

## **Embalagens ativas antioxidantes: uma estratégia para a conservação de alimentos com alto teor lipídico**

**Antioxidant packaging: a strategy for the preservation of fatty foods**

**Envases antioxidantes: una estrategia para la conservación de alimentos con alto contenido en lípidos**

Recebido: 15/08/2022 | Revisado: 24/08/2022 | Aceito: 25/08/2022 | Publicado: 02/09/2022

**Luis Fernando de Assis Almada**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-9836>

Instituto Federal de Ciência e Educação do Sudeste de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [alfaalmada@gmail.com](mailto:alfaalmada@gmail.com)

**Maria José Novaes Firmo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9943-6386>

Instituto Federal de Ciência e Educação do Sudeste de Minas Gerais, Brasil

E-mail: [mjfirmo@gmail.com](mailto:mjfirmo@gmail.com)

**Tarsila Rodrigues Arruda**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1721-7241>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [tarsilaarruda@gmail.com](mailto:tarsilaarruda@gmail.com)

**Bruno Ricardo de Castro Leite Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9030-2819>

Universidade Federal de Viçosa, Brasil

E-mail: [bruno.leitejr@ufv.br](mailto:bruno.leitejr@ufv.br)

### **Resumo**

As embalagens bioativas com ação antioxidante auxiliam na manutenção das características sensoriais e nutricionais dos alimentos ricos em lipídios. Essa revisão apresenta estudos do emprego dessas embalagens com objetivo de minimizar as perdas e estender a vida útil destes produtos. Diversos compostos com ação antioxidante podem ser utilizados para este fim, dentre eles, a utilização de compostos naturais (extratos de plantas e óleos essenciais) tem emergido como alternativa para o atendimento dos anseios dos consumidores. Estudos têm demonstrado interessante prospecção para aplicação das embalagens ativas antioxidantes visando a manutenção da qualidade destes alimentos. Uma nova tendência também se destaca no contexto do desenvolvimento sustentável, com a produção de embalagens ativas a partir de polímeros *bio-based*. Todavia, urge-se a necessidade de mais estudos referentes a este assunto visando a produção de embalagens com adequadas propriedades tecno-funcionais, mecânicas e térmicas para produção em escala industrial visando a substituição das embalagens convencionais.

**Palavras-chave:** Embalagens poliméricas; Filmes biodegradáveis; Atividade antioxidante; Alimentos com alto teor lipídico.

### **Abstract**

Bioactive packaging with antioxidant action helps to maintain the sensory and nutritional characteristics of foods rich in lipids. This review presents studies on the use of these packages to minimize losses and extend the shelf life of these products. Several compounds with antioxidant action (plant extracts and essential oils) can be used for this purpose, among them, the use of natural compounds has emerged as a potential alternative to meet the desires of consumers. Studies have shown an interesting prospect for the application of active antioxidant packaging to maintain the quality of these foods. A new trend also stands out in the context of sustainable development, with the production of active packaging from bio-based polymers. However, there is an urgent need for further studies on this subject aiming at the production of packaging with adequate techno-functional, mechanical, and thermal properties for production on an industrial scale in order to replace conventional packaging.

**Keywords:** Polymeric packaging; Biodegradable films; Antioxidant activity; Fatty foods.

### **Resumen**

Los envases bioactivos con acción antioxidante ayudan a mantener las características sensoriales y nutricionales de los alimentos ricos en lípidos. Esta revisión presenta estudios sobre el uso de estos envases con el fin de minimizar las pérdidas y extender la vida útil de estos productos. Varios compuestos con acción antioxidante pueden ser utilizados para este fin, entre ellos, el uso de compuestos naturales (extractos de plantas y aceites esenciales) ha surgido como una potencial alternativa para satisfacer los deseos de los consumidores. Los estudios han mostrado una perspectiva

interesante para la aplicación de envases antioxidantes activos para mantener la calidad de estos alimentos. También se destaca una nueva tendencia en el contexto del desarrollo sostenible, con la producción de envases activos a partir de polímeros *bio-based*. Sin embargo, existe una necesidad urgente de más estudios sobre este tema con el objetivo de producir envases con propiedades tecno funcionales, mecánicas y térmicas adecuadas para la producción a escala industrial con el fin de reemplazar los envases convencionales.

**Palabras clave:** Envases poliméricos; Películas biodegradables; Actividad antioxidante; Alimentos con alto contenido en lípidos.

## 1. Introdução

A conservação de alimentos pode ser afetada por vários fatores, resultando em alterações na qualidade e impactando também as características sensoriais dos produtos (alterações na cor e sabor). O crescimento de microrganismos e reações oxidativas podem ser mencionados como os principais entraves à manutenção da qualidade dos alimentos.

Considerando os alimentos com alto teor lipídico, os processos oxidativos são, na maioria dos casos, os responsáveis pela redução da sua vida de prateleira. A oxidação lipídica ocorre principalmente em alimentos com elevado conteúdo de lipídios insaturados. Ressalta-se ainda que tais processos podem ser iniciados a partir de radicais livres, impulsionados pela presença de oxigênio e/ou luz (Melo et al., 2019).

Neste cenário, a indústria de alimentos busca contornar esses problemas a partir de diversas estratégias como, por exemplo, a utilização de embalagens ativas incorporadas com substâncias com propriedades antioxidantes. Nos últimos anos, esforços têm sido destinados ao desenvolvimento de embalagens que possam ser aplicadas à estes alimentos mais susceptíveis à oxidação, como é o caso dos derivados do leite (manteiga, creme de leite), bolos, biscoitos, e produtos cárneos, afim de se manter a qualidade destes alimentos e, conseqüentemente, prolongar a vida de prateleira desses produtos (Carrizo et al., 2016; Gómez-Estaca et al., 2014).

Estudos e pesquisas-piloto têm sido aplicados no contexto das embalagens ativas antioxidantes, principalmente utilizando polímeros como material base. As embalagens plásticas apresentam grande versatilidade e, com a crescente preocupação ambiental, novos materiais biodegradáveis e/ou de fontes renováveis (*bio-based*) têm sido desenvolvidos em contrapartida aos plásticos convencionais, ampliando suas aplicações, incluindo a produção de embalagens ativas (Baghi et al., 2022). Neste contexto, filmes antioxidantes têm sido desenvolvidos a partir de polímeros fósseis ou *bio-based* e, mais ainda, a partir de antioxidantes sintéticos amplamente reconhecidos ou, principalmente, fazendo-se uso de novas substâncias antioxidantes oriundas de fontes naturais (por exemplo, extratos de plantas e óleos essenciais) (Arruda et al., 2022; Sanches-Silva et al., 2014).

Diante do mencionado, fica clara a necessidade de se explorar tais embalagens ativas no contexto dos alimentos com alto teor lipídico, apontando suas principais características e avanços recentes. A presente revisão tem o objetivo de apresentar exemplos de embalagens ativas e suas propriedades, considerando sua importância tecnológica e aplicações em alimentos ricos em lipídios.

## 2. Metodologia

Realizou-se uma revisão narrativa que tem por finalidade abordar e contextualizar o emprego de embalagens poliméricas ativas com ação antioxidante em alimentos com alto teor lipídico. Para isso, informações foram obtidas a partir de uma extensa pesquisa bibliográfica nas bases de dados: Scopus, Web of Science, Science Direct, Pubmed e Google Acadêmico. Durante a investigação dos artigos científicos, as palavras-chave “embalagens ativas”, “atividade antioxidante”, “embalagens biodegradáveis”, “oxidação”, “gordura”, “antioxidantes naturais” e “polímeros bioativos” foram utilizadas para seleção dos artigos publicados durante o período de 2014 a 2022.

Os critérios adotados para a seleção dos artigos incluíram estudos publicados em português e inglês, e minoritariamente

também foram utilizados de textos-base acerca da temática. A fim de se evitar possíveis fontes de viés e com base no objetivo do estudo, foram utilizados critérios de inclusão/exclusão e eliminação de duplicatas para elegibilidade (Pacheco et al., 2022). Inicialmente, foram identificados 4746 artigos, dos quais 1316 do Science Direct, 503 do Scopus, 363 do Web of Science, 200 do Pubmed e 2364 do Google Acadêmico (Tabela 1). Após os critérios de inclusão/exclusão e eliminação de duplicatas, a amostragem final foi de 54 artigos.

**Tabela 1.** Resumo da busca de dados e artigos selecionados para composição do “*corpus* da pesquisa”.

Base Eletrônica de Dados	Quantidade de artigos	Artigos selecionados após os critérios de seleção
Science Direct	1316	
Scopus	503	
Web of Science	363	
Pubmed	200	54
Google Acadêmico	2364	
<b>Total</b>	<b>4746</b>	

Fonte: Autores.

### 3. Embalagens e a Conservação dos Alimentos

A perda de alimentos durante toda a sua cadeia é significativa, gerando uma grande quantidade de desperdício e perdas econômicas. Logo, as embalagens visam reduzir tais perdas, auxiliando na manutenção da qualidade e contribuindo na preservação dos ingredientes, no acondicionamento, no transporte e, conseqüentemente, resultam, por si só, no prolongamento da vida de prateleira dos alimentos embalados. Os materiais utilizados nas embalagens de alimentos podem ser plásticos (incluídos os vernizes e revestimentos); celulose regenerada; elastômeros e borrachas; vidro; metais e suas ligas; dentre outros (ABRE, 2022).

Os materiais plásticos são amplamente empregados no acondicionamento de alimentos. Entretanto, a utilização indiscriminada associada ao descarte incorreto vem causando sérios problemas ambientais, especialmente considerando o elevado tempo de decomposição de grande parte dos materiais utilizados (por exemplo, plásticos de origem fóssil). Além disso, principalmente devido à pandemia de Covid 19, a demanda por embalagens primárias e secundárias teve um aumento significativo, reforçando a preocupação com os impactos ambientais ocasionados por esta mudança de comportamento dos consumidores (Al-Tayyar, et al., 2019). Diante deste contexto, materiais poliméricos *bio-based* estão se destacando dentro da indústria de alimentos por tornarem-se uma alternativa ambientalmente sustentável para substituição das dos plásticos convencionais (Bhargava et al., 2020; ABRE, 2022).

Além de dispor proteção, as embalagens de alimentos são estratégias importantes que podem ser decisivas na vantagem competitiva dentro da indústria de alimentos, correspondendo a expectativa dos consumidores, como o recente (e crescente) anseio por produtos mais próximos ao natural, seguros e contendo menor ou nenhum teor de conservantes sintéticos (Bom et al. 2019). Logo, novas funcionalidades estão sendo adicionadas às embalagens tradicionais, ditas passivas, como a introdução do conceito de embalagens ativas. Tais embalagens são caracterizadas pela interação intencional com o alimento acondicionado, liberando ou absorvendo substâncias no interior da embalagem, visando melhorar algumas de suas características (Yildirim et al., 2018). Neste contexto, as embalagens ativas podem ser uma ferramenta-chave na conservação de alimentos, principalmente aqueles mais susceptíveis à deterioração, como é o caso dos alimentos com alto teor lipídico.

#### 4. Reações de Deterioração em Alimentos com Alto Teor Lipídico

A maioria dos alimentos que contém óleos e/ou gorduras, principalmente em quantidades elevadas e cuja composição predominam ácidos graxos insaturados, estão susceptíveis a reações químicas que levam à sua deterioração; sendo as principais as reações de oxidação (de maior importância, devido à deterioração de ácidos graxos essenciais e vitaminas lipossolúveis), hidrólise e polimerização (Carocho, et al., 2018). A oxidação ocorre quando elétrons são retirados de um átomo ou de um grupo de átomos. Subsequentemente, ocorre uma reação de redução correspondente que envolve a incorporação de elétrons a um átomo ou um grupo de átomos diferentes (Damodaran, et al., 2010).

A oxidação lipídica é uma das reações mais importantes relacionadas à degradação dos alimentos, acarretando alterações nutricionais e sensoriais, como o aparecimento de sabores e odores desagradáveis conhecidos como ranço, perda de cor e textura, produzindo ainda alguns compostos tóxicos. Tais alterações são responsáveis por reduzir a qualidade do produto, consequentemente, sua vida útil. A quantidade de lipídios na composição dos alimentos pode ser um fator responsável pela velocidade de oxidação, tornando o produto vulnerável à deterioração oxidativa (Baron, et al., 2020).

Entre os componentes químicos dos lipídios estão os monoglicerídeos, diglicerídeos, triglicerídeos e ácidos graxos livres, os quais são propensos à oxidação, que ocorre de maneira espontânea. São diversas as etapas que ocorrem ao longo dessa reação, as quais são complexas e estão relacionadas ao tipo de estrutura lipídica e o meio onde se encontram, podendo acontecer durante seu processamento, armazenamento e distribuição (Damodaran, et al., 2010).

A auto-oxidação dos lipídios está associada à reação do oxigênio com ácidos graxos insaturados e ocorre em três etapas (iniciação, propagação e terminação), as quais são responsáveis pela formação de diferentes produtos, tais como novos radicais livres e compostos voláteis (Ramalho & Jorge, 2006). Estes últimos são os principais responsáveis pelo *off-flavor* que se desenvolve em alimentos que passaram por reações oxidativas, com o aparecimento de uma característica “rançosa” (rancidez oxidativa) (Melo et al., 2019). Dentre as formas de se controlar a ocorrência de processos oxidativos nos alimentos está o emprego de aditivos antioxidantes, os quais são definidos como “substância que retarda o aparecimento de alteração oxidativa nos alimentos” (Oliveira, 2019).

Além da classificação de acordo com a atuação, os antioxidantes podem ser divididos em sintéticos e naturais. Antioxidantes sintéticos são aplicados como aditivos alimentares para prevenir ou retardar a oxidação lipídica e apresenta, como vantagens, a praticidade e o baixo custo. A utilização desses compostos sintéticos é regulamentada e aprovada por legislações vigentes dentro de um limite de ingestão diária, que varia de acordo com cada país. Entretanto, mesmo com a ingestão controlada, a segurança dessas substâncias tem sido debatida nos últimos anos, devido ao seu potencial tóxico (Carocho, et al., 2018).

Entre os antioxidantes sintéticos mais conhecidos e utilizados estão o butil-hidroxianisol (BHA), butil-hidroxi-tolueno (BHT) e butil-hidroxi-quinona (TBHQ) que, embora sejam eficazes, apresentam problemas de solubilidade, sabores residuais e potencial tóxico. Por conta disso, antioxidantes naturais extraídos de plantas podem ser usados como alternativas aos sintéticos, por seu efeito equivalente ou ainda de maior inibição da oxidação e alta potencialidade nutricional e de segurança alimentar. Neste contexto, especiarias e ervas têm sido usadas pelo alto potencial antioxidante, sendo eficazes inibindo ou retardando a oxidação lipídica nos alimentos. Dentre as principais plantas usadas com o propósito de reduzir a velocidade de reações de oxidação, destacam-se o orégano, a quitosana e a canela (Upadhyay & Mishra, 2014; Arruda et al., 2022).

Dentre as substâncias com potencial antioxidantes destacam-se os ácidos fenólicos, com cerca de 8000 compostos encontrados em plantas, estando presentes em grande diversidade de produtos da natureza. O mecanismo de ação antioxidante dos ácidos fenólicos constitui-se na doação de hidrogênio e elétrons, além também da presença de radicais intermediários estáveis que impedem a oxidação lipídica (Oliveira, 2019).

Além da incorporação direta dos antioxidantes nos alimentos, tais substâncias têm sido investigadas na produção de embalagens ativas (Andrade-Del Olmo et al., 2019; Homayonpour et al., 2021; Staroszczyk et al., 2020). Os resultados

promissores obtidos, principalmente no contexto dos antioxidantes naturais, têm impulsionado o setor das embalagens e, mais ainda, demonstrado ser estratégia valiosa para conservação de alimentos com alto teor lipídico.

#### 4.1 Embalagens ativas para alimentos

O termo embalagem ativa foi apresentado pela primeira vez por Labuza e Breene (1989), sendo designado como uma categoria de embalagem que exerce um papel adicional na preservação de alimentos e uma resposta às mudanças contínuas nas demandas dos consumidores e tendências de mercado, elas incluem os absorvedores de oxigênio e etileno; eliminadores e emissores de gás carbônico, enzimas, controladores de umidade, sabor e odor, agentes antimicrobianos e antioxidantes (Rooney, 2005).

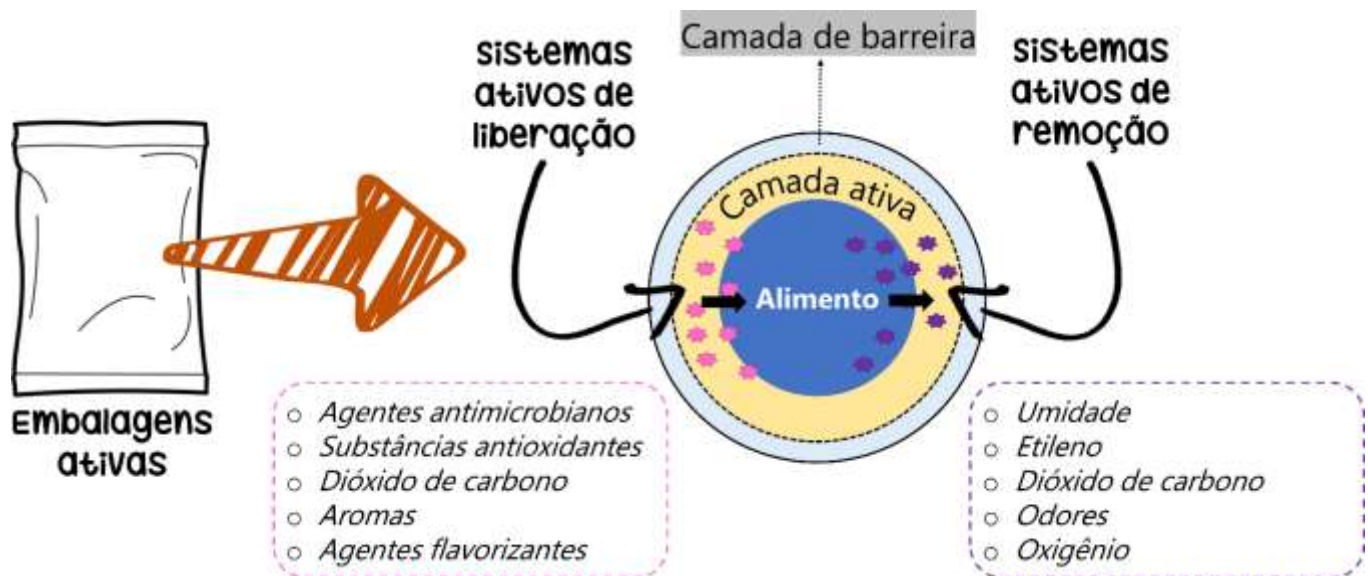
As embalagens ativas são parte de um novo conceito de embalagens devido a interação positiva do alimento, embalagem e ambiente, para melhorar e preservar a vida de prateleira do produto de modo a manter a sua qualidade, segurança e características sensoriais. A tecnologia empregada está fundamentada no processo de incorporação positiva de certos componentes em sistemas de embalagem que liberam ou absorvem aditivos e substâncias em sistemas de embalagem em seu interior, ou mesmo incorporados nos próprios materiais da embalagem (Landim et al., 2016; Severo et al., 2021). Tal interação pode ser realizada por contato direto, quando o alimento está em contato com a camada ativa da embalagem, ou por ação indireta, quando os compostos são liberados ou absorvidos pelo *headspace* da embalagem.

Revestimentos alimentícios ativos devem apresentar diversas características para que o alimento permaneça estável pelo maior período. Desta forma, um filme para ser aplicado como embalagem deve possuir boa resistência mecânica e flexibilidade, baixa permeabilidade ao vapor de água, boa estabilidade térmica e transparência adequada (Kuai et al., 2021; Wang et al., 2022). Além das características intrínsecas ao material utilizado, outros fatores são considerados importantes para o desenvolvimento das embalagens ativas, tais como: características bioquímicas do alimento, características inerentes ao componente bioativo (embalagens de liberação), interação química entre os componentes bioativos adicionados e a matriz polimérica, temperatura de armazenamento do alimento, coeficientes de transferência de massa e comportamento migratório dos componentes na interface embalagem x alimento ou embalagem x *headspace* x alimento (Mishra et al., 2021).

Nas últimas décadas houve um grande avanço na tecnologia e aplicação das embalagens, mas o uso de embalagens sintéticas com apenas a função de proteção ainda é muito utilizado (Monção et al., 2022). A quantidade de embalagens que retardam a oxidação lipídica em alimentos tem aumentado gradativamente, e apresentam resultados satisfatórios quando aplicados principalmente em alimentos de origem animal, sementes oleaginosas e seus óleos (Licciardello, 2017). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), estima-se que foram desperdiçados 931 milhões de toneladas de alimentos no ano de 2020 em todo o mundo. Diante do exposto, as embalagens ativas poderão contribuir com a redução desse número (Brasil, 2018). Como exemplo, estudos apontam o desenvolvimento de embalagens destinadas às hortaliças minimamente processadas, que além de reduzir as perdas, contribuiu para incentivar o consumo desses produtos (Zhong, et al., 2019; Sharma et al., 2021; Peron et al., 2022; Souza et al., 2022).

Como possibilidade de atuação das embalagens ativas, pode-se mencionar, principalmente: absorção de componentes (oxigênio, etileno, umidade e odor), liberação de componentes como substâncias bioativas, dióxido de carbono, aromas e agentes flavorizantes (Figura 1); possibilitando o aumento da vida de prateleira do produto (Yildirim et al., 2018).

**Figura 1.** Esquema representativo do mecanismo de ação das embalagens ativas (por contato direto).



Fonte: Autores.

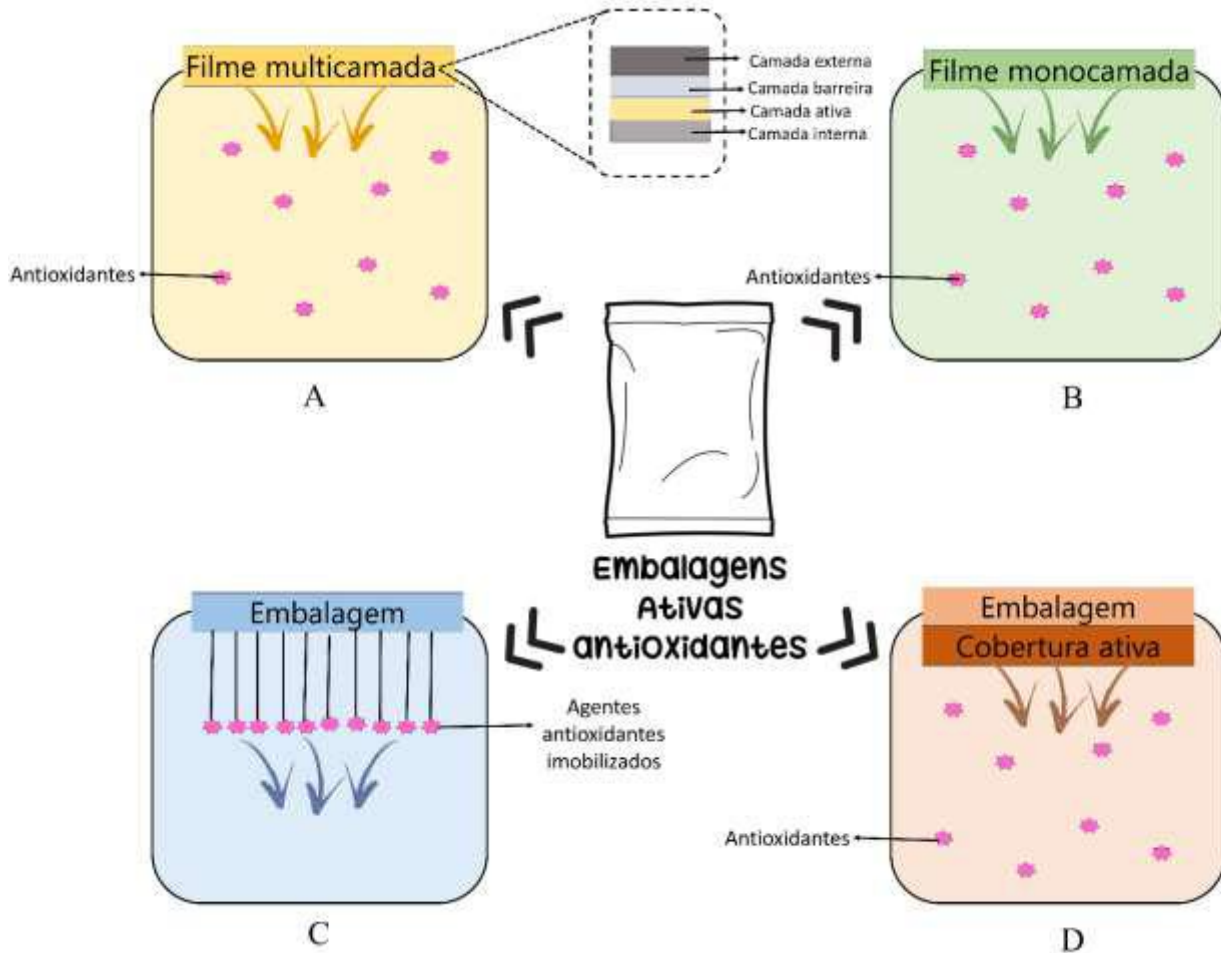
Conforme apresentado, as embalagens ativas podem ser produzidas a partir de diferentes mecanismos de ação e, mais ainda, utilizando diferentes componentes responsáveis pela atividade proporcionada (Figura 1). Além dos inúmeros estudos que têm sido desenvolvidos, atualmente já estão disponíveis no mercado alguns *pads*, filmes e sachês que atuam na absorção de compostos indesejáveis, gases e umidade, ou ainda apresentam interessantes propriedades bioativas (antimicrobianas/antioxidantes) e/ou sensoriais (aromatizantes) (Ma et al., 2018).

#### 4.2 Embalagens poliméricas biodegradáveis com propriedades antioxidantes

O desenvolvimento de embalagens biodegradáveis tem sido impulsionado pela necessidade de se reduzir os resíduos de embalagens produzidas pelo consumo de alimentos. Além disso, os polímeros tradicionais apresentam alto custo de reciclagem e grande gasto de energia. Assim, têm sido desenvolvidas embalagens sustentáveis e biodegradáveis, que podem ser ativas, sendo as mesmas adicionadas de substâncias para interação positiva com alimento, embalagem e ambiente, com o objetivo de manter a sua qualidade, segurança e características sensoriais (Landim et al., 2016).

Dentre os diversos tipos de embalagens ativas, destaca-se as embalagens com liberação de aditivos, como os conservantes e antioxidantes. Tais compostos, são capazes prolongar a vida de prateleira, podem ser liberados controladamente sobre a superfície de um alimento, através da difusão e ebulição a partir de um biofilme ou através de reação química ou enzimática (Sharma et al., 2020, Firouz, et al., 2021; Vidal et al., 2022; Fang et al., 2017). Os agentes antioxidantes a serem liberados pela embalagem ativa podem estar dispostos de diferentes formas para ação no alimento. A Figura 2 apresenta um esquema representativo da aplicação de agentes antioxidantes em embalagens ativas (Gaikwad et al., 2018).

**Figura 2.** Esquema representativo da aplicação e migração de componentes antioxidantes em embalagens ativas: A: Migração a partir de camada ativa presente entre camadas externas e interna em filme multicamada; B: Liberação do componente antioxidante diretamente do filme ativo; C: Agentes antioxidantes imobilizados na camada interna da embalagem; D: Componentes antioxidantes liberados a partir de cobertura interna à embalagem.



Fonte: Autores.

Conforme apresentado, os componentes antioxidantes podem ser incorporados de diferentes formas na embalagem ativa, o que será determinante na sua migração e, conseqüentemente, aplicabilidade da embalagem (Figura 2). Como exemplo de substâncias utilizadas como aditivos naturais de origem vegetal destacam-se os óleos essenciais e extratos de plantas condimentares. Esses compostos vem sendo cada dia mais pesquisados e empregados na produção de flavorizantes, antimicrobianos e antioxidantes (Filipini, et al., 2020; Manikandan, et al., 2020; Oliveira & Melo, 2020; Varghese, et al., 2020). Dentre as principais ações, essas substâncias são capazes de retardar/inibir reações de oxidação lipídica e escurecimento enzimático, o que contribuiu para manutenção das propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos quando comparada aos antioxidantes artificiais (Topuz & Uyar, 2020; Rangaraj et al., 2021). Entre os polímeros que mais se adaptam à biodegradação alude-se os naturais, hidrolisáveis ao gás carbônico, à água ou ao metano (Priyadarshi & Rhim, 2020; Wu, et al., 2021; Mangaraj et al., 2018).

Diversos estudos abordam a elaboração de embalagens ativas biodegradáveis com função antioxidante em alimentos com alto teor lipídico, enfatizando o uso de substâncias naturais, visando aumentar a vida de prateleira e mostrando ser uma possível opção para substituir aditivos sintéticos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Utilização de filmes biodegradáveis ativos com função antioxidante em alimentos com alto teor lipídico.

<b>Suporte Polimérico / Agente ativo / Alimento</b>	<b>Principais resultados</b>	<b>Referência</b>
Biomassa residual do óleo de café verde prensado a frio incorporando os extratos de torta de prensa e sedimento em filmes de carboximetilcelulose	Maior propriedade de barreira ao oxigênio e a luz UV, capacidade antioxidante e teor de peróxidos, o filme produzido contribuiu para a proteção de alimentos ricos em óleo.	(Vidal et al., 2022)
Álcool polivinílico (PVOH) e amido de milho (ST) com extrato de casca de abacaxi (PPE)	Espessura, alongamento na ruptura e a permeabilidade ao vapor de água aumentaram ligeiramente. Houve aumento notável da estabilidade térmica e das propriedades antioxidantes.	(Kumar et al., 2021)
Aplicação de filme de quitosana (CS) usando nanocompósito de sílica magnética para encapsular óleo essencial de cúrcuma (TEO)	As propriedades físicas e mecânicas, microbianas e antioxidantes do filme foram significativamente melhoradas, enquanto os bionanocompósitos exibiram uma liberação sustentada de TEO que controlou a carga microbiana.	(Zohreh et al., 2022)
Extratos de açaí em carne de porco refrigerado	Não afetou a composição centesimal, pH e parâmetros de cozimento, aumentou a atividade antioxidante e reduziu a oxidação lipídica. O extrato otimizado não afetou os parâmetros de cor, mostrando a potencial aplicação em hambúrgueres suínos.	(Bellucci et al., 2022)
Extratos vegetais de jurema preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ) e cajueiro ( <i>Anacardium occidentale</i> L.)	O extrato de jurema preta apresentou maior teor de flavonoides e fenólicos totais (como taninos) que o cajueiro, com potencial ação antioxidante.	(Silva et al., 2021)
Óleo essencial (OE) de orégano em pão de hambúrguer.	Não houve alteração para os parâmetros estudados durante o tempo de armazenamento, garantindo as características físico-químicas do pão de hambúrguer.	(Fernandes, Araújo & Sousa, 2020)
Hemicelulose e a pectina em filmes comestíveis ativos	Hemicelulose (>50%) são adequados para aplicação como filmes de embalagens ativas e os filmes com >50% de pectina são adequados para aplicação como filmes comestíveis e revestimentos.	(Road & Chimphaugo, 2022)

Fonte: Autores.

Conforme os estudos apresentados na Tabela 2 e de acordo com a literatura, os polímeros biodegradáveis obtidos por via biológica/tecnológica (como exemplo, por produção agrícola (biomassa) e microbiana (fermentação)) podem ser constituídos de polissacarídeos, lipídios e proteínas (Sharma et al., 2021; Amin et al., 2021; Villegas et al., 2016). Dentre os polissacarídeos aplicados na formação destes filmes tem-se o amido, alginato, pectina, carragena, quitosana, derivados da celulose e fécula de mandioca (Kandasamy et al., 2021).

Sooch e Mann (2021) avaliaram a viabilidade do uso de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) em embalagens ativas à base de gelatina para estender a vida de prateleira de tomates (*Solanum lycopersicum* L.). Como resultado foi observado uma redução no tamanho das nanopartículas, melhor atividade antimicrobiana, melhores propriedades mecânicas (maior resistência a tração e a ruptura), menor citotoxicidade e aumento na vida de prateleira do tomate (até 18-40 dias) por meio da utilização dos filmes ativos nano reforçados.

Riaz et al. (2021) elaboraram um filme de embalagem ativo biodegradáveis à base de quitosana contendo extrato de raiz de cebolinha chinesa (*Allium tuberosum*) para aplicação em alimentos pela metodologia de *casting*. Os filmes preparados



pela adição dos extratos apresentaram boa atividade antioxidante e antimicrobiana. Além disso, esse material apresentou alto teor de compostos bioativos, adequado grau de intumescimento, boa colorimetria e barreira ao vapor de água. Baseado nesses resultados, destaca-se o potencial dessa embalagem como material bio-composto para a indústria alimentícia.

Severo *et al.* (2021) ponderaram o desenvolvimento de filmes de extrato de cranberry em dois tipos de filmes de quitosana, alterando o conteúdo de plastificantes (polietilenoglicol (PEG) sozinho ou PEG e glicerol), para o aprimoramento das propriedades antioxidantes e antimicrobianas em embalagem para alimentos. Em síntese, os filmes apresentaram boa capacidade antioxidante, antimicrobiana, transmitância de luz e água, permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio. Desta forma, esses resultados reforçam que os filmes de cranberry-quitosana podem ser uma alternativa para embalagens de alimentos visando a manutenção da qualidade dos produtos elaborados.

## 5. Considerações Finais

A manutenção da qualidade de produtos alimentícios com alto teor lipídico é um desafio para a indústria de alimentos devido à grande susceptibilidade à processos oxidativos. O desenvolvimento de novas estratégias torna-se fundamental para a manutenção da qualidade desses alimentos, principalmente considerando seu armazenamento. Para contornar esses entraves, a utilização de embalagens ativas (produzidas principalmente a partir de matrizes poliméricas) com propriedades antioxidantes tem sido considerada uma excelente ferramenta. Neste contexto, tais embalagens são caracterizadas pela incorporação de substâncias antioxidantes e, além disso, tem agregado com a utilização de antioxidantes naturais. Esses componentes são liberados para o *headspace* da embalagem ou mesmo para contato direto com o alimento, interrompendo e/ou retardando as reações oxidativas. Em paralelo, o avanço no estudo de embalagens ativas biodegradáveis está em ascensão, indo ao encontro dos anseios dos consumidores e contribuindo com o desenvolvimento sustentável. Por outro lado, deve haver uma investigação minuciosa da estabilidade físico-química, mecânica, térmica dessas embalagens, além de questões toxicológicas para produção em larga escala.

Diante do exposto, futuros estudos devem ser conduzidos visando a avaliação das embalagens ativas biodegradáveis em alimentos com alto teor de gordura, especialmente no que diz respeito à cinética de liberação dos componentes ativos (no caso das embalagens de liberação) e também o comportamento de absorção de componentes da embalagem (considerando as embalagens de absorção). Além disso, estudos de vida útil baseados na evolução dos processos oxidativos dos alimentos acondicionados nestas embalagens são de suma importância para verificação da interação e ação dos compostos ativos com os alimentos embalados.

## Agradecimentos

Ao Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, campus Rio Pomba. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade a B.R.C. Leite Júnior (nº306514/2020-6), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Código de Financiamento 001) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - APQ-00388-2).

## Referências

ABRE, Associação Brasileira de Embalagem. Estudo abre macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo. (20 de janeiro de 2022). <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>.

Al-Tayyar, A., Youssef, A. M., & Al-hindi, R. (2019). Antimicrobial Food Packaging Based on Sustainable Bio-based materials for Reducing Foodborne Pathogens: A Review. *Food Chemistry*, 310, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125915>.

- Amin, U., Khan, M. U., Yaqoob, M., Rebezov, M., Khayrullin, M., Bobkova, E., Mohammad Ali Shariati, M. A., Chung, I. M., & Thiruvengadam, M. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2184–2198. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.182>.
- Andrade-Del Olmo, J., Pérez-Álvarez, L., Hernáez, E., Ruiz-Rubio, L., & Vilas-Vilela, J. L. (2019). Antibacterial multilayer of chitosan and (2-carboxyethyl)- $\beta$ -cyclodextrin onto polylactic acid (PLLA). *Food Hydrocolloids*, 88(July 2018), 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.014>
- Arruda, T. R., Bernardes, P. C., Moraes, A. R. F., & Soares, N. F. F. (2022). Natural bioactives in perspective: The future of active packaging based on essential oils and plant extracts themselves and those complexed by cyclodextrins. *Food Research International*, 156, 111160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111160>
- Baghi, F., Gharsallaoui, A., Dumas, E., & Ghnimi, S. (2022). Advancements in Biodegradable Active Films for Food Packaging: Effects of Nano/Microcapsule Incorporation. *Foods*, 11(5), 1–44. <https://doi.org/10.3390/foods11050760>
- Baron, L. F., Pazinato, R., & Baron, C. P. (2020). Oxidação de lipídios e as implicações na nutrição e saúde de animais de produção. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 37(1). 10.35977/0104-1096.cct2020.v37.26597
- Bellucci, E. B., dos Santos, J. M. dos, Carvalho, L. T., Borgonovi, T. F., Lorenzo, J. M., & Barretto, A. C. S. (2022). Açáí extract powder as natural antioxidant on pork patties during the refrigerated storage. *Meat Science*, 184, 108667. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108667>.
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science*, 114, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017>.
- Bom, S., Jorge, J., Ribeiro, H. M., & Marto, J. (2019). A step forward on sustainability in the cosmetics industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 270–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.255>.
- Brasil. (2018). Combate ao desperdício de alimentos é desafio do Brasil e do mundo nos próximos anos. <http://www.brasil.gov.br/noticias/cidadania-e-inclusao/2018/08/combate-ao-desperdicio-de-alimentos-e-desafio-do-brasil-e-do-mundo-nos-proximos-anos>.
- Carocho, M., Morales, P., & Ferreira, I. C. F. R. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food applications, legislation and role as preservatives. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 107–120. [doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.008](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.008).
- Carrizo, D., Taborda, G., Nerín, C., & Bosetti, O. (2016). Extension of shelf life of two fatty foods using a new antioxidant multilayer packaging containing green tea extract. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 33, 534–541. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.018>
- Damodaran S., Parkin K. L., & Fennema O. R. (2010). *Química de Alimentos de Fennema*. (4ª ed.): Artmed. 900 p.
- Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R., & Johnson, S. (2017). Active and intelligent packaging in the meat industry. *Trends Food Science Technology*, 61(5), 60–71. [10.1016/j.tifs.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.002).
- Fernandes, F. G., Araújo, J., & Sousa, S. (2020). Physical-chemical analysis of hamburger bread using active packaging with oregano essential oil. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 20580–2058. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-291>
- Filipini, G. S., Romani, V. P., & Martins, V. G. Biodegradable and active-intelligent films based on methylcellulose and jambolão (*Syzygium cumini*) skins extract for food packaging. (2020). *Food Hydrocolloids*, 109, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106139>.
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110113>.
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Lee, Y. S. (2018). Oxygen scavenging films in food packaging. *Environmental Chemistry Letters*, 16(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0705-z>
- Gómez-Estaca, J., López-de-Dicastillo, C., Hernández-Muñoz, P., Catalá, R., & Gavara, R. (2014). Advances in antioxidant active food packaging. *Trends in Food Science and Technology*, 35(1), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.10.008>
- Homayonpour, P., Jalali, H., Shariatifar, N., & Amanlou, M. (2021). Effects of nano-chitosan coatings incorporating with free /nano-encapsulated cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil on quality characteristics of sardine fillet. *International Journal of Food Microbiology*, 341(November 2020), 109047. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109047>
- Kandasamy, S., Yoo, J., Yun, J., Kang, H-B., Seol, K-H., & Jun-Sang, H. (2021). Application of Whey Protein-Based Edible Films and Coatings in Food Industries: An Updated Overview. *Coatings*, 11(1056), 1–26. <https://doi.org/10.3390/coatings11091056>.
- Kuai, L., Liu, F., Chiou, B-S., Roberto J. Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., & Zhong, F. (2021). Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 120, 106992. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106992>.
- Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A., & Gaikwad, K. K. (2021). Pineapple peel extract incorporated poly(vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging: Preparation, characterization and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 223–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136>.
- Labuza, T. P., & Breene, W. M. (1989). Applications of active packaging for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 13, 1–69.
- Landim, A. P. M., Bernardo, C. O., Martins, I. B. A., Francisco, M. R., Santos, M. B., & Melo, N. R. de. (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros*, 26(número especial), 82–92. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428>.

- Licciardello, F. (2017). Packaging, blessing in disguise: Review on its diverse contribution to food sustainability. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.003>.
- Ma, B., Jin, M., Liang, X., & Li, J. (2018). Processus de mélange et de minéralisation des eaux souterraines dans un bassin désertique montagneux avec des oasis, dans le nord-ouest de la Chine: hydrogéochemie et indicateurs de traceurs environnementaux. *Hydrogeology Journal*, 26(1), 233-250. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-017-1659-0>.
- Mangaraj, S., Yadav, A., Bal, L. M., Dash, S. K., & Mahanti, N. K. (2018). Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 3(1), 77-96. <https://doi.org/10.1007/s41783-018-0049-y>.
- Manikandan, N. A., Pakshirajan K., & Pugazhenth, G. (2020). *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.084>.
- Melo, P. E. F., Silva, A. P. M., Marques, F. P., Ribeiro, P. R. V., Souza Filho, M. de S. M., Brito, E. S., Lima, J. R., & Azeredo, H. M. C. (2019). Antioxidant films from mango kernel components. *Food Hydrocolloids*, 95(February), 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.061>
- Mishra, B., Varjani, S. J., Pollution, G., Board, C., Parida, M., & Iragavarapu, G. P. (2021). Film based packaging for food safety and preservation: issues and perspectives. In A. Singh, S. Srivastava, D. Rathore, & D. Pant (Eds.), *Environmental Microbiology and Biotechnology* (Issue March). Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-7493-1>
- Monção, E. C., Grisi, C. V. B., Fernandes, J. M., Souza, P. S., & Souza, A. L. (2022). Active packaging for lipid foods and development challenges for marketing. *Food Bioscience*, 45, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101370>
- Oliveira, A. S. B. D., & Melo, N. R. de. (2020). Market and sustainability of food packaging: a review. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 36(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.5380/bceppa.v36i1.57846>.
- Oliveira, L. R. C. (2019). Bioativos e aditivos naturais em alimentos: Corantes, antioxidantes e aromatizantes. *Boletim Técnico-Científico*, 5(2), p 77- 93.
- Pacheco, A. F. C., Pereira, G. Z., Rodrigues, A. C. de S., Cunha, J. S., Pacheco, F. C., Paiva, P. H. C., Tribst, A. A. L., & Junior, B. R. de C. L. (2022). Proteínas de sementes de abóbora e propriedades multifuncionais de seus hidrolisados : uma revisão. *Research, Society and Development*, 11(8), e47211831161.
- Peron, T., Santos, T. C. C., Silva, L. D. S., Arruda, T. R., & Leite Júnior, B. R. de C. Active packaging: an alternative to minimum processed vegetables?. *Research, Society and Development*, [S. l.], 11(10), e469111033043, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.33043>.
- Priyadarshi, R., & Rhim, J-W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 62, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346>.
- Ramalho, V. C., & Jorge, N. (2006). Antioxidantes utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos. *Revista Química Nova*, São Paulo, 29, 4, p. 755-760.
- Rangaraj, V. M., Rambabu, K., Banat, F., & Mittal, V. (2021). Natural antioxidants-based edible active food packaging: An overview of current advancements. *Food Bioscience*, 43 101251. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101251>.
- Riaz, A., Lagnik, C., Luo, H., Dai, Z., Niew, M., Hashim, M. M., Liu, C., Song, J., & Li, D. (2021). Chitosan-based biodegradable active food packaging film containing Chinese chive (*Allium tuberosum*) root extract for food application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 595-604. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.078>.
- Road, L. R., & Chimphaugo, A. F. (2022). Physicochemical properties and potential application of hemicellulose/pectin/nanocellulose biocomposites as active packaging for fatty foods. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100795>.
- Rooney, M. L. (2005). Introduction to active food packaging technologies. In: *Innovations in Food Packaging*. Jung H. Han. Academic Press. Elsevier.
- Sanches-Silva, A., Costa, D., Albuquerque, T. G., Buonocore, G. G., Ramos, F., Castilho, M. C., Machado, A. V., & Costa, H. S. (2014). Trends in the use of natural antioxidants in active food packaging: a review. *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 31(3), 374-395. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.879215>
- Severo, C., Anjos, I., G.L. Souza, V. G. L., Canejo, J. P., Bronze, M. R., Fernando, A. L., Coelho, I., Bettencourt, A. F., & Ribeiro, I. A. C. (2021). Development of cranberry extract films for the enhancement of food packaging antimicrobial properties. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100646>.
- Sharma, S. K. Jaiswal, A. K., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2021). Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide) /poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100491>.
- Sharma, S., Barkauskaite, S., K. Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2020). Essential Oils as Additives in Active Food Packaging. *Food Chemistry*, 343, 128403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128403>.
- Silva, I. D. L., Oliveira, F. S. M. de., Andrade, M. F. de, Brito, A. M. S. S., Hallwass, F., & Vinhas, G. M. (2021). Avaliação das potencialidades dos extratos vegetais de jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) para uso em embalagens ativas antimicrobianas e antioxidantes. *Revista Matéria*, 26(1), 1-13. [10.1590/s1517-707620210001.1224](https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1224)
- Sooch, B. S., & Mann, M. K. (2021). Nanoreinforced biodegradable gelatin based active food packaging film for the enhancement of shelf life of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Food Control*, 130, 108322. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108322>.
- Souza, A. L. de., Vieira, M. J. A., Paiva, M. J. do A., Bittencourt, M. T., Vieira, Érica N. R. & Leite Júnior, B. R. de C. Antimicrobial biodegradable packaging with nanotechnology application. *Research, Society and Development*, [S. l.], 11(8), e3511830406, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30406>.

- Staroszczyk, H., Kusznerewicz, B., Malinowska-Pańczyk, E., Sinkiewicz, I., Gottfried, K., & Kołodziejka, I. (2020). Fish gelatin films containing aqueous extracts from phenolic-rich fruit pomace. *LWT - Food Science and Technology*, 117(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108613>
- Topuz, F., & Uyar, T. (2020). Antioxidant, Antibacterial and Antifungal Electrospun Nanofibers for Food Packaging Applications. *Food Research International*, 130, 108927. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108927>.
- Upadhyay, R., & Mishra, H. N. (2014). Antioxidant activity measurement of oleoresin from Rosemary and sage. *Industrial Crops and Products*, 61(31), p. 453–459. doi:10.1016/j.indcrop.2014.07.043.
- Varghese, S. A., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Essential oils as antimicrobial agents in biopolymer-based food packaging - A comprehensive review. *Food Bioscience*. 38(100785), 1-89, <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100785>.
- Vidal, O. L., Barros Santos, M. C. B., Batista, A. P., Andriago, F. F., Lecomtec, B. B. J. Figuero-Espinoza, M. C., Villeneuve, N. G. P. V., Guillard, V., Rezende, C. M., Bourlieu-Lacanal, C., & Ferreira, M. S. L. (2022). Active packaging films containing antioxidant extracts from green coffee oil by-products to prevent lipid oxidation. *Journal of Food Engineering*, 312, 110744. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110744>.
- Villegas, M., Romero, A. I., Parentis, M. L., Castro Vidaurre, E. F., & Gottifredi, J. C. (2016). Acrylic acid plasma polymerized poly(3-hydroxybutyrate) membranes for methanol/MTBE separation by pervaporation. *Chemical Engineering Research & Design*, 109, 234-248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2016.01.018>.
- Wang, C., Gong, C., Qin, Y., Yao Hu, Y., Jiao, A., Jin, Z., Qiu, C., & Wang, J. (2022). Bioactive and functional biodegradable packaging films reinforced with nanoparticles. *Journal of Food Engineering*, 312, 110752. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110752>.
- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101395>.
- Yildirim, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2018). Active Packaging Applications for Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165–199. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>
- Zhong, Y., Godwin, J. P. Y., & Xiao, H. (2019). Biodegradable Polymers and Green-based Antimicrobial Packaging Materials: A minireview. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>.
- Zohreh, N., Karimi, N., Hosseini, S. H., & Busuioc, C. I. C. (2022). Fabrication of a magnetic nanocarrier for doxorubicin delivery based on hyperbranched polyglycerol and carboxymethyl cellulose: An investigation on the effect of borax cross-linker on pH-sensitivity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 80-92, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.150>.