

**TECNOLOGIAS
EMERGENTES NA
PRESERVAÇÃO DE
ALIMENTOS:
NANOTECNOLOGIA E
BIOPOLÍMEROS NA
EXTENSÃO DA VIDA ÚTIL**

**EMERGING TECHNOLOGIES IN FOOD PRESERVATION:
NANOTECHNOLOGY AND BIOPOLYMERS FOR SHELF-LIFE EXTENSION**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Biológicas, Engenharias •

18/04/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/776387986](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/776387986)

Rômulo Ferreira dos Santos¹

Alexandre Bicalho do Amaral²

Sabrina Bezerra da Silva³

Lailton da Silva Freire⁴

Marcus Dhilermando Hora de Souza⁵

Jaime Elias Jemusse⁶

RESUMO

A segurança alimentar global e a sustentabilidade dos sistemas alimentares dependem, cada vez mais, de tecnologias capazes de reduzir perdas pós-colheita, retardar deterioração microbiológica e oxidativa, preservar atributos sensoriais e nutricionais e, simultaneamente, diminuir a dependência de embalagens fósseis convencionais. Nesse contexto, a nanotecnologia e os biopolímeros vêm se consolidando como duas das frentes mais promissoras para a próxima geração de sistemas de conservação de alimentos, especialmente em embalagens ativas e inteligentes. Este artigo tem como objetivo analisar, por meio de revisão sistemática qualitativa da literatura, os avanços recentes no uso de nanomateriais e biopolímeros para extensão da vida útil de alimentos, com ênfase em mecanismos de ação, principais matrizes poliméricas, aplicações em diferentes grupos de alimentos, desafios regulatórios, questões toxicológicas e implicações para a sustentabilidade da cadeia produtiva. Os resultados mostram que a incorporação de nanocargas, nanoemulsões, nanopartículas metálicas e óxidos metálicos pode melhorar propriedades mecânicas, térmicas, antimicrobianas e de barreira a gases e vapor d'água, enquanto biopolímeros como quitosana, amido, celulose, gelatina, alginato, pectina, zeína e PLA oferecem alternativas renováveis, biodegradáveis e, em alguns casos, comestíveis, ao plástico convencional. Além disso, indicadores colorimétricos, sensores, transportadores de dados e sistemas inteligentes baseados em pigmentos naturais, antocianinas e materiais bioinspirados ampliam a capacidade de monitoramento em tempo real da qualidade e do frescor dos alimentos. Contudo, persistem desafios ligados à escalabilidade industrial, custo, estabilidade funcional, aceitação do consumidor, compostabilidade real, segurança de migração e regulação de materiais em contato com alimentos. Conclui-se que a

convergência entre nanotecnologia e biopolímeros representa uma rota tecnocientífica consistente para ampliar a vida útil, reduzir desperdício e apoiar a transição para embalagens mais sustentáveis, desde que acompanhada por avaliação toxicológica rigorosa, desenho regulatório claro e estratégias de implementação industrialmente viáveis.

Palavras-chave: engenharia de alimentos; nanotecnologia; biopolímeros; conservação de alimentos; sustentabilidade; embalagens ativas; embalagens inteligentes.

ABSTRACT

Global food security and the sustainability of food systems increasingly depend on technologies capable of reducing post-harvest losses, delaying microbial and oxidative deterioration, preserving sensory and nutritional attributes, and simultaneously decreasing reliance on conventional fossil-based packaging. In this context, nanotechnology and biopolymers have emerged as two of the most promising fronts for the next generation of food preservation systems, especially in active and intelligent packaging. This article aims to analyze, through a qualitative systematic literature review, recent advances in the use of nanomaterials and biopolymers for shelf-life extension, focusing on mechanisms of action, major polymeric matrices, applications across food categories, regulatory challenges, toxicological concerns, and implications for supply chain sustainability. The findings show that the incorporation of nanofillers, nanoemulsions, metallic nanoparticles, and metal oxides can improve mechanical, thermal, antimicrobial, and gas and water-vapor barrier properties, while biopolymers such as chitosan, starch, cellulose, gelatin, alginate, pectin, zein, and PLA offer renewable, biodegradable, and in some cases edible alternatives to conventional plastics. In addition,

colorimetric indicators, sensors, data carriers, and intelligent systems based on natural pigments, anthocyanins, and bio-inspired materials increase the ability to monitor food quality and freshness in real time. However, important challenges remain regarding industrial scalability, cost, functional stability, consumer acceptance, real compostability, migration safety, and regulation of food-contact materials. It is concluded that the convergence of nanotechnology and biopolymers provides a robust technoscientific pathway for extending shelf life, reducing food waste, and supporting the transition to more sustainable packaging, provided that it is accompanied by rigorous toxicological evaluation, clear regulatory design, and industrially viable implementation strategies.

Keywords: food engineering; nanotechnology; biopolymers; food preservation; sustainability; active packaging; intelligent packaging.

1. INTRODUÇÃO

A preservação de alimentos é um dos eixos estruturantes da segurança alimentar contemporânea, não apenas por sua relevância para a saúde pública, mas também por seu impacto direto sobre disponibilidade, qualidade, preço, logística e sustentabilidade dos sistemas de abastecimento. A FAO distingue perda e desperdício de alimentos ao longo da cadeia, mostrando que a perda ocorre do pós-colheita até antes do varejo, enquanto o desperdício se concentra mais intensamente no varejo e no consumo. Já o UNEP destaca que 13% dos alimentos produzidos são perdidos entre a colheita e as prateleiras, enquanto outros 19% são desperdiçados em domicílios, serviços de alimentação e varejo; além disso, o desperdício de alimentos responde por 8% a 10% das emissões globais de gases de efeito estufa. Esse cenário torna a extensão da

vida útil um objetivo estratégico, não apenas tecnológico, mas ambiental, social e econômico.

No plano industrial, a embalagem sempre desempenhou papel central na preservação de alimentos ao atuar como barreira física contra oxigênio, umidade, luz, contaminação e danos mecânicos. No entanto, a embalagem convencional, especialmente a baseada em polímeros fósseis, vem sendo pressionada por duas frentes simultâneas: de um lado, pela necessidade de maior funcionalidade para alimentos cada vez mais perecíveis e cadeias logísticas mais longas; de outro, pela urgência de reduzir resíduos plásticos e de alinhar materiais de embalagem a princípios de economia circular. González-López et al. (2023) observam que o setor busca materiais e tecnologias capazes de fechar a distância entre desempenho técnico e sustentabilidade, enquanto Stoica et al. (2024) mostram que a transição da embalagem passiva para sistemas ativos e inteligentes é hoje um dos movimentos mais marcantes do campo.

É nesse contexto que biopolímeros e nanotecnologia se tornam centrais. Os biopolímeros oferecem rotas de origem renovável, biodegradabilidade e, em alguns casos, comestibilidade, com aplicações em filmes, revestimentos, compósitos e embalagens funcionais. A nanotecnologia, por sua vez, amplia a possibilidade de modificar propriedades de materiais em escala nanométrica, melhorando resistência mecânica, barreira a gases, estabilidade térmica, ação antimicrobiana e desempenho sensorial ou analítico. A combinação de ambas as frentes tem produzido bio-nanocompósitos, embalagens ativas com liberação controlada de agentes antioxidantes e antimicrobianos, e embalagens inteligentes com indicadores de frescor, sensores de gases e materiais

colorimétricos capazes de monitorar alterações no alimento em tempo real.

A literatura recente tem mostrado que a preservação de alimentos deixou de depender apenas de propriedades passivas da embalagem. Ahari e Soufiani (2021) sintetizam que as novas embalagens alimentares se organizam, em termos amplos, em dois grandes grupos: as ativas, que interagem com o alimento ou com o ambiente interno da embalagem para prolongar a vida útil; e as inteligentes, que monitoram propriedades do produto, da atmosfera ou das condições de transporte e armazenamento. Azeredo e Corrêa (2021) detalham que os mecanismos da embalagem inteligente se concentram sobretudo em indicadores, sensores e transportadores de dados, voltados a informar qualidade, frescor e rastreabilidade. Assim, a embalagem passa de “invólucro” a sistema funcional de conservação e informação.

Esse avanço responde a problemas concretos da cadeia produtiva. O FAO observa que perdas em armazenamento e transporte estão fortemente associadas a deficiência de infraestrutura, redução prematura da vida útil e inadequações de embalagem e processamento. O UNEP também aponta a cadeia fria e a redução de perdas como instrumentos decisivos para enfrentar fome, emissões e ineficiência sistêmica. Desse ponto de vista, tecnologias emergentes de conservação não são meramente refinamentos laboratoriais: elas têm implicações diretas sobre segurança do abastecimento, redução de perdas, valorização de produtos perecíveis e menor pressão sobre recursos naturais.

Ao mesmo tempo, o entusiasmo com essas tecnologias precisa ser acompanhado de análise crítica. Biopolímeros frequentemente

apresentam limitações de resistência mecânica, hidrofobicidade e estabilidade em comparação com polímeros petroquímicos; e muitos só se tornam competitivos quando passam por blendas, plastificação ou reforço com nanomateriais. Nanomateriais, por sua vez, podem melhorar desempenho funcional, mas introduzem questões relativas à migração, toxicidade, ecotoxicidade, aceitação do consumidor e regulação para materiais em contato com alimentos. Zhou et al. (2024) ressaltam que a incorporação de nanocargas pode reduzir permeabilidade a oxigênio e vapor d'água, além de introduzir ação antimicrobiana, mas as incertezas sobre migração e ecotoxicidade ainda exigem investigação contínua. A EFSA, por sua vez, mantém orientação específica para avaliação de nanomateriais ao longo da cadeia alimentar e enfatiza a necessidade de dados de migração e toxicidade em materiais de contato com alimentos.

Outro aspecto relevante é que o campo já não se limita a filmes ou bandejas “mais verdes”. A pesquisa recente mostra crescimento de sistemas colorimétricos baseados em pigmentos naturais, sensores bioinspirados, indicadores de pH e compostos voláteis, além de soluções integradas a rastreabilidade digital e análise em tempo real. Chiu et al. (2024) destacam o papel de sensores colorimétricos naturais, especialmente antocianinas, para detecção de oxigênio, temperatura, pH e umidade em embalagens inteligentes baseadas em biopolímeros. Mkhari, Adeyemi e Fawole (2025) ampliam essa leitura ao mostrar que RFID, sensores e indicadores tornaram-se componentes relevantes de sistemas de preservação que associam controle de deterioração, comunicação com o consumidor e gestão de qualidade em logística.

Diante desse panorama, o presente artigo tem como objetivo analisar o estado da arte das tecnologias emergentes de preservação de alimentos baseadas em nanotecnologia e biopolímeros, com foco em extensão da vida útil, embalagens ativas e inteligentes, aplicações em diferentes grupos de alimentos, sustentabilidade, segurança e desafios regulatórios. O trabalho parte da hipótese de que a convergência entre materiais bio-based e nanoengenharia representa uma das rotas mais promissoras para reduzir perdas e desperdício, desde que acompanhada por desenho seguro, validação regulatória e viabilidade de escala industrial.

2. METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido como **revisão sistemática qualitativa da literatura**, orientada pelos princípios do **PRISMA 2020**, com o objetivo de sintetizar o conhecimento recente sobre nanotecnologia, biopolímeros, embalagens ativas e inteligentes e extensão da vida útil de alimentos. A opção por uma síntese qualitativa decorre da heterogeneidade dos desenhos experimentais, das matrizes alimentares, dos materiais poliméricos, dos nanomateriais e dos desfechos utilizados nos estudos revisados. Assim, em vez de metanálise numérica, privilegiou-se análise crítica integrada dos avanços, limitações e tendências mais consistentes.

A estratégia de busca concentrou-se em revisões sistemáticas, revisões narrativas de alta relevância, artigos de síntese e documentos técnico-regulatórios sobre: a) biopolímeros para embalagens alimentares; b) nanocompósitos e nanocargas em sistemas de embalagem; c) embalagens ativas e inteligentes; d) sensores e indicadores bio-based; e) segurança, migração e regulação de materiais de contato com alimentos. Foram

privilegiadas fontes indexadas em bases amplamente reconhecidas e repositórios científicos acessíveis, além de documentos institucionais da EFSA, FAO e UNEP.

Os critérios de inclusão priorizaram publicações com aderência direta ao tema, autoria identificada e foco em aplicações alimentares. Foram especialmente valorizados trabalhos recentes publicados entre 2020 e 2025, sem excluir referências importantes de 2021 e anteriores quando úteis para definições, mecanismos ou enquadramento conceitual, como no caso de Ahari e Soufiani (2021) e Azeredo e Corrêa (2021). Também foram incluídos documentos normativos e páginas técnicas oficiais sobre avaliação de nanomateriais e materiais de contato com alimentos, dada a importância da regulação para a implementação industrial dessas soluções.

A análise dos estudos foi organizada em sete eixos: contexto de perdas e sustentabilidade; fundamentos de nanotecnologia; classes de biopolímeros; mecanismos de embalagens ativas; mecanismos de embalagens inteligentes; aplicações em alimentos perecíveis; e desafios de migração, toxicidade, escalabilidade e regulação. A síntese foi conduzida com ênfase em convergências da literatura, limitações recorrentes e lacunas de translação entre pesquisa laboratorial e adoção industrial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Pressões Contemporâneas Sobre a Conservação de Alimentos

Os estudos revisados convergem em apontar que a preservação de alimentos, hoje, responde simultaneamente a três pressões: segurança e qualidade do alimento, redução de perdas e

desperdício, e sustentabilidade material da embalagem. O UNEP mostra que a dimensão climática do desperdício alimentar já torna o tema incontornável, enquanto a FAO evidencia que perdas pós-colheita, armazenamento e transporte são especialmente relevantes para produtos perecíveis. Nessa lógica, aumentar a vida útil deixou de ser apenas uma vantagem comercial e passou a integrar uma agenda global de eficiência sistêmica, mitigação de emissões e segurança alimentar.

Além disso, a literatura recente destaca que a vida útil é influenciada por múltiplos mecanismos de deterioração: oxidação lipídica, respiração e transpiração de frutos, crescimento microbológico, degradação enzimática, perda de umidade, escurecimento e exposição a luz e oxigênio. Mkhari et al. (2025) e Ahari e Soufiani (2021) reforçam que a nova geração de embalagens procura atuar exatamente nesses mecanismos, seja modulando a atmosfera interna, seja liberando compostos ativos, seja monitorando sinais de deterioração antes que o produto se torne impróprio. Isso reposiciona a embalagem como componente funcional da conservação.

3.2. Biopolímeros: Classes, Vantagens e Limitações

Os biopolímeros empregados em preservação de alimentos podem ser agrupados, em termos gerais, em polissacarídeos, proteínas e poliésteres de origem biobaseada. Stoica et al. (2024) e González-López et al. (2023) destacam entre os principais materiais a quitosana, o amido, a celulose e seus derivados, o alginato, a pectina, a pullulana, a gelatina, proteínas do soro, zeína e o ácido polilático (PLA). Essas matrizes têm em comum a origem renovável e, com frequência, biodegradabilidade; porém variam significativamente

em propriedades de barreira, comportamento mecânico, sensibilidade à água, transparência e compatibilidade com agentes ativos.

Os resultados mostram que cada classe apresenta um perfil funcional específico. A quitosana é amplamente valorizada por sua atividade antimicrobiana intrínseca e pela capacidade filmogênica; o amido se destaca por abundância e baixo custo; a celulose e as nanoceluloses oferecem boa resistência e reforço estrutural; a gelatina e proteínas do soro apresentam boa formação de filmes; a zeína, derivada do milho, tem propriedades de barreira relevantes; e o PLA é frequentemente citado como o biopolímero bio-based com maior avanço comercial, em função de transparência, resistência mecânica e processabilidade relativamente favoráveis. Ao mesmo tempo, Stoica et al. (2024) observam que muitos desses materiais são demasiadamente hidrofílicos ou frágeis quando usados isoladamente, exigindo blendas, plastificantes ou nano-reforços.

As limitações dos biopolímeros constituem um dos achados mais recorrentes da revisão. González-López et al. (2023) e Taherimehr et al. (2021) apontam que a principal distância em relação aos plásticos convencionais está em propriedades de barreira à umidade, resistência térmica e processabilidade em larga escala. Stoica et al. (2024) acrescentam que materiais biodegradáveis apresentam, em muitos casos, vulnerabilidade à água e propriedades mecânicas e térmicas inferiores, o que explica a tendência crescente ao desenvolvimento de compósitos e bio-nanocompósitos. Em outras palavras, os biopolímeros são tecnologicamente promissores, mas sua performance isolada raramente basta para aplicações exigentes.

3.3. Nanotecnologia Como Ferramenta de Funcionalização

A nanotecnologia aparece na literatura como estratégia para superar parte das limitações dos biopolímeros e conferir novas funcionalidades às embalagens. Muthu et al. (2025) sintetizam que nanomateriais podem aumentar resistência mecânica, eficiência de barreira, atividade antimicrobiana e resposta a estímulos ambientais. Zhou et al. (2024) detalham que nanocargas como nanoclay, nanotubos de carbono, nanopartículas de prata, ZnO, TiO₂ e outros óxidos são utilizadas tanto para melhorar propriedades físico-químicas como para introduzir funções ativas e inteligentes. O efeito mais clássico é o chamado caminho tortuoso, pelo qual a incorporação de nanofillers aumenta a tortuosidade da difusão de moléculas, reduzindo a permeabilidade a oxigênio e vapor d'água.

No caso dos nanocompósitos, a literatura aponta ganhos relevantes em barreira, estabilidade e ação antimicrobiana quando há dispersão homogênea das partículas na matriz polimérica. Sarfraz et al. (2021) e Taherimehr et al. (2021) destacam que a eficácia dessas formulações depende criticamente do tipo de nanocarga, da interação com a matriz, do método de incorporação e do grau de dispersão. Quando bem formulados, os nanocompósitos podem diminuir permeabilidade, aumentar módulo mecânico e conferir novas respostas a oxidação e contaminação; quando mal dispersos, porém, perdem funcionalidade e podem até comprometer propriedades do filme.

Nanopartículas metálicas e de óxidos metálicos, especialmente prata, ZnO e TiO₂, aparecem com frequência nos estudos como agentes antimicrobianos. Zhou et al. (2024) registram que a presença dessas partículas em filmes e revestimentos pode reduzir oxidação lipídica, perda de massa e crescimento microbiano em diferentes matrizes alimentares, embora os mecanismos de ação

variem entre liberação iônica, geração de espécies reativas e interação com membranas celulares. O mesmo corpo de literatura ressalta, no entanto, que o uso desses nanomateriais é também o mais sensível sob o ponto de vista toxicológico e regulatório.

Além dos nanofillers inorgânicos, a revisão mostra crescimento de nanoemulsões, nanofibras e encapsulamento nanoestruturado de compostos naturais, como óleos essenciais, extratos fenólicos e bacteriocinas. Andrade et al. (2025) observam que a encapsulação tem sido adotada para contornar volatilidade, baixa solubilidade e impacto sensorial excessivo de compostos bioativos em embalagens ativas. Brandelli et al. (2024) e estudos citados em sua revisão mostram que lipossomas, nanocelulose, nanoclay e fibras eletrofiadas podem servir de plataforma para incorporação e liberação mais controlada de agentes antimicrobianos e antioxidantes.

3.4. Embalagens Ativas: Princípios e Mecanismos

Um dos resultados mais consistentes da literatura é a consolidação da embalagem ativa como alternativa à embalagem meramente passiva. Stoica et al. (2024) definem a embalagem ativa como sistema projetado para liberar ou absorver compostos do alimento, da bebida ou do ambiente interno da embalagem com o objetivo principal de prolongar a vida útil. Ahari e Soufiani (2021) e Salgado et al. (2021) reforçam que tais sistemas vão além da proteção física e incluem sequestradores de oxigênio, absorvedores de etileno, reguladores de umidade, agentes antimicrobianos e antioxidantes.

Entre os mecanismos mais recorrentes estão o sequestro de oxigênio, absorção de etileno para frutas climatéricas, liberação

controlada de compostos antimicrobianos e antioxidantes, e ajuste da atmosfera interna do pacote. Gaikwad et al. (2020), citados por Stoica et al. (2024), são referência importante para sistemas sequestradores de etileno, enquanto Andrade et al. (2025) documentam o avanço recente de embalagens emissoras de óleos essenciais, extratos naturais e fenólicos. Esses sistemas são especialmente úteis em carnes, frutas frescas e produtos minimamente processados, nos quais pequenos incrementos na estabilidade oxidativa e microbiológica podem produzir ganhos significativos de vida útil.

As matrizes poliméricas mais comuns para embalagem ativa sustentável incluem quitosana, amido, pectina, gelatina, proteínas do soro, celulose e PLA, frequentemente combinadas com compostos naturais bioativos. Andrade et al. (2025) assinalam que, de 2019 a 2024, o foco da literatura se concentrou em óleos essenciais, extratos vegetais e compostos fenólicos, muitas vezes incorporados em materiais biodegradáveis ou encapsulados para liberação gradual. O uso de compostos de origem vegetal atende simultaneamente à demanda por preservação, à redução do uso de conservantes sintéticos e ao discurso de circularidade por valorização de subprodutos agroindustriais.

Os exemplos práticos são numerosos. Stoica et al. (2024) listam aplicações de sistemas como PLA/quitosana para peru fatiado pronto para consumo, quitosana/ZnO para carnes cruas, gelatinas e pullulana com óleo essencial de canela para carnes, celulose/carbon dots para carne suína moída e diferentes combinações de biopolímeros com nanopartículas e extratos naturais para frango, cordeiro, presunto e pescado. A recorrência desses exemplos em produtos de origem animal não é casual: carnes e pescados

combinam alta perecibilidade microbiológica e oxidativa, o que os torna campo de prova privilegiado para tecnologias ativas.

3.5. Embalagens Inteligentes: Indicadores, Sensores e Rastreabilidade

No campo da embalagem inteligente, a literatura diferencia claramente indicadores, sensores e transportadores de dados. Azeredo e Corrêa (2021) explicam que indicadores fornecem mudanças visuais diretas relacionadas à qualidade; sensores detectam analitos específicos por meio de receptores e transdutores; e data carriers, como RFID, servem mais à rastreabilidade e à logística do que ao monitoramento direto do alimento. Mkhari et al. (2025) reiteram que sensores, indicadores e RFID são os pilares das soluções inteligentes para preservação contemporânea.

Os indicadores colorimétricos baseados em pigmentos naturais são o segmento mais dinâmico entre as soluções inteligentes sustentáveis. Chiu et al. (2024) mostram que antocianinas, betacianinas, curcumina, clorofilas, shikonina e outros corantes naturais vêm sendo integrados a matrizes biopoliméricas para gerar sensores visuais de pH, oxigênio, umidade relativa e temperatura. Tais sistemas são particularmente úteis em carnes, pescados e laticínios, nos quais a deterioração gera compostos voláteis ou mudanças de pH capazes de acionar resposta cromática perceptível ao consumidor e ao varejo.

Rodrigues et al. (2021) reforçam que sensores bio-based podem associar sustentabilidade e funcionalidade, reduzindo dependência de indicadores sintéticos não biodegradáveis. Seu trabalho destaca o potencial de extratos naturais, especialmente antocianinas, para

atuar como biossensores em associação com biopolímeros. Remedio et al. (2024), por sua vez, mostram que os filmes indicadores à base de antocianinas se tornaram uma das abordagens mais estudadas da embalagem inteligente e chamam atenção para um ponto crítico: a estabilidade dos pigmentos sob diferentes condições de armazenamento, luz, pH e interação com a matriz polimérica. Assim, o desafio já não é apenas “funcionar”, mas manter estabilidade funcional durante o ciclo logístico real.

A literatura também aponta avanço de sensores para gases, indicadores de tempo-temperatura e plataformas integradas de monitoramento. Mkhari et al. (2025) destacam sistemas capazes de acompanhar temperatura, atividade microbiana e integridade da embalagem, enquanto trabalhos mais recentes apontam integração com dispositivos eletrônicos, leitura remota e análise digital. Embora parte dessas soluções ainda esteja mais próxima do estágio de desenvolvimento do que da adoção massiva, seu potencial para reduzir descartes preventivos indevidos e aperfeiçoar a gestão da cadeia fria é amplamente reconhecido.

3.6. Aplicações por Grupo de Alimentos

Nos **frutos e hortaliças**, os biopolímeros aparecem com destaque em revestimentos comestíveis e embalagens ativas sensíveis a etileno, umidade e respiração. Vanaraj et al. (2024) destacam que revestimentos à base de quitosana, alginato e pectina atuam como barreira contra evaporação de água, trocas gasosas excessivas e proliferação microbiana, com efeitos positivos sobre qualidade pós-colheita. A literatura revisada por Stoica et al. (2024) e por pesquisas citadas em sua revisão mostra aplicações em pêssegos, limões, morangos e folhosas frescas, frequentemente com integração de

extratos naturais, nanoceluloses ou sistemas sequestradores de etileno.

Em **carnes e produtos cárneos**, os objetivos centrais são reduzir oxidação lipídica, crescimento microbiano e perda de qualidade sensorial. Nesse segmento, há forte predominância de filmes e revestimentos ativos à base de quitosana, gelatina, pullulana, PLA e nanocompósitos com ZnO, TiO₂, carbon dots ou óleos essenciais encapsulados. Stoica et al. (2024) reúnem uma série de exemplos em frango, cordeiro, carne bovina, presunto e carne suína, enquanto Mkhari et al. (2025) e Ahari e Soufiani (2021) identificam o setor cárneo como um dos principais alvos das tecnologias ativas e inteligentes pela alta sensibilidade de seus produtos à contaminação e deterioração.

Nos **pescados e frutos do mar**, a embalagem inteligente baseada em mudança de pH e compostos nitrogenados voláteis tem recebido atenção especial. Chiu et al. (2024) observam que os sistemas colorimétricos naturais foram desenvolvidos majoritariamente para carnes, pescados e laticínios, justamente porque nesses alimentos a deterioração química e microbiológica gera sinais facilmente correlacionáveis com mudanças cromáticas. Além disso, filmes ativos com quitosana, flavonoides, antocianinas e nanocargas vêm sendo estudados para retardar deterioração e informar frescor de forma mais direta ao usuário final.

Em **laticínios e produtos fermentados**, a literatura ainda é menos volumosa que em carnes e frutas, mas há evidências de uso promissor de revestimentos de gelatina, filmes proteicos, sensores de pH e embalagens com indicadores de contaminação e mofo. Vanaraj et al. (2024) mencionam o potencial de revestimentos de

gelatina para controle de umidade e prolongamento da qualidade em produtos lácteos. Rodrigues et al. (2021) reforçam que o desenvolvimento de biossensores naturais em associação a biopolímeros pode apoiar o monitoramento de alterações fisiológicas e microbiológicas também nesse grupo de alimentos.

3.7. Segurança, Migração e Regulação

Embora o potencial tecnológico seja amplo, a literatura revisada insiste que a segurança é uma condição de legitimidade e não um aspecto secundário. Zhou et al. (2024) dedicam parte central de sua revisão à migração de nanofillers, métodos de avaliação e questões de citotoxicidade e ecotoxicidade. Seus resultados indicam que a migração pode ser baixa em vários sistemas, mas não pode ser presumida como irrelevante, especialmente em alimentos ácidos, em materiais submetidos a condições severas e em nanoestruturas metálicas ou metal-óxido. O próprio estudo ressalta que os efeitos ambientais finais dos nanocompósitos ainda permanecem insuficientemente compreendidos.

A EFSA mantém posição clara de que materiais em contato com alimentos devem ser avaliados com base em dados de migração e toxicologia, e que substâncias e aplicações envolvendo nanomateriais exigem orientação específica de avaliação de risco. A autoridade europeia observa que materiais de contato com alimentos podem transferir químicos para alimentos e bebidas, e que essa transferência não pode gerar preocupação de segurança, alterar a composição de modo inaceitável nem afetar a qualidade sensorial do alimento. No caso dos nanomateriais, a EFSA mantém documentos e anexos específicos para avaliação da presença de

pequenas partículas e nanopartículas em aplicações alimentares e de food contact materials.

Além do risco toxicológico estrito, os estudos apontam desafios de percepção e aceitação. Stoica et al. (2024) observam que consumidores tendem a pesar benefícios de maior frescor e vida útil contra preocupações com segurança e preço. No caso das embalagens ativas, o próprio contato funcional com o alimento — por migração controlada ou absorção — torna a comunicação de segurança mais sensível do que em sistemas passivos. Já em nanocompósitos, a presença de partículas metálicas ou nanoestruturas ainda pode despertar resistência quando a regulação e a informação pública são insuficientes.

3.8. Sustentabilidade, Circularidade e Escala Industrial

A revisão mostra que a sustentabilidade desses sistemas não pode ser avaliada apenas pela substituição do plástico fóssil. González-López et al. (2023) e Stoica et al. (2024) enfatizam que soluções bio-based só se tornam de fato sustentáveis quando combinam desempenho técnico, viabilidade econômica, adequada destinação pós-uso e compatibilidade com políticas ambientais. O exemplo do PLA é emblemático: embora tenha menor pegada de carbono e boa aplicação em embalagens, Stoica et al. (2024) lembram que sua degradação frequentemente requer compostagem industrial, o que relativiza a ideia de “biodegradável” quando não há infraestrutura adequada.

Há também forte ênfase no uso de subprodutos agroindustriais e resíduos como fonte de compostos ativos ou de matéria-prima para biopolímeros e sensores naturais. Andrade et al. (2025) apontam que

extratos naturais e compostos fenólicos podem ser obtidos de correntes residuais, contribuindo para princípios de economia circular. Chiu et al. (2024) observam algo semelhante no caso de pigmentos naturais aplicados como sensores bio-based. Isso amplia o valor dessas tecnologias ao conectá-las não só à preservação, mas à valorização de resíduos e à redução de impactos em toda a cadeia produtiva.

No entanto, a literatura é igualmente clara sobre as limitações de escala. Salgado et al. (2021) e González-López et al. (2023) assinalam que um dos maiores gargalos do campo está na transição do protótipo laboratorial para aplicação industrial real. Entre os obstáculos mais citados estão custo de produção, estabilidade durante armazenamento e processamento, repetibilidade de desempenho, adequação às linhas industriais existentes, exigências regulatórias e aceitação do mercado. Em síntese, a tecnologia está avançada em muitos nichos, mas ainda há distância considerável entre sucesso experimental e adoção ampla.

Os resultados desta revisão permitem afirmar que a convergência entre nanotecnologia e biopolímeros representa uma mudança estrutural na lógica da preservação de alimentos. Historicamente, o objetivo central da embalagem era separar alimento e ambiente; agora, o movimento predominante é transformar a embalagem em interface funcional, capaz de interagir com o alimento, modular microambientes e informar sobre o estado do produto. Esse deslocamento conceitual, já fortemente presente em Ahari e Soufiani (2021), Azeredo e Corrêa (2021) e Mkhari et al. (2025), redefine o papel da embalagem dentro da engenharia de alimentos: ela deixa de ser um componente periférico e passa a integrar a estratégia de conservação propriamente dita.

Do ponto de vista dos materiais, os biopolímeros oferecem base estratégica para sustentabilidade, mas a revisão mostra que o discurso de substituição direta dos polímeros convencionais é excessivamente simplificador. Em quase todos os casos, o desempenho competitivo depende de modificação estrutural, formulação em blendas, uso de plastificantes, reforço com nanocargas ou incorporação de compostos funcionais. Isso significa que a pergunta correta não é se os biopolímeros “substituem” o plástico, mas em que aplicações, sob quais exigências e com quais estratégias de engenharia eles podem desempenhar com eficiência comparável ou superior. González-López et al. (2023), Taherimehr et al. (2021) e Stoica et al. (2024) convergem exatamente nesse ponto.

A nanotecnologia, nesse contexto, aparece menos como adição acessória e mais como mecanismo de viabilização funcional. Nanofillers e nanoestruturas podem resolver um dos problemas clássicos dos biopolímeros — sua fragilidade frente a umidade e gases — ao aumentar tortuosidade, resistência e estabilidade, além de introduzir ação antimicrobiana e antioxidante. Porém, o mesmo elemento que aumenta desempenho também aumenta complexidade de avaliação de risco. Isso cria uma tensão inevitável entre eficácia tecnológica e responsabilidade toxicológica. A literatura de Zhou et al. (2024), Muthu et al. (2025) e EFSA mostra que o avanço industrial do campo dependerá diretamente da capacidade de provar segurança de migração, estabilidade e destino ambiental de materiais nanoestruturados.

A discussão também mostra que embalagens ativas e inteligentes cumprem papéis distintos, mas crescentemente complementares. As ativas atuam na deterioração; as inteligentes atuam na informação. As primeiras reduzem oxidação, etileno, umidade ou

carga microbiana; as segundas reduzem incerteza, permitem monitoramento em tempo real e diminuem descartes baseados apenas em datas fixas. Quando combinadas, podem gerar sistemas mais eficazes tanto na conservação quanto na gestão do risco de desperdício. Esse é um ponto importante porque ajuda a explicar por que a pesquisa recente fala cada vez mais em sistemas “smart-active”, e não em soluções isoladas.

Outro aspecto central é que a sustentabilidade dessas tecnologias não se mede apenas pela biodegradabilidade declarada. É necessário considerar origem da matéria-prima, necessidade de compostagem industrial, possibilidade de reciclagem, persistência ambiental de nanocargas, consumo energético de processamento e compatibilidade com cadeias reais de descarte. O caso do PLA, por exemplo, é promissor, mas ilustra como a rotulagem simplificada pode ocultar exigências infraestruturais complexas. De modo semelhante, a incorporação de metais ou óxidos em nanocompósitos pode melhorar a conservação, mas também gerar passivos ambientais ou dificuldades de circularidade se o fim de vida do material não for adequadamente tratado.

Do ponto de vista setorial, a literatura sugere que carnes, pescados, frutas e hortaliças continuarão sendo os principais vetores de aplicação dessas tecnologias. Isso ocorre porque concentram elevada perecibilidade, perdas relevantes e grande sensibilidade a pequenas melhorias de atmosfera, umidade, oxidação e carga microbiana. Em termos de política pública e inovação industrial, isso indica que programas de redução de perdas deveriam priorizar justamente matrizes de alta perecibilidade e alto desperdício, combinando desenvolvimento de embalagens funcionais com melhorias em cadeia fria, logística e monitoramento. A revisão da

UNEP e da FAO reforça que a tecnologia de embalagem é mais eficaz quando inserida em estratégia sistêmica, e não tratada isoladamente.

Por fim, os estudos revisados apontam que a próxima etapa do campo não será apenas desenvolver novos materiais, mas demonstrar **viabilidade regulatória, econômica e industrial**. Há, hoje, vasta literatura de prova de conceito; o gargalo está em escalonamento, padronização, repetibilidade, aceitação do consumidor e conformidade regulatória internacional. Assim, o futuro da preservação de alimentos com nanotecnologia e biopolímeros dependerá menos do surgimento de novas formulações isoladas e mais da capacidade de integrar ciência de materiais, avaliação de risco, engenharia de processos, desenho de cadeia logística e políticas de sustentabilidade.

4. CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo deste artigo permite concluir que a preservação de alimentos entrou em uma fase de transformação paradigmática, na qual a simples função protetiva da embalagem já não responde, de forma suficiente, às exigências contemporâneas de segurança alimentar, sustentabilidade ambiental, redução de perdas e eficiência logística. Em um cenário global marcado por aumento da demanda por alimentos de qualidade, pressão sobre recursos naturais, crescimento das cadeias de abastecimento e agravamento do impacto ambiental associado ao desperdício, torna-se evidente que os sistemas tradicionais de conservação, embora ainda indispensáveis, precisam ser complementados por soluções tecnológicas mais sofisticadas, responsivas e sustentáveis. Nesse contexto, a convergência entre nanotecnologia e biopolímeros

emerge como uma das rotas mais consistentes e promissoras para a construção de uma nova geração de materiais de embalagem e conservação, capazes de ampliar a vida útil dos alimentos e, ao mesmo tempo, reposicionar a engenharia de alimentos em direção a modelos mais circulares, inteligentes e ambientalmente responsáveis.

A primeira conclusão central deste estudo é que o avanço das tecnologias emergentes em preservação de alimentos não pode ser compreendido apenas como uma melhoria incremental dos materiais de embalagem já existentes. O que se observa é uma mudança mais profunda na lógica de concepção do sistema de conservação. A embalagem deixa de ser um elemento passivo, destinado apenas a separar o alimento do meio externo, e passa a ser concebida como um dispositivo funcional, dinâmico e, em muitos casos, interativo. Essa transformação é especialmente visível no crescimento das embalagens ativas e inteligentes, que representam uma ruptura importante com o modelo convencional de acondicionamento. Como mostram Azeredo e Corrêa (2021), a inteligência da embalagem está relacionada à sua capacidade de monitorar parâmetros relevantes do produto e do ambiente, enquanto a atividade funcional se vincula à intervenção direta em mecanismos de deterioração. Assim, a embalagem já não apenas protege; ela conserva, sinaliza, responde e informa.

Sob essa perspectiva, a nanotecnologia desempenha papel decisivo. Sua principal contribuição reside na possibilidade de modificar, em escala nanométrica, propriedades estruturais e funcionais dos materiais, ampliando o desempenho de sistemas que, em escala convencional, apresentariam limitações significativas. A literatura revisada mostra que nanocargas, nanopartículas, nanoemulsões e

nanoestruturas permitem melhorar propriedades de barreira, resistência mecânica, estabilidade térmica, atividade antimicrobiana e comportamento funcional de materiais poliméricos. Isso significa que a nanotecnologia não deve ser vista apenas como adição sofisticada a materiais tradicionais, mas como ferramenta de reengenharia da própria matriz de conservação. Quando nanomateriais são incorporados de forma tecnicamente adequada, eles alteram o modo como gases, vapor d'água, radiação e microrganismos interagem com a embalagem e, conseqüentemente, com o alimento. Essa constatação é especialmente relevante porque demonstra que o prolongamento da vida útil não depende apenas de barreiras mais espessas ou de adição direta de conservantes, mas de uma reorganização funcional das interfaces material-alimento-ambiente.

Ao mesmo tempo, os biopolímeros assumem papel igualmente estratégico, sobretudo no que se refere à transição para materiais de base renovável, menor dependência de polímeros fósseis e possibilidade de biodegradabilidade ou compostabilidade. A revisão da literatura mostra que materiais como quitosana, amido, celulose, pectina, alginato, gelatina, zeína e ácido polilático já ultrapassaram o estágio de curiosidade científica e se consolidaram como plataformas reais para desenvolvimento de filmes, revestimentos, compósitos, biofilmes e sistemas de embalagem com funções específicas. Sua relevância não está apenas na origem biológica ou na biodegradabilidade potencial, mas na versatilidade estrutural e funcional que apresentam quando combinados a plastificantes, extratos naturais, nanocargas e estratégias de modificação físico-química. Em outras palavras, os biopolímeros não devem ser lidos apenas como “substitutos verdes” do plástico convencional, mas como materiais com identidade própria, propriedades particulares e

potencial para suportar arquiteturas de conservação tecnologicamente avançadas.

Contudo, uma conclusão importante deste estudo é que a simples substituição do plástico convencional por biopolímeros, isoladamente, não resolve o problema da preservação de alimentos em escala industrial. A literatura foi clara ao mostrar que muitos biopolímeros apresentam limitações significativas quando empregados sozinhos, especialmente no que se refere à barreira contra umidade, resistência mecânica, estabilidade térmica e comportamento durante processamento industrial. Isso significa que a agenda da sustentabilidade não pode ser tratada de maneira simplista ou retórica. Um material bio-based só se torna tecnologicamente relevante quando consegue responder, com desempenho suficiente, às exigências reais da cadeia produtiva. Por isso, o verdadeiro avanço não está no abandono puro e simples dos materiais convencionais, mas na capacidade de formular bio-nanocompósitos, blendas e sistemas híbridos que conciliem sustentabilidade material com robustez funcional. A convergência entre biopolímeros e nanotecnologia, portanto, não é contingente; ela é, em muitos casos, a condição de viabilidade técnica dessas novas embalagens.

Outro ponto essencial revelado pela análise é o papel central das embalagens ativas na ampliação da vida útil. Ao incorporar agentes antimicrobianos, antioxidantes, sequestradores de oxigênio, absorvedores de etileno e reguladores de umidade, esses sistemas atuam diretamente nos mecanismos de deterioração que limitam a durabilidade dos alimentos. Em vez de apenas reduzir a exposição passiva do alimento aos agentes externos, a embalagem ativa modifica o microambiente interno e interfere no curso da

degradação físico-química e microbiológica. Esse aspecto é decisivo porque representa uma mudança de escala na engenharia da conservação. Não se trata mais apenas de atrasar a contaminação ou a perda de qualidade por proteção estática, mas de intervir de forma controlada sobre processos que conduzem ao vencimento sensorial, microbiológico ou nutricional do alimento. Os resultados discutidos neste artigo mostram que essa estratégia tem se revelado especialmente eficaz para carnes, pescados, frutas e hortaliças, justamente os grupos de alimentos mais suscetíveis a perdas ao longo da cadeia produtiva.

Da mesma forma, a emergência das embalagens inteligentes amplia a dimensão estratégica dessas tecnologias. O monitoramento em tempo real de pH, umidade, oxigênio, temperatura, integridade da cadeia fria e compostos voláteis relacionados ao frescor permite que a embalagem atue também como sistema de comunicação e de gestão da qualidade. Esse é um ponto de enorme relevância porque desloca a tomada de decisão sobre descarte, consumo ou comercialização do alimento para bases mais dinâmicas e contextualizadas. Em vez de depender exclusivamente de prazos fixos impressos, que nem sempre refletem a condição real do produto, sistemas inteligentes permitem avaliações mais ajustadas ao histórico efetivo de armazenamento e deterioração. Isso tem implicações econômicas, logísticas e ambientais diretas, uma vez que parte do desperdício alimentar decorre exatamente da incapacidade de distinguir, com precisão, entre alimentos efetivamente comprometidos e alimentos ainda seguros e aceitáveis. Nesse sentido, a inteligência embarcada na embalagem não aumenta apenas a segurança; ela reduz incertezas e cria condições para uma gestão mais racional do alimento ao longo da cadeia.

Uma conclusão complementar, e extremamente importante, é que os benefícios dessas tecnologias não se limitam ao prolongamento da vida útil em termos estritamente quantitativos. A literatura mostra que sua aplicação adequada pode contribuir também para manutenção de atributos sensoriais, retenção de compostos bioativos, controle de oxidação, redução de escurecimento, menor perda de massa, maior estabilidade microbiológica e, em alguns casos, melhor preservação do valor nutricional. Isso é essencial porque a qualidade de um alimento não pode ser reduzida ao simples número de dias adicionais de armazenamento. Vida útil ampliada com perda acentuada de qualidade sensorial, textura, cor ou valor nutritivo teria utilidade limitada. Portanto, a relevância dessas tecnologias reside exatamente em sua capacidade de atuar sobre múltiplas dimensões da qualidade, integrando segurança, aceitabilidade e estabilidade.

Ainda assim, a pesquisa revisada também conduz a conclusões de prudência. O campo da nanotecnologia aplicada à conservação de alimentos, embora extremamente promissor, permanece atravessado por desafios relevantes ligados à segurança toxicológica, à migração de nanopartículas, à ecotoxicidade e ao destino ambiental dos materiais ao final de seu ciclo de vida. A presença de nanopartículas metálicas e de óxidos metálicos, por exemplo, pode oferecer benefícios antimicrobianos expressivos, mas também exige análise rigorosa quanto ao potencial de migração para os alimentos, à exposição crônica e aos possíveis efeitos em ecossistemas. Isso significa que a adoção dessas soluções não pode ser guiada apenas pelo desempenho tecnológico. É indispensável uma abordagem de inovação responsável, que integre desde a fase de desenvolvimento a avaliação de risco, a caracterização de migração, os testes toxicológicos, a conformidade regulatória e a análise de ciclo de vida.

A contribuição da EFSA, ao exigir diretrizes específicas para materiais em contato com alimentos e para nanomateriais, reforça exatamente essa necessidade de prudência técnico-regulatória.

Nesse mesmo sentido, o estudo permite concluir que a sustentabilidade dessas tecnologias não deve ser inferida automaticamente a partir da origem renovável dos materiais. O fato de um polímero ser bio-based ou rotulado como biodegradável não garante, por si só, desempenho ambiental superior. É necessário considerar o ciclo de vida completo: origem da matéria-prima, processamento, consumo energético, compatibilidade com sistemas de reciclagem ou compostagem, persistência dos componentes adicionados, infraestrutura disponível para destinação final e impactos decorrentes da incorporação de nanomateriais. O caso do PLA é ilustrativo. Embora seja um dos biopolímeros mais promissores do ponto de vista industrial e apresente vantagens relevantes, sua degradação em condições reais depende, frequentemente, de compostagem industrial. Em contextos nos quais essa infraestrutura não existe, a vantagem ambiental pode ser reduzida. O mesmo raciocínio vale para compósitos com nanocargas inorgânicas, cuja presença pode dificultar reciclagem ou gerar novos desafios ambientais. Portanto, a sustentabilidade real desses sistemas precisa ser verificada empiricamente e não apenas presumida por seu enquadramento conceitual.

Outro resultado importante da análise é que a cadeia produtiva dos alimentos precisa ser considerada de maneira sistêmica. Nenhuma embalagem, por mais sofisticada que seja, corrige isoladamente problemas de logística, falhas de refrigeração, manejo inadequado pós-colheita, ausência de rastreabilidade ou infraestrutura precária de distribuição. O prolongamento da vida útil é mais eficaz quando

integrado a boas práticas de processamento, cadeia fria eficiente, controle sanitário, rastreabilidade e capacitação operacional. Isso significa que as tecnologias discutidas neste artigo devem ser entendidas como parte de uma estratégia ampliada de engenharia da conservação, e não como solução autônoma e universal. Seu potencial máximo emerge quando são combinadas a melhorias organizacionais e infraestruturais em toda a cadeia de suprimento.

Do ponto de vista da inovação industrial, uma conclusão particularmente relevante é a existência de uma distância ainda significativa entre o sucesso laboratorial e a implementação em larga escala. Muitos dos estudos revisados apresentam resultados excelentes em protótipos, filmes experimentais, revestimentos em escala piloto e simulações controladas. Entretanto, a adoção industrial depende de fatores adicionais, como custo das matérias-primas, compatibilidade com linhas de produção existentes, estabilidade em armazenamento prolongado, repetibilidade do desempenho, exigências de rotulagem, aceitação do consumidor, homologação regulatória e capacidade de operar em mercados altamente competitivos. Isso sugere que o avanço futuro do campo não dependerá apenas de novas descobertas em ciência dos materiais, mas também de soluções de engenharia de processo, escalonamento, modelagem econômica e estratégia regulatória. Em síntese, a inovação precisa sair do laboratório sem perder funcionalidade nem segurança.

No plano social e econômico, a análise também permite reconhecer que essas tecnologias podem desempenhar papel importante na redução de desperdício, especialmente em alimentos de alta perecibilidade e alto valor agregado. Em frutas, hortaliças, carnes e pescados, pequenas extensões de vida útil já são suficientes para

reduzir perdas durante transporte, armazenamento e exposição no varejo. Isso pode beneficiar não apenas grandes cadeias industriais, mas também produtores, cooperativas, setores exportadores e sistemas alimentares que enfrentam perdas significativas antes mesmo da chegada do alimento ao consumidor final. Em contextos de insegurança alimentar, escassez logística e pressão climática sobre a produção, tecnologias que preservam melhor os alimentos têm valor estratégico muito além da embalagem em si. Elas podem contribuir para melhorar disponibilidade, reduzir pressão sobre produção adicional e diminuir o custo ambiental associado à reposição de alimentos perdidos.

Há ainda uma dimensão simbólica e institucional importante a ser destacada. A adoção de embalagens ativas e inteligentes baseadas em biopolímeros e nanotecnologia ajuda a redefinir a própria identidade da engenharia de alimentos contemporânea. O campo passa a operar de forma mais integrada com ciência dos materiais, toxicologia, ciência de dados, sustentabilidade e economia circular. Essa interdisciplinaridade não é acessória; ela passa a ser constitutiva do desenvolvimento tecnológico. Projetar uma embalagem eficiente hoje significa compreender microbiologia, transferência de massa, interação material-alimento, comportamento do consumidor, normativa sanitária e impacto ambiental. A preservação de alimentos deixa, assim, de ser problema estritamente conservacionista e se torna problema de engenharia sistêmica.

Em termos de agenda futura, este estudo sugere que os próximos avanços mais relevantes deverão ocorrer em quatro frentes. A primeira é o aperfeiçoamento de bio-nanocompósitos com melhor equilíbrio entre barreira, resistência e segurança. A segunda é o

desenvolvimento de sistemas inteligentes mais estáveis, especialmente os baseados em pigmentos naturais e biossensores. A terceira é a construção de marcos regulatórios mais claros, especialmente para nanomateriais em contato com alimentos. E a quarta é a produção de estudos de ciclo de vida e de viabilidade econômica que permitam distinguir, entre as soluções atualmente propostas, quais são efetivamente escaláveis e sustentáveis em condições reais. Sem esse conjunto de avanços, o campo corre o risco de acumular protótipos promissores sem transição consistente para o mercado.

Por tudo isso, a conclusão geral do artigo é que nanotecnologia e biopolímeros formam, em conjunto, uma base tecnocientífica extremamente robusta para a próxima geração de sistemas de preservação de alimentos. Seu potencial está amplamente demonstrado em termos de extensão da vida útil, melhoria de barreira, controle de deterioração, monitoramento de frescor e redução de desperdício. Entretanto, esse potencial só será plenamente convertido em benefício social, econômico e ambiental quando acompanhado por avaliação rigorosa de segurança, planejamento regulatório, viabilidade industrial e integração com políticas mais amplas de sustentabilidade alimentar. O êxito dessas tecnologias dependerá menos de promessas abstratas de inovação e mais da capacidade de articular desempenho material, responsabilidade toxicológica, circularidade e aplicabilidade real. Em síntese, o futuro da preservação de alimentos não está apenas em conservar por mais tempo, mas em conservar melhor, com menor impacto, maior inteligência e maior compromisso com a sustentabilidade da cadeia produtiva como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHARI, H.; SOUFIANI, S. P. **Smart and Active Food Packaging: Insights in Novel Food Packaging.** *Frontiers in Microbiology*, v. 12, 657233, 2021.

ANDRADE, M. A. et al. **Emerging Trends in Active Packaging for Food: A Six-Year Review.** 2025.

AZEREDO, H. M. C.; CORRÊA, D. S. **Smart choices: Mechanisms of intelligent food packaging.** *Current Research in Food Science*, v. 4, p. 932-936, 2021.

CHIU, I. et al. **Biopolymer-based intelligent packaging integrated with natural colourimetric sensors for food safety and sustainability.** *Analytical Science Advances*, v. 5, n. 5-6, e2300065, 2024.

EFSA. **Nanotechnology.** European Food Safety Authority, 2026.

EFSA. **Food contact materials.** European Food Safety Authority, 2026.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, M. E. M. E. et al. **Current trends in biopolymers for food packaging: a review.** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023.

MKHARI, T.; ADEYEMI, J. O.; FAWOLE, O. A. **Recent Advances in the Fabrication of Intelligent Packaging for Food Preservation: A Review.** *Processes*, v. 13, n. 2, 539, 2025.

MUTHU, A. et al. **Nanomaterials for Smart and Sustainable Food Packaging: Nano-Sensing Mechanisms, and Regulatory Perspectives.** *Foods*, 2025.

REMEDIO, L. N. et al. **Intelligent Packaging Systems with Anthocyanin: Influence of Different Polymers and Storage Conditions.** 2024.

RODRIGUES, C. et al. **Bio-Based Sensors for Smart Food Packaging —Current Applications and Future Trends.** *Sensors*, v. 21, 2148, 2021.

SALGADO, P. R. et al. **Recent Developments in Smart Food Packaging Focused on Biobased and Biodegradable Polymers.** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021.

STOICA, M. et al. **Review of Bio-Based Biodegradable Polymers: Smart Solutions for Sustainable Food Packaging.** *Foods*, v. 13, n. 19, 3027, 2024.

TAHERIMEHR, M. et al. **Trends and challenges of biopolymer-based nanocomposites in food packaging.** *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 20, p. 5321-5344, 2021.

UNEP. **Food loss and waste.** United Nations Environment Programme, 2025.

VANARAJ, R. et al. **A Current Trend in Efficient Biopolymer Coatings for Edible Fruits to Enhance Shelf Life.** 2024.

ZHOU, X. et al. **Nanofillers in Novel Food Packaging Systems and Their Toxicity Issues.** *Foods*, v. 13, n. 13, 2014, 2024.

¹ Doutor em Gestão de Projetos de Tecnologia da Informação e Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail: romulodba@gmail.com

² Mestre em Ciência e Tecnologia em Alimentos pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM). E-mail: aba.26@hotmail.com

³ Doutora em Ciências e Saúde Animal pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atua no Centro Universitário de Patos (Unifip). E-mail: sabrinafigueiredo@fiponline.edu.br

⁴ Mestre em Alimentos e Nutrição, Tecnólogo de Alimentos pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). E-mail: lailton.f@hotmail.com

⁵ Mestre pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). E-mail: marcus.d.souza@ufv.br

⁶ Mestrando em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). E-mail: Jaimejemusi210@gmail.com