Cellular redox and related physiological characteristics. **Food Chemistry**, vol. 472, p. 142853, 2025. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142853

Pérez-Viveros, D. J.; Díaz-Batalla, L.; Navarro-Cortez, R. O.; Palma-Rodríguez, H. M.; Hernández-Uribe, J. P. Effect of extrusion on physicochemical and functional properties of cladode flour from *Opuntia cochenillifera* and *Opuntia ficus-indica*. **Applied Food Research**, vol. 4, no. 2, p. 100568, Dec. 2024. https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100568.

Pinheiro, J. C.; Silva, L. J. V.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; Fonseca, K. Brito, F. A. L. S.; Silva, T. G. F.; Brito, A. M. S. S.; Silva, I. D. L.; Vinhas, G. M.; Simões, A. N. Effects of cactus pear clone harvest seasons and times on the physicochemical and technological properties of resulting mucilage and biopolymeric films. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 257, p. 128374, Feb. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128374.

Pirsa, S.; Abdolsattari, P.; Peighambardoust, S. J.; Fasihnia, S. H.; Peighambardoust, S. H. Investigating microbial properties of traditional Iranian white cheese packed in active LDPE

films incorporating metallic and organoclay nanoparticles. **Chemical Review and Letters**, vol. 3, p. 168–174, 2020.

Pirsa, S.; Bener, M.; Şen, F. B. Biodegradable film of carboxymethyl cellulose modified with red onion peel powder waste and boron nitride nanoparticles: Investigation of physicochemical properties and release of active substances. **Food Chemistry**, vol. 445, p. 138721, 2024. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138721

Pirsa, S.; Mahmudi, M.; Ehsani, A. Biodegradable film based on cress seed mucilage, modified with lutein, maltodextrin and alumina nanoparticles: Physicochemical properties and lutein controlled release. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 224, p. 1588–1599, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.244

Queiroz, L. P. de O.; Aroucha, E. M. M.; Silva, W. A. O.; Almeida, J. G. L.; Soares, L. P.; Leite, R. H. L. A novel edible biocomposite coating based on alginate from the brown seaweed *Dictyota mertensii* loaded with beeswax nanoparticles extends the shelf life of yellow passion fruit. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 284, p. 138051, Jan. 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138051.

Rawat, R.; Saini, C. S. A novel biopolymeric composite edible film based on sunnhemp protein isolate and potato starch incorporated with clove oil: Fabrication, characterization, and amino acid composition. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 268, p. 131940, May 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131940.

Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, vol. 26, no. 9–10, p. 1231–1237, May 1999. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

Saikaew, K.; Siripornadulsil, W.; Siripornadulsil, S. A combination of coating and modified atmosphere packaging preserves the color and phytochemicals of ripe frozen mango slices. **Journal of Food Composition and Analysis**, vol. 140, p. 107272, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107272

Shi, B.; Liu, S.; Wang, Y. Nisin/cellulose nanofiber/protein bio-composite antibacterial coating for postharvest preservation of fruits. **Progress in Organic Coatings**, vol. 194, p. 108634, Sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108634.

Singletton, V. L.; Orthofer, R.; Lamuela-Raventós, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **In Methods in Enzymology;** Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, vol. 299, p. 152–178, 1999.

Teshager, A. A.; Atlabachew, M.; Alene, A. N. Development of biodegradable film from cactus (*Opuntia Ficus Indica*) mucilage loaded with acid-leached kaolin as filler. **Heliyon**, vol. 10, no. 11, p. e31267, Jun. 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31267.

Tosif, M. M.; Najda, A.; Bains, A.; Zawiślak, G.; Maj, G.; Chawla, P. Starch–Mucilage Composite Films: An Inclusive on Physicochemical and Biological Perspective. **Polymers**, vol. 13, no. 16, p. 2588, 4 Aug. 2021. https://doi.org/10.3390/polym13162588.

Wang, R.; Li, X.; Liu, L.; Chen, W.; Bai, J.; Ma, F.; Liu, X.; Kang, W. Preparation and characterization of edible films composed of *Dioscorea opposita* Thunb. mucilage and starch. **Polymer Testing**, vol. 90, p. 106708, Oct. 2020. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106708.

Wang, L.; Kan, J.; Tang, L.; Abidin, S. Z. The effects of glycerol addition on the physicochemical, structural and mechanical properties of salt-gelatinized rice starch-based film. **LWT**, vol. 218, p. 117427, 2025. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117427

Yilmaz, A.; Tugrul, N. Effect of ultrasound-microwave and microwave-ultrasound treatment on physicochemical properties of corn starch. **Ultrasonics Sonochemistry**, vol. 98, p. 106516, Aug. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106516.

Yuan, N.; Wang, Y.; Guan, Y.; Chen, C.; Hu, W. Effect of Nisin on the Quality and Antioxidant Activity of Fresh-Cut Pumpkins (*Cucurbita moschata* Duch.). **Horticulturae**, vol. 9, no. 5, p. 529, 24 Apr. 2023. https://doi.org/10.3390/horticulturae9050529.

Zhang, Y.; Wang, Z.; Yao, S.; Lin, X.; Zhang, X.; Tan, X.; Zhang, L.; Xu, R.; Zhao, Y.; Zhao, C.; Chu, F.; Jing, W.; Huang, X.; Wang, P. Natural polysaccharide hydrogel with bioadhesion characters to synergistically enhance berberine's antibacterial effect by regulating the PTS system of *Staphylococcus aureus*. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 281, p. 136605, Nov. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136605.

Zhang, Y.; Gu, Z.; Zhu, L.; Hong, Y. Comparative study on the interaction between native corn starch and different hydrocolloids during gelatinization. **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 116, p. 136–143, Sep. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.011.

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou de forma abrangente as propriedades da mucilagem extraída de *O. cochenillifera* (MOC), destacando seu potencial como biopolímero multifuncional e suas aplicações em diversos setores industriais. Os resultados obtidos confirmam que a MOC apresenta características físico-químicas compatíveis com outras mucilagens vegetais, sendo rica em polissacarídeos essenciais para aplicações funcionais. O comportamento reológico da MOC revelou propriedades de fluido não newtoniano, com afinamento por cisalhamento e dependência da viscosidade em relação à temperatura, pH e concentração, tornando-a promissora para uso como agente espessante e estabilizante.

A fermentação da mucilagem com *L. gasseri* mostrou-se uma estratégia eficaz para aprimorar suas propriedades, resultando em alterações estruturais que levaram a uma maior estabilidade térmica e melhora na solubilidade. A redução da viscosidade após a fermentação e o aumento das propriedades emulsificantes indicam que a mucilagem fermentada (MOCF) pode ser aplicada em formulações alimentícias que exigem emulsões estáveis, como molhos e laticínios, contribuindo para formulações mais saudáveis sem comprometer os atributos sensoriais.

No contexto da aplicação em filmes comestíveis de amido, a incorporação da mucilagem controle e fermentada resultou mudanças nas propriedades mecânicas e estruturais dos filmes. O filme contendo MOCF demonstrou uma estrutura homogênea e flexível, com maior resistência mecânica, sendo eficaz na preservação da qualidade de melões minimamente processados durante o armazenamento refrigerado. Apesar da limitada atividade antimicrobiana observada, a combinação da mucilagem com outros compostos bioativos pode potencializar suas propriedades de barreira e antimicrobianas.

Os ensaios de viabilidade celular indicaram a segurança da mucilagem para aplicações biomédicas, embora a ausência de atividade antioxidante significativa reforce a necessidade de estudos adicionais para exploração do potencial bioativo da mucilagem. Assim, pesquisas futuras devem focar na caracterização antioxidante detalhada, na avaliação de sua

sustentabilidade em comparação a polímeros sintéticos e na exploração de sinergias com outros hidrocoloides para ampliar suas funcionalidades.

Conclui-se que a mucilagem de *O. cochenillifera*, especialmente após a fermentação, apresenta propriedades funcionais promissoras para aplicações em alimentos, cosméticos e farmacêuticos, destacando-se como uma alternativa natural e sustentável com amplo potencial de utilização industrial.

APÊNDICES

1. APÊNDICE I

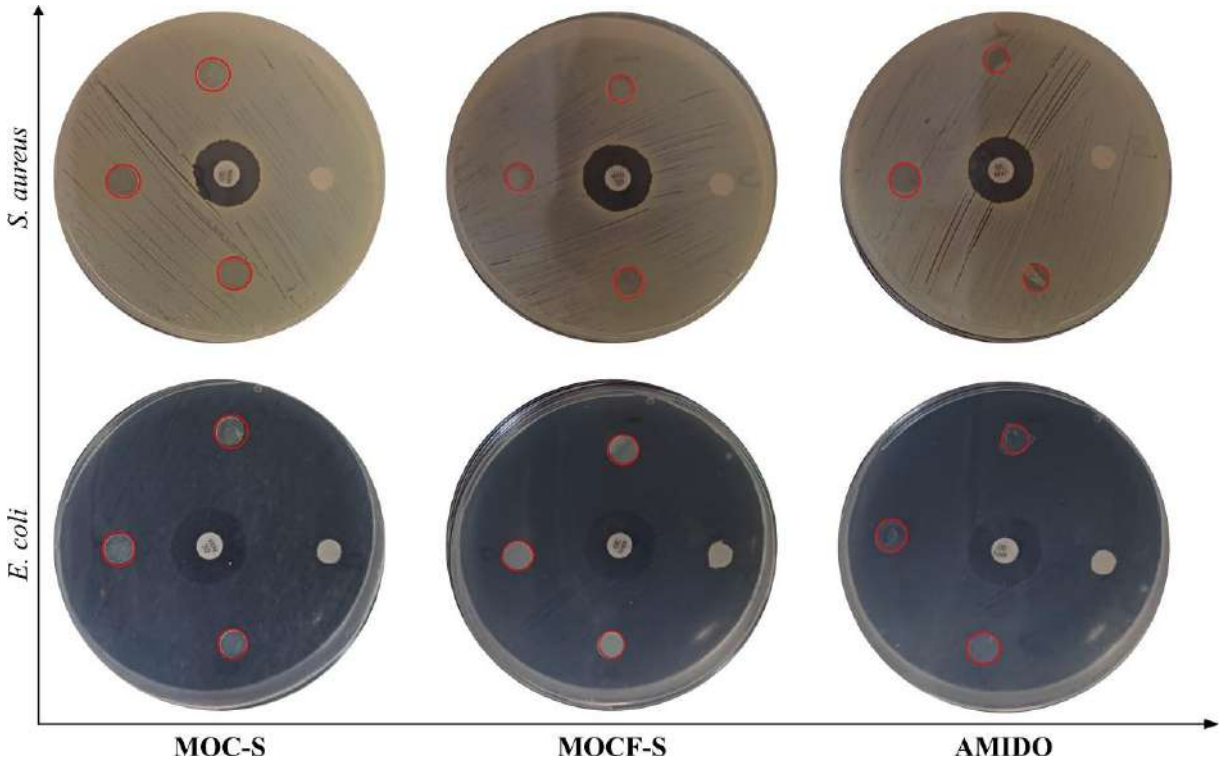

Figura 1S. Halo de inibição dos filmes de mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido em placas com *S. aureus* e *E. coli* para teste de atividade antibacteriana pelo método de disco difusão em ágar Muller Hinton. **Fonte:** Autoria própria.

2. APÊNDICE II

Tabela 1S. Características físico-químicas de melões minimamente processados, não revestidos (controle) e revestidos com mucilagem controle com amido (MOC-S), mucilagem fermentada com amido (MOCF-S) e apenas amido (S) ao longo de 12 dias de armazenamento sob refrigeração (5 ± 2 °C).

Tempo (dias)	Parâmetros						
	°Hue	pH	TTA (g/100g)	TSS (°Brix)	TCP (mg/100g)	ABTS^{+} (mg/100g)	FRAP (mg/100g)
MOC-S							
0	133,6 ± 7,4^{bA}	5,3 ± 0,0^{bA}	0,08 ± 0,01^{aA}	6,5 ± 0,1^{bB}	40,9 ± 3,7^{aB}	2824,8 ± 143,5^{aC}	722,0 ± 47,9^{aB}
3	125,3 ± 5,1^{bA}	5,5 ± 0,1^{bA}	0,07 ± 0,00^{aA}	7,4 ± 0,3^{aB}	36,9 ± 2,9^{aB}	2203,0 ± 216,1^{bC}	682,3 ± 61,3^{aB}
6	118,2 ± 1,9^{aA}	5,7 ± 0,1^{aA}	0,07 ± 0,01^{aA}	7,7 ± 0,6^{aB}	37,8 ± 0,9^{aB}	1742,0 ± 45,5^{bC}	773,3 ± 4,4^{aB}
9	123,3 ± 8,6^{aA}	5,7 ± 0,0^{aA}	0,07 ± 0,01^{aA}	8,2 ± 0,2^{aB}	37,6 ± 0,6^{aB}	2035,1 ± 546,7^{bC}	704,4 ± 130,3^{aB}
12	119,9 ± 2,5^{aA}	5,7 ± 0,0^{aA}	0,06 ± 0,01^{bA}	8,4 ± 0,1^{aB}	29,7 ± 1,2^{bB}	1294,0 ± 136,2^{bC}	649,7 ± 21,4^{aB}
MOCF-S							
0	119,3 ± 3,4^{aAB}	5,2 ± 0,1^{bA}	0,08 ± 0,01^{aA}	6,9 ± 0,1^{bC}	54,0 ± 0,4^{aAB}	2851,7 ± 45,6^{aB}	768,1 ± 19,8^{aB}
3	121,2 ± 5,1^{aAB}	5,4 ± 0,1^{aA}	0,07 ± 0,00^{bA}	7,5 ± 0,1^{aC}	46,6 ± 0,1^{bAB}	2672,8 ± 31,0^{aB}	915,0 ± 104,2^{aB}
6	123,6 ± 5,6^{aAB}	5,6 ± 0,1^{aA}	0,07 ± 0,00^{bA}	7,3 ± 0,1^{aC}	40,0 ± 1,5^{bAB}	2706,0 ± 27,3^{aB}	771,9 ± 6,9^{aB}
9	119,4 ± 0,1^{aAB}	5,8 ± 0,1^{aA}	0,07 ± 0,00^{bA}	7,5 ± 0,1^{aC}	40,2 ± 2,5^{bAB}	2520,0 ± 564,9^{aB}	572,1 ± 118,9^{bB}
12	115,6 ± 3,3^{aAB}	5,8 ± 0,1^{aA}	0,06 ± 0,01^{bA}	8,0 ± 0,1^{aC}	38,4 ± 5,7^{bAB}	2252,0 ± 29,8^{bB}	579,0 ± 159,5^{bB}
Amido							
0	123,2 ± 10,0^{aA}	5,3 ± 0,1^{bA}	0,07 ± 0,01^{aB}	6,6 ± 0,1^{bD}	44,9 ± 3,9^{aA}	2822,5 ± 62,7^{aB}	880,6 ± 9,5^{aA}
3	123,9 ± 2,3^{aA}	5,5 ± 0,1^{aA}	0,06 ± 0,01^{bB}	6,6 ± 0,5^{bD}	47,9 ± 0,3^{aA}	2851,3 ± 333,5^{aB}	1027,1 ± 44,1^{aA}
6	122,3 ± 2,6^{aA}	5,7 ± 0,1^{aA}	0,06 ± 0,01^{bB}	7,1 ± 0,2^{aD}	44,2 ± 0,3^{aA}	2368,0 ± 197,2^{aB}	806,4 ± 91,3^{aA}
9	129,8 ± 6,2^{aA}	5,8 ± 0,0^{aA}	0,05 ± 0,00^{bB}	7,7 ± 0,1^{aD}	41,8 ± 1,7^{aA}	2341,1 ± 94,9^{bB}	705,1 ± 7,1^{aA}
12	122,6 ± 4,1^{aA}	5,7 ± 0,0^{aA}	0,05 ± 0,01^{bB}	7,6 ± 0,1^{aD}	47,2 ± 1,4^{aA}	2573,2 ± 348,9^{aB}	797,4 ± 50,9^{aA}
Controle							
0	125,0 ± 3.8^{aB}	5,4 ± 0,1^{bA}	0,06 ± 0,00^{aB}	7,2 ± 0,2^{bA}	48,7 ± 1,7^{aA}	3117,5 ± 37,9^{aA}	834,2 ± 94,1^{aB}
3	119,4 ± 6,3^{aB}	5,6 ± 0,1^{bA}	0,06 ± 0,01^{aB}	7,7 ± 0,1^{aA}	44,0 ± 2,1^{aA}	3144,0 ± 235,2^{aA}	796,0 ± 148,7^{aB}
6	114,1 ± 1,9^{aB}	5,7 ± 0,0^{aA}	0,06 ± 0,01^{aB}	7,7 ± 0,2^{aA}	42,6 ± 3,0^{bA}	2905,0 ± 28,6^{aA}	655,9 ± 29,0^{aB}
9	120,5 ± 2,6^{aB}	5,7 ± 0,0^{aA}	0,05 ± 0,00^{aB}	8,5 ± 0,1^{aA}	35,3 ± 2,3^{bA}	2819,7 ± 43,2^{aA}	652,7 ± 33,1^{bB}
12	114,9 ± 4,9^{aB}	5,8 ± 0,0^{aA}	0,06 ± 0,01^{aB}	9,3 ± 0,2^{aA}	38,4 ± 3,5^{bA}	2773,4 ± 23,2^{aA}	738,4 ± 6,0^{bB}

$^{a.b}$ Letras minúsculas na mesma coluna e no mesmo tratamento denotam diferença significativa ($p < 0,05$) entre o tempo de armazenamento e o dia 0.

$^{A.B,C}$ Letras maiúsculas na mesma coluna entre os tratamentos denotam diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autoria própria.