

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Materiais plásticos e seus impactos ambientais

O consumo excessivo de produtos e embalagens plásticas derivadas do petróleo em escala mundial tem revelado consequências drásticas e nocivas ao meio ambiente. Estima-se que mais de 100 milhões de toneladas de plásticos tenham sido acumulados nos oceanos e, especialistas sugerem uma piora nesse quadro até 2025 (JAMBECK *et al.*, 2015; HARTMANN *et al.*, 2019).

O Brasil está em quarto lugar entre os maiores produtores de lixo plástico no mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Plásticos (ALBREPE), o volume de plástico descartado no Brasil em 2020 foi de 13,3 milhões de toneladas, 15% a mais que no ano anterior (ALBREPE, 2020).

Além do descarte desenfreado de resíduos plásticos gerados pelos brasileiros, o país possui baixa taxa de reciclagem desse lixo. Heinrich-Böll-Stiftung (2020), relata que apenas 1,3% de lixo plástico são reciclados no Brasil, sendo inferior à média global de reciclagem, que é de 9%. Os EUA são os primeiros na produção de lixo plástico, porém, possuem uma taxa de 34,6% de reciclagem. Do mesmo modo, a China recicla 21,9% dos resíduos plásticos gerados (HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG, 2020). Apesar de ser um problema global, a situação no Brasil se agrava, visto que os resíduos plásticos dispersados no ambiente não são reintroduzidos na cadeia produtiva, onde a maioria é descartada de forma irregular em aterros sanitários, comprometendo a circulação de gases e líquidos que dificultam a degradação de outros materiais (GOMEZ *et al.*, 1996; HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG, 2020).

A presença do lixo plástico tem demonstrado preocupação na sociedade devido ao seu acúmulo no meio ambiente. Pesquisadores e empresas estão ativamente à procura por tecnologias que possam reduzir o uso de materiais de origem petroquímicos (ZHU *et al.*, 2016; MENDES & PEDERSON, 2021). Assim, programas com a finalidade de diminuir esse material já estão sendo investidos em diversos países, bem como o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis (YARADODDI *et al.*, 2020; RAI *et al.*, 2021).

Como alternativa a esse problema, surgiram os biofilmes comestíveis ou biodegradáveis que são capazes de se decompor rapidamente quando expostos a uma variedade de microrganismos. Essa é uma alternativa viável, que poderia substituir parte das embalagens de origem petroquímica, contribuindo para a preservação do meio ambiente (WELIGAMA *et al.*, 2022).

3.2 Resíduos agroindustriais

O Brasil é considerado um dos maiores produtores de alimentos no mundo. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA), a indústria alimentícia representa cerca de 10,6% do PIB brasileiro (ABIA, 2022), com destaque para o beneficiamento e processamento de matérias-primas provenientes da agropecuária, incentivando a inclusão do meio rural na economia nacional e internacional (RICARDINO *et al.*, 2020). Entretanto, a agroindústria lida com sérios problemas referentes às perdas e desperdícios ocasionados durante todas as etapas no processamento desde a extração da matéria-prima até a disposição final (ABBADE, 2019; SANTOS *et al.*, 2020).

Assim, há uma geração substancial de resíduos, cujo descarte inadequado pode acarretar impactos ambientais significativos. Esses impactos incluem alterações nas características dos solos, da água e do ar, com efeitos prejudiciais a todos os seres vivos (TROMBETTA *et al.*, 2020). Pesquisas realizadas na área da agroindústria oferecem oportunidades para aprimorar a qualidade dos produtos, bem como explorar o reaproveitamento e a biotransformação dos resíduos para várias finalidades, como extração de compostos bioativos, a produção de etanol de segunda geração e o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis (EMBRAPA, 2020).

Dentre os resíduos agroindustriais, destacam-se os obtidos através do processamento de frutas, compreendendo cerca de 41,3 milhões de toneladas geradas anualmente no Brasil (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI e FRUTI, 2022). O país se encontra entre os três maiores produtores mundiais de hortifrúti, atrás apenas da China e da Índia, respectivamente, e esse potencial se deve às condições do solo, clima e em razão da sua grande extensão territorial (RANDOLPHO *et al.*, 2020).

Nos processos produtivos deste setor, diversos autores apontam que há grandes percentuais de perdas em todas as etapas. Na colheita de frutas, estima-se 10% de desperdício e nas etapas seguintes, como transporte e armazenamento, a perda do produto chega a 50%. As indústrias de polpas e sucos de frutas também possuem uma geração considerável de resíduos no processo, incluindo cascas, sementes e frutos inutilizáveis (RORIZ, 2012; SILVA *et al.*, 2018; SOUSA *et al.*, 2018). A etapa de seleção da matéria-prima é realizada de forma criteriosa, onde as frutas que apresentam sujidades, deformidades, contaminação por fungos ou parasitas e que estejam contaminadas por substâncias que não fazem parte da sua composição natural são descartadas (LIMA *et al.*, 2022).

É importante ressaltar que os resíduos agroindustriais, mesmo sendo biodegradáveis, precisam de um tempo mínimo para que ocorra a sua decomposição total no meio ambiente.

Esses insumos se tornam fontes de poluição e contaminação nos corpos hídricos, na depreciação dos solos (JERÔNIMO, 2012; COSTA & ASSAHARA, 2020) e proliferação de vetores como ratos, baratas e mosquitos, devido ao grande acúmulo de material orgânico (COSTA & ASSAHARA, 2020). Essas razões, aliadas ao baixo custo desses possíveis subprodutos, têm despertado interesse na utilização dos resíduos em processos biotecnológicos, onde a elaboração de novos produtos a partir de resíduos surge como uma alternativa sustentável (MANIGLIA, 2017). Assim, uma das possibilidades para o aproveitamento desses resíduos está na tecnologia de bioprocessos, com ênfase no desenvolvimento de biofilmes a partir de resíduos agroindustriais, visto que existe um cenário de desperdício de matéria orgânica, associado aos danos ambientais (JERÔNIMO, 2012; LOBATO, 2017; ARQUELAU *et al.*, 2019).

3.3 Frutos e resíduos amazônicos

O bioma amazônico é reconhecido por sua notável diversidade biológica, abrigando aproximadamente 25% de todas as espécies de fauna e flora existentes no mundo. Estima-se que existam cerca de 50.000 espécies vegetais nessa região, onde muitas delas são frutíferas (CARDOSO *et al.*, 2017; ULLOA ULLOA *et al.*, 2017). Seus recursos exibem um notável potencial para o desenvolvimento de produtos e tecnologias inovadoras, despertando interesse nas indústrias fitoterápica, farmacêutica, de alimentos e bebidas. No entanto, é fundamental adotar práticas de uso sustentável dessa biodiversidade, considerando os benefícios econômicos e sociais que esse patrimônio pode trazer (MIRANDA *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Dentre os recursos de maior viabilidade econômica, destacam-se os frutos endêmicos do bioma amazônico, que podem ser consumidos *in natura* ou utilizados como matéria-prima na fabricação de novos produtos. Nesse contexto, a fruticultura emerge como um setor com considerável potencial de expansão, especialmente no que diz respeito ao cultivo de espécies como açaí, biribá, araçá-boi, bacupari, guaraná, entre outros. Essa abordagem promove o desenvolvimento da agricultura familiar e a prática de extração sustentável dos frutos nativos da região (BECKER *et al.*, 2018; ANUNCIACÃO *et al.*, 2019; HOMMA *et al.*, 2020).

Além dos frutos, os subprodutos resultantes do processamento, como cascas, sementes e bagaços, também possuem potencial biotecnológico significativo. Pesquisadores têm adotado iniciativas para viabilizar o aproveitamento desses resíduos provenientes dos frutos amazônicos na indústria local, visando a exploração de sua capacidade nutricional e dos compostos bioativos presentes (PEREIRA, 2015; CUNHA JUNIOR *et al.*, 2020; ASSMANN *et al.*, 2021).

Nesse contexto, pesquisas relacionadas a aplicação de frutos e resíduos provenientes da

região amazônica no desenvolvimento de filmes e revestimentos biodegradáveis apresentam potencial para impulsionar a fruticultura, introduzindo novas alternativas de utilização, reduzindo o desperdício e permitindo a produção de produtos biotecnológicos.

3.3.1 Biribá (*Annona mucosa* Jacq.)

A família botânica Annonaceae, originária de territórios tropicais e subtropicais, possui cerca de 130 gêneros e 2.200 espécies (HARAHAP *et al.*, 2022). No Brasil, essas espécies são predominantemente encontradas na região Amazônica, bem como nos biomas da Mata atlântica e no Cerrado (GOMES, 2018). Dentre as espécies dessa família, *Annona mucosa* Jacq., conhecida anteriormente pela sua sinonímia *Rollinia mucosa* (Jacq.) Baill (RAINER, 2007) (FIGURA 1) representa uma árvore frutífera nativa da Floresta Amazônica e da Mata Atlântica, popularmente conhecida como biribá, graviola brava, araticum ponhé, fruta-de-condessa ou fruta-de-conde (FERREIRA *et al.*, 2010; GOMES, 2018).

Figura 1 - Espécie de *Annona mucosa* Jacq. (A) vista geral da planta em condição de campo; (B) fruto *in natura* e (C) fruto em corte vertical



Fonte: Autora (2023).

O biribazeiro é uma planta arbórea de porte médio, atingindo alturas de seis a dez metros. A infrutescência é do tipo sincárpica composta por numerosas partes hexagonais que se unem entre si. O fruto pode alcançar até 1,3 kg e a polpa mucilaginosa apresenta coloração branca a creme com sabor adocicado e aroma atrativo (LIMA *et al.*, 2020). O epicarpo do fruto do biribazeiro exibe uma coloração verde durante sua fase imatura, que se transforma em amarelo quando atinge a maturação. Além disso, o epicarpo pode apresentar saliências carnosas conhecidas como espículas ou espinhos. Em média, o fruto possui cerca de 52% de polpa, 42%

de casca e 6% de sementes, em relação ao seu peso total (SANTOS *et al.*, 2005; SOARES *et al.*, 2014). A polpa pode ser consumida *in natura* ou como matéria-prima para a produção de diversos produtos alimentícios, onde os resíduos são descartados após seu processamento (MEDEIROS *et al.*, 2009).

Estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar as propriedades físico-químicas e bioativas dessa espécie vegetal. Silva *et al.* (2019) realizaram a caracterização dos frutos em cinco estágios de desenvolvimento, avaliando pH, sólidos solúveis, acidez titulável e teor de pectina total e solúvel. Já Rodrigues *et al.* (2021) obtiveram resultados promissores nas análises da atividade larvicida de sementes e folhas contra *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*. Barboza *et al.* (2015) relataram, pela primeira vez, atividade antimicrobiana de folhas e caules de espécies de *A. mucosa* (Jacq.) cultivada *in vivo* e obtida por cultura *in vitro*, onde os extratos avaliados apresentaram atividade antimicrobiana seletiva, inibindo o crescimento de *Streptococcus pyogenes* e *Bacillus thuringiensis* em diferentes concentrações.

Pesquisas voltadas para a caracterização, assim como a identificação das propriedades bioativas presentes na espécie do biribá são de extrema importância, uma vez que contribuem para a ampliação das aplicações biotecnológicas dos frutos e de outras estruturas vegetais anteriormente consideradas resíduos. Esses estudos impulsionam toda uma cadeia produtiva relacionada a este fruto na região amazônica

3.3.2 Maracujá suspiro (*Passiflora nitida* Kunth)

Pertencente à família Passifloraceae, o maracujá, denominação atribuída ao fruto e à planta de várias espécies do gênero *Passiflora*, encontra-se amplamente distribuído por toda a América Latina, África, Ásia, Oceania, América do Norte, América Central e, principalmente, na América do Sul (FALEIRO *et al.*, 2017). De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil se destaca como o principal produtor e consumidor mundial de diversas espécies de maracujá, evidenciando sua significativa importância tanto do ponto de vista social quanto econômico (IBGE, 2018).

Dentre as espécies dessa família, a *Passiflora nitida* Kunth (FIGURA 2), popularmente conhecida como maracujá suspiro, maracujá do mato, maracujá de cheiro e maracujá de rato, é encontrada em todo o território nacional, principalmente na Amazônia, mas também encontrada no Piauí, Mato Grosso, Tocantins, Goiás, Bahia, Minas Gerais e no Distrito Federal (JUNQUEIRA *et al.*, 2007; BERNACCI *et al.*, 2015). Esta espécie é classificada como silvestre e apresenta crescimento natural em áreas de vegetação secundária ou em margens de rios e

estradas (ANDRADE *et al.*, 2010). Os frutos apresentam uma forma ovoide, com dimensões médias de aproximadamente 8 cm. A casca dos frutos exibe uma coloração amarelo-alaranjada, enquanto o mesocarpo é caracterizado por sua espessura essencialmente esponjosa, medindo cerca de 1,5 cm de espessura (SILVA *et al.*, 2013).

Figura 2 - Espécie de *Passiflora nitida* Kunth. (A) vista geral da planta em condições de campo; (B) fruto *in natura* e (C) fruto em corte vertical



Fonte: Autora (2023).

Devido ao seu sabor doce e exótico, o fruto possui uma notável aceitação para consumo *in natura*, além de ser utilizado na preparação de sucos e doces. No entanto, não há registros de cultivo comercial até o momento, prevalecendo a atividade extrativista e a comercialização em feiras livres, mercados, sacolões e por vendedores ambulantes (JUNQUEIRA, 2010).

No que diz respeito à composição e propriedades bioativas de *P. nitida*, as informações ainda são escassas. Contudo, Gomes *et al.* (2020) avaliaram a extração de substâncias pécicas do mesocarpo de *P. nitida*. Vargas *et al.* (2016) elucidaram sobre a atividade antioxidante do extrato da passiflora pela presença de fenóis em sua composição. Carvalho *et al.* (2010) corroboraram sobre a ação antioxidante, anticoagulante e antiagregante plaquetária do extrato das folhas. Bendini *et al.* (2006) demonstraram a atividade antimicrobiana do extrato metanólico da espécie.

Estudos como esses promovem o estímulo tanto ao extrativismo quanto ao cultivo conduzido por agricultores familiares da região, devido ao notável potencial mercadológico e biotecnológico do fruto, surgindo melhores perspectivas a exploração econômica dessa espécie.

3.3.3 Araçá-boi (*Eugenia stipitata* McVaugh)

Nativa da Floresta Amazônica, o araçazeiro (*Eugenia stipitata* McVaugh) é uma frutífera arbustiva de aproximadamente, três metros de altura, pertencente à família Myrtaceae (BOHRY *et al.*, 2019). A espécie apresenta cultivares em países como Peru, Bolívia, Equador, Colômbia e Brasil, nos quais são produzidos frutos com considerável potencial para o mercado, no entanto, seu conhecimento ainda é limitado no território brasileiro (SOUZA *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020).

O araçá-boi (*Eugenia stipitata*) (FIGURA 3), conhecido popularmente como fruta iogurte, exibe uma forma esférica com diâmetro variando entre 5 a 10 cm e peso de aproximadamente 150 a 200 gramas. A polpa desse fruto é carnuda, succulenta e representa de 60 a 90% de sua massa total, caracterizando-se pela presença de fibras finas (ARAÚJO *et al.*, 2021). O fruto dessa espécie é notável por suas características sensoriais, apresentando aroma adocicado e acidez elevada, o que limita seu consumo *in natura*. Em vez disso, é comercializado principalmente como polpa congelada ou utilizado como matéria-prima na fabricação de diversos produtos alimentícios, como sorvetes, licores, geleias e bombons (SANTOS *et al.*, 2017; ANDRADE *et al.*, 2021).

Figura 3 - Espécie *Eugenia stipitata* McVaugh. (A) vista geral da planta em condições de campo; (B) fruto *in natura* e (C) fruto em corte horizontal



Fonte: Autora (2023).

O fruto possui elevado teor de água e sua composição inclui carboidratos, fibras, minerais, consideráveis teores de vitaminas, com destaque para a vitamina C, e compostos fenólicos como miricetina, quercetina e ácido gálico (NERI-NUMA *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2018). Em decorrência da sua composição nutricional e dos seus compostos bioativos, o fruto apresenta potencialidades biotecnológicas. Virgolin *et al.* (2017) realizaram estudos sobre a

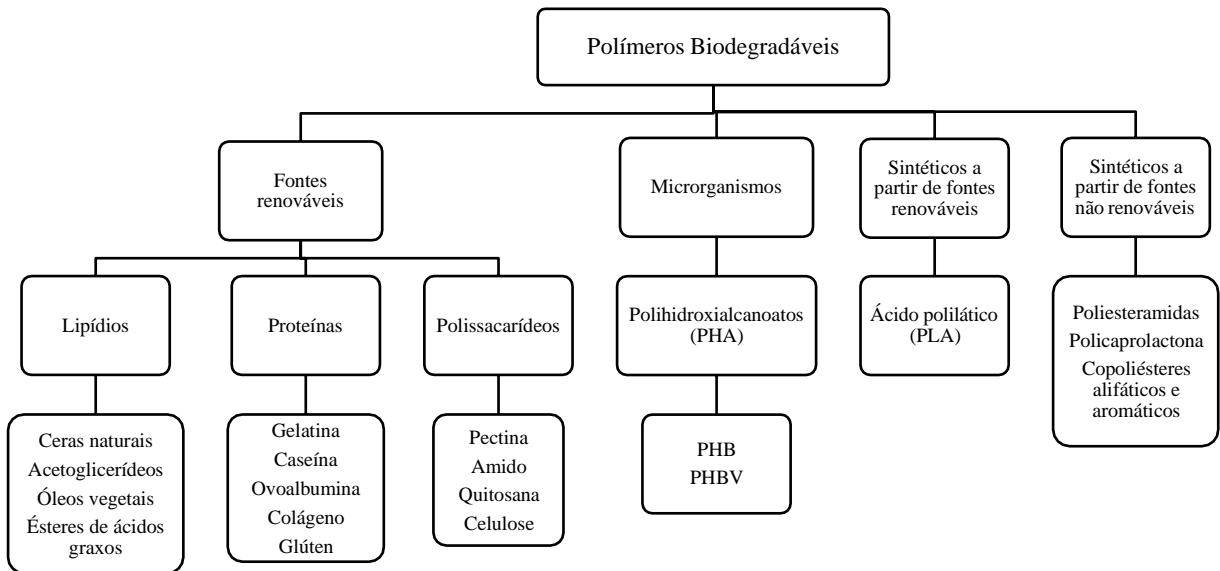
composição e atividade antioxidante. Já Araújo *et al.* (2021) corroboraram sobre a presença de compostos fenólicos presentes em frações de araçá-boi. Neves *et al.* (2015) constataram que a polpa e a casca da espécie apresentam teores de compostos fenólicos totais maiores que cajá (*Spondias lutea* L), inajá (*Maximiliana maripa* Aublet Drude) e uxi (*Endopleura uchi* Huber).

De acordo com Medeiros *et al.* (2003), o óleo extraído das folhas do araçazeiro possui alta capacidade antimicrobiana. Neri-Numa *et al.* (2013) apontaram que o extrato etanólico da polpa de *Eugenia stipitata* apresentou propriedades antimutagênicas e antígenotóxicas, revelando-se como um agente preventivo efetivo contra o câncer. Nesse contexto, estudos referentes às propriedades do fruto aumentam a possibilidade de utilização da espécie e incentivam o desenvolvimento de produtos inovadores.

3.4 Polímeros e filmes biodegradáveis

Em virtude da crescente preocupação ambiental, a pesquisa e a disseminação da produção de materiais a partir de polímeros biodegradáveis têm se intensificado na sociedade. Essa categoria de polímeros abrange aqueles que são susceptíveis à degradação por microrganismos, resultando na formação de biomassa, dióxido de carbono e água como produtos finais (BRITO *et al.*, 2011; SIMAN FILHO & SANFELICE, 2018).

Os polímeros biodegradáveis podem ser derivados de fontes renováveis, como recursos vegetais e animais, ou sintetizados por microrganismos. Além disso, também podem ser obtidos a partir de fontes não renováveis (FIGURA 4), cuja classificação permite a visualização dos polímeros de acordo com o seu processo de obtenção (SIMAN FILHO & SANFELICE, 2018; KUMAR *et al.*, 2020).

Figura 4 - Polímeros biodegradáveis de acordo com o processo de obtenção

Fonte: Autora (2023).

Dentre essa classificação, os polímeros obtidos a partir de fontes renováveis podem ser utilizados na produção de filmes ou coberturas com propriedades semelhantes aqueles obtidos de materiais petroquímicos (AL-NAJI *et al.*, 2021). O uso de polímeros naturais na produção de biofilmes é recomendada devido à sua capacidade de formar uma matriz contínua, homogênea e coesa. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais focadas na síntese e no aprimoramento das propriedades mecânicas e térmicas desses materiais, a fim de expandir sua aplicabilidade (GAGLIERI *et al.*, 2022).

Os filmes biodegradáveis compreendem películas produzidas a partir de materiais biológicos, que apresentam como principal função proteger a superfície de um produto (TAVASSOLI-KAFRANI *et al.*, 2016). Uma das aplicações dos filmes biodegradáveis é o desenvolvimento de embalagens alimentícias capazes de garantir a conservação e a qualidade nutricional dos produtos (ASSIS & BRITO, 2014; SANTACRUZ *et al.*, 2015; BARBOZA *et al.*, 2022).

O filme pode ser apresentado em duas formas distintas: filmes sólidos ou soluções filmogênicas. Os filmes sólidos produzidos em laboratório, geralmente são obtidos a partir da técnica de *casting*, resultando em uma película fina pré-formada, separada do produto. Em escala industrial, é possível obter o filme por meio de processos como extrusão, coextrusão para filmes multicamadas, laminação e secagem em rolos (VILLADIEGO *et al.*, 2005). Por outro lado, as soluções filmogênicas ou coberturas são formuladas através da suspensão ou emulsão,

que é aplicada diretamente na superfície do produto e, em seguida, se converte em uma película (VILLADIEGO *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2010).

A formulação de uma solução filmogênica requer a presença dos seguintes componentes essenciais: agente de alta massa molecular ou formadores de matriz (lipídios, proteínas ou polissacarídeos); solvente (água, etanol ou mistura etanol/água); plastificante (glicerol, sorbitol, tricetina ou ácidos graxos); e, quando necessário, ajustadores de pH (como ácido cítrico, hidróxido de amônio, entre outros) (SILVA *et al.*, 2013). É importante ressaltar que a seleção do agente formador da matriz para a fabricação do filme é influenciada pelas características do alimento a ser revestido e pelos objetivos almejados com o revestimento. Portanto, fatores como estabilidade microbiológica, solubilidade, transparência, propriedades mecânicas, sensoriais e permeabilidade ao vapor de água e gases devem ser cuidadosamente considerados, pois desempenham um papel determinante nessa escolha (SILVA, 2017; ASEVEDO *et al.*, 2021).

Revestimentos semelhantes têm sido extensivamente empregados para preservar as propriedades físico-químicas e organolépticas de frutas e hortaliças, uma vez que esses alimentos frescos são altamente suscetíveis à deterioração e enfrentam diversos desafios em relação à conservação, tais como processos respiratórios, fermentação e putrefação (NOBRE, 2011). Dessa forma, a aplicação de um revestimento envolvente tem uma contribuição significativa na redução das perdas pós-colheita (LEMOS *et al.*, 2008), visto que são capazes de prolongar a vida útil destes, pois podem criar uma barreira semipermeável contra a água, oxigênio, umidade e movimento de soluto (PODSHIVALOV *et al.*, 2017; SORADECH *et al.*, 2017).

3.4.1 Obtenção de filmes a partir de fontes renováveis

Os filmes lipídicos são formulados a partir de ceras naturais, acetoglicerídeos, óleos vegetais e ácidos graxos (RODRIGUES *et al.*, 2016; COSTA *et al.*, 2018). Devido à sua natureza hidrofóbica, os revestimentos podem oferecer uma excelente barreira contra a umidade, além de proporcionar um brilho atrativo. Essa aplicabilidade é favorável para produtos alimentícios altamente perecíveis, como frutas, legumes e vegetais (CHEVALIER *et al.*, 2018; BARBOZA *et al.*, 2022). Entretanto, os filmes à base de lipídios apresentam baixas propriedades mecânicas, tendem a formar fissuras e apresentam falta de homogeneidade, resultando em possíveis alterações sensoriais. Além disso, esses filmes são sensíveis à oxidação, apresentam baixa adesão ao produto e, em certos casos, a alta barreira a gases que

estabelecem pode levar à criação de condições anaeróbicas (CUTER, 2006; HAMEDI *et al.*, 2017; BARBOZA *et al.*, 2022).

Proteínas como gelatina, caseína, ovoalbumina, colágeno, glúten de trigo, dentre outros, são compostos comumente utilizados para a produção de biofilmes comestíveis (HASSAN *et al.*, 2018). Os filmes proteicos apresentam diversas vantagens, como transparência, homogeneidade, flexibilidade, ótimas propriedades mecânicas e atuam como barreira semipermeável à umidade, gases e compostos aromáticos (LIMPAN *et al.*, 2010; COSTA *et al.*, 2017; HASSAN *et al.*, 2018). Contudo, o uso de proteínas em revestimentos para fins alimentícios apresenta limitações devido à possibilidade de causar reações alérgicas (HAMEDI *et al.*, 2017). Além disso, a natureza hidrofílica das proteínas acarreta em propriedades inadequadas de barreira à umidade, como permeabilidade ao vapor de água, inchaço ou solubilidade (COSTA *et al.*, 2018).

Os polissacarídeos mais utilizados para a produção de revestimentos biodegradáveis comestíveis são a pectina, amido, quitosana e celulose. Devido à predominância de grupos altamente polares, os filmes à base de polissacarídeos são naturalmente hidrofílicos (GENSKOWSKY *et al.*, 2015). O uso desses revestimentos contribui de maneira significativa nos aspectos visuais de frutas e hortaliças, atribuindo brilho e proporcionando o retardo da perda de umidade nos alimentos (YOUSUF *et al.*, 2018). Os mesmos também possuem baixa permeabilidade a gases, auxiliando na redução do escurecimento enzimático devido à ação das polifenoloxidasas (COSTA *et al.*, 2017).

De acordo com Luvielmo e Lamas (2012), o uso de filmes biodegradáveis à base de polissacarídeos de origem vegetal e animal apresenta resultados satisfatórios no que se referem ao aumento de vida de prateleira de frutas. Oliveira Fonseca *et al.* (2016) avaliaram a influência de filmes à base de amido, alginato e arboximetilcelulose (CMC) em goiabas “Pedro sato” (*Psidium guajava*) e constataram que tanto o amido quanto o alginato foram eficazes em retardar o amadurecimento das frutas durante um período de armazenamento de quatro dias, quando mantidas sob refrigeração. Sales *et al.* (2021) analisaram a aplicação de filmes biodegradáveis à base de amido de milho, incorporados com extrato de própolis-verde, na conservação de bananas-prata (*Musa spp.*) e relataram que as frutas embaladas apresentaram menor perda de massa em comparação com as amostras sem o revestimento comestível.

Silva *et al.* (2015) demonstraram em seus estudos que a utilização de quitosana a 2% na forma de filme sólido aplicado em amendoim, reduziu a concentração de esporos e aflatoxinas de *Aspergillus parasiticus*. Asevedo *et al.* (2021), avaliaram a aplicação de cobertura filmogênica comestível à base de pectina extraída de cajá (*Spondias mombin*) em acerolas

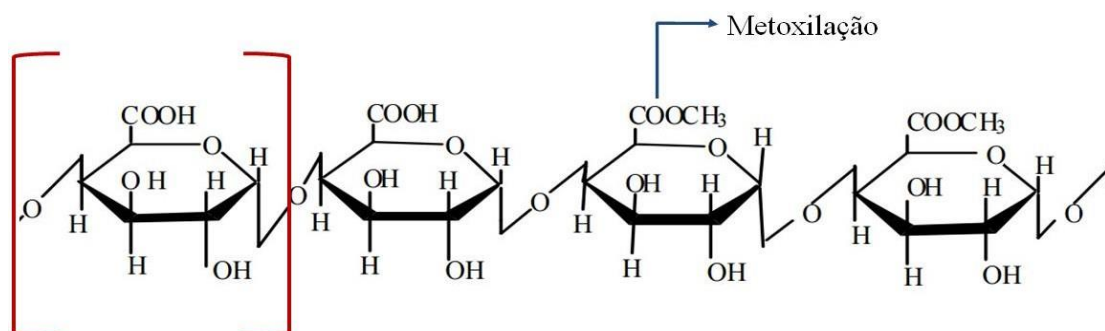
verdes (*Malpighia emarginata*) e constataram que o revestimento reduziu a perda de massa, indicando que a cobertura favoreceu o atraso na maturação dos frutos revestidos. É importante ressaltar que os filmes e as coberturas à base de polissacarídeos apresentam limitações em suas propriedades mecânicas e de barreiras, que podem ser contornadas utilizando plastificantes na sua formulação, tornando o biofilme mais elástico (GALDEANO *et al.*, 2014; DIAS *et al.*, 2015).

3.4.2 Filmes à base de pectinas

As pectinas são substâncias que formam uma família dentro do grupo dos polissacarídeos complexos, estando presentes nas células vegetais, constituindo as paredes celulares, estando associadas à lignina, celulose e hemicelulose (BRANDÃO & ANDRADE, 1999). Este heteropolissacarídeo foi descoberto por Nicolas Louis Vauquelin em 1790. Contudo, somente em 1824, com os trabalhos do químico e farmacêutico francês Henri Braconnot, passaram a estudar a principal característica deste grupo e suas propriedades gelificantes (CANTERI *et al.*, 2012; FANI, 2012;).

A principal estrutura base das pectinas é o homopolímero de ácido galacturônico, unidos por ligações glicosídicas α -(1→4) (FIGURA 5) com grau variável de grupos carboxílicos que podem estar parcialmente esterificados por metoxilas (VORAGEN *et al.*, 2009). As cadeias de resíduos galacturonato podem ser interrompidas por unidades de L-ramnose, as quais estão ligadas às cadeias laterais formadas por açúcares neutros. Açúcares como D-galactose, D-xilose, L-arabinose, L-fucose, também podem ser encontrados em proporções variáveis (VORAGEN *et al.*, 2009).

Figura 5 - Estrutura química da cadeia pectínica



Ácido galacturônico

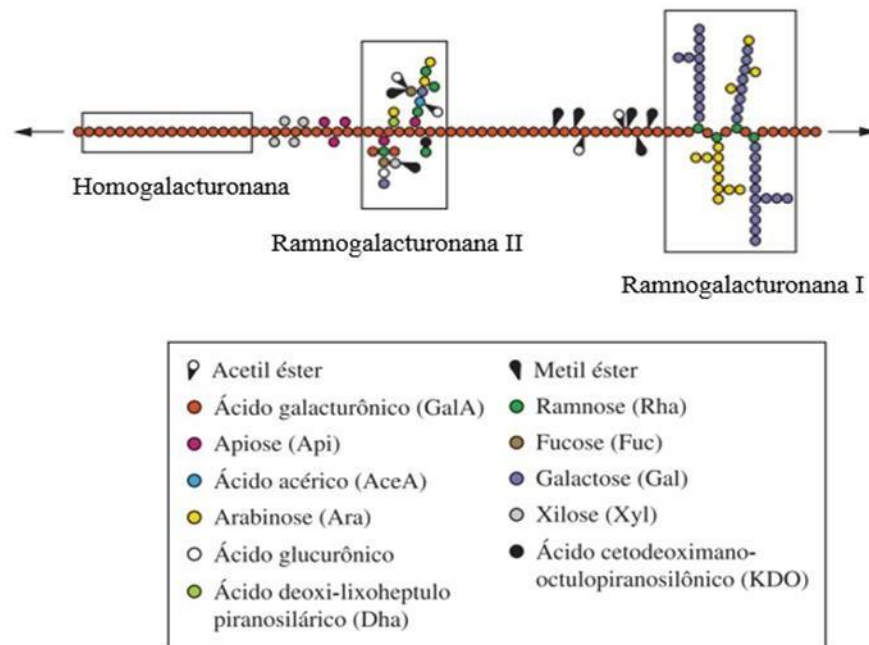
Fonte: Adaptado de Jesus (2017).

As pectinas são polissacarídeos que podem consistir em uma variedade de monossacarídeos, com até dezessete diferentes tipos presentes em sua estrutura. Essa diversidade resulta em diferentes tipos de polissacarídeos, sendo os mais comuns a homogalacturonana e as ramnogalacturonanas, que são classificadas em tipo I e tipo II. A compreensão dessa complexidade estrutural representa um desafio para a criação de um único modelo que possa acomodar todas as informações disponíveis, conforme ilustrado na Figura 6 (VINCKEN *et al.*, 2003; VORAGEN *et al.*, 2009).

A homogalacturonana (HG) é o componente mais abundante encontrado nas paredes celulares, representando aproximadamente 60-65% do total das pectinas presentes nas plantas (VINCKEN *et al.*, 2003; WILLATS, 2006; MOHNEN, 2008). A ramnogalacturonana I (RG-I), por sua vez, compõe cerca de 20-35% das pectinas e é composta principalmente pelos dissacarídeos arabinana e galactana. Já a ramnogalacturonana II (RG-II) é o segmento mais complexo em termos estruturais, representando aproximadamente 10% das pectinas, com pouca variação entre diferentes espécies vegetais (DRANCA *et al.*, 2018).

A capacidade da pectina de formar géis é influenciada por vários fatores, que incluem a presença de grupos polares livres, como hidroxilas, a estrutura tridimensional, o pH, a solubilidade, a concentração da pectina em dispersão, a massa molar, o grau de metoxilação, a tecnologia empregada, a distribuição dos grupos ao longo da cadeia pectica e a composição das cadeias laterais (CANTERI *et al.*, 2012). Devido a essa habilidade, a pectina possui um valor significativo na indústria de alimentos como um aditivo natural (HAMINIUK, 2009). Além disso, a pectina tem despertado grande interesse no desenvolvimento de produtos biotecnológicos, como revestimentos biodegradáveis, podendo ser aplicada em áreas como farmacêutica, indústria têxtil, embalagens alimentícias e outros setores (TANZEELA *et al.*, 2019).

Figura 6 - Representação da cadeia pécica



Fonte: Adaptado de Canteri, Wosiacki, Scheer (2012).

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos visando formulações de filmes e revestimentos biodegradáveis e comestíveis utilizando a pectina. Chaichi *et al.* (2017) formularam e caracterizaram um filme comestível à base de pectina comercial e nanocelulose cristalina onde, ao final do trabalho, apresentaram um produto resistente, totalmente biodegradável e com potencial para o desenvolvimento de embalagem para alimentos.

Mendes *et al.* (2019) realizaram estudos utilizando pectina reforçada com borra de café para o desenvolvimento de filmes, e verificaram que incorporação resultou no melhoramento da estabilidade térmica e na taxa de permeabilidade a gases desse filme. Meerasri e Sothornvit (2020) corroboraram com a formulação e caracterização de filmes a partir de pectinas incorporada com ácido gama-aminobutírico, cujo resultado foi um filme com propriedades antioxidantes. Shivangi *et al.* (2021) ao desenvolver e caracterizar um filme comestível à base de pectina cítrica contendo extrato de folha de amoreira e seus componentes bioativos, sugeriram que os filmes comestíveis ecologicamente corretos desenvolvidos podem ser usados como um material de embalagem/revestimento de alimentos alternativos naturais para prolongar a vida útil de frutas e legumes.

Asevedo *et al.* (2021) realizaram trabalhos utilizando a pectina extraída do cajá amarelo (*Spondias mombin* L.) para a formulação de filmes biodegradáveis, onde obtiveram uma solução filmogênica com grau de esterificação de 46%, ótimas propriedades mecânicas e efeito antimicrobiano contra bactérias gram-negativas, sendo um produto com potencial para produzir

embalagens ativas para alimentos. Oliveira *et al.* (2021) corroboraram com a formulação e caracterização de filmes à base de pectina extraída do epicarpo do jenipapo (*Genipa americana*), pitaya vermelha (*Hylocereus polyrhizus*) e carambola (*Averrhoa carambola*). Nesse estudo, foram avaliadas as propriedades bioativas dos filmes, demonstrando que a formulação desses materiais apresenta uma alternativa viável para o uso em embalagens ativas na indústria alimentícia.

3.4.3 Produção de filmes pelo método de *casting*

O método de *casting* baseia-se na evaporação do solvente contido na solução filmogênica espelhada sobre a superfície (placa de Petri, placas de polipropileno etc.), cujo processo pode ser acelerado pelo uso de aquecimento (PAVINATTO *et al.*, 2022). Esta técnica, por ser um processo simples e barato, é utilizada com frequência para a produção de filmes em escalas laboratoriais e piloto (RHIM *et al.*, 2006; PAVINATTO *et al.*, 2022).

Na produção de filmes por esse método, inicialmente, o polímero base utilizado para formar a matriz estrutural é selecionado e dissolvido/disperso em um solvente, posteriormente, a solução obtida é vertida em um molde pré-definido e segue para secagem até a total evaporação do solvente, formando um filme polimérico que adere ao molde (JENSEN *et al.*, 2015; SUHAG *et al.*, 2020). Yang *et al.* (2019) destacam que o uso da técnica de *casting* para a produção de filmes leva a uma melhor interação entre as partículas, tornando o empacotamento das mesmas mais homogêneo. Além disso, esse método possui uma série de características especiais como pureza óptica superior, poucas manchas, transparência, planicidade e orientação isotrópica (SIEMANN, 2005; YANG *et al.*, 2019).

Apesar da facilidade, esse método possui algumas desvantagens como a restrição de formas, desnaturação de polímeros naturais e outras moléculas que são introduzidas nos polímeros pelo solvente (SAIT & MA, 2009). Há também uma restrição na quantidade de filme a ser produzido por *casting* e a despadroneização dos níveis de evaporação e temperaturas que podem levar a formação de filmes com características distintas (SAIT & MA, 2009; FAKHOURY *et al.*, 2012).

A utilização de secadores ventilados, secador de bandeja, micro-ondas e secadores a vácuo, são aplicados no método de *casting* para facilitar a remoção de solventes e *peeling* de filme (CHA & CHINNAN, 2004). Esta é uma etapa crucial, visto que, possui influência na estrutura cristalina, propriedades mecânicas e de barreira dos filmes produzidos (TAPIA-BLÁCIDO *et al.*, 2013; SUHAG *et al.*, 2020).

3.4.4 Agente plastificante

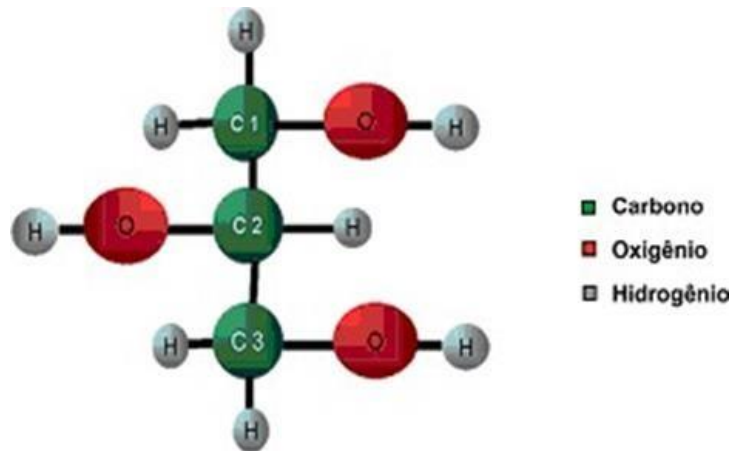
Os plastificantes são aditivos não voláteis de baixo peso molecular (CANEVAROLO JR., 2010). Na produção de soluções filmogênicas são usados com a finalidade de melhorar as características físicas, como o aumento da flexibilidade, alongamento e tenacidade da película, evitando possíveis rupturas durante o manuseio e armazenagem (VIEIRA *et al.*, 2011). Esses aditivos são compostos por cadeias poliméricas que, quando incorporados aos filmes, estabelecem uma interação molecular que reduz as forças coesivas entre as moléculas ao longo das cadeias. Isso resulta em uma diminuição da rigidez dos filmes (CANEVAROLO JR, 2010; SOTHORNVIT *et al.*, 2010).

Segundo Pellá *et al.* (2020), a adição de plastificantes de grupos hidroxila, tais como glicerol, sorbitol ou polietilenoglicol em concentrações de 15 a 30%, além de reduzir a rigidez, diminuem a temperatura de transição vítrea e aumentam a distribuição de soluções de formação de película. Porém, a adição dos plastificantes, podem causar aumento na permeabilidade ao vapor de água e gases (Pellá *et al.*, (2020).

Assim, para obter o melhor desempenho mecânico com o menor aumento possível na permeabilidade, é necessário realizar uma seleção cuidadosa e uma concentração adequada do plastificante durante a produção do filme (SOTHORNVIT *et al.*, 2010). Entre os diferentes aditivos plastificantes, o glicerol é amplamente empregado devido à sua excelente estabilidade e habilidade de interação com cadeias biopoliméricas hidrofílicas (OTONI *et al.*, 2017).

O glicerol (propano-1,2,3-triol) (FIGURA 7) é uma substância líquida obtida tanto de fontes naturais como da indústria petroquímica. Apresenta características higroscópicas, é incolor, possui sabor adocicado, não tem odor, é viscoso e solúvel em água e álcool. Além disso, é considerado seguro para o consumo humano (BEATRIZ *et al.*, 2011). Na indústria alimentícia, o glicerol tem uma ampla aplicação como geleificante, espessante, emulsificante e estabilizante (RESA *et al.*, 2014; LIMA *et al.*, 2022).

Figura 7 - Estrutura química do glicerol (propano-1,2,3-triol)



Fonte: EMBRAPA (2020).

3.5 Embalagens ativas

As embalagens tradicionais alimentícias possuem como função básica proteger o produto, formando uma barreira entre o meio externo e interno, não podendo interagir com o alimento acondicionado (SHARMA *et al.*, 2021). No entanto, recentes progressos em estudos relacionados a embalagens ativas têm sido realizados visando a incorporação de componentes que possam liberar ou absorver substâncias, a fim de melhorar a vida útil e conservação dos alimentos (YILDIRIM *et al.*, 2018; VILELA *et al.*, 2018).

Os aditivos frequentemente adicionados às embalagens ativas incluem antioxidantes, agentes antimicrobianos, vitaminas, aromas e corantes, com o objetivo de garantir a segurança alimentar e prolongar a vida útil dos produtos nas prateleiras (BHARGAVA *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2020). Em razão dos problemas ambientais decorrentes do uso de embalagens de origem petroquímica, pesquisas têm se voltado para a utilização de polímeros e compostos ativos naturais na fabricação de embalagens ativas. Essa abordagem visa aprimorar a segurança dos consumidores e, simultaneamente, mitigar os impactos adversos associados aos plásticos provenientes de fontes petroquímicas (NORCINO *et al.*, 2020).

Na literatura, há diversos trabalhos que relatam o uso de combinações de polímeros e compostos naturais para desenvolver embalagens ativas. Como por exemplo, matriz polimérica à base de quitosana e óleos essenciais de canela; amido reforçado com resíduos de café e incorporado com ampicilina; uso de pectina com nanoemulsões de óleo de copaíba (MOURA *et al.*, 2014; PAULINO *et al.*, 2019; NORCINO *et al.*, 2020).

Trabalhos como esses mostram a relevância do uso de produtos de origem natural para o desenvolvimento de embalagens ativas biodegradáveis, pois além de oferecerem vantagens

para os alimentos, tais materiais desempenham um papel significativo na preservação do meio ambiente. Por essa razão, despertam considerável interesse tanto na indústria alimentícia quanto na sociedade em geral (SHRUTHY *et al.*, 2020). Contudo, o desenvolvimento de embalagens ativas exige a realização de testes abrangentes que avaliem a utilização de aditivos, a incorporação de nanocompostos, a seleção de microrganismos a serem afetados pela embalagem (em embalagens antimicrobianas), bem como a qualidade e eficácia pretendida, sendo uma tecnologia em amplo desenvolvimento e demandas a serem estudadas (MOURA *et al.*, 2014; MORELLI *et al.*, 2015; SALARBASHI *et al.*, 2016).

3.6 Frutos minimamente processados

O hábito alimentar da população mundial está em constante mudança devido à crescente escassez de tempo nas atividades diárias, resultando em uma maior demanda por produtos alimentícios que ofereçam qualidade, durabilidade, conveniência e segurança ao consumidor (FEDDERN *et al.*, 2021). O mercado dos minimamente processados é um segmento em expansão e consolidação, com o aumento significativo desses produtos trazendo várias vantagens para os consumidores. Essas vantagens incluem a disponibilidade de produtos padronizados, fácil acesso a frutas e hortaliças frescas, necessidade reduzida de espaço para armazenamento e menor desperdício (ALI *et al.*, 2017; CORATO, 2020).

Os frutos minimamente processados são preparados através de intervenções físicas e químicas, tais como lavagem, descascamento, corte/fatiamento, sanitização, centrifugação e embalagem, com o objetivo de torná-los prontos e seguros para o consumo. É fundamental ressaltar que esse processo deve preservar os atributos de qualidade, mantendo as características nutritivas e sensoriais dos frutos, como frescor, aroma, cor e sabor (FERREIRA *et al.*, 2022).

Entretanto, em decorrência dos danos mecânicos e injúrias sofridas, as frutas processadas apresentam metabolismo mais elevado em relação aos *in natura*, promovendo aumento na produção de etileno e na atividade de trocas gasosas, tornando esses produtos mais perecíveis, além de suscetíveis ao ataque de microrganismos (MARIAH *et al.*, 2022).

O aumento da superfície de contato proveniente do processamento mínimo resulta na oxidação de compostos fenólicos, promovendo o escurecimento enzimático, como também acarreta o aumento da taxa de evaporação de água, ocasionando a desidratação dos frutos cortados. Fatores como esses devem ser levados em consideração pois são limitantes para a comercialização e consumo e, portanto, deve-se buscar alternativas para contornar esses problemas (BARRETO *et al.*, 2021; CORATO, 2020). Alguns fatores podem ser utilizados com

o objetivo de mitigar as desordens fisiológicas, bioquímicas e microbiológicas observadas em alimentos minimamente processados. Alguns exemplos incluem a implementação de boas práticas durante as etapas de processamento, a modificação da temperatura de armazenamento e a utilização de embalagens apropriadas (CENCI, 2011; COFELICE *et al.*, 2019).

No tocante às embalagens, pesquisas vêm sendo realizadas visando o desenvolvimento de filmes e coberturas capazes de aumentar a vida de prateleira dos frutos minimamente processados, possibilitando o aumento desse mercado (MITELUT *et al.*, 2021).

Garcia *et al.* (2022) desenvolveram um revestimento comestível à base de resíduo de frutas, adicionado de polpa de acerola, e verificaram resultados negativos significativos na conservação em mamão e morango minimamente processados, durante seis dias de armazenamento. Besinela Júnior *et al.* (2010) avaliaram a aplicação de revestimentos à base de quitosana, alginato e carboximetilcelulose em mamão (*Carica papaya* L.) minimamente processado e constataram que os filmes não influenciaram nos aspectos sensoriais (aroma, sabor, textura e aparência) até o 4º dia de armazenamento, entretanto, foi observado que os revestimentos não influenciaram nas reduções de perda de massa e no teor de licopeno.

Basaglia *et al.* (2021) avaliaram o impacto da cobertura comestível à base de quitosana contendo óleo essencial de canela em diferentes concentrações na vida útil do abacaxi minimamente processado, armazenados em 15 dias a 5 °C. Os resultados demonstraram que os revestimentos utilizados foram eficazes na preservação do fruto em comparação com a amostra controle. Além disso, eles mostraram redução no crescimento de bolores e leveduras, bem como na perda de peso e na firmeza do fruto.

Portanto, o progresso na criação de embalagens e revestimentos destinados a frutas minimamente processadas surge como uma abordagem viável para prolongar a vida útil desses produtos. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais e análises mais aprofundadas das aplicações dos frutos, a fim de compreender adequadamente o desempenho desses revestimentos nas diferentes etapas do processo de corte.