



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS NATURAIS

ANA PAULA COELHO SAMPAIO

***BIOPOLYMERS+*: ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO
TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL SIMPLIFICADA DE BIOPOLÍMEROS
EM ESTÁGIOS INICIAIS DE DESENVOLVIMENTO**

FORTALEZA – CEARÁ

2024

ANA PAULA COELHO SAMPAIO

BIOPOLYMERS+: ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICA,
ECONÔMICA E AMBIENTAL SIMPLIFICADA DE BIOPOLÍMEROS EM
ESTÁGIOS INICIAIS DE DESENVOLVIMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Ciências Naturais. Área de concentração: Aproveitamento de Recursos Naturais.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

FORTALEZA – CEARÁ

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Estadual do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo SidUECE, mediante os dados fornecidos pelo(a)

Sampaio, Ana Paula Coelho.

Biopolymers+: Abordagem metodológica para avaliação técnica, econômica e ambiental simplificada de biopolímeros em estágios iniciais de desenvolvimento [recurso eletrônico] / Ana Paula Coelho Sampaio. - 2024.
145 f. : il.

Tese (doutorado acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Doutorado Acadêmico - Programa de Pós-graduação Em Ciências Naturais, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof.^a Pós-Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

1. Ecodesign. 2. Tecnologias emergentes. 3. ACV ex-ante. 4. Análise multicritério. 5. Bioplástico. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais

FOLHA DE APROVAÇÃO – DEFESA DE TESE

ALUNO: Ana Paula Coelho Sampaio

TÍTULO: BIOPOLYMERS+: FRAMEWORK PARA A AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL SIMPLIFICADA DE BIOPOLÍMEROS EM ESTÁGIOS INICIAIS DE DESENVOLVIMENTO.

PROFESSOR ORIENTADOR: Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo

BANCA EXAMINADORA:

	CONCEITO	ASSINATURA
Profa. Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo	(EMBRAPA) <u>Satisfatório</u>	
Prof. Dr. Adriano Lincoln Albuquerque Mattos	(EMBRAPA) <u>Satisfatório</u>	
Profa. Dra. Morsyleide de Freitas Rosa	(EMBRAPA) <u>SATISFATORIO</u>	
Prof. Dr. Antônio Genésio Vasconcelos Neto	(EMBRAPA) <u>SATISFATORIO</u>	
Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota	(UFC) <u>SATISFATORIO</u>	

DATA DA APROVAÇÃO: 21 de fevereiro de 2024

HORÁRIO: 08:00 h

LOCAL: Sala Caju da Embrapa Agroindústria Tropical

Dedico este trabalho a Sagrada Família, pela companhia nessa jornada; e aos meus amados pais, Auxiliadora e Assis (*in memorian*), por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Santíssima Trindade, pela determinação, sabedoria e paciência para chegar até aqui, por ter guiado todos os meus passos e pensamentos;

A Santíssima Virgem Maria e a São José, eu agradeço a intercessão constante junto ao Senhor;

Aos meus pais, Auxiliadora e Assis (*in memoriam*), por todo amor, pelo esforço em me garantir uma boa educação e bons exemplos de disciplina e integridade;

Ao meu namorado, Fabrício. Agradeço o apoio, o companheirismo, o cuidado e as inúmeras vezes em que você me disse: “Calma. Vai dar certo!”;

À minha orientadora Dr^a Maria Cléa Brito de Figueirêdo, pela disposição em sempre me ajudar;

A Jéssica, Johnny, Renatinha, Kueirislene e Joana, pela amizade que foi capaz de tornar essa caminhada mais leve;

À Embrapa Agroindústria Tropical pela oportunidade de aprendizado, pelo ambiente que me proporcionou realizar minhas pesquisas e assim desenvolver meu lado profissional;

À UECE e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, pela oportunidade e ensino;

A FUNCAp, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio;

E a todos que contribuíram diretamente ou não para a minha formação, meu muito obrigada.

“Para acabar as coisas, é preciso começar a fazê-las.”

(Sulco, n. 492 - São Josemaría Escrivá)

RESUMO

Ao desenvolver um novo biopolímero, é importante que a equipe de pesquisa considere indicadores técnicos e econômicos, além dos ambientais. A tomada de decisão precoce baseada nesses aspectos evita adaptações e prejuízos nos estágios seguintes de maturidade tecnológica. Esta pesquisa teve como objetivo propor e aplicar uma abordagem metodológica, combinando avaliação do ciclo de vida *ex-ante* (ACV *ex-ante*) e análise multicritério de decisão, no desenvolvimento de um novo biopolímero com desempenho técnico, econômico e ambiental semelhante ao polietileno de baixa densidade (PEBD), a partir de uma revisão crítica da literatura sobre ecodesign de filmes biopoliméricos. A revisão analisou pesquisas sobre a produção de filmes de base biológica aplicados em embalagens e observou que a maioria, se concentra na avaliação técnica de biopolímeros já comercializados, não realizam avaliação de custos, e as poucas avaliações ambientais realizadas não consideram as práticas para a ACV *ex-ante*. A abordagem metodológica foi estruturada em seis etapas: 1) planejamento das avaliações, 2) avaliação de materiais para o novo biopolímero, 3) detalhamento das rotas de produção e aplicação no desenvolvimento do biopolímero, 4) avaliação das rotas produtivas, 5) avaliação das opções de fim-de-vida, e 6) avaliação comparativa entre produtos. A avaliação técnica, econômica e ambiental (ATEA) que compara diferentes materiais, para auxiliar na escolha da formulação, ocorre na etapa dois. As avaliações que comparam diferentes cenários de produção, opções de fim de vida e o novo biopolímero ao similar comercial, ocorrem nas etapas quatro, cinco e seis, respectivamente. A aplicação da abordagem mostrou que a melhor formulação para o novo biopolímero foi a combinação de amido de milho e farinha de amêndoa da manga, como matriz, e glicerol, como plastificante. As ATEAs mostraram que o biopolímero criado possui as propriedades mecânicas similares ao PEBD, sendo uma alternativa ao similar comercial. A abordagem proposta pode auxiliar no desenvolvimento de diferentes biopolímeros, e contribuir para a interpretação e compreensão dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais, visando a sustentabilidade no desenvolvimento de novos bioprodutos.

Palavras-chave: Ecodesign; Tecnologias emergentes; ACV *ex-ante*; Análise multicritério; Bioplástico.

ABSTRACT

When developing a new biopolymer, it is important that the research team consider technical and economic indicators, in addition to environmental ones. Early decision-making based on these aspects avoids adaptations and losses in the following stages of technological maturity. This research aimed to propose and apply a methodological approach, combining ex-ante life cycle assessment (ex-ante LCA) and multi-criteria decision analysis, in the development of a new biopolymer with technical, economic and environmental performance similar to polyethylene. low density (LDPE), based on a critical review of the literature on ecodesign of biopolymeric films. The review analyzed research on the production of bio-based films applied to packaging and observed that the majority focuses on the technical evaluation of already commercialized biopolymers, does not carry out cost assessments, and the few environmental assessments carried out do not consider LCA practices. ex-ante. The methodological approach was structured in six stages: 1) planning the evaluations, 2) evaluating materials for the new biopolymer, 3) detailing the production and application routes in the development of the biopolymer, 4) evaluating the production routes, 5) evaluating the end-of-life options, and 6) comparative assessment between products. The technical, economic and environmental assessment (TEEA) that compares different materials, to assist in choosing the formulation, takes place in step two. Assessments that compare different production scenarios, end-of-life options and the new biopolymer to its commercial counterpart occur in stages four, five and six, respectively. The application of the approach showed that the best formulation for the new biopolymer was the combination of corn starch and mango almond flour, as matrix, and glycerol, as plasticizer. The TEEAs showed that the biopolymer created has mechanical properties similar to LDPE, being an alternative to the commercial similar. The proposed approach can assist in the development of different biopolymers, and contribute to the interpretation and understanding of technical, economic and environmental aspects, aiming at sustainability in the development of new bioproducts.

Keyword: Ecodesign; Emerging technologies; Ex ante LCA; Multi-criteria analysis; Bioplastic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos bioplásticos e plásticos de acordo com suas características.....	18
Figura 2 – Classificação dos biopolímeros de acordo com as suas origens.....	19
Figura 3 – Artigo publicado no periódico <i>Environmental Development</i>.....	31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos níveis de maturidade tecnológica (NMT).....	24
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AHP	Processo de hierarquia analítica
ATEA	Avaliação técnica, econômica e ambiental
GEE	Gases de efeito estufa
HDPE	Polietileno de alta densidade
IUPAC	União internacional de química pura e aplicada
LDPE	Polietileno de baixa densidade
MAVT	Teoria do valor multiatributo
NASA	<i>National aeronautics and space administration</i>
NMT	Níveis de maturidade tecnológica
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PA	Poliamida
PBAT	Polibutileno tereftalato adipado
PBS	Polibutilenosuccinato
PCL	Policaprolactona
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
PHA	Polihidroxialcanoato
PLA	Poliácido láctico
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
TPS	Amido termoplástico
TRL	<i>Technology readiness levels</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Bioplásticos.....	17
3.1.1	Definição e classificação.....	17
3.1.2	Propriedades dos bioplásticos.....	18
3.1.2.1	<i>Base biológica</i>.....	18
3.1.2.2	<i>Biodegradação</i>.....	20
3.1.3	Opções de fim de vida.....	20
3.1.4	Vantagens.....	21
3.1.5	Aplicações dos bioplásticos.....	22
3.2	Desenvolvimento tecnológico: <i>Technology Readiness Levels</i> (TRL)	23
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ex-ante.....	25
3.3.1	Definição de objetivo e escopo.....	26
3.3.2	Inventário de ciclo de vida.....	27
3.3.3	Metodologia para a construção de cenários futuros.....	27
3.4	Análises técnico-econômica-ambientais (ATEAs)	28
3.5	Análise de tomada de decisão multicritério.....	29
3.5.1	Método de soma ponderada.....	30
4	ARTIGOS.....	31
4.1	Artigo 1.....	32
4.2	Artigo 2.....	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
	REFERÊNCIAS.....	103
	APÊNDICES.....	110
	APÊNDICE A – MATERIAL SUPLEMENTAR DO ARTIGO 1.....	110
	APÊNDICE B – MATERIAL SUPLEMENTAR DO ARTIGO 2.....	142

1 INTRODUÇÃO

O ecodesign é uma abordagem metodológica que considera os aspectos ambientais ao conceber e desenvolver um produto, de forma a reduzir os seus impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida (KONG et al., 2022). No entanto, considerando a sustentabilidade de um novo produto, é necessário integrar os aspectos técnicos e econômicos, bem como os ambientais, nas principais etapas de desenvolvimento do produto, através dos níveis de maturidade tecnológica (TRL). Essa integração permite que sejam realizadas alterações no processo ou produto ainda em construção, possibilitar a inovação e a reduzir custos atuais e futuros (MAHMUD et al., 2021).

A preocupação com o esgotamento dos recursos naturais, a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) e a segurança energética têm levado ao desenvolvimento de pesquisas e projetos focados na criação de produtos com foco na economia circular (UBANDO et al., 2020). A princípio, busca-se a substituição dos recursos fósseis, por recursos de base biológica (total ou parcialmente), para a fabricação de bioprodutos, como os biopolímeros. Isso ocorre devido aos possíveis benefícios sociais, ambientais e econômicos associados à produção e ao uso dessas novas tecnologias (BROEREN et al., 2017; JAKES et al., 2016; ALI et al., 2023). No entanto, é necessário avaliar, de forma sistemática, o desenvolvimento dos novos biopolímeros, a fim de comprovar os supostos benefícios, e promover a sua sustentabilidade no meio ambiente.

A avaliação do ciclo de vida ex-ante (ACV ex-ante) considera a baixa maturidade tecnológica do biopolímero no momento da pesquisa, assumindo que o mesmo estará plenamente desenvolvido no futuro. Essa abordagem prevê os potenciais impactos ambientais do novo biopolímero, considerando o uso de dados primários para a composição do inventário, a simulação dos processos em escala industrial, a partir de processos em laboratório, a comparação entre diferentes cenários de produção e tecnologias similares (ARVIDSSON et al., 2018; CUCURACHI et al., 2018; MONI et al., 2020; VAN DER GIESEN et al., 2020). Além disso, para auxiliar nas tomadas de decisão os métodos de análise multicritério têm sido utilizados como apoio nas mais diversas áreas do conhecimento (DIAS et al., 2019; 2016). Petrillo et al. (2022) utilizaram a análise multicritério (método do Processo de Hierarquia Analítica – AHP) para integrar critérios mecânicos, econômicos e ambientais de agregados superficiais usados no setor de construção civil, para avaliar os mais sustentáveis. Já Gwender et al. (2019) buscaram integrar critérios econômicos, ambientais e sociais para avaliar a sustentabilidade da demanda de energia elétrica em residências numa aldeia rural,

atraves da Teoria do Valor Multiatributo (MAVT), outro método de análise multicritério. Reeb et al. (2016) utilizaram a análise estocástica de múltiplos atributos para agregar indicadores de viabilidade técnica, financeira e ambiental para comparar diferentes matérias-primas para a fabricação de açúcar.

Outras abordagens metodológicas para avaliar o desempenho técnico, econômico e ambiental estão disponíveis na literatura, podendo ser adaptadas à pesquisa de um biopolímero. Como exemplo, pode-se citar Wunderlich et al. (2020) que propuseram uma estrutura para orientar na integração dos resultados a partir das avaliações técnico-econômicas e da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando a finalidade das avaliações, a maturidade da tecnologia e a disponibilidade de dados. Além disso, Thomassen et al. (2019) analisaram diferentes métodos de avaliação técnica, econômica e ambiental utilizadas para otimizar processos em estágios iniciais. Falta, no entanto, um modelo que mostre os indicadores a serem utilizados em cada etapa de desenvolvimento do biopolímero, bem como sistematize as avaliações e a comparação do novo biopolímero com outro similar já comercializado.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a construção de uma abordagem metodológica de apoio ao desenvolvimento de biopolímeros com melhor desempenho técnico, econômico e ambiental, quando comparado a produtos comerciais similares. O uso desta abordagem metodológica apoiará a tomada de decisão em etapas iniciais do processo de desenvolvimento sobre qual combinação de materiais e processos utilizar na formulação de biopolímeros, bem como quais indicadores podem ser utilizados para uma avaliação comparativa entre biopolímeros e similares comerciais.

A pesquisa está organizada da seguinte forma: na seção 2 são apresentados os objetivos (geral e específicos). O referencial teórico é apresentado na seção 3. Na seção 4 são apresentados os artigos, tendo sido o 1º (Artigo 1) já publicado e intitulado “*Ecodesign de filmes de base biológica para embalagens de alimentos: Desafios e recomendações*”; e o segundo foi submetido, com o seguinte título “*Uma abordagem para o desenvolvimento sustentável de biopolímeros para embalagens de alimentos em fase inicial de maturidade tecnológica (Biopolymers+)*”. As considerações finais são apresentadas na seção 5, seguida pelas referências e apêndices.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Propor uma abordagem metodológica para a avaliação de bioprodutos, considerando o desempenho técnico, econômico e ambiental, como apoio a tomada de decisão no início do processo de desenvolvimento tecnológico.

2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar revisão crítica sobre ecodesign no desenvolvimento de filmes biopoliméricos;
- b) Propor uma abordagem metodológica para avaliação técnica, econômica e ambiental, em estágio inicial de desenvolvimento tecnológico (níveis de maturidade tecnológica - TRL de 2 a 5) de bioprodutos;
- c) Aplicar a metodologia proposta no desenvolvimento de um biopolímero (TRL 2 e início da 5).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Bioplásticos

3.1.1 Definição e classificação

O termo bioplástico foi definido pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), em 2012, como “um polímero de base biológica derivado da biomassa ou emitido de monômeros derivados da biomassa e que, em algum estágio de seu processamento em produtos acabados, pode ser moldado por fluxo”. Esse termo também foi identificado como o oposto do polímero derivado de recursos fósseis, no entanto, o seu uso foi desencorajado por sugerir que qualquer polímero derivado da biomassa fosse ecologicamente correto (VAN DEN OEVER et al., 2017).

Em 2018, essa definição foi modificada pela *European Bioplastics*, tornando-se mais abrangente e aceita na comunidade científica. Os bioplásticos passaram a abranger materiais de base biológica (independentemente de serem biodegradáveis ou não), materiais biodegradáveis (independentemente de terem ou não origem biológica), incluindo obviamente a interseção (materiais que apresentem essas duas características), e compreendendo um conjunto de materiais com diferentes propriedades e aplicações (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

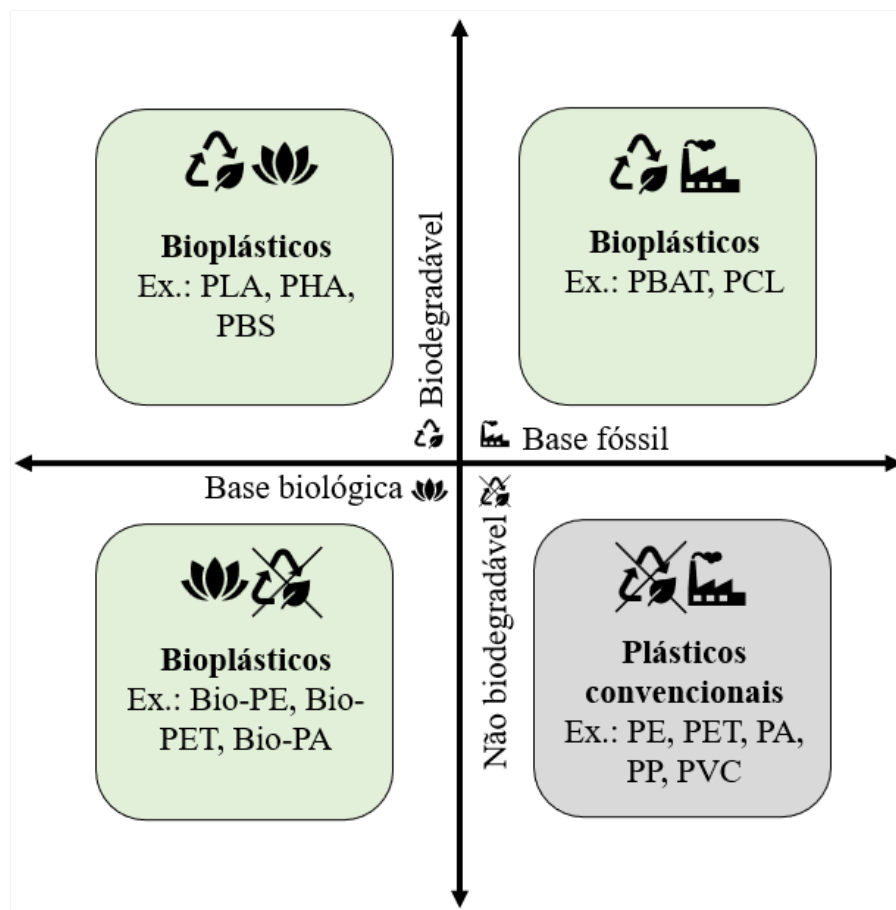
Um bioplástico de base biológica é aquele derivado, parcial ou totalmente, da biomassa ou recursos renováveis; como matérias-primas (ex: milho, mandioca, cana-de-açúcar), resíduos agroindustriais, como bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho (LUZI et al., 2019), ou ainda efluentes utilizados como meio de cultura para processos de base biológica (FERNÁNDEZ-DACOSTA et al., 2015). O bioplástico biodegradável é aquele que pode ser degradado pela ação de microrganismos, como bactérias, fungos e algas, em dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e água (VINAYAGAMOORTHY; VENKATAKOTESWARARAO, 2019).

Com base nestas duas características, um bioplástico pode ser classificado de três formas: i) base biológica, não biodegradável – como o Bio-polietileno (Bio-PE), Bio-polipropileno (Bio-PP) ou Bio-polietileno tereftalato (Bio-PET); ii) de base biológica e biodegradável – como polilático (PLA), polihidroxialcanoato (PHA) ou polibutilenosuccinato (PBS); e iii) baseado em recursos fósseis e biodegradáveis – como o polibutileno tereftalato adipado (PBAT) e o policaprolactona (PCL). Aqueles baseados em

recursos fósseis e não biodegradáveis não são considerados bioplásticos, e são comumente conhecidos como plásticos convencionais. São exemplos de plásticos convencionais o polietileno (PE), o polietileno tereftalato (PET), o polipropileno (PP), a poliamida (PA) e o policloreto de vinila (PVC) (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

A partir desta classificação, observa-se que nem todos os bioplásticos são biodegradáveis, assim como há bioplásticos de base fóssil. A Figura 1 fornece uma representação gráfica dos quatro conceitos apresentados:

Figura 1 - Classificação dos bioplásticos e plásticos de acordo com suas características



Fonte: adaptado de European Bioplastics (2020)

3.1.2 Propriedades dos bioplásticos

3.1.2.1 Base biológica

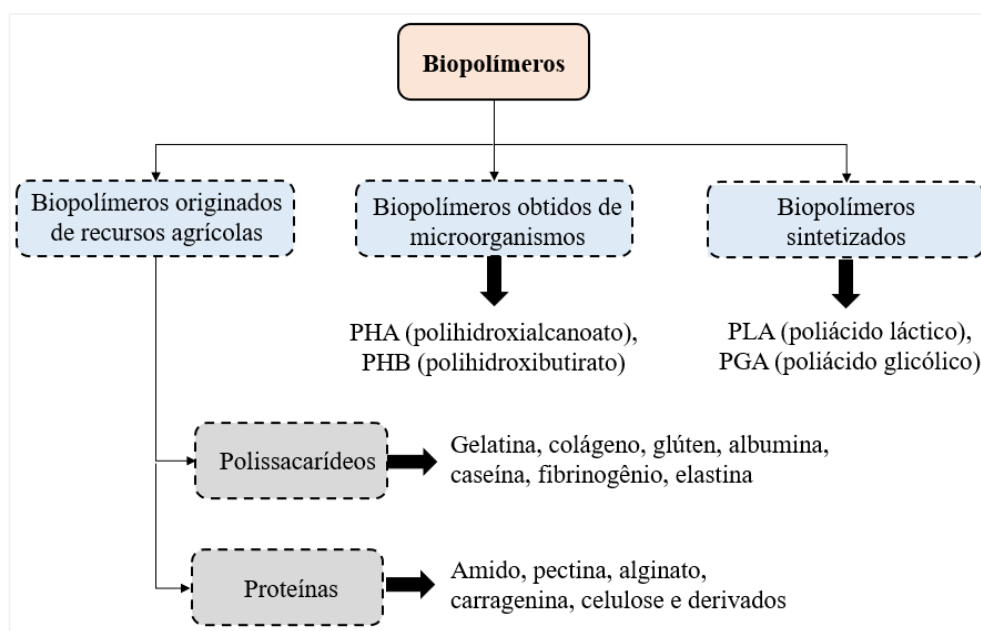
O termo “base biológica” significa que a matéria-prima para a produção do bioplástico é total ou parcialmente derivada da biomassa. Essa matéria-prima é denominada

de biopolímero - um polímero derivado de recursos agrícolas, de microrganismos ou sintetizado a partir de monômeros bioderivados (VINAYAGAMOORTHY; VENKATAKOTESWARARAO, 2019).

Os biopolímeros são classificados de acordo com sua origem e com base em sua própria definição (Figura 2): i) biopolímeros originados de recursos agrícolas – como amido, pectina e biopoliésteres; ii) biopolímeros obtidos por fermentação microbiana – como pululano e polihidroxialcanoatos; e iii) biopolímeros sintetizados quimicamente a partir de monômeros obtidos de uma matéria-prima natural, como o poliácido láctico (PLA) (MEEKS et al., 2015; THAKUR et al., 2018).

Os biopolímeros, por serem originados de fonte renovável, aumentam as opções de materiais para o desenvolvimento de bioplásticos, além de serem (em sua maioria) biodegradáveis ou compostáveis (NEVORALOVÁ et al., 2019).

Figura 2 - Classificação dos biopolímeros de acordo com as suas origens



Fonte: elaborado pela autora.¹

1 A rigor, proteínas não são polímeros, já que, apesar de serem formados por unidades básicas (aminoácidos), a combinação dos aminoácidos não ocorre com o padrão de repetição que caracteriza os “meros” dos verdadeiros polímeros. No entanto, proteínas serão (neste estudo) consideradas como biopolímeros, para fins de simplificação, considerando sua estrutura macromolecular.

3.1.2.2 Biodegradação

Definida como um processo físico, químico e biológico, a biodegradação, resulta da ação natural de microrganismos, que degradam materiais diversos em substâncias mais simples como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e água (H_2O) (MIRI et al., 2021; VAN DEN OEVER et al., 2017). A biodegradação depende de vários fatores ambientais, como a temperatura, pH, níveis de oxigênio e umidade; além das características inerentes ao bioplástico a ser degradado, como por exemplo, estrutura química, peso molecular, cadeia polimérica, grupos funcionais, cristalinidade e da aplicação do mesmo (EMADIAN et al., 2017; THAKUR et al., 2018).

A biodegradação pode acontecer de forma: i) aeróbica – em um ambiente com condições específicas, com alto teor de oxigênio (não inferior a 6%), alta temperatura (entre 60 e 70°C), ambiente úmido (aproximadamente 60%) e pH em torno de 8,5, onde o bioplástico é utilizado pelo microrganismo como fonte de energia e carbono, produzindo principalmente água e dióxido de carbono; e de forma ii) anaeróbica – ocorrendo em um ambiente sem oxigênio, onde os produtos da reação serão água, dióxido de carbono, metano, sulfeto de hidrogênio e amônia (BÁTORI et al., 2018).

3.1.3 Opções de fim de vida

Os bioplásticos não biodegradáveis podem ser reciclados com os plásticos convencionais ou compostados. O problema está no descarte dos bioplásticos biodegradáveis e compostáveis, que necessitam de métodos específicos de reciclagem, por não aderirem aos demais plásticos conhecidos durante o processo de degradação (BARRET, 2018).

A reciclagem mecânica é a opção comumente empregada na disposição dos plásticos convencionais e bioplásticos biodegradáveis. Esse processo promove a degradação do material dentro de um período de tempo, em condições específicas, e por meio de processos mecânicos, como separação, trituração, lavagem e secagem. O material descartado será transformado em grânulos que posteriormente serão reutilizados como matéria-prima na fabricação de novos produtos (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

Já compostagem ou reciclagem orgânica é a opção mais adequada para os bioplásticos compostáveis. Esse processo ocorre de forma gradual, a partir da degradação das fontes de carbono, seguida pela oxidação dos açúcares e álcool e a hidrólise dos polissacarídeos, até a formação de nutrientes. Os bioplásticos podem ser coletados com

resíduos biológicos, para gerar um composto final mais enriquecido em nutrientes, que poderá ser utilizado como fertilizante para novos cultivos (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

Por sua vez, a digestão anaeróbia, ou biodigestão, é uma alternativa para os bioplásticos biodegradáveis ou aqueles que não são bem compostados. Esse processo ocorre em um ambiente sem a presença de oxigênio, onde a decomposição da matéria orgânica resulta em água, dióxido de carbono e biogás (fonte de energia), além de gerar menos emissões de gases de efeito estufa, quando comparado a compostagem (CAZAUDEHORA et al., 2022; FLURY; NARAYAN, 2021).

Visando os bioplásticos como uma alternativa na busca por uma economia circular, antes de buscar por opções de fim de vida é necessário promover as práticas preventivas e de reúso. Deve-se ampliar a capacidade de reutilização desses bioplásticos, através de processos que reduzam o uso de recursos naturais, ao mesmo tempo, em que aumentem o desempenho dos produtos comercializados (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

3.1.4 Vantagens

Os bioplásticos têm como vantagem a possibilidade de utilizar resíduos e subprodutos do setor alimentício como matéria-prima em sua produção. Um exemplo, é a pesquisa de Silva et al. (2021) onde avaliou-se ambiental e economicamente a obtenção de amido a partir da amêndoa da manga, como uma fonte alternativa, possibilitando o aumento da eficiência dos recursos naturais.

Outra vantagem é a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), por causa da substituição da base fóssil pela biológica na produção dos bioplásticos (VENKATACHALAM et al., 2018). Pang et al. (2014) calcularam a pegada de carbono do polipropileno obtido a partir do amido contido em resíduos agrícolas, para a fabricação de bandejas e observaram uma redução de 20% nas emissões de GEE, quando comparado ao polipropileno tradicional, de base fóssil. Já o trabalho de Dilkes-Hoffman et al. (2018) compara as emissões de GEE de duas embalagens de alimentos, uma de polipropileno (PP) e outra sendo um *blend* entre o polihidroxialcanoato e o amido termoplástico (PHA-TPS) onde a substituição da sacola promove a redução das emissões em aterro sanitário, quando se alcança 97% da eficiência na captura do metano.

As propriedades de biodegradação e compostagem dos bioplásticos favorecem a diminuição da poluição e do acúmulo de resíduos, visto que o descarte dos plásticos

convencionais ao final de sua vida útil é um problema mundial, devido ao acúmulo nos lixões (SINTIM et al., 2019). Hottle et al. (2017) analisaram alguns bioplásticos (PLA, TPS, Bio-PET, Bio-HDPE e Bio-LDPE), com relação a sua destinação final (reciclagem, compostagem e aterro sanitário), seguindo as etapas da Avaliação do Ciclo de Vida. Os resultados das análises mostraram que a compostagem dos bioplásticos é vantajosa, principalmente com relação ao aterro sanitário, mas que a reciclagem proporciona os melhores benefícios a longo prazo, pois evita a produção de novos plásticos e o consumo de matéria-prima virgem.

Por fim, cada novo bioplástico possui características singulares, que tornam necessária a existência de procedimentos específicos de descarte para evitar problemas ambientais já existentes pelo uso dos plásticos convencionais, como o acúmulo em lixões. É o que nos apresenta a pesquisa de Fredi e Dorigato (2021) que analisaram o fim de vida dos bioplásticos biodegradáveis e não-biodegradáveis, concluindo que os biodegradáveis podem ser reciclados de forma mecânica, química ou enzimática; enquanto os não-biodegradáveis devem ser reciclados mecânica e quimicamente; evitando-se em ambos os casos o descarte em aterro sanitário, que continua sendo o pior cenário.

3.1.5 Aplicações dos bioplásticos

Com o avanço no desenvolvimento de novos materiais, como os bioplásticos, com diferentes propriedades e funcionalidades, o aumento do seu uso é tido como uma forma de cuidar do meio ambiente, promovendo o consumo de produtos sustentáveis. Dessa forma, os bioplásticos já estão presentes em vários segmentos do mercado, como o setor de embalagens para alimentos e produtos em geral, eletroeletrônicos, indústria automotiva e de transporte, agricultura, brinquedos, revestimentos, construção, cosméticos, biomedicina e bens de consumo (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020).

O setor automotivo visa a substituição de itens plásticos que compõem os carros por bioplásticos, para torná-los mais leves (OLIVER-ORTEGA et al., 2019). Além disso, busca-se o uso de bio-adesivos e até óleo lubrificante biodegradável para reduzir o gasto com combustível fóssil e emissões de carbono, configurando em um menor impacto ambiental de seus produtos (SAHA; GHOSH, 2018; LI et al., 2018).

Na agricultura, o uso de bioplásticos é tido como uma alternativa de substituição dos materiais plásticos convencionais utilizados durante o plantio e que colaboram a longo prazo com os impactos ambientais causados ao solo (degradação), como o *mulching* no

plantio de hortaliças e as mantas de proteção contra pragas (MOSTAFA et al., 2018; VERMA et al., 2019).

A possibilidade de adaptar as propriedades mecânicas de um bioplástico, assim como suas propriedades físicas, químicas e biológicas tornou esse tipo de material atrativo para possíveis aplicações biomédicas (DA SILVA et al., 2018). Visando a biocompatibilidade, pesquisas nas quais esses materiais são utilizados na fabricação de tecidos cardíacos, implantes e até mesmo como auxílio no transporte intravenoso de medicamentos no tratamento de cânceres, vêm fomentando o avanço da medicina no mundo (WU et al., 2018; HU et al., 2019).

Estima-se que o setor de embalagens foi o responsável por 47% do mercado total de bioplásticos em 2020. Devido à sua diversidade, os bioplásticos possibilitam a obtenção de diferentes tipos de embalagens para os mais variados produtos em suas funções específicas de armazenamento, contenção e/ou coleta (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2020). Como as sacolas bioplásticas produzidas do polietileno obtido a partir do etanol da cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2019), embalagens para contenção de produtos cosméticos e afins, assim como garrafas de água, fazem uso do poliácido láctico como matéria prima (SIKORSKA et al., 2018).

O objetivo da substituição dos plásticos convencionais em embalagens visa diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte – como o crescente volume dessas embalagens não-biodegradáveis nos aterros sanitários e a economia dos recursos utilizados nos processos de fabricação (SIKORSKA et al., 2018; SANTOS et al., 2019).

Diante da variedade de aplicações dos bioplásticos, os filmes biopoliméricos surgem como bioprodutos diversificados, que podem ser usados em embalagens, indústrias e revestimentos de alimentos, implantes, distribuição de medicamentos, entre outros (LAVERY et al., 2019; MACHA et al., 2019; ZHANG et al., 2019). Esses bioplásticos são o foco deste review e será discutido na próxima seção.

3.2 Desenvolvimento tecnológico: *Technology Readiness Levels* (TRL)

As principais etapas do processo de desenvolvimento tecnológico são: i) a concepção, quando são observadas demandas, oportunidades no mercado e são descritas às funcionalidades técnicas que o produto deverá possuir; ii) a experimentação, quando materiais alternativos são testados, selecionados e rotas tecnológicas são propostas, avaliadas e definidas em escala laboratorial; e iii) o escalonamento, quando o processo estabelecido em

escala de bancada é adaptado para produção em escala piloto (ARVIDSSON et al., 2017; BERGERSON et al., 2020).

Essas etapas estão associadas aos níveis de maturidade tecnológica (NMT) - no inglês *Technology Readiness Levels* (TRL) – uma métrica sistemática que avalia o nível de maturidade de uma tecnologia específica, em comparação com diferentes tipos de tecnologia, em um contexto específico (MANKINS, 1995). Esse sistema é utilizado pela agência aeroespacial americana, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e também pela Embrapa, que desde 2017 faz uso desses níveis para identificar a maturidade de produtos e processos em desenvolvimento, mostrando a aplicabilidade dessa proposta para a gestão do processo de desenvolvimento de tecnologias agrícolas e agroindustriais (CAPDEVILLE; ALVES; BRASIL, 2017).

Os níveis de maturidade tecnológica estão divididos em uma escala de um a nove, onde o primeiro é o mais baixo, e o último o mais alto (Quadro 1). Cada nível apresenta uma definição e etapas tecnológicas específicas, sendo necessário o cumprimento das evidências das etapas anteriores, para que uma nova tecnologia avance para o nível posterior. Assim, a evolução de uma tecnologia na escala NMT, pode ocorrer de forma mais rápida ou lenta, a depender do sistema, produto e/ou indicadores considerados no processo em desenvolvimento (NBR ISO 16290, 2015).

Quadro 1 - Descrição dos níveis de maturidade tecnológica (NMT)

TRL	NMT	Descrição
1	Princípios de base observados e relatados	É iniciada a transferência da pesquisa científica para a investigação aplicada e desenvolvimento, identificando-se as potenciais aplicações.
2	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados	Início da atividade inventiva. A aplicação é ainda especulativa, ou seja, não há prova ou análise detalhadas que suportem a suposição.
3	Prova de conceito analítica e experimental da função crítica e/ou da característica	É iniciada a atividade de investigação e desenvolvimento, onde a prova da função/característica do elemento é feita por análise e experimentação.
4	Verificação funcional em ambiente laboratorial do componente e/ou maquete	Os elementos tecnológicos básicos são integrados até atingirem os níveis de desempenho desejados, através de uma maquete de laboratório do elemento.
5	Verificação do ambiente relevante da função crítica do componente e/ou maquete	A fidelidade do componente testado tem que aumentar significativamente.
6	Modelo demonstrando as funções críticas do elemento em um ambiente relevante	As funções críticas do elemento ou protótipo são verificadas e o desempenho é demonstrado em ambiente relevante com modelos representativos em formato, configuração e função.
7	Modelo demonstrando o desempenho do elemento para o ambiente operacional	O desempenho do elemento é validado por meio de ensaios para demonstrar desempenho no ambiente operacional.
8	Sistema real desenvolvido e aceito	Este nível significa o final do desenvolvimento tecnológico do sistema, ou seja, todas as tecnologias

		utilizadas no sistema real estão em TRL8.
9	Sistema real “demonstrado” por meio de operações bem sucedidas	É o nível dos últimos acertos. O TRL9 é alcançado e o elemento está maduro após operações bem-sucedidas e alcance de desempenho no ambiente operacional.

Fonte: Adaptado da ISO 16290 (2015).

Avaliações de sustentabilidade em determinados níveis de maturidade tecnológica, realizadas de forma sistemática e integrada, permitirão escolhas conscientes de materiais, processos, produtos e equipamentos. Permitirão ainda a promoção do reúso e da reciclagem, assim como o adequado tratamento de efluentes e resíduos que não podem ser reutilizados. O conjunto dessas escolhas, pautadas no melhor balanço entre ganho financeiro e ambiental, levará a transformação de um conceito tecnológico em um produto tecnicamente e economicamente viável, integrante da economia circular, e de elevado desempenho ambiental.

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ex-ante

As tradicionais pesquisas de avaliação do ciclo de vida (ACV), em sua maioria, consideram as tecnologias totalmente desenvolvidas (THONEMANN; SCHULTE; MAGA, 2020). No entanto, nos últimos anos, surgiu a necessidade de se avaliar tecnologias emergentes, que estão em desenvolvimento, no momento em que a realização de mudanças no processo ainda é possível e menos custosa para o fabricante, do que quando a tecnologia já se encontra em uso pelos consumidores (BAUMANN; TILLMAN, 2006; GÖSWEIN et al., 2020).

A ACV ex-ante considera a imaturidade da tecnologia em desenvolvimento, mas a modelagem ocorre presumindo-se um cenário onde a tecnologia estará madura (BERGERSON et al., 2020). Ou seja, a tecnologia possui uma baixa maturidade no momento da pesquisa, mas assume-se que estará plenamente desenvolvida no futuro. O objetivo principal desta abordagem é prever os potenciais impactos ambientais de uma tecnologia emergente, antes que ela seja produzida e comercializada em larga escala, além de auxiliar na resolução de desafios durante o desenvolvimento do processo/produto (CUCURACHI; VAN DER GIESEN; GUINÉE, 2018; GÖSWEIN et al., 2020).

A ACV é padronizada pelas normas NBR ISO 14040 e 14044 (2009), e corroborada por livros, artigos, relatórios e especificações técnicas publicadas. A sua estrutura geral é dividida em 4 fases: i) definição de objetivo e escopo; ii) análise de inventário, iii) avaliação de impactos, e iv) interpretação dos resultados. A abordagem ex-ante segue as

mesmas diretrizes e fases da ACV tradicional, salvo as diferentes escolhas na modelagem do processo e a construção de cenários, que são abordadas nas seguintes subseções.

3.3.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo da ACV ex-ante é quantificar os possíveis impactos ambientais futuros de uma tecnologia emergente (MONI et al., 2020). Essa quantificação pode ser comparativa ou não. Quando comparativa, a tecnologia emergente é comparada a outra já existente, e que desempenha uma função semelhante à sua (VAN DER GIESEN et al., 2020). A definição do escopo depende no nível de prontidão tecnológica (TRL) da tecnologia emergente. No caso de TRLs mais baixas (1-4) a tecnologia se encontra na fase conceitual, onde é possível identificar pontos críticos nas fases iniciais e realizar maiores mudanças no processo. Já em TRLs mais elevadas (>5) a tecnologia já possui a sua função definida e são propostos cenários visando a otimização do processo (VAN DER HULST et al., 2020).

O contexto temporal e geográfico influencia diretamente na dinâmica ex-ante, pois espera-se que os impactos das tecnologias mudem ao longo do tempo e de acordo com a localização geográfica da indústria (CUCURACHI et al., 2019). Essas mudanças podem afetar principalmente a disponibilidade de água, matéria-prima e o uso de energia elétrica (CUCURACHI et al., 2019).

A unidade funcional é definida a partir do objetivo da pesquisa. Ela pode estar relacionada a saída do processo, ou seja, em função de uma unidade do produto (ex.: 1 kg de produto, 1 unidade produzida), ou basear-se na matéria-prima (biomassa) que está sendo utilizada (ex.: 1 tonelada de matéria-prima), ou no uso da terra, necessário para a produção de diferentes tipos de biomassa que podem ser utilizadas (ex.: 1 hectare) (AHLGREN et al., 2015).

Com a definição do objetivo da pesquisa, seu contexto temporal e geográfico, e sua unidade funcional, os limites do sistema a ser avaliado devem ser estabelecidos. Quando a pesquisa for comparativa, com o uso de diferentes matérias-primas e sistema de produção iguais, sugere-se a abordagem do berço ao portão, considerando desde a extração dos insumos utilizados, até a fabricação o produto. Já para a avaliação de processos diferentes, com o uso da mesma matéria-prima, sugere-se uma abordagem portão-portão, ou seja, considerando somente o processo de produção (ASGHER et al., 2020; GUINEÉ, 2002). Por fim, quando a pesquisa não for comparativa, deve-se considerar a análise do berço ao túmulo, considerando desde a extração dos insumos até a destinação final do produto após o seu uso e descarte (EC,

2010). Alterações nas sugestões para os limites do sistema podem ser realizadas, desde que estejam de acordo com os objetivos específicos de cada pesquisa.

3.3.2 Inventário de ciclo de vida

A principal dificuldade na ACV ex-ante de uma tecnologia emergente é a falta de dados representativos para compor os inventários de ciclo de vida (MONI et al., 2020). Geralmente, os dados da nova tecnologia encontram-se em escala laboratorial ou piloto, sendo necessário realizar um escalonamento do processo, para que o mesmo possa ser avaliado em escala industrial (PICCINNO et al., 2016).

Para facilitar a modelagem, é necessário separar os componentes do processo. Os de primeiro plano, obtidos de dados primários, coletados ou medidos pelo próprio analista; e os de segundo plano, obtidos de fontes secundárias, como bases de dados (ex.: Ecoinvent, AgriFootprint, Carbon Minds) e literatura publicada (VAN DER GIESEN et al., 2020).

A modelagem da produção em escala industrial deve basear-se nos dados de laboratório para realização dos balanços de massa (relações de entrada e saída) e em conhecimento especializado para a definição dos equipamentos industriais (VENKATACHALAM et al., 2018). Para a construção dos inventários é necessário a utilização de métodos ou softwares de aumento de escala (ex.: Aspen Plus, SuperPro Designer) (MILÀ I CANALS et al., 2011; PARVATKER; ECKELMAN, 2019; SANJUÁN; STOESSEL; HELLWEG, 2014). Alguns pesquisadores fornecem orientação sobre como escolher uma abordagem de aumento de escala, abordar a incerteza na avaliação e a limitação dos dados, com base na exploração de cenários futuros (DE MORAES et al., 2013; MILÀ I CANALS et al., 2011).

3.3.3 Metodologia para a construção de cenários futuros

A ACV ex-ante avalia o potencial desenvolvimento de novos processos no futuro. No entanto, devido a impossibilidade de se prever a evolução dos sistemas de primeiro e segundo, com precisão, a única forma de avaliar esses novos processos no futuro é com a utilização de cenários (ARVIDSSON et al., 2017; THOMASSEN et al., 2019).

A metodologia para a construção dos cenários baseia-se nas fases da ACV. Deve-se inicialmente, definir o objetivo e escopo do cenário, o nível de maturidade tecnológica (TRL), contexto temporal e geográfico (MONI et al., 2020; THOMASSEN et al., 2019). Em

seguida, define-se o contexto tecnológico a ser investigado – se um sistema de primeiro plano, modelado diretamente pelo analista, ou um de segundo plano, com o uso de bases de dados existentes (ARVIDSSON et al., 2017; MENDOZA BELTRAN et al., 2020). Aqui, é importante considerar a disponibilidade de dados para modelar ambos os sistemas.

Os tipos de cenários a serem modelados também devem ser definidos, pois é possível modelar cenários preditivos, onde se avalia somente como será o futuro; ou cenários exploratórios, onde se avalia como o futuro poderia se desenvolver a partir de um referencial; e cenários normativos, onde se avalia o futuro com base em metas específicas a serem atingidas com desenvolvimento do sistema (BÖRJESON et al., 2006).

Após a explanação dos cenários, é necessário avaliar quais são possíveis, a fim de reduzir as alternativas para não tornar a pesquisa muito complicada. Essa avaliação deve basear-se nos parâmetros mais importantes dentro do processo, como por exemplo, a matéria-prima que está sendo utilizada, se pode ou não ser substituída por outra no futuro, a fim de reduzir os impactos no processo, mantendo a competitividade do produto no mercado.

Tendo-se definido os cenários alternativos, é realizada a coleta de dados para a construção dos diferentes inventários, depois o escalonamento dos processos e avaliação dos impactos, seguida pela comparação entre as alternativas futuras e o cenário de referência, além da interpretação dos resultados obtidos.

3.4 Análises técnico-econômica-ambientais (ATEAs)

No passado, o termo ecodesign se referia somente ao aspecto ambiental de um produto, baseando-se na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e outras metodologias (AHMAD et al., 2018). No entanto, para o desenvolvimento de novos produtos sustentáveis é necessário considerar os aspectos técnicos e econômicos, além dos ambientais (MAHMUD et al., 2021).

Enquanto a análise técnico-econômica avalia o desempenho técnico e a viabilidade econômica de um novo produto, a análise ambiental avalia os potenciais impactos. Comumente, as avaliações técnicas-econômicas e ambientais são realizadas separadamente, em momentos diferentes na escala de desenvolvimento, e apresentam conclusões opostas (THOMASSEN et al., 2019).

A integração das avaliações técnico-econômica e ambiental de forma prospectiva, pode reduzir as inconsistências nas pesquisas, melhorar o processo de tomada de decisão, e fornecer uma análise sistemática entre os desempenhos técnicos, econômicos e ambientais -

permitindo assim, a otimização do processo de produção durante o desenvolvimento do novo produto (WUNDERLICH et al., 2020).

3.5 Análise de tomada de decisão multicritério

A tomada de decisão está presente no cotidiano, mas também em atividades complexas que levam a escolher alternativas, valores e pesos diferentes em determinadas situações. Uma tomada de decisão em quase todos os contextos industriais e institucionais envolve avaliar alternativas em relação aos múltiplos critérios existentes que, geralmente, são conflitantes, e assim, escolher a alternativa mais eficaz e eficiente (NGAN, 2015). Para isso, a análise multicritério pode ser utilizada como ferramenta qualificada para realizar escolhas entre alternativas conflitantes.

A análise multicritério consiste em utilizar técnicas numéricas para auxiliar na escolha entre um conjunto de alternativas, com base em critérios determinados pelos responsáveis pela tomada de decisão (DIAS; FREIRE; GELDERMANN, 2019). Os múltiplos critérios considerados possibilitam avaliar as múltiplas preocupações do decisores, e o desempenho de cada alternativa considerada é avaliada e ponderada, a fim de se obter uma recomendação (DIAS; FREIRE; GELDERMANN, 2019; TRIANTAPHYLLOU, 2000).

Muitos autores têm proposto utilizar a análise multicritério para integrar indicadores técnicos, econômicos e ambientais para compor uma avaliação sustentável combinada de processos e/ou produtos, visando auxiliar em uma melhor avaliação de desempenho. Petrillo et al. (2022) utilizaram a análise multicritério (método do Processo de Hierarquia Analítica – AHP) para integrar critérios mecânicos, econômicos e ambientais de agregados superficiais usados no setor de construção civil, para avaliar os mais sustentáveis. Já Gwender et al. (2019) buscaram integrar critérios econômicos, ambientais e sociais para avaliar a sustentabilidade da demanda de energia elétrica em residências numa aldeia rural, através da Teoria do Valor Multiatributo (MAVT), outro método de análise multicritério.

Existem diferentes métodos de análise multicritério, que podem auxiliar em uma melhor avaliação de desempenho de processos e/ou produtos – sendo determinado para uma pesquisa aquele capaz de melhor interpretar as alternativas e critérios pertinentes a cada caso.

3.5.1 Método de soma ponderada

O método de soma ponderada é um método de fácil aplicação, que costuma ser utilizado em problemas unidimensionais (MATEO, 2012). Ele consiste em auxiliar na tomada de decisão multicritério, quando há várias alternativas, e é preciso determinar a melhor com base em diferentes critérios (ALANAZI; ABDULLAH; LARBANI, 2013). Neste método, a pontuação final de uma alternativa é igual à soma ponderada das avaliações por critério, e os pesos são atribuídos de acordo com a importância de cada atributo. Por fim, é possível organizar um ranqueamento das alternativas.

Este método permite a normalização entre os diferentes critérios, que possuem diferentes unidades de medida. Após definido os critérios da análise, ocorre a definição de cada um, como atributo benéfico – caso se almeje o valor máximo; ou atributo não-benéfico – caso se almeje o valor mínimo (ALANAZI; ABDULLAH; LARBANI, 2013; MATEO, 2012). As fórmulas para normalização dos critérios são apresentadas a seguir de acordo com o atributo determinado:

$$\text{Para atributo benéfico: } X = \frac{x}{x_{max}} \quad (1)$$

$$\text{Para atributo não-benéfico: } X = \frac{x_{min}}{x} \quad (2)$$

Após a normalização, é realizada a multiplicação de cada alternativa, pelo peso correspondente ao critério; resultando em diferentes avaliações por critério, para cada alternativa – que são somadas para a obtenção de uma pontuação final, e permitem o ranqueamento das alternativas propostas, indicando a melhor opção dentre as demais (ALANAZI; ABDULLAH; LARBANI, 2013; MATEO, 2012).

4 ARTIGOS

Nesta seção constam os resultados da pesquisa, dividido em dois artigos. O primeiro, intitulado “*Ecodesign de filmes de base biológica para embalagens de alimentos: Desafios e recomendações*” foi publicado no periódico *Environmental Development*, e contribuiu para a conexão do conhecimento sobre os aspectos tecnológicos de biopolímeros e filmes de base biológica e os aspectos metodológicos da ACV ex-ante. De forma que foi possível identificar os aspectos cruciais para a avaliação do desempenho ambiental e adaptar recomendações específicas para novos filmes de base biológica e biopolímeros, que serviram de base para a concepção da abordagem metodológica proposta no artigo 2, intitulado “*Uma abordagem para o desenvolvimento sustentável de biopolímeros para embalagens de alimentos em fase inicial de maturidade tecnológica (Biopolímero+)*”.

Figura 3 – Artigo publicado no periódico *Environmental Development*



Fonte: base de dados *Science Direct*.

4.1 Artigo 1

Ecodesign de filmes de base biológica para embalagens de alimentos: Desafios e recomendações

Ana Paula Coelho Sampaio^a, Jade Müller-Carneiro^b, André Luís Sousa Pereira^c, Morsyleide de Freitas Rosa^c, Adriano Lincoln Albuquerque Mattos^c, Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo^d, Fausto Freire^b, Maria Cléa Brito de Figueirêdo^{c,*}

^a Universidade Estadual do Ceará (UECE), Brasil

^b Universidade de Coimbra, Portugal

^c Embrapa Agroindústria Tropical, Brasil

^d Embrapa Instrumentação, Brasil

Highlights

- Esta revisão investiga questões relevantes para o ecodesign de filmes de base biológica.
- Fontes de biomassa, técnicas e propriedades de processamento de filmes são identificadas.
- Os potenciais impactos ambientais dos biopolímeros são analisados.
- São apresentados os principais desafios e recomendações para o ecodesign de filmes.

Resumo

Os filmes de base biológica tornaram-se boas alternativas aos filmes de base petroquímica para aplicações de uso único devido ao aumento da consciência ambiental e à busca por produtos sustentáveis. No entanto, fornecer novos filmes de base biológica com impactos ambientais reduzidos em comparação com filmes de base fóssil requer um design ecológico nas fases iniciais de investigação, desenvolvimento e inovação (IDI) do produto. Esta revisão investiga os principais desafios no design ecológico de filmes de base biológica e fornece recomendações para superá-los no início da IDI. Identificamos os principais materiais, técnicas de produção e propriedades de filmes de base biológica para embalagens de alimentos, que são importantes para identificar a funcionalidade e o desempenho do produto e selecionar os estoques apropriados. Em seguida, revisamos as avaliações do ciclo de vida (ACV) de filmes e biopolímeros de base biológica para analisar as escolhas e impactos de

modelagem. Considerando a vasta literatura sobre formulações e propriedades de filmes, encontramos apenas algumas avaliações ambientais publicadas de filmes de base biológica. Os estudos revisados se concentraram na avaliação de biopolímeros comercialmente disponíveis, aplicando uma avaliação convencional do ciclo de vida do berço ao portão para selecionar formulações ideais para uma nova solução de embalagem. A maioria das avaliações baseou-se apenas em dados laboratoriais para calcular os impactos e comparou novos biopolímeros com os existentes (principalmente de base fóssil), desconsiderando as melhores práticas para ACV ex-ante. Os principais desafios na IDI inicial de filmes incluem a falta de conhecimento dos efeitos do filme nos alimentos embalados, a definição pouco clara de funcionalidade, o uso de novos compostos de base biológica nas formulações de filmes, o endurecimento do desenvolvimento de inventário e o aumento da incerteza na avaliação de impacto. Fornecemos recomendações para superar esses e outros desafios.

Palavras-chave: ACV ex ante; inovação de processos; biopolímeros; indicadores técnicos; avaliação do ciclo de vida.

1. Introdução

Os filmes de base biológica são produtos novos e alternativas aos filmes plásticos convencionais baseados em recursos fósseis, especialmente para aplicações de uso único, como embalagens de alimentos. Os filmes plásticos convencionais de base fóssil apresentam alto desempenho, baixos custos, fácil produção e métodos de produção bem estabelecidos em comparação com os filmes de base biológica. No entanto, os filmes de base biológica podem ser superiores em termos de pegada de carbono, biodegradabilidade e propriedades ativas (por exemplo, antioxidantes e antibacterianas) (Rosenboom et al., 2022).

Para comparar e melhorar o desempenho ambiental dos filmes de base biológica em relação aos filmes plásticos comerciais convencionais, são necessárias avaliações ambientais nas fases iniciais de investigação, desenvolvimento e inovação, além de avaliações técnicas e econômicas (Sun et al., 2023). Essas avaliações podem orientar decisões relativas a materiais, técnicas e características do produto (Bassani et al., 2022).

Novos filmes de base biológica podem ser melhorados se as avaliações forem feitas em vários níveis de prontidão tecnológica (TRLs) que mostram a maturidade de novos produtos para comercialização (Moni et al., 2020; Thonemann et al., 2020). Os TRLs variam de um a nove, abrangendo conceituação, experimentação e produção completa. Nos TRLs 1–

2, as oportunidades de mercado são investigadas e as características técnicas do produto são definidas. Nos TRLs 3–5, materiais alternativos e rotas tecnológicas são testados em escala laboratorial. Nos TRLs 6–7 e TRLs 8–9, a rota ideal é adaptada para as escalas piloto e industrial, respectivamente.

As modificações em produtos e processos são mais fáceis e baratas de realizar nas fases iniciais do desenvolvimento tecnológico porque pouco investimento foi feito e as modificações são mais fáceis de implementar em laboratórios do que em plantas industriais (Muizniece e Blumberga, 2018). Contudo, as escolhas feitas nos TRLs 1–5 afetam significativamente o desempenho ambiental futuro das novas tecnologias; assim, é fundamental identificar os seus potenciais impactos socioeconômicos e ambientais nas fases iniciais de desenvolvimento (Ferreira et al., 2022; Moni et al., 2020; Wright e Caudill, 2020).

O design ecológico deve ocorrer durante o desenvolvimento do produto (TRLs 1–9). Incorporar avaliações ambientais no desenvolvimento de produtos e processos, e melhorar o desempenho ambiental do ciclo de vida. O ecodesign permite a seleção de materiais e técnicas de processamento e influencia as opções e impactos de fim de vida. Exemplificando, De Gisi et al. (2022) investigaram a biodegradabilidade do plástico durante o seu ecodesign, mostrando a utilidade da adição de materiais de base biológica na formulação e os perigos potenciais do uso de aditivos pró-oxidantes. Os impactos da biodegradação do plástico em sistemas alternativos de gestão de resíduos (por exemplo, digestão anaeróbica e compostagem) também foram avaliados por Cucina et al. (2021) e De Gisi et al. (2022) que destacaram a necessidade de melhorar as condições para a biodegradação do plástico. Além disso, o design ecológico de materiais de embalagens para alimentos pode identificar formulações para prolongar a vida útil dos alimentos e reduzir o desperdício e a perda de alimentos. A necessidade de melhorar a sustentabilidade dos produtos colocou o ecodesign no centro da Iniciativa de Política de Produtos Sustentáveis, que promove a comercialização e a utilização de produtos sustentáveis na União Europeia (Comissão Europeia, 2020).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta bem conhecida e abrangente para avaliar os potenciais impactos ambientais dos produtos, desde a extração e produção de matérias-primas até à utilização e fim de vida do produto. Esta ferramenta tem sido amplamente aplicada à avaliação de produtos industriais, mas também tem sido utilizada na concepção ecológica de novos produtos e processos. Recentemente, a comunidade de ACV discutiu as melhores práticas para a aplicação desta metodologia durante as fases iniciais do desenvolvimento do produto, referidas como ACV ex-ante ou prospectiva. Enquanto a ACV convencional se concentra na avaliação dos impactos ambientais de produtos já estabelecidos,

a ACV ex-ante procura avaliar os impactos dos produtos na fase inicial de desenvolvimento, quando não são comercializados e são considerados uma tecnologia emergente (Arvidsson et al., 2017, Cucurachi et al., 2022, Cucurachi et al., 2018, van der Giesen et al., 2020).

Embora muitos estudos tenham apresentado novas formulações de filmes de base biológica em escala laboratorial, apenas algumas ACVs ex-ante de biopolímeros e filmes de base biológica estão disponíveis. Esta revisão procura apoiar o ecodesign de filmes de base biológica com baixos TRLs. As seções a seguir identificam os principais materiais dos filmes, técnicas de produção e propriedades e, em seguida, analisam as opções de modelagem e seus principais impactos associados. Além disso, discutimos os principais desafios e fornecemos recomendações para o ecodesign de filmes de base biológica.

2. Critérios para busca e seleção de artigos

Os artigos científicos foram selecionados nas bases de dados *Web of Science* (WoS) e *Scopus*. A busca foi realizada em dois grupos, cada um utilizando um conjunto de palavras-chave. No grupo I, usamos as palavras-chave “*bio-based*”, “*biopolymer*”, “*bioplastic*”, “*edible*” AND “*films*” AND “*food packaging*” para filtrar artigos relacionados a novas formulações de filmes, publicados entre 2016 e 2021. No Grupo II, as palavras-chave foram “*bio-based*”, “*biopolymer*”, “*bioplastic*”, “*edible*” AND “*films*”, “*environmental assessment*”, “*life cycle assessment*”, “*ecodesign*” para encontrar artigos relacionados aos impactos ambientais de filmes e seus biopolímeros publicados entre 2010 e 2022. A combinação de palavras do grupo I objetivou encontrar estudos propondo rotas tecnológicas para a produção de filmes de base biológica, enquanto a combinação de palavras do grupo II procurou identificar estudos sobre ecodesign e avaliações ambientais de filmes de base biológica. O período de busca para o grupo I foram os últimos cinco anos, enquanto para o grupo II foram incluídos os últimos 12 anos devido à escassez de estudos (Figura 1).

Inicialmente, a busca pelo grupo I resultou em mais de 500 estudos. Esses estudos foram filtrados para 100, incluindo artigos que descreviam matrizes, plastificantes e reforços utilizados na produção de filmes biopoliméricos, as principais técnicas de processamento e propriedades dos filmes como mecânicas, de barreira, técnicas, ópticas, antioxidantes e antibacterianas. Esta seleção teve como objetivo definir o processo de fabricação de um filme de base biológica, os insumos necessários e as características desejadas do filme para utilização em embalagens de alimentos, sendo todos partes integrantes do processo de ecodesign de um filme de biopolímero (Tabela A1, Material Suplementar - MS).

Poucas avaliações ambientais de biopolímeros e filmes de base biológica estão disponíveis. A busca de artigos do grupo II resultou em apenas 17 estudos que aplicaram a ACV como metodologia para avaliar filmes de biopolímeros. Eles foram analisados caracterizando-se matrizes e aditivos de base biológica, unidade funcional de matérias-primas, categorias de impacto, métodos de impacto e nível de maturidade tecnológica.

Figura 1. Procedimento aplicado para seleção de artigos dos grupos I e II

Grupo I			
			
Palavras-chave: “base biológica”, “biopolímero”, “bioplástico”, “comestível” AND “filmes” AND “embalagens para alimentos”.	Período de publicação: 2016 – 2021.  Artigos: +500, filtrado para 100.	Critério de inclusão: - Estudos descrevendo os componentes utilizados na produção de filmes biopoliméricos; - Estudos com técnicas de processamento definidas; - Estudos com apresentação das propriedades dos filmes produzidos.	Critério de exclusão: Estudos que não atenderam a todos os critérios de inclusão.
Grupo II			
			
Palavras-chave: “base biológica”, “biopolímero”, “bioplástico”, “comestível” AND “filmes”, “avaliação ambiental”, “avaliação do ciclo de vida”, “ecodesign”.	Período de publicação: 2010 – 2022.  Artigos: Somente 17.	Critério de inclusão: - Estudos que utilizaram ACV como ferramenta de avaliação ambiental; - Estudos que informaram a unidade funcional adotada, escopo, categorias de impacto e métodos de avaliação.	Critério de exclusão: Estudos que não atenderam a todos os critérios de inclusão.

3. Filmes de base biológica: materiais, técnicas de processamento e propriedades

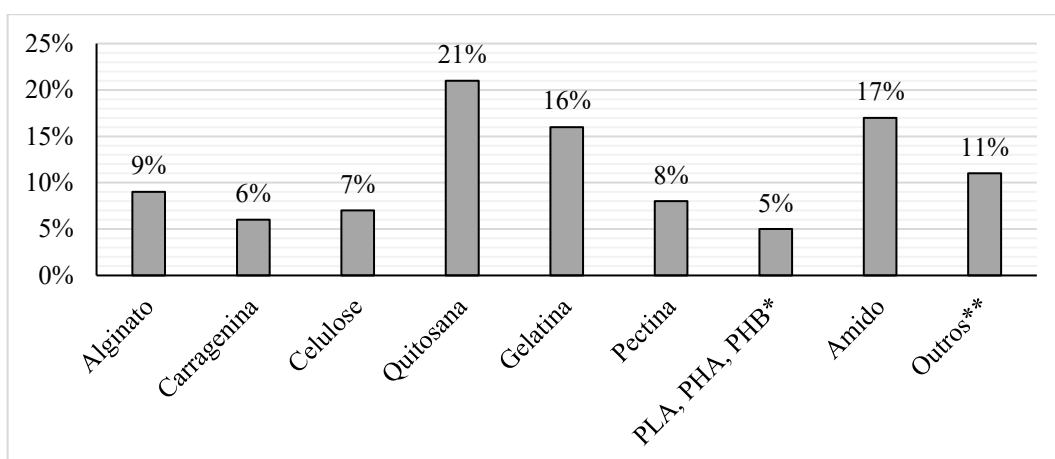
3.1. Matrizes

As formulações de filmes utilizam matrizes e aditivos com base nas propriedades e funcionalidades desejadas. A matriz é o principal componente do filme e a base para a formação do filme (Azeredo et al., 2019). Matrizes são biopolímeros naturais produzidos por microrganismos (por exemplo, celulose bacteriana) ou extraídos da biomassa (por exemplo, pectina e carragenina), permitindo uma grande variedade de estruturas químicas (Li et al., 2020; Norcino et al., 2020; Thakur et al., 2018).

A literatura revisada (Figura 2) revelou que uma proteína (gelatina) e dois polissacarídeos (quitosana e amido) foram os biopolímeros mais utilizados de 2016 a 2021

durante a produção de filmes em escala laboratorial para embalagens de alimentos. A quitosana foi extraída de camarão e caranguejo (Hajji et al., 2021; Yadav et al., 2020), e o amido foi extraído de mandioca, palma, milho, arroz e ervilha (Collazo-Bigliardi et al., 2019; Saberi et al., 2017; Tongdeesoontorn et al., 2021). A gelatina foi extraída de pele e ossos de gado (89%) e pele de peixe (11%) (Batra et al., 2020; He et al., 2020; Yavari Maroufi et al., 2020; Shen et al., 2021) .

Figura 2. Matrizes mais utilizadas em filmes de biopolímero (2016 – 2021)



* PLA: ácido polilático, PHA: polihidroxialcanoato, PHB: polihidroxibutirato.

** Queratina, manga (purê e casca), bagaço de abacaxi, mucilagem (semente de chia), sementes e cascas de abóbora.

3.2. Aditivos

Os aditivos podem melhorar o desempenho físico (especialmente mecânico) dos filmes ou fornecer uma função ativa (por exemplo, antimicrobiana e/ou antioxidante).

Os plastificantes aumentam a flexibilidade do filme (Braun et al., 2013). Sua dispersão dentro da matriz do filme modifica a organização molecular da rede 3-D, aumentando o espaço livre entre as cadeias de biopolímeros, diminuindo as forças intermoleculares de atração e tornando a rede menos densa e mais flexível (Wilkes et al., 2005).

O glicerol é o plastificante mais utilizado para produção de filmes por ser altamente hidrofílico, facilitando sua incorporação na maioria das matrizes (que geralmente são hidrofílicas) (Jamróz et al., 2018; Sedayu et al., 2020). Foi utilizado em 83% dos estudos revisados. Outros plastificantes utilizados foram os polióis (sorbitol, etilenoglicol, propilenoglicol e polietilenoglicol), que são facilmente incorporados em diferentes matrizes (De Oliveira Júnior et al., 2021; Kumar et al., 2019; Soni et al., 2016; Susmitha et al., 2021).

Reforços foram adicionados aos filmes para melhorar suas propriedades mecânicas. Entre os estudos analisados, 37% utilizaram nanopartículas de prata, zinco, cobre, sílica e titânio como reforços (Hajizadeh et al., 2020; Li et al., 2021; Roy e Rhim, 2020; Sonseca et al., 2020), seguido por nanocristais e fibras de celulose (26%) (Ghazanfari et al., 2016; Jung et al., 2020; Menzel, 2020; Wang et al., 2019).

3.3. Técnicas de produção

Três técnicas foram identificadas para a produção de filmes de base biológica. *Casting* foi o método principal (90% dos estudos apresentaram formulações de filmes), seguido de extrusão (6%) e *electrospinning* (4%).

As condições de produção variaram de acordo com a funcionalidade pretendida e escolha de materiais. O *casting* envolve a obtenção de uma dispersão filmogênica por meio da homogeneização dos componentes em meio aquoso ou solvente orgânico, seguida do espalhamento da dispersão sobre uma superfície plana para secagem (Sharif et al., 2019). A maioria dos polissacarídeos testados poderia ser usada para obter filmes por *casting*.

Nos artigos analisados, a moldagem foi realizada manualmente e apenas em escala laboratorial. No entanto, o lingotamento contínuo automatizado está disponível para produção em escala piloto, empregando equipamentos específicos, como revestidores automáticos de filme ou secadores contínuos.

A extrusão é um processo seco e sem solvente baseado na deformação do plástico em componentes de filme (geralmente usando calor e pressão), fazendo com que o material flua através de um orifício para um molde e adote seu perfil de seção transversal (Nessi et al., 2019; Pomeroy, 2021). Filmes contendo apenas componentes não voláteis (ou seja, com temperaturas de degradação acima de 200 °C) podem ser extrusados devido à sua alta estabilidade térmica (He et al., 2019; Radusin et al., 2019).

Durante a *electrospinning*, soluções formadoras de filme de uma concentração específica são submetidas a uma corrente elétrica (geralmente entre 10 e 20 kV), resultando na evaporação do solvente e na liberação de fibras com diâmetros de 0,05–5 µm (DeJean, 2020). O *electrospinning* tem sido utilizada para a produção de filmes à base de pectina, com glicerol e polietilenoglicol como plastificantes, e embalagens multicamadas para alimentos com barreiras aromáticas (Akinalan Balik et al., 2019).

3.4. Principais propriedades do filme para embalagens de alimentos

Os principais fatores que influenciam as propriedades do filme biopolímero são os biopolímeros escolhidos como matrizes, técnicas de processamento do filme e presença e estrutura química de plastificantes e/ou outros aditivos, incluindo reforços (Zhang et al., 2019). Cada um desses fatores pode afetar as propriedades mecânicas, de barreira, térmicas, ópticas e ativas/bioativas dos filmes de biopolímero. Assim, diversas combinações e proporções de componentes devem ser testadas para caracterizar filmes de biopolímeros e definir sua possível aplicabilidade em embalagens de alimentos. A Tabela 1 apresenta os benefícios das propriedades do filme para alimentos embalados, com base nos artigos analisados.

Tabela 1. Propriedades do filme e exemplos dos benefícios para alimentos embalados

Propriedades	Benefícios
Comestibilidade	Incorporação de características funcionais e/ou nutricionais ao alimento
Resistência mecânica	Suporta maior peso dos alimentos durante o transporte, garantindo a integridade física dos alimentos
Resistência térmica	Permite o processamento em temperaturas mais altas e utilizando técnicas de extrusão
Permeabilidade ao vapor de água	Modificação da atmosfera da embalagem, prolongando a vida útil
Permeabilidade ao oxigênio	Modificação da atmosfera da embalagem, prolongando a vida útil
Solubilidade em água	Melhoria da biodegradação à disposição
Hidrofobicidade	Resistência à água aprimorada
Atividade antioxidante	Redução das taxas de oxidação, prolongando a vida útil

3.4.1. Propriedades mecânicas

Uma das principais funções das embalagens é proteger seu conteúdo e separá-lo do ambiente externo. Isso exige que o material resista às forças de tração, cisalhamento e perfuração durante a embalagem, transporte, comercialização e uso do produto embalado (em armazéns, supermercados ou outros locais de consumo final).

O ensaio de tração é o método mais comum para caracterização de propriedades mecânicas, no qual uma amostra do filme obtido é puxada verticalmente a uma velocidade constante até a ruptura. Dos 100 artigos analisados, 91 mencionaram a realização de ensaios mecânicos (Tabela A2, MS) de acordo com a ASTM D882-12 (2012).

Han (2014) propôs uma classificação baseada em faixas de valores, nas quais os filmes são considerados inferiores, marginais, bons e superiores com resistência à tração <1 MPa, 1–10 MPa, 10–100 MPa e >100 MPa, respectivamente. As sacolas plásticas de

polietileno de alta densidade apresentaram valor de tensão máxima de aproximadamente 6 MPa, o que é marginal (Correa et al., 2015). Em comparação, filmes com tensão inferior à das sacolas plásticas devem ser utilizados sob menor estresse mecânico. De acordo com esta classificação, 62% dos filmes apresentaram boa resistência à tração (30% marginal, 7% inferior e 2% superior). Os filmes que exibiram maior resistência à tração foram à base de alginato (80–190 MPa; 46,3-55,2 MPa) (Bastante et al., 2021; Tan et al., 2020) e carragenina (60 MPa) (Li et al., 2020).

3.4.2. *Propriedades de Barreira*

A embalagem também deve proteger o conteúdo microscopicamente. A troca de gases e vapores ocorre entre os meios internos e externos. A permeabilidade ao vapor de água (WVP) avalia o fluxo de vapor de água através de um material, de acordo com métodos padrão (ASTM E96-80, ASTM 1989), enquanto a permeabilidade ao oxigênio e ao dióxido de carbono geralmente não é medida.

Valores variando de $1,04 \times 10^{-10}$ a $3,61 \times 10^{-16}$ kg.m.m⁻². Pa⁻¹.s⁻¹ foram relatados nos estudos analisados de acordo com a composição e proporção dos constituintes do filme (Tabela A3, MS). Han (2014) propôs uma classificação baseada em faixas de valores semelhantes às apresentadas para o ensaio de tração, sendo os filmes considerados inferiores, marginais, bons e superiores quando PVA $>10^{-13}$, 10^{-13} – 10^{-14} , 10^{-14} – 10^{-15} e $<10^{-15}$ kg.m.m⁻². Pa⁻¹.s⁻¹, respectivamente.

Para determinar a viabilidade de interação com um filme em ambientes aquosos ou úmidos, os testes de ângulo de contato são importantes. O ângulo (θ) formado entre uma gota de água e a superfície do filme é medido, e o filme é classificado como hidrofílico ($\theta < 90^\circ$) ou hidrofóbico ($\theta > 90^\circ$). Dos 100 estudos avaliados, apenas 23 analisaram o ângulos de contato do filme, dos quais 22 estudos eram hidrofílicos e apenas um era hidrofóbico (Tabela A4, MS).

Outra forma de avaliar as interações com o ambiente externo é através da solubilidade. Os filmes são completamente submersos em um meio líquido, normalmente água, por 24 horas, e a porcentagem em massa dos sólidos restantes é medida. A solubilidade dos filmes analisados variou de 2% a 100% (Tabela A5, MS). Essa grande variação depende diretamente da hidrofobicidade dos filmes, ou seja, da sua capacidade de repelir água. Alguns filmes são parcial ou totalmente solubilizados em água ($>50\%$), sendo hidrofílicos, enquanto

outros são pouco solúveis em água (filmes hidrofóbicos). Além disso, as variações também dependeram das diferentes concentrações dos componentes utilizados na formulação do filme.

3.4.3. Propriedades térmicas

Além da estabilidade mecânica, as embalagens requerem estabilidade térmica desde a temperatura ambiente até as temperaturas de processamento e armazenamento. A análise termogravimétrica (TGA) fornece um perfil da curva de degradação do filme obtida em temperaturas crescentes, enquanto a TGA diferencial fornece picos relacionados à perda de massa (Tan et al., 2020).

Dentre os estudos analisados, 54% dos filmes apresentaram resistência térmica em temperaturas iguais ou superiores a 200 °C (Tabela A6, MS). Porém, mesmo para matrizes altamente estáveis, a inclusão de substâncias voláteis em aditivos pode reduzir a estabilidade térmica. Em alguns casos, não há degradação em altas temperaturas (>200 °C); no entanto, a volatilização destes componentes pode incluir funcionalidade.

3.4.4. Propriedades ópticas

Nos casos de embalagens de alimentos frescos, os filmes devem ser transparentes para permitir avaliações visuais do conteúdo antes da compra ou consumo. A cor também influencia a compra do produto e a proporção dos componentes da embalagem pode afetar a atratividade do produto. O grau de transparência ou opacidade é obtido testando os filmes sob luz ultravioleta e visível (Bastante et al., 2021), enquanto a cor é determinada utilizando a luminosidade, ou seja, tons de vermelho e amarelo (Shen et al., 2021).

Os estudos não analisaram nenhuma alteração de cor ou transparência em relação ao padrão perceptível a olho nu, exceto em filmes com incorporação de extratos vegetais, que passaram para tons amarelados e vermelhos.

3.4.5. Propriedades ativas e bioativas (antimicrobianas/antioxidantes)

Os componentes dos filmes também podem agregar funções ativas, como redução do crescimento microbiano e/ou reações de oxidação. Dos 100 estudos avaliados, 32% demonstraram apenas ação antimicrobiana e 13% demonstraram apenas ação antioxidante.

24% relataram ambas as funções, enquanto o restante (31%) não relatou qualquer ação antimicrobiana ou antioxidante.

Sais e óxidos metálicos como prata, cobre e zinco, que atuam como inibidores do crescimento microbiano, eram comumente usados (El Fawal et al., 2020; Hajizadeh et al., 2020). Também foram utilizados extratos vegetais e compostos voláteis, sendo a maioria compostos polifenólicos com atividade antioxidante e/ou antimicrobiana (Tabela A7, MS) (Biddeci et al., 2016; Yavari Maroufi et al., 2020).

3.4.6. Relevância das propriedades nas fases do ciclo de vida do filme

Durante as fases do ciclo de vida dos filmes de biopolímero, as propriedades acima mencionadas devem ser consideradas ao avaliar modificações em formulações destinadas a reduzir os impactos ambientais. Começando pela escolha da matriz do filme e dos aditivos, eles influenciarão diretamente os custos de produção do filme, as condições do processo, a destinação final (por exemplo, aterro ou compostagem) e, conseqüentemente, os impactos ambientais devido à produção e propriedades dos materiais (Ribeiro et al., 2013). Durante a etapa de produção do filme, as propriedades térmicas se destacam, principalmente durante processos de alta temperatura, como a extrusão, uma vez que os materiais podem volatilizar ou degradar, gerando poluentes e perdendo propriedades do filme (Laslu e Mustatea, 2018).

Além disso, os aditivos de filmes podem alterar o desempenho, a funcionalidade, a aparência e/ou as propriedades de envelhecimento dos filmes (Hahladakis et al., 2018). Os aditivos dificilmente são considerados na avaliação ambiental dos bioplásticos, embora às vezes sejam adicionados em grandes quantidades (Bishop et al., 2021). Pequenas quantidades de aditivos podem resultar em impactos ambientais elevados ou desconhecidos (por exemplo, efeitos toxicológicos dos nanomateriais), sendo importante contabilizar os impactos da sua produção e utilização.

Quanto ao uso de filmes para embalagens de alimentos, podem necessitar de embalagens manuais ou mecânicas (sachês ou embalagens primárias). Os alimentos podem ser revestidos com uma solução formadora de filme que tem interações neutras com a superfície do alimento (Laslu e Mustatea, 2018), mas os aditivos podem migrar para os alimentos embalados durante a fase de utilização. Espera-se que muitos aditivos de filmes de biopolímero sejam seguros para os seres humanos e para o meio ambiente (por exemplo, óleos essenciais e glicerol), diferente de muitos aditivos plásticos que causam impactos negativos

(Hahladakis et al., 2018). No entanto, a segurança das nanopartículas metálicas (por exemplo, prata) está em discussão devido à sua possível migração para alimentos embalados (Jafarzadeh et al., 2021).

Além disso, a estabilidade do filme durante a embalagem deve ser investigada para garantir uma vida útil adequada dos alimentos. O ângulo de contato pode mostrar o comportamento de um filme sob diferentes condições (hidrofílicas ou hidrofóbicas), bem como sua solubilidade, o que pode auxiliar na avaliação da biodegradabilidade do filme produzido.

Considerando que os alimentos são transportados do centro de produção para o centro de distribuição e depois para o consumidor, devem ser consideradas as diferentes forças (tração, cisalhamento e torção) constantemente experimentadas pelas embalagens. Devem ser realizados testes destrutivos para verificar os limites do filme produzido, bem como testes de solubilidade e ângulo de contato para identificar a possibilidade de condensação de água na superfície da embalagem (Laslu e Mustatea, 2018).

Quando em repouso no local de armazenamento, venda ou consumo, os alimentos estão sujeitos à decomposição/degradação, mesmo em condições adequadas. A permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio é especialmente importante, pois ambos estão relacionados com alterações de degradação (Laslu e Mustatea, 2018). Compostos antioxidantes e antimicrobianos são aditivos importantes para filmes, uma vez que podem prolongar a vida útil de alimentos embalados, especialmente para alimentos frescos e não processados embalados (Versino et al., 2023).

Durante o consumo alimentar, os filmes comestíveis são integrados aos alimentos. Os componentes antioxidantes também podem desempenhar funções bioativas (porque as reações de oxidação estão envolvidas em doenças crônicas e problemas de saúde). Entretanto, os compostos antimicrobianos podem afetar negativamente a microbiota intestinal. Em filmes não comestíveis, estas propriedades desempenham papéis fundamentais na biodegradabilidade após descarte; se os filmes tiverem alta atividade antioxidante e antimicrobiana, demorarão mais para se decompor por hidrólise (ácida ou enzimática), oxidação ou ação bacteriana (Laslu e Mustatea, 2018).

4. Avaliações ambientais de filmes de base biológica

Encontramos 17 avaliações ambientais relevantes de filmes de base biológica aplicando ACV (palavras-chave do Grupo II), com dois estudos avaliando apenas a pegada de

carbono. Os filmes de base biológica variaram em termos de tipo de material, matéria-prima e escala de produção (Tabela A8, MS).

Nesta seção, analisamos o TRL de filmes e processos de produção, principais matérias-primas e biopolímeros utilizados como matrizes, principais aditivos utilizados em formulações de filmes e opções de modelagem para ACVs (limites do sistema, unidades funcionais e categorias de impacto). A comparação direta dos resultados de impacto é difícil, pois os estudos adotaram diferentes unidades funcionais, categorias de impacto e métodos. Por exemplo, os estudos de Zhang et al. (2017) e Petrucci et al. (2018) avaliaram 1 kg de filme PLA. No entanto, obtiveram dados de diferentes escalas de produção cinematográfica (laboratório e piloto) e escolheram diferentes categorias de impacto e métodos. A única categoria de impacto comum foi a de mudanças climáticas, avaliadas por diferentes métodos (IPCC 2013, 100anos e Eco-Indicador 99, respetivamente). Divergências semelhantes foram encontradas nos demais estudos.

4.1. Nível de prontidão tecnológica e escala de produção

Os produtos avaliados foram baseados em dados de diferentes escalas de produção (laboratorial, piloto ou industrial). Seis filmes de biopolímero foram avaliados no TRL 9, com base em dados industriais (Choi et al., 2018; Hermann et al., 2011; Lokesh et al., 2020). Seis estudos utilizaram dados em escala laboratorial de experimentos na fase de produção de filmes (por exemplo, De Léis et al., 2017; Günkaya e Banar, 2016), um modelou uma planta industrial a partir de dados em escala laboratorial (Müller-Carneiro et al., 2023) e um utilizou dados de produção em escala piloto (Vea et al., 2021). Dois estudos analisaram novas formulações baseadas em biopolímeros comerciais (por exemplo, ácido polilático - PLA) incorporados com novas nanopartículas (em um TRL baixo) com base em dados aumentados de inventário de ciclo de vida secundário (ICV) (Vigil et al., 2020; Zhang et al., 2017).

4.2. Matérias-primas

A maioria dos estudos avaliou filmes sintetizados a partir do milho. Outras matérias-primas de primeira geração incluem mandioca, trigo, soja e beterraba sacarina. Alguns estudos avaliaram matérias-primas de segunda geração, como palha de milho (Lokesh et al., 2020), polpa de beterraba sacarina (Vea et al., 2021), quitosana (Leceta et al., 2013;

2014), cascas de laranja (Günkaya e Banar, 2016) e sementes de manga (Müller-Carneiro et al., 2023). Apenas um estudo analisou filmes à base de algas (Leceta et al., 2014).

4.3. Matrizes e aditivos

A maioria dos estudos de ACV concentrou-se em filmes à base de PLA produzidos em escala industrial, seja como materiais únicos ou em combinação com outros biopolímeros em misturas ou filmes multicamadas. O PLA é um dos únicos plásticos comerciais totalmente de base biológica. Os filmes com baixo TRL avaliados foram baseados em matrizes como amido, proteína, quitosana, pectina e celulose (Da Silva et al., 2021; De Léis et al., 2017; Deng et al., 2013; Günkaya e Banar, 2016; Leceta et al., 2014; Riviére et al., 2021).

Avaliações ambientais de novos biopolímeros durante os estágios iniciais de desenvolvimento (TRLs 3–6) foram publicadas, a maioria delas usadas como matrizes na pesquisa de novas formulações de filmes (artigos no grupo I, Figura 2). No entanto, existem poucos estudos de ACV que relatam filmes de base biológica utilizando estes materiais como matrizes, provavelmente porque os dados de inventário da sua produção à escala industrial modelada dificilmente estão disponíveis (mais na secção 5.3). Durkin et al. (2019) analisaram um novo biopolímero, poli(carbonato de limoneno) (PLC) e modelaram sua produção em escala industrial usando software de simulação (Aspen Plus). Fernández-daCosta et al. (2015) realizaram uma ACV de uma nova rota para a produção de polihidroxibutirato (PHB) a partir de águas residuais domésticas, do berço ao portão, no estágio inicial de desenvolvimento. Tecchio et al. (2016) desenvolveram um protocolo em escala piloto para ampliar e avaliar polímeros de base biológica e aplicaram-no ao succinato de polibutileno de base biológica (Bio-PBS).

Além disso, merecem destaque os estudos de ACV sobre biopolímeros naturais (amido, gelatina e celulose) extraídos de resíduos agroindustriais, que são potenciais matrizes de filmes. Embora tais extrações possam resultar em perdas de materiais e emissões poluentes, surgem benefícios no que diz respeito à agregação de valor aos materiais considerados resíduos e à redução da demanda por fontes alimentares para a formulação de filmes de biopolímeros. Para reduzir os impactos ambientais destes processos de extração, é fundamental introduzir o ecodesign nas fases iniciais de desenvolvimento do processo.

De Araújo e Silva et al. (2020) e Da Silva et al. (2021) propuseram procedimentos para realizar ACVs em níveis iniciais de maturidade tecnológica. De Araújo e Silva et al.

(2020) compararam as rotas tecnológicas para produção de celulose bacteriana utilizando meios de cultura sintéticos e novos de base biológica (melaço de soja e suco de caju). Sampaio et al. (2017) e Da Silva et al. (2021) compararam processos alternativos para extração de gelatina da pele de tilápia e amido de grãos de manga. As abordagens aplicadas nesses estudos incluíram a construção de inventários em escala laboratorial, a realização de ACVs comparativas de rotas alternativas em escala laboratorial, a avaliação de cenários para melhorar o desempenho ambiental, a modelagem de aumento de escala, a realização de ACVs após o aumento de escala do processo e a identificação de escala piloto ideal. rotas de implementação.

Em relação aos aditivos, os estudos revisados utilizaram principalmente glicerol como plastificante e nanopartículas para melhorar as propriedades mecânicas dos filmes, e a maioria apresentou processos em estágios iniciais de desenvolvimento (TRLs 3–5).

4.4. Unidades funcionais

Três tipos principais de unidades funcionais (UFs) foram adotados nos estudos revisados: baseadas em área (sete estudos, por exemplo, 1 m² de filme), baseadas em massa (seis estudos, 1 kg de filme) e baseadas em unidades de produto (quatro estudos): Vigil et al. (2020), Vea et al. (2021) e Firoozi Nejad et al. (2021) e Hutchings et al. (2021) para um saco embalando alface, um croissant embalado e bandejas embalando 1 kg de carne, respectivamente.

4.5. Limites do sistema

Aproximadamente metade dos estudos adotou limites do berço ao portão (focados na produção); o restante adotou limites do berço ao túmulo. Para este último, foram considerados vários cenários de fim de vida: combinação de eliminação de resíduos por país (Hutchings et al., 2021); compostagem 100% para filmes biodegradáveis (Leceta et al., 2013; Petrucci et al., 2018; Vigil et al., 2020); cenários separados de incineração, aterro, compostagem e digestão anaeróbica; e diferentes combinações, como 50% de incineração/50% de aterro (Hermann et al., 2011; Hutchings et al., 2021; Zhang et al., 2017).

4.6. Categorias e métodos de impacto

No que diz respeito às categorias de impacto ambiental, a maioria dos estudos tinha listas de categorias abrangentes: oito avaliaram 9–17 categorias, três incluíram 4–7 categorias e cinco avaliaram uma (mudanças climáticas) ou duas categorias (mudanças climáticas e uso de energia) (Tabela A9, MS). As categorias avaliadas com mais frequência foram mudanças climáticas (todos os estudos), utilização total de energia, utilização de energia não renovável ou esgotamento fóssil abiótico (88%), eutrofização (71%) e acidificação (59%). Os menos avaliados foram formação de smog (6%), efeitos respiratórios (11%) e material particulado (23%). Aproximadamente metade dos estudos incluiu indicadores de toxicidade humana e/ou ecotoxicidade, e apenas 30% incluíram esgotamento de água. Um estudo propôs uma nova categoria de impacto (múltiplas alterações climáticas) (Vea et al., 2021).

Os métodos mais utilizados foram ReCiPe *Midpoint Hierarchical* e IPCC (Huijbregts et al., 2017; IPCC, 2013). Todos os 17 estudos avaliaram categorias de impacto médio e três incluíram categorias de desfecho: saúde humana, ecossistemas e recursos (Leceta et al., 2013; 2014; Petrucci et al., 2018).

Apenas 2 dos 17 estudos abordaram os encargos de perda e desperdício de alimentos (PDA) associados aos filmes de base biológica. No entanto, diferentes materiais e configurações de embalagem (por exemplo, monocamada vs. multicamada) resultam em diferentes prazos de validade e, conseqüentemente, em desperdício de alimentos (Otoni et al., 2021; Pauer et al., 2019).

Hutchings et al. (2021) avaliaram bandejas de carne cobertas com películas de cobertura de base biológica e incluíram PDA alocando parte da carne vencida desperdiçada para a película de cobertura com base na proporção da área do filme em relação a toda a área da embalagem. Vigília et al. (2020) avaliaram embalagens ativas com nanopartículas metálicas (agentes antimicrobianos) e evitaram a perda de alimentos (alface) ao longo da cadeia de abastecimento usando um modelo de probabilidade de perda de alimentos (PPA) (Conte et al., 2015). Zhang et al. (2017) avaliaram embalagens ativas com nanopartículas de Ag e TiO₂, mas não analisaram os impactos da PDA, uma vez que se presumiu que as alternativas de embalagem tinham capacidades antimicrobianas equivalentes. Outros estudos que avaliam embalagens multicamadas com potenciais benefícios de prazo de validade não mencionam este aspecto (Vea et al., 2021).

A avaliação ambiental dos filmes de base biológica revisados nesta seção concentrou-se na avaliação de biopolímeros comercialmente disponíveis, aplicando principalmente ACV convencional para selecionar as melhores formulações para novas soluções de embalagem (Broeren et al., 2016; Colwill et al., 2012; Ribeiro et al., 2013; Venkatachalam et al., 2018). Poucos estudos se concentraram na melhoria do desempenho ambiental de biopolímeros (matrizes potenciais) durante os estágios iniciais de desenvolvimento (Da Silva et al., 2021; De Araújo e Silva et al., 2020; Sampaio et al., 2017).

A maioria das avaliações de filmes de base biológica aplicaram limites do berço ao portão e confiaram apenas em dados laboratoriais para calcular impactos e comparar novos biopolímeros com biopolímeros existentes (geralmente de base fóssil) (Leceta et al., 2013; Rivière et al., 2021). No entanto, algumas avaliações de biopolímeros naturais (por exemplo, amido, proteínas e gelatina) e um novo filme adotaram métodos de aumento de escala para construir inventários de processos de primeiro plano em escala industrial (TRL 8–9) (Da Silva et al., 2021; Müller-Carneiro et al., 2023; Sampaio et al., 2017).

5. Desafios e recomendações para o ecodesign de filmes de base biológica em fases iniciais de desenvolvimento

Embora a ACV tradicional se baseie em dados de processos industriais bem conhecidos e avalie produtos comerciais, a ACV ex-ante depende de dados de processos laboratoriais e avalia novos produtos e processos, ambos mudando com as adequações e melhorias sofridas ao longo dos TRLs. As subseções a seguir discutem os desafios e recomendações relacionados à ACV ex-ante, considerando as propriedades dos filmes de base biológica, técnicas de produção e principais materiais utilizados nos níveis de maturidade de conceituação e experimentação laboratorial.

5.1. Definição de funcionalidade e comparabilidade entre novos filmes de base biológica e filmes existentes (baseados em fósseis)

Definir a função do produto para os usuários e uma unidade de medição para funcionalidade (unidade funcional) são desafios críticos para filmes de base biológica na fase de laboratório. Os filmes para embalagens de alimentos podem manter a integridade física dos alimentos (durante o transporte e/ou armazenamento), prolongar a vida útil e fornecer complementação nutricional (para filmes comestíveis). Quando nenhuma aplicação específica

é definida para novos filmes, a escolha de UFs é difícil porque a quantidade de material necessária para cumprir cada função é desconhecida.

A maioria dos estudos revisados adotou unidades baseadas em massa ou área. No entanto, pode haver compensações significativas entre os filmes de biopolímero, tais como densidade, propriedades mecânicas e propriedades de barreira. Por exemplo, os filmes de amido (já que a maioria dos filmes à base de polissacarídeos são hidrofílicos) têm alto WVP, enquanto os filmes de PLA têm WVP mais baixo, mas alta permeabilidade ao oxigênio.

Além disso, materiais com propriedades inferiores podem necessitar de filmes mais espessos (em relação às suas alternativas). Assim, utilizar a mesma massa para comparar diferentes filmes de biopolímeros é inadequado, sendo necessário considerar a potencial aplicação destes produtos (como embalagens de alimentos) ao comparar filmes alternativos. UFs baseadas em área (por exemplo, 1 m² de filme) podem ser mais apropriadas para considerar densidades de materiais; No entanto, alterações na espessura necessária para diferentes aplicações requerem uma definição de aplicação.

Fatores de substituição de materiais (FSMs) têm sido usados para apoiar a comparabilidade de diferentes polímeros, calculando alterações de peso de material para obter filmes (ou outro formato de embalagem) com funções equivalentes (por exemplo, resistência mecânica e barreiras à água) às existentes (Aggarwal et al., 2018; Broeren et al., 2016; Müller-Carneiro et al., 2023; Roes et al., 2007). FSMs foram aplicados para corrigir UFs baseadas em massa. Esta abordagem é baseada no método de índice de materiais de Ashby (Ashby, 2005) e produz apenas resultados relativos (em relação a um material de referência, por exemplo, plástico convencional). Os FSMs têm limitações, uma vez que as embalagens podem ter uma engenharia excessiva para uma propriedade e uma engenharia insuficiente para outra (Aggarwal e Langowski, 2020). Idealmente, esta abordagem poderia ser adaptada para determinar a espessura adequada com base nos limites de propriedades para produtos alimentares específicos. No entanto, estes limites só podem ser obtidos para determinadas aplicações, como a produção de carne e queijo (Barlow e Morgan, 2013; Hutchings et al., 2021).

Nossa recomendação para desenvolvedores de filmes é formar equipes multidisciplinares para definir as principais aplicações e UFs adequadas, construir vários cenários (por exemplo, baseados em massa e área) e/ou aplicar FSMs para melhorar a comparabilidade de materiais com propriedades muito diferentes. Além disso, se forem definidos limites de propriedade para aplicações potenciais, recomendamos o uso de cálculos FSMs baseados nesses limites, em vez de propriedades de materiais de referência.

5.2. *Avaliando todo o ciclo de vida (do berço ao túmulo) de novos filmes de base biológica*

A falta de conhecimento sobre a aplicação e o comportamento de degradação de numerosas formulações de filmes de base biológica dificulta as decisões de ecodesign relativamente às fases de utilização e fim-de-vida. A maioria das avaliações de biopolímeros (Yates e Barlow, 2013) e de muitos novos filmes de base biológica (Leceta et al., 2013; Müller-Carneiro et al., 2023; Riviére et al., 2021), desconsiderou a fase de uso para embalagens de alimentos, assumindo que o armazenamento é por um curto período e os impactos estão principalmente associados às distâncias de transporte dos supermercados até as casas dos consumidores. No entanto, os filmes de base biológica podem incorporar nanopartículas ou agentes antibacterianos que afetam a saúde humana e os ecossistemas através de várias rotas toxicológicas (por exemplo, ingestão ou contato dérmico) (Pourzahedi e Eckelman, 2015; Salieri et al., 2019; Weyell et al., 2020). Além disso, o uso de agentes antimicrobianos pode aumentar a vida útil dos alimentos embalados. Assim, enfatizamos a importância da adoção dos limites do sistema do berço ao túmulo ao avaliar novos filmes de base biológica.

Neste ponto, é importante abordar as seguintes questões: i) os potenciais impactos das nanopartículas, ii) o efeito dos filmes na PDA, e iii) a definição e modelagem de cenários de fim-de-vida. Acredita-se que os materiais nano-habilitados causam problemas toxicológicos, incluindo biopolímeros incorporados com nanopartículas antibacterianas metálicas (por exemplo, Ag e ZnO) (Aznar-Mollá et al., 2020), o que levou alguns autores a recomendar evitá-los em compósitos poliméricos (Álvarez -Chávez et al., 2012). Além disso, os métodos de toxicidade da ACV ignoram a maioria das nanopartículas, embora estejam sob investigação. Consequentemente, muitas ACVs sobre produtos nano-habilitados desconsideram os efeitos ambientais da liberação de nanopartículas nas fases de uso e fim-de-vida porque exigem modelagem avançada do destino das nanopartículas. A abordagem dos impactos emergentes das nanopartículas pode ser alcançada utilizando abordagens diferentes da ACV, tais como análise de risco ou inferências qualitativas (Gavankar et al., 2012; Weyell et al., 2020).

Em relação ao impacto dos filmes nos PDA, a proteção de alimentos e a redução de resíduos estão intimamente relacionadas às propriedades de barreira do filme e são aspectos importantes a serem considerados nas ACVs de filmes biopoliméricos. A relação entre embalagens e desperdício de alimentos tem sido investigada com estudos que indicam que o impacto ambiental da produção adicional de alimentos tende a ser mais significativo do

que o da produção de polímeros (de base fóssil) (Dilkes-Hoffman et al., 2018; Kakadellis et al., 2020; Zemigala, 2022).

Pauer et al. (2019) propuseram um limite de sistema estendido para materiais de embalagem que incluía a carga de produção e descarte de resíduos alimentares. No entanto, isso exigiria a obtenção de uma série de alimentos desperdiçados, o que exige a recolha de dados empíricos porque não estão amplamente disponíveis. Permanece uma lacuna na modelagem da ACV de novos filmes de biopolímero, particularmente em análises comparativas. Uma solução potencial é usar modelos PDA baseados na vida útil do produto (Conte et al., 2015). Este indicador pode ser integrado com ACV ex-ante e outros indicadores (por exemplo, avaliação de custos e risco do filme) num quadro de análise de decisão multicritério (Dias et al., 2016; 2019) considerando uma UF comum (por exemplo, 1 m² de filme).

Para abordar a definição de cenários de fim de vida, destacamos que o fim de vida pode ser responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais dos biopolímeros, dependendo do método predominante de tratamento de resíduos (aterro, incineração e compostagem) utilizado na região onde o material é consumido e descartados (Yates e Barlow, 2013). Os filmes comestíveis são ingeridos pelos consumidores juntamente com os alimentos; portanto, o tratamento de resíduos não é necessário. Para os filmes não comestíveis descartados, existem muitos destinos possíveis, tanto através de sistemas de gestão de resíduos como do meio ambiente. No entanto, para novas formulações de filmes, a grande quantidade de informações necessárias para modelar o fim-de-vida não está disponível e pode ser modelada de forma diferente em diferentes estudos. Por exemplo, os testes de degradação podem não ter sido realizados em diferentes ambientes e sistemas de gestão de resíduos. Além disso, informações como o teor de carbono e energia dos materiais podem ser desconhecidas, dificultando a quantificação das emissões provenientes da incineração. Devido à indisponibilidade de dados, os cenários de lixo marinho raramente são explorados em estudos de fim de vida de novos materiais.

Os estudos realizados por Gadaleta et al. (2023) e Dolci et al. (2021) ilustram a importância e as limitações da avaliação de cenários de fim de vida para materiais de base biológica. Dolci et al. (2021) utilizaram dados primários para comparar o desempenho ambiental do papel para coleta de alimentos e das sacolas de base biológica, mostrando que o tipo de sacola teve grande influência nos impactos ambientais totais. Além disso, mostraram que a melhor opção de saco varia de acordo com as condições ambientais locais e as práticas de gestão de resíduos, bem como com as escolhas de modelização para contabilizar as

emissões provenientes da reciclagem. Gadaleta et al. (2023) também coletaram dados primários ao avaliar os impactos ambientais de rotas alternativas de descarte de resíduos de embalagens de acetato de celulose (AC), destacando a necessidade de pesquisas futuras sobre emissões provenientes de incineração e digestão anaeróbica.

Considerando que as fases de fim-de-vida podem dominar os impactos dos biopolímeros (Hottle et al., 2017), a nossa recomendação é modelá-las de forma simplificada, concentrando-se nas emissões potenciais de CO₂ e metano e descrevendo os impactos possíveis e previstos. Além disso, o cenário base para a fim de vida deve considerar a combinação predominante de eliminação de resíduos regionais para resíduos urbanos ou plásticos, quando disponível (Hermann et al., 2011). Por exemplo, quando os bio-resíduos não são separados para compostagem, mas são enviados para aterros, a compostagem só deve ser considerada numa análise de cenário e não no caso base. Além disso, lacunas de dados no inventário de fim-de-vida do filme (por exemplo, a porção de carbono degradada) podem ser preenchidas com informações de materiais semelhantes (por exemplo, fim-de-vida de amido para filmes à base de amido).

5.3. Dados apropriados para a construção de futuros inventários de primeiro e segundo plano de filmes de base biológica

A disponibilidade de dados de inventário é um grande desafio na realização de ACVs ex-ante de filmes de base biológica. Como existem poucos estudos de ACV sobre filmes de biopolímeros, foi realizada uma busca nas bases de dados de ICV para identificar os principais componentes do filme (matriz e aditivos) e técnicas de produção disponíveis (e.g., *casting*), considerando as bases de dados incluídas nos pacotes SimaPro (e.g., Ecoinvent e Pegada Agrícola) e uma nova base de dados especializada em produtos químicos (*Carbon Minds*) (Tabela 2). Descobrimos que um número considerável de conjuntos de dados, especialmente aqueles nas bases de dados Ecoinvent e Agri-footprint, eram adequados para matrizes em filmes à base de amido (Huber et al., 2022). No entanto, estes conjuntos de dados estavam principalmente relacionados com amido de culturas produzidas em países europeus. Em relação aos aditivos, também foram encontrados dados para diversos plastificantes, especialmente para Ecoinvent e Carbon Minds (Piccinno et al., 2016). No entanto, como os bancos de dados são uma coleção de conjuntos de dados de ICV baseados na produção comercial (TRL 9), muitos aditivos ainda não estão disponíveis, especialmente nanocargas

(por exemplo, nanocristais de celulose e nanopartículas de Ag), que ainda apresentam TRLs baixos.

Tabela 2. Disponibilidade de inventários de componentes de filmes em bancos de dados de ACV

Matrizes	Ecoinvent	Agri-footprint	Carbon minds	Outros bancos de dados
Carboximetilcelulose	X	-	-	-
Ácido polilático (PLA)*	X	-	-	USLCI
Amido (mandioca/tapioca)	-	X	-	-
Amido (milho/milho)	X	X	-	-
Amido (ervilha)	-	X	-	-
Amido (Batata)	X	-	-	-
Amido (Arroz)	-	X	-	-
Amido (trigo)	-	X	-	-
Plastificantes				
Ácido acético	X	-	X	-
Clorofórmio (triclorometano)	X	-	-	-
Ácido Cítrico	X	-	-	-
Dietanolamina (DEA)	X	-	X	Industry data 2.0
Dietilenoglicol	X	-	X	-
Etilenoglicol	X	-	X	-
Glicerol (glicerina)**	X	-	-	USLCI
Monoetanolamina (MEA)	X	-	X	-
Propileno glicol	X	-	X	-
Hidróxido de sódio (NaOH)	X	X	X	USLCI, ELCD, Industry data 2.0
Ácido esteárico	X	-	-	-
Trietanolamina (TEA)	X	-	X	Industry data 2.0
Trietilenoglicol	X	-	-	-
Enchimentos/agentes de reforço				
Carboximetilcelulose	X	-	-	-
Fibras de celulose***	X	-	-	-

*Produção de PLA válida apenas para o fabricante *NatureWorks*.

**Glicerina de diversas fontes (óleo de soja, colza, palma, etc.).

***Existe um conjunto de dados de “fibra de celulose” no ecoinvent, mas é um material produzido a partir de resíduos de papel destinado a aplicações de isolamento de edifícios. Potencialmente poderia ser usado como proxy.

Uma nova busca de inventários em artigos publicados mostrou que, embora um número considerável de estudos apresentasse dados de inventário, cada inventário adotava critérios de modelagem particulares, mesmo para materiais semelhantes. Esses critérios adotados diferiram nas seguintes questões: i) escala de produção (laboratorial, piloto e industrial); ii) alocação (por exemplo, massa, econômica e energia); iii) rotas de produção (melhores rotas técnicas não definidas nas fases iniciais) e iv) matéria-prima (por exemplo, amido de milho, mandioca, caroço de manga, etc.).

Nossa primeira recomendação para aumentar os dados de inventário de matrizes de filmes e aditivos é construí-los a partir de relações de entrada-saída de laboratório e conhecimento especializado de equipamentos industriais. Cenários alternativos de maquinaria

e possíveis ganhos de rendimento também devem ser explorados. A construção de um futuro inventário em escala industrial a partir de dados laboratoriais requer métodos ou software de aumento de escala (por exemplo, *Aspen Plus* ou *SuperPro Designer*) (Parvatker e Eckelman, 2019) para lidar com a incerteza nas avaliações e limitações de dados. Os métodos de aumento de escala mais robustos, como simulações, devem ser utilizados para a construção do ICV das matrizes, pois representam a maior parcela do peso do filme. Para aditivos com menor peso (ou seja, nanocargas), podem ser utilizadas abordagens simplificadas, como proxies (Milà i Canals et al., 2011).

Além disso, a criação de uma base de dados colaborativa para os profissionais partilharem dados de ICV sobre novos produtos e processos com TRLs baixos beneficiaria as avaliações ex ante e a concepção ecológica nas fases iniciais de desenvolvimento. Numerosos grupos de investigação estão a desenvolver produtos de base biológica semelhantes, pelo que uma atividade de investigação mais interligada pode poupar tempo e recursos e facilitar a concepção ecológica. Se não houver acesso aos dados de ICV na escala exigida, os profissionais de ACV podem aplicar ferramentas de aumento de escala para obter ICV modelado em escala industrial. A Tabela 3 apresenta estudos de ACV de materiais não encontrados em bancos de dados, incluindo quitosana, gelatina de peixe e celulose bacteriana, que poderão ser utilizados em estudos futuros de filmes de base biológica.

Em relação aos futuros processos de base, os inventários (por exemplo, produtos químicos e energia) devem ser adaptados ao futuro quando os produtos atingirem o TRL 9 (Arvidsson et al., 2018; Thonemann et al., 2020). Os futuros bancos de dados de ICV (por exemplo, inventários Ecoinvent para 2030, 2040,..., 2100) foram desenvolvidos para sistemas energéticos sob diferentes cenários de mudanças climáticas (Mendoza Beltran et al., 2020) e podem ser implementados em cenários usando software como o *Activity Browser* (Steubing e de Koning, 2021).

Tabela 3. Estudos revisados de filmes de base biológica: materiais utilizados, disponibilidade de dados de inventário, Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) de processos e resultados para Potencial de Aquecimento Global (PAG)

Componente/técnicas	TRL	Escala do modelo	PAG (kg CO ₂ -eq/kg)	Dados de disponíveis	Fonte de dados
Matrizes					
Ágar (<i>Gelidium sesquipedale</i> - <i>Rodophyta</i>)	3-5	-	-	P	Leceta et al. (2014)
Celulose bacteriana	3-5	Lab / Industrial*	-	-	de Araújo e Silva et al. (2020)
Amido de mandioca	9	Industrial	0.54	S	De Léis et al. (2017), updated Ecoinvent v.3.7

Quitosana	3-5	Lab	-	P	Leceta et al. (2013; 2014)
Amido de milho	9	Industrial	0.84	S	Ecoinvent v.3.7
Gelatina (peixe)	3-5	Lab	43.7 – 85.3	S	Sampaio et al. (2017)
Amido de caroço de manga	3-5	Lab / Industrial*	15.8 / 4.9	S	Da Silva et al. (2021)
Pectina de casca de laranja	3-5	Lab	-	-	Gunkaya and Banar (2016)
Proteína de soja	3-5	Lab	-	P	Leceta et al. (2014)
Glúten de trigo (pó)	9	Industrial	0.71	S	Deng et al. (2013)
Nanocargas					
<i>Nanocristsais de celulose</i>					
Fibras de coco	3-5	Lab	207	S	Nascimento et al. (2016)
Fibras de coco	3-5	Lab	-	-	Figueirêdo et al. (2012)
Fibras de algodão	3-5	Lab	-	-	Figueirêdo et al. (2012)
Fibras de algodão	6-8	Piloto	28 - 50	S	Zhang et al. (2022)
Polpa Kraft	6-8	Piloto	29	S	Gu et al. (2015)
Fibras de folhas (<i>Phormium tenax</i>)	3-5	Lab	N/A	-	Petrucci et al. (2018)
Cacho de frutas vazio de dendezeiro	3-5	Lab	-	-	Teh et al. (2019)
<i>Nanofibra de celulose</i>					
Resíduos de cenoura	3-5	Industrial*	N/A	S	Piccinno et al. (2018)
<i>Nanocristsais de amido</i>					
Amido de milho	3-5	Lab	-	-	LeCorre et al. (2013)
Amido de caroço de manga	3-5	Industrial*	19.6	S	Müller-Carneiro et al. (2023)
Nanoargila organicamente modificada (OMMT)	3-5	Lab	-	P	LeCorre et al. (2013); Petrucci et al. (2018)
Nanopartículas de prata (Ag)	3-5	Industrial*	213	S	Walser et al. (2011); Zhang et al. (2017)
Nanopartículas de dióxido de titânio (TiO ₂)	3-5	Industrial*	9 - 278	P	Caramazana-González et al. (2017)
Plastificantes					
Citrato de acetil tributil (ATBC)	3-5	Lab	-	-	Petrucci et al. (2018)
Glicerol (glicerina) soja	9	Industrial	4,8	S	Ecoinvent 3.7
Limoneno	3-5	Lab	-	-	Petrucci et al. (2018)
Técnicas de produção					
<i>Casting</i> (Método Gontard/Gennadios**)	3-5	Lab	-	S	Deng et al. (2013)
<i>Casting</i> (solvente: álcool)	3-5	Lab	-	-	De Léis et al. (2017)
<i>Casting</i> (solvente: 1% solução de ácido acético)	3-5	Lab	-	P	Leceta et al. (2013; 2014)
Extrusão	9-10	Industrial	0,65	S	Ecoinvent 3.7

*Atualizado para a escala referida (a partir de dados de laboratório).

**Métodos Gontard ou Gennadios apenas para filmes proteicos. P: parte dos dados de ICV disponíveis (por exemplo, materiais, mas não energia/infraestrutura).

5.4. Tempo necessário para avaliação ambiental

Pode-se argumentar que a realização de ACVs ex-ante para novos biopolímeros e filmes é a abordagem mais adequada para todos os TRLs porque produz resultados quantificáveis. No entanto, a ACV ex-ante exige dados e tempo, além de exigir um procedimento de ampliação.

Por outro lado, os métodos simplificados de fase inicial (MSFI) centram-se nas informações de input (por exemplo, intensidade da matéria-prima) e de output (emissões) relacionadas com categorias de impacto relevantes em fases específicas do ciclo de vida, fazendo uso de indicadores semiquantitativos e qualitativos (Fernández-daCosta et al., 2019). Na fase inicial de pesquisa de conceituação do produto (TRLs 1–2), quando rotas tecnológicas para gerar novos filmes e formulações alternativas são exploradas, os MSFI propostos para outros produtos podem ser adaptados para avaliar e classificar formulações alternativas de filmes. Escalas visuais, como o scorecard plástico, podem ser adaptadas à avaliação de filmes, melhorando assim a comunicação dos resultados (Álvarez-Chávez et al., 2012).

Os principais desafios relacionados ao ecodesign de filmes de biopolímeros na fase inicial de desenvolvimento e as recomendações propostas para superá-los estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4. Resumo dos desafios para avaliar o desempenho ambiental de filmes de biopolímero com baixo TRL e recomendações

Desafios	Recomendações
i) Definição de funcionalidade e comparabilidade entre filmes de base biológica novos e existentes	
Identificação de aplicações e consideração de funcionalidades	- Formação de equipe multidisciplinar composta por desenvolvedores de produtos, engenheiros de produção e especialistas em marketing para dar suporte às principais aplicações dos produtos; - Utilizar análise de cenários para avaliar o efeito de múltiplas unidades funcionais nos resultados de impacto (por exemplo, 1 m², 1 kg, ou baseado em produto), assumindo as aplicações mais potenciais de filmes para embalagens de alimentos; - Ao adotar 1 kg como unidade funcional, aplicar fatores de substituição de material baseados em um material de referência (por exemplo, plástico convencional) em uma análise de sensibilidade.
ii) Adoção do limite do berço ao túmulo na ACV ex ante de filmes de base biológica	
Consideração das fases de uso e fim de vida	- Identificar as principais aplicações possíveis para a modelação de diferentes cenários para as fases de utilização e fim de vida; - Aplicar abordagens híbridas, combinando ACV e outros indicadores desde a avaliação de risco para contabilização dos possíveis efeitos de toxicidade devido à libertação de nanomateriais no ambiente. Utilizar análise de decisão multicritério para integração de indicadores; - Modelar cenários simplificados de fim de vida considerando a combinação de países como caso base, investigando opções de circularidade. Preencha lacunas de dados com dados de materiais semelhantes (por exemplo, amido semelhante).
Consideração dos encargos	- Aplicar cenários para incluir perdas, por exemplo, baseados na probabilidade

com perda e desperdício de alimentos	de perdas em sistemas similares de embalagem de alimentos, especialmente ao comparar materiais com propriedades ativas (antimicrobianas e/ou antioxidantes).
iii) Dados de inventário para avaliação de filmes de base biológica em situações atuais e futuras	
Falta de dados primários de inventário	- Utilização de inventários em escala piloto ou industrial para avaliação de impactos de filmes; - Criação de banco de dados colaborativo para compartilhamento de dados de ICV sobre novos produtos e processos com baixo TRL;
Uso de futuros dados secundários	- Aplicar cenários futuros baseados em bases de dados ecoinvent "futuras" para o período em que se espera que o biopolímero atinja o TRL 9 (por exemplo, cinco ou mais anos antes da situação atual de desenvolvimento).
iv) Tempo necessário para avaliação ambiental	- Adaptar abordagens semiquantitativas ou qualitativas, inserindo indicadores para os principais aspectos ambientais relacionados aos componentes dos filmes de base biológica e às propriedades dos filmes que afetam as fases de uso e fim de vida.

6. Conclusões

Este artigo revisou estudos técnicos e ambientais sobre filmes de base biológica aplicados em embalagens de alimentos para identificar os principais desafios e fornecer recomendações para equipes de PDI que visam introduzir o ecodesign nos primeiros TRLs. Considerando a vasta literatura sobre formulações de filmes e suas propriedades, encontramos poucas avaliações ambientais publicadas de filmes de base biológica. As avaliações concentraram-se na avaliação de biopolímeros comercialmente disponíveis, principalmente PLA, através da aplicação de ACVs convencionais do berço ao portão para selecionar as melhores formulações para novas soluções de embalagem. A maioria das avaliações revisadas baseou-se apenas em dados laboratoriais para calcular impactos e comparar novos biopolímeros com biopolímeros existentes (principalmente de origem fóssil), desconsiderando as melhores práticas para ACV ex-ante.

As principais dificuldades na realização de ACV ex-ante de filmes de base biológica estão relacionadas com: i) definir a principal funcionalidade do filme e UFs em escala laboratorial; ii) acesso a dados de inventário em escala laboratorial para modelagem de formulação de filmes em escala industrial; iii) acesso aos impactos na saúde humana das nanopartículas, que são amplamente utilizadas como aditivos para filmes; vi) acessar dados de inventário de base simulados para futura avaliação ex-ante de filmes de biopolímero em escala industrial; e v) avaliar o efeito dos filmes na perda e desperdício de alimentos, que leva a grandes impactos ambientais globais.

Para superar esses desafios, nossas principais recomendações são: i) estruturar uma equipe multidisciplinar desde a definição do projeto, formada por

engenheiros de produção, especialistas em ACV e especialistas em marketing, para definir as principais funcionalidades e cenários de um filme para UFs alternativas, materiais, técnicas de produção, uso de filmes e fim de vida; ii) modelar a produção de biopolímeros em escala piloto e industrial, utilizando software ou cálculos para matrizes e proxies para aditivos quando necessário; iii) construir um banco de dados de inventário colaborativo para novos biopolímeros; e iv) integrar indicadores de ACV com outros que considerem os riscos das nanopartículas na saúde, utilizando análise de decisão multicritério.

As contribuições desta pesquisa residem em conectar o conhecimento sobre os aspectos tecnológicos de biopolímeros e filmes de base biológica e os aspectos metodológicos da ACV ex-ante. Estudos anteriores de ACV sobre novos filmes consideraram apenas informações laboratoriais que são comprovadamente inadequadas para comparação com materiais comercialmente existentes. Ao ligar tópicos de investigação distintos, conseguimos identificar aspectos cruciais para a avaliação do desempenho ambiental e adaptar recomendações específicas para novos filmes de base biológica, que podem, em última análise, servir de base para o desenvolvimento de ferramentas de concepção ecológica para implementação nas fases laboratorial e piloto.

Em termos práticos, este artigo fornece uma lista abrangente de referências sobre pesquisas de filmes de base biológica que podem ser utilizadas para identificar tendências tecnológicas (matérias-primas, matrizes, aditivos, processos) e lacunas para futuros projetos de pesquisa. Além disso, fornecemos fontes de inventário de ciclo de vida (material suplementar) que podem ser usadas para preencher lacunas de dados em ACVs de filmes de base biológica, economizando tempo e recursos.

Outras oportunidades de investigação incluem a compreensão do comportamento de fim de vida dos filmes de base biológica através da experimentação e do desenvolvimento de métodos para quantificar a relação entre o material de embalagem e as potenciais perdas de alimentos, particularmente para filmes com propriedades ativas (antimicrobianas ou antioxidantes). Sugere-se também que o *casting* de filmes seja modelado em escala industrial, o que beneficiará futuras ACVs em novos filmes de base biológica, a maioria dos quais são produzidos usando esta técnica.

Além disso, os resultados da concepção ecológica devem ser documentados e amplamente comunicados a todas as partes interessadas envolvidas na investigação, desenvolvimento e inovação tecnológica, incluindo investigadores, financiadores e

empresas. Esta comunicação fornecerá apoio à decisão relativamente a novas ações de investigação e investimentos na reformulação de filmes ou em futuras produções piloto, mesmo após a finalização do projeto de investigação, permitindo que um novo filme evolua à escala do TRL. Estas recomendações impulsionarão a concepção ecológica de biopolímeros nas fases iniciais de investigação e desenvolvimento.

Referências

- Aggarwal, A., Langowski, H. C. 2020. Packaging functions and their role in technical development of food packaging systems: Functional equivalence in yoghurt packaging. *Procedia CIRP*, 90, 405-410. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.063>.
- Aggarwal, A., Schmid, M., Patel, M. K., Langowski, H. C. 2018. Function-driven Investigation of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions for material selection in food packaging applications: Case study of yoghurt packaging. *Procedia CIRP*, 69, 728-733. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.132>.
- Akinalan Balik, B., Argin, S., Lagaron, J. M., Torres-Giner, S. 2019. Preparation and characterization of electrospun pectin-based films and their application in sustainable aroma barrier multilayer packaging. *Applied Sciences*, 9(23), 5136. <https://doi.org/10.3390/app9235136>.
- Álvarez-Chávez, C. R., Edwards, S., Moure-Eraso, R., Geiser, K. 2012. Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement. *Journal of cleaner production*, 23(1), 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.003>.
- Arvidsson, R., Tillman, A. M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordelöf, A., Kushnir, D., Molander, S. 2017. Environmental Assessment of Emerging Technologies: Recommendations for Prospective LCA. *Journal of Industrial Ecology*, 22(6), 1286-1294. <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>.
- Ashby, M. F. 2005. Materials selection in mechanical design. *MRS Bull*, 30(12), 995. <https://doi.org/10.1557/mrs2005.264>.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2012. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. D882 – 12. United States.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 1989. Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials. E 96 - 95. United States.
- Azeredo, H. M., Barud, H., Farinas, C. S., Vasconcellos, V. M., Claro, A. M. 2019. Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00007>.
- Aznar-Mollá, F., Fito-López, C., Alvaro, J. A. H. 2021. Insights into the potential effects of released engineered nanomaterials from polymer nanocomposites: environmental issues

- and future activities for risk assessment and management. *Journal of Nanoparticle Research*, 23(4), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05165-w>.
- Barlow, C. Y., Morgan, D. C. 2013. Polymer film packaging for food: An environmental assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.003>.
- Bassani, F., Rodrigues, C., Marques, P., Freire, F. 2022. Ecodesign approach for pharmaceutical packaging based on Life Cycle Assessment. *Science of The Total Environment*, 816, 151565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151565>.
- Bastante, C. C., Silva, N. H., Cardoso, L. C., Serrano, C. M., de la Ossa, E. J. M., Freire, C. S., Vilela, C. 2021. Biobased films of nanocellulose and mango leaf extract for active food packaging: Supercritical impregnation versus solvent casting. *Food Hydrocolloids*, 117, 106709. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106709>.
- Batra, M., Malik, G. K., Mitra, J. 2020. Enhancing the properties of gelatin–chitosan bionanocomposite films by incorporation of silica nanoparticles. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13329. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13329>.
- Biddeci, G., Cavallaro, G., Di Blasi, F., Lazzara, G., Massaro, M., Milioto, S., Spinelli, G. 2016. Halloysite nanotubes loaded with peppermint essential oil as filler for functional biopolymer film. *Carbohydrate polymers*, 152, 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.041>.
- Bishop, G., Styles, D., Lens, P. N. 2021. Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105451. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>.
- Braun, D., Cherdron, H., Rehahn, M., Ritter, H., Voit, B. 2013. *Functional Polymers. In Polymer Synthesis: Theory and Practice* (pp. 375-395). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28980-4_6.
- Broeren, M. L. M., Molenveld, K., Van den Oever, M. J. A., Patel, M. K., Worrell, E., Shen, L. 2016. Early-stage sustainability assessment to assist with material selection: a case study for biobased printer panels. *Journal of Cleaner Production*, 135, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.159>.
- Caramazana-Gonzalez, P., Dunne, P. W., Gimeno-Fabra, M., Zilka, M., Ticha, M., Stieberova, B., Freiberg, F., McKchnie, J., Lester, E. H. 2017. Assessing the life cycle environmental impacts of titania nanoparticle production by continuous flow solvo/hydrothermal syntheses. *Green Chemistry*, 19(6), 1536-1547. <https://doi.org/10.1039/C6GC03357A>.
- Choi, B., Yoo, S., Park, S. I. 2018. Carbon footprint of packaging films made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT blends in South Korea. *Sustainability*, 10(7), 2369. <https://doi.org/10.3390/su10072369>.

- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., Chiralt, A. 2019. Improving properties of thermoplastic starch films by incorporating active extracts and cellulose fibres isolated from rice or coffee husk. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100383>.
- Colwill, J. A., Wright, E. I., Rahimifard, S. 2012. A holistic approach to design support for bio-polymer based packaging. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(4), 1112-1123. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0545-z>.
- Conte, A., Cappelletti, G. M., Nicoletti, G. M., Russo, C., Del Nobile, M. A. 2015. Environmental implications of food loss probability in packaging design. *Food Research International*, 78, 11–17. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2015.11.015>.
- Correa, C., Jucá, J. F., Motta, E. 2015. The influence of soft plastic in shear strength analysis of municipal solid waste. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, 427-436. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000125006>.
- Cucina, M., de Nisi, P., Tambone, F., Adani, F. 2021. The role of waste management in reducing bioplastics' leakage into the environment: A review. *Bioresource Technology*, 337, 125459. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125459>.
- Cucurachi, S., Steubing, B., Siebler, F., Navarre, N., Caldeira, C., Sala, S. 2022. Prospective LCA methodology for Novel and Emerging Technologies for BIO-based products - The PLANET BIO project. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129632>.
- Cucurachi, S., van der Giesen, C., Guinée, J., Guinée, J. B. 2018. Ex-ante LCA of Emerging Technologies. *CIRP Procedia*, 69, 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005>.
- Da Silva, A. K. P., Cardoso, A., de Sa Filho, E. B., de Azeredo, H. M. C., Freire, F., Casimiro Filho, F., de Figueirêdo, M. C. B. 2021. Integrating life cycle assessment in early process development stage: The case of extracting starch from mango kernel. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128981. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128981>.
- De Araújo e Silva, R., Santa Brígida, A. I., de Freitas Rosa, M., da Silva Neto, R. M., Spinosa, W. A., de Sa Filho, E. B., de Figueirêdo, M. C. B. 2020. An approach for implementing ecodesign at early research stage: a case study of bacterial cellulose production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122245>.
- De Gisi, S., Gadaleta, G., Gorrasi, G., La Mantia, F. P., Notarnicola, M., Sorrentino, A. 2022. The role of (bio) degradability on the management of petrochemical and bio-based plastic waste. *Journal of Environmental Management*, 310, 114769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114769>.
- De Léis, C. M., Nogueira, A. R., Kulay, L., Tadini, C. C. 2017. Environmental and energy analysis of biopolymer film based on cassava starch in Brazil. *Journal of cleaner production*, 143, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.147>.

- De Oliveira Júnior, S. D., de Araújo, J. S., de Asevedo, E. A., de Medeiros, F. G. M., dos Santos, V. S., de Sousa Júnior, F. C., dos Santos, E. S. 2021. Exploiting films based on pectin extracted from yellow mombin (*Spondias mombin* L.) peel for active food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01321-3>.
- DeJean, K. 2020. "Methods for Film Coating Electrospun Fibers". Williams Honors College, Honors Research Projects. 1052.
https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/1052.
- Deng, Y., Achten, W. M., Van Acker, K., Duflou, J. R. 2013. Life cycle assessment of wheat gluten powder and derived packaging film. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 429-458. <https://doi.org/10.1002/bbb.1406>.
- Dias, L. C., Passeira, C., Malça, J., Freire, F. 2016. Integrating life-cycle assessment and multi-criteria decision analysis to compare alternative biodiesel chains. *Annals of Operations Research*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2329-7>.
- Dias, L. C., Freire, F., Geldermann, J. 2019. Perspectives on multi-criteria decision analysis and life-cycle assessment. In *New Perspectives in Multiple Criteria Decision Making* (pp. 315-329). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11482-4_12.
- Dilkes-Hoffman, L. S., Lane, J. L., Grant, T., Pratt, S., Lant, P. A., Laycock, B. 2018. Environmental impact of biodegradable food packaging when considering food waste. *Journal of Cleaner Production*, 180, 325-334.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.169>.
- Dolci, G., Rigamonti, L., Grosso, M. 2021. Life cycle assessment of the food waste management with a focus on the collection bag. *Waste Management & Research*, 39(10), 1317-1327. <https://doi.org/10.1177/0734242X211050>.
- Durkin, A., Tapygin, I., Kong, Q., Gunam Resul, M. F., Rehman, A., Fernández, A. M., Guo, M. 2019. Scale-up and Sustainability Evaluation of Biopolymer Production from Citrus Waste Offering Carbon Capture and Utilisation Pathway. *ChemistryOpen*, 8(6), 668-688.
<https://doi.org/10.1002/open.201900015>.
- El Fawal, G., Hong, H., Song, X., Wu, J., Sun, M., He, C., Wang, H. 2020. Fabrication of antimicrobial films based on hydroxyethylcellulose and ZnO for food packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100462.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100462>.
- European Commission. 2020. *Ecodesign for Food Packaging*. <http://www.ecosign-project.eu/>.
- Fernández-daCosta, C., Posada, J. A., Kleerebezem, R., Cuellar, M. C., Ramirez, A. 2015. Microbial community-based polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from wastewater: Techno-economic analysis and ex-ante environmental

- assessment. *Bioresource technology*, 185, 368-377.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.025>.
- Fernández-daCosta, C., Wassenaar, P. N., Dencic, I., Zijp, M. C., Morao, A., Heugens, E. H., Shen, L. 2019. Can we assess innovative bio-based chemicals in their early development stage? A comparison between early-stage and life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 230, 137-149.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.115>.
- Ferreira, V., Fabregat-Aibar, L., Pie, L., Terceno, A. 2022. Research trends and hotspots in bioeconomy impact analysis: a study of economic, social and environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106842.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106842>.
- Figueirêdo, M. C. B., de Freitas Rosa, M., Ugaya, C. M. L., de Souza, M. D. S. M., da Silva Braid, A. C. C., de Melo, L. F. L. 2012. Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers. *Journal of Cleaner Production*, 35, 130-139.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.033>.
- Firoozi Nejad, B., Smyth, B., Bolaji, I., Mehta, N., Billham, M., Cunningham, E. 2021. Carbon and energy footprints of high-value food trays and lidding films made of common bio-based and conventional packaging materials. *Cleaner Environmental Systems*, 3, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100058>.
- Gadaleta, G., Ferrara, C., De Gisi, S., Notarnicola, M., De Feo, G. 2023. Life cycle assessment of end-of-life options for cellulose-based bioplastics when introduced into a municipal solid waste management system. *Science of The Total Environment*, 871, 161958. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161958>.
- Gavankar, S., Suh, S., Keller, A. F. 2012. Life cycle assessment at nanoscale: review and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(3), 295-303. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0368-5>.
- Ghazanfari, M., Jahromi, I. R., Moallemi-Oreh, A., Ebadi-Dehaghani, H., Akbarzadeh, M. 2016. Evaluation of mixing efficiency in elaborating of chitosan/cellulose nanocomposite via statistical analyses. *International journal of biological macromolecules*, 93, 703-711. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.010>.
- Gu, H., Reiner, R., Bergman, R., Rudie, A. 2015. LCA study for pilot scale production of cellulose nano crystals (CNC) from wood pulp. In *Proceedings from the LCA XV Conference* (pp. 33-42). <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/50827>.
- Günkaya, Z., Banar, M. 2016. An environmental comparison of biocomposite film based on orange peel-derived pectin jelly-corn starch and LDPE film: LCA and biodegradability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(4), 465-475.
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1042-8>.
- Hajizadeh, H., Peighambaroust, S. J., Peighambaroust, S. H., Peressini, D. 2020. Physical, mechanical, and antibacterial characteristics of bio-nanocomposite films loaded with Ag-

- modified SiO₂ and TiO₂ nanoparticles. *Journal of food science*, 85(4), 1193-1202.
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.15079>.
- Hajji, S., Kchaou, H., Bkhairia, I., Salem, R. B. S. B., Boufi, S., Debeaufort, F., Nasri, M. 2021. Conception of active food packaging films based on crab chitosan and gelatin enriched with crustacean protein hydrolysates with improved functional and biological properties. *Food Hydrocolloids*, 116, 106639.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106639>.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., Purnell, P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of hazardous materials*, 344, 179-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>.
- Han, J. H. (Ed.). 2014. *Innovations in food packaging*. Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780123946010/innovations-in-food-packaging>.
- He, L., Lan, W., Ahmed, S., Qin, W., Liu, Y. 2019. Electrospun polyvinyl alcohol film containing pomegranate peel extract and sodium dehydroacetate for use as food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100390.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100390>.
- He, B., Wang, W., Song, Y., Ou, Y., Zhu, J. 2020. Structural and physical properties of carboxymethyl cellulose/gelatin films functionalized with antioxidant of bamboo leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1649-1656.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.286>.
- Hermann, B. G., Debeer, L., De Wilde, B., Blok, K., Patel, M. K. 2011. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), 1159-1171.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.026>.
- Hottle, T. A., Bilec, M. M., Landis, A. E. 2017. Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.002>.
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., van Zelm, R. 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- Huber, E., Bach, V., Holzapfel, P., Blizniukova, D., Finkbeiner, M. 2022. An Approach to Determine Missing Life Cycle Inventory Data for Chemicals (RREM). *Sustainability*, 14(6), 3161. <https://doi.org/10.3390/su14063161>.
- Hutchings, N., Smyth, B., Cunningham, E., Yousif, M., Mangwandi, C. 2021. Comparative life cycle analysis of a biodegradable multilayer film and a conventional multilayer film for fresh meat modified atmosphere packaging—and effectively accounting for shelf-life. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129423.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129423>.

- IPCC. 2013. Climate Change 2013, The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.cambridge.org>.
- Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., Oladzad-Abbasabadi, N., Jafari, S. M. 2021. Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and Interface Science*, 291, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>.
- Jamróz, E., Juszczak, L., Kucharek, M. 2018. Development of starch-furcellaran-gelatin films containing tea tree essential oil. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(42), 46754. <https://doi.org/10.1002/app.46754>.
- Jung, B. N., Jung, H. W., Kang, D. H., Kim, G. H., Lee, M., Shim, J. K., Hwang, S. W. 2020. The fabrication of flexible and oxygen barrier cellulose nanofiber/polylactic acid nanocomposites using cosolvent system. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(47), 49536. <https://doi.org/10.1002/app.49536>.
- Kakadellis, S., Harris, Z. M. 2020. Don't scrap the waste: The need for broader system boundaries in bioplastic food packaging life-cycle assessment—A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122831>.
- Kumar, R., Ghoshal, G., Goyal, M. 2019. Synthesis and functional properties of gelatin/CA–starch composite film: excellent food packaging material. *Journal of food science and technology*, 56(4), 1954-1965. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03662-4>.
- Laslu, G., Mustatea, G. 2018. Ecodesign in Food Packaging In *UNIT 2: International and European standards directives for Ecodesign in food packaging*. <http://www.ecosign-project.eu/>.
- Leceta, I., Etxabide, A., Cabezudo, S., De La Caba, K., Guerrero, P. 2014. Bio-based films prepared with by-products and wastes: environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 64, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.054>.
- Leceta, I., Guerrero, P., Cabezudo, S., de la Caba, K. 2013. Environmental assessment of chitosan-based films. *Journal of Cleaner Production*, 41, 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.049>.
- LeCorre, D., Hohenthal, C., Dufresne, A., Bras, J. 2013. Comparative sustainability assessment of starch nanocrystals. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(1), 71-80. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0447-0>.
- Li, F., Liu, Y., Cao, Y., Zhang, Y., Zhe, T., Guo, Z., Wang, L. 2020. Copper sulfide nanoparticle-carrageenan films for packaging application. *Food Hydrocolloids*, 109, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106094>.

- Li, X., Ren, Z., Wang, R., Liu, L., Zhang, J., Ma, F., Liu, X. 2021. Characterization and antibacterial activity of edible films based on carboxymethyl cellulose, *Dioscorea opposita* mucilage, glycerol and ZnO nanoparticles. *Food Chemistry*, 349, 129208. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129208>.
- Lokesh, K., Matharu, A. S., Kookos, I. K., Ladakis, D., Koutinas, A., Morone, P., Clark, J. 2020. Hybridised sustainability metrics for use in life cycle assessment of bio-based products: Resource efficiency and circularity. *Green Chemistry*, 22(3), 803-813. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/gc/c9gc02992c>.
- Mendoza Beltran, A., Cox, B., Mutel, C., van Vuuren, D. P., Font Vivanco, D., Deetman, S., Tukker, A. 2020. When the background matters: using scenarios from integrated assessment models in prospective life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 64-79. <https://doi.org/10.1111/jiec.12825>.
- Menzel, C. 2020. Improvement of starch films for food packaging through a three-principle approach: Antioxidants, cross-linking and reinforcement. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116828. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116828>.
- Milà i Canals, L., Azapagic, A., Doka, G., Jefferies, D., King, H., Mutel, C., Nemecek, T., Roches, A., Sim, S., Stichnothe, H., Thoma, G., Williams, A. 2011. Approaches for Addressing Life Cycle Assessment Data Gaps for Bio-based Products. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 707–725. <https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2011.00369.X>.
- Moni, S. M., Mahmud, R., High, K., Carbajales-Dale, M. 2020. Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 52-63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>.
- Muizniece, I., Blumberga, D. 2018. Methodology for determining potential of forest bioproduct commercialization. *Environmental Development*, 26, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.02.004>.
- Müller-Carneiro, J., de Figueirêdo, M. C. B., Rodrigues, C., de Azeredo, H. M. C., Freire, F. 2023. Ex-ante life cycle assessment framework and application to a nano-reinforced biopolymer film based on mango kernel. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106637. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106637>.
- Nascimento, D. M., Dias, A. F., de Araújo Junior, C. P., de Freitas Rosa, M., Morais, J. P. S., de Figueirêdo, M. C. B. 2016. A comprehensive approach for obtaining cellulose nanocrystal from coconut fiber. Part II: Environmental assessment of technological pathways. *Industrial Crops and Products*, 93, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.063>.
- Nessi, V., Falourd, X., Maigret, J. E., Cahier, K., D'orlando, A., Descamps, N., Lourdin, D. 2019. Cellulose nanocrystals-starch nanocomposites produced by extrusion: Structure and behavior in physiological conditions. *Carbohydrate polymers*, 225, 115123. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115123>.
- Norcino, L. B., Mendes, J. F., Natarelli, C. V. L., Manrich, A., Oliveira, J. E., Mattoso, L. H. C. 2020. Pectin films loaded with copaiba oil nanoemulsions for potential use as

- bio-based active packaging. *Food Hydrocolloids*, 106, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105862>.
- Otoni, C. G., Azeredo, H. M., Mattos, B. D., Beaumont, M., Correa, D. S., Rojas, O. J. 2021. The Food–Materials Nexus: Next Generation Bioplastics and Advanced Materials from Agri-Food Residues. *Advanced Materials*, 33(43), 2102520. <https://doi.org/10.1002/adma.202102520>.
- Parvatker, A. G., Eckelman, M. J. 2018. Comparative evaluation of chemical life cycle inventory generation methods and implications for life cycle assessment results. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 350-367. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03656>.
- Pauer, E., Wohner, B., Heinrich, V., Tacker, M. 2019. Assessing the environmental sustainability of food packaging: An extended life cycle assessment including packaging-related food losses and waste and circularity assessment. *Sustainability*, 11(3), 925. <https://doi.org/10.3390/su11030925>.
- Petrucchi, R., Fortunati, E., Puglia, D., Luzi, F., Kenny, J. M., Torre, L. 2018. Life cycle analysis of extruded films based on poly (lactic acid)/cellulose nanocrystal/limonene: a comparative study with ATBC plasticized PLA/OMMT systems. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(5), 1891-1902. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1085-3>.
- Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., Som, C. 2016. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1085-1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>.
- Pomeroy, M. (Ed.). 2021. *Encyclopedia of materials: technical ceramics and glasses*. Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/encyclopedia-of-materials-technical-ceramics-and-glasses/pomeroy/978-0-12-818542-1>.
- Pourzahedi, L., Eckelman, M. J. 2015. Environmental life cycle assessment of nanosilver-enabled bandages. *Environmental science & technology*, 49(1), 361-368. <https://doi.org/10.1021/es504655y>.
- Radusin, T., Torres-Giner, S., Stupar, A., Ristic, I., Miletic, A., Novakovic, A., Lagaron, J. M. 2019. Preparation, characterization and antimicrobial properties of electrospun polylactide films containing *Allium ursinum* L. extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100357>.
- Ribeiro, I., Peças, P., Henriques, E. 2013. A life cycle framework to support materials selection for Ecodesign: A case study on biodegradable polymers. *Materials & Design*, 51, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.043>.
- Rivière, G. N., Pion, F., Farooq, M., Sipponen, M. H., Koivula, H., Jayabalan, T., Österberg, M. 2021. Toward waste valorization by converting bioethanol production residues into nanoparticles and nanocomposite films. *Sustainable materials and technologies*, 28, e00269. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00269>.

- Roes, A. L., Marsili, E., Nieuwlaar, E., Patel, M. K. 2007. Environmental and cost assessment of a polypropylene nanocomposite. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(3), 212-226. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0064-5>.
- Rosenboom, J. G., Langer, R., Traverso, G. 2022. Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117-137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
- Roy, S., Rhim, J. W. 2020. Effect of CuS reinforcement on the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of alginate-based composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.092>.
- Saberi, B., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., Stathopoulos, C. E. 2017. Physical, barrier, and antioxidant properties of pea starch-guar gum biocomposite edible films by incorporation of natural plant extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 10(12), 2240-2250. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1995-z>.
- Salieri, B., Hischier, R., Quik, J. T., Jolliet, O. 2019. Fate modelling of nanoparticle releases in LCA: An integrative approach towards “USEtox4Nano”. *Journal of Cleaner Production*, 206, 701-712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.187>.
- Sampaio, A. P. C., de Sá Filho, M., Castro, A. L. A., de Figueirêdo, M. C. B. 2017. Life cycle assessment from early development stages: the case of gelatin extracted from tilapia residues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(5), 767-783. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1179-5>.
- Sedayu, B. B., Cran, M. J., Bigger, S. W. 2020. Reinforcement of refined and semi-refined carrageenan film with nanocellulose. *Polymers*, 12(5), 1145. <https://doi.org/10.3390/polym12051145>.
- Sharif, A., Mondal, S., Hoque, M. E. 2019. Polylactic acid (PLA)-based nanocomposites: Processing and properties. In *Bio-based Polymers and Nanocomposites* (pp. 233-254). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05825-8_11.
- Shen, Y., Ni, Z. J., Thakur, K., Zhang, J. G., Hu, F., Wei, Z. J. 2021. Preparation and characterization of clove essential oil loaded nanoemulsion and pickering emulsion activated pullulan-gelatin based edible film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181, 528-539. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.133>.
- Soni, B., Schilling, M. W., Mahmoud, B. 2016. Transparent bionanocomposite films based on chitosan and TEMPO-oxidized cellulose nanofibers with enhanced mechanical and barrier properties. *Carbohydrate polymers*, 151, 779-789. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.022>.
- Sonseca, A., Madani, S., Rodríguez, G., Hevilla, V., Echeverría, C., Fernández-García, M., López, D. 2019. Multifunctional PLA blends containing chitosan mediated silver nanoparticles: Thermal, mechanical, antibacterial, and degradation properties. *Nanomaterials*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.3390/nano10010022>.

- Steubing, B., de Koning, D. 2021. Making the use of scenarios in LCA easier: The superstructure approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2248-2262. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01974-2>.
- Sun, S., Wu, Q., Tian, X. 2023. How does sharing economy advance cleaner production? Evidence from the product life cycle design perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107016>.
- Susmitha, A., Sasikumar, K., Rajan, D., Nampoothiri, K. M. 2021. Development and characterization of corn starch-gelatin based edible films incorporated with mango and pineapple for active packaging. *Food Bioscience*, 41, 100977. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100977>.
- Tan, W., Zhang, J., Zhao, X., Li, Q., Dong, F., Guo, Z. 2020. Preparation and physicochemical properties of antioxidant chitosan ascorbate/methylcellulose composite films. *International journal of biological macromolecules*, 146, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.044>.
- Tecchio, P., Freni, P., De Benedetti, B., Fenouillot, F. 2016. Ex-ante Life Cycle Assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate. *Journal of cleaner production*, 112, 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.090>.
- Teh, K. C., Tan, R. R., Aviso, K. B., Promentilla, M. A. B., Tan, J. 2019. An integrated analytic hierarchy process and life cycle assessment model for nanocrystalline cellulose production. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 13-31. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.003>.
- Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., Thakur, V. K. 2018. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current opinion in Green and Sustainable chemistry*, 13, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.013>.
- Thonemann, N., Schulte, A., Maga, D. 2020. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. *Sustainability*, 12(3), 1192. <https://doi.org/10.3390/su12031192>.
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L. J., Wongruong, S., Sriburi, P., Reungsang, A., Rachtanapun, P. 2021. Antioxidant films from cassava starch/gelatin biocomposite fortified with quercetin and TBHQ and their applications in food models. *Polymers*, 13(7), 1117. <https://doi.org/10.3390/polym13071117>.
- van der Giesen, C., Cucurachi, S., Guinée, J., Kramer, G. J., Tukker, A. 2020. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>.
- Vea, E. B., Fabbri, S., Spierling, S., Owsianiak, M. 2021. Inclusion of multiple climate tipping as a new impact category in life cycle assessment of polyhydroxyalkanoate

- (PHA)-based plastics. *Science of The Total Environment*, 788, 147544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147544>.
- Venkatachalam, V., Spierling, S., Endres, H. J., Siebert-Raths, A. 2018. Integrating life cycle assessment and eco-design strategies for a sustainable production of bio-based plastics. In *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies* (pp. 487-497). Springer, Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-66981-6>.
- Versino, F., Ortega, F., Monroy, Y., Rivero, S., López, O. V., García, M. A. 2023. Sustainable and Bio-Based Food Packaging: A Review on Past and Current Design Innovations. *Foods*, 12(5), 1057. <https://doi.org/10.3390/foods12051057>.
- Vigil, M., Pedrosa-Laza, M., Alvarez Cabal, J. V., Ortega-Fernández, F. 2020. Sustainability analysis of active packaging for the fresh cut vegetable industry by means of attributional & consequential life cycle assessment. *Sustainability*, 12(17), 7207. <https://doi.org/10.3390/su12177207>.
- Walser, T., Demou, E., Lang, D. J., Hellweg, S. 2011. Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts. *Environmental science & technology*, 45(10), 4570-4578. <https://doi.org/10.1021/es2001248>.
- Wang, H., Gong, X., Miao, Y., Guo, X., Liu, C., Fan, Y. Y., Li, W. 2019. Preparation and characterization of multilayer films composed of chitosan, sodium alginate and carboxymethyl chitosan-ZnO nanoparticles. *Food Chemistry*, 283, 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.022>.
- Weyell, P., Kurland, H. D., Hülser, T., Grabow, J., Müller, F. A., Kralisch, D. 2020. Risk and life cycle assessment of nanoparticles for medical applications prepared using safe-and benign-by-design gas-phase syntheses. *Green Chemistry*, 22(3), 814-827. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2019/gc/c9gc02436k>.
- Wilkes, C. E., Summers, J. W., Daniels, C. A., Berard, M. T. 2005. *PVC handbook* (Vol. 184). Munich: Hanser.
- Wright, J. M., Caudill, R. J. 2020. A more comprehensive and quantitative approach to corporate sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 83, 106409. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106409>.
- Yadav, S., Mehrotra, G. K., Bhartiya, P., Singh, A., Dutta, P. K. 2020. Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan-gelatin film for food packaging. *Carbohydrate polymers*, 227, 115348. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115348>.
- Yates, M. R., Barlow, C. Y. 2013. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.010>.
- Yavari Maroufi, L., Ghorbani, M., Tabibiazar, M. 2020. A gelatin-based film reinforced by covalent interaction with oxidized guar gum containing green tea extract as an

active food packaging system. *Food and Bioprocess Technology*, 13(9), 1633-1644.
<https://doi.org/10.1007/s11947-020-02509-7>.

Zemigala, M. 2022. Business and climate change-research tendencies. *Environmental Development*, 42, 100696. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100696>.

Zhang, L., Jia, X., Ai, Y., Huang, R., Qi, W., He, Z., Klemes, J. J., Su, R. 2022. Greener production of cellulose nanocrystals: An optimised design and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131073.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131073>.

Zhang, X., You, S., Tian, Y., Li, J. 2019. Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 249, 38-48.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.037>.

Zhang, H., Hortal, M., Dobon, A., Jorda-Beneyto, M., Bermudez, J. M. 2017. Selection of Nanomaterial-Based Active Agents for Packaging Application: Using Life Cycle Assessment (LCA) as a Tool. *Packaging Technology and Science*, 30(9), 575-586.
<https://doi.org/10.1002/pts.2238>.

4.2 Artigo 2

Uma abordagem para o desenvolvimento sustentável de biopolímeros para embalagens de alimentos em fase inicial de maturidade tecnológica (*Biopolymers+*)

Ana Paula Coelho Sampaio^a, Adriano Lincoln Albuquerque Mattos^b, Maria Cléa Brito de Figueirêdo^b

^a Universidade Estadual do Ceará (UECE), Brasil

^b Embrapa Agroindústria Tropical, Brasil

Highlights

- Este artigo propõe uma metodologia para avaliar novos biopolímeros.
- São utilizados indicadores técnicos, econômicos e ambientais.
- A abordagem combina ACV ex-ante e análise de decisão multicritério.
- É apresentado um estudo de caso para a produção de um novo biopolímero.

Resumo

Para se tornar sustentável, um biopolímero precisa ser otimizado em instituições de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PDI). A avaliação do ciclo de vida ex-ante (ACV ex-ante) possibilita a avaliação dos potenciais impactos ambientais do novo biopolímero, enquanto a análise técnico-econômica (TEA) analisa a viabilidade técnica e econômica de um produto e seu processo produtivo. A integração dessas avaliações por meio da análise multicritério pode ser utilizada no processo de PDI, desde etapas iniciais de maturidade tecnológica, buscando melhorias no seu desempenho técnico, econômico e ambiental. Embora trabalhos anteriores realizaram avaliações técnico-econômica e ambiental de ciclo de vida (ATEA) de biopolímeros em desenvolvimento, falta um procedimento definindo o objetivo, escopo e estrutura dessas avaliações ao longo da escala de maturidade tecnológica, principalmente, em estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico. Este estudo propõe uma abordagem metodológica para realização de um conjunto de ATEAs, nos estágios de ideação e experimentação de desenvolvimento. Essa abordagem está estruturada em seis etapas realizadas em diferentes níveis da escala de maturidade tecnológica (TRL). Na etapa 1 – o planejamento das ATEAs (TRL2), cronograma e equipe de trabalho são definidos. Na etapa 2 – avaliação de materiais alternativos para a formulação do biopolímero são comparados na

ATEA1 (TRL3). Na etapa 3 - detalhamento das rotas de produção e aplicação do biopolímero, dados são coletados nas operações unitárias de uma ou mais rotas definidas em laboratório (referência), cenários alternativos são construídos e biopolímeros caracterizados, permitindo definição da aplicação mais viável (TRL 4). Na etapa 4 - avaliação de rotas produtivas, as rotas de referência e alternativas (cenários) são comparadas na ATEA2. Na etapa 5 - avaliação de opções de fim de vida, alternativas para destino no biopolímero após uso são comparadas na ATEA3. Na etapa 6 - avaliação comparativa de produtos (ATEA4), o biopolímero com maior viabilidade técnica, menor custo e causando menor impacto ambiental potencial é comparado ao polímero similar comercial. Essa abordagem foi aplicada (ATEAs 1 e 2) no desenvolvimento de biopolímeros a base de amido formulados para serem utilizados na fabricação de embalagens. Os resultados das ATEAs mostraram que os novos biopolímeros podem ser alternativas viáveis ao uso do polietileno de baixa densidade.

Palavras-chave: tecnologias emergentes; ACV ex ante; avaliação técnica-econômica; análise multicritério; bioplástico.

1. Introdução

Biopolímeros são definidos como polímeros produzidos a partir de matérias-primas derivadas da biomassa ou recursos renováveis, como milho, mandioca, e resíduos agroindustriais (Ali et al., 2023). A diversidade de fontes de biomassa disponível, e a possibilidade de desenvolver biopolímeros com diferentes propriedades mecânicas e químicas, tornou os biopolímeros atrativos para a fabricação de embalagens para os mais variados produtos, com as funções específicas de armazenamento. A substituição das embalagens plásticas convencionais por embalagens biopoliméricas oriundas de resíduos e coprodutos da agricultura e agroindústria busca reduzir impactos ambientais causados pelo descarte das embalagens e economizar recursos naturais primários, promovendo a economia circular (Santos et al., 2019; Sikorska et al., 2018). Entretanto, para que o conjunto de processos e o novo biopolímero possa trazer benefícios para a sociedade, é necessário inserir ações de ecodesign ao longo do processo de desenvolvimento tecnológico.

A inserção do ecodesign por meio da avaliação de critérios técnicos, econômicos e ambientais ao longo do processo de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PDI) de biopolímeros é de grande relevância para promover a inovação com menor custo, facilitar a integração da cadeia produtiva e garantir que os novos biopolímeros sejam mais sustentáveis

que polímeros similares oriundos do petróleo (Vazifeh et al., 2023). Sem isso, corre-se o risco de avaliar o desempenho desses materiais somente após comercializados, tendo os mesmos sido desenvolvidos sem que a melhoria dos seus indicadores técnicos, econômicos e ambientais tenha sido investigada. É relevante ressaltar que modificações em processos e produtos, quando já em uso pelos consumidores, requerem altos investimentos e são difíceis de serem implementadas (Mahmud et al., 2021; Wunderlich et al., 2020).

Os desafios relacionados ao ecodesign de filmes biopoliméricos foram enumerados por Sampaio et al. (2023) e podem ser considerados para o desenvolvimento de biopolímeros em geral. Os principais desafios foram: i) definição da funcionalidade e comparação entre novos biopolímeros e similares comerciais; ii) adoção de limites do berço ao túmulo de biopolímeros; iii) disponibilidade de dados de inventário para a avaliação dos biopolímeros; e iv) tempo necessário para uma avaliação ampla do biopolímero, considerando indicadores ambientais, técnicos e econômicos (Sampaio et al., 2023).

Uma alternativa para consideração da sustentabilidade no processo de desenvolvimento tecnológico é a inserção de ações de ecodesign que apoiam avaliações em níveis específicos de maturidade tecnológica (Technology Readiness Level - TRL), principalmente, os associados aos estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico (Thomassen et al., 2019). A definição do TRL de um produto em desenvolvimento baseia-se em critérios técnicos estabelecidos em uma escala de 1 a 9. Esses níveis estão agrupados em quatro de estágios de desenvolvimento de produto: ideação (TRLs 1 e 2), experimentação em laboratório (TRLs 3 a 5), produção piloto (TRLs 6 e 7) e produção industrial (TRLs 8 e 9). A definição da TRL de uma tecnologia (processo ou produto) permite sua comparação com outras similares em um mesmo nível de maturidade (Moni et al., 2020).

Abordagens ambientais, econômicas, sociais e outros, em algum estágio do processo de desenvolvimento tecnológico. Abordagens qualitativas e semi-quantitativas utilizam métodos simples como checklists, matrizes e flowcharts (Chebaeva et al., 2021). Já as abordagens quantitativas propostas são baseadas no conceito de ciclo de vida do produto e empregam técnicas de análise multicritério para agregação de indicadores em um índice final de impacto (Parolin et al., 2024; Muller-Carneiro et al., 2023).

Dentre as abordagens quantitativas, destacam-se a *Sustainable Life Cycle Assessment* (ACV-S) (Escobar and Laibach, 2021), Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental de ciclo de vida (ATEA) (Thomassen et al., 2019) e *Safe and Sustainable by Design* (SSbD) (Caldeira et al., 2022). Essas abordagens empregam a ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para avaliação dos impactos ambientais, as ferramentas

Life Cycle Costing (LCC), *Techno-Economic Analysis* (TEA) ou *Cost-Benefit Analysis* (CBA) para avaliação da viabilidade econômica, e a ferramenta *Social Life Cycle Assessment* (S-LCA) para avaliação de impactos sociais. Para combinação de ferramentas como TEA ou CBA com a ACV, Wunderlich et al. (2021) e Thomassen et al. (2019) ressaltaram a necessidade de definir: i) objetivo comum da avaliação ao qual se almeja tomar uma decisão; e ii) escopo comum de avaliação, (processos relacionados ao ciclo de vida de um produto que serão considerados e unidade comum de medida do produto avaliado).

Além disso, Moni et al. (2020), van der Giesen et al. (2020) e Cucurachi et al. (2022) ressaltaram a necessidade de considerar a escassez e incerteza dos dados em avaliações de produtos em desenvolvimento (ex-ante), principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento (TRLs 1-5). Assim, mostrou-se a necessidade de antecipar os potenciais impactos ambientais do novo produto, utilizando dados primários para simulação de processos em escala piloto/industrial, e de analisar cenários futuros tanto dos processos de *foreground* como de *background*.

Nesse contexto, algumas abordagens foram propostas para integração de critérios técnicos e econômicos à ACV, utilizando métodos de análise multicritério (Muller-Carneiro et al., 2023; Patel et al., 2012; Reeb et al., 2016; Van Schoubroeck et al., 2021). Essa integração permite a geração de um índice final que facilita comparações de materiais, rotas de produção e produtos. Embora essas abordagens foram direcionadas às etapas iniciais do processo de desenvolvimento tecnológico, não apresentam atividades e avaliações específicas para TRLs dos estágios de ideação e experimentação. De acordo com Thomassen et al. (2019), cada TRL tem objetivo específico, sendo importante utilizar ferramentas de avaliação com propósito e estrutura específicos a cada TRL.

Muller-Carneiro et al. (2023) propuseram uma abordagem para uso no estágio de experimentação, baseada na combinação da ACV ex-ante com a análise estocástica de multi-atributo (*stochastic multi-attribute analysis* – SMAA), considerando indicadores ambientais, técnicos e econômicos. Patel et al. (2012) propuseram um método multicritério para avaliação rápida preliminar (*streamlined*) da sustentabilidade (critérios econômicos e ambientais) de processos químicos em estágio experimental de maturidade tecnológica. Reeb et al. (2016) focaram na comparação entre diferentes matérias-primas para a produção industrial de açúcar por meio de análise estocástica de multi-atributo (SMAA), avaliando diversos critérios como de transporte, econômicos e ambientais. Van Schoubroeck et al. (2021) propuseram uma abordagem de classificação hierárquica e estocástica para avaliação de diferentes sistemas de

ponderação de critérios ambientais, econômicos e sociais no estudo da sustentabilidade de uma tecnologia em experimentação.

Esse trabalho apresenta uma abordagem estruturada para integrar ATEA nos estágios de ideação e experimentação de desenvolvimento de biopolímeros. Nessa abordagem, atividades e quatro avaliações com objetivo e escopo específicos, são propostas para as TRLs 2, 3, 4 e 5, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais. Busca-se apoiar instituições de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) no desenvolvimento de biopolímeros que atendam as demandas da sociedade e reduzam as pressões ambientais.

O trabalho está organizado em cinco seções, considerando essa introdutória. Na seção 2 é apresentada a estrutura metodológica proposta para avaliar novos biopolímeros. A aplicação da abordagem no desenvolvimento de biopolímeros à base de amido, bem como os seus resultados, são apresentados na seção 3. A discussão e conclusão são apresentadas, respectivamente, nas seções 4 e 5.

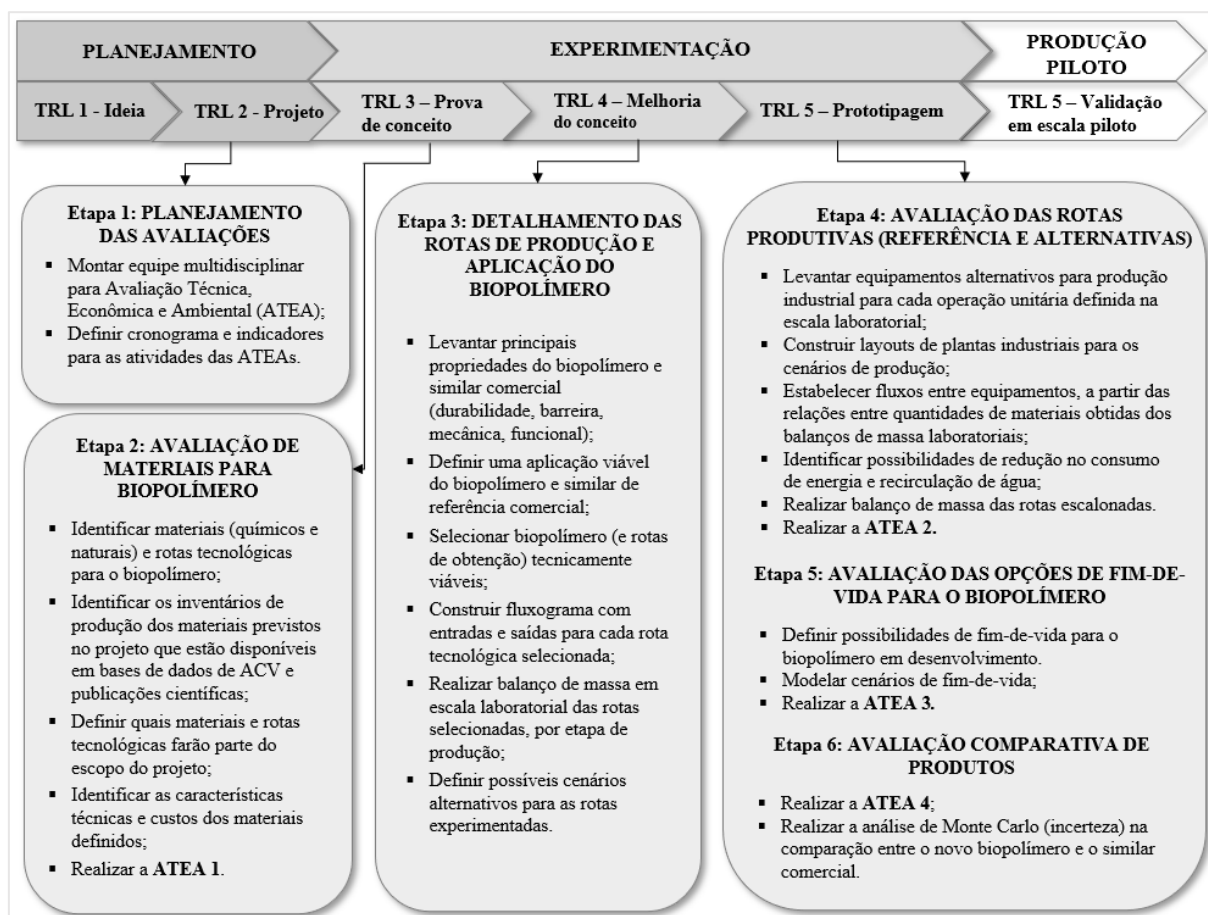
2. Abordagem proposta: *Biopolymers+*

Biopolymers+ é uma abordagem metodológica para uso desde a ideação até o final da experimentação laboratorial (TRLs 2 a 5). Essa abordagem considera as especificidades da avaliação *ex-ante* de ciclo de vida (ACV *ex-ante*), a análise técnico-econômica (TEA) e a análise multicritério de decisão para integração de indicadores em um índice final. Foi construída a partir de trabalhos anteriores que avaliaram rotas alternativas para a obtenção de biopolímeros com baixo nível de maturidade tecnológica (TRLs 3 a 5) (Da Silva et al., 2021; De Araújo e Silva et al., 2020; Sampaio et al., 2017). Sua aplicação é relevante em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que almejem gerar novos biopolímeros e propor rotas tecnológicas sustentáveis para sua obtenção.

Diferentes biopolímeros podem ser idealizados (TRLs 1 e 2), com rotas de obtenção testadas (TRLs 3 e 4). Avaliações técnicas, econômicas e ambientais podem ser realizadas investigando-se diferentes materiais e formulações, rotas de produção, e destinação do produto após cumprimento da sua função inicial. Além disso, novos biopolímeros precisam ser comparados a polímeros similares comerciais para analisar a viabilidade de maiores investimentos para aumento da sua maturidade tecnológica. Assim, essa abordagem está estruturada em seis etapas, a serem executadas em níveis específicos de maturidade tecnológica: (1) planejamento das avaliações (TRL2); (2) avaliação de materiais para biopolímero (TRL3); (3) detalhamento das rotas de produção e aplicação do biopolímero

(TRL4); (4) avaliação das rotas produtivas (TRL5); (5) avaliação das opções de fim de vida para o biopolímero (TRL5); e (6) avaliação comparativa de produtos (TRL5). Nessas etapas, ocorrem atividades que permitem a realização de quatro ATEAs, considerando critérios técnico, econômico e ambiental (Figura 1).

Figura 1. Abordagem *Biopolymers+*



Na Etapa 1 – Planejamento das avaliações, ocorre a elaboração do projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico na TRL2, sendo necessário prever nesse projeto ações de pesquisa para realização das ATEAs. Nessa etapa, deve-se formar uma equipe multidisciplinar, composta por pesquisadores das áreas de biomateriais, ACV, economia e produção industrial para as ações de codesign. Essa equipe atuará desde a elaboração do projeto, identificando e selecionando as principais rotas de produção disponíveis, materiais alternativos para formulação do biopolímero, e polímeros comerciais com características similares aos que serão desenvolvidos. O levantamento preliminar de dados na fase de elaboração do projeto de pesquisa facilitará o detalhamento das atividades das ATEAs no projeto de pesquisa, assim como a construção do cronograma e orçamento relacionados as

ações de ecodesign. Com relação ao orçamento, é importante prever recursos para aquisição de bases de inventários de produção dos principais materiais com potencial de uso na formulação do biopolímero, selecionados como relevantes pela equipe do projeto, assim como orçar análises físico-químicas de possíveis efluentes, por rota tecnológica investigada. Após aprovação do projeto, essa equipe levantará as informações e realizará as ATEAs previstas nas próximas etapas.

Na Etapa 2 – Avaliação de materiais para biopolímero, ocorre a comparação de materiais alternativos com potencial de serem utilizados na formulação do biopolímero, devendo essa atividade ser realizada no início da TRL3. O levantamento dos inventários (consumos e emissões) da produção desses materiais deve considerar tanto bases de dados de ACV comerciais (ex.: ecoinvent, agri-footprint e carbon minds) e livres (ILCD e SICV), como a literatura científica disponível.

Projetos para o desenvolvimento de biopolímeros costumam utilizar matérias-primas que são coprodutos, resíduos de processos agrícolas ou agroindustriais (ex.: amido do caroço da manga, celulose bacteriana cultivada em melaço de soja) e aditivos (ex: óleos essenciais, nanomateriais), com ações de extração e caracterização desses materiais integrando o projeto de pesquisa. Embora, usualmente, a produção agrícola da fonte de biomassa residual seja desconsiderada em avaliações ambientais (ACV tradicional) e o custo de obtenção desse material seja oriundo apenas do transporte para a unidade processadora, em uma avaliação ex-ante, o resíduo atual tornar-se-á coproduto no futuro (Da Silva et al., 2021). Assim, é importante considerar a etapa de produção agrícola e agroindustrial em avaliações de biopolímeros em desenvolvimento. Nesses casos, para se obter o inventário desse tipo de material, deve-se buscar dados de literatura ou utilizar proxies, utilizando critérios de alocação mássicos e/ou econômicos.

Para os diferentes materiais selecionados e com inventários disponíveis, realiza-se a ATEA1 que compara materiais (ex.: matriz, plastificante, agente de reforço, agente antioxidante, e outros) com função semelhante na formulação de um biopolímero. Essa primeira avaliação funciona como um filtro para a equipe do projeto utilizar em laboratório os materiais mais promissores, ou seja, os de melhor desempenho técnico, econômico e ambiental. Sampaio et al. (2023) realizou levantamento da disponibilidade de inventários dos materiais mais empregados na formulação de biopolímeros.

Na Etapa 3 – Detalhamento da rota de produção de referência, cenários e aplicação do biopolímero, com ações de pesquisa relativas à formulação e caracterização do biopolímero são conduzidas. Ao final da TRL4, pelo menos uma rota com maior rendimento

do biopolímero foi identificada pela equipe de pesquisa do projeto, com a definição de operações unitárias e condições de processamento relacionadas ao tempo, temperatura e pressão. Além disso, as propriedades do biopolímero foram investigadas permitindo a definição das aplicações mais promissoras para as características encontradas.

As seguintes propriedades de biopolímeros utilizados como embalagem de alimentos são usualmente investigadas: resistência mecânica, degradação térmica, permeabilidade ao oxigênio, vapor d'água e biodegradabilidade. Essas propriedades permitem definir possíveis aplicações para o biopolímero e construir diferentes cenários de fim-de-vida. Assim, as principais propriedades dos biopolímeros são selecionadas como indicadores no critério técnico em comparações com produtos comerciais similares.

Para cada rota de produção investigada, deve-se elaborar um fluxograma detalhando as operações unitárias, e realizar o balanço de massa nessas operações. Deve-se também obter dados sobre as condições de processamento (tempo, temperatura, pressão) e equipamentos utilizados na escala laboratorial. Esse detalhamento será a base para construção do modelo de planta de processamento piloto e de possíveis cenários de fim-de-vida para o biopolímero.

Na Etapa 4 – Avaliação das rotas produtivas (cenários de referências e alternativos), a rota de produção é modelada em escala piloto, a partir de dados levantados na Etapa 3. A comparação de processos em escala piloto com processos laboratoriais mostrou mudança nos valores dos impactos e na identificação de pontos críticos, sendo necessário modelar processos em escala de produção piloto e industrial para otimização de processos e efetiva comparação de produto em desenvolvimento com similares produzidos em escala industrial (Da Silva et al., 2021).

Tsoy et al. (2020) discutiram que a modelagem de uma planta industrial é usualmente realizada seguindo um procedimento manual utilizando equações da termodinâmica (Piccinno et al., 2016; Sanjuán et al., 2014) ou software de simulação (ex.: SuperPro Designer). Em ambas as situações, o desenho da planta piloto ou industrial se inicia com a investigação de equipamentos industriais que desempenham função similar aos laboratoriais. Software de simulação possuem bases de dados de equipamentos por tipo de operação unitária desejada, facilitando esse trabalho.

Em seguida, as relações encontradas nos balanços de massa laboratoriais entre as quantidades de matéria-prima, insumos e produtos (Etapa 3) são a base para a quantificação dos fluxos entre equipamentos. Esses fluxos, quando modelados em escala piloto, permitem realizar novo balanço de massa por operação unitária e construir o inventário dessas

operações na escala piloto, necessários à realização das avaliações previstas (ATEAs 2, 3 e 4). Permitem também a determinação do tempo de processamento por batelada ou contínuo, além da produção anual total da planta.

Na Etapa 5 – Avaliação das opções de fim-de-vida para o biopolímero, são definidas e comparadas oportunidades de fim-de-vida do biopolímero na ATEA3, analisando cenários de compostagem, reuso e reciclagem, em sintonia com a visão da economia circular. A análise de cenários é utilizada nas ATEAs 2 e 3 para comparação de rotas alternativas de produção e de opções de fim-de-vida do biopolímero, respectivamente.

A Etapa 6 – Avaliação comparativa de produtos, compara a rota otimizada de menor impacto para produção, uso e fim-de-vida do novo biopolímero com polímero similar comercial (ATEA4). A análise de incerteza por Monte Carlo é empregada nessa comparação. No caso do biopolímero em desenvolvimento apresentar desempenho inferior ao comercial, indica-se sua reformulação e reavaliação posterior. No caso de diferença não significativa entre os produtos, indica-se experimentação dos cenários promissores para confirmação dos dados de inventário e manutenção das propriedades relevantes do biopolímero em desenvolvimento.

2.1 Detalhamento das avaliações ex-ante técnico-econômica e ambiental (ATEAs)

A Tabela 1 apresenta os objetivos e escopos das quatro ATEAs propostas. Essas avaliações permitem a escolha de materiais, rotas tecnológicas de produção e destinação do produto no fim-de-vida, além de indicar a necessidade de mudanças no produto e/ou processo devido a desempenho inferior a outro comercial com função similar.

Tabela 1. Objetivos e escopos das avaliações técnicas-econômicas-ambientais

ATEA	Objetivo	Escopo
1	Comparar e selecionar materiais.	Do berço-ao-portão (extração de matérias-primas, transporte e produção de materiais), avaliando a função de produção, com coleta de dados e resultados referentes a 1 kg de material (unidade funcional).
2	Comparar cenários de produção	Do berço-ao-portão (produção de materiais, transporte, produção do biopolímero), avaliando a função de produção, com coleta de dados e resultados referentes a 1 tonelada do biopolímero produzido (unidade funcional).
3	Comparar cenários de fim de vida do biopolímero.	Do berço-ao-portão (coleta do biopolímero, transporte e opções de processamento, como aterro sanitário, compostagem ou reprocessamento), utilizando como unidade funcional a produção ou destino final de 1 tonelada do biopolímero.

4	Comparar o biopolímero em desenvolvimento (melhor rota de produção e fim de vida) com similar comercial.	Do berço-ao-fim de vida do biopolímero (produção de materiais, transporte, produção, uso e fim-de-vida) e do similar comercial. A unidade funcional avaliada é 1 tonelada de biopolímero/comercial similar produzido.
---	--	---

Essas avaliações seguem as etapas das normas ISO 14040 e 14044 (2009a e b), com definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação dos resultados. As avaliações ambientais são do tipo *ex-ante*, diferenciando-se da ACV tradicional principalmente em dois aspectos: i) construção de inventário e ii) análise de cenários. A ACV *ex-ante* se baseia na modelagem da produção em escala piloto ou industrial, realizada utilizando dados laboratoriais, enquanto a ACV tradicional utiliza dados de processos consolidados e disponíveis na escala industrial. Além disso, como o biopolímero e seu processo de obtenção estão em desenvolvimento, são necessários anos até que a escala TRL tenha sido concluída e o biopolímero seja comercial. Assim, a ACV *ex-ante* é exploratória, requerendo a construção de cenários para investigação de opções e tomada de decisão.

A construção de cenários requer que a equipe multidisciplinar do projeto considere tendências políticas e setoriais em um horizonte de 10 a 15 anos e analise como essas tendências podem modificar a estrutura de um produto e seu processo de obtenção, considerando as etapas de definição de objetivo e escopo, assim como a análise de inventário na ACV (Cucurachi et al., 2022). Durante a idealização dessas etapas são definidas condições e realizadas importantes escolhas de modelagem. Essas decisões podem influenciar no resultado do final, positivamente ou não. Por isso, a necessidade de se avaliar possíveis alternativas com relação ao definido inicialmente no projeto.

Fazendo um exercício com biopolímeros, observa-se que a política ambiental tende a ser cada vez mais restritiva com relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE), enquanto a economia circular deve fortalecer cadeias produtivas regionais visando maior circularidade do biopolímero após cumprir sua função inicial (Fernandez-DaCosta et al., 2019). Além disso, as mudanças no clima agravarão os eventos extremos, como a seca em regiões semiáridas, requerendo o desenho de rotas tecnológicas que façam reuso, recirculação ou reciclagem de água e que sejam eficientes no uso da água oriunda de mananciais (Ubando et al., 2020). Já o crescimento populacional nos países em desenvolvimento, demandará maior produção alimentar nessas áreas e redução de perdas de alimentos (Pauer et al., 2019). Essas tendências demandam o desenvolvimento de biopolímeros que reduzam as perdas nos alimentos embalados e possam ter outro uso para a sociedade após descartados. Requer

também o desenho de rotas tecnológicas eficientes, principalmente no uso da água e energia, baseadas em fontes de biomassa regionais não-alimentares (ex.: resíduos agroindustriais) e que empregam fontes de energias renováveis e de baixo carbono.

2.2 Indicadores nos critérios técnico, econômico e ambiental para avaliação de biopolímeros

Os indicadores do critério técnico devem ser escolhidos de acordo com o tipo de biopolímero a ser desenvolvido e a função almejada na embalagem de alimentos. Entretanto, propõem-se utilizar indicadores que denotam as principais propriedades dos materiais e do biopolímero em desenvolvimento, visando aplicação como embalagem de alimento. Na ATEA1 avalia-se características importantes de cada material utilizado na formulação de um biopolímero. Nas ATEAs 2 e 4, avalia-se a qualidade do biopolímero obtido, com base nas características desejadas para aplicação como embalagem de alimento. Na ATEA3, compara-se o potencial de biodegradação do biopolímero obtido, com relação ao similar comercial diante das diferentes possibilidades de fim-de-vida.

Para o critério econômico, utilizam-se indicadores para avaliar os valores de mercado dos materiais selecionados, considerando a produção de 1 tonelada de cada material na ATEA1. Já nas ATEAs 2 e 4, calcula-se o lucro bruto (valor de venda do produto – custo do materiais) do biopolímero, utilizando os dados da literatura e de mercado. Na ATEA3, avalia-se o custo operacional de cada opção de disposição final do biopolímero, com base na literatura. A seleção desconsiderou outros indicadores relacionados a análise de lucratividade, como lucro líquido, e de investimento, como Taxa Interna de Retorno, pela dificuldade de calculá-los em etapa iniciais de desenvolvimento.

O critério ambiental em todas as ATEAs é avaliado pelo índice final da Pegada Ambiental de Produtos (PEF) que agrega indicadores utilizados pela Comissão Europeia para avaliar 16 categorias de impacto (Zampori and Pant, 2019). O índice PEF é calculado por meio da normalização e ponderação dos valores de cada categoria de impacto. A normalização é realizada utilizando fatores de normalização calculados com base nos indicadores de ciclo de vida para os recursos utilizados por uma pessoa vivendo na Europa por um ano. Já na agregação foram atribuídos pesos para cada categoria por meio de consulta a diversos especialistas e estudiosos. A categoria com maior peso atribuído na composição do índice PEF foi mudanças climáticas (21,06%).

É importante considerar que também se pode utilizar indicadores ambientais relativos a categorias de impactos específicas, quando as partes interessadas no estudo

considerarem importante. Outra opção é utilizar o índice final de métodos de avaliação do impacto de ciclo de vida que calculam o dano ao ecossistema, saúde humana e recursos naturais e, em seguida, o índice final de impacto (ex.: Recipe, LC-Impact e Impact World). Entretanto, é importante atentar para a crescente importância de estudos da PEF de produtos para a União Europeia, sendo interessante já considerar o índice PEF desde a pesquisa, desenvolvimento e inovação de biopolímeros.

2.3 Análise multicritério: normalização de indicadores

A análise de decisão multicritério é empregada para obtenção de uma resposta única de viabilidade para o biopolímero em desenvolvimento, integrando indicadores técnicos, econômicos e ambientais. Nessa abordagem, emprega-se o método de soma ponderada (SAW) para normalização dos valores entre os diferentes indicadores. Esse método foi selecionado por ser de fácil aplicação, sendo utilizado para analisar problemas com várias alternativas de solução, e para determinar a melhor alternativa, considerando diferentes indicadores (Mateo, 2012).

O método SAW permite a normalização interna entre os diferentes indicadores, que possuem diferentes unidades de medida. Após definido os indicadores da análise, ocorre a classificação de cada um como atributo benéfico – caso se almeje o valor máximo do indicador analisado – ou atributo não-benéfico – caso se almeje o valor mínimo do indicador analisado (Alanazi et al., 2013; Mateo, 2012). As fórmulas para normalização dos indicadores são apresentadas a seguir de acordo com o atributo determinado:

$$\text{Para atributo benéfico: } X = \frac{x}{x_{max}} \quad (1)$$

$$\text{Para atributo não-benéfico: } X = \frac{x_{min}}{x} \quad (2)$$

2.3.1 Ponderação de indicadores e critérios (técnico, econômico e ambiental)

Após a normalização, realiza-se a multiplicação de cada indicador pelo peso correspondente ao critério (técnico, econômico e ambiental). Um ou mais indicadores estão relacionados a um critério. Em seguida, os resultados são somados para a obtenção de uma

pontuação final, permitindo o ranqueamento das alternativas propostas, indicando a melhor opção dentre as demais (Alanazi et al., 2013; Mateo, 2012).

A validação e atribuição de pesos aos critérios foi realizada mediante a análise dos resultados de um questionário aplicado à profissionais da área de biomateriais. Os profissionais sugeriram o grau de importância que cada um dos critérios exerce na avaliação de um novo biopolímero. As respostas foram apresentadas mediante uma escala composta pelas alternativas: mais importante, importante e menos importante, e os pesos sugeridos para contabilizar as respostas foram combinações que resultam numa somatória final de 100%, ficando assim distribuídos: técnico – 0,50; econômico – 0,30; e ambiental – 0,20. Considerou-se que os indicadores relacionados a um critério possuem a mesma importância para esse critério.

Na Tabela 2 estão apresentados uma seleção de indicadores e atributos (benéfico ou não-benéfico) para cada critério, por ATEA. Ressalta-se que os indicadores devem ser selecionados de acordo com o uso pretendido e requisitos estabelecidos pelas partes interessadas, com relação ao biopolímero em desenvolvimento.

Tabela 2. Atributos de indicadores nos critérios técnicos, econômicos e ambientais propostos em cada ATEA

ATEA	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental
1 (materiais)	- Indicadores: Teor de amilose e massa molar; - Atributo: Benéfico (melhor desempenho técnico).	- Indicador: Valor de mercado; - Atributo: Não-benéfico (menor custo).	- Indicador: Pegada Ambiental de Produtos PEF - Atributo: Não-benéfico (menor impacto ambiental).
2 (rota de produção)	- Indicadores: Resistência à tração e módulo de elasticidade; - Atributo: Benéfico (melhor desempenho técnico).	- Indicador: Margem de lucro bruto; - Atributo: Benéfico (maior lucro).	- Indicador: Pegada Ambiental de Produtos PEF - Atributo: Não-benéfico (menor impacto ambiental).
3 (fim de vida)	- Indicador: Biodegradabilidade; - Atributo: Benéfico (melhor desempenho técnico).	- Indicador: Custo operacional; - Atributo: Não-benéfico (menor custo).	- Indicador: Pegada Ambiental de Produtos PEF - Atributo: Não-benéfico (menor impacto ambiental).
4 (produtos)	- Indicadores: Resistência a tração e módulo de elasticidade; - Atributo: Benéfico (melhor desempenho técnico).	- Indicador: Valor de mercado; - Atributo: Não-benéfico (menor custo).	- Indicador: Pegada Ambiental de Produtos PEF - Atributo: Não-benéfico (menor impacto ambiental).

3. Aplicação da *Biopolymers+*: estudo de caso de biopolímeros à base de amido

3.1 Etapa 1: Planejamento das avaliações dos biopolímeros A e B

A abordagem *Biopolymers+* foi aplicada no desenvolvimento de dois biopolímeros: i) biopolímero A, em estágio inicial de concepção em 2023, avaliado nas etapas 1 (planejamento na TRL2) e 2 (experimentação na TRL3), empregando a ATEA1; e ii) biopolímero B, em estágio de experimentação, avaliado nas etapas 3 (TRL4) e 4 (início da TRL5), empregando a ATEA2. Essa estratégia foi adotada devido a necessidade de aplicar essa abordagem em um ano (2023), tempo inferior ao usualmente requerido entre ideação de um novo biopolímero e final da sua experimentação (3 a 4 anos). Os biopolímeros A e B estavam em desenvolvimento no Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical e foram selecionados devido a facilidade de coleta de dados.

Devido a adoção dessa estratégia, os resultados da ATEA1 voltados à seleção de materiais, não foram aplicados diretamente no estudo do biopolímero B que já tinha materiais e formulação definidos no início desse trabalho. Entretanto, os melhores materiais identificados nessa avaliação foram utilizados na construção de cenários alternativos de produção na ATEA2.

O biopolímero A atendia a uma demanda para desenvolvimento de um bioplástico à base de amido, para ser utilizado como filme na embalagem de grãos. Já o biopolímero B foi formulado para gerar tampas que serão empregadas na embalagem de grãos.

A mesma equipe multidisciplinar atuou no desenvolvimento dos dois biopolímeros. Essa equipe foi composta por um engenheiro de materiais, um analista econômico e um analista ambiental com formação de ACV.

Os indicadores selecionados para avaliação dos biopolímeros A (ATEA1) e B (ATEA 2) são apresentados na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3. Critérios e indicadores nas ATEAs dos biopolímeros A e B

Critérios	Indicadores	Unidade	Método	ATEA	
				1	2
Técnicos	Teor de amilose	%	Colorimétrico do iodo simplificado	x	
	Massa molar	g/mol	Soma das massas atômicas	x	
	Resistência a tração	MPa	ASTM D638		x
	Módulo de elasticidade	MPa	ASTM D638		x
Econômicos	Valor de mercado	US\$/t	Valor de mercado	x	
	Margem de lucro bruto	%	Margem de lucro bruto		x
Ambientais	Índice PEF*	Diferentes métodos e unidades		x	x

*Categorias de impacto que compõem a PEF: acidification, climate change, ecotoxicity (freshwater), particulate matter, eutrophication (freshwater, marine, terrestrial); human toxicity (cancer, non-cancer); ionizing radiation, land use, ozone depletion, photochemical ozone formation, resource use (fossils, minerals and metals), and water use.

3.2 Etapa 2: Seleção de materiais para formulação do biopolímero A

O biopolímero A foi demandado pelo setor de embalagem que especificou o amido como matriz. Assim, buscou-se potenciais fontes de amido e plastificantes que pudessem ser utilizados junto a matriz de amido. Foram identificados os inventários de 6 matrizes à base de amido (amido de manga, mandioca, milho, ervilha, batata, e trigo) e 13 aditivos químicos que podem ser utilizados como plastificantes, disponíveis nas bases de dados do Ecoinvent v.3.9.1, Agro-Footprint 6 e da Embrapa Agroindústria Tropical. Os nomes das matrizes, plastificantes e inventários selecionados nas bases de dados encontram-se na Tabela A1 do material suplementar.

Como indicador para o critério técnico do amido, utilizou-se o teor de amilose (%), e para os plastificantes, a massa molar (g/mol). O teor de amilose está relacionado a qualidade do amido, sendo um parâmetro que pode afetar algumas propriedades das matrizes de amido, como a capacidade de gelatinização e solubilidade (Zhu et al., 2008). Quanto maior for o teor de amilose, melhor a qualidade da matriz, e maiores serão as oportunidades de aplicação. Com relação a massa molar, espera-se que ela seja a menor possível com relação ao peso da matriz, pois assim facilitará a interação entre as moléculas, provocando aumento do volume livre entre as mesmas, o que implicará no aumento da flexibilidade e alongamento da biopolímero (Montilla-Buitrago et al., 2021).

O valor de mercado (US\$/kg) foi selecionado como indicador do critério econômico, com os valores dos materiais obtido no site *Made-in-China* (<https://www.made-in-china.com>). O índice PEF foi utilizado na avaliação ambiental. A avaliação (ATEA 1) foi relativa à produção de 1 kg de cada material (Tabela 4).

Tabela 4. Valores dos indicadores dos critérios técnico, econômico e ambiental utilizados na ATEA1

Insumos	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental
Matrizes	Teor de amilose (%)	Valor (US\$/kg)	Índice PEF (adimensional)
Amido de manga	22,10	0,238	1,439
Amido de mandioca	17,00	1,200	0,631
Amido de milho	26,50	0,600	0,166
Amido de ervilha	35,00	1,300	0,442
Amido de batata	20,46	0,680	0,359
Amido de trigo	27,89	0,500	0,268
Plastificantes	Massa molar (g/mol)	Valor (US\$/kg)	Índice PEF (adimensional)
Ácido acético	60,052	0,815	243,212
Ácido cítrico	192,124	0,695	838,329
Dietanolamina (DEA)	105,140	1,500	312,925
Dietilenoglicol	106,120	1,050	224,085
Etilenoglicol	62,070	0,800	197,650
Glicerol	92,094	1,000	472,552
Monoetanolamina (MEA)	61,080	1,000	324,116
Propileno glicol	76,090	1,100	545,016
Óxido de propileno	58,079	2,000	618,622
Ácido esteárico	284,480	1,350	47,996
Trietanolamina (TEA)	149,188	1,800	312,841
Trietilenoglicol	150,170	1,175	235,012
Urea	60,060	0,250	178,231

Após a valoração dos diferentes indicadores em todos os materiais, aplicou-se o método da soma ponderada, para normalização interna de matrizes e plastificantes, separadamente. Considerou-se que os materiais (matrizes e plastificantes) devem ter o melhor desempenho técnico, menor custo e menor impacto ambiental.

Observou-se que a matriz de amido de milho (pontuação final: 0,698) é a melhor escolha ao considerar a soma ponderada de todos os indicadores e critérios analisados, seguido pelos amidos de trigo, manga, ervilha, batata e mandioca (Tabela 5). Com relação ao plastificante, a ureia (pontuação final: 0,837) representa a melhor escolha, enquanto o trietanolamina (0,292) a pior, entre os treze plastificantes analisados.

Tabela 5. ATEA1: pesos e pontuação final

Matriz	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental	SOMA
Peso	0,50	0,30	0,20	
Amido de manga	0,316	0,300	0,023	0,639
Amido de mandioca	0,243	0,060	0,052	0,354
Amido de milho	0,379	0,119	0,200	0,698
Amido de ervilha	0,500	0,055	0,075	0,630
Amido de batata	0,293	0,105	0,092	0,490
Amido de trigo	0,399	0,143	0,124	0,665
Plastificante	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental	SOMA
Peso	0,50	0,30	0,20	
Ácido acético	0,484	0,120	0,039	0,643
Ácido cítrico	0,151	0,164	0,011	0,327
Dietanolamina	0,276	0,080	0,031	0,387

Dietilenoglicol (DEA)	0,274	0,114	0,043	0,431
Etilenoglicol	0,468	0,150	0,049	0,666
Glicerol	0,315	0,200	0,020	0,536
Monoetanolamina (MEA)	0,475	0,120	0,030	0,625
Propileno glicol	0,382	0,109	0,018	0,508
Óxido de propileno	0,500	0,060	0,016	0,576
Ácido esteárico	0,102	0,089	0,200	0,391
Trietanolamina (TEA)	0,195	0,067	0,031	0,292
Trietilenoglicol	0,193	0,102	0,041	0,336
Urea	0,484	0,300	0,054	0,837

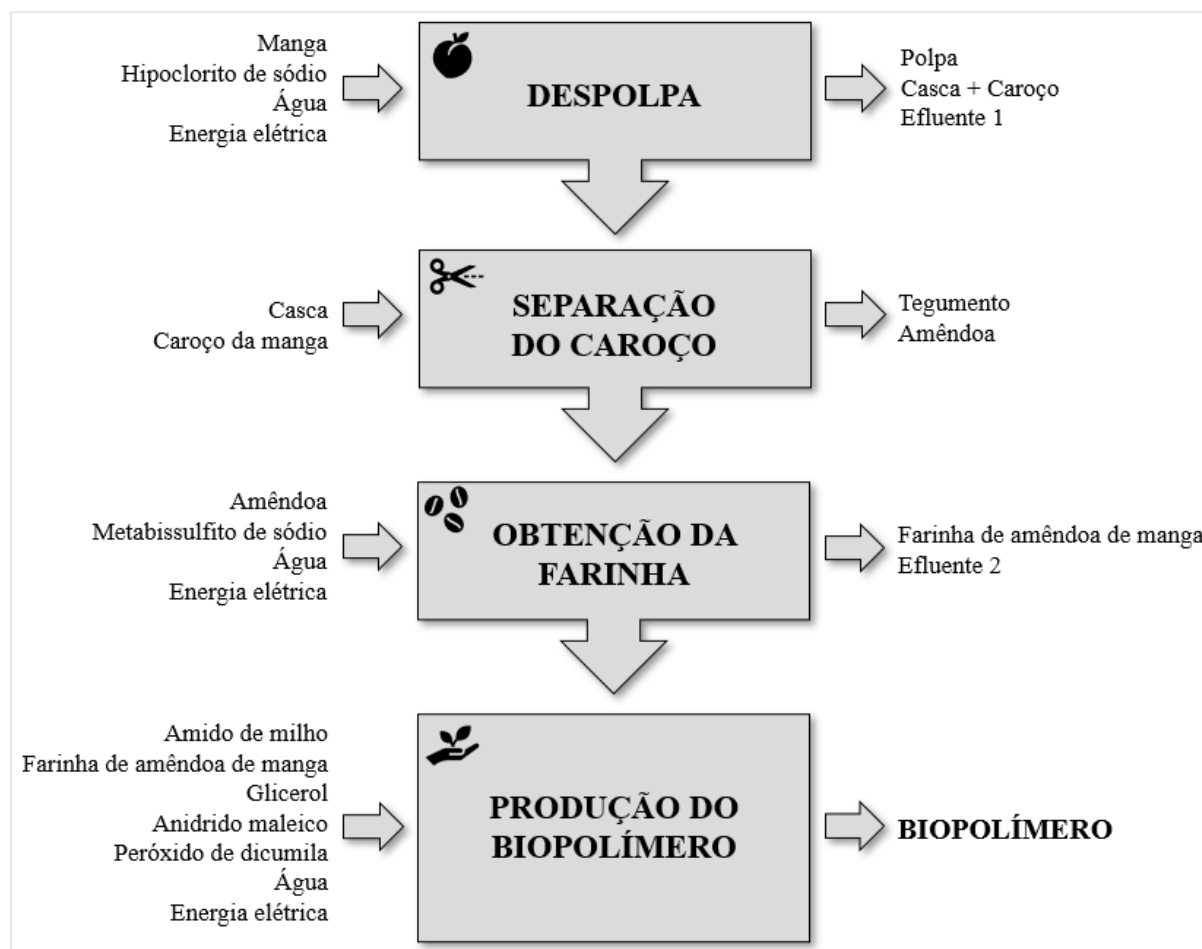
3.3 Etapa 3: Detalhamento da rota de produção e aplicação do biopolímero B

A partir dessa etapa, optou-se por aplicar a abordagem *Biopolymers+* no desenvolvimento de um biopolímero B, baseado em um blend de amido de milho e farinha da amêndoa da manga, tendo como plastificante o glicerol. A escolha da farinha da amêndoa da manga para compor a base do novo biopolímero, se deve ao estudo de Gomez-Caturla et al. (2022), que observou o efeito dessa combinação na melhoria das propriedades físicas, mecânicas, antioxidantes e biodegradáveis de filmes biopoliméricos. Já o glicerol foi escolhido por ser o plastificante mais utilizado nos estudos realizados, devido a sua alta hidrofilicidade (Sampaio et al., 2023).

O biopolímero B deveria ter características semelhantes ao polietileno de baixa densidade (similar comercial), como a resistência a tração (entre 6,9-16 MPa) e o módulo de elasticidade (entre 102-240 MPa), visando a sua aplicação na confecção de tampas para embalagens de grãos.

Os processos unitários na produção do biopolímero B foram a despolpa da manga, separação da amêndoa e tegumento no caroço, obtenção da farinha da amêndoa (foi necessário construir o inventário desse novo insumo), produção do biopolímero B pelo processo de extrusão (Figura 2). O inventário com os dados coletados em laboratório (formulação de referência) estão disponíveis na Tabela A2 do material suplementar.

Figura 2. Fluxograma da rota tecnológica selecionada para a produção do novo biopolímero B



3.3.1 Construção de cenários de produção alternativos para a rota de referência

O projeto inicial optou pelo desenvolvimento de um biopolímero a base de amido, e a partir dessa escolha, a definição de um plastificante compatível com o uso de uma matriz de amido se fez necessária. A ATEA1 avaliou diferentes matrizes e possíveis plastificantes para o projeto, e os ranqueou para sugerir as melhores opções para o biopolímero em desenvolvimento com base na avaliação das características técnicas, econômicas e ambientais de cada material. Esse resultado foi considerado na construção de cenários alternativos de produção.

A partir dessas observações foram definidos quatro possíveis cenários, propondo-se a substituição da matriz e do plastificante, com base nos resultados da ATEA1. Os cenários propostos foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Caracterização dos cenários propostos

Cenário	Insumos	
	Matriz	Plastificante
Referência	Amido de milho	Glicerol
Cenário 1	Amido de trigo	Glicerol
Cenário 2	Amido de manga	Glicerol
Cenário 3	Amido de milho	Ureia
Cenário 4	Amido de milho	Etileno glicol

3.4 Etapa 4: Avaliação de rotas produtivas (referência e alternativas)

3.4.1 Modelagem da rota definida em escala laboratorial para produção em escala industrial

A simulação do processo de produção do biopolímero B em escala piloto foi realizada no software *SuperPro Designer* v.10. Para a construção desta simulação foram utilizados os dados obtidos do inventário em escala de laboratório referentes a: quantidade de insumos, descrição das condições do processo (temperatura, pressão, ordem de utilização dos insumos) e equipamentos utilizados. Os equipamentos industriais escolhidos da base de dados do *SuperPro* desempenham funções semelhantes às dos equipamentos de laboratório e a proporção entre a quantidade de materiais utilizados em escala laboratorial foi mantida em escala industrial. O inventário do processo foi construído após modelagem e simulação da produção em escala piloto (Tabela 7). As descrições do processo, equipamentos e fluxograma da planta piloto estão no Texto A1 e Tabela A3 do material suplementar.

Tabela 7. Inventário da produção do novo bioplástico em escala piloto, considerando um ano de produção

Insumos			Etapas de produção		
Entradas	Unidade	Despolpa	Separação do caroço	Obtenção da farinha	Produção do biopolímero
Manga	kg	6280000,0			
Hipoclorito de sódio	kg	624674,4			
Casca	kg		728480,0		
Caroço	kg		734760,0		
Amêndoa	kg			339120,0	
Metabissulfito de sódio	kg			1561,8	
Farinha de amêndoa	kg				257858,4
Amido de milho	kg				400795,3
Glicerol	kg				70475,7
Anidrido maleico	kg				7283,5
Peróxido de dicumila	kg				3606,9
Água	L	5652000,0		314000,0	507059,8
Energia (elétrica)	Kwh	2173156,6	376463,9	733021,6	2298857,0
Energia (steam)	MT		3,0	659,0	
Saídas	Unidade	Despolpa	Separação do caroço	Obtenção da farinha	Produção do bioplástico

Polpa	kg	4816760,0		
Casca	kg	728480,0		
Caroço	kg	734760,0		
Amêndoa	kg		339120,0	
Tegumento	kg		395640,0	
Biometano	kg		106106,6	
Efluente 1	L		342461,0	
Reuso de água	L	5291768,8		
Farinha de amêndoa	kg		257858,4	
Água evaporada	L			838830,0
Biopolímero	kg			951515,8

3.4.2 ATEA2: avaliação das rotas (referência e alternativas)

Na ATEA2 foi realizada a avaliação técnica, econômica e ambiental da produção em escala piloto na situação de referência (Tabela 2) e nos cenários propostos. As propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade foram escolhidas como indicadores do critério técnico, por serem relevantes na avaliação da resistência ao cisalhamento e perfuração (Sampaio et al., 2023), qualidades importantes para biopolímero utilizado em tampas de garrafas.

Foi observado que o biopolímero no cenário de referência tem as propriedades mecânicas dentro do estimado para ser comparável ao polietileno de baixa densidade (similar comercial), considerando que os valores obtidos nos testes mecânicos do biopolímero no cenário de referência foram similares ao do polietileno (Tabela 8). Considerou-se nos cenários 1 e 2 que a mudança da matriz de amido de milho para as de amido de trigo e manga, poderiam sim, gerar um biopolímero comparável ao similar comercial, devido a quantidade de amilose presente nos materiais substitutos. Já a substituição do plastificante (cenários 3 e 4) pode alterar o resultado final de forma física e mecânica, devido as iterações químicas entre a matriz e o plastificante, resultando em um bioplástico diferente do de referência, sendo necessário a caracterização do biopolímero obtido, no caso de os resultados da avaliação serem satisfatórios.

Para a avaliação multicritério dos critérios técnicos (resistência a tração e módulo de elasticidade), optou-se por uma legenda baseada na possibilidade de os cenários propostos resultarem em um biopolímero com características similares ao polietileno - considerou-se o valor 2 para o caso de o cenário ter a maior possibilidade de similaridade ao polietileno, são os casos dos cenários de referência, 1 e 2. Já para os cenários 3 e 4, onde a mudança do plastificante implica em diferentes iterações químicas, considerou-se o valor 1, pois há uma menor possibilidade de similaridade ao polietileno (Tabela 8).

Tabela 8. Propriedades dos polímeros (indicador técnico)

Propriedade mecânica	Unidade	Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Bioplástico desenvolvido no cenário de referência
Resistência a tração	MPa	6,9 - 16	9.53 ± 0.48
Módulo de elasticidade	MPa	102 - 240	241.41 ± 10.55

A margem de lucro bruta (US\$ lucro/US\$ vendido) foi selecionada como indicador do critério econômico por ser uma medida que avalia se uma determinada atividade comercial gera lucro. Essa medida representa o lucro obtido pela venda do produto, após a subtração de todos os seus custos (Nariswari and Nugraha, 2020). O índice final da Pegada Ambiental de Produtos (PEF) também foi utilizado no critério ambiental nessa ATEA. O resultado da avaliação foi obtido considerando a produção de 1 tonelada do biopolímero, a partir dos inventários localizados nas bases de dados presentes na biblioteca do software SimaPro (Tabela 9).

Tabela 9. Valores dos indicadores dos critérios técnico, econômico e ambiental utilizados na ATEA2

Cenário	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental
	Similaridade propriedades mecânicas	Valor (US\$ lucro/vendido)	Índice PEF (adimensional)
Referência	2,000	0,181	134,487
Cenário 1	2,000	0,179	177,528
Cenário 2	2,000	0,188	670,890
Cenário 3	1,000	0,183	112,687
Cenário 4	1,000	0,180	114,125

Observou-se que a rota na situação de referência (matriz de milho e plastificante glicerol) é a melhor quando comparada a todos os cenários (1 a 4) (Tabela 10). Para o critério técnico, o biopolímero produzido no cenário de referência tem propriedades mecânicas similares ao polietileno (similar comercial). O proposto nos cenários 1 e 2 (mudança de matriz), tem maior possibilidade de similaridade ao polietileno, enquanto os cenários 3 e 4, tem menor possibilidade. Houve pouca diferença no critério econômico, visto que a mudança em cada cenário foi com relação ao custo das matrizes e plastificantes substituídos. Por fim, com relação ao critério ambiental, o cenário 3 (ureia como plastificante) foi bem melhor, pois a produção da ureia tem o menor impacto ambiental, como comparado aos demais cenários, porém isso não causou grande diferença no índice final devido ao menor peso desse critério em relação aos outros.

Tabela 10. ATEA 2: pesos e pontuação final

Cenário	Critério técnico	Critério econômico	Critério ambiental	SOMA
Peso	0,50	0,30	0,20	
Referência	0,500	0,289	0,168	0,956
Cenário 1	0,500	0,286	0,127	0,913
Cenário 2	0,500	0,300	0,034	0,834
Cenário 3	0,250	0,292	0,200	0,742
Cenário 4	0,250	0,287	0,197	0,735

4. Discussão

A abordagem *Biopolymers+* proposta foi considerada útil na concepção de novos biopolímeros em estágios iniciais de desenvolvimento. A integração dos critérios técnico, econômico e ambiental, por meio do uso da análise multicritério de decisão, em uma resposta única de viabilidade, facilitou a tomada de decisão das partes interessadas. Além disso, a definição de atividades e avaliações com objetivo e escopo específico por nível de maturidade tecnológica facilita a integração dos critérios econômico e ambiental ao técnico, foco do processo atual de PDI.

Uma limitação dessa abordagem é a subjetividade na escolha dos pesos por terem sido estabelecidos por um grupo específico de especialistas. No entanto, os pesos na ponderação dos indicadores podem ser alterados com base em critérios que melhor reflitam os valores das partes interessadas. Outra limitação é a falta de atividades e avaliações voltadas à otimização de rotas tecnológicas na TRL5, a partir do estudo de pontos críticos. Entretanto, essa questão pode ser inserida em trabalhos futuros.

A abordagem proposta pode ser aplicada na PDI de outros biopolímeros e ser adaptada para outros produtos, como bioquímicos, bio-adesivos e biochar. Para outras aplicações será necessário definir indicadores técnicos diferentes, por exemplo, na produção de benzeno, os indicadores podem incluir o rendimento e a seletividade do carbono (Hu, 2015). Também é possível definir indicadores econômicos diferentes, no caso da avaliação da produção o biochar, devido as diversas opções de matéria-prima, pode-se avaliar o custo do transporte até a área de produção (Mousavi-Avval et al., 2023).

A *Biopolymers+* diferencia-se das demais anteriormente propostas pela sua estruturação de atividades e avaliações em TRLs específicas dos estágios de ideação e experimentação. Algumas abordagens foram propostas nos últimos anos buscando a integração de critérios e indicadores por meio da análise multicritério, porém concentrando esforços em uma única avaliação de desempenho de uma tecnologia, realizada em algum momento do estágio inicial PDI.

Patel et al. (2012) compararam a rota de produção de um novo produto a um similar, nos estágios iniciais de desenvolvimento. A abordagem considera critérios técnicos, econômicos e ambientais; a soma ponderada como método de análise multicritério, e Monte Carlo para avaliar a incerteza e sensibilidade das rotas de produção comparadas. A *Biopolymers+* avalia os processos modelados em escala laboratorial e piloto, e propõe a análise de diferentes cenários de produção, considerando desde a escolha dos materiais, até possíveis opções de fim de vida (Tabela 13).

Reeb et al. (2016) compararam matérias-primas alternativas para a produção de açúcar (biomassas, como: milho, eucalipto, cascas de arroz, e outros), utilizaram a análise estocástica de múltiplos atributos para agregar indicadores de viabilidade técnica, financeira e ambiental, e Monte Carlo para analisar a incerteza na comparação entre as biomassas. A abordagem proposta por Reeb et al. (2016) se assemelha a ATEA1, que tem o objetivo de auxiliar na escolha dos insumos que serão utilizados para o desenvolvimento do biopolímero, através do ranqueamento das possíveis opções de matéria-prima. No entanto, ela difere da *Biopolymers+* quanto ao método de análise multicritério utilizado, por não avaliar rotas de produção, diferentes cenários e possíveis opções de fim-se-vida (Tabela 13).

Van Schoubroeck et al. (2021) propuseram avaliar um produto (ou tecnologia), considerando critérios ambientais, econômicos e sociais do processo de produção em escala laboratorial. O estudo propôs a análise de cenários, e utilizou a análise estocástica de múltiplos atributos na agregação dos critérios e Monte Carlo para avaliar a incerteza entre os cenários propostos. A *Biopolymers+* difere quanto aos critérios considerados (técnicos, econômicos e ambientais), a modelagem dos processos (laboratorial e piloto), técnica de análise multicritério utilizada (soma ponderada) e por propor a avaliação das opções de fim-de-vida e a comparação a um similar comercial (Tabela 13).

Muller-Carneiro et al. (2023) compararam diferentes formulações para a obtenção de um filme biopolimérico, além da comparação da melhor formulação do filme com um similar comercial, por meio da análise multicritério considerando indicadores técnicos, econômicos e ambientais, estabelecendo a incineração como fim de vida. A *Biopolymers+* difere quanto ao método usado para o escalonamento do processo, o método de análise multicritério, por propor a avaliação de diferentes opções de fim-de-vida, e pela sua estruturação, que consiste em diferentes ATEAs por etapas definidas em acordo com a escala TRL. Assim a abordagem proposta nesse estudo consiste na avaliação preliminar de diferentes materiais, testes de formulação em laboratório, escalonamento da rota de produção com melhor desempenho, análise de diferentes cenários (inclusive diferentes opções de fim-de-vida),

e comparação do novo produto a um similar comercial, considerando todo o ciclo de vida (Tabela 13).

Tabela 13. Estudos revisados de diferentes avaliações de sustentabilidade: escala TRL, objetivo, escopo, escalonamento, multicritério, análise de cenários e incertezas

Referência	Componentes					
	Escala TRL	Objetivo e escopo das avaliações	Escalonamento	Análise multicritério	Análise de cenários	Análise de incerteza
Esta pesquisa	1-5	Objetivos: comparar e selecionar materiais e opções de fim de vida; comparar o novo produto com um similar; identificar pontos críticos; e sugerir melhorias.	Sim	Método da soma ponderada	Sim	Sim
Patel et al. (2012)	3-4	Escopo: do berço ao fim de vida..	Não	Método da soma ponderada	Não	Sim
		Objetivos: comparar o novo produto com um similar (processos em estágio de laboratório);				
Reeb et al. (2016)	1-2	Escopo: do berço ao portão.	Não	Análise estocástica multiatributos (SMAA)	Não	Sim
		Objetivos: comparar e selecionar materiais.				
Van Schoubroeck et al. (2021)	1-4	Escopo: do berço ao berço.	Não	Análise estocástica multiatributos (SMAA)	Sim	Sim
		Objetivos: avaliar um produto ou tecnologia específica e toda a sua cadeia de valor.				
Muller-Carneiro et al. (2023)	1-5	Escopo: do berço ao portão.	Sim	Análise estocástica multiatributos (SMAA)	Sim	Sim
		Objetivos: comparar diferentes formulações; e comparar o novo produto com um similar.				
		Escopo: do berço ao fim de vida.				

5. Conclusões

Este estudo teve o objetivo de desenvolver uma abordagem metodológica para a utilização nos estágios de ideação e experimentação de biopolímeros, considerando indicadores técnicos, econômicos e ambientais, agregados por meio da análise multicritério. Essa abordagem é especialmente relevante em organizações de PDI que utilizam a escala TRL para desenvolver, avaliar e comunicar a maturidade de uma tecnologia.

A abordagem foi aplicada com sucesso no ecodesign de dois biopolímeros (A e B) à base de amido. Os resultados da ATEA1, referente ao biopolímero A, apontaram o amido de

milho e ureia como as melhores opções de materiais, com base nos indicadores avaliados. Essa avaliação permitiu a definição dos principais materiais a serem utilizados para a concepção de um novo biopolímero, considerando os critérios técnicos, econômicos e ambientais, e facilitando a tomada de decisão no início do projeto (TRL2).

Para o biopolímero B, a formulação de referência considerada foi composta pelo blend de amido de milho e farinha da amêndoa da manga (matriz) e glicerol (plastificante). Realizado o escalonamento do processo, foram definidos quatro cenários, com base na substituição da matriz (trigo, manga) e plastificante (etileno glicol, ureia). A ATEA2 mostrou que o cenário de referência (milho e glicerol) é a melhor opção para a formulação do novo biopolímero, tendo o melhor resultado da avaliação multicritério, e com as características técnicas (resistência a tração e módulo de elasticidade) similares ao polietileno de baixa densidade (PEBD), indicando que o biopolímero B pode ser uma alternativa viável para a substituição do PEBD na fabricação de embalagens.

A aplicação da *Biopolymers+* mostrou que ela pode contribuir para o desenvolvimento de novos biopolímeros, devido a sua base metodológica, que propõe atividades e avaliações técnicas, econômicas e ambientais, desde a seleção dos materiais, incluindo a análise de diferentes cenários de produção, e a possível investigação sobre opções de fim-de-vida, e comparação a um similar comercial. Portanto, essa abordagem pode auxiliar no desenvolvimento de diferentes bioprodutos, visando uma produção mais sustentável. Por fim, recomenda-se a aplicação integral da abordagem metodológica, considerando as ATEAs 3 e 4, propostas para as etapas 5 e 6 da *Biopolymers+*.

Referências

- Abbasi, T., Jaafarzadeh Haghighi Fard, N., Madadzadeh, F., Eslami, H., Ebrahimi, A. A. 2023. Environmental Impact Assessment of Low-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate Containers Using a Life Cycle Assessment Technique. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02806-0>.
- Alanazi, H. O., Abdullah, A. H., Larbani, M. 2013. Dynamic weighted sum multi-criteria decision making: Mathematical Model. *International Journal of Mathematics and Statistics Invention*, 1(2), 16-18. <https://ijmsi.org/Papers/Volume.1.Issue.2/B012016018.pdf>.
- Ali, S. S., Abdelkarim, E. A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., Zuorro, A., Zhu, D., Sun, J. 2023. Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100254>.
- Ali, S. S., Elsamahy, T., Abdelkarim, E. A., Al-Tohamy, R., Kornaros, M., Ruiz, H. A., Zhao, T., Li, F., Sun, J. 2022. Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life

- scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 127869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127869>.
- Bartolucci, L., Cordiner, S., De Maina, E., Kumar, G., Mele, P., Mulone, V., Iglinski, B., Piechota, G. 2023. Sustainable Valorization of Bioplastic Waste: A Review on Effective Recycling Routes for the Most Widely Used Biopolymers. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 7696. <https://doi.org/10.3390/ijms24097696>.
- Caldeira, C., Farcas, L. R., Garmendia Aguirre, I., Mancini, L., Tosches, D., Amelio, A., Sala, S. 2022. Safe and sustainable by design chemicals and materials. Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials. EUR. <https://iris.polito.it/handle/11583/2981423>.
- Chebaeva, N., Lettner, M., Wenger, J., Schöggel, J. P., Hesser, F., Holzer, D., Stern, T. 2021. Dealing with the eco-design paradox in research and development projects: The concept of sustainability assessment levels. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125232>.
- Cucurachi, S., Steubing, B., Siebler, F., Navarre, N., Caldeira, C., Sala, S. 2022. Prospective LCA methodology for Novel and Emerging Technologies for BIO-based products - The PLANET BIO project. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129632>.
- Da Silva, A. K. P., Cardoso, A., de Sá Filho, E. B., de Azeredo, H. M. C., Freire, F., Casimiro Filho, F., de Figueirêdo, M. C. B. 2021. Integrating life cycle assessment in early process development stage: The case of extracting starch from mango kernel. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128981. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128981>.
- De Araújo e Silva, R., Santa Brígida, A. I., de Freitas Rosa, M., da Silva Neto, R. M., Spinosa, W. A., de Sá Filho, E. B., de Figueirêdo, M. C. B. 2020. An approach for implementing ecodesign at early research stage: a case study of bacterial cellulose production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122245>.
- Escobar, N., Laibach, N. 2021. Sustainability check for bio-based technologies: A review of process-based and life cycle approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110213>.
- Fernandez-Dacosta, C., Wassenaar, P. N., Dencic, I., Zijp, M. C., Morao, A., Heugens, E. H., Shen, L. 2019. Can we assess innovative bio-based chemicals in their early development stage? A comparison between early-stage and life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 230, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.115>.
- Gomez-Caturla, J., Ivorra-Martinez, J., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., Garcia-Garcia, D., Dominici, F., Puglia, D., Torre, L. 2022. Improvement of the barrier and mechanical properties of environmentally friendly mango kernel flour/glycerol films by varying the particle size of mango kernel flour. *Industrial Crops and Products*, 188, 115668. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115668>.

- Göswein, V., Rodrigues, C., Silvestre, J. D., Freire, F., Habert, G., König, J. 2020. Using anticipatory life cycle assessment to enable future sustainable construction. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 178-192. <https://doi.org/10.1111/jiec.12916>.
- Hu, W. 2015. *Techno-economic, uncertainty, and optimization analysis of commodity product production from biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading* (Doctoral dissertation, Iowa State University).
<https://www.proquest.com/openview/2d93067c1819a019260237f5755300d6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>.
- ISO 14040. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/38498.html>.
- Lomate, G. B., Dandi, B., Mishra, S. 2018. Development of antimicrobial LDPE/Cu nanocomposite food packaging film for extended shelf life of peda. *Food packaging and shelf life*, 16, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.04.001>.
- Luzi, F., Puglia, D., Torre, L. 2019. Natural fiber biodegradable composites and nanocomposites: a biomedical application. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*, 179-201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00010-2>.
- Mahmud, R., Moni, S. M., High, K., Carbajales-Dale, M. 2021. Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design—A review. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128247>.
- Mateo, J. R. S. C. 2012. Weighted sum method and weighted product method. *Multi criteria analysis in the renewable energy industry*, 19-22. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0_4.
- Montilla-Buitrago, C. E., Gómez-López, R. A., Solanilla-Duque, J. F., Serna-Cock, L., Villada-Castillo, H. S. 2021. Effect of plasticizers on properties, retrogradation, and processing of extrusion-obtained thermoplastic starch: A review. *Starch-Stärke*, 73(9-10), 2100060. <https://doi.org/10.1002/star.202100060>.
- Mousavi-Avval, S. H., Sahoo, K., Nepal, P., Runge, T., Bergman, R. 2023. Environmental impacts and techno-economic assessments of biobased products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113302. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113302>.
- Moni, S. M., Mahmud, R., High, K., Carbajales-Dale, M. 2020. Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 52-63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>.
- Müller-Carneiro, J., Rodrigues, C., Dias, L. C., Antunes, C. H., Mattos, A. L., Freire, F. 2023. A multi-criteria framework for the ecodesign of bio-based materials at early development stages. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139268>.

- Nariswari, T. N., Nugraha, N. M. 2020. Profit growth: impact of net profit margin, gross profit margin and total assests turnover. *International Journal of Finance & Banking Studies* (2147-4486), 9(4), 87-96. <https://doi.org/10.20525/ijfbs.v9i4.937>.
- Parolin, G., McAloone, T. C., Pigosso, D. C. 2024. How can technology assessment tools support sustainable innovation? A systematic literature review and synthesis. *Technovation*, 129, 102881. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102881>.
- Patel, A. D., Meesters, K., Den Uil, H., De Jong, E., Blok, K., Patel, M. K. 2012. Sustainability assessment of novel chemical processes at early stage: application to biobased processes. *Energy & Environmental Science*, 5(9), 8430-8444. [10.1039/c2ee21581k](https://doi.org/10.1039/c2ee21581k).
- Pauer, E., Wohner, B., Heinrich, V., Tacker, M. 2019. Assessing the environmental sustainability of food packaging: An extended life cycle assessment including packaging-related food losses and waste and circularity assessment. *Sustainability*, 11(3), 925. <https://doi.org/10.3390/su11030925>.
- Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., Som, C. 2016. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1085-1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>.
- Reeb, C. W., Venditti, R., Gonzalez, R., Kelley, S. 2016. Environmental LCA and financial analysis to evaluate the feasibility of bio-based sugar feedstock biomass supply globally: Part 2. Application of multi-criteria decision-making analysis as a method for biomass feedstock comparisons. *BioResources*, 11(3), 6062-6084. https://jstatm.textiles.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_3_6062_Reeb_Environmental_LCA_Financial_Analysis_Sugar_Feedstock.
- Sampaio, A. P. C., Müller-Carneiro, J., Pereira, A. L. S., de Freitas Rosa, M., Mattos, A. L. A., de Azeredo, H. M. C., Freire, F., de Figueirêdo, M. C. B. 2023. Ecodesign of bio-based films for food packaging: Challenges and recommendations. *Environmental Development*, 100926. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100926>.
- Sampaio, A. P. C., de Sá M de Sousa Filho, M., Castro, A. L. A., de Figueirêdo, M. C. B. 2017. Life cycle assessment from early development stages: the case of gelatin extracted from tilapia residues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 767-783. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1179-5>.
- Sanjuán, N., Stoessel, F., Hellweg, S. 2014. Closing data gaps for LCA of food products: estimating the energy demand of food processing. *Environmental science & technology*, 48(2), 1132-1140. <https://doi.org/10.1021/es4033716>.
- Santos, J. F., Macario, K. D., Jou, R. M., Oliveira, F. M., Cardoso, R. P., Diaz, M., Anjos, R. M., Alves, E. Q. 2019. Monitoring the biogenic fraction of sugarcane-based plastic bags. *Journal of cleaner production*, 233, 348-352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.377>.

- Sikorska, W., Musioł, M., Rydz, J., Zięba, M., Rychter, P., Lewicka, K., Šišková, A., Mosnáčková, K., Kowalczyk, M., Adamus, G. 2018. Prediction studies of environment-friendly biodegradable polymeric packaging based on PLA. Influence of specimens' thickness on the hydrolytic degradation profile. *Waste Management*, 78, 938-947. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.014>.
- Spierling, S., Venkatachalam, V., Mudersbach, M., Becker, N., Herrmann, C., Endres, H. J. 2020. End-of-life options for bio-based plastics in a circular economy—status quo and potential from a life cycle assessment perspective. *Resources*, 9(7), 90. <https://doi.org/10.3390/resources9070090>.
- Thomassen, G., Van Dael, M., Van Passel, S., You, F. 2019. How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework. *Green Chemistry*, 21(18), 4868-4886. <https://doi.org/10.1039/C9GC02223F>.
- Tsoy, N., Steubing, B., van der Giesen, C., Guinée, J. 2020. Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1680-1692. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01796-8>.
- Ubando, A. T., Felix, C. B., Chen, W. H. 2020. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource technology*, 299, 122585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>.
- van der Giesen, C., Cucurachi, S., Guinée, J., Kramer, G. J., Tukker, A. 2020. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>.
- Van Schoubroeck, S., Thomassen, G., Van Passel, S., Malina, R., Springael, J., Lizin, S., Venditti, R. A., Yao, Y., Van Dael, M. 2021. An integrated techno-sustainability assessment (TSA) framework for emerging technologies. *Green Chemistry*, 23(4), 1700-1715. <https://doi.org/10.1039/D1GC00036E>.
- Vazifeh, Z., Bensebaa, F., Shadbahr, J., Gonzales-Calienes, G., Mafakheri, F., Benali, M., Ebadian, M., Vézina, P. 2023. Forestry based products as climate change solution: Integrating life cycle assessment with techno-economic analysis. *Journal of Environmental Management*, 330, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117197>.
- Wunderlich, J., Armstrong, K., Buchner, G. A., Styring, P., Schomäcker, R. 2021. Integration of techno-economic and life cycle assessment: Defining and applying integration types for chemical technology development. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125021>.
- Zampori, L., Pant, R. 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Publications Office of the European Union: Luxembourg. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEF_method.pdf.

Zhu, T., Jackson, D. S., Wehling, R. L., Geera, B. 2008. Comparison of amylose determination methods and the development of a dual wavelength iodine binding technique. *Cereal Chemistry*, 85(1), 51-58. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-1-0051>.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa realizou uma revisão crítica da literatura sobre o ecodesign no desenvolvimento de filmes biopoliméricos, assim como propôs e aplicou uma estrutura metodológica integrando avaliações técnicas, econômicas e ambientais, para avaliar o desempenho de novos bioprodutos, nas fases iniciais de desenvolvimento tecnológico.

A revisão crítica analisou pesquisas técnicas e ambientais sobre filmes biopoliméricos aplicados em embalagens de alimentos, a fim de identificar os principais desafios e fornecer recomendações para as equipes de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que desejam introduzir o ecodesign nos estágios iniciais de desenvolvimento. Em sua maioria, essas pesquisas se concentram na avaliação de biopolímeros comercialmente disponíveis, com foco nas avaliações técnicas (propriedades mecânicas e de barreira), sem avaliação de custo, e poucas avaliações ambientais. Estas, por sua vez, ocorreram através da aplicação da ACV tradicional, baseando-se apenas em dados de laboratório, e sem considerar as práticas para a ACV ex-ante.

A abordagem metodológica combinou as orientações para a prática da ACV ex-ante e o método da soma ponderada (análise multicritério de decisão) para agregar indicadores técnicos, econômicos e ambientais, em um único valor, seguido pelo ranqueamento das alternativas propostas, e indicação da melhor opção. Aplicou-se a estrutura no processo de desenvolvimento de um novo biopolímero a base de amido. Após a escolha dos materiais, testes em laboratório, escalonamento do processo e avaliação de cenários, pode-se concluir que o novo biopolímero é uma possível alternativa para substituir o uso do polietileno de baixa densidade na fabricação de embalagens.

A aplicação da abordagem proposta nesta pesquisa pode contribuir para a interpretação e compreensão dos resultados das avaliações técnicas, econômicas e ambientais, tanto para pesquisadores quanto para tomadores de decisão. A abordagem possui uma base metodológica que analisa a seleção dos materiais, diferentes cenários de produção e fim de vida. Portanto, pode auxiliar no desenvolvimento de diferentes bioprodutos, visando uma produção mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- AHLGREN, S.; BJÖRKLUND, A.; EKMAN, A.; KARLSSON, H.; BERLIN, J.; BÖRJESSON, P.; EKVALL, T.; FINNVEDEN, G.; JANSSEN, M.; STRID, I. Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems-key issues and recommendations. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 9, n. 5, p. 606-619, 2015.
- AHMAD, S.; WONG, K. Y.; TSENG, M. L.; WONG, W. P. Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, p. 49-61, 2018.
- ALANAZI, H. O.; ABDULLAH, A. H.; LARBANI, M. Dynamic weighted sum multi-criteria decision making: Mathematical Model. **International Journal of Mathematics and Statistics Invention**, v. 1, n. 2, p. 16-18, 2013.
- ALI, S. S.; ABDELKARIM, E. A.; ELSAMAHY, T.; AL-TOHAMY, R.; LI, F.; KORNAROS, M.; ZUORRO, A.; ZHU, D.; SUN, J. Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review. **Environmental Science and Ecotechnology**, 100254, 2023.
- ARVIDSSON, R.; TILLMAN, A. M.; SANDÉN, B. A.; JANSSEN, M.; NORDELÖF, A.; KUSHNIR, D.; MOLANDER, S. Environmental assessment of emerging technologies: recommendations for prospective LCA. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 6, p. 1286-1294, 2018.
- ASGHER, M.; QAMAR, S. A.; BILAL, M.; IQBAL, H. M. N. Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials. **Food Research International**, v. 137, p. 109625, 2020.
- BARRET, A. The History and Most Important Innovations of Bioplastics – Bioplastics News n. d. <<https://bioplasticsnews.com/2018/07/05/history-of-bioplastics/>>. Acesso em: 15 set. 2021.
- BÁTORI, V.; ÅKESSON, D.; ZAMANI, A.; TAHERZADEH, M. J.; HORVÁTH, I. S. Anaerobic degradation of bioplastics: A review. **Waste management**, v. 80, p. 406-413, 2018.
- BAUMANN, H.; TILLMAN, A. The Hitch Hiker's Guide to LCA -An orientation in LCA methodology and application. **The International Journal Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, 2006.
- BERGERSON, J. A.; BRANDT, A.; CRESKO, J.; CARBAJALES-DALE, M.; MACLEAN, H. L.; MATTHEWS, H. S.; MCCOY, S.; MCMANUS, M.; MILLER, S. A.; MORROW III, W. R.; POSEN, I. D.; SEAGER, T.; SKONE, T.; SLEEP, S. Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 11-25, 2020.
- BÖRJESON, L.; HÖJER, M.; DREBORG, K. H.; EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Scenario types and techniques: towards a user's guide. **Futures**, v. 38, n. 7, p. 723-739, 2006.

BROEREN, M. L.; ZIJP, M. C.; WAAIJERS-VAN DE LOOP, S. L.; HEUGENS, E. H.; POSTHUMA, L.; WORRELL, E.; SHEN, L. Environmental assessment of bio-based chemicals in early-stage development: a review of methods and indicators. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 4, p. 701-718, 2017.

CAPDEVILLE, G.; ALVES, A. A.; BRASIL, BSAF. Modelo de inovação e negócios da Embrapa Agroenergia: gestão estratégica integrada de P&D e TT. 2017.

CAZAUDEHORE, G.; GUYONEAUD, R.; EVON, P.; MARTIN-CLOSAS, L.; PELACHO, A. M.; RAYNAUD, C.; MONLAU, F. Can anaerobic digestion be a suitable end-of-life scenario for biodegradable plastics? A critical review of the current situation, hurdles, and challenges. **Biotechnology Advances**, v. 56, p. 107916, 2022.

CUCURACHI, S.; SCHERER, L.; GUINÉE, J.; TUKKER, A. Life cycle assessment of food systems. **One Earth**, v. 1, n. 3, p. 292-297, 2019.

CUCURACHI, S.; VAN DER GIESEN, C.; GUINÉE, J. Ex-ante LCA of emerging technologies. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 463-468, 2018.

DA SILVA, D.; KADURI, M.; POLEY, M.; ADIR, O.; KRINSKY, N.; SHAINSKY-ROITMAN, J.; SCHROEDER, A. Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 340, p. 9-14, 2018.

DE MORAES, J. O.; SCHEIBE, A. S.; SERENO, A.; LAURINDO, J. B. Scale-up of the production of cassava starch based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 4, p. 800-808, 2013.

DIAS, L. C.; FREIRE, F.; GELDERMANN, J. Perspectives on multi-criteria decision analysis and life-cycle assessment. **New Perspectives in Multiple Criteria Decision Making: Innovative Applications and Case Studies**, p. 315-329, 2019.

DIAS, L. C.; PASSEIRA, C.; MALÇA, J.; FREIRE, F. Integrating life-cycle assessment and multi-criteria decision analysis to compare alternative biodiesel chains. **Annals of Operations Research**, p. 1-16, 2016.

DILKES-HOFFMAN, L. S.; LANE, J. L.; GRANT, T.; PRATT, S.; LANT, P. A.; LAYCOCK, B. Environmental impact of biodegradable food packaging when considering food waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 325-334, 2018.

EC (2010). Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. In Constraints (First edit). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/38479>.

EMADIAN, S. M.; ONAY, T. T.; DEMIREL, B. Biodegradation of bioplastics in natural environments. **Waste management**, v. 59, p. 526-536, 2017.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics market data. <<https://www.european-bioplastics.org/market/>>. Acesso em: 08 nov. 2021.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Composting. <<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/waste-management/composting>>. Acesso em: 13 out. 2020.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Environmental benefits of bioplastics. <<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/environment>>. Acesso em: 13 out. 2020.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Mechanical recycling. <<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/waste-management/recycling>>. Acesso em: 13 out. 2020.

FERNÁNDEZ-DACOSTA, C.; POSADA, J. A.; KLEEREBEZEM, R.; CUELLAR, M. C.; RAMIREZ, A. Microbial community-based polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from wastewater: techno-economic analysis and ex-ante environmental assessment. **Bioresource technology**, v. 185, p. 368-377, 2015.

FLURY, M.; NARAYAN, R. Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 30, p. 100490, 2021.

FREDI, G.; DORIGATO, A. Recycling of bioplastics waste: a review. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, 2021.

GÖSWEIN, V.; RODRIGUES, C.; SILVESTRE, J. D.; FREIRE, F.; HABERT, G.; KÖNIG, J. Using anticipatory life cycle assessment to enable future sustainable construction. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 178-192, 2020.

GUINÉE, J. B. (Ed.). **Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards**. Springer Science & Business Media, 2002.

GWERDER, Y. V.; MARQUES, P.; DIAS, L. C.; FREIRE, F. Life beyond the grid: A Life-Cycle Sustainability Assessment of household energy needs. **Applied Energy**, v. 255, p. 113881, 2019.

HOTTLE, T. A.; BILEC, M. M.; LANDIS, A. E. Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 295-306, 2017.

HU, T.; WU, Y.; ZHAO, X.; WANG, L.; BI, L.; MA, P. X.; GUO, B. Micropatterned, electroactive, and biodegradable poly (glycerol sebacate)-aniline trimer elastomer for cardiac tissue engineering. **Chemical Engineering Journal**, v. 366, p. 208-222, 2019.

JAKES, J. E.; ARZOLA, X.; BERGMAN, R.; CIESIELSKI, P.; HUNT, C. G.; RAHBAR, N.; TSHABALALA, M.; WIEDENHOEFT, A. C.; ZELINKA, S. L. Not just lumber—Using wood in the sustainable future of materials, chemicals, and fuels. **Jom**, v. 68, p. 2395-2404, 2016.

KONG, L.; WANG, L.; LI, F.; TIAN, G.; LI, J.; CAI, Z.; ZHOU, J.; FU, Y. A life-cycle integrated model for product eco-design in the conceptual design phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132516, 2022.

LAVERY, L. A.; BHAVAN, K.; WUKICH, D. K. Biofilm and diabetic foot ulcer healing: all hat and no cattle. **Annals of translational medicine**, v. 7, n. 7, 2019.

LI, X.; LI, J.; LUO, J.; LI, K.; GAO, Q.; LI, J. A novel eco-friendly blood meal-based bio-adhesive: Preparation and performance. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 2, p. 607-615, 2018.

LUZI, F.; PUGLIA, D.; TORRE, L. Natural fiber biodegradable composites and nanocomposites: a biomedical application. In: **Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy**. Woodhead Publishing, 2019. p. 179-201.

MACHA, I. J.; KARACAN, I.; BEN-NISSAN, B.; CAZALBOU, S.; MÜLLER, W. H. Development of antimicrobial composite coatings for drug release in dental, orthopaedic and neural prostheses applications. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2019.

MAHMUD, R.; MONI, S. M.; HIGH, K.; CARBAJALES-DALE, M. Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design—A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 317, p. 128247, 2021.

MANKINS, J. C. Technology readiness levels. **White Paper, April**, v. 6, n. 1995, p. 1995, 1995.

MATEO, J. R. S. C. Weighted sum method and weighted product method. **Multi criteria analysis in the renewable energy industry**, p. 19-22, 2012.

MEEKS, D.; HOTTLE, T.; BILEC, M. M.; LANDIS, A. E. Compostable biopolymer use in the real world: Stakeholder interviews to better understand the motivations and realities of use and disposal in the US. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 134-142, 2015.

MENDOZA BELTRAN, A.; COX, B.; MUTEL, C.; VAN VUUREN, D. P.; FONT VIVANCO, D.; DEETMAN, S.; EDELENBOSCH, O. Y.; GUINÉE, J.; TUKKER, A. When the background matters: using scenarios from integrated assessment models in prospective life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 64-79, 2020.

MILÀ I CANALS, L.; AZAPAGIC, A.; DOKA, G.; JEFFERIES, D.; KING, H.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; ROCHES, A.; SIM, S.; STICHNOTHE, H.; THOMA, G.; WILLIAMS, A. Approaches for addressing life cycle assessment data gaps for bio-based products. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 5, p. 707-725, 2011.

MIRI, S.; SAINI, R.; DAVOODI, S. M.; PULICHARLA, R.; BRAR, S. K.; MAGDOULI, S. Biodegradation of microplastics: Better late than never. **Chemosphere**, p. 131670, 2021.

MONI, S. M.; MAHMUD, R.; HIGH, K.; CARBAJALES-DALE, M. Life cycle assessment of emerging technologies: A review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 52-63, 2020.

MOSTAFA, N. A.; FARAG, A. A.; ABO-DIEF, H. M.; TAYEB, A. M. Production of biodegradable plastic from agricultural wastes. **Arabian journal of chemistry**, v. 11, n. 4, p. 546-553, 2018.

NBR ISO-14040. (2009). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. ISO Standard 14040:2009.

NBR ISO-14044. (2009). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. ISO Standard 14044:2009.

NBR ISO-16290. (2015). Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. ISO Standard 16290:2015.

NEVORALOVÁ, Martina et al. Controlled biodegradability of functionalized thermoplastic starch based materials. **Polymer Degradation and Stability**, v. 170, p. 108995, 2019.

NGAN, S. C. Evidential Reasoning approach for multiple-criteria decision making: A simulation-based formulation. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 9, p. 4381-4396, 2015.

OLIVER-ORTEGA, H.; JULIAN, F.; ESPINACH, F. X.; TARRÉS, Q.; ARDANUY, M.; MUTJÉ, P. Research on the use of lignocellulosic fibers reinforced bio-polyamide 11 with composites for automotive parts: Car door handle case study. **Journal of cleaner production**, v. 226, p. 64-73, 2019.

PANG, M. M.; PUN, M. Y.; CHOW, W. S.; ISHAK, Z. A. M. Carbon footprint calculation for thermoformed starch-filled polypropylene biobased materials. **Journal of cleaner production**, v. 64, p. 602-608, 2014.

PARVATKER, A. G.; ECKELMAN, M. J. Comparative evaluation of chemical life cycle inventory generation methods and implications for life cycle assessment results. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 1, p. 350-367, 2018.

PETRILLO, A.; COLANGELO, F.; FARINA, I.; TRAVAGLIONI, M.; SALZANO, C.; CIOFFI, R. Multi-criteria analysis for Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of lightweight artificial aggregates from industrial waste by double-step cold bonding palletization. **Journal of Cleaner Production**, v. 351, p. 131395, 2022.

PICCINNO, F.; HISCHIER, R.; SEEGER, S.; SOM, C. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1085-1097, 2016.

REEB, C. W.; VENDITTI, R.; GONZALEZ, R.; KELLEY, S. Environmental LCA and financial analysis to evaluate the feasibility of bio-based sugar feedstock biomass supply globally: Part 2. Application of multi-criteria decision-making analysis as a method for biomass feedstock comparisons. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 6062-6084, 2016.

SAHA, D. K.; GHOSH, P. Almond Oil as Potential Biodegradable Lube Oil Additive: A Green Alternative. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 6, p. 2392-2400, 2018.

SANJUÁN, N.; STOESSEL, F.; HELLWEG, S. Closing data gaps for LCA of food products: estimating the energy demand of food processing. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 2, p. 1132-1140, 2014.

SANTOS, J. F. P.; MACARIO, K. D.; JOU, R. M.; OLIVEIRA, F. M.; CARDOSO, R. P.; DIAZ, M.; ANJOS, R. M.; ALVES, E. Q. Monitoring the biogenic fraction of sugarcane-based plastic bags. **Journal of cleaner production**, v. 233, p. 348-352, 2019.

SIKORSKA, W.; MUSIOL, M.; RYDZ, J.; ZIEBA, M.; RYCHTER, P.; LEWICKA, K.; SISKOVA, A.; MOSNACKOVA, K.; KOWALCZUK, M.; ADAMUS, G. Prediction studies of environment-friendly biodegradable polymeric packaging based on PLA. Influence of specimens' thickness on the hydrolytic degradation profile. **Waste Management**, v. 78, p. 938-947, 2018.

SILVA, A. K. P.; CARDOSO, A.; DE SÁ FILHO, E. B.; DE AZEREDO, H. M. C.; FREIRE, F.; CASIMIRO FILHO, F.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. Integrating life cycle assessment in early process development stage: The case of extracting starch from mango kernel. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128981, 2021.

SINTIM, H. Y.; BARY, A. I.; HAYES, D. G.; ENGLISH, M. E.; SCHAEFFER, S. M.; MILES, C. A.; ZELENYUK, A.; SUSKI, K.; FLURY, M. Release of micro-and nanoparticles from biodegradable plastic during in situ composting. **Science of The Total Environment**, v. 675, p. 686-693, 2019.

THAKUR, S.; CHAUDHARY, J.; SHARMA, B.; VERMA, A.; TAMULEVICIUS, S.; THAKUR, V. K. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. **Current opinion in Green and Sustainable chemistry**, v. 13, p. 68-75, 2018.

THOMASSEN, G.; VAN DAEL, M.; VAN PASSEL, S.; YOU, F. How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework. **Green Chemistry**, v. 21, n. 18, p. 4868-4886, 2019.

THONEMANN, N.; SCHULTE, A.; MAGA, D. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1192, 2020.

TRIANAPHYLLOU, E. **Multi-criteria decision making methods**. Springer US, 2000.

UBANDO, A. T., FELIX, C. B., CHEN, W. H. 2020. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. **Bioresource technology**, 299, 122585.

VAN DEN OEVER, M.; MOLENVELD, K.; VAN DER ZEE, M.; BOS, H. **Bio-based and biodegradable plastics: facts and figures: focus on food packaging in the Netherlands**. Wageningen Food & Biobased Research, 2017.

VAN DER GIESEN, C.; CUCURACHI, S.; GUINÉE, J.; KRAMER, G. J.; TUKKER, A. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120904, 2020.

VAN DER HULST, M. K.; HUIJBREGTS, M. A.; VAN LOON N.; THEELEN, M.; KOOTSTRA, L.; BERGESEN, J. D.; HAUCK, M. A systematic approach to assess the environmental impact of emerging technologies: A case study for the GHG footprint of CIGS solar photovoltaic laminate. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 6, p. 1234-1249, 2020.

VENKATACHALAM, V.; SPIERLING, S.; ENDRES, H. J.; SIEBERT-RATHS, A. Integrating life cycle assessment and eco-design strategies for a sustainable production of bio-based plastics. **Designing Sustainable Technologies, Products and Policies: From Science to Innovation**, p. 487-497, 2018.

VENKATACHALAM, V.; SPIERLING, S.; HORN, R.; ENDRES, H. J. LCA and eco-design: consequential and attributional approaches for bio-based plastics. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 579-584, 2018.

VERMA, A. K.; SINDHU, S. S.; SINGH, A.; KUMAR, A.; SINGH, A.; CHAUHAN, V. B. S. Conditioning effects of biodegradable superabsorbent polymer and vermi-products on media properties and growth of gerbera. **Ecological Engineering**, v. 132, p. 23-30, 2019.

VERT, M.; DOI, Y.; HELLWICH, K. H.; HESS, M.; HODGE, P.; KUBISA, P.; RINAUDO, M.; SCHUÉ, F. Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). **Pure and Applied Chemistry**, v. 84, n. 2, p. 377-410, 2012.

VINAYAGAMOORTHY, R.; VENKATAKOTESWARARAO, G. Synthesis and property analysis of green resin-based composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 33, n. 10, p. 1429-1445, 2020.

WU, H.; HU, H.; WAN, J.; LI, Y.; WU, Y.; TANG, Y.; XIAO, C.; XU, H.; YANG, X.; LI, Z. Hydroxyethyl starch stabilized polydopamine nanoparticles for cancer chemotherapy. **Chemical Engineering Journal**, v. 349, p. 129-145, 2018.

WUNDERLICH, J.; ARMSTRONG, K.; BUCHNER, G. A.; STYRING, P.; SCHOMÄCKER, R. Integration of techno-economic and life cycle assessment: Defining and applying integration types for chemical technology development. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125021, 2021.

ZHANG, X.; YOU, S.; TIAN, Y.; Li, J. Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality. **Scientia Horticulturae**, v. 249, p. 38-48, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MATERIAL SUPLEMENTAR DO ARTIGO 1

Tabela A1. Categorização dos estudos analisados por referência

Referência	Antimicrobiano	Antioxidante	Ambos	Nenhum	Referência	Antimicrobiano	Antioxidante	Ambos	Nenhum
Ahammed et al. (2021)	-	-	-	X	Ma et al. (2017)	-	-	-	
Alexandre et al. (2016)	-	X	-	-	Ma et al. (2019)	X	-	-	
Amalraj et al. (2020)	-	-	X	-	Manikandan et al. (2020)	-	-	-	
Azizun et al. (2020)	X	-	-	-	Maroufi et al. (2020)	-	-	X	
Balik et al. (2019)	-	-	-	X	Medina-Jaramillo et al. (2016)	-	X	-	
Bastante et al. (2021)	-	-	X	-	Medina-Jaramillo et al. (2017)	-	X	-	
Batra et al. (2020)	X	-	-	-	Menzel (2020)	-	X	-	
Bi et al. (2019)	-	-	X	-	Mirjalili and Ardekani (2017)	X	-	-	
Biddeci et al. (2016)	-	-	X	-	Montes-de-Oca-Ávalos et al. (2020)	-	-	-	
Cazón et al. (2018)	-	X	-	-	Moreirinha et al. (2020)	-	-	X	
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	-	-	X	-	Moreno et al. (2017)	X	-	-	
Da Silva et al. (2018)	-	X	-	-	Mousavi et al. (2021)	X	-	-	
De Melo Fiori et al. (2019)	-	-	-	X	Narasagoudr et al. (2020)	X	-	-	
De Oliveira Jr. et al. (2021)	-	-	X	-	Norcino et al. (2020)	X	-	-	
Dou et al. (2018)	-	X	-	-	Orsuwan et al. (2016)	-	-	X	
Dou et al. (2020)	-	-	-	X	Priyadarshi et al. (2021)	-	-	-	
Echeverría et al. (2016)	X	-	-	-	Qiu et al. (2020)	X	-	-	
El Fawal et al. (2020)	X	-	-	-	Radusin et al. (2019)	X	-	-	

El Miri et al. (2018)	-	-	-	X	Risyon et al. (2020)	-	-	-
Farhan and Hani (2017)	-	-	-	X	Rivera-Hernández et al. (2020)	X	-	-
Ghazanfari et al. (2016)	-	-	-	X	Roy and Rhim (2020a)	X	-	-
Giz et al. (2020)	-	-	-	X	Roy and Rhim (2020b)	X	-	-
González et al. (2019)	-	-	-	X	Saberi et al. (2017)	-	X	-
Gouveia et al. (2019)	-	-	-	X	Samsalee and Sothornvit (2019)	-	-	-
Gupta et al. (2020)	-	-	-	X	Sari et al. (2021)	-	-	-
Haghigui et al. (2019)	X	-	-	-	Satriaji et al. (2020)	X	-	-
Hajizadeh et al. (2020)	X	-	-	-	Sedayu et al. (2020)	-	-	-
Hajji et al. (2021)	-	-	X	-	Shen et al. (2021)	-	-	X
Halim et al. (2018)	X	-	-	-	Soni et al. (2016)	-	-	-
Hasan et al. (2020)	-	-	-	-	Sonseca et al. (2020)	X	-	-
He et al. (2019)	-	-	X	-	Su et al. (2020)	X	-	-
He et al. (2020)	-	X	-	-	Sun et al. (2019)	-	-	-
Hemalatha et al. (2017)	-	-	X	-	Suriyatem et al. (2018)	-	-	X
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	X	-	-	-	Susmitha et al. (2021)	-	-	X
Jamróz et al. (2018)	-	-	X	-	Tan et al. (2020)	-	X	-
Jamróz et al. (2020)	X	-	-	-	Thakur et al. (2016)	-	-	-
Jiang et al. (2016)	-	-	-	X	Tongdeesoontorn et al. (2021)	-	X	-
Jung et al. (2020)	-	-	-	X	Urbizo-Reyes et al. (2020)	-	-	-
Kashiri et al. (2016)	X	-	-	-	Wang et al. (2019)	X	-	-
Kumar et al. (2019)	-	-	-	X	Wang et al. (2019)	-	-	X
Lalnunthari et al. (2019)	-	-	-	X	Xu et al. (2019)	-	-	-
Lan et al. (2020)	-	-	X	-	Yadav et al. (2020)	-	-	X

Lee et al. (2019)	X	-	-	-	Ye et al. (2018)	X	-	-
Li et al. (2020)	X	-	-	-	Ye et al. (2019)	-	-	-
Li et al. (2020)	-	X	-	-	Yu et al. (2019)	X	-	-
Li et al. (2021)	X	-	-	-	Zareie et al. (2020)	-	-	X
Liu et al. (2017)	-	X	-	-	Zhang et al. (2018)	X	-	-
Liu et al. (2020)	-	-	-	X	Zhao et al. (2020)	X	-	-
Luchese et al. (2017)	-	-	-	X	Zheng et al. (2018)	-	-	X
Luo et al. (2019)	-	-	X	-	Zhu et al. (2017)	-	-	X

Tabela A2. Principais componentes e valores de tensão máxima nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	Resistência à tração (MPa)
Alexandre et al. (2016)	<i>Gelatin</i>	<i>Montmorillonite</i>	29.7 - 33.8
Amalraj et al. (2020)	<i>Polyvinyl acetate, Chitosan, Gum arabic</i>	<i>Black pepper essential oil, Ginger essential oil</i>	7.1 - 11.8
Azizun et al. (2020)	<i>Gelatin, Starch</i>	<i>Zinc oxide</i>	5.1 - 8.5
Batra et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Silica and chitosan nanoparticles</i>	4.6 - 46.4
Bi et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Proanthocyanidins</i>	27.4 - 35.2
Biddeci et al. (2016)	<i>Pectin</i>	<i>Halloysite nanotubes, Essential peppermint oil</i>	41.6 - 48.3
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibres</i>	4.1 - 12.1
Da Silva et al. (2018)	<i>Pectin</i>	-	15.0 - 54.0
De Melo Fiori et al. (2019)	<i>Carboxymethylcellulose</i>	<i>Sodium-based clay nanofillers</i>	10.7 - 37.2
Dou et al. (2018)	<i>Gelatin, Alginate</i>	<i>Tea polyphenols</i>	39.1 - 72.0
Dou et al. (2020)	<i>Keratin</i>	-	0.7 - 4.0
Echeverría et al. (2016)	<i>Soy protein isolate</i>	<i>Clove essential oil, Montmorillonite</i>	2.5 - 11.7
El Fawal et al. (2020)	<i>Hydroxyethylcellulose</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	8.0 - 10.0
El Miri et al. (2018)	<i>Alginate</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	29.0 - 54.0
Farhan and Hani (2017)	<i>K-carrageenan</i>	-	40.3 - 48.7
Ghazanfari et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofiber</i>	0.5 - 1.6
Giz et al. (2020)	<i>Alginate</i>	-	80.0 - 180.0
González et al. (2019)	<i>Soy protein, Galactomannan</i>	-	1.9 - 7.8
Gouveia et al. (2019)	<i>Pectin</i>	-	2.9 - 18.4
Gupta et al. (2020)	<i>Carboxymethylcellulose</i>	-	12.7 - 16.0
Haguini et al. (2019)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Plant essential oils</i>	29.6 - 47.7
Hajizadeh et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Titanium and silica nanoparticles</i>	3.3 - 8.9
Hajji et al. (2021)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	25.0
Hasan et al. (2020)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Extra virgin olive oil</i>	0.8 - 2.6
He et al. (2019)	<i>Polyvinyl alcohol</i>	<i>Pomegranate peel extract, Sodium dehydroacetate</i>	2.4 - 10.4
He et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	13.4 - 16.8
Hemalatha et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Basil oil</i>	30.0 - 39.0
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	<i>Carboxymethylated plantain flour, Polystyrene</i>	-	3.0 - 5.0
Jamróz et al. (2018)	<i>Starch, Furcellaran, Gelatin</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	59.4 - 70.2
Jamróz et al. (2020)	<i>Furcellaran nanocomposite</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	13.9 - 25.5
Jiang et al. (2016)	<i>Whey protein, Chitosan</i>	-	1.5 - 5.2
Jung et al. (2020)	<i>Polylactic acid</i>	<i>Cellulose nanofiber</i>	35.7 - 43.0
Kamari et al. (2018)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Tannic acid, Methylcellulose</i>	7.3 - 39.7
Kumar et al. (2019)	<i>Starch, Gelatin</i>	-	7.5 - 39
Lalnunthari et al. (2019)	<i>Pumpkin seeds and peels</i>	-	0.7 - 1.4

Lan et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	16.3 - 28.1
Lee et al. (2019)	<i>Pectin, Pullulan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	18.7 - 35.7
Li et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	60.0
Li et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Sodium carboxymethylcellulose</i>	11.1 - 15.5
Li et al. (2021)	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	<i>Mucilage, Zinc nanoparticles</i>	4.8 - 21.6
Liu et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Protocatechuic acid</i>	26.7 - 49.6
Liu et al. (2020)	<i>Soybean polysaccharide, Gelatin</i>	-	2.6 - 6.1
Luchese et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Xanthan gum</i>	1.6 - 17.1
Luo et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Guava leaf extracts</i>	1.1 - 17.4
Ma et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	4.0 - 23.0
Ma et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Carboxymethylcellulose, Collagen</i>	12.6 - 21.8
Ma et al. (2019)	<i>Alginate, Collagen</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	12.6 - 21.8
Manikandan et al. (2020)	<i>Polyhydroxybutyrate</i>	<i>Graphene nanoplatelets</i>	4.5 - 12.2
Maroufi et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	-	3.8 - 78.9
Menzel (2020)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibers</i>	2.2 - 7.5
Mirjalili and Ardekani (2017)	<i>Starch</i>	<i>Carboxymethylcellulose, Zinc nanoparticles</i>	2.7 - 9.8
Montes-de-Oca-Ávalos et al. (2020)	<i>Corn oil, Whey protein</i>	<i>Titanium nanoparticles</i>	0.5 - 1.1
Moreirinha et al. (2020)	<i>Nanocellulose</i>	<i>Grain arabinoxylans</i>	10.1 - 116.8
Moreno et al. (2017)	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Ethyl lauroyl arginate</i>	24.0 - 46.0
Narasagoudr et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Rutin, Polyvinyl alcohol</i>	16.0 - 55.0
Norcino et al. (2020)	<i>Pectin</i>	<i>Copaiba oil</i>	12.4 - 41.8
Orsuwan et al. (2016)	<i>Agar, Banana powder</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	16.5 - 41.2
Priyadarshi et al. (2021)	<i>Pectin, Pullulan</i>	-	19.1 - 23.4
Qiu et al. (2020)	<i>Sodium caseinate</i>	<i>Lysozyme</i>	7.3 - 27.3
Radusin et al. (2019)	<i>Polylactic acid</i>	<i>Allium ursinum L.</i>	2.7 - 4.8
Risyon et al. (2020)	<i>Polylactic acid</i>	<i>Halloysite nanotubes</i>	15.0 - 35.0
Rivera-Hernández et al. (2020)	<i>Pectin, Gellan</i>	-	8.8 - 27.0
Roy and Rhim (2020a)	<i>Alginate</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	37.5 - 47.6
Roy and Rhim (2020b)	<i>Pullulan, Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles, D-limonene</i>	54.0 - 70.5
Samsalee and Sothornvit (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Porcine plasma protein</i>	0.6 - 4.7
Sari et al. (2021)	<i>Carrageenan</i>	<i>Sweet sorghum</i>	0.6 - 6.0
Satriaji et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Zinc oxide nanoparticles</i>	25.0 - 42.0
Sedayu et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Nanocellulose fibrils</i>	37.0 - 44.0
Shen et al. (2021)	<i>Pullulan, Gelatin</i>	-	2.2 - 6.3
Soni et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofibers</i>	11.0 - 19.0
Sonseca et al. (2020)	<i>Polylactic acid, Chitosan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	14.0 - 23.0
Su et al. (2020)	<i>Ethyl cellulose, Capsaicin</i>	<i>Castor oil</i>	2.3 - 5.4

Sun et al. (2019)	<i>Chitosan, Konjac glucomannan</i>	<i>TEMPO-ChNCs</i>	22.1 - 35.1
Suriyatem et al. (2018)	<i>Starch, Chitosan</i>	<i>Propolis extract</i>	17.0 - 19.0
Susmitha et al. (2021)	<i>Mango (puree and peel), Pineapple pomace</i>	<i>Starch, Gelatin</i>	0.3 - 0.6
Tan et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Methylcellulose</i>	14.0 - 55.0
Thakur et al. (2016)	<i>Starch, Carrageenan</i>	-	31.6 - 116.5
Tongdeesoontorn et al. (2021)	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Quercetin, tertiary butylhydroquinone</i>	3.0 - 11.0
Urbizo-Reyes et al. (2020)	<i>Mucilage (chia seed)</i>	-	0.4 - 3.2
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan, Alginate</i>	<i>Carboxymethyl, Zinc nanoparticles</i>	16.2 - 24.4
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Gallic acid, Caffeic acid</i>	11.0 - 13.0
Xu et al. (2019)	<i>Hemicelluloses, Chitosan</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	16.2 - 69.2
Yadav et al. (2020)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Quercetin, Starch</i>	10.5 - 17.1
Ye et al. (2018)	<i>Alginate</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	7.5 - 27.3
Ye et al. (2019)	<i>Soy protein</i>	-	1.9 - 2.6
Yu et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>ϵ-polylysine</i>	13.0 - 78.0
Zareie et al. (2020)	<i>Soy protein, Chitosan</i>	-	0.02 - 0.9
Zhang et al. (2018)	<i>Alginate, Pullulan</i>	<i>Capsaicin</i>	46.3 - 55.2
Zhao et al. (2020)	<i>Gelatin, Chitosan</i>	<i>Capsaicin</i>	41.1 - 46.1
Zheng et al. (2018)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Litsea cubeba oil</i>	26.4 - 33.5
Zhu et al. (2017)	<i>Gelatin</i>	<i>Lysozyme</i>	4.2 - 4.8

Tabela A3. Principais componentes e valores de permeabilidade ao vapor de água nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	WVP (kg/m s Pa)
Alexandre et al. (2016)	<i>Gelatin</i>	<i>Montmorillonite</i>	$(7.5 - 8.3) \times 10^{-14}$
Balik et al. (2019)	<i>Pectin</i>	<i>Polyethylene oxide 2000</i>	$(1.7 - 5.0) \times 10^{-10}$
Batra et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Silica and chitosan nanoparticles</i>	$(0.3 - 3.0) \times 10^{-13}$
Bi et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Proanthocyanidins</i>	$(1.7 - 2.2) \times 10^{-14}$
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibres</i>	$(3.0 - 4.3) \times 10^{-12}$
Da Silva et al. (2018)	<i>Pectin</i>	-	$(0.8 - 1.6) \times 10^{-13}$
De Melo Fiori et al. (2019)	<i>Carboxymethylcellulose</i>	<i>Sodium-based clay nanofillers</i>	$(0.5 - 2.1) \times 10^{-13}$
Dou et al. (2018)	<i>Gelatin, Alginate</i>	<i>Tea polyphenols</i>	$(3.8 - 6.3) \times 10^{-14}$
Dou et al. (2020)	<i>Keratin</i>	-	$(3.3 - 5.0) \times 10^{-13}$
Echeverría et al. (2016)	<i>Soy protein isolate</i>	<i>Clove essential oil, Montmorillonite</i>	$(2.9 - 6.7) \times 10^{-14}$
Farhan and Hani (2017)	<i>K-carrageenan</i>	-	$(0.9 - 1.2) \times 10^{-13}$
Ghazanfari et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofiber</i>	$(1.0 - 2.4) \times 10^{-11}$
Giz et al. (2020)	<i>Alginate</i>	-	$(3.2 - 5.8) \times 10^{-13}$
González et al. (2019)	<i>Soy protein, Galactomannan</i>	-	$(1.2 - 1.6) \times 10^{-13}$
Gouveia et al. (2019)	<i>Pectin</i>	-	$(1.4 - 2.7) \times 10^{-12}$
Haghighi et al. (2019)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Plant essential oils</i>	$(0.9 - 1.5) \times 10^{-14}$
Hajizadeh et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Titanium and silica nanoparticles</i>	$(1.8 - 2.8) \times 10^{-13}$
Hasan et al. (2020)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Extra virgin olive oil</i>	$(3.6 - 4.5) \times 10^{-12}$
He et al. (2019)	<i>Polyvinyl alcohol</i>	<i>Pomegranate peel extract, Sodium dehydroacetate</i>	$(3.7 - 4.7) \times 10^{-14}$
He et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	$(1.8 - 2.7) \times 10^{-13}$
Hemalatha et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Basil oil</i>	$(1.5 - 3.0) \times 10^{-14}$
Jiang et al. (2016)	<i>Whey protein, Chitosan</i>	-	$(2.2 - 3.3) \times 10^{-12}$
KamariI et al. (2018)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Tannic acid, Methylcellulose</i>	$(0.9 - 1.9) \times 10^{-13}$
Kashiri et al. (2016)	<i>Zein</i>	<i>Ethyl-Nα-dodecanoyl-L-arginate hydrochloride</i>	$(3.7 - 5.5) \times 10^{-14}$
Lalnunthari et al. (2019)	<i>Pumpkin seeds and peels</i>	-	$(2.2 - 2.7) \times 10^{-12}$
Lan et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	$(0.8 - 2.3) \times 10^{-14}$
Lee et al. (2019)	<i>Pectin, Pullulan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	$(1.5 - 4.1) \times 10^{-12}$
Li et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Sodium carboxymethylcellulose</i>	$(1.1 - 1.7) \times 10^{-13}$
Li et al. (2021)	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	<i>Mucilage, Zinc nanoparticles</i>	$(2.9 - 4.9) \times 10^{-13}$
Liu et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Protocatechuic acid</i>	$(7.1 - 12.7) \times 10^{-14}$
Liu et al. (2020)	<i>Soybean polysaccharide, Gelatin</i>	-	$(5.5 - 7.0) \times 10^{-13}$
Luchese et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Xanthan gum</i>	$(0.1 - 1.2) \times 10^{-13}$
Luo et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Guava leaf extracts</i>	$(0.5 - 1.8) \times 10^{-12}$
Ma et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Carboxymethylcellulose, Collagen</i>	$(1.5 - 3.2) \times 10^{-14}$
Manikandan et al. (2020)	<i>Polyhydroxybutyrate</i>	<i>Graphene nanoplatelets</i>	$(0.5 - 1.3) \times 10^{-15}$

Maroufi et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	-	$(1.4 - 3.6) \times 10^{-16}$
Medina-Jaramillo et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Green tea, Basil</i>	$(3.4 - 5.2) \times 10^{-13}$
Menzel (2020)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibers</i>	$(2.6 - 3.3) \times 10^{-12}$
Mirjalili et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Carboxymethylcellulose, Zinc nanoparticles</i>	$(4.5 - 5.3) \times 10^{-14}$
Montes-de-Oca-Ávalos et al. (2020)	<i>Corn oil, Whey protein</i>	<i>Titanium nanoparticles</i>	$(0.5 - 2.9) \times 10^{-13}$
Mousavi et al. (2021)	<i>Starch, Alginate</i>	<i>Carbon nitride nanoparticles with copper</i>	$(3.0 \pm 0.1) \times 10^{-13}$
Narasagoudr et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Rutin, Polyvinyl alcohol</i>	$(6.1 - 9.8) \times 10^{-13}$
Norcino et al. (2020)	<i>Pectin</i>	<i>Copaiba oil</i>	$(4.2 - 7.8) \times 10^{-13}$
Orsuwan et al. (2016)	<i>Agar, Banana powder</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	$(0.9 - 2.0) \times 10^{-14}$
Priyadarshi et al. (2021)	<i>Pectin, Pullulan</i>	-	$(1.2 - 1.5) \times 10^{-12}$
Qiu et al. (2020)	<i>Sodium caseinate</i>	<i>Lysozyme</i>	$(1.1 - 1.3) \times 10^{-13}$
Radusin et al. (2019)	<i>Polylactic acid</i>	<i>Allium ursinum L.</i>	$(6.9 - 9.2) \times 10^{-14}$
Risyon et al. (2020)	<i>Polylactic acid</i>	<i>Halloysite nanotubes</i>	$(1.4 - 1.7) \times 10^{-13}$
Rivera-Hernández et al. (2020)	<i>Pectin, Gellan</i>	-	$(1.4 - 1.6) \times 10^{-13}$
Roy and Rhim (2020a)	<i>Alginate</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	$(1.2 - 1.5) \times 10^{-12}$
Roy and Rhim (2020b)	<i>Pullulan, Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles, D-limonene</i>	$(0.9 - 1.1) \times 10^{-12}$
Saberi et al. (2017)	<i>Starch, Guar gum</i>	<i>Blueberry, Macadamia and Banana extract</i>	$(7.0 - 16.5) \times 10^{-13}$
Samsalee and Sothornvit (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Porcine plasma protein</i>	$(3.8 - 7.5) \times 10^{-13}$
Sedayu et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Nanocellulose fibrils</i>	$(2.2 - 4.7) \times 10^{-13}$
Shen et al. (2021)	<i>Pullulan, Gelatin</i>	-	$(1.1 - 8.0) \times 10^{-10}$
Soni et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofibers</i>	$(2.6 - 3.3) \times 10^{-14}$
Sun et al. (2019)	<i>Chitosan, Konjac glucomannan</i>	<i>TEMPO-ChNCs</i>	$(5.2 - 8.7) \times 10^{-14}$
Tan et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Methylcellulose</i>	$(2.8 - 3.3) \times 10^{-13}$
Thakur et al. (2016)	<i>Starch, Carrageenan</i>	-	$(3.5 - 4.5) \times 10^{-14}$
Urbizo-Reye et al. (2020)	<i>Mucilage (chia seed)</i>	-	$(1.3 - 2.3) \times 10^{-12}$
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan, Alginate</i>	<i>Carboxymethyl, Zinc nanoparticles</i>	$(0.6 - 1.4) \times 10^{-13}$
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Gallic acid, Caffeic acid</i>	$(1.9 - 2.9) \times 10^{-13}$
Xu et al. (2019)	<i>Hemicelluloses, Chitosan</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	$(0.8 - 3.6) \times 10^{-13}$
Yadav et al. (2020)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Quercetin, Starch</i>	$(7.6 - 10.1) \times 10^{-11}$
Ye et al. (2018)	<i>Alginate</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	$(6.1 - 10.2) \times 10^{-14}$
Ye et al. (2019)	<i>Soy protein</i>	-	$(0.6 - 1.2) \times 10^{-13}$
Yu et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>ϵ-polylysine</i>	$(0.9 - 2.2) \times 10^{-13}$
Zareie et al. (2020)	<i>Soy protein, Chitosan</i>	-	$(3.3 - 4.7) \times 10^{-13}$
Zhang et al. (2018)	<i>Alginate, Pullulan</i>	<i>Capsaicin</i>	$(3.3 - 8.5) \times 10^{-13}$
Zhao et al. (2020)	<i>Gelatin, Chitosan</i>	<i>Capsaicin</i>	$(1.2 - 1.8) \times 10^{-13}$
Zheng et al. (2018)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Litsea cubeba oil</i>	$(1.4 - 1.6) \times 10^{-14}$

Tabela A4. Componentes e valores de ângulo de contato (em água) nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	Ângulo de contato
Alexandre et al. (2016)	<i>Gelatin</i>	<i>Montmorillonite</i>	81° - 126°
Batra et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Silica and chitosan nanoparticles</i>	31° - 96°
Biddeci et al. (2016)	<i>Pectin</i>	<i>Halloysite nanotubes, Essential peppermint oil</i>	76° - 82°
Dou et al. (2018)	<i>Gelatin, Alginate</i>	<i>Tea polyphenols</i>	87° - 115°
González et al. (2019)	<i>Soy protein, Galactomannan</i>	-	44° - 73°
Hajji et al. (2021)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	100°
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	<i>Carboxymethylated plantain flour, Polystyrene</i>	-	65° - 72°
Lalnunthari et al. (2019)	<i>Pumpkin seeds and peels</i>	-	42° - 44°
Lan et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	25° - 60°
Lee et al. (2019)	<i>Pectin, Pullulan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	52° - 71°
Manikandan et al. (2020)	<i>Polyhydroxybutyrate</i>	<i>Graphene nanoplatelets</i>	62° - 75°
Medina-Jaramillo et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Green tea, Basil oil</i>	63° - 68°
Narasagoudr et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Rutin, Polyvinyl alcohol</i>	50° - 70°
Norcino et al. (2020)	<i>Pectin</i>	<i>Copaiba oil</i>	48° - 64°
Orsuwan et al. (2016)	<i>Agar, Banana oylh</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	44° - 52°
Sedayu et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Nanocellulose fibrils</i>	40° - 90°
Urbizo-Reyes et al. (2020)	<i>Mucilage (chia seed)</i>	-	23° - 48°
Xu et al. (2019)	<i>Hemicellulose, Chitosan</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	83° - 101°
Ye et al. (2019)	<i>Soy protein</i>	-	46° - 107°
Yu et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>ε-polylysine</i>	32° - 45°
Zhang et al. (2018)	<i>Alginate, Pullulan</i>	<i>Capsaicin</i>	46° - 80°
Zhao et al. (2020)	<i>Gelatin, Chitosan</i>	<i>Capsaicin</i>	16° - 65°
Zheng et al. (2018)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Litsea cubeba oil</i>	74° - 94°

Tabela A5. Componentes e valores de solubilidade (em água) nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	Solubilidade (%)
Ahammed et al. (2021)	<i>Gelatin, Zein</i>	-	2.0
Alexandre et al. (2016)	<i>Gelatin</i>	<i>Montmorillonite</i>	37.0 – 42.0
Amalraj et al. (2020)	<i>Polyvinyl acetate, Chitosan, Gum arabic</i>	<i>Black pepper and ginger essential oil</i>	29.4 – 48.0
Bi et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Proanthocyanidins</i>	16.9 – 19.3
Biddeci et al. (2016)	<i>Pectin</i>	<i>Halloysite nanotubes, Essential peppermint oil</i>	42.7 – 45.2
De Oliveira Jr. Et al. (2021)	<i>Chitosan, Pectin</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	99.9
Dou et al. (2020)	<i>Keratin</i>	-	42.2 – 59.2
Echeverría et al. (2016)	<i>Soy protein isolate</i>	<i>Clove essential oil, Montmorillonite</i>	38.1 – 43.3
Farhan and Hani (2017)	<i>K-carrageenan</i>	-	42.6 – 49.5
Ghazanfari et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofiber</i>	11.6 – 17.4
Gupta et al. (2020)	<i>Carboxymethylcellulose</i>	-	28.1 – 39.6
Haghighi et al. (2019)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Plant essential oils</i>	23.6 – 31.7
Hajizadeh et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Titanium and silica nanoparticles</i>	24.0 – 32.0
Hemalatha et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Basil oil</i>	10.3 – 16.5
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	<i>Carboxymethylated plantain flour, Polystyrene</i>	-	14.0 – 23.0
Jamróz et al. (2018)	<i>Starch, Furcellaran, Gelatin</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	42.7 – 45.2
Jamróz et al. (2020)	<i>Furcellaran nanocomposite</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	24.7 – 84.9
Jiang et al. (2016)	<i>Whey protein, Chitosan</i>	-	31.0 – 38.0
Kashiri et al. (2016)	<i>Zein</i>	<i>Ethyl-Na-dodecanoyl-L-arginate hydrochloride (LAE)</i>	12.8 – 22.6
Kumar et al. (2019)	<i>Starch, Gelatin</i>	-	26.0 – 60.0
Liu et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Protocatechuic acid</i>	19.2 – 31.4
Liu et al. (2020)	<i>Soybean polysaccharide, Gelatin</i>	-	31.5 – 100
Luchese et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Xanthan gum</i>	12.0 – 24.0
Luo et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Guava leaf extracts</i>	76.3 – 94.0
Ma et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	37.5 – 66.0
Medina-Jaramillo et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Green tea, Basil oil</i>	28.0 – 30.0
Narasagoudr et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Rutin, Polyvinyl alcohol</i>	30.0 – 50.0
Orsuwan et al. (2016)	<i>Agar, Banana olyh</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	12.9 – 18.5
Saberi et al. (2017)	<i>Starch, Guar gum</i>	<i>Blueberry, Macadamia and Banana extract</i>	12.0 – 24.0
Samsalee and Sothornvit (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Porcine plasma protein</i>	16.6 – 36.7
Satriaji et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Zinc oxide nanoparticles</i>	53.9 – 78.1
Sedayu et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Nanocellulose fibrils</i>	40.0 – 57.0
Soni et al. (2016)	<i>Chitosan</i>	<i>Cellulose nanofibers</i>	13.0 – 53.0
Susmitha et al. (2021)	<i>Mango (puree and peel), Pineapple pomace</i>	<i>Starch, Gelatin</i>	26.8 – 64.1
Tan et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Methylcellulose</i>	31.1 – 100

Thakur et al. (2016)	<i>Starch, Carrageenan</i>	-	43.3 – 63.2
Tongdeesoontorn et al. (2021)	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Quercetin, tertiary butylhydroquinone</i>	45.0 – 65.0
Urbizo-Reyes et al. (2020)	<i>Mucilage (chia seed)</i>	-	11.6 – 29.3
Xu et al. (2019)	<i>Hemicellulose, Chitosan</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	3.1 – 16.0
Yadav et al. (2020)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Quercetin, Starch</i>	41.2 – 58.1
Zareie et al. (2020)	<i>Soy protein, Chitosan</i>	-	38.8 – 83.3
Zhao et al. (2020)	<i>Gelatin, Chitosan</i>	<i>Capsaicin</i>	43.4 – 58.7

Tabela A6. Principais componentes e valores de temperatura nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	Agente antimicrobiano	Agente antioxidante	Temperatura (°C)
Ahammed et al. (2021)	<i>Gelatin, Zein</i>	-	-	-	84 - 91
Azizun et al. (2020)	<i>Gelatin, Starch</i>	<i>Zinc oxide</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-	48.1 - 51.2
Balik et al. (2019)	<i>Pectin</i>	<i>Polyethylene oxide 2000</i>	-	-	227 - 230
Bastante et al. (2021)	<i>Nanofibrillated cellulose</i>	<i>Mango leaf extract</i>	<i>Mango leaf extract</i>	<i>Mango leaf extract</i>	250
Biddeci et al. (2016)	<i>Pectin</i>	<i>Halloysite nanotubes, Essential peppermint oil</i>	<i>Essential peppermint oil</i>	<i>Essential peppermint oil</i>	248 - 249
Cazón et al. (2018)	<i>Cellulose</i>	-	-	-	180
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibres</i>	-	<i>Coffee and rice husks extracts</i>	237 - 263
Da Silva et al. (2018)	<i>Pectin</i>	-	-	<i>Hydrocolloid from chia seeds</i>	182 - 268
De Oliveira Jr. et al. (2021)	<i>Chitosan, Pectin</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	<i>Yellow mombin, Extracted pectin</i>	<i>Yellow mombin, Extracted pectin</i>	45 - 181
El Miri et al. (2018)	<i>Alginate</i>	<i>Cellulose nanocrystals</i>	-	-	210
Giz et al. (2020)	<i>Alginate</i>	-	-	-	200 - 230
Hajji et al. (2021)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	320
Hasan et al. (2020)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Extra virgin olive oil</i>	-	<i>Extra virgin olive oil</i>	238 - 352
Hemalatha et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Basil oil</i>	<i>Basil oil</i>	<i>Basil oil</i>	206
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	<i>Carboxymethylated plantain flour, Polystyrene</i>	-	<i>Acrylamide, Hydroxymethylfurfural and Furan contaminants</i>	-	303
Jamróz et al. (2018)	<i>Starch, Furcellaran, Gelatin</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	<i>Furcellaran</i>	127 - 139
Kamari et al. (2018)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Tannic acid, Methylcellulose</i>	<i>Tannic acid</i>	-	214 - 226
Lan et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	<i>Apple polyphenols</i>	200
Li et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	-	120 - 220
Li et al. (2021)	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	<i>Mucilage, Zinc nanoparticles</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-	275
Manikandan et al. (2020)	<i>Polyhydroxybutyrate</i>	<i>Graphene nanoplatelets</i>	-	-	279 - 289
Maroufi et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	-	<i>Green tea extract</i>	<i>Green tea extract</i>	120
Medina-Jaramillo et al. (2016)	<i>Starch</i>	<i>Yerba mate extract</i>	-	<i>Yerba mate extract</i>	180
Menzel (2020)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibers</i>	-	<i>Sunflower hulls phenolic</i>	271 - 276

				extract	
Montes-de-Oca-Ávalos et al. (2020)	Corn oil, Whey protein	Titanium nanoparticles	-	-	250 - 340
Moreirinha et al. (2020)	Nanocellulose	Grain arabinoxylans	Ferulic acid or feruloylated arabinoxyloligosaccharides	Ferulic acid or feruloylated arabinoxyloligosaccharides	209 - 244
Moreno et al. (2017)	Starch, Gelatin	Ethyl lauroyl arginate	Ethyl lauroyl arginate	-	100
Mousavi et al. (2021)	Starch, Alginate	Carbon nitride nanoparticles with copper	Carbon nitride nanoparticles with copper	-	230
Narasagoudr et al. (2020)	Chitosan	Rutin, Polyvinyl alcohol	Rutin induced Chitosan	-	238 - 352
Norcino et al. (2020)	Pectin	Copaiba oil	Copaiba oil	-	198 - 215
Priyadarshi et al. (2021)	Pectin, Pullulan	-	-	-	150 - 240
Risyon et al. (2020)	Polylactic acid	Halloysite nanotubes	-	-	320 - 330
Roy and Rhim (2020a)	Alginate	Copper sulfide nanoparticles	Copper sulfide nanoparticles	-	190 - 250
Roy and Rhim (2020b)	Pullulan, Carrageenan	Copper sulfide nanoparticles, D-limonene	Copper sulfide nanoparticles	-	159 - 160
Samsalee and Sothornvit (2019)	Chitosan	Porcine plasma protein	-	-	157 - 164
Sedayu et al. (2020)	Carrageenan	Nanocellulose fibrils	-	-	170 - 225
Shen et al. (2021)	Pullulan, Gelatin	-	Clove essential oil	Clove essential oil	200 - 300
Soni et al. (2016)	Chitosan	Cellulose nanofibers	-	-	240 - 250
Sonseca et al. (2020)	Polylactic acid, Chitosan	Silver nanoparticles	Chitosan mediated silver nanoparticles	-	203 - 227
Su et al. (2020)	Ethyl cellulose, Capsaicin	Castor oil	Capsaicin	-	160 - 180
Sun et al. (2019)	Chitosan, Konjac glucomannan	TEMPO-ChNCs	-	-	200
Suriyatem et al. (2018)	Starch, Chitosan	Propolis extract	Propolis extract	Propolis extract	162 - 167
Susmitha et al. (2021)	Mango puree with peel, Pineapple pomace	Starch, Gelatin	Mango puree with peel, Pineapple pomace	Mango puree with peel, Pineapple pomace	200
Tan et al. (2020)	Chitosan	Methylcellulose	-	Chitosan ascorbate	100
Ye et al. (2019)	Soy protein	-	-	-	135 - 149
Yu et al. (2019)	Chitosan	ϵ -polylysine	Chitosan/ ϵ -polylysine	-	280
Zhu et al. (2017)	Gelatin	Lysozyme	Oligomeric proanthocyanidins	Oligomeric proanthocyanidins	120

Tabela A7. Agentes antimicrobianos e antioxidantes utilizados nos filmes

Referência	Matriz	Reforço	Agente antimicrobiano	Agente antioxidante
Alexandre et al. (2016)	<i>Gelatin</i>	<i>Montmorillonite</i>	-	<i>Ginger essential oil</i>
Amalraj et al. (2020)	<i>Polyvinyl acetate, Chitosan, Gum arabic</i>	<i>Black pepper and ginger essential oil</i>	<i>Black pepper and ginger essential oil</i>	<i>Black pepper and ginger essential oil</i>
Azizun et al. (2020)	<i>Gelatin, Starch</i>	<i>Zinc oxide nanoparticles</i>	<i>Zinc oxide nanoparticles</i>	-
Bastante et al. (2021)	<i>Nanofibrillated cellulose</i>	<i>Mango leaf extract</i>	<i>Mango leaf extract</i>	<i>Mango leaf extract</i>
Batra et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Silica and chitosan nanoparticles</i>	<i>chitosan nanoparticles</i>	-
Bi et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Proanthocyanidins</i>	<i>Proanthocyanidins</i>	<i>Proanthocyanidins</i>
Biddecki et al. (2016)	<i>Pectin</i>	<i>Halloysite nanotubes, Essential peppermint oil</i>	<i>Essential peppermint oil</i>	<i>Essential peppermint oil</i>
Collazo-Bigliardi et al. (2019)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibres</i>	-	<i>Coffee and rice husks extracts</i>
Da Silva et al. (2018)	<i>Pectin</i>	-	-	<i>Hydrocolloid from chia seeds</i>
De Oliveira Jr. et al. (2021)	<i>Chitosan, Pectin</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	<i>Yellow mombin, Extracted pectin</i>	<i>Yellow mombin, Extracted pectin</i>
Dou et al. (2018)	<i>Gelatin, Alginate</i>	<i>Tea polyphenols</i>	-	<i>Green tea polyphenols</i>
Echeverría et al. (2016)	<i>Soy protein isolate</i>	<i>Clove essential oil, Montmorillonite</i>	<i>Clove essential oil</i>	-
El Fawal et al. (2020)	<i>Hydroxyethylcellulose</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-
Haghighi et al. (2019)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Plant essential oils</i>	<i>Plant essential oils</i>	-
Hajizadeh et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Titanium and silica nanoparticles</i>	<i>Titanium and silica nanoparticles</i>	-
Hajji et al. (2021)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>	<i>Shrimp and crab protein hydrolysates</i>
Hasan et al. (2020)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Extra virgin olive oil</i>	-	<i>Extra virgin olive oil</i>
He et al. (2019)	<i>Polyvinyl alcohol</i>	<i>Pomegranate peel extract, Sodium dehydroacetate</i>	<i>Sodium dehydroacetate, Pomegranate peel extract</i>	<i>Pomegranate peel extract</i>
He et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	-	<i>Antioxidant of bamboo leaves</i>
Hemalatha et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Basil oil</i>	<i>Basil oil</i>	<i>Basil oil</i>
Herniou-Julien and Gutiérrez (2021)	<i>Carboxymethylated plantain flour, Polystyrene</i>	-	<i>Acrylamide, Hydroxymethylfurfural and Furan contaminants</i>	-
Jamróz et al. (2018)	<i>Starch, Furcellaran, Gelatin</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	<i>Tea tree essential oil</i>	<i>Furcellaran</i>
Jamróz et al. (2020)	<i>Furcellaran nanocomposite</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	-
Kamari et al. (2018)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Tannic acid, Methylcellulose</i>	<i>Tannic acid</i>	-
Kashiri et al. (2016)	<i>Zein</i>	<i>Ethyl-Na-dodecanoyl-L-arginate hydrochloride</i>	<i>Ethyl-Na-dodecanoyl-L-arginate hydrochloride</i>	-

Lan et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Silver nanoparticles, Apple polyphenols</i>	<i>Apple polyphenols, Silver nanoparticles</i>	<i>Apple polyphenols</i>
Lee et al. (2019)	<i>Pectin, Pullulan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	-
Li et al. (2020)	<i>Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	-
Li et al. (2020)	<i>Starch</i>	<i>Sodium carboxymethylcellulose, Lactic acid bacteria</i>	-	<i>Lactic acid bacteria with high exopolysaccharide yield</i>
Li et al. (2021)	<i>Carboxymethyl cellulose</i>	<i>Mucilage, Zinc nanoparticles</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-
Liu et al. (2017)	<i>Chitosan</i>	<i>Protocatechuic acid</i>	-	<i>Protocatechuic acid</i>
Luo et al. (2019)	<i>Alginate</i>	<i>Guava leaf extracts</i>	<i>Guava leaf extract</i>	<i>Guava leaf extract</i>
Ma et al. (2019)	<i>Alginate, Sodium carboxymethylcellulose, Collagen</i>	-	<i>Probiotic (Lactococcus lactis)</i>	-
Maroufi et al. (2020)	<i>Gelatin</i>	-	<i>Green tea extract</i>	<i>Green tea extract</i>
Medina-Jaramillo et al. (2016)	<i>Starch</i>	<i>Yerba mate extract</i>	-	<i>Yerba mate extract</i>
Medina-Jaramillo et al. (2017)	<i>Starch</i>	<i>Green tea, Basil oil</i>	-	<i>Green tea, Basil oil</i>
Menzel (2020)	<i>Starch</i>	<i>Cellulose fibers</i>	-	<i>Sunflower hulls phenolic extract</i>
Mirjalili and Ardekani (2017)	<i>Starch</i>	<i>Carboxymethylcellulose, Zinc nanoparticles</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-
Moreirinha et al. (2020)	<i>Nanocellulose</i>	<i>Grain arabinoxylans</i>	<i>Ferulic acid or feruloylated arabinoxyloligosaccharides</i>	<i>Ferulic acid or feruloylated arabinoxyloligosaccharides</i>
Moreno et al. (2017)	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Ethyl lauroyl arginate</i>	<i>Ethyl lauroyl arginate</i>	-
Mousavi et al. (2021)	<i>Starch, Alginate</i>	<i>Copper deposited graphitic carbon nitride</i>	<i>Copper deposited graphitic carbon nitride</i>	-
Narasagoudr et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Rutin, Polyvinyl alcohol</i>	<i>Rutin induced Chitosan</i>	-
Norcino et al. (2020)	<i>Pectin</i>	<i>Copaiba oil</i>	<i>Copaiba oil</i>	-
Orsuwan et al. (2016)	<i>Agar, Banana powder</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	<i>Banana powder</i>
Qiu et al. (2020)	<i>Sodium caseinate</i>	<i>Lysozyme</i>	<i>Lysozyme</i>	-
Radusin et al. (2019)	<i>Poly lactic acid</i>	<i>Allium ursinum L.</i>	<i>Allium ursinum L. extract</i>	-
Rivera-Hernández et al. (2020)	<i>Pectin, Gellan</i>	-	<i>Nisin (Nisaplin®)</i>	-
Roy and Rhim (2020a)	<i>Alginate</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	-
Roy and Rhim (2020b)	<i>Pullulan, Carrageenan</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles, D-limonene</i>	<i>Copper sulfide nanoparticles</i>	-
Saberi et al. (2017)	<i>Starch, Guar gum</i>	<i>Epigallocatechin gallate, Blueberry, Macadamia and Banana extract</i>	-	<i>Natural antioxidants</i>
Sari et al. (2021)	<i>Carrageenan</i>	<i>Sweet sorghum</i>	-	-

Satriaji et al. (2020)	<i>Alginate</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	<i>Zinc nanoparticles</i>	-
Shen et al. (2021)	<i>Pullulan, Gelatin</i>	-	<i>Clove essential oil</i>	<i>Clove essential oil</i>
Sonseca et al. (2020)	<i>Polylactic acid, Chitosan</i>	<i>Silver nanoparticles</i>	<i>Chitosan mediated silver nanoparticles</i>	-
Su et al. (2020)	<i>Ethyl cellulose, Capsaicin</i>	<i>Castor oil</i>	<i>Capsaicin</i>	-
Suriyatem et al. (2018)	<i>Starch, Chitosan</i>	<i>Propolis extract</i>	<i>Propolis extract</i>	<i>Propolis extract</i>
Susmitha et al. (2021)	<i>Mango (puree and peel), Pineapple pomace</i>	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Mango puree with peel, Pineapple pomace</i>	<i>Mango puree with peel, Pineapple pomace</i>
Tan et al. (2020)	<i>Chitosan</i>	<i>Methylcellulose</i>	-	<i>Chitosan ascorbate</i>
Tongdeesoontorn et al. (2021)	<i>Starch, Gelatin</i>	<i>Quercetin, butylhydroquinone</i>	<i>tertiary</i> -	<i>Cassava starch/gelatin composite films integrated with quercetin</i>
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan, Alginate</i>	<i>Carboxymethyl, nanoparticles</i>	<i>Zinc</i> <i>Zinc nanoparticles</i>	-
Wang et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>Gallic acid, Caffeic acid</i>	<i>Gallic acid, Caffeic acid</i>	<i>Gallic acid, Caffeic acid</i>
Yadav et al. (2020)	<i>Chitosan, Gelatin</i>	<i>Quercetin-starch</i>	<i>Quercetin-starch</i>	<i>Quercetin-starch</i>
Ye et al. (2018)	<i>Alginate</i>	<i>Carboxymethylcellulose</i>	<i>Probiotic (Lactococcus lactis)</i>	-
Yu et al. (2019)	<i>Chitosan</i>	<i>ε-polylysine</i>	<i>Chitosan/ε-polylysine</i>	-
Zareie et al. (2020)	<i>Soy protein, Chitosan</i>	-	<i>Gamma-aminobutyric acid (GABA)</i>	<i>Gamma-aminobutyric acid (GABA)</i>
Zhang et al. (2018)	<i>Alginate, Pullulan</i>	<i>Capsaicin</i>	<i>Capsaicin</i>	-
Zhao et al. (2020)	<i>Gelatin, Chitosan</i>	<i>Capsaicin</i>	<i>Capsaicin</i>	-
Zheng et al. (2018)	<i>Chitosan, Starch</i>	<i>Litsea cubeba oil</i>	<i>Litsea cubeba oil, D-limonene, Linalool</i>	<i>Hardleaf oatchestnut starch</i>
Zhu et al. (2017)	<i>Gelatin</i>	<i>Lysozyme</i>	<i>Oligomeric proanthocyanidins</i>	<i>Oligomeric proanthocyanidins</i>

Tabela A8. Resumo dos estudos de avaliação do ciclo de vida de filmes de biopolímero

Matriz	Aditivo	Fonte de biomassa	Produção de filmes	Propriedades ativas	Unidade funcional	Escopo	Fim-de-vida	TRL	Escala de produção	Referência
<i>Gluten</i>	<i>Glycerol</i>	<i>Wheat</i>	<i>Casting; extrusion</i>	-	<i>1 m² (0.15mm thick)</i>	CtG**; CtGr**	CP; IN	3-5	Lab	Deng et al. (2013)
<i>Chitosan</i>	<i>Glycerol, acetic acid</i>	<i>Crustacean shell</i>	<i>Casting</i>	<i>Antimicrobial</i>	<i>1 m² film</i>	CtGr	CP	3-5	Lab	Leceta et al. (2013, 2014)
<i>Agar</i>	<i>Glycerol</i>	<i>Algae</i>	<i>Casting</i>	-	<i>1 m² film</i>	CtGr	CP	3-5	Lab	Leceta et al. (2014)
<i>Soy protein</i>	<i>Glycerol</i>	<i>Soybean</i>	<i>Casting</i>	-	<i>1 m² film</i>	CtGr	CP	3-5	Lab	Leceta et al. (2014)
<i>Starch</i>	<i>Glycerol, clay</i>	<i>Cassava</i>	<i>Casting; extrusion</i>	-	<i>1 kg film</i>	CtG	-	3-5	Lab	De Léis et al. (2017)
<i>Starch</i>	<i>Glycerol, SNC**</i>	<i>Mango kernel</i>	<i>Casting; extrusion</i>	-	<i>1 kg film</i>	CtG	-	3-5	Escalonado	Müller Carneiro (2020)
<i>Chitosan</i>	<i>Glycerol, CNF**, citric acid</i>	<i>Crustacean shell</i>	<i>Casting</i>	<i>Antimicrobial</i>	<i>1 kg film</i>	CtG	-	3-5	Lab	Ponnusamy and Mani (2022)
<i>PLA/Bio-PE**</i>	-	<i>Corn</i>	<i>Extrusion</i>	-	<i>1 m² film</i>	CtG; CtGr	IN; LF; CP; AD	9	Industrial	Hermann et al. (2011)
<i>PLA</i>	-	<i>Corn</i>	<i>Extrusion</i>	-	<i>1 m² (0.15mm thick)</i>	CtG; CtGr	CP; IN	9	Industrial	Deng et al. (2013)
<i>Starch, pectin</i>	<i>Glycerol, Na-MMT</i>	<i>Orange peel; corn</i>	<i>Extrusion</i>	-	<i>1 m² film (0.015mm thick)</i>	CtG	-	3-5	Lab	Günkaya and Banar (2016)
<i>PLA</i>	<i>Ag NPs</i>	<i>Corn</i>	<i>Extrusion</i>	<i>Antimicrobial</i>	<i>1 kg packaging material</i>	CtGr	50%IN/ 50%LF	3-5*	Lab; piloto; escalonado	Zhang et al. (2017)
<i>PLA</i>	<i>TiO2 NPs</i>	<i>Corn</i>	<i>Extrusion</i>	<i>Antimicrobial</i>	<i>1 kg packaging material</i>	CtGr	50%IN/ 50%LF	3-5*	Lab; piloto; escalonado	Zhang et al. (2017)
<i>PLA</i>	<i>ATBC**, OMMT**</i>	<i>Corn</i>	<i>Extrusion</i>	-	<i>1 kg film</i>	CtGr	CP	3-5	Lab; escalonado	Petrucchi et al. (2018)
<i>PLA</i>	<i>Limonene, CNF</i>	<i>Corn; citrus waste; wood</i>	<i>Extrusion</i>	-	<i>1 kg film</i>	CtGr	CP	3-5	Lab; escalonado	Petrucchi et al. (2018)

		<i>fibres</i>								
PLA	-	Corn	Extrusion	-	40,000 films (dimensions: 300 × 250 mm x 0.06 mm)	CtGr	IN; LF	9	Industrial	Choi et al. (2018)
PLA, PBAT**	-	Corn	Extrusion	-		CtGr	IN; LF	9	Industrial	Choi et al. (2018)
PLA PHA/PLA	-	Corn; sugar beet	Extrusion	-	One croissant (packed in bag)	CtGr	50%IN/ 50%LF; 100%IN	6-8* / 9	Piloto; Industrial	Vea et al. (2021)
PHA/BVOH**	-	Sugar beet; sugarcane; soybean oil; corn; corn stover	Extrusion	-	1 kg of meat (2 trays including lidding film)	CtGr	LF; CP; IN; AD	9	Industrial	Hutchings et al. (2021)
PLA	ZnO NPs	Corn	Melt-blending (extrusion)	Antimicrobial	One serving (130 g) of lettuce (in bag)	CtGr	CP	3-5*	Lab; Industrial	Vigil et al. (2020)
Lignocellulosic nanofiber	CLPs	Bioethanol residues	Pressure- assisted filtration + ambient drying/hot pressing	Antioxidant	1 kg film	CtG	-	3-5	Lab	Rivière et al. (2021)
PLA	-	Corn; corn stover; sugar beet pulp	Extrusion	-	One film (350 mm × 250 mm × 0.05 mm)	GtG**	-	9	Industrial	Lokesh et al. (2020)
PLA	-	Corn	Extrusion + thermoforming	-	1,000 trays of meat incl. lidding film	CtGr	IN	9	Industrial	Firoozi Nejad et al. (2021)

*pelo menos um componente/processo com TRL baixo.

**Bio-PE: polietileno de base biológica; PBAT: tereftalato de adipato de polibutileno; BVOH: álcool vinílico butanodiol; SNC: nanocristais de amido; CNF: nanofibras de celulose; NPs: nanopartículas; ATBC: citrato de acetil tributil; OMMT: montmorilonita organomodificada; CLPs: partículas de lignina coloidal aniônica; CtG: *cradle-to-gate*; CtGr: *cradle-to-grave*; GtG: *gate-to-gate*; CP: compostagem; IN: incineração; AD: digestão anaeróbica; LF: aterro sanitário.

Tabela A9. Categorias de impacto e métodos considerados nos estudos revisados

Referência	Método	Midpoint																	Endpoint		
		CC	TEU	NREU	AD	POF/Pox	OD	Ac	Eu	WD	LU	HT*	EcT	PM	RE	SF	IR/Ra	HH	EQ	R	
Hermann et al. (2010)	CML 2 baseline 2000	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Deng et al. (2013)	ReCiPe Midpoint H	x	-	-	f, m	x	x	t	x	x	x	x	t, fw, m	x			x	-	-	-	
Leceta et al. (2013)	Eco-Indicator 99	x	-	-	f, m	-	x	x	x	-	x	c	x	-	-	-	x	x	x	x	
Leceta et al. (2014)	Eco-Indicator 99	x	-	-	f, m	-	x	x	x	-	x	c	x	-	-	-	x	x	x	x	
Günkaya and Banar (2016)	CML-IA	x	-	-	f, m	x	x	x	x	-	-	x	t, fw, m	-	-	-	-	-	-	-	
Zhang et al. (2017)	IPCC 2013 100y; CED	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Petrucci et al. (2018)	Eco-Indicator 99	x	-	-	f, m	-	x	x	x	-	x	c	x	-	i, o	-	x	x	x	x	
Choi et al. (2018)	IPCC 2013 100y	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
De Léis et al. (2017)	ReCiPe Midpoint H; CED	x	x	-	-	x	-	t	fw	-	x	-	t	-	-	-	-	-	-	-	
Vea et al. (2021)	ReCiPe Midpoint H; ILCD (2011)	x	-	-	f, m	x	x	t	fw, m	x	x	c, nc	t, fw, m	x	-	-	x	-	-	-	

Lokesh et al. (2020)	IPCC 2013 100y; UNEP; Accumulated exceedance model; ReCiPe Midpoint H; USEtox; CML 2002; AWARE	x	-	-	f	-	-	-	fw	x	-	c	-	x	-	-	-	-	-	-
Vigil et al. (2020)	ReCiPe midpoint H	x	-	-	f, m	x	x	t	fw, m, t	x	x	-	t, fw, m	x	-	-	x	-	-	-
Riviere et al. (2021)	IPCC 2013 100y	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Firoozi et al. (2021)	N/S	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hutchings et al. (2021)	N/S	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Müller Carneiro et al. (2022)	IPCC 2013 100y; CED; ReCiPe Midpoint H	x	-	x	-	-	-	t	fw	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ponnusamy & Mani (2022)	TRACI 2.1	x	-	-	f	-	-	x	x	-	-	c, nc	x	-	x	x	-	-	-	-

N/S: *not specified*; CC: *climate change*; AD: *abiotic depletion* (m - *metals*, f - *fossil*); TEU: *total energy use*; NREU: *non-renewable energy use*; POF: *photo-oxidant formation*; Pox: *photochemical oxidation*; OD: *ozone depletion*; Ac: *acidification* (t – *terrestrial*); Eu: *eutrophication* (t – *terrestrial*, m – *marine*, fw – *freshwater*); WD: *water depletion*; LU: *land use*; HT: *human toxicity* (c – *carcinogenic*, nc – *non carcinogenic*); EcT: *ecotoxicity* (t – *terrestrial*, m – *marine*, fw – *freshwater*); RE: *respiratory effects* (o – *organics*, i – *inorganics*); PM: *particulate matter*; SF: *smog formation*; IR: *ionizing radiation*; Ra: *radiation*; HH: *human health*; EQ: *ecosystems quality*; R: *resources*.

Referências

- Ahammed, S., Liu, F., Wu, J., Khin, M. N., Yokoyama, W. H., Zhong, F. 2021. Effect of transglutaminase crosslinking on solubility property and mechanical strength of gelatin-zein composite films. *Food Hydrocolloids*, 116, 106649. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106649>.
- Akinalan Balik, B., Argin, S., Lagaron, J. M., Torres-Giner, S. 2019. Preparation and characterization of electrospun pectin-based films and their application in sustainable aroma barrier multilayer packaging. *Applied Sciences*, 9(23), 5136. <https://doi.org/10.3390/app9235136>.
- Alexandre, E. M. C., Lourenço, R. V., Bittante, A. M. Q. B., Moraes, I. C. F., do Amaral Sobral, P. J. 2016. Gelatin-based films reinforced with montmorillonite and activated with nanoemulsion of ginger essential oil for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.10.004>.
- Amalraj, A., Raj, K. K., Haponiuk, J. T., Thomas, S., Gopi, S. 2020. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of chitosan/gum arabic/polyethylene glycol composite films incorporated with black pepper essential oil and ginger essential oil as potential packaging and wound dressing materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3(4), 485-497. <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00178-w>.
- Azizun, N. N., Khairul, W. M., Daud, A. I., Sarbon, N. M. 2021. Effect of pH on functional, gas sensing and antimicrobial properties of bio-nanocomposite gelatin film for food packaging application. *Journal of Food Science and Technology*, 58(9), 3338-3345. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04893-6>.
- Bastante, C. C., Silva, N. H., Cardoso, L. C., Serrano, C. M., de la Ossa, E. J. M., Freire, C. S., Vilela, C. 2021. Biobased films of nanocellulose and mango leaf extract for active food packaging: Supercritical impregnation versus solvent casting. *Food Hydrocolloids*, 117, 106709. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106709>.
- Batra, M., Malik, G. K., Mitra, J. 2020. Enhancing the properties of gelatin–chitosan bionanocomposite films by incorporation of silica nanoparticles. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13329. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13329>.
- Bi, F., Zhang, X., Bai, R., Liu, Y., Liu, J., Liu, J. 2019. Preparation and characterization of antioxidant and antimicrobial packaging films based on chitosan and proanthocyanidins. *International journal of biological macromolecules*, 134, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.042>.
- Biddeci, G., Cavallaro, G., Di Blasi, F., Lazzara, G., Massaro, M., Milioto, S., Spinelli, G. 2016. Halloysite nanotubes loaded with peppermint essential oil as filler for functional biopolymer film. *Carbohydrate polymers*, 152, 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.041>

- Cazón, P., Velázquez, G., Vázquez, M. 2019. Characterization of bacterial cellulose films combined with chitosan and polyvinyl alcohol: Evaluation of mechanical and barrier properties. *Carbohydrate polymers*, 216, 72-85.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.093>.
- Choi, B., Yoo, S., Park, S. I. 2018. Carbon footprint of packaging films made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT blends in South Korea. *Sustainability*, 10(7), 2369.
<https://doi.org/10.3390/su10072369>.
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., Chiralt, A. 2019. Improving properties of thermoplastic starch films by incorporating active extracts and cellulose fibres isolated from rice or coffee husk. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100383.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100383>.
- Da Silva, A. K. P., Cardoso, A., de Sa Filho, E. B., de Azeredo, H. M. C., Freire, F., Casimiro Filho, F., de Figueirêdo, M. C. B. 2021. Integrating life cycle assessment in early process development stage: The case of extracting starch from mango kernel. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128981.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128981>.
- Da Silva, I. S. V., de Sousa, R. M. F., de Oliveira, A., de Oliveira, W. J., Motta, L. A. C., Pasquini, D., Otaguro, H. 2018. Polymeric blends of hydrocolloid from chia seeds/apple pectin with potential antioxidant for food packaging applications. *Carbohydrate polymers*, 202, 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.061>.
- De Araújo e Silva, R., Santa Brígida, A. I., de Freitas Rosa, M., da Silva Neto, R. M., Spinosa, W. A., de Sa Filho, E. B., de Figueirêdo, M. C. B. 2020. An approach for implementing ecodesign at early research stage: a case study of bacterial cellulose production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122245.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122245>.
- De Léis, C. M., Nogueira, A. R., Kulay, L., Tadini, C. C. 2017. Environmental and energy analysis of biopolymer film based on cassava starch in Brazil. *Journal of cleaner production*, 143, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.147>.
- De Melo Fiori, A. P. S., Camani, P. H., dos Santos Rosa, D., Carastan, D. J. 2019. Combined effects of clay minerals and polyethylene glycol in the mechanical and water barrier properties of carboxymethylcellulose films. *Industrial Crops and Products*, 140, 111644.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111644>.
- De Oliveira Júnior, S. D., de Araújo, J. S., de Asevedo, E. A., de Medeiros, F. G. M., dos Santos, V. S., de Sousa Júnior, F. C., dos Santos, E. S. 2021. Exploiting films based on pectin extracted from yellow mombin (*Spondias mombin* L.) peel for active food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01321-3>.

- Deng, Y., Achten, W. M., Van Acker, K., Duflou, J. R. 2013. Life cycle assessment of wheat gluten powder and derived packaging film. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(4), 429-458. <https://doi.org/10.1002/bbb.1406>.
- Dou, L., Li, B., Zhang, K., Chu, X., Hou, H. 2018. Physical properties and antioxidant activity of gelatin-sodium alginate edible films with tea polyphenols. *International journal of biological macromolecules*, 118, 1377-1383. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.121>.
- Dou, Y., Zhang, L., Zhang, B., He, M., Shi, W., Yang, S., Cui, Y., Yin, G. 2020. Preparation and characterization of edible dialdehyde carboxymethyl cellulose crosslinked feather keratin films for food packaging. *Polymers*, 12(1), 158. <https://doi.org/10.3390/polym12010158>.
- Echeverría, I., López-Caballero, M. E., Gómez-Guillén, M. C., Mauri, A. N., Montero, M. P. 2016. Structure, functionality, and active release of nanoclay–soy protein films affected by clove essential oil. *Food and bioprocess technology*, 9(11), 1937-1950. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1777-z>.
- El Fawal, G., Hong, H., Song, X., Wu, J., Sun, M., He, C., Wang, H. 2020. Fabrication of antimicrobial films based on hydroxyethylcellulose and ZnO for food packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100462>.
- El Miri, N., Aziz, F., Aboulkas, A., El Bouchti, M., Ben Youcef, H., El Achaby, M. 2018. Effect of plasticizers on physicochemical properties of cellulose nanocrystals filled alginate bionanocomposite films. *Advances in Polymer Technology*, 37(8), 3171-3185. <https://doi.org/10.1002/adv.22087>.
- Farhan, A., Hani, N. M. 2017. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol. *Food Hydrocolloids*, 64, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.034>.
- Firoozi Nejad, B., Smyth, B., Bolaji, I., Mehta, N., Billham, M., Cunningham, E. 2021. Carbon and energy footprints of high-value food trays and lidding films made of common bio-based and conventional packaging materials. *Cleaner Environmental Systems*, 3, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100058>.
- Ghazanfari, M., Jahromi, I. R., Moallemi-Oreh, A., Ebadi-Dehaghani, H., Akbarzadeh, M. 2016. Evaluation of mixing efficiency in elaborating of chitosan/cellulose nanocomposite via statistical analyses. *International journal of biological macromolecules*, 93, 703-711. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.010>.
- Giz, A. S., Berberoglu, M., Bener, S., Aydelik-Ayazoglu, S., Bayraktar, H., Alaca, B. E., Catalgil-Giz, H. 2020. A detailed investigation of the effect of calcium crosslinking and glycerol plasticizing on the physical properties of alginate films. *International journal of biological macromolecules*, 148, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.103>.

- González, A., Barrera, G. N., Galimberti, P. I., Ribotta, P. D., Igarzabal, C. I. A. 2019. Development of edible films prepared by soy protein and the galactomannan fraction extracted from *Gleditsia triacanthos* (Fabaceae) seed. *Food Hydrocolloids*, 97, 105227. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105227>.
- Gouveia, T. I., Biernacki, K., Castro, M. C., Gonçalves, M. P., Souza, H. K. 2019. A new approach to develop biodegradable films based on thermoplastic pectin. *Food Hydrocolloids*, 97, 105175. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105175>.
- Günkaya, Z., Banar, M. 2016. An environmental comparison of biocomposite film based on orange peel-derived pectin jelly-corn starch and LDPE film: LCA and biodegradability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(4), 465-475. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1042-8>.
- Gupta, H., Kumar, H., Kumar, M., Gehlaut, A. K., Gaur, A., Sachan, S., Park, J. W. 2020. Synthesis of biodegradable films obtained from rice husk and sugarcane bagasse to be used as food packaging material. *Environmental Engineering Research*, 25(4), 506-514. <https://www.eeer.org/upload/eeer-2019-191.pdf>.
- Haghighi, H., Biard, S., Bigi, F., De Leo, R., Bedin, E., Pfeifer, F., Siesler, H. W., Licciardello, F., Pulvirenti, A. 2019. Comprehensive characterization of active chitosan-gelatin blend films enriched with different essential oils. *Food Hydrocolloids*, 95, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.019>.
- Hajizadeh, H., Peighambaroust, S. J., Peighambaroust, S. H., Peressini, D. 2020. Physical, mechanical, and antibacterial characteristics of bio-nanocomposite films loaded with Ag-modified SiO₂ and TiO₂ nanoparticles. *Journal of food science*, 85(4), 1193-1202. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15079>.
- Hajji, S., Kchaou, H., Bkhairia, I., Salem, R. B. S. B., Boufi, S., Debeaufort, F., Nasri, M. 2021. Conception of active food packaging films based on crab chitosan and gelatin enriched with crustacean protein hydrolysates with improved functional and biological properties. *Food Hydrocolloids*, 116, 106639. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106639>.
- Hasan, M., Rusman, R., Khaldun, I., Ardana, L., Mudatsir, M., Fansuri, H. 2020. Active edible sugar palm starch-chitosan films carrying extra virgin olive oil: Barrier, thermo-mechanical, antioxidant, and antimicrobial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 766-775. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.076>.
- He, B., Wang, W., Song, Y., Ou, Y., Zhu, J. 2020. Structural and physical properties of carboxymethyl cellulose/gelatin films functionalized with antioxidant of bamboo leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1649-1656. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.286>.
- He, L., Lan, W., Ahmed, S., Qin, W., Liu, Y. 2019. Electrospun polyvinyl alcohol film containing pomegranate peel extract and sodium dehydroacetate for use as food

- packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100390>.
- Hemalatha, T., UmaMaheswari, T., Senthil, R., Krithiga, G., Anbukkarasi, K. 2017. Efficacy of chitosan films with basil essential oil: perspectives in food packaging. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 2160-2170. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9601-7>.
- Hermann, B. G., Debeer, L., De Wilde, B., Blok, K., Patel, M. K. 2011. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), 1159-1171. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.026>.
- Herniou-Julien, C., Gutiérrez, T. J. 2021. Reactive Extrusion-Processed Shape-Memory Food Packaging Films Made from Native and Carboxymethylated Plantain Flour/Polystyrene Blends. *Starch-Stärke*, 73(11-12), 2100053. <https://doi.org/10.1002/star.202100053>.
- Hutchings, N., Smyth, B., Cunningham, E., Yousif, M., Mangwandi, C. 2021. Comparative life cycle analysis of a biodegradable multilayer film and a conventional multilayer film for fresh meat modified atmosphere packaging—and effectively accounting for shelf-life. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129423>.
- Jamróz, E., Juszczak, L., Kucharek, M. 2018. Development of starch-furcellaran-gelatin films containing tea tree essential oil. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(42), 46754. <https://doi.org/10.1002/app.46754>.
- Jamróz, E., Khachatryan, G., Kopel, P., Juszczak, L., Kawecka, A., Krzyściak, P., Kucharek, M., Bębenek, Z., Zimowska, M. 2020. Furcellaran nanocomposite films: The effect of nanofillers on the structural, thermal, mechanical and antimicrobial properties of biopolymer films. *Carbohydrate polymers*, 240, 116244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116244>.
- Jaramillo, C. M., Gutiérrez, T. J., Goyanes, S., Bernal, C., Famá, L. 2016. Biodegradability and plasticizing effect of yerba mate extract on cassava starch edible films. *Carbohydrate polymers*, 151, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.025>.
- Jiang, S. J., Zhang, X., Ma, Y., Tuo, Y., Qian, F., Fu, W., Mu, G. 2016. Characterization of whey protein-carboxymethylated chitosan composite films with and without transglutaminase treatment. *Carbohydrate polymers*, 153, 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.094>.
- Jung, B. N., Jung, H. W., Kang, D. H., Kim, G. H., Lee, M., Shim, J. K., Hwang, S. W. 2020. The fabrication of flexible and oxygen barrier cellulose nanofiber/polylactic acid nanocomposites using cosolvent system. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(47), 49536. <https://doi.org/10.1002/app.49536>.

- Kamari, A., Phillip, E. 2018. Chitosan, gelatin and methylcellulose films incorporated with tannic acid for food packaging. *International journal of biological macromolecules*, 120, 1119-1126. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.169>.
- Kashiri, M., Cerisuelo, J. P., Domínguez, I., López-Carballo, G., Hernández-Muñoz, P., Gavara, R. 2016. Novel antimicrobial zein film for controlled release of lauroyl arginate (LAE). *Food Hydrocolloids*, 61, 547-554. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.012>.
- Kumar, R., Ghoshal, G., Goyal, M. 2019. Synthesis and functional properties of gelatin/CA–starch composite film: excellent food packaging material. *Journal of food science and technology*, 56(4), 1954-1965. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03662-4>.
- Lalnunthari, C., Devi, L. M., Amami, E., Badwaik, L. S. 2019. Valorisation of pumpkin seeds and peels into biodegradable packaging films. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.015>.
- Lan, W., Li, S., Shama, S., Zhao, Y., Sameen, D. E., He, L., Liu, Y. 2020. Investigation of ultrasonic treatment on physicochemical, structural and morphological properties of sodium alginate/AgNPs/apple polyphenol films and its preservation effect on strawberry. *Polymers*, 12(9), 2096. <https://doi.org/10.3390/polym12092096>.
- Leceta, I., Etxabide, A., Cabezudo, S., De La Caba, K., Guerrero, P. 2014. Bio-based films prepared with by-products and wastes: environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 64, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.054>.
- Leceta, I., Guerrero, P., Cabezudo, S., de la Caba, K. 2013. Environmental assessment of chitosan-based films. *Journal of Cleaner Production*, 41, 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.049>.
- Lee, J. H., Jeong, D., Kanmani, P. 2019. Study on physical and mechanical properties of the biopolymer/silver based active nanocomposite films with antimicrobial activity. *Carbohydrate polymers*, 224, 115159. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115159>.
- Li, F., Liu, Y., Cao, Y., Zhang, Y., Zhe, T., Guo, Z., Wang, L. 2020. Copper sulfide nanoparticle-carrageenan films for packaging application. *Food Hydrocolloids*, 109, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106094>.
- Li, X., Ren, Z., Wang, R., Liu, L., Zhang, J., Ma, F., Liu, X. 2021. Characterization and antibacterial activity of edible films based on carboxymethyl cellulose, *Dioscorea opposita* mucilage, glycerol and ZnO nanoparticles. *Food Chemistry*, 349, 129208. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129208>.
- Liu, C., Huang, J., Zheng, X., Liu, S., Lu, K., Tang, K., Liu, J. 2020. Heat sealable soluble soybean polysaccharide/gelatin blend edible films for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100485. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100485>.

- Liu, J., Liu, S., Wu, Q., Gu, Y., Kan, J., Jin, C. 2017. Effect of protocatechuic acid incorporation on the physical, mechanical, structural and antioxidant properties of chitosan film. *Food Hydrocolloids*, 73, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.035>.
- Lokesh, K., Matharu, A. S., Kookos, I. K., Ladakis, D., Koutinas, A., Morone, P., Clark, J. 2020. Hybridised sustainability metrics for use in life cycle assessment of bio-based products: Resource efficiency and circularity. *Green Chemistry*, 22(3), 803-813. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/gc/c9gc02992c>.
- Luchese, C. L., Spada, J. C., Tessaro, I. C. 2017. Starch content affects physicochemical properties of corn and cassava starch-based films. *Industrial Crops and Products*, 109, 619-626. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.020>.
- Luo, Y., Liu, H., Yang, S., Zeng, J., Wu, Z. 2019. Sodium alginate-based green packaging films functionalized by guava leaf extracts and their bioactivities. *Materials*, 12(18), 2923. <https://doi.org/10.3390/ma12182923>.
- Ma, D., Jiang, Y., Ahmed, S., Qin, W., Liu, Y. 2019. Physical and antimicrobial properties of edible films containing *Lactococcus lactis*. *International journal of biological macromolecules*, 141, 378-386. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.006>.
- Manikandan, N. A., Pakshirajan, K., Pugazhenth, G. 2020. Preparation and characterization of environmentally safe and highly biodegradable microbial polyhydroxybutyrate (PHB) based graphene nanocomposites for potential food packaging applications. *International journal of biological macromolecules*, 154, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.084>.
- Medina-Jaramillo, C., Ochoa-Yepes, O., Bernal, C., Famá, L. 2017. Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts. *Carbohydrate Polymers*, 176, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.079>.
- Menzel, C. 2020. Improvement of starch films for food packaging through a three-principle approach: Antioxidants, cross-linking and reinforcement. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116828. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116828>.
- Mirjalili, F., Yassini Ardekani, A. 2017. Preparation and characterization of starch film accompanied with ZnO nanoparticles. *Journal of food process engineering*, 40(6), e12561. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12561>.
- Montes-de-Oca-Ávalos, J. M., Altamura, D., Herrera, M. L., Huck-Iriart, C., Scattarella, F., Siliqi, D., Giannini, C., Candal, R. J. (2020). Physical and structural properties of whey protein concentrate-Corn oil-TiO₂ nanocomposite films for edible food-packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100590>
- Moreirinha, C., Vilela, C., Silva, N. H., Pinto, R. J., Almeida, A., Rocha, M. A. M., Coelho, E., Coimbra, M. A., Silvestre, A. J.D., Freire, C. S. 2020. Antioxidant and antimicrobial films based on brewers spent grain arabinoxylans, nanocellulose and feruloylated

- compounds for active packaging. *Food Hydrocolloids*, 108, 105836. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105836>.
- Moreno, O., Cárdenas, J., Atarés, L., Chiralt, A. 2017. Influence of starch oxidation on the functionality of starch-gelatin based active films. *Carbohydrate Polymers*, 178, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.128>.
- Mousavi, S. N., Daneshvar, H., Dorraji, M. S. S., Ghasempour, Z., Panahi-Azar, V., Ehsani, A. 2021. Starch/alginate/Cu-g-C3N4 nanocomposite film for food packaging. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124583. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124583>.
- Narasagoudr, S. S., Hegde, V. G., Chougale, R. B., Masti, S. P., Vootla, S., Malabadi, R. B. 2020. Physico-chemical and functional properties of rutin induced chitosan/poly (vinyl alcohol) bioactive films for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 109, 106096. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106096>.
- Norcino, L. B., Mendes, J. F., Natarelli, C. V. L., Manrich, A., Oliveira, J. E., Mattoso, L. H. C. 2020. Pectin films loaded with copaiba oil nanoemulsions for potential use as bio-based active packaging. *Food Hydrocolloids*, 106, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105862>.
- Orsuwan, A., Shankar, S., Wang, L. F., Sothornvit, R., Rhim, J. W. 2016. Preparation of antimicrobial agar/banana powder blend films reinforced with silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 60, 476-485. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.04.017>.
- Petrucci, R., Fortunati, E., Puglia, D., Luzi, F., Kenny, J. M., Torre, L. 2018. Life cycle analysis of extruded films based on poly (lactic acid)/cellulose nanocrystal/limonene: a comparative study with ATBC plasticized PLA/OMMT systems. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(5), 1891-1902. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1085-3>.
- Ponnusamy, P. G., Mani, S. 2022. Life cycle assessment of manufacturing cellulose nanofibril-reinforced chitosan composite films for packaging applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(3), 380-394. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02035-y>.
- Priyadarshi, R., Kim, S. M., Rhim, J. W. 2021. Pectin/pullulan blend films for food packaging: Effect of blending ratio. *Food Chemistry*, 347, 129022. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129022>.
- Qiu, Y. T., Wang, B. J., Weng, Y. M. 2020. Preparation and characterization of genipin cross-linked and lysozyme incorporated antimicrobial sodium caseinate edible films. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100601>.
- Radusin, T., Torres-Giner, S., Stupar, A., Ristic, I., Miletic, A., Novakovic, A., Lagaron, J. M. 2019. Preparation, characterization and antimicrobial properties of electrospun polylactide films containing *Allium ursinum* L. extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100357>.

- Risyon, N. P., Othman, S. H., Basha, R. K., Talib, R. A. 2020. Characterization of polylactic acid/halloysite nanotubes bionanocomposite films for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100450>.
- Rivera-Hernández, L., Chavarría-Hernández, N., López Cuellar, M. D. R., Martínez-Juárez, V. M., Rodríguez-Hernández, A. I. 2021. Pectin-gellan films intended for active food packaging: Release kinetics of nisin and physico-mechanical characterization. *Journal of Food Science and Technology*, 58(8), 2973-2981. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04800-z>.
- Rivière, G. N., Pion, F., Farooq, M., Sipponen, M. H., Koivula, H., Jayabalan, T., Österberg, M. 2021. Toward waste valorization by converting bioethanol production residues into nanoparticles and nanocomposite films. *Sustainable materials and technologies*, 28, e00269. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00269>.
- Roy, S., Rhim, J. W. 2020. Effect of CuS reinforcement on the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of alginate-based composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.092>.
- Roy, S., Rhim, J. W. 2020. Fabrication of copper sulfide nanoparticles and limonene incorporated pullulan/carrageenan-based film with improved mechanical and antibacterial properties. *Polymers*, 12(11), 2665. <https://doi.org/10.3390/polym12112665>.
- Saberi, B., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., Stathopoulos, C. E. 2017. Physical, barrier, and antioxidant properties of pea starch-guar gum biocomposite edible films by incorporation of natural plant extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 10(12), 2240-2250. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1995-z>.
- Sampaio, A. P. C., de Sá Filho, M., Castro, A. L. A., de Figueirêdo, M. C. B. 2017. Life cycle assessment from early development stages: the case of gelatin extracted from tilapia residues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(5), 767-783. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1179-5>.
- Samsalee, N., Sothornvit, R. 2019. Development and characterization of porcine plasma protein-chitosan blended films. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100406. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100406>.
- Sari, Y. W., Putri, S. Y., Intan, N., Bahtiar, A., Kurniati, M. 2021. The effect of sorbitol and sweet sorghum to carrageenan ratio on the physicochemical properties of sweet sorghum/carrageenan bioplastics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01254-3>.
- Satriaji, K. P., Garcia, C. V., Kim, G. H., Shin, G. H., Kim, J. T. 2020. Antibacterial bionanocomposite films based on CaSO₄-crosslinked alginate and zinc oxide nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100510. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100510>.

- Sedayu, B. B., Cran, M. J., Bigger, S. W. 2020. Reinforcement of refined and semi-refined carrageenan film with nanocellulose. *Polymers*, 12(5), 1145. <https://doi.org/10.3390/polym12051145>.
- Soni, B., Schilling, M. W., Mahmoud, B. 2016. Transparent bionanocomposite films based on chitosan and TEMPO-oxidized cellulose nanofibers with enhanced mechanical and barrier properties. *Carbohydrate polymers*, 151, 779-789. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.022>.
- Sonseca, A., Madani, S., Rodríguez, G., Hevilla, V., Echeverría, C., Fernández-García, M., López, D. 2019. Multifunctional PLA blends containing chitosan mediated silver nanoparticles: Thermal, mechanical, antibacterial, and degradation properties. *Nanomaterials*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.3390/nano10010022>.
- Su, X., Yang, Z., Tan, K. B., Chen, J., Huang, J., Li, Q. 2020. Preparation and characterization of ethyl cellulose film modified with capsaicin. *Carbohydrate polymers*, 241, 116259. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116259>.
- Sun, J., Du, Y., Ma, J., Li, Y., Wang, L., Lu, Y., Zou, J., Pang, J., Wu, C. 2019. Transparent bionanocomposite films based on konjac glucomannan, chitosan, and TEMPO-oxidized chitin nanocrystals with enhanced mechanical and barrier properties. *International journal of biological macromolecules*, 138, 866-873. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.170>.
- Suriyatem, R., Auras, R. A., Rachtanapun, C., Rachtanapun, P. 2018. Biodegradable rice starch/carboxymethyl chitosan films with added propolis extract for potential use as active food packaging. *Polymers*, 10(9), 954. <https://doi.org/10.3390/polym10090954>.
- Susmitha, A., Sasikumar, K., Rajan, D., Nampoothiri, K. M. 2021. Development and characterization of corn starch-gelatin based edible films incorporated with mango and pineapple for active packaging. *Food Bioscience*, 41, 100977. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100977>.
- Tan, W., Zhang, J., Zhao, X., Li, Q., Dong, F., Guo, Z. 2020. Preparation and physicochemical properties of antioxidant chitosan ascorbate/methylcellulose composite films. *International journal of biological macromolecules*, 146, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.044>.
- Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., Thakur, V. K. 2018. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current opinion in Green and Sustainable chemistry*, 13, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.013>.
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L. J., Wongruong, S., Sriburi, P., Reungsang, A., Rachtanapun, P. 2021. Antioxidant films from cassava starch/gelatin biocomposite fortified with quercetin and TBHQ and their applications in food models. *Polymers*, 13(7), 1117. <https://doi.org/10.3390/polym13071117>.

- Urbizo-Reyes, U., San Martin-González, M. F., Garcia-Bravo, J., Liceaga, A. M. 2020. Development of chia seed (*Salvia hispanica*) mucilage films plasticized with polyol mixtures: Mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 854-864. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.023>.
- Vea, E. B., Fabbri, S., Spierling, S., Owsianiak, M. 2021. Inclusion of multiple climate tipping as a new impact category in life cycle assessment of polyhydroxyalkanoate (PHA)-based plastics. *Science of The Total Environment*, 788, 147544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147544>
- Vigil, M., Pedrosa-Laza, M., Alvarez Cabal, J. V., Ortega-Fernández, F. 2020. Sustainability analysis of active packaging for the fresh cut vegetable industry by means of attributional & consequential life cycle assessment. *Sustainability*, 12(17), 7207. <https://doi.org/10.3390/su12177207>.
- Wang, H., Gong, X., Miao, Y., Guo, X., Liu, C., Fan, Y. Y., Li, W. 2019. Preparation and characterization of multilayer films composed of chitosan, sodium alginate and carboxymethyl chitosan-ZnO nanoparticles. *Food Chemistry*, 283, 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.022>.
- Wang, Y., Du, H., Xie, M., Ma, G., Yang, W., Hu, Q., Pei, F. 2019. Characterization of the physical properties and biological activity of chitosan films grafted with gallic acid and caffeic acid: A comparison study. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100401>.
- Xu, J., Xia, R., Zheng, L., Yuan, T., Sun, R. 2019. Plasticized hemicelluloses/chitosan-based edible films reinforced by cellulose nanofiber with enhanced mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 224, 115164. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115164>.
- Yadav, S., Mehrotra, G. K., Bhartiya, P., Singh, A., Dutta, P. K. 2020. Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan-gelatin film for food packaging. *Carbohydrate polymers*, 227, 115348. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115348>.
- Ye, J., Ma, D., Qin, W., Liu, Y. 2018. Physical and antibacterial properties of sodium alginate—sodium carboxymethylcellulose films containing *Lactococcus lactis*. *Molecules*, 23(10), 2645. <https://doi.org/10.3390/molecules23102645>.
- Ye, Q., Han, Y., Zhang, J., Zhang, W., Xia, C., Li, J. 2019. Bio-based films with improved water resistance derived from soy protein isolate and stearic acid via bioconjugation. *Journal of Cleaner Production*, 214, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.277>.
- Yu, Z., Rao, G., Wei, Y., Yu, J., Wu, S., Fang, Y. 2019. Preparation, characterization, and antibacterial properties of biofilms comprising chitosan and ϵ -polylysine. *International journal of biological macromolecules*, 141, 545-552. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.035>.

- Zareie, Z., Yazdi, F. T., Mortazavi, S. A. 2020. Development and characterization of antioxidant and antimicrobial edible films based on chitosan and gamma-aminobutyric acid-rich fermented soy protein. *Carbohydrate polymers*, 244, 116491. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116491>.
- Zhang, H., Hortal, M., Dobon, A., Jorda-Beneyto, M., Bermudez, J. M. 2017. Selection of Nanomaterial-Based Active Agents for Packaging Application: Using Life Cycle Assessment (LCA) as a Tool. *Packaging Technology and Science*, 30(9), 575-586. <https://doi.org/10.1002/pts.2238>.
- Zhang, S., Wei, F., Han, X. 2018. An edible film of sodium alginate/pullulan incorporated with capsaicin. *New journal of chemistry*, 42(21), 17756-17761. <https://doi.org/10.1039/C8NJ04249G>.
- Zhao, J., Wei, F., Xu, W., Han, X. 2020. Enhanced antibacterial performance of gelatin/chitosan film containing capsaicin loaded MOFs for food packaging. *Applied Surface Science*, 510, 145418. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145418>.
- Zheng, K., Li, W., Fu, B., Fu, M., Ren, Q., Yang, F., Qin, C. 2018. Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films containing hardleaf oatchestnut starch and Litsea cubeba oil. *International journal of biological macromolecules*, 118, 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.126>.
- Zhu, J. Y., Tang, C. H., Yin, S. W., Yu, Y. G., Zhu, J. H., Yang, X. Q. 2017. Development and characterization of multifunctional gelatin-lysozyme films via the oligomeric proanthocyanidins (OPCs) crosslinking approach. *Food Biophysics*, 12(4), 451-461. <https://doi.org/10.1007/s11483-017-9501-8>.

APÊNDICE B – MATERIAL SUPLEMENTAR DO ARTIGO 2

Tabela A1. Nomes das matrizes, plastificantes e inventários selecionados nas bases de dados

Material	Nome do processo	Base de dados
Matrizes		
Amido de manga	Amido de manga	Embrapa Agroindústria Tropical
Amido de mandioca	<i>Tapioca starch (with use of co-products), at processing {TH} Mass, U</i>	Agro-Footprint 6
Amido de milho	<i>Maize starch {RoW} maize starch production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Amido de ervilha	<i>Pea starch-concentrate, at processing {DE} Mass, U</i>	Agro-Footprint 6
Amido de batata	<i>Potato starch {RoW} potato starch production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Amido de trigo	<i>Wheat starch, at processing {BR} Mass, U</i>	Agro-Footprint 6
Plastificantes		
Ácido acético	<i>Acetic acid, without water, in 98% solution state {RoW} acetic acid production, product in 98% solution state Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Ácido cítrico	<i>Citric acid {RoW} citric acid production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Dietanolamina	<i>Diethanolamine {RoW} ethanolamine production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Dietilenoglicol	<i>Diethylene glycol {RoW} ethylene glycol production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Etilenoglicol	<i>Ethylene glycol {RoW} ethylene glycol production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Glicerol	<i>Glycerine {RoW} glycerine production, from epichlorohydrin Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Monoetanolamina	<i>Monoethanolamine {RoW} ethanolamine production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Propileno glicol	<i>Propylene glycol, liquid {RoW} propylene glycol production, liquid Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Óxido de propileno	<i>Propylene oxide, liquid {RoW} propylene oxide production, liquid Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Ácido esteárico	<i>Stearic acid {GLO} stearic acid production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Trietanolamina	<i>Triethanolamine {RoW} ethanolamine production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Trietilenoglicol	<i>Triethylene glycol {RoW} ethylene glycol production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1
Ureia	<i>Urea {RoW} urea production Cut-off, U</i>	Ecoinvent v.3.9.1

Tabela A2. Inventário da produção do novo bioplástico em escala laboratorial

Insumos		Etapas de produção			
Entradas	Unidade	Despolpa	Separação do caroço	Obtenção da farinha	Produção do bioplástico
Manga	g	6605,7			
Hipoclorito de sódio	g	1467,6			
Casca	g		766,3		
Caroço	g		772,8		
Amêndoa	g			356,7	
Metabissulfito de sódio	g			5,4	
Farinha de amêndoa	g				285,9
Amido de milho	g				421,6
Glicerol	g				74,1
Anidrido maleico	g				7,7
Peróxido de dicumila	g				3,8
Água	mL	12230		1070	1000
Saídas	Unidade	Despolpa	Separação do caroço	Obtenção da farinha	Produção do bioplástico
Polpa	g	5066,6			
Casca	g	766,3			
Caroço	g	772,8			
Amêndoa	g		356,7		
Tegumento	g		416,1		
Efluente 1	mL	13697,6			
Farinha de amêndoa	g			285,95	
Efluente 2	mL			1064,7	
Bioproduto	g				840,6

Texto A1. Simulação do processo em escala industrial

A capacidade de produção da planta modelada foi definida de acordo com o trabalho de Da Silva et al. (2021). Assumiu-se o processamento de 6280 toneladas de manga/ano, com base em um ciclo operacional anual 315 dias.

Descrição do processo de escalonamento

O processo de obtenção da farinha de amido de caroço de manga inicia-se pelo transporte da quantidade de manga a ser processada até a fábrica, fazendo parte da etapa de despolpa. Em seguida, por meio de uma esteira industrial, as mangas são transportadas até um tanque de lavagem, onde ocorre uma limpeza inicial dos frutos, por meio da mistura com uma solução de hipoclorito de sódio. Após o processo completo de lavagem, as mangas umedecidas são transportadas para uma máquina de corte, onde a polpa é separada das partes sólidas da fruta: casca e caroço. A solução aquosa de hipoclorito de sódio segue para o tratamento de efluentes, visando o reuso da água no processo de lavagem. Após a despolpa, essas partes sólidas são levadas para outra máquina onde ocorre a separação da casca e do caroço. A casca segue para o digestor, onde acontece a digestão anaeróbica, transformando esse resíduo em biometano. O caroço é levado para outra máquina de corte para a extração da amêndoa. As amêndoas são transportadas para um novo tanque de mistura para que passem pelo processo de inibição da oxidação, através da mistura com uma solução de metabissulfito. Esta solução é produzida pelo fornecimento de água controlada, e misturada com uma solução de metabissulfito puro no misturador. Finalmente, esta solução é transportada para o tanque de mistura onde se encontra a amêndoa, de forma a retardar a sua oxidação. Em seguida, as amêndoas umidificadas são transportadas para um moinho, onde serão trituradas até a formação de uma pasta homogênea, e novamente transportadas até uma estufa para secagem, e obtenção da farinha da amêndoa da manga. A farinha de amêndoa segue para um novo tanque de mistura, junto com o amido de milho, glicerol, anidrido maleico e peróxido de dicumila. A massa resultante segue para a extrusora, onde ocorre o processo de transformação do bioplástico, e por fim, acontece o corte do material extrusado em unidades de 0,5 kg.

Tabela A3. Equipamentos utilizados no processo em escala industrial

Etapa de produção	Simulação industrial
	Operação unitária
Despolpa	<i>Belt Conveying</i>
	<i>Blending/Storage</i>
	<i>Mixing</i>
	<i>Belt Conveying</i>
	<i>Grinding</i>
	<i>Component Splitting</i>
	<i>Dead-End/Filtration</i>
Separação do caroço	<i>Mixing</i>
	<i>Batch Generic Box</i>
	<i>Batch Generic Box</i>
	<i>Batch Generic Box</i>
Obtenção da farinha	<i>Anaerobic Digestion</i>
	<i>Blending/Storage</i>
	<i>Mixing</i>
	<i>Mixing</i>
	<i>Grinding</i>
	<i>Tray Drying</i>
Produção do bioplástico	<i>Shredding</i>
	<i>Blending/Storage</i>
	<i>Extrusion</i>
	<i>Tableting</i>