

Quitosano: una solución natural para conservar frutas tropicales sin ceras artificiales

Chitosan: a natural solution for preserving tropical fruits without artificial waxes

CABRERA ROMERO, ALEXIS NICOLÁS¹

¹ Laboratorio de Humedales y Sustentabilidad Ambiental. Maestría en Ciencias de la ingeniería. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz 93821, Mexico.
Autor por correspondencia:

Recibido: 15 de mayo de 2025

Aceptado: 06 de noviembre 2025

Publicado: 24 de noviembre de 2025

Resumen

Este artículo de revisión narrativa analiza críticamente los avances científicos sobre el uso del quitosano como recubrimiento comestible en frutas tropicales, en comparación con las ceras convencionales de origen sintético y mineral. Se examina su eficacia en la conservación poscosecha, las propiedades antimicrobianas, su perfil de inocuidad bajo normativas internacionales, y su impacto ambiental evaluado mediante análisis de ciclo de vida (LCA). Asimismo, se discuten sus aplicaciones en la economía circular y su potencial en biorremediación. A través de una integración crítica de evidencias, este trabajo subraya que el quitosano constituye una alternativa tecnológicamente viable, ambientalmente responsable y económicamente prometedora para los sistemas agroalimentarios sostenibles.

Palabras clave: *Quitosano, recubrimientos comestibles, frutas tropicales, economía circular, conservación postcosecha, seguridad alimentaria.*

Abstract

This narrative review article critically analyzes the scientific advances regarding the use of chitosan as an edible coating for tropical fruits, in comparison with conventional waxes of synthetic and mineral origin. Its effectiveness in postharvest preservation, antimicrobial properties, safety profile under international regulations, and environmental impact assessed through life cycle analysis (LCA) are examined. Additionally, its applications in the circular economy and potential for bioremediation are discussed. Through a critical integration of evidence, this study highlights that

chitosan represents a technologically viable, environmentally responsible, and economically promising alternative for sustainable agri-food systems.

Keywords: *Chitosan, edible coatings, tropical fruits, circular economy, postharvest preservation, food safety.*

1. Introducción

El desperdicio de alimentos frescos representa una de las problemáticas más severas en la actualidad, con implicaciones directas sobre la seguridad alimentaria global, el cambio climático y la sostenibilidad económica. Dentro de este contexto, las frutas tropicales constituyen una categoría especialmente vulnerable debido a su alta tasa respiratoria, rápida maduración y susceptibilidad a daños mecánicos y microbiológicos. Según la FAO (2019), se estima que aproximadamente un tercio de todos los alimentos producidos en el mundo se pierden o desperdician, siendo las frutas y hortalizas las más afectadas, con una pérdida poscosecha que puede superar el 40 % en regiones tropicales.

Tradicionalmente, las ceras convencionales derivadas de fuentes petroquímicas (como el polietileno o la parafina) y vegetales (carnauba, candelilla) han sido ampliamente utilizadas como recubrimientos para prolongar la vida útil de los frutos al reducir la pérdida de humedad, limitar la respiración y conferir un aspecto brillante que incrementa su aceptación comercial. No obstante, estas ceras presentan limitaciones críticas: su origen no renovable, su persistencia ambiental y la necesidad de incorporar aditivos antimicrobianos para controlar enfermedades poscosecha.

Frente a estos desafíos, ha surgido una línea de investigación centrada en recubrimientos comestibles de origen biológico, entre los cuales destaca el quitosano. Este biopolímero natural, derivado principalmente de la desacetilación de quitina extraída de crustáceos, ha demostrado propiedades antimicrobianas, biodegradabilidad, compatibilidad con alimentos y potencial para formar películas protectoras sobre superficies vegetales (Rinaudo, 2006; Dutta et al., 2009). El aprovechamiento de residuos marinos para la obtención de quitosano no solo ofrece una solución

técnica viable para la conservación poscosecha, sino que también se alinea con los principios de la economía circular y la bioeconomía sostenible (Shahidi & Abuzaytoun, 2005).

Este artículo presenta una revisión crítica de la literatura científica reciente, comparando sistemáticamente el quitosano con las ceras tradicionales en cuanto a funcionalidad, eficacia, seguridad alimentaria, impacto ambiental y escalabilidad industrial. Se busca aportar un marco de referencia actualizado que oriente futuras investigaciones y facilite decisiones informadas en la industria agroalimentaria, especialmente en contextos donde la implementación de soluciones sostenibles es urgente.

2. Metodología

La presente revisión se fundamenta en una estrategia de búsqueda bibliográfica sistemática, orientada a identificar publicaciones científicas relevantes entre los años 2010 y 2024. Las bases de datos consultadas incluyeron Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed y Google Scholar. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés, tales como “chitosan edible coating”, “postharvest preservation tropical fruits”, “biodegradable packaging”, “circular economy in agroindustry” y “chitosan antimicrobial mechanism”.

Se establecieron criterios de inclusión rigurosos: artículos revisados por pares, estudios experimentales con resultados verificables, revisiones sistemáticas, reportes técnicos y capítulos de libros académicos. Se excluyeron fuentes no científicas, duplicadas o sin acceso al texto completo. La selección final integró 65 referencias que cumplen con los estándares de calidad y pertinencia temática, las cuales han sido incorporadas y citadas conforme al formato Harvard en el cuerpo del texto y en la bibliografía.

La revisión se estructuró en función de cinco ejes temáticos: i) propiedades fisicoquímicas y biológicas del quitosano; ii) comparación funcional con ceras convencionales; iii) evaluación de inocuidad alimentaria; iv) impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (LCA); y v) aplicaciones emergentes en economía circular y biorremediación. Cada eje fue abordado con un

enfoque crítico y analítico, integrando hallazgos contrastados y discutiendo sus implicaciones prácticas e investigativas.

3. Resultados

El quitosano es un polisacárido lineal que se obtiene mediante la desacetilación parcial o total de la quitina, uno de los biopolímeros más abundantes del planeta, presente en el exoesqueleto de crustáceos, insectos y en las paredes celulares de algunos hongos (Rinaudo, 2006; Younes & Rinaudo, 2015). Desde el punto de vista químico, está conformado por unidades de β -(1 \rightarrow 4)-D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina, cuya proporción determina su grado de desacetilación y, por ende, sus propiedades fisicoquímicas y funcionales (Elsabee & Abdou, 2013; Dutta et al., 2009).

Entre las propiedades más relevantes del quitosano para su uso como recubrimiento comestible se destacan biodegradable, compatible y eficaz (Ferreira et al., 2016; Wang et al., 2016; Hosseini et al., 2013; Martins et al., 2012; Ojeda & Freer, 2011; Bordenave et al., 2010; Goy et al., 2009; Coma, 2008)

El quitosano se degrada de manera natural por acción de enzimas como la quitinasa y la lisozima, lo que lo convierte en una opción ambientalmente amigable para la industria alimentaria, al ser no tóxico y no alergénico en la mayoría de los casos, es compatible con tejidos biológicos y ha sido aprobado por diversas agencias regulatorias para su uso en alimentos y envases. El quitosano puede formar películas delgadas, transparentes, flexibles y resistentes, que actúan como barrera contra gases (O₂, CO₂), vapor de agua y compuestos volátiles, reduciendo la respiración de los frutos y prolongando su vida útil. Además, posee un mecanismo de acción múltiple contra bacterias, levaduras y hongos, que incluye la alteración de la permeabilidad de membrana, la inhibición de enzimas esenciales y la quelación de metales traza. Estas propiedades lo convierten en una alternativa prometedora frente a los recubrimientos convencionales. Además, su funcionalidad puede mejorarse mediante técnicas de modificación química (acetilación, carboximetilación) o su combinación con otros biopolímeros como alginatos, pectinas o proteínas

Un aspecto clave es su comportamiento dependiendo del pH. El quitosano presenta solubilidad en soluciones ácidas ($\text{pH} < 6.5$), lo cual permite su aplicación en soluciones acuosas sin necesidad de disolventes orgánicos, a diferencia de algunas ceras comerciales (Pillai et al., 2009). Esta propiedad facilita su uso en sistemas alimentarios sensibles y refuerza su carácter ecológico.

Diversos estudios han documentado aplicaciones exitosas de quitosano en frutas tropicales. Por ejemplo, Jiang & Li (2001) reportaron una reducción significativa en la pérdida de peso, tasa de respiración y descomposición de mango tratado con quitosano. Asimismo, Ali et al. (2011) observaron mejoras en la firmeza, contenido de sólidos solubles y color en papayas 'Eksotika II' almacenadas a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De igual forma, la adición de extractos naturales al recubrimiento de quitosano puede potenciar su actividad funcional. Hossain et al. (2015) demostraron que la incorporación de aceites esenciales como tomillo y orégano aumenta la eficacia antimicrobiana del recubrimiento, sin comprometer sus propiedades barrera ni la aceptabilidad sensorial del fruto.

El quitosano destaca por una combinación única de propiedades estructurales, funcionales y ecológicas que lo posicionan como un biopolímero versátil para la protección poscosecha de frutas tropicales. Su estudio y optimización sigue siendo un campo fértil para la investigación en ciencia y tecnología de alimentos.

3.1. Quitosano vs ceras: ¿Quién gana en sostenibilidad y eficiencia?

Desde hace décadas, la industria hortofrutícola ha empleado ceras convencionales como solución eficaz para reducir la pérdida de humedad en frutas, mejorar su presentación y retardar la senescencia. Estas ceras, derivadas principalmente del petróleo (como la parafina y las microcristalinas) o de fuentes vegetales como la cera de carnauba, tienen una funcionalidad comprobada, pero también presentan limitaciones significativas en términos de sostenibilidad y seguridad alimentaria (Arnon et al., 2014; Hagenmaier & Baker, 1997).

En comparación, el quitosano ofrece ventajas estructurales, funcionales y ecológicas que lo colocan como una opción competitiva frente a estos recubrimientos tradicionales. La Tabla 1 presenta una comparación detallada entre ambos sistemas de recubrimiento:

Tabla 1. Comparación funcional entre quitosano y ceras convencionales

Característica	Quitosano	Ceras convencionales
Origen	Biopolímero natural (marino o fúngico)	Petroquímico o vegetal
Biodegradabilidad	Alta	Limitada o nula
Actividad antimicrobiana	Intrínseca (bacterias, hongos)	Generalmente no presenta
Solubilidad	Soluble en medios ácidos	Requiere solventes orgánicos
Apariencia del fruto	Película transparente o mate	Brillante, altamente comercial
Regulaciones internacionales	Aprobado por FDA, EFSA y Codex	Aprobadas según tipo y región
Impacto ambiental	Bajo, proveniente de residuos	Alto, no renovable
Compatibilidad con economía circular	Alta (revaloriza residuos)	Baja (lineal, genera residuos posconsumo)
Costo de producción	Variable (dependiente de materia prima)	Bajo (producción masiva y establecida)

El quitosano, además de reducir la transpiración y la actividad enzimática del fruto como las ceras tradicionales, añade una barrera biológica contra patógenos, lo que disminuye la necesidad de aplicar fungicidas postcosecha (Valencia-Chamorro et al., 2011). Este efecto es particularmente relevante en mercados que demandan alimentos con menor carga química.

Si bien las ceras poseen una ventaja competitiva en términos de costos y estandarización industrial, el quitosano representa una alternativa con mayor valor añadido, sobre todo en cadenas

agroalimentarias enfocadas en exportación, productos orgánicos o certificaciones de sostenibilidad (Borderías et al., 2015).

Estudios comparativos han evidenciado que frutas tropicales recubiertas con quitosano, como el mango y la papaya, mantienen mejor firmeza, reducen la pérdida de peso y muestran menor incidencia de mohos en comparación con aquellas tratadas con ceras convencionales (Campos et al., 2011; Hernández-Muñoz et al., 2008). Además, los consumidores perciben de forma positiva el uso de recubrimientos biodegradables, especialmente cuando se comunica su origen natural y sus beneficios sobre la salud y el medio ambiente (Xing et al., 2012).

Sin embargo, existen retos técnicos asociados al uso del quitosano, como la estandarización del grado de desacetilación, la optimización del pH de aplicación y la mejora de su adherencia a superficies cerosas de algunas frutas (Elsabee & Abdou, 2013). Estos aspectos están siendo abordados actualmente mediante la incorporación de aditivos naturales, el uso de técnicas de electroaspersión y el desarrollo de mezclas poliméricas adaptadas a cada tipo de fruta (Mohamed et al., 2017; Ferreira et al., 2016).

Aunque las ceras convencionales continúan dominando el mercado por su bajo costo y familiaridad, el quitosano se perfila como un recubrimiento más integral, con beneficios adicionales que responden a las exigencias contemporáneas de salud pública, sostenibilidad y competitividad internacional.

La inocuidad alimentaria es un criterio ineludible para la aceptación de nuevos materiales en contacto con alimentos. En este contexto, el quitosano ha sido objeto de diversas evaluaciones toxicológicas y regulatorias que respaldan su seguridad como recubrimiento comestible. Diversos organismos internacionales, como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) y el Codex Alimentarius, han emitido directrices y dictámenes favorables sobre el uso del quitosano en aplicaciones alimentarias (EFSA, 2011; Coma, 2008; FAO/WHO, 2009).

En Estados Unidos, la FDA ha catalogado al quitosano como un "ingrediente generalmente reconocido como seguro" (GRAS) bajo el código 21 CFR 172.896, permitiendo su uso como aditivo alimentario en ciertas condiciones. En Europa, la EFSA ha emitido opiniones científicas que avalan la inocuidad del quitosano derivado de fuentes marinas, siempre que se cumpla con especificaciones de pureza, grado de desacetilación y contenido en metales pesados (EFSA Panel on Dietetic Products, 2011).

Desde el punto de vista técnico, la principal preocupación sobre la inocuidad del quitosano radica en su origen marino y la posible presencia de alérgenos provenientes de crustáceos. No obstante, estudios recientes han demostrado que los procesos de purificación industrial eliminan la mayoría de los componentes alergénicos, y no se han reportado casos significativos de reacciones adversas cuando se utiliza en alimentos (Kim et al., 2018; Park et al., 2005).

Ensayos de migración específicos realizados en sistemas alimentarios han confirmado que el quitosano no transfiere compuestos tóxicos ni reacciona con componentes de los alimentos, incluso cuando se aplica en concentraciones del 1% al 2% sobre frutas frescas o procesadas (Kanatt et al., 2014; Hosseini et al., 2013). Además, su uso no genera subproductos peligrosos ni residuos persistentes, lo que lo diferencia de otros materiales sintéticos o ceras con disolventes.

La versatilidad del quitosano también permite su aplicación combinada con otros biopolímeros o agentes naturales, como aceites esenciales, extractos fenólicos o nanopartículas de plata, sin comprometer la seguridad del alimento (Mohamed et al., 2017; Jayakumar et al., 2010). Esta compatibilidad con compuestos GRAS amplía su potencial de uso en sistemas de recubrimiento activos o inteligentes.

Un caso documentado por Ojagh et al. (2010) evidenció que el recubrimiento de filetes de trucha con quitosano permitió extender significativamente su vida útil sin alterar parámetros organolépticos ni generar migración de residuos al alimento. Asimismo, estudios en frutas como plátano, papaya y cítricos han demostrado que el quitosano mantiene la integridad microbiológica y físico-química del producto, sin representar riesgos para el consumidor (Ali et al., 2011; Romanazzi et al., 2002).

En cuanto a la percepción del consumidor, investigaciones de mercado han revelado una creciente preferencia por productos recubiertos con materiales naturales y libres de químicos sintéticos. El etiquetado "biodegradable", "libre de residuos" o "procedente de subproductos marinos" ha mostrado influir positivamente en la intención de compra (Souza et al., 2019; Xu et al., 2017).

El quitosano cumple con los estándares de seguridad alimentaria exigidos por los principales organismos internacionales, y su perfil toxicológico ha sido validado por múltiples estudios científicos. Su uso como recubrimiento comestible no solo es seguro, sino que responde a las demandas actuales de inocuidad, sostenibilidad y trazabilidad dentro de las cadenas agroalimentarias modernas.

3.2. Quitosano: Recubrimiento natural con impacto ambiental positivo

La evaluación del impacto ambiental asociado al uso de recubrimientos para frutas tropicales debe contemplar no solo los efectos directos sobre el producto, sino también las consecuencias derivadas del origen, procesamiento, uso y disposición final de dichos materiales. En este sentido, el análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta integral que permite cuantificar de forma estandarizada la huella ambiental de un producto desde su cuna hasta su tumba (Roes & Patel, 2007).

Las ceras convencionales, especialmente aquellas de origen petroquímico como la parafina y las ceras microcristalinas, presentan un impacto ambiental significativo en etapas clave como la extracción de materias primas, el consumo energético durante su síntesis, y la persistencia de residuos en el ambiente. Además, su baja biodegradabilidad contribuye a la acumulación de desechos sólidos no compostables en los sistemas agrícolas y de distribución (Souza et al., 2019). Por el contrario, el quitosano presenta un perfil ambiental marcadamente favorable. Al derivarse de residuos de la industria pesquera (cáscaras de camarón, langosta, cangrejo) o de hongos, su producción se alinea con estrategias de valorización de subproductos, evitando el uso de recursos vírgenes y reduciendo la carga ambiental de las industrias extractivas (Pillai et al., 2009; Shahidi & Abuzaytoun, 2005).

Estudios de LCA comparativos, como el realizado por Kumar et al. (2020), han demostrado que el quitosano genera entre 40 % y 60 % menos emisiones de CO₂ equivalente que las ceras sintéticas, y presenta menores consumos de energía primaria no renovable. Además, el quitosano es completamente biodegradable en condiciones naturales, tanto en suelo como en ambientes acuáticos, sin generar residuos tóxicos ni microplásticos (Muxika et al., 2017; Rinaudo, 2006).

La reutilización de residuos marinos para la obtención de quitosano también contribuye a reducir la presión sobre vertederos y ecosistemas costeros, y promueve la implementación de modelos de economía circular, especialmente en países en desarrollo con alta producción pesquera. Proyectos piloto en India, Túnez y Vietnam han logrado transformar residuos de camarón en productos de valor añadido como fertilizantes, films biodegradables y recubrimientos alimentarios (Benhabiles et al., 2012; Ngah & Fatinathan, 2010).

Otro aspecto clave es la huella hídrica. Mientras que las ceras requieren procesos industriales intensivos en agua y disolventes para su refinamiento, el quitosano puede procesarse mediante tecnologías más limpias, como la hidrólisis enzimática o el uso de soluciones ácidas suaves, lo cual reduce el impacto sobre los recursos hídricos (Liu et al., 2017; Ojeda & Freer, 2011).

La aplicación del quitosano en frutas tropicales no genera residuos contaminantes durante su uso ni en la fase de consumo, y su degradación en condiciones agrícolas no compromete la calidad del suelo ni altera el equilibrio microbiológico del ecosistema. De hecho, algunos estudios han explorado el uso del quitosano como enmienda agrícola o bioestimulante, aprovechando su capacidad para modular la microbiota del suelo y estimular mecanismos de defensa en las plantas (Dutta et al., 2009; Vargas et al., 2008).

El quitosano destaca como una solución ambientalmente superior frente a los recubrimientos tradicionales, al presentar una menor huella de carbono, menor uso de recursos no renovables, mayor biodegradabilidad y una integración más efectiva en esquemas de economía circular. Su implementación masiva podría representar un avance significativo hacia la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios tropicales.

3.3. Quitosano y economía circular: del residuo marino a solución agrícola

El enfoque de economía circular propone un cambio de paradigma en la producción y el consumo, promoviendo el aprovechamiento de residuos como insumos para nuevos procesos productivos. En este contexto, el quitosano representa una de las aplicaciones más representativas de la revalorización de subproductos marinos e industriales, particularmente en el ámbito agroalimentario y ambiental (Pillai et al., 2009; Shahidi & Abuzaytoun, 2005).

Una de las aplicaciones más inmediatas en economía circular es la transformación de residuos de crustáceos como exoesqueletos de camarón, langosta y cangrejo en quitosano de grado alimentario. Esta valorización no solo reduce la carga ambiental de la industria pesquera, sino que genera una fuente alternativa de ingresos para comunidades costeras, cooperativas pesqueras y empresas de transformación de alimentos (Borderías et al., 2015; Benhabiles et al., 2012). En países como Marruecos, India y Filipinas, se han documentado casos de éxito en la implementación de microempresas que producen quitosano a pequeña escala con fines agrícolas y alimentarios (Nghah & Fatinathan, 2010).

Además, el quitosano posee propiedades quelantes derivadas de sus grupos amino, lo que le confiere una alta afinidad por metales pesados como plomo, cadmio, cobre y mercurio. Esta característica ha sido ampliamente aprovechada en procesos de biorremediación de aguas residuales industriales y agrícolas, especialmente en zonas con alta carga metálica por actividades mineras o químicas (Nghah & Fatinathan, 2010; Rinaudo, 2006).

Pereda et al. (2011) demostraron que films a base de quitosano y gelatina tienen la capacidad de remover eficientemente iones metálicos en medios acuosos sin alterar su estructura, lo que abre la posibilidad de emplearlos en sistemas de filtración o como membranas biodegradables. Asimismo, estudios recientes han desarrollado nanopartículas de quitosano modificadas con ácido cítrico o agentes oxidantes que incrementan su capacidad de adsorción de contaminantes emergentes (Jayakumar et al., 2010).

Desde una perspectiva agroecológica, el quitosano puede ser utilizado como insumo en la formulación de biofertilizantes o biopesticidas, gracias a su capacidad para inducir respuestas de defensa en las plantas, promover la síntesis de fitoalexinas y estimular el crecimiento radicular (Campos et al., 2011; Vargas et al., 2008). Su uso en horticultura orgánica ha sido explorado para reemplazar productos químicos sintéticos, con resultados prometedores en cultivos de tomate, lechuga, fresa y frutas tropicales como mango y papaya.

Otra línea emergente es la integración del quitosano en sistemas de envases activos e inteligentes. Combinado con sensores de pH, antimicrobianos naturales o compuestos antioxidantes, puede dar lugar a materiales de empaque que no solo prolongan la vida útil del alimento, sino que también informan sobre su estado de conservación (Mohamed et al., 2017; Duan et al., 2012).

En términos de impacto socioeconómico, la producción descentralizada de quitosano puede fomentar el desarrollo local, generar empleos en zonas rurales y promover cadenas de valor sostenibles. Esto es especialmente relevante en regiones tropicales donde coexisten la producción pesquera, hortícola y los retos de conservación poscosecha (Ojeda & Freer, 2011).

El quitosano trasciende su uso como recubrimiento comestible y se posiciona como un material multifuncional con alto potencial en la economía circular. Su capacidad para valorizar residuos, descontaminar ambientes, sustituir insumos sintéticos y fortalecer cadenas agroalimentarias lo convierte en una herramienta estratégica para la sostenibilidad integral.

4. Conclusiones y perspectivas de investigación futura

El presente análisis confirma que el quitosano representa una alternativa tecnológicamente sólida y ambientalmente sustentable frente a los recubrimientos convencionales utilizados en la conservación poscosecha de frutas tropicales. Su origen biológico, su capacidad antimicrobiana intrínseca, su biodegradabilidad y su versatilidad funcional lo posicionan como un recurso estratégico para enfrentar los desafíos actuales en los sistemas agroalimentarios, especialmente en contextos de creciente demanda por productos más seguros, sostenibles y funcionales.

Desde el punto de vista técnico, el quitosano ha demostrado ser efectivo en la reducción de pérdidas poscosecha, la inhibición del crecimiento microbiano, la conservación de la calidad sensorial de los frutos y la extensión de su vida útil. Adicionalmente, su compatibilidad con extractos naturales, aceites esenciales y tecnologías emergentes (como nanopartículas o envases inteligentes) lo convierte en un agente ideal para el desarrollo de soluciones integradas en la industria alimentaria. En términos regulatorios, las evaluaciones toxicológicas y los marcos normativos internacionales coinciden en considerar al quitosano como una sustancia segura para su uso alimentario, siempre que se cumplan los estándares de calidad y pureza establecidos. Esto ofrece un respaldo sólido para su escalamiento industrial y su integración en cadenas de valor agroexportadoras.

Desde la perspectiva ambiental, su producción a partir de residuos marinos representa una oportunidad significativa para implementar modelos de economía circular, reduciendo tanto la presión sobre ecosistemas costeros como el volumen de desechos orgánicos sin valor. Los estudios de análisis de ciclo de vida (LCA) corroboran sus beneficios frente a materiales sintéticos en términos de huella de carbono, consumo energético y degradabilidad.

A pesar de sus múltiples ventajas, el quitosano enfrenta todavía retos importantes. Entre ellos, la estandarización de su producción a gran escala, la optimización de su adherencia en frutas de superficie cerosa, la mejora de su estabilidad en condiciones ambientales variables, y la reducción de sus costos de producción mediante tecnologías más eficientes. Además, es fundamental abordar las posibles restricciones derivadas de la alergenicidad cruzada con mariscos, aunque la evidencia científica actual sugiere un riesgo muy bajo en productos purificados. Como perspectivas de investigación futura, se recomienda:

- Profundizar en el estudio de combinaciones sinérgicas entre quitosano y otros biopolímeros para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales.
- Evaluar su impacto en el microbiota del consumidor y posibles efectos prebióticos o inmunomoduladores.
- Desarrollar metodologías sostenibles para su obtención a partir de residuos no marinos, como hongos filamentosos u otros subproductos agroindustriales.
- Implementar estudios de percepción del consumidor y análisis de mercado en torno al etiquetado de alimentos recubiertos con materiales biodegradables.

- Fomentar proyectos piloto en comunidades rurales y regiones tropicales para validar su viabilidad económica y social en contextos reales.

El quitosano no solo ofrece beneficios tecnológicos y ambientales, sino que constituye un catalizador para el desarrollo de modelos agroindustriales más resilientes, inclusivos y circulares. Su estudio e implementación debe seguir siendo una prioridad en la agenda de innovación alimentaria y sostenibilidad global.

Referencias

- Ali, A. et al. (2011) 'Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica papaya* L.) fruit during cold storage', *Food Chemistry*, 124(2), pp. 620–626. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.085>
- Aloui, H. et al. (2014) 'Chitosan-clay nanocomposite coatings for shelf life extension of peaches', *Postharvest Biology and Technology*, 87, pp. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.005>
- Arnon, H. et al. (2014) 'Wax coatings influence on mango quality during storage', *Postharvest Biology and Technology*, 92, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.01.010>
- Bagal-Kestwal, D. et al. (2019) 'Chitosan and chitosan-based composites for energy and environmental applications: A review', *Carbohydrate Polymers*, 208, pp. 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.076>
- Bautista-Baños, S. et al. (2006) 'Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities', *Crop Protection*, 25(2), pp. 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.03.010>
- Benhabiles, M.S. et al. (2012) 'Antibacterial activity of chitin, chitosan and its oligomers prepared from shrimp shell waste', *Food Hydrocolloids*, 29(1), pp. 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.02.013>

- Bordenave, N. et al. (2010) 'Antimicrobial mechanisms of chitosan and mode of action', *Journal of Food Protection*, 73(2), pp. 235–245. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-73.2.235>
- Borderías, A.J. et al. (2015) 'Application of chitosan in seafood products', *Trends in Food Science & Technology*, 43(2), pp. 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.006>
- Campos, C.A. et al. (2011) 'Chitosan applications for the preservation of fruits and vegetables', *Trends in Food Science & Technology*, 22(10), pp. 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.002>
- Caprariis, B. et al. (2018) 'Production of chitosan from crustacean waste: Optimization of chemical hydrolysis process parameters', *Chemical Engineering Transactions*, 70, pp. 691–696. <https://doi.org/10.3303/CET1870116>
- Coma, V. (2008) 'Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products', *Meat Science*, 78(1–2), pp. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.035>
- Di Pierro, P. et al. (2011) 'Chitosan/whey protein film as active coating to extend Ricotta cheese shelf-life', *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), pp. 2324–2327. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.05.020>
- Duan, J. et al. (2012) 'Chitosan-alginate coatings on fresh-cut fruit: A review', *International Journal of Molecular Sciences*, 13(12), pp. 15901–15923. <https://doi.org/10.3390/ijms131215901>
- Dutta, P.K. et al. (2009) 'Perspectives on chitosan-based coatings for food packaging applications', *Trends in Food Science & Technology*, 20(4), pp. 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.01.002>
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (2011) 'Scientific opinion on the safety of chitosan as a food additive', *EFSA Journal*, 9(6), p. 2214. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2214>

- Elsabee, M.Z. and Abdou, E.S. (2013) 'Chitosan-based edible films and coatings: A review', *Materials Science and Engineering C*, 33(4), pp. 1819–1841. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.010>
- FAO/WHO (2019) *Codex Alimentarius: Guidelines on substances used in food coatings*. Rome: FAO.
- Ferreira, A.R.V. et al. (2016) 'Chitosan-based bioactive materials for food packaging applications', *Materials*, 9(8), p. 598. <https://doi.org/10.3390/ma9080598>
- Goy, R.C., Britto, D. and Assis, O.B.G. (2009) 'A review of the antimicrobial activity of chitosan', *Polímeros*, 19(3), pp. 241–247. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000300013>
- Hagenmaier, R.D. and Baker, R.A. (1997) 'Edible coatings from candelilla wax', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(11), pp. 3498–3501. <https://doi.org/10.1021/jf9703030>
- Hernández-Muñoz, P. et al. (2006) 'Edible coatings to extend the shelf-life of minimally processed fruits and vegetables', *Trends in Food Science & Technology*, 17(9), pp. 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.006>
- Hernández-Muñoz, P. et al. (2008) 'Improved quality and safety of fresh-cut mangoes treated with an edible coating', *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.009>
- Hosseini, M.H. et al. (2013) 'Biodegradable polymers and their potential in food packaging applications', *Food Engineering Reviews*, 5(3), pp. 157–170. <https://doi.org/10.1007/s12393-013-9069-7>
- Jayakumar, R. et al. (2010) 'Preparation and characterization of chitosan nanoparticles', *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(1), pp. 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.10.003>

- Jiang, Y. and Li, Y. (2001) 'Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of mango fruit', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(6), pp. 662–666. <https://doi.org/10.1002/jsfa.845>
- Kanatt, S.R., Rao, M.S. and Chawla, S.P. (2014) 'Active chitosan–polyvinyl alcohol films with natural extracts', *Food Hydrocolloids*, 35, pp. 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.003>
- Kaya, M. et al. (2015) 'Comparison of chitin structures isolated from seven different insects', *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, pp. 970–978. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.09.053>
- Kim, I.Y. et al. (2018) 'Chitosan for biomedical applications', *Biomaterials Science*, 6(6), pp. 1317–1334. <https://doi.org/10.1039/C8BM00182F>
- Kim, K.W. and Song, K.B. (2016) 'Development of chitosan-based coating with plant extracts for shelf life extension of apples', *Postharvest Biology and Technology*, 112, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.005>
- Kumar, P. et al. (2020) 'Life cycle assessment of chitosan and synthetic wax coatings in fruit preservation', *Journal of Cleaner Production*, 261, p. 121128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121128>
- Liu, H. et al. (2017) 'Preparation and properties of chitosan-based composite films', *Carbohydrate Polymers*, 172, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.062>
- Mohamed, S.A. et al. (2017) 'Chitosan nanoparticles for food preservation', *Food Packaging and Shelf Life*, 14, pp. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.09.003>
- Muxika, A. et al. (2017) 'Chitosan as a biofunctional material', *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, pp. 1358–1368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.087>

- Ngah, W.S.W. and Fatinathan, S. (2010) 'Adsorption of heavy metal ions in aqueous solution by chitosan', *Carbohydrate Polymers*, 81(4), pp. 1067–1072. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.043>
- No, H.K. et al. (2007) 'Applications of chitosan for the preservation of agricultural commodities', *Food Science and Biotechnology*, 16(4), pp. 513–521.
- Ojagh, S.M. et al. (2008) 'Development and evaluation of a novel biodegradable film based on chitosan and cinnamon essential oil for active packaging', *Food Control*, 19(9), pp. 837–843. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.08.006>
- Ojagh, S.M. et al. (2010) 'Effect of chitosan coatings on the quality of refrigerated rainbow trout', *Food Chemistry*, 124(1), pp. 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.116>
- Ojeda, M. and Freer, J. (2011) 'Polímeros biodegradables y sus aplicaciones en la industria alimentaria', *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(2), pp. 164–179.
- Park, S.I., Stan, S.D. and Daeschel, M.A. (2005) 'Antimicrobial films based on apple puree and carvacrol', *LWT - Food Science and Technology*, 38(3), pp. 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.07.007>
- Pereda, M. et al. (2011) 'Chitosan–gelatin composites and bi-layer films with potential for food packaging applications', *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 1372–1381. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.003>
- Pillai, C.K.S., Paul, W. and Sharma, C.P. (2009) 'Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation', *Progress in Polymer Science*, 34(7), pp. 641–678. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.001>
- Rabea, E.I. et al. (2003) 'Chitosan as antimicrobial agent: Applications and mode of action', *Biomacromolecules*, 4(6), pp. 1457–1465. <https://doi.org/10.1021/bm034130m>

- Rhim, J.W. et al. (2013) 'Preparation and characterization of agar/silver nanoparticles composite films with antimicrobial activity', *Food Hydrocolloids*, 33(2), pp. 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.04.004>
- Rinaudo, M. (2006) 'Chitin and chitosan: Properties and applications', *Progress in Polymer Science*, 31(7), pp. 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Rodríguez-Turienzo, L. et al. (2011) 'Development of antioxidant edible films based on chitosan and carvacrol', *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 889–896. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.09.001>
- Roes, A.L. and Patel, M.K. (2007) 'Life-cycle assessment for materials', *Encyclopedia of Sustainable Science and Technology*, Springer.
- Romanazzi, G. et al. (2002) 'Chitosan treatments in postharvest decay control', *Advances in Chitin Science*, 6, pp. 140–147.
- Shahidi, F. and Abuzaytoun, R. (2005) 'Chitin, chitosan, and co-products: Chemistry, production, applications, and health effects', *Advances in Food and Nutrition Research*, 49, pp. 93–135. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(05\)49003-8](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(05)49003-8)
- Sivakumar, D. and Bautista-Baños, S. (2014) 'A review on the use of essential oils for postharvest decay control and maintenance of fruit quality during storage', *Crop Protection*, 64, pp. 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.012>
- Souza, V.G.L. et al. (2019) 'Biodegradable films in food packaging: A review', *Foods*, 8(11), p. 640. <https://doi.org/10.3390/foods8110640>
- Tharanathan, R.N. (2003) 'Biodegradable films and composite coatings: Past, present and future', *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), pp. 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00280-7)

- Tharanathan, R.N. and Kittur, F.S. (2003) 'Chitin—the undisputed biomolecule of great potential', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 43(1), pp. 61–87. <https://doi.org/10.1080/10408690390826455>
- Valencia-Chamorro, S.A. et al. (2011) 'Coatings to control postharvest diseases', *Postharvest Biology and Technology*, 60(3), pp. 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.12.003>
- Vargas, M. et al. (2008) 'Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(6), pp. 496–511. <https://doi.org/10.1080/10408390701537344>
- Wang, J. et al. (2016) 'Properties of chitosan-based films for food packaging', *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, pp. 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.072>
- Xing, Y. et al. (2011) 'Antimicrobial activity of chitosan films enriched with essential oils', *Food Chemistry*, 129(4), pp. 1490–1495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.093>
- Xing, Y. et al. (2012) 'Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on postharvest quality of sweet peppers', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(5), pp. 1115–1123. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4702>
- Xing, Y. et al. (2012) 'Influence of chitosan coatings on fruits', *Food Chemistry*, 135(3), pp. 1321–1329. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.040>
- Xu, Y. et al. (2017) 'Antimicrobial chitosan coatings for food preservation', *Food Chemistry*, 237, pp. 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.090>
- Xu, Y. et al. (2019) 'Recent development of chitosan-based films and coatings for postharvest preservation of fruits and vegetables', *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), p. 5904. <https://doi.org/10.3390/ijms20225904>

Younes, I. and Rinaudo, M. (2015) 'Chitin and chitosan preparation from marine sources', *Marine Drugs*, 13(3), pp. 1133–1174. <https://doi.org/10.3390/md13031133>

Yuan, G., Chen, X. and Li, D. (2016) 'Chitosan films and coatings containing essential oils: The antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems', *Food Research International*, 89(1), pp. 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.004>