

RESSALVA

**Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo deste
documento será
disponibilizado somente a
partir de 26/09/2027.**

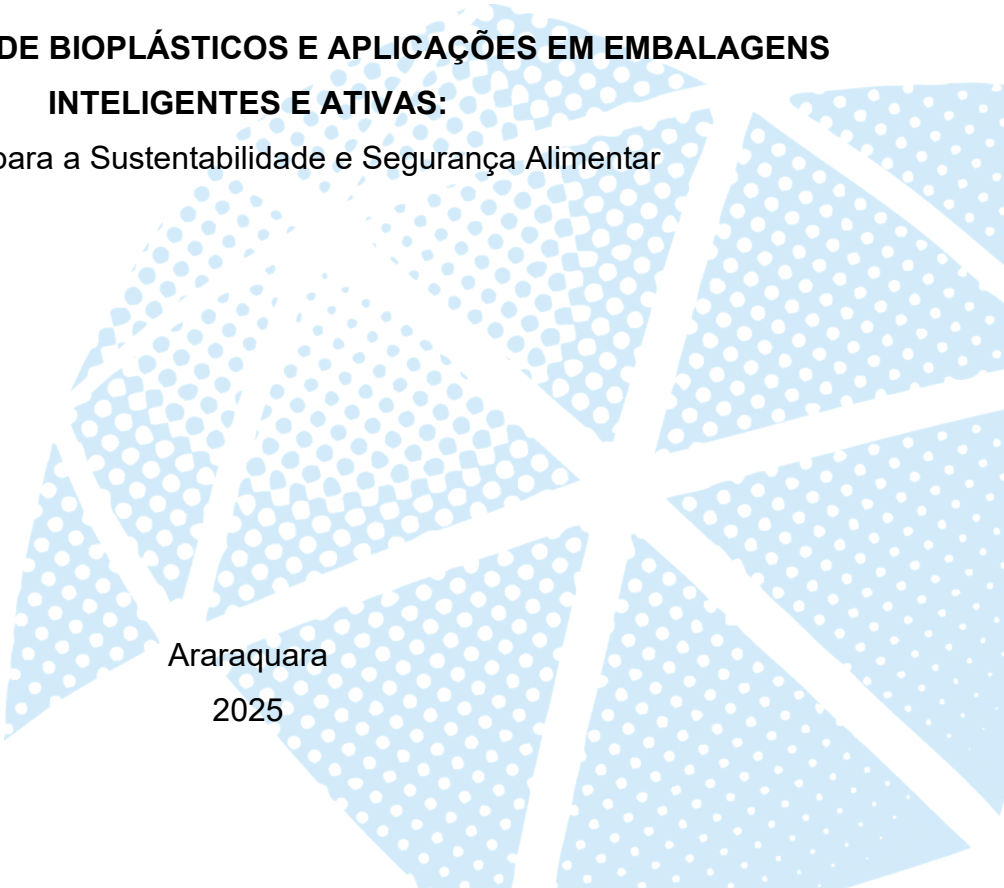
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

DANIELA VASSALO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE BIOPLÁSTICOS E APLICAÇÕES EM EMBALAGENS
INTELIGENTES E ATIVAS:**

Inovações para a Sustentabilidade e Segurança Alimentar

Araraquara
2025



DANIELA VASSALO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE BIOPLÁSTICOS E APLICAÇÕES EM EMBALAGENS
INTELIGENTES E ATIVAS:**

Inovações para a Sustentabilidade e Segurança Alimentar

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara, para obtenção do título de Doutor(a) em Química.

Área de Concentração: Química
Inorgânica

Orientador(a): Prof. Dr. Sidney José Lima
Ribeiro

Coorientadores: Prof. Dr. Hernane da Silva
Barud e Prof. Dr. Maurício Cavicchioli

Araraquara

2025

P436d

Pereira, Daniela Vassalo

Desenvolvimento de bioplásticos e aplicações em embalagens inteligentes e ativas : inovações para a sustentabilidade e segurança alimentar / Daniela Vassalo Pereira. -- Araraquara, 2025
95 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Sidney José Lima Ribeiro

Coorientador: Hernane da Silva Barud e Maurício Cavicchioli

1. Agroindústria. 2. Segurança alimentar. 3. Biopolímeros. 4.
Tecnologia de alimentos. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: "Desenvolvimento de Bioplásticos e Aplicações em Embalagens Inteligente e Ativa: Inovações para Sustentabilidade e Segurança Alimentar"

AUTORA: DANIELA VASSALO PEREIRA

ORIENTADOR: SIDNEY JOSE LIMA RIBEIRO

COORIENTADOR: MAURICIO CAVICCHIOLI

COORIENTADOR: HERNANE DA SILVA BARUD

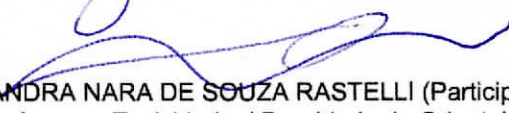
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Química, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SIDNEY JOSE LIMA RIBEIRO (Participação Presencial)
Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica / Instituto de Química - UNESP - Araraquara


Prof. Dr. ELIAS DE SOUZA MONTEIRO FILHO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara


Prof. Dr. CAIO GOMIDE OTONI (Participação Presencial)
Departamento de Química Orgânica / Instituto de Química - UNICAMP - Campinas


Profª. Drª. SANDRA ANDREA CRUZ (Participação Presencial)
Departamento de Química / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAr - São Carlos


Profa. Dra. ALESSANDRA NARA DE SOUZA RASTELLI (Participação Presencial)
Laboratório de Mutagênese e Toxicidade / Faculdade de Odontologia de Araraquara - UNESP

Araraquara, 25 de setembro de 2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa contribui para a sustentabilidade ambiental, combate ao desperdício de alimentos e aumento da segurança alimentar, alinhando-se ao ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis. Também, busca promover a educação ambiental sobre o consumo de alimentos e suas embalagens, além de incentivar parcerias com o setor agroalimentar a fim de impulsionar modelos de negócio inovadores e sustentáveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research contributes to environmental sustainability, the fight against food waste, and the enhancement of food security, aligning with SDG 12 – Responsible Consumption and Production. It also seeks to promote environmental education regarding food consumption and its packaging, as well as to encourage partnerships with the agri-food sector in order to drive innovative and sustainable business models.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	DANIELA VASSALOPEREIRA 17/01/1993
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Pereira, Daniela V. Pereira, D. V.
Endereço profissional	Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Campus de Araraquara Departamento de Química Analítica, Físico-Química e Inorgânica Rua Francisco Degni, 55 Quitandinha, Araraquara – SP CEP 14800-900 Telefone: (16) 3301-9500
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/6223720081176425
ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2233-9649
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2013/2017	Licenciatura em Química Instituto de Química – UNESP, Campus de Araraquara
2018/2021	Mestrado em Química Instituto de Química – UNESP, Campus de Araraquara
PRODUÇÃO DE PATENTE	
PEREIRA, D. V.; RIBEIRO, S. J. L.; SANTOS, W. G.; NOGUEIRA, F. A. R.; BARUD, H. S.; CAVICCHIOL, M. Título da invenção: PROCESSO DE OBTENÇÃO DE FILMES COMPÓSITOS BASEADO EM FIBROÍNA DA SEDA E CELULOSE BACTERIANA ADSORVIDOS DE AZO CORANTE, E SEU USO COMO RÓTULO INDICADOR DE FRESCOR EM EMBALAGENS PARA PRODUTOS CÁRNEOS. Depósito realizado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Número do Processo: BR 10 2025 016185 0. Data do depósito: 01/08/2025.	
PRÊMIO	
Prêmio CRQ – IV 2024 como orientadora da pesquisa na modalidade Ensino Técnico intitulada “Síntese de filmes como alternativa sustentável para aplicação de embalagem ativa antimicrobiana em frutos”.	

PARTICIPAÇÃO EM COMISSÕES ORGANIZADORAS DE EVENTOS
IQ DE PORTAS ABERTAS, 2022. Araraquara – SP.
12TH WORKSHOP PHOTONICS AND ITS APPLICATIONS IN ENERGY, HEALTH, ENVIRONMENT AND AGRICULTURE (NanoAndes), 2023. Araraquara – SP.
PARTICIPAÇÃO EM AVALIAÇÕES
Avaliação de trabalhos em Eventos Científicos
Participação na qualidade de avaliador do XXXIV Congresso de Iniciação Científica da Unesp IQ/Araraquara. Trabalho em forma de pôster. Instituto de Química da Unesp, Araraquara – SP, 2022.
Participação na qualidade de avaliador do XXII Simpósio da Base Experimental das Ciências Naturais (BECN) do Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia (BC&T). Trabalho em forma de vídeo. Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André – SP, 2023.
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS
LATIN AMERICA OPTICS AND PHOTONICS CONFERENCE (LAOP), 2022, (Recife – PE). Anti-counterfeiting strategy based on rare earths and biopolymers. 2022. (Apresentação de pôster).
REUNIÃO REGIONAL DO INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE FOTÔNICA (INFO), 2023, (Ribeirão Preto – SP). Biomaterial based on silk fibroin and bacterial cellulose. 2023. (Apresentação de pôster).
46ª REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA (SBQ), 2023, (Águas de Lindóia – SP). Smart packaging for meat-based products from bacterial cellulose, silk fibroin and curcumin. 2023. (Apresentação de pôster).
SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS (SBPMat), 2024, (Santos – SP). Bioplastic based on silk fibroin, bacterial cellulose, curcumin and silver nanoparticles as an alternative for food packaging. 2024. (Apresentação de pôster).
PARTICIPAÇÃO EM ÓRGÃOS COLEGIADOS E COMISSÕES DA UNESP
Representante discente na qualidade de suplente do Órgão Colegiado do Conselho do Programa de Pós-Graduação em Química da Unesp/Araraquara. Mandato no período de 04/10/2022 a 03/10/2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de concretizar mais um sonho, por ter me sustentado e me guiado nessa jornada. Sou grata à minha família, ao meu companheiro, aos membros da família de quatro patas e aos amigos que sempre estiveram ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sidney José Lima Ribeiro, aos coorientadores Prof. Dr. Hernane da Silva Barud e Prof. Dr. Mauricio Cavicchioli por todo conhecimento compartilhado comigo, levando ao meu crescimento pessoal e profissional. Obrigada por toda paciência e dedicação que se iniciou ainda durante minha graduação em Química na iniciação científica. Vocês foram e são inspiração para que eu tivesse ainda mais vontade de aprender Química e me envolver no mundo da pesquisa.

Ao grupo Fotônicos por ter me acolhido desde o início e me ajudado no uso de equipamentos, dicas para meu trabalho de pesquisa e risadas compartilhadas durante reuniões, eventos e confraternizações do grupo. A Universidade de Araraquara (UNIARA) e a empresa BioSmart Nanotechnology LTDA por toda receptividade ao disponibilizar seu laboratório e equipamentos, auxiliando na construção desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de pesquisa (processo 140853/2021-9).

Ao Instituto de Química – Unesp, campus de Araraquara e a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para me tornar uma profissional melhor.

Muito obrigada!

“Nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

Antoine Lavoisier

RESUMO

A crescente preocupação com o desperdício de alimentos e o impacto ambiental causado por embalagens derivadas de petróleo tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas sustentáveis que contribuam para a conservação dos alimentos. Neste contexto, foram desenvolvidas duas embalagens inovadoras: uma inteligente, com sensor indicador de frescor, e outra ativa, com propriedades antimicrobianas. A embalagem inteligente foi produzida a partir de filmes compostos por fibroína da seda (FS) e celulose bacteriana (CB). Filmes com diferentes porcentagens de FS e CB foram combinados. O aumento da concentração de FS elevou a espessura dos filmes, que apresentaram estruturas com nanofibras e alta área superficial, conforme evidenciado por micrografias de MEV. Espectros de FTIR não indicaram alterações químicas e os ensaios de opacidade e análise mecânica dinâmica revelaram que o filme FS/CB-3 (60% FS e 40% CB) apresentou características adequadas para aplicação como sensor. O uso do corante halocrômico pyrylazo (Pyr) mostrou ser uma boa escolha para compor o sensor indicador de frescor, uma vez que os ensaios de citotoxicidade e mutagenicidade revelaram ser seguros para aplicação desejada. Além disso, o corante mostrou boa interação com os diferentes filmes e composições de FS e CB, com baixa liberação do Pyr para o meio aquoso. As propriedades químicas e halocrômicas do Pyr foram mantidas mesmo após ser inserido no filme FS/CB-3. Testes com aminas biogênicas e produtos cárneos indicaram que o filme FS/CB-3 combinado com o Pyr (FS/CB-3-Pyr) mostrou-se promissor na detecção de componentes voláteis básicos decorrentes da degradação da carne, sendo evidenciada pela sua mudança de cor. Quanto à embalagem ativa, foram desenvolvidos filmes de amido de milho com glicerol (AG) e com adição de semente de abacate *Persea americana* em pó (AGA). Ambos apresentaram características físico-químicas semelhantes quanto à espessura e à permeabilidade ao vapor d'água. Além disso, os espectros de FTIR não mostraram alteração química nos filmes AG e AGA. A adição da semente de abacate contribuiu para maior homogeneidade superficial do filme e proteção à radiação UV, além de conferir atividade antimicrobiana comprovada pela prova de conceito com potencial aplicação na conservação de frutas, como morangos. Conclui-se que o uso de biopolímeros renováveis, como FS, CB, amido de milho e resíduos como a semente do abacate demonstram viabilidade para serem bioplásticos aplicados no desenvolvimento de

embalagens inteligentes e ativas. Tais materiais apresentaram potencial para monitorar e prolongar a vida útil de alimentos, reduzir o desperdício e promover a sustentabilidade na cadeia alimentar.

Palavras-chave: agroindústria, segurança alimentar, biopolímeros; tecnologia de alimentos; sustentabilidade.

ABSTRACT

Growing concern about food waste and the environmental impact of petroleum-based packaging has driven the development of sustainable alternatives that contribute to food preservation. In this context, two innovative packaging solutions were developed: one smart, with a freshness indicator sensor, and the other active, with antimicrobial properties. The smart packaging was produced from films composed of silk fibroin (SF) and bacterial cellulose (BC). Films with different percentages of SF and BC were combined. Increasing the SF concentration increased the thickness of the films, which presented nanofiber structures and a high surface area, as evidenced by SEM micrographs. FTIR spectra did not indicate chemical changes and opacity tests and dynamic mechanical analysis revealed that the SF/BC-3 film (60% SF and 40% BC) presented suitable characteristics for application as a sensor. The halochromic dye pyrylazo (Pyr) proved to be a good choice for the freshness indicator sensor, as cytotoxicity and mutagenicity tests revealed it to be safe for the desired application. Furthermore, the dye demonstrated good interaction with the different SF and BC films and compositions, with low Pyr release into the aqueous medium. The chemical and halochromic properties of Pyr were maintained even after being added to the SF/BC-3 film. Tests with biogenic amines and meat products indicated that the SF/BC-3 film combined with Pyr (SF/BC-3-Pyr) showed promise in detecting basic volatile components resulting from meat degradation, as evidenced by its color change. For active packaging, cornstarch films with glycerol (AG) and with the addition of *Persea americana* avocado seed powder (AGA) were developed. Both presented similar physicochemical characteristics in terms of thickness and water vapor permeability. Furthermore, FTIR spectra showed no chemical alteration in the AG and AGA films. The addition of avocado seeds contributed to greater film surface homogeneity and UV radiation protection, in addition to conferring antimicrobial activity, as demonstrated by the proof of concept, with potential application in the preservation of fruits such as strawberries. The conclusion is that the use of renewable biopolymers such as SF, BC, cornstarch, and waste materials such as avocado seeds demonstrate viability as bioplastics for use in the development of smart and active packaging. These materials have the potential to monitor and extend the shelf life of food, reduce waste, and promote sustainability in the food chain.

Keywords: agroindustry, food safety, biopolymers; food technology; sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	VIDA ÚTIL OU <i>SHELF LIFE</i> DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO	13
1.2	FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA ÚTIL DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO	14
1.3	DESAFIOS ACERCA DOS DESPERDÍCIOS DE PRODUTOS ALIMENTARES	16
1.4	O IMPACTO NA SAÚDE HUMANA DECORRENTE DA INGESTÃO DE ALIMENTOS IMPRÓPRIOS PARA CONSUMO	17
1.5	EMBALAGENS INTELIGENTES E ATIVAS PARA REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS	20
1.5.1	Embalagem inteligente	20
1.5.2	Embalagem ativa	21
1.6	O IMPACTO AMBIENTAL DAS EMBALAGENS UTILIZADAS NAS CADEIAS DE SUPRIMENTOS	22
1.7	BIOPLÁSTICOS COMO SOLUÇÃO AMBIENTALMENTE CORRETA	23
2	OBJETIVOS	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	PREPARO DA EMBALAGEM INTELIGENTE INDICADORA DE FRESCOR	32
3.1.1	Procedimento para obtenção da fibroína da seda	32
3.1.2	Procedimento para obtenção da celulose bacteriana	33
3.1.3	Procedimento para obtenção de filmes biopoliméricos	34
3.1.4	Determinação da espessura dos filmes biopoliméricos	34
3.1.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes biopoliméricos	34
3.1.6	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier dos filmes biopoliméricos	34
3.1.7	Ensaio de opacidade dos filmes biopoliméricos	35
3.1.8	Ensaio mecânicos dos filmes biopoliméricos	35
3.1.9	Preparo da solução do corante halocrômico	35
3.1.10	Ensaio de citotoxicidade de pyrylazo	35
3.1.11	Ensaio de mutagenicidade de pyrylazo	36
3.1.12	Incorporação de corante halocrômico nos filmes biopoliméricos	37

3.1.13	Teste de liberação do pyrylazo	38
3.1.14	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier dos filmes biopoliméricos FS, CB e FS/CB-3 combinados com pyrylazo.....	38
3.1.15	Comportamento colorimétrico do pyrylazo na presença de aminas biogênicas	38
3.1.16	Comportamento colorimétrico do filme FS/CB-3 combinado com pyrylazo na presença de aminas biogênicas	38
3.1.17	Prova de conceito da embalagem inteligente com sensor indicador de frescor – filme FS/CB-3/Pyr.....	39
3.1.18	Teste colorimétrico e microbiológico	39
3.2	PREPARO DA EMBALAGEM ATIVA ANTIMICROBIANA	40
3.2.1	Procedimento para obtenção do filme baseado em amido de milho e glicerol	40
3.2.2	Procedimento para obtenção do filme à base de amido de milho e glicerol com semente de abacate, Persea americana	41
3.2.3	Determinação da espessura dos filmes AG e AGA.....	41
3.2.4	Taxa de Permeabilidade ao Vapor de Água (TPVA) dos filmes	42
3.2.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes AG e AGA	42
3.2.6	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier dos filmes AG e AGA	42
3.2.7	Ensaio de opacidade dos filmes biopoliméricos	42
3.2.8	Prova de conceito da embalagem ativa antimicrobiana – filme AGA ...	42
4	RESULTADOS.....	43
4.1	EMBALAGEM INTELIGENTE INDICADORA DE FRESCOR	43
4.1.1	Determinação da espessura dos filmes biopoliméricos.....	43
4.1.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes biopoliméricos	43
4.1.3	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos filmes biopoliméricos	44
4.1.4	Ensaio de opacidade dos filmes biopoliméricos	46
4.1.5	Ensaio mecânicos dos filmes biopoliméricos	47
4.1.6	Ensaio de citotoxicidade de pyrylazo	48
4.1.7	Ensaio de mutagenicidade de pyrylazo	49
4.1.8	Incorporação de corante halocrômico nos filmes biopoliméricos	50
4.1.9	Teste de liberação do pyrylazo	53

4.1.10	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos filmes biopoliméricos FS, CB e FS/CB-3 combinados com pyrylazo	55
4.1.11	Comportamento colorimétrico do pyrylazo na presença de aminas biogênicas	57
4.1.12	Comportamento colorimétrico do filme FS/CB-3 combinado com pyrylazo na presença de aminas biogênicas	60
4.1.13	Prova de conceito da embalagem inteligente com sensor indicador de frescor – filme FS/CB-3/Pyr.....	60
4.1.14	Teste colorimétrico e microbiológico	62
4.2	EMBALAGEM ATIVA ANTIMICROBIANA	65
4.2.1	Determinação da espessura dos filmes AG e AGA:.....	65
4.2.2	Taxa de Permeabilidade ao Vapor de Água (TPVA) dos filmes	65
4.2.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes AG e AGA	66
4.2.4	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos filmes AG e AGA	67
4.2.5	Ensaio de opacidade dos filmes biopoliméricos	69
4.2.6	Prova de conceito da embalagem ativa antimicrobiana – filme AGA ...	70
5	CONCLUSÃO	73
	PERSPECTIVA	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a sociedade tem se conscientizado a respeito da sustentabilidade ambiental, uma preocupação crescente entre cientistas, produtores e consumidores do setor agroalimentar ^{1,2}. Associada a esse setor, embalagens de alimentos são geradoras de resíduos plásticos e perda de alimentos, criando-se a necessidade de novos materiais sustentáveis e que auxiliem no prolongamento da vida útil dos alimentos.

Em sua maioria, as embalagens para produtos alimentícios têm como função proporcionar o correto armazenamento do produto até o momento do seu consumo. Poucas funcionalidades adicionais têm sido acrescentadas durante a sua história. O prazo de validade de um produto, por exemplo, é medido a partir de testes laboratoriais para se determinar um prazo médio de degradação. Não existe um sistema, na própria embalagem, que determine a qualidade do produto em tempo real^{1,2}.

As embalagens também têm um impacto ambiental muito negativo pois são geradoras de resíduos plásticos com capacidade de reciclagem difícil ou pouco rentável, além de longo tempo de degradação na natureza. Além disso, os consumidores estão cada vez mais preocupados em consumir um produto com boa qualidade sensorial, seguro e que traga benefícios à saúde, além de se preocuparem com os requisitos legais e sustentáveis para o meio ambiente daquele produto e sua embalagem^{1,2}.

Portanto, a obtenção de novos materiais alternativos para embalagens, que sejam sustentáveis e biodegradáveis é altamente desejável. Associada a esses benefícios, a adição de funcionalidades inteligente e ativa a estas embalagens é algo inovador e pode proporcionar uma melhor qualidade ao alimento. Um exemplo de funcionalidade inteligente seria o sensoriamento do alimento com relação à sua validade através de um indicador de frescor e uma funcionalidade ativa por meio de aditivo antimicrobiano inserido na embalagem que reveste o alimento a fim de prolongar sua vida útil².

1.1 VIDA ÚTIL OU *SHELF LIFE* DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO

A RDC 259/2002 da Anvisa trouxe um conjunto de diretrizes para estabelecer a vida útil (em inglês, *Shelf Life*) de um produto alimentício³. Posteriormente revogada

pela RDC nº 727/2022, o novo documento atualizou termos e instruções para rotulagem e determinação de prazo de validade para alimentos⁴. Os documentos citados juntamente com o Guia Para Determinação de Prazos de Validade de Alimentos definem que a vida útil de um produto alimentício compreende o período em que o alimento pode ser armazenado sem ter prejuízo de suas características como sabor, textura e segurança, além disso, deve ser iniciado a partir do momento que o produto foi fabricado, sendo responsável o fabricante por garantir a preservação das características e segurança do alimento no prazo de vida útil declarado no rótulo⁵.

Assim como o prazo de validade deve estar evidente na embalagem, o modo de armazenamento também deve estar descrito a fim de garantir um produto seguro e de boa qualidade no prazo estipulado⁸. A ANVISA não prevê prazo de validade aos alimentos, uma vez que a vida útil do produto está relacionada as práticas produtivas e aos fatores intrínsecos e extrínsecos que está mantido e exposto⁵.

1.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA ÚTIL DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO

Fatores intrínsecos e extrínsecos podem influenciar no prazo de validade dos produtos alimentícios. Compreender e interferir em como esses fatores influenciam na estabilidade dos produtos torna possível estimar o prazo de validade e prolongar sua vida útil de prateleira.

São exemplos de fatores intrínsecos: I) atividade de água (aW) – a água disponível no alimento, quando elevada, pode favorecer o crescimento microbiano e reações físico-químicas; II) potencial redox (Eh) e oxigênio dissolvido – o Eh do alimento determina o quanto está favorável a perder elétrons (oxidar) ou ganhar elétrons (reduzir), assim o uso de diferentes compostos pode interferir no Eh dos alimentos e no tipo de microrganismos que podem se desenvolver (anaeróbios entre +100 e -250 mV, anaeróbios facultativos entre +300 e -100 mV e aeróbios entre +500 -+300 mV); a quantidade de oxigênio presente em alimentos ricos em gordura pode ocasionar a rancidez liberando compostos voláteis indesejados e desagradáveis (*off-flavours*); III) pH/acidez pode ser responsável pela degradação de diversos componentes, por exemplo, algumas vitaminas podem sofrer modificações em meios com baixo pH enquanto outras em meios com pH elevado, além disso o pH do alimento pode interferir na microbiota que irá se desenvolver e na estabilidade de

aditivos como os corantes halocrômicos; meios com pH neutro, próximos a 6,5 a 7,5, favorecem o desenvolvimento de boa parte das bactérias de relevância em alimentos, que ao se multiplicarem pode modificar o pH do meio; IV) qualidade dos ingredientes e das matérias primas – as características físico-químicas, microbiológicas, composição e pureza podem influenciar no prazo de validade; V) composição/formulação – ao incluir ou retirar ingredientes, assim como substituir ou alterar sua concentração pode interferir no prazo de vida útil; VI) presença de microrganismos – são agentes que podem estar presente nos insumos ou no processamento; podem ser usados biotecnologicamente para ampliar a vida útil do alimento e sua multiplicação é favorável, enquanto outros microrganismos podem interferir na qualidade do alimento com mudanças sensoriais, físicas e químicas e, podem prejudicar a segurança do alimento, sendo desfavorável sua multiplicação e, em alguns casos, não sejam inseridos no alimento e/ou processamento ou então controlados de forma que não causem doenças de origem alimentar e não deteriore o alimento colocando em risco a segurança do alimento; VII) estrutura/forma de apresentação (líquido, sólido, semissólido, *in natura*, congelado, picado, inteiro ou moído) podem interferir no prazo de validade, uma vez que as características físico-químicas, assim com a área superficial do alimento foram modificadas; VIII) presença de compostos antimicrobianos – são recursos tecnológicos que podem ser inseridos no produto alimentar ou já estarem presente naturalmente, ampliando a vida útil⁵.

Os fatores extrínsecos incluem: I) processamento – impacta na exposição do alimento, que pode propiciar aumento no crescimento microbiano, perda nutricional e alterações físico-químicas; II) temperatura de processamento e armazenamento – temperaturas mais elevadas contribuem para o aumento da multiplicação de grande parte dos microrganismos e reações químicas, sendo o oposto verdadeiro. Porém, vale ressaltar que alguns microrganismos podem se multiplicar até mesmo em temperaturas baixas <5°C; III) umidade relativa (UR) – possui relação direta com a aW do alimento, o que influencia na multiplicação de microrganismos e na cinética de reação físico-químicas. O alimento perderá água, aW diminuirá, quando mantido em ambiente com UR menor do que o seu e irá absorver água, aW aumentará, quando mantido em meio com UR maior que do alimento; IV) exposição a luz – a luz, especialmente a ultravioleta, pode acelerar o processo de deterioração, além de provocar mudança sensorial e nutricional do alimento. Com a exposição a luz a reação dos radicais livres que levam a degradação da gordura é acelerada, assim como a

estabilização de algumas vitaminas e corantes são fragilizadas; V) embalagem e atmosfera – quanto maior a capacidade de barreira da embalagem melhor a proteção contra os fatores extrínsecos. A atmosfera ao redor do alimento também pode influenciar na vida útil do produto alimentício, pois, microrganismos aeróbios prevalecerão em ambiente com oxigênio, enquanto os anaeróbios se multiplicarão em sua ausência. O oxigênio pode favorecer reações de oxidação-redução que provocam a rancidez, assim gorduras e óleos são susceptíveis a oxidar e liberar hidroperóxidos, aldeídos e cetonas e componentes voláteis desagradáveis⁵.

1.3 DESAFIOS ACERCA DOS DESPERDÍCIOS DE PRODUTOS ALIMENTARES

Não somente as características intrínsecas e extrínsecas do alimento citadas anteriormente são importantes para determinar sua vida útil, mas também o ambiente que é exposto ao decorrer da cadeia produtiva⁵. Em regiões tropicais a perda de produtos é ainda maior, cerca de um terço dos alimentos produzidos em regiões tropicais é estragado ou desperdiçado no início da cadeia de suprimentos antes de chegar ao consumidor final. As altas temperaturas e elevada umidade na ausência da cadeia de frio causam deterioração abiótica pós-colheita (não causada por organismos vivos como bactérias, fungos, insetos), aceleram a deterioração biótica de alimentos e até levam a surtos de doenças transmitidas por alimentos⁶.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) – (em inglês, *United Nations Environment Programme*, UNEP) forneceu o Relatório do Índice de Desperdício de Alimentos 2024. A UNEP é um programa das Nações Unidas com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável e proteger o meio ambiente. No relatório é explorado de forma expandida e volumosa sobre coletas de dados de todo o mundo, com estimativas nacionais e globais, acerca dos resíduos alimentares e possíveis estratégias para redução do desperdício de alimentos em nível global⁷. As informações e orientações contidas no relatório da UNEP caminham em encontro com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) encontrados no site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)⁸, em especial o objetivo 12 – Consumo e Produção Responsáveis, Figura 1 – e o subitem 12.3 descrito a seguir:

“Até 2030, reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial, nos níveis de varejo e do consumidor, e reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento, incluindo as perdas pós-colheita”.



Figura – 1 Objetivo 12, Consumo e produção responsáveis, contido na ODS da ONU para a Agenda 2030.

Fonte: Conecta Basil (2025)⁹.

O Relatório do Índice de Desperdício de Alimentos 2024 fornecido pela UNEP aponta dados alarmantes acerca do desperdício de alimentos. Afirma que todos os anos são descartados US\$ 1 trilhão em alimentos, que gera entre 8 e 10% das emissões globais de gases de efeito estufa (incluindo perda e desperdício)⁷.

No ano de 2022 foram gerados 1,05 bilhões de toneladas de resíduos alimentares, totalizando 132 quilogramas per capita por ano. Cerca de um quinto, 19%, dos alimentos disponíveis para os consumidores são desperdiçados no varejo, nos serviços de alimentação e nos domicílios⁷.

O relatório também destaca que os países mais quentes parecem gerar mais desperdício de alimentos per capita nos domicílios por conta do maior consumo de alimentos frescos contendo partes não comestíveis e à falta de cadeias de refrigeração adequada. Tal refrigeração pode ser falha devido aos refrigeradores domésticos inadequados e as instalações de cadeias de frios durante toda cadeia de suprimentos, afetando a qualidade dos alimentos que chegam nos domicílios do consumidor final⁷.

1.4 O IMPACTO NA SAÚDE HUMANA DECORRENTE DA INGESTÃO DE ALIMENTOS IMPRÓPRIOS PARA CONSUMO

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) as principais doenças transmitidas por alimentos têm origem infecciosa ou tóxica. Alimentos inseguros para consumo podem conter parasitas, vírus, bactérias e substâncias químicas nocivas que podem causar diarreia a câncer, totalizando mais de 200 doenças¹⁰. O artigo da OMS

“Food Safety” afirma que 1 em cada 10 pessoas no mundo adoecem por ingerir alimento contaminado – um total aproximado de 600 milhões de pessoas todos os anos sendo que 420 mil chegam a morrer¹⁰.

Um alimento pode estar impróprio para consumo devido a contaminação de microrganismos, parasitas, vírus, bactérias e substâncias químicas nocivas como exposto pela OMS, mas também pode ser prejudicial à saúde em decorrência de sua deterioração. Alguns alimentos estragados podem liberar aminas biogênicas (AB) e a exposição a essas moléculas também apresenta riscos à saúde humana⁶. As aminas biogênicas fazem parte do grupo de compostos nitrogenados, incluindo as monoaminas feniletilamina, tiramina, triptamina e histamina, além das diaminas putrescina e cadaverina¹¹.

No caso dos peixes e carnes, há formação de aminas biogênicas quando ocorre hidrólise de proteínas por descarboxilação e formação de amônia após hidrólise de proteínas por desaminização pela ação de microrganismos^{11,12}. A descarboxilação acontece via remoção do grupo α -carboxila do aminoácido precursor. Os aminoácidos que estão envolvidos na formação de diversas aminas estão contidos na Tabela 1.

Tabela 1 – O aminoácido a esquerda contribui para a formação da respectiva amina a direita.

Aminoácidos	Aminas
Fenilalanina	Feniletilamina
Histidina	Histamina
Lisina	Cadaverina
Ornitina e agmatina	Putrescina
Tirosina	Tiramina
Triptofano	Triptamina

Fonte: Turna, Chung e McIntyre¹².

As aminas biogênicas podem ser produzidas através de atividades metabólicas normais em microrganismos, plantas, animais e humanos¹². Elas auxiliam no sistema fisiológico do corpo humano como na atividade cerebral em transmissão sináptica, regulação da temperatura, controle da pressão arterial, secreção de ácido gástrico e resposta alérgica^{11,12}. Contudo, quando presente em excesso no corpo, pode acarretar diversos problemas de saúde como dores de cabeça, náuseas, diarreia, crises hipertensivas, erupções cutâneas, febre, vômitos e dor abdominal. Também pode ocorrer a reação de aminas biogênicas com possíveis nitritos presentes na carne processada, produzindo a nitrosoamina que é um composto cancerígeno^{11,12}. Os níveis de toxicidade das AB variam de acordo com a quantidade ingerida e a sensibilidade do ser humano¹¹.

Limites exatos de toxicidade para aminas biogênicas são difíceis de determinar, uma vez que depende dos mecanismos de desintoxicação do indivíduo, assim como a ingestão de álcool e medicamentos que inibem ou atuam nas vias enzimáticas da amina oxidase para desintoxicação dos excedentes de aminas biogênicas. A intoxicação alimentar ocorre quando as enzimas que metabolizam aminas estão com sua capacidade supersaturada ou têm sua habilidade metabólica inibida¹². Logo, ao se referir a intoxicação alimentar por amina biogênica, é importante considerar não apenas a concentração de uma única amina biogênica, mas o conjunto de aminas, quantidade de alimento ingerido, consumo de álcool e medicamentos¹².

As aminas biogênicas, a partir de certos níveis, causam deterioração do alimento, colocando em risco sua segurança e qualidade dos recursos nutricionais que o produto pode oferecer, além dos danos à saúde humana^{2,13}. A histamina e tiramina recebem maior atenção devido ao potencial de toxicidade¹⁴. Além disso, a toxicidade da histamina pode ser aumentada pela presença de outras aminas como cadaverina, putrescina e tiramina, que atuam como potencializadoras de sua toxicidade¹⁵.

A legislação brasileira estabelece limites de histamina para alguns pescados e seus derivados através da Instrução Normativa nº 60/2019 da ANVISA (que foi revogada pela RDC nº 724/22 e IN nº 161/22), o que representa uma pequena porção dos alimentos que podem conter amina biogênica^{16,17}. Diante das dificuldades apresentadas, o setor agroalimentar não encontra respaldo em normas internacionais para limites padronizados de aminas biogênicas em bebidas e alimentos. Porém, mesmo com os desafios acerca da determinação de níveis de aminas considerados tóxicos, a indústria de bebidas e alimentos deve garantir o frescor e segurança do produto para aceitação do consumidor^{1,2}.

Hoje em dia, há possibilidade de detecção de vapores de aminas com espectrometria de massas associada a cromatografia líquida de alta performance ou cromatografia gasosa, contudo são equipamentos caros, com tempo de resposta lento, além de serem robustos e complexos, o que os tornam recursos inadequados para fácil monitoramento em tempo real e de campo^{13,18}.

1.5 EMBALAGENS INTELIGENTES E ATIVAS PARA REDUÇÃO DO DESPERDÍCIO DE ALIMENTOS

Os desafios da alta demanda de uso de embalagens, a deterioração precoce de alimentos e os riscos expostos a saúde humana tem motivado estudos para soluções inovadoras. As embalagens tradicionais derivadas de petróleo apresentam diversas limitações como prazo de validade fixo, não contém propriedades que auxiliem no prolongamento da vida útil do alimento e seu monitoramento de qualidade, além de ser um poluente ambiental¹⁹. A vida útil de alimentos pode ser prolongada e o desperdício minimizado ao inserir o uso de embalagens inteligentes e ativas nas cadeias de suprimentos do setor agroalimentar².

1.5.1 Embalagem inteligente

A embalagem inteligente possui indicadores biológicos ou químicos que podem ser anexados no interior ou exterior da embalagem a fim de indicar a qualidade do alimento, especialmente, durante o armazenamento e transporte^{1,20}. Esses sensores podem detectar variações fisiológicas do alimento por causa da degradação microbiana e química e serem usados como indicador de frescor do alimento através da mudança de cor de corantes orgânicos facilmente visível, de forma rápida e prática para o distribuidor e consumidor do produto^{20,21}.

Corantes que respondem a estímulos são ideais para serem usados em sensores, sendo a incorporação de um cromóforo halocrômico ideal, já que permite a funcionalidade de detecção do sensor com a variação do pH circundante proveniente dos vapores de aminas biogênicas²². Outras moléculas de monitoramento alvo utilizando indicadores que são sensíveis ao pH incluem NH_4 , SO_2 e ácidos orgânicos²⁰.

Para embalagens de carne, um exemplo de indicador de frescor é o corante de pH azul de bromotimol para monitoramento de dióxido de carbono formado como resultado do crescimento microbiano. O elevado nível de dióxido de carbono reage com o corante e ocorre sua mudança de cor. Outros exemplos de corantes são roxo de bromocresol, azul de xilenol, vermelho de cresol, verde de bromocresol, vermelho de metila, vermelho de fenol e alizarina²⁰.

O corante alizarina e amarelo de alizarina têm sido utilizado em polímeros com a proposta de indicador de frescor em embalagens inteligentes para

alimentos^{22,23,24,25}. Assim como o corante amarelo de alizarina, Figura 2, o pyrylazo também apresenta um grupo azo (N=N) em sua estrutura, Figura 3^{26,27}.

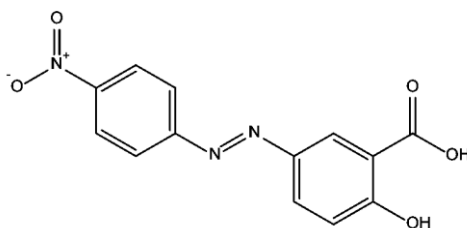


Figura 2 – Representação do azo corante amarelo de alizarina.

Fonte: Chouaybi et al. (2023)²⁶.

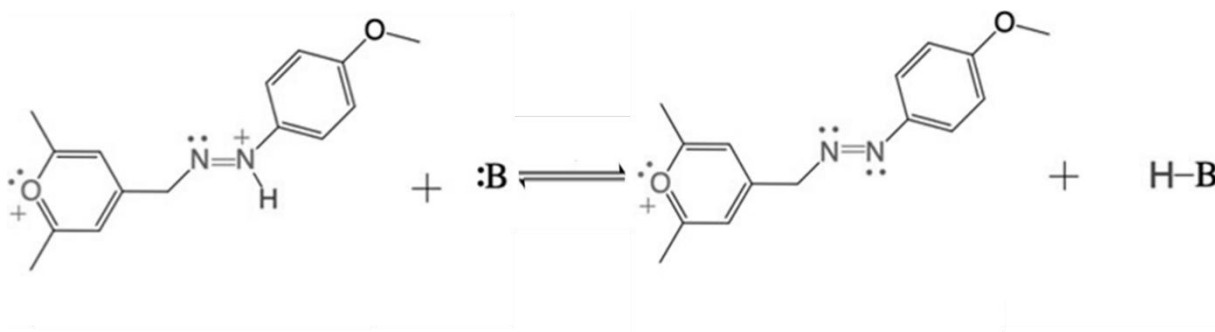


Figura 3 – Representação do azo corante pyrylazo em meio equilíbrio ácido-base, sendo ácido à esquerda e básico à direita. A letra “B” representa a base de Brönsted-Lowry.

Fonte: Santos et al. (2024) – Adaptado²⁷.

O pyrylazo é um azo-corante recém-descoberto e pode ser uma alternativa interessante para dar funcionalidade indicadora de frescor as embalagens inteligentes emergentes. O pyrylazo possui propriedade halocrômica, cor vermelha em meio ácido/neutro e amarelo em meio básico, além de haver estudos que indicam sua mudança de coloração em presença de diversas aminas²⁷. O presente trabalho adotou o uso do corante pyrylazo como estratégia para desenvolver um sensor indicador de frescor para embalagens de produtos cárneos.

O uso de um sensor indicador de frescor pode auxiliar no monitoramento da qualidade do alimento e detectar possíveis falhas no armazenamento das cadeias de frios, auxiliando a prevenir desperdício e oferecendo produtos alimentares mais seguros.

1.5.2 Embalagem ativa

Em concordância com as preocupações em ofertar alimentos seguros, com boa qualidade nutricional e minimamente processados, a embalagem ativa corrobora para alcançar o oferecimento inovativo de uma embalagem que vai além da abordagem de uma embalagem convencional para alimentos. A embalagem ativa possui não

somente função de proteção contra poeiras, umidade, luz, gases e outros contaminantes, mas também aditivos que auxiliam no prolongamento da vida útil do alimento²⁰.

Há dois tipos de embalagens ativas, com sistemas absorvedores e emissores. Embalagens com sistemas absorvedores têm a função de deter os principais compostos, dióxido de carbono, oxigênio, água e etileno, que propiciam a degradação do alimento e podem estar em contato com o alimento ou na atmosfera interna da embalagem. As embalagens com sistemas emissores contêm substâncias como aditivos conservantes, antioxidantes e antimicrobianos que são liberados de forma gradativa^{20,28}.

O uso de aditivos antimicrobianos naturais tem sido explorado para o desenvolvimento de embalagens ativas antimicrobianas, como óleos essenciais de alecrim, alho e orégano, além de extratos de plantas e até mesmo resíduos como a semente do abacate^{29,30,31,32}.

A semente do abacate *Persea americana*, contém em sua composição compostos fenólicos e ácidos graxos insaturados (oleico, linoleico e linolênico) que contribuem para a propriedade antimicrobiana. Além disso, o caroço é considerado um subproduto, sendo descartado após o uso da polpa do fruto, gerando toneladas de resíduos^{33,34}. A semente de abacate é originária do México, mas também é encontrado em várias regiões do Brasil e foi selecionada como ótima opção para aditivo antimicrobiano no desenvolvimento da embalagem ativa do presente trabalho.

1.6 O IMPACTO AMBIENTAL DAS EMBALAGENS UTILIZADAS NAS CADEIAS DE SUPRIMENTOS

A Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (em inglês, *Organisation for Economic Cooperation and Development*, OECD) alerta que o uso crescente de plásticos e seu descarte inadequado é um grande desafio ambiental³⁵. O aumento da conscientização sobre a preservação dos recursos naturais e o crescimento sustentável tem levado os consumidores a fazerem escolhas mais conscientes e ecologicamente responsáveis ao adquirir produtos. Alinhada as preocupações ambientais, a OECD tem buscado informar e apoiar medidas econômicas, financeiras, comerciais, sociais e ambientais que auxiliem na superação do desafio gerado pelos plásticos derivados de petróleo³⁵.

De acordo com a OECD, sem políticas mais rígidas, a quantidade de plásticos produzidos continuará a aumentar em todo o mundo e permanecerá a superar o crescimento populacional global. A produção e o uso global de plásticos em 2020 foi de 435 Mt, sendo que podem ter um aumento de 70% até 2040, atingindo a marca de 736 milhões de toneladas³⁶.

O uso de embalagens convencionais à base de petróleo para alimentos contribui significativamente para o aumento dos resíduos plásticos. Além disso, essas embalagens oferecem proteção limitada contra fatores químicos, físicos e biológicos, o que agrava o problema da perda de alimentos com vida útil curta, sendo ainda uma questão relevante no setor⁶.

1.7 BIOPLÁSTICOS COMO SOLUÇÃO AMBIENTALMENTE CORRETA

Alinhada a ideia de oferecer e consumir alimentos saudáveis e seguros, o uso de bioplásticos como alternativa sustentável para produção de embalagens ecologicamente corretas vem atraído a atenção no setor agroalimentar. Os bioplásticos são produtos poliméricos produzidos a partir de fontes naturais e recursos renováveis e alguns desses materiais, em condições adequadas, podem ser biodegradáveis e/ou compostáveis. A síntese desses materiais envolve comumente o uso de proteínas, óleo vegetal, celulose e amido³⁷.

Os bioplásticos são um subconjunto dos biopolímeros, que por sua vez são definidos como polímeros que poder ser biodegradado pela ação enzimática de micróbios². Os biopolímeros surgiram da crescente preocupação para o desenvolvimento de materiais verdes e sustentáveis devido à reserva limitada de petróleo e em contrapartida a alta demanda de seus resíduos plásticos nocivos ao meio ambiente^{1,38}.

Já foi relatado que plásticos provenientes de petróleo é o terceiro maior acumulador de resíduos urbanos e apenas 3% são de fato reciclados. O efeito tóxico do acúmulo ou incineração desses plásticos e os novos requisitos para uma embalagem mais sustentável levou a busca de bioplásticos ou recursos biodegradáveis³⁹.

A biodegradabilidade está relacionada à estrutura química do material formado e não com a sua origem. Assim, o tipo de ligação química define o período de biodegradação. Polímeros naturais que contém carbono na estrutura, como lignina,

queratina, celulose, gelatina e amido são considerados biodegradáveis ou compostáveis³⁰.

A oxidação enzimática de grupos hidroxilas proporciona a formação de grupos carbonila, causando a clivagem na cadeia polimérica, que por sua vez diminui a massa molar. Esses compostos de baixo peso molecular são mais facilmente degradados pelas enzimas. Heteropolímeros, com átomos diferentes do carbono, são mais propensos a biodegradação por serem mais susceptíveis a hidrólise, o que leva a menor peso molecular dando aos microrganismos mais locais de ataque³⁰. A Figura 4 mostra um esquema que ilustra o mecanismo de degradação de produtos bioplásticos através de microrganismos.

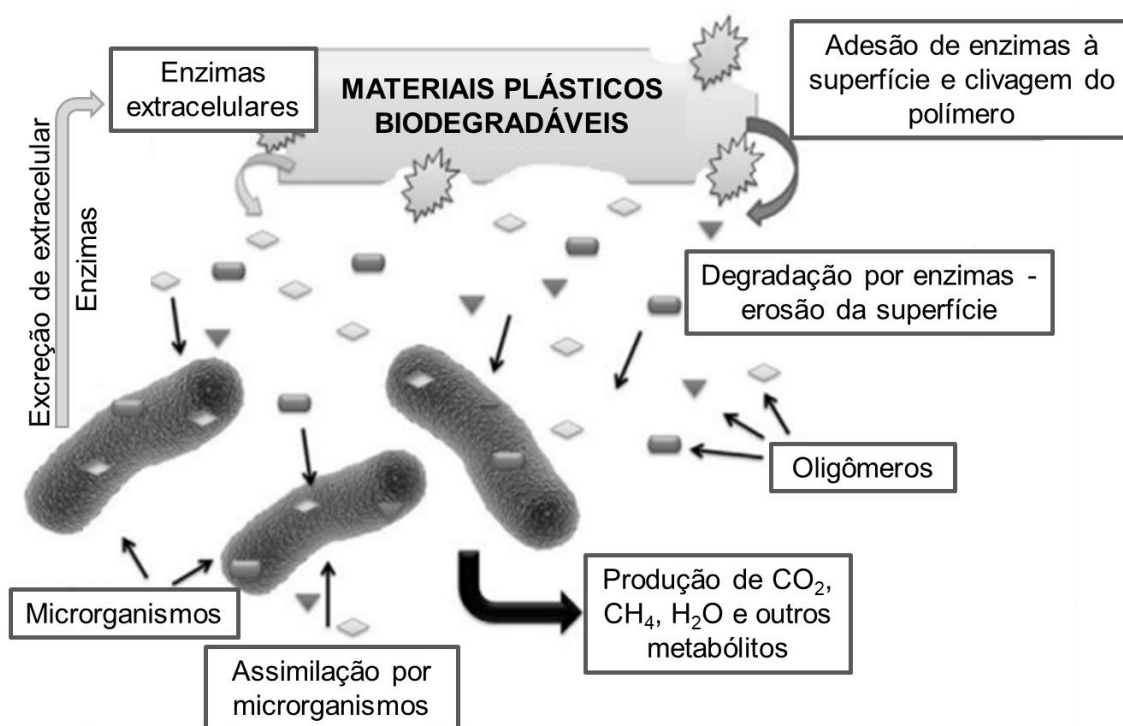


Figura 4 – Esquema geral do mecanismo de degradação de produtos plásticos através de microrganismos.

Fonte: Asgher et al. (2020) – Adaptado³⁰.

Compósitos a base de fibras naturais e biopolímeros têm sido vistos como boa alternativa de materiais sustentáveis, além de apresentarem propriedades muito atrativas. A resposta mecânica desses materiais é fundamental, uma vez que sua durabilidade, flexibilidade, resistência e tenacidade são fatores importantes para um bom desempenho da embalagem^{29,38}.

Um biomaterial muito versátil é a celulose bacteriana (CB), Figura 5, sendo um material natural nanofibrilar extrudado e feito por bactérias unicelulares que utilizam a

energia química proveniente de substratos renováveis. Também tem a vantagem de ser um biopolímero puro, sem necessidade de extração e purificação como outros biopolímeros, além disso possui estabilidade térmica, resistência mecânica e biocompatibilidade. As fibras da CB são formadas por uma rede tridimensional altamente porosa, e de elevada área superficial^{39,40,41}.



Figura 5 – Celulose bacteriana entumecida em água.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A CB possui duas regiões: cristalina e amorfa. A primeira apresenta filamentos de celulose altamente ordenados e de forma paralela. A segunda consiste em fibras ordenadas aleatoriamente. A presença de regiões cristalinas favorece a resistência à tração e sua estrutura, Figura 6, permite alta capacidade de retenção de água entre 95 e 98%, o que permite a inserção de substâncias hidrossolúveis⁴¹.

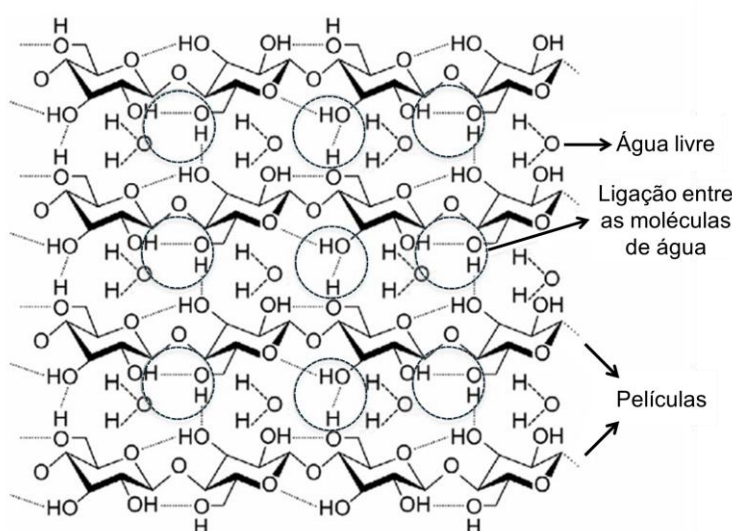


Figura 6 – Estrutura química da CB e sua organização com ligações de moléculas de água e água livre.

Fonte: Girard; Chaussé; Vermette (2024) – Adaptado⁴¹.

Diversas bactérias são produtoras de celulose, entre elas os gêneros *Sarcina*, *Komagataeibacter*, *Acetobacter*, *Gluconobacter*, *Rhizobium* e *Agrobacterium*. O meio de cultura mais usado para a produção de CB é o meio Hestrin e Schramm, com glicose, peptona e extrato de levedura, que servem como fontes de carbono e nitrogênio a serem metabolizados pelas bactérias a fim de produzir a CB^{39,41}.

A CB é formada por longas cadeias de unidades de β -D-glucopiranosose ligadas entre si por ligações glicosídicas β 1-4, deixando livre em sua superfície um grupo hidroxila³⁵. Esses grupos hidroxilas reativos permitem diferentes funcionalizações e seu baixo custo e relativa simplicidade de produção a torna um ótimo material para sensores de embalagens inteligentes^{39,41}.

Outro biomaterial muito atrativo para sensores de embalagens inteligentes é a fibroína da seda (FS), um material natural fibroso e com excelente biocompatibilidade, baixa toxicidade, degradabilidade ajustável e transparente na região do visível^{42,43,44}. A FS pode ser produzida por diferentes artrópodes, como bichos-da-seda, aranhas, vaga-lumes, crisopídeos e ácaros⁴⁵.

A FS proveniente do casulo produzido pelo bicho-da-seda *Bombyx mori* é comumente utilizada devido ao maior rendimento de fibras, Figura 7⁴⁵. O casulo é formado por duas proteínas, a FS e a sericina. A FS é uma proteína fibrosa e um componente estrutural semicristalino que confere rigidez e resistência, já a sericina é uma proteína amorfa que mantém as fibras da FS juntas. Ao remover a proteína sericina da seda, a FS passa a ser imunologicamente inerte e possui baixo potencial inflamatório^{42,43,46}.



Figura 7 – Casulos provenientes do bicho-da-seda.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A FS é um copolímero formado por uma cadeia leve e uma pesada que se conectam por uma ligação de dissulfeto ($-S-S-$). Os principais aminoácidos presente na FS são glicina (Gli) com 43%, alanina (Ala) com 30% e serina (Ser) com 12% além de tirosina (Tir) e valina^{42,46,47,48}.

A cadeia pesada tem uma estrutura primária com 12 domínios hidrofóbicos que se repetem e são separados por 11 regiões hidrofílicas curtas. A estrutura secundária é determinada pelos domínios hidrofóbicos. Mais detalhadamente, a cadeia pesada possui uma sequência de seis aminoácidos Gly-Ala-Gly-Ala-Gly-Ser e repetições de Gly-Ala/Ser/Tir com possibilidade de formação de cristais anti-folha paralela^{42,46,47,48}.

Em contrapartida, a cadeia leve não apresenta repetição o que lhe confere um caráter hidrofílico e levemente elástico. A FS possui duas estruturas cristalinas principais, seda I e seda II. A seda I apresenta um sistema ortorrômbico e uma estrutura metaestável. A seda II apresenta um sistema monoclinico e uma estrutura anti-folha paralela. As ligações de hidrogênio aos segmentos adjacentes são majoritariamente responsáveis pela resistência e tração da FS⁴⁸.

A Figura 8 ilustra a estrutura química da FS e sua organização com interações intramoleculares (circulado em azul) e intermoleculares (circulado em laranja).

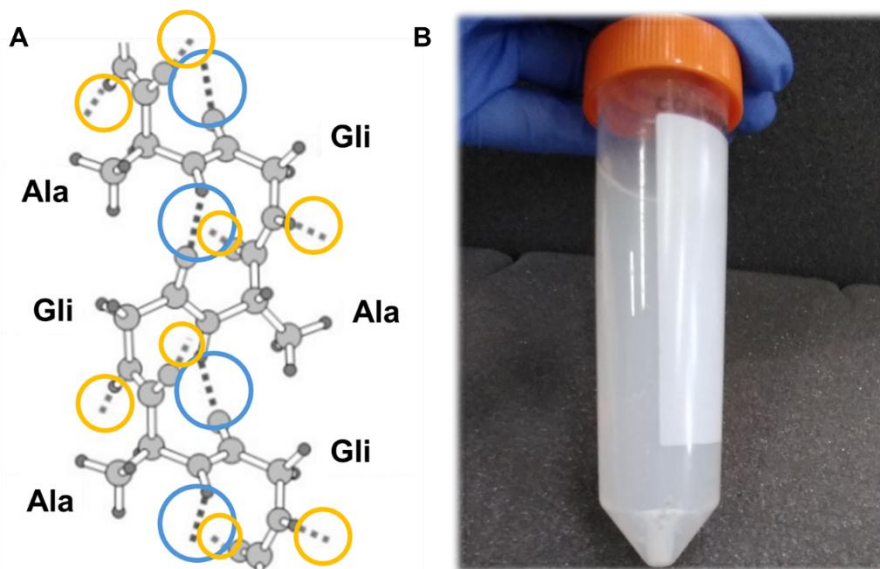


Figura 8 – (A) Estrutura química da FS e sua organização com interações intramoleculares e intermoleculares; (B) imagem da solução de FS após ser dissolvida em mistura de solvente água, etanol e cloreto de cálcio e dialisada em água.

Fonte: Asakura (2021) – Adaptado⁴⁷; Imagem contida na Figura 7 (B) foi elaborada pela autora (2025).

Além disso, a formação da seda I e II dependem do processo, sendo a seda I uma estrutura secundária amorfa e solúvel em água composta principalmente de α

hélice e espirais aleatórias, e seda II, caracterizada pela presença de ao menos 55% de estruturas de folha β antiparalelas cristalinas^{42,48}.

O processamento da FS pode induzir o rearranjo da proteína de α hélice para estruturas de folha β e a partir da formação de ligações de hidrogênio, os domínios hidrofóbicos da cadeia pesada podem formar folha β antiparalelos cristalinos. Assim, as propriedades mecânicas e biodegradabilidade são promissoras para uso em embalagens inteligentes, uma vez que podem ser ajustadas de acordo com a quantidade de folhas β presentes, dando um caráter mais rígido e resistente a degradação de acordo com o aumento de folhas β ^{42,45}.

Além disso, há estudos que mostram um sinergismo das propriedades físico-químicas ao combinar a CB como reforço a materiais feitos à base de FS^{49,50}. Diante das excelentes propriedades físico-químicas apresentadas pelos biopolímeros CB e FS, ambos foram escolhidos para serem estudados como matriz polimérica do bioplástico e para a inserção do corante halocrômico pyrylazo a fim de desenvolver um sensor indicador de frescor. A Figura 9 ilustra a embalagem inteligente indicadora de frescor desenvolvida no presente trabalho.

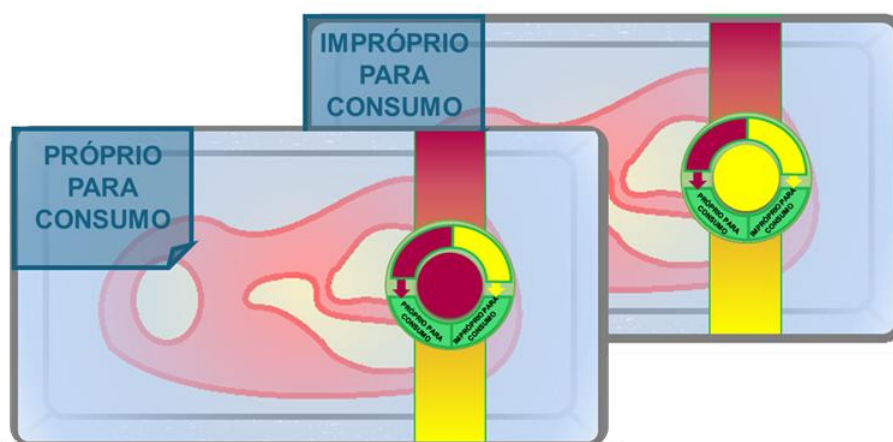


Figura 9 – Ilustração da embalagem inteligente com sensor indicador de frescor de produto cárneo através da mudança de cor, roxo para amarelo, sendo próprio e impróprio para consumo, respectivamente.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Estudos também demonstram o uso de amido de diversos materiais vegetais para embalagens de alimentos como alternativa sustentável aos plásticos derivados do petróleo⁵¹. O amido é um polissacarídeo vegetal, com ótima relação custo-benefício, abundância e propriedades que levam a formação de filme^{30,51}. Esse polissacarídeo é formado por unidades de glicose, amilopectina e amilose conforme ilustrado na Figura 10.

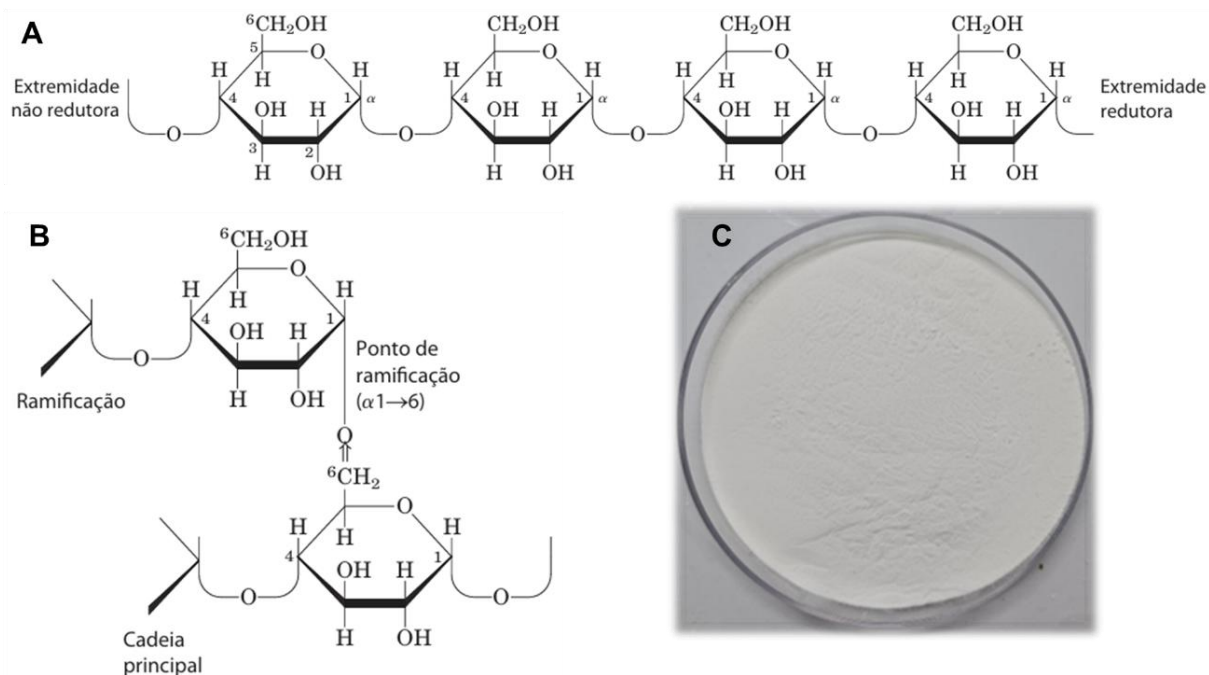


Figura 10 – Estrutura do amido com as cadeias de (A) amilose e (B) amilopectina; (C) imagem de amido de milho em pó.

Fonte: Nelson e Cox (2023)⁵²; Imagem contida na Figura 8 (c) foi elaborada pela autora (2025).

Os filmes e revestimentos feitos de amido possui matriz predominantemente amorfa e grupos -OH livres, com possibilidade de funcionalização e combinação de aditivos naturais. Estudos demonstram o desenvolvimento de filmes de amido com adição de ervas, frutas, vegetais, óleos essenciais e sementes como reforço estrutural e/ou propriedades antimicrobianas⁵¹.

Para ter bom desempenho e boa aceitação no mercado, algumas propriedades dos filmes, tais como: barreira ao vapor de água, barreira a gases, solubilidade em água, capacidade de alongamento e resistência à tração são muito importantes. Dessa forma, a adição de aditivos plastificantes, como o glicerol, é feita a fim de melhorar essas propriedades físicas e mecânicas^{53,54}.

O glicerol, cujo nome comercial é glicerina, é comumente utilizada como reforço para as propriedades do filme com base de amido de milho, pois é um aditivo plastificante capaz de proporcionar boa qualidade no filme biodegradável a ser desenvolvido. Além disso, se trata de uma matéria prima renovável capaz de promover melhorias na estrutura de polímeros rígidos e quebradiços como no caso dos filmes de amido de milho^{54,55}.

Aditivos naturais com propriedades antimicrobianas combinados com amido estão em foco para o desenvolvimento de embalagens ativas⁵¹. Assim, o amido foi escolhido para compor a matriz polimérica do bioplástico, o glicerol como plastificante

e, como exposto anteriormente, a semente do abacate *Persea americana* como funcionalização antimicrobiana para o desenvolvimento da embalagem ativa do presente trabalho. A Figura 11 ilustra a embalagem ativa antimicrobiana desenvolvida no presente trabalho.

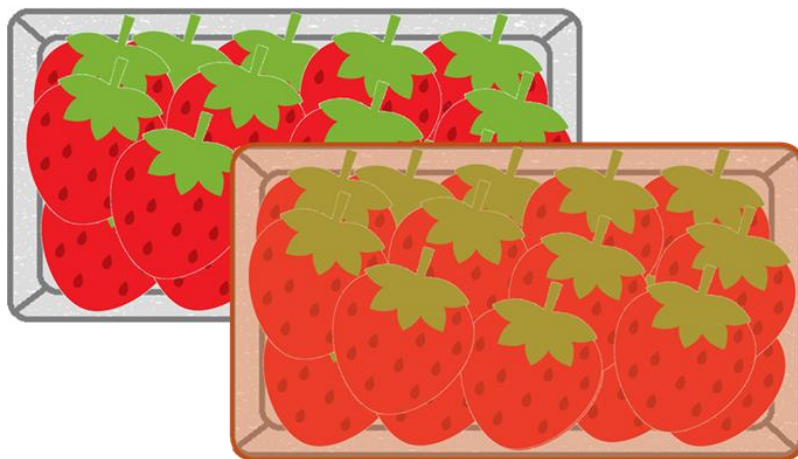


Figura 11 – Ilustração da embalagem ativa com função antimicrobiana, contendo um filme na parte superior da embalagem com propriedade antimicrobiana para aplicação em frutos.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

5 CONCLUSÃO

A crescente preocupação com o desperdício de alimentos e o acúmulo de resíduos de embalagens à base de petróleo levou a uma busca crescente por embalagens sustentáveis que prolonguem a vida útil dos produtos. Para ajudar a superar esses problemas, duas embalagens foram desenvolvidas, uma inteligente como sensor indicador de frescor e outra ativa com atividade antimicrobiana.

Para o desenvolvimento da embalagem inteligente como sensor indicador de frescor é possível afirmar que o filme de FS apresentou maior espessura em relação ao filme de CB, além disso, para as combinações desses biopolímeros, FS/CB-1, FS/CB-2 e FS/CB-3, apresentou maior espessura conforme maior quantidade de FS presente no filme. As micrografias de MEV indicaram que os biopolímeros FS/CB-1, FS/CB-2 e FS/CB-3 possuem nanofibras em suas estruturas e alta área superficial. Os espectros de FTIR dos filmes FS/CB-1, FS/CB-2 e FS/CB-3 não apresentaram formação de novas bandas quando comparados aos polímeros individuais (filmes puros de FS e CB), sugerindo que não houve mudança química dos materiais precursores e que, provavelmente, as propriedades de biodegradação e compostagem foram mantidas.

A partir do ensaio de opacidade foi possível notar que o aumento no teor de CB elevou a opacidade, de modo que o inverso também ocorreu considerando o teor de FS adicionado na composição dos filmes. Por meio dos ensaios de DMA o filme FS/CB-3 (60% FS e 40% CB) apresentou menor rigidez, o que o tornou uma boa alternativa para compor o sensor indicador de frescor. Ao selecionar o corante halocrômico, pyrylazo, para compor o sensor indicador de frescor, procedeu-se com ensaios de citotoxicidade e mutagenicidade, o que revelou resultados seguros para aplicação em embalagens de alimentos.

As curvas de absorbância cinética do pyrylazo ao ser inserido nos filmes biopoliméricos mostrou maior velocidade e interação com o filme de FS em comparação ao filme de CB. Ao considerar o mesmo tamanho para todos os filmes, as amostras de FS/CB-1, FS/CB-2e FS/CB-3 apresentaram maior velocidade de adsorção do corante quando comparados aos filmes puramente de FS e CB, sugerindo que houve um sinergismo na afinidade do pyrylazo pelos filmes FS/CB-1, FS/CB-2e FS/CB-3. Os testes de liberação do pyrylazo dos filmes biopoliméricos foi positivo, uma vez que revelaram uma baixa liberação do corante.

Os espectros de FTIR dos filmes FS-Pyr, CB-Pyr, FS/CB-3-Pyr e FS/CB-3-Pyr após 6 meses de congelamento não apresentaram mudança química em suas estruturas e possivelmente a biodegradabilidade dos biopolímeros foi mantida, além da CB mostrar ser um reforço estrutural positivo ao ser combinado a estrutura mais frágil da FS. Testes colorimétricos da solução de pyrilazo e do filme FS/CB-3-Pyr em presença de aminas biogênicas foi realizado e revelou que a propriedade halocrômica do corante foi mantida ao ser inserido ao filme FS/CB-3. A prova de conceito do filme FS/CB-3-Pyr, como sensor indicador de frescor, indicou que a sensibilidade ao pH foi mantida sob condições simuladas de armazenamento em presença de amostras reais de produtos cárneos.

Além disso, o teste colorimétrico combinado ao microbiológico indicou que o sensor proposto tem sua coloração modificada conforme há o aumento de compostos voláteis básicos e que, por sua vez, são originados do aumento do metabolismo e crescimento microbiano. O conjunto de estudos descritos mostrou que o desenvolvimento do sensor indicador de frescor, FS/CB-3-Pyr, tem potencial para ser uma alternativa sustentável e eficaz para o monitoramento do frescor de produtos cárneos.

Em relação a embalagem ativa antimicrobiana, pode-se afirmar que os resultados de espessura e taxa de permeação ao vapor de água foram semelhantes para ambos os filmes sintetizados, AG e AGA. Micrografias de MEV revelaram que a adição da semente de abacate em pó ao filme de AG contribuiu para uma superfície mais homogênea. Os espectros de FTIR mostraram que nenhum novo grupo funcional foi formado quando a semente de abacate em pó foi combinada com o filme de AG, sugerindo que a biodegradabilidade e as propriedades antimicrobianas foram mantidas.

O teste de opacidade indicou menor absorção de radiação UV no filme de AGA devido à adição da semente de abacate em pó, *Persea americana*. Além disso, a Prova de Conceito demonstrou a potencial atividade antimicrobiana do filme de AGA. Os materiais recém-desenvolvidos, AG e AGA, podem ser classificados como bioplásticos e os resultados corroboram que o filme de AG é uma alternativa sustentável aos plásticos à base de petróleo. Além disso, ao combinar sementes de abacate (*Persea americana*) ao filme de AG, obteve-se um material promissor, o AGA, para ser aplicado como bioplástico em embalagens de frutas com atividade antimicrobiana, a fim de prolongar a vida útil de frutas como morangos.

Dessa forma, a investigação de diferentes matérias-primas biopoliméricas mostraram potencialidades para compor bioplásticos a partir de fontes renováveis, fibroína da seda, celulose bacteriana, amido de milho e resíduos como a semente do abacate. O estudo das características e propriedades dos novos materiais indicaram potencialidades para suas aplicações em embalagens inteligentes e ativas, o que contribui para promover a sustentabilidade ambiental, reduzir o desperdício de alimentos e aumentar a segurança alimentar.

PERSPECTIVA

A fim de compreender e avaliar de forma mais completa a aplicação do sensor indicador de frescor e da embalagem antimicrobiana no mercado é importante seguir com mais estudos físico-químicos e econômico. Entre eles, realizar ensaios de CG-MS para quantificar a concentração mínima de aminas biogênicas, como cadaverina e putrescina, capazes de serem detectadas pelo sensor indicador de frescor. Estudos microbiológicos mais completos acerca da atividade antimicrobiana e ensaios de DMA da embalagem ativa.

Além disso, realizar ensaios de solubilidade e testes para verificar a capacidade de biodegradação e/ou compostagem das duas novas tecnologias. Elaborar um estudo para estimar o custo de produção das tecnologias em nível laboratorial e analisar a escalabilidade. Também é importante ressaltar que há estudos de mercado que revelam que os consumidores estão dispostos a pagar um valor maior para produtos totalmente rastreáveis, ambientalmente corretos e mais seguros⁸⁹.

Além disso, o mercado de embalagens inteligentes e ativas apresenta uma trajetória de crescimento consistente, com estimativas indicando um valor de US\$ 15,43 bilhões em 2025. Considerando uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 6,55%, projeta-se que esse segmento alcance US\$ 21,19 bilhões até o ano de 2030⁸⁹. O sensor indicador de frescor para embalagens inteligentes e a embalagem ativa antimicrobiana são tecnologias promissoras para terem seus estudos continuados e aplicadas no cenário atual e nos próximos anos como forma sustentável de agregar valor ao mercado das embalagens e alimentos, reduzindo o desperdício de alimentos e poluição do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ¹SORO, A. B. et al. Current sustainable solutions for extending the shelf life of meat and marine products in the packaging process. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 29, p. 100722, 2021.
- ²AHARI, H.; SOUFIANI, S. P. Smart and Active food packaging: insights in novel food packaging. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, 2021.
- ³Disponível em:
https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2002/rdc0259_20_09_2002.html. Acesso em 10 de abr.2025.
- ⁴Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-727-de-1-de-julho-de-2022-413249279>. Acesso em 10 de abr.2025.
- ⁵ Guia para determinação de prazos de validade de alimentos. Guia nº 16/2018 – versão 2, de 03 de julho de 2024. Disponível em:
https://anvisa.legis.datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=GUI&numeroAto=00000016&seqAto=REV&valorAno=2024&orgao=ANVISA/MS&cod_modulo=644&cod_menu=9486. Acesso em 10 de abr.2025.
- ⁶HAN, Yangyang et al. Design of biodegradable, climate-specific packaging materials that sense food spoilage and extend shelf life. **ACS nano**, v. 17, n. 9, p. 8333-8344, 2023.
- ⁷UNEP (UN Environment Programme). Food Waste Index Report 2024. 27 mar. 2024. Disponível online em: <https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>. Acesso em 16 fev. 2025.
- ⁸IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível online em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>. Acesso em 16 fev. 2025.
- ⁹Conecta Basil. Conecta Brasil e os ODS da ONU. Disponível online em: <https://conectabrasil.org/home>. Acesso em 16 fev. 2025.
- ¹⁰WHO (World Health Organization). Food safety. 4 out. 2024. Disponível online em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety#:~:text=are%20listed%20below,Bacteria,vomiting%2C%20abdominal%20pain%20and%20diarrhoea>. Acesso em 21 abr. 2025.
- ¹¹DOEUN, D.; DAVAATSEREN, Munkhtugs; CHUNG, Myung-Sub. Biogenic amines in foods. **Food science and biotechnology**, v. 26, p. 1463-1474, 2017.
- ¹²TURNA, N. S.; CHUNG, R.; MCINTYRE, L. A review of biogenic amines in fermented foods: Occurrence and health effects. **Heliyon**, v. 10, n. 2, 2024.

- ¹³MENG, Y. et al. A coumarin-based portable fluorescent probe for rapid turn-on detection of amine vapors. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 262, p. 120152, 2021.
- ¹⁴ROE, A. L. et al. Considerations for determining safety of probiotics: a USP perspective. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 136, p. 105266, 2022.
- ¹⁵CABALLERO, B.; FINGLAS, P.; TOLDRÁ, Fidel. Biogenic Amines: Toxicology and Health Effect. **Encyclopedia of food and health**. Academic Press, 2015.
- ¹⁶DE ALIMENTOS, Gerência-Geral et al. Padrões microbiológicos: perguntas e respostas. 2021. Disponível online em: <http://bibliotecadigital.anvisa.ibict.br/jspui/handle/anvisa/211>. Acesso em 20 jul. 2025.
- ¹⁷ANIVISA. RDC nº 724/22. https://anvisa.gov.br/legis/datalegis.net/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00000724&sgl_tipo=RDC&sgl_orgao=RDC/DC/ANVISA/MS&vlr_ano=2022&seq_ato=002&cod_modulo=310&cod_menu=9434. Acesso online em: 20 jul. 2025.
- ¹⁸WANG, L. et al. Recent advances on reaction-based amine fluorescent probes. **Dyes and Pigments**, p. 109634, 2021.
- ¹⁹SAID, N. S.; LEE, W. Y. Pectin-Based Active and Smart Film Packaging: A Comprehensive Review of Recent Advancements in Antimicrobial, Antioxidant, and Smart Colorimetric Systems for Enhanced Food Preservation. **Molecules**, v. 30, n. 5, p. 1144, 2025.
- ²⁰FANG, Z. et al. Active and intelligent packaging in meat industry. **Trends in Food Science & Technology**, v. 61, p. 60-71, 2017.
- ²¹RODRIGUES, C. et al. Bio-Based Sensors for Smart Food Packaging—Current Applications and Future Trends. **Sensors**, v. 21, n. 6, p. 2148, 2021.
- ²²SCHOOOLAERT, E. et al. Eco-Friendly Colorimetric Nanofiber Design: Halochromic Sensors with Tunable pH-Sensing Regime Based on 2-Ethyl-2-Oxazoline and 2-n-Butyl-2-Oxazoline Statistical Copolymers Functionalized with Alizarin Yellow R. **Advanced Functional Materials**, p. 2106859, 2021.
- ²³EZATI, Parya et al. Intelligent pH-sensitive indicator based on starch-cellulose and alizarin dye to track freshness of rainbow trout fillet. **International journal of biological macromolecules**, v. 132, p. 157-165, 2019.
- ²⁴EZATI, P. et al. CMC and CNF-based alizarin incorporated reversible pH-responsive color indicator films. **Carbohydrate polymers**, v. 246, p. 116614, 2020.
- ²⁵WU, Y. et al. Poly (lactic acid)-based pH responsive membrane combined with chitosan and alizarin for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 214, p. 348-359, 2022.

- ²⁶CHOUAYBI, I. et al. Highly efficient removal of alizarin yellow R dye from aqueous solution using a synthetic hydrocalumite-type LDH (CaAl–NO₃). **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 33, n. 6, p. 1517-1526, 2023.
- ²⁷SANTOS, W. G. et al. Pyrylazo Dye: A Novel Azo Dye Structure with Photoinduced Proton Release and Highlighted Photophysical Properties in Biological Media. **ACS omega**, v. 10, n. 3, p. 2517-2527, 2024.
- ²⁸KADIRVEL, V.; PALANISAMY, Y.; GANESAN, N. D. Active Packaging System—An Overview of Recent Advances for Enhanced Food Quality and Safety. **Packaging Technology and Science**, v. 38, n. 2, p. 145-162, 2025.
- ²⁹JOSHI, M. et al. Fiber and nanofiber based edible packaging for enhancing the shelf life of food: A review. **Food Bioscience**, p. 103970, 2024.
- ³⁰ASGHER, M. et al. Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials. **Food Research International**, v. 137, p. 109625, 2020.
- ³¹ALI, A. et al. Starch-based environment friendly, edible and antimicrobial films reinforced with medicinal plants. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 1066337, 2023.
- ³²WADAY, Y. A.; AKLILU, Ermias Girma. ANN and RSM modeling for the synthesis of avocado seed starch combined orange peel extract antimicrobial packaging film. **International Journal of Polymer Science**, v. 2023, n. 1, p. 8877598, 2023.
- ³³BARBOSA-MARTÍN, E. et al. Chemical and technological properties of avocado (*Persea americana* Mill.) seed fibrous residues. *Food and Bioproducts processing*, v. 100, p. 457-463, 2016.
- ³⁴SOLEDAD, C. T. et al. Avocado seeds (*Persea americana* cv. Criollo sp.): Lipophilic compounds profile and biological activities. **Saudi journal of biological sciences**, v. 28, n. 6, p. 3384-3390, 2021.
- ³⁵OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). Bioplastics. Disponível online em: <https://www.oecd.org/en/topics/plastics.html>. Acesso em 19 jan. 2025.
- ³⁶OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040. Disponível online em: https://www.oecd.org/en/publications/policy-scenarios-for-eliminating-plasticpollution-by-2040_76400890-en.html. Acesso em 19 jan. 2025.
- ³⁷KONG, U.; MOHAMMAD RAWI, N. F.; TAY, Guan Seng. The potential applications of reinforced bioplastics in various industries: A review. **Polymers**, v. 15, n. 10, p. 2399, 2023.
- ³⁸POGGI, G.; CHELAZZI, D.; LAURATI, M. Mechanical response and yielding transition of silk-fibroin and silk-fibroin/cellulose nanocrystals composite gels.

Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, p. 128121, 2021.

³⁹GREGORY, D. A. et al. Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 145, p. 100623, 2021.

⁴⁰CAZÓN, P; VÁZQUEZ, M. Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: a review. **Food Hydrocolloids**, p. 106530, 2020.

⁴¹GIRARD, V. D.; CHAUSSEÉ, J.; VERMETTE, P. Bacterial cellulose: A comprehensive review. **Journal of applied polymer science**, v. 141, n. 15, p. e55163, 2024.

⁴²DEBARI, M. K. et al. Silk Fibroin as a Green Material. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, v. 7, n. 8, p. 3530-3544, 2021.

⁴³PANNEERSELVAM, D.; MURUGESAN, P.; MOSES, J. A. Silk fibroin and prospective applications in the food sector. **European Polymer Journal**, p. 113058, 2024.

⁴⁴CANDIDO, I. CM et al. PVA-silk fibroin bio-based triboelectric nanogenerator. **Nano Energy**, v. 105, p. 108035, 2023.

⁴⁵SUN, W. et al. Silk fibroin as a functional biomaterial for tissue engineering. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 3, p. 1499, 2021.

⁴⁶QI, Yu et al. A review of structure construction of silk fibroin biomaterials from single structures to multi-level structures. **International journal of molecular sciences**, v. 18, n. 3, p. 237, 2017.

⁴⁷ASAKURA, T. Structure of silk I (Bombyx mori silk fibroin before spinning)-type II β -turn, not α -helix. **Molecules**, v. 26, n. 12, p. 3706, 2021.

⁴⁸WANG, H.; ZHANG, Y.; WEI, Z. Dissolution and processing of silk fibroin for materials science. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, n. 3, p. 406 424, 2021.

⁴⁹BARUD, H.G.O. et al. Preparation and characterization of a bacterial cellulose/silk fibroin sponge scaffold for tissue regeneration. **Carbohydrate Polymers**, v. 128, p. 41-51, 2015.

⁵⁰CHOI, Y. et al. Enhanced mechanical properties of silk fibroin-based composite plates for fractured bone healing. **Fibers and Polymers**, v. 14, p. 266-270, 2013.

⁵¹ZHU, F. Starch based films and coatings for food packaging: Interactions with phenolic compounds. **Food Research International**, p. 115758, 2025.

⁵² NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica de Lehninger**. Artmed Editora, 2022.

- ⁵³MOIA, P. J. S. et al. Efeito dos plastificantes sorbitol e glicerol em filmes de gelatina da pele de tambaqui (*Colossoma macropomum*). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 15, n. 2, 2021.
- ⁵⁴NASIR, N. N.; OTHMAN, Siti Amira. The Physical and Mechanical Properties of Corn-based Bioplastic Films with Different Starch and Glycerol Content. **Journal of Physical Science**, v. 32, n. 3, 2021.
- ⁵⁵ANTUNES, L. B. et al. Efeito do glicerol nas propriedades mecânicas de filmes a base de quitosana. **Revista Desafios, Goiania**, v. 6, 2019.
- ⁵⁶DOS SANTOS, R. A. C. et al. Draft genome sequence of *Komagataeibacter rhaeticus* strain AF1, a high producer of cellulose, isolated from Kombucha tea. **Genome announcements**, v. 2, n. 4, p. 10.1128/genomea.00731-14, 2014.
- ⁵⁷OCKWOOD, D. N. et al. Materials fabrication from *Bombyx mori* silk fibroin. **Nature protocols**, v. 6, n. 10, p. 1612-1631, 2011.
- ⁵⁸HAIDER, Z. A.; ARAI, Mitsuo; HIRABAYASHI, Kiyoshi. Mechanism of the gelation of fibroin solution. **Bioscience, biotechnology, and biochemistry**, v. 57, n. 11, p. 1910-1912, 1993.
- ⁵⁹DOMENEGUETTI, R. R. et al. Structural and morphological properties of in-situ biosynthesis of biocompatible bacterial cellulose/Laponite nanocomposites. **Applied Clay Science**, v. 234, p. 106851, 2023.
- ⁶⁰ALMEIDA DA SILVA, T. C. et al. Designing Highly Photoactive Hybrid Aerogels for In-Flow Photocatalytic Contaminant Removal Using Silica-Coated Bacterial Nanocellulose Supports. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 15, n. 19, p. 23146-23159, 2023.
- ⁶¹DOS SANTOS DIAS, D. et al. Large scale manufacturing of puree-only edible films from onion bulb (*Allium cepa* L.): Probing production and structure–processing–property correlations. **Industrial crops and products**, v. 145, p. 111847, 2020.
- ⁶²TEODORO, K. B. R. et al. Fast Fabrication of Multifunctional PCL/Curcumin Nanofibrous Membranes for Wound Dressings. **ACS Applied Bio Materials**, 2023.
- ⁶³PAGE, B.; PAGE, M.; NOEL, C. A new fluorometric assay for cytotoxicity measurements in-vitro. **International Journal of Oncology**, v. 3, n. 3, p. 473–476, 1993.
- ⁶⁴MARON, D. M.; AMES, Bruce N. Revised methods for the *Salmonella* mutagenicity test. **Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects**, v. 113, n. 3-4, p. 173-215, 1983.
- ⁶⁵BERNSTEIN, L. et al. An empirical approach to the statistical analysis of mutagenesis data from the *Salmonella* test. **Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects**, v. 97, n. 4, p. 267-281, 1982.

- ⁶⁶MORTELMANS, K.; ZEIGER, Errol. The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. **Mutation research/fundamental and molecular mechanisms of mutagenesis**, v. 455, n. 1-2, p. 29-60, 2000.
- ⁶⁷ALTMANN, I.; ATZ, N. R.; ROSA, S. ML. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis obtidos a partir de amido de milho: uma proposta experimental de produção de biofilmes em sala de aula. **Química Nova na Escola**, v. 40, n. 1, p. 53-58, 2018.
- ⁶⁸NWAOKOBIA, K. et al. Evaluation of the chemical composition of Persea americana (Mill) pulp and seed. **Journal of Bioscience and Biotechnology discovery**, v. 3, n. 4, p. 83-89, 2018.
- ⁶⁹AGUIRRE-LOREDO, R. Y. et al. Effect of equilibrium moisture content on barrier, mechanical and thermal properties of chitosan films. **Food chemistry**, v. 196, p. 560-566, 2016.
- ⁷⁰ZHANG, H.; Li, L.L.; Dai, F.Y.; Zhang, H.H.; Ni, B.; Zhou, W.; Yang, X. and Wu, Y.Z. Preparation and characterization of silk fibroin as a biomaterial with potential for drug delivery. **Journal of Translational Medicine**, 10, 1, 1-9, 2012.
- ⁷¹CANDIDO, I. CM et al. PVA-silk fibroin bio-based triboelectric nanogenerator. **Nano Energy**, v. 105, p. 108035, 2023.
- ⁷²COELHO, F.; CAVICCHIOLI, M.; SPECIAN, S.S.; CILLI, E.M.; RIBEIRO, A.J. L.; CAMINAGA, R.M.S.; CAPOTE, T.S.O. Silk fibroin/hydroxyapatite composite membranes: Production, characterization and toxicity evaluation. **Toxicology in Vitro**, 62, 104670, 2020.
- ⁷³DE SALVI, D. T.B. et al. Preparation, thermal characterization, and DFT study of the bacterial cellulose: triethanolamine system. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 118, p. 205-215, 2014.
- ⁷⁴GUO, C.; LI, C.; KAPLAN, D. L. Enzymatic degradation of Bombyx mori silk materials: a review. **Biomacromolecules**, v. 21, n. 5, p. 1678-1686, 2020.
- ⁷⁵VICENTE, A. A. et al. Protein-based resins for food packaging. In: **Multifunctional and nanoreinforced polymers for food packaging**. Woodhead Publishing, 2011. p. 610-648.
- ⁷⁶ASHOK, R. B.; SRINIVASA, C. V.; BASAVARAJU, B. Dynamic mechanical properties of natural fiber composites—a review. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, v. 2, p. 586-607, 2019.
- ⁷⁷PATRA, S.; AJAYAN, P. M.; NARAYANAN, T. N. Dynamic mechanical analysis in materials science: The Novice's Tale. **Oxford Open Materials Science**, v. 1, n. 1, p. itaa001, 2021.

⁷⁸MARON, D. M.; AMES, B. N. Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. **Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects**, v. 113, n. 3-4, p. 173-215, 1983.

⁷⁹MORTELMANS, K.; ZEIGER, E. The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. **Mutation research/fundamental and molecular mechanisms of mutagenesis**, v. 455, n. 1-2, p. 29-60, 2000.

⁸⁰ZEIGER, E. Mutagens that are not carcinogens: faulty theory or faulty tests?. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 492, n. 1-2, p. 29-38, 2001.

⁸¹SCHAEFER, E. W. et al. Influence of turmeric incorporation on physicochemical, antimicrobial and mechanical properties of the cornstarch and chitosan films. **International journal of biological macromolecules**, v. 148, p. 342-350, 2020.

⁸²LACERDA, L. G. et al. Thermal, structural and rheological properties of starch from avocado seeds (*Persea americana*, Miller) modified with standard sodium hypochlorite solutions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 2, p. 1893-1899, 2014.

⁸³KAHN, V. Characterization of starch isolated from avocado seeds. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 6, p. 1646-1648, 1987.

⁸⁴SHANBHAG, C. et al. Formulation and characterization of starch-based novel biodegradable edible films for food packaging. **Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 11, p. 2858-2867, 2023.

⁸⁵MERINO, D. et al. Avocado peels and seeds: processing strategies for the development of highly antioxidant bioplastic films. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 13, n. 32, p. 38688-38699, 2021.

⁸⁶LAGARÓN, J.-M. Multifunctional and nanoreinforced polymers for food packaging. In: **Multifunctional and nanoreinforced polymers for food packaging**. Woodhead publishing, 2011. p. 1-28.

⁸⁷Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). RESOLUÇÃO - RDC Nº 724, DE 1º DE JULHO DE 2022. Dispõe sobre os padrões microbiológicos dos alimentos e sua aplicação. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-724-de-1-de-julho-de-2022-413364812>. Acesso em 26 Abri 2025.

⁸⁸Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) Instrução normativa - in nº 161, de 1º de julho de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 06 jul. 2022. Estabelece os padrões microbiológicos dos alimentos. Disponível em: https://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/IN_161_2022_.pdf/b08d70cb-add6-47e3-a5d3-fa317c2d54b2. Acesso em 26 Abri 2025.

⁸⁹Modor Intelligence. Active & Intelligent Packaging Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). Disponível em:

<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/active-and-intelligent-packaging-market-industry>. Acesso em 26 ago 2025.