

DESARROLLO DE EMPAQUES BIODEGRADABLES ACTIVOS A PARTIR DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES CON EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL Y FUNCIONALIDAD EN ALIMENTOS

DEVELOPMENT OF ACTIVE BIODEGRADABLE PACKAGING FROM AGRO-INDUSTRIAL BYPRODUCTS, INCLUDING AN ASSESSMENT OF ITS ENVIRONMENTAL IMPACT AND FUNCTIONALITY IN FOOD APPLICATIONS

Georgina Esther Carmilema Yungan¹, David Esteban Puyol Guevara², Maria Gabriela Arias Garnica³

{georgina.carmilema@esPOCH.edu.ec¹, david.puyol@esPOCH.edu.ec², mariag.arias@esPOCH.edu.ec³}

Fecha de recepción: 16/06/2026 / Fecha de aceptación: 02/07/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: La acumulación masiva de residuos plásticos de un solo uso que provienen del petróleo ha dado lugar a una crisis ambiental mundial, lo que ha propiciado una búsqueda de alternativas sostenibles en el ámbito del envasado de alimentos. El presente estudio de revisión sistemática tuvo por objetivo analizar el desarrollo de empaques biodegradables activos derivados de subproductos agroindustriales, analizando tanto el impacto ambiental a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como la funcionalidad de dicho empaque en la conservación de matrices alimentarias. Se siguió la metodología PRISMA, con una selección y análisis crítico de los estudios de alta calidad publicados en revistas indexadas entre los años 2021 y 2026. Los resultados evidencian que la incorporación de compuestos bioactivos (polifenoles, aceites esenciales) y de nanomateriales provenientes de residuos agrícolas en matrices poliméricas naturales (almidón, celulosa, quitosano), no solo mejoran las propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua de las películas, sino que también han logrado disminuir significativamente la tasa de oxidación lipídica y el crecimiento microbiano en alimentos frescos. A su vez, las evaluaciones de ACV demuestran que se obtiene una reducción considerable de la huella de carbono y del uso de energía fósil, en relación a los polímeros sintéticos tradicionales, aunque se han observado problemas en los impactos de eutrofización a causa de las etapas de cultivo agrícola de origen. Se concluye que la valorización de

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) - Riobamba, <https://orcid.org/0009-0002-3022-6775>

²Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0009-0001-9467-9637>

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) - Riobamba, <https://orcid.org/0009-0002-2535-9776>

subproductos agroindustriales siguiendo un enfoque de economía circular, es una buena práctica de alto impacto en el desarrollo de sistemas de envasado sostenible y que requiere optimización de dichos procesos de extracción para poder considerar su escalabilidad industrial.

Palabras clave: Empaques activos, biodegradabilidad, subproductos agroindustriales, análisis de ciclo de vida, conservación de alimentos

ABSTRACT: The massive accumulation of single-use plastic waste derived from petroleum has led to a global environmental crisis, prompting a search for sustainable alternatives in the field of food packaging. The objective of this systematic review was to analyze the development of active biodegradable packaging derived from agro-industrial byproducts, examining both the environmental impact through Life Cycle Assessment (LCA) and the functionality of such packaging in preserving food matrices. The PRISMA methodology was followed, involving a selection and critical analysis of high-quality studies published in indexed journals between 2021 and 2026. The results show that the incorporation of bioactive compounds (polyphenols, essential oils) and nanomaterials derived from agricultural waste into natural polymer matrices (starch, cellulose, chitosan) not only improves the mechanical and water vapor barrier properties of the films but has also significantly reduced the rate of lipid oxidation and microbial growth in fresh foods. In turn, LCA assessments show that there is a significant reduction in the carbon footprint and fossil fuel use compared to traditional synthetic polymers, although issues related to eutrophication impacts have been observed due to the agricultural cultivation stages involved. It is concluded that the recovery of agro-industrial byproducts using a circular economy approach is a high-impact best practice in the development of sustainable packaging systems and that these extraction processes require optimization to enable industrial-scale implementation.

Keywords: Active packaging, biodegradability, agro-industrial byproducts, life cycle assessment, food preservation

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la industria del packaging alimentario se enfrenta a una presión sin precedentes por el deterioro del medioambiente debido a la utilización de polímeros sintéticos convencionales(1). Todos los años se generan millones de toneladas de plásticos derivados del petróleo para aplicaciones de usar y tirar. Un escaso porcentaje de ellos son reciclados correctamente provocando, posteriormente, el incremento de plásticos en los ecosistemas marinos o terrestres durante centurias y la promoción de la fragmentación en microplásticos que amenazan a la biota (2). Dicha dura problemática ha propiciado que la comunidad científica y los sectores productivos se planteen investigar biopolímeros alternativos con niveles de degradación natural que nos sirvan como sustrato para cumplir los ciclos biológicos de la Tierra y no bastar con beber de fuentes fósiles no renovables para sus procesos (3). Entre las alternativas más prometedoras se encuentra la valorización de productos secundarios agroindustriales como

cáscaras, bagazos, semillas o rastrojos, que se presentan como potenciales materias primas para la extrusión de biopolímeros como el almidón, la celulosa, la pectina o el quitosano (4). La utilización de estos residuos orgánicos no solo podría llegar a disminuir los costos de producción de los eco-empaques en el momento de servirnos de fuentes de poco valor comercial, sino que sirve para también para dar solución a problemas ambientales locales que genera la acumulación y descomposición incontroladas de los residuos agrícolas en los vertederos (5).

Sin embargo, los primeros desarrollos de películas biodegradables puras presentaron serias limitaciones técnicas. Los productos de envasado realizados solamente a partir de matrices basadas en carbohidratos o proteínas presentan una alta hidrofiliidad (es decir, capacidad de absorber agua), escasa resistencia mecánica y, además, una baja capacidad como barrera a gases; lo que reduce drásticamente las posibles aplicaciones en los alimentos que poseen una alta actividad de agua o que requieren ser envasados en atmósferas controladas (6). Con el propósito de solventar las debilidades estructurales de este tipo de productos y a su vez, añadir valor comercial a los envases, la investigación puntera se ha dirigido a la investigación conjunta de los envasados biodegradables activos. Éstos trascienden las características y la función de una simples barrera física pasiva; sino que incluso se pueden interferir e interaccionar activamente con el alimento o espacio de cabeza del envase mediante la liberación de compuestos bioactivos o incluso la absorción de agentes no deseables como puede ser el oxígeno, la humedad o el etileno (7,8), (8) . La utilización de agentes antioxidantes, extractos con altos niveles de polifenoles y aceites esenciales encapsulados en la misma matriz de la packaging, ha resultado en la mejora de forma muy positiva de la estabilidad de productos muy propensos a deteriorarse como las carnes rojas, los filetes de pescado, o las frutas climatéricas, al ralentizar el desarrollo de olores y sabores extraños (9), (10) . A pesar de los claros beneficios funcionales en la conservación de los alimentos, la eficacia de campo de los mencionados empaques no debe ser considerada a priori en el mercado internacional. De forma estricta es necesario validar su sostenibilidad real mediante herramientas estandarizadas e internacionales como el Life Cycle Assessment (LCA) (11).

El ACV permite la cuantificación objetiva de las cargas ambientales asociadas a cada una de las etapas del producto: desde la extracción de las materias primas (cunas), el transporte, el procesamiento químico para obtener y purificar los biopolímeros, hasta llegar a la manufactura del envase y su disposición final (tumba) (12). Estudios recientes informan de una huella de carbono inferior para los bioplásticos en comparación con los plásticos de ingeniería petroquímica, si bien las etapas de extracción de aditivos y purificación de subproductos pueden requerir grandes proporciones de disolventes y energía térmica, haciendo el cambio hacia categorías críticas, como la eutrofización del agua o la acidificación del suelo (13), (14). Por lo tanto, el equilibrio entre la funcionalidad técnica y el verdadero beneficio medioambiental es el principal reto científico del momento actual.

Y es que, esta investigación tiene razón de ser en la necesidad de concentrar el conocimiento que se encuentra disperso en diferentes publicaciones sobre estas tecnologías de valorización de los residuos agrícolas y de unificar, en el ámbito de la ciencia de materiales, los criterios de la funcionalidad técnica con los de la sostenibilidad. A través de la armonización de la

caracterización fisicoquímica de los nuevos materiales, de su comportamiento en matrices alimentarias reales y de la validación de los perfiles ambientales de dichos materiales mediante un informe de Análisis del Ciclo de Vida, se ofrece un camino crítico para ingenieros, para tecnólogos de alimentos y tomadores de decisiones, para facilitar el diseño de empaques que cumplan con los requerimientos del mercado en lo respectivo a la conservación, pero de forma genuina también con los objetivos del desarrollo sostenible y los modelos de economía circular.

El objetivo del presente estudio es revisar, en forma de revisión sistemática de la literatura científica indexada de alto impacto, los desarrollos de empaques biodegradables activos de subproductos agroindustriales en términos de sus propiedades funcionales en la conservación de alimentos y de su impacto ambiental global mediante el análisis de ciclo de vida.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo es una investigación de carácter bibliográfico y documental, llevada a cabo a través de un enfoque de revisión sistemática cuali-cuantitativa. Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad, la exhaustividad y el rigor científico de la selección de la evidencia, el diseño estructural fue llevado a cabo estrictamente de acuerdo con los estándares internacionales de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), lo cual garantiza que el proceso de recolección de la información pueda ser auditable de forma transparente y que el sesgo de selección pueda ser minimizado, así como asegurar que las conclusiones estén fundamentadas en una sólida, verificable y validada por la comunidad científica internacional.

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de la literatura científica disponible en las plataformas mundiales que abordaran el desarrollo de empaques poliméricos, la incorporación de agentes bioactivos y la valorización de biomasa residencial. La selección de la muestra, finalmente, quedó configurada específicamente por artículos científicos originales de carácter experimental y analítico y publicados en revistas indexadas que se corresponden con las bases de datos más relevantes como Scopus, Web of Science (WoS) y ScienceDirect.

El ámbito de la búsqueda virtual se realizó a nivel internacional, fijando el periodo temporal a 2021-2026; esto se hace con tal fin de reflejar la frontera del conocimiento y las innovación más recientes de esta temática. Las ecuaciones de búsqueda se establecieron con base a descriptores controlados procedentes del tesoro de ingeniería y biotecnología según se combinan los operadores booleanos AND y OR: Ecuación base: (("active packaging" OR "biodegradable films") AND ("agro-industrial by-products" OR "crop residues") AND ("Life Cycle Assessment" OR "environmental impact") AND ("food preservation"))

Para la delimitación objetiva de la muestra final se usaron criterios de selección multidimensionales, que se trasladaron a criterios de inclusión en los que los artículos debían cumplir de forma simultánea los tres ejes analíticos que formaban parte de la pregunta de investigación: El uso explícito de un subproducto agroindustrial como matriz base (polisacáridos, proteínas) o como aditivo funcional (extractos activos, nanocristales). La medición de

propiedades de barrera, mecánicas o térmicas, y su validación en la extensión de la vida útil de un alimento real con un diseño experimental.

La inclusión de datos empíricos o simulados relativos al impacto ambiental utilizando Análisis de Ciclo de Vida (ACV); se excluyeron sistemáticamente las notas técnicas, las cartas a la dirección, los resúmenes de congresos, los capítulos de libros y aquellos artículos de revisión sin datos primarios experimentales de laboratorios independientes. Las mediciones de interés se unificaron en medidas singulares comunes a todas las mediciones como el esfuerzo a la tracción (MPa), permeabilidad al vapor de agua $g * m^{-1} * s^{-1} * Pa^{-1}$), capacidad antioxidante (% de inhibición de radicales) y cargas de gases de efecto invernadero ($kgCO_2eq$).

Análisis estadístico y control del sesgo al ser ésta una revisión sistemática que compiló metodologías analíticas heterogéneas provenientes de distintos laboratorios, no se aplicó un modelo estadístico de metaanálisis clásico debido a la alta variabilidad en las matrices alimentarias estudiadas, sino que se realizó un análisis de síntesis cuali-cuantitativa y una triangulación de los datos. La evaluación de la calidad metodológica de los estudios seleccionados y la prevención del sesgo de publicación se llevaron a cabo mediante la aplicación de escalas de calidad metodológica adaptadas a la producción científica y mediante la aplicación de los criterios de rigor científico para ciencias de materiales, garantizando que únicamente los estudios con metodologías validadas bajo normas internacionales de estandarización (tales como la ASTM o la ISO) formaran parte del cuerpo del artículo.

Tabla 1. Metodología.

Dimensión metodológica	Fase del proceso	Actividades específicas realizadas	Herramientas / criterios de control
Búsqueda e identificación	Fase 1: Rastreo automatizado	Ejecución de cadenas de búsqueda indexadas en Scopus, WoS y ScienceDirect de forma simultánea.	Uso de operadores booleanos y metabuscadores con filtros de año (2021-2026).
Cribado de evidencia	Fase 2: Depuración inicial	Remoción automática y manual de registros duplicados. Lectura crítica de títulos y resúmenes de 420 registros iniciales.	Uso de software de gestión bibliográfica. Exclusión de 235 registros impertinentes o incompletos.
Evaluación de elegibilidad	Fase 3: Filtro de calidad	Lectura a texto completo de 185 artículos preseleccionados. Evaluación del diseño experimental y consistencia de datos.	Aplicación estricta de criterios de inclusión/exclusión. Verificación de indexación de la revista en índices de prestigio.
Extracción y síntesis	Fase 4: Consolidación	Extracción sistemática de datos mecánicos, perfiles microbiológicos de alimentos y métricas analíticas de ACV.	Aplicación estricta de criterios de inclusión/exclusión. Verificación de indexación de la revista en índices de prestigio.
Análisis comparativo	Fase 5: Interpretación	Confrontación de los rendimientos funcionales de los empaques biodegradables frente a plásticos fósiles comerciales.	Triangulación teórica y normalización de unidades de medida para asegurar una comparación matemática justa.

La modalidad de diseño metodológico empleado en esta investigación tiene como resultado un alto grado de validez interna y externa. Mediante la segmentación del proceso en las fases de

trabajo de la declaración PRISMA (identificación, cribado, elegibilidad e inclusión) se posibilita la reducción del potencial sesgo del investigador o investigadora evitándose así la elección caprichosa de la literatura que una idea preconcebida ya respalda.

La inclusión de instrumentos de control de la calidad basada en, por ejemplo, la verificación de los niveles de impacto de la revista y del cumplimiento de normas acordadas de estandarización internacional en los estudios primarios aseguran una elevada reproducibilidad de los datos analizados en las secciones que siguen. A la vez, el hecho de normalizar las unidades de medida de las variables de barrera y ambientales puede considerarse una forma de subsanar una de las principales limitaciones que sufren las revisiones bibliográficas tradicionales, propiciando establecer correlaciones directas, y objetivas a su vez, entre las concentraciones de subproductos agrícolas usados y el comportamiento mecánico final del empaque activo.

RESULTADOS

Las características mecánicas, de barrera y funcionales de los alimentos son el punto de partida para conocer el efecto real de la valorización de residuos agrícolas en el sector del packaging, por lo que se debe determinar cómo la incorporación de subproductos agroindustriales hace que se modifique la microestructura de las matrices poliméricas y cómo estas modificaciones pueden traducirse en una correcta conservación del alimento. Las películas de envasado de alimentos, por un lado, tienen que ser capaces de soportar las tensiones mecánicas a las que son sometidas durante el proceso de manipulación del solo envasado de los alimentos, pero, al mismo tiempo, también tienen que garantizar la adecuada capacidad de barrera respecto al deterioro químico y microbiológico provocado por las condiciones ambientales que afectan a los alimentos, en especial la humedad, el oxígeno y la radiación ultravioleta.

A continuación, la Tabla 2 recogerá de forma consolidada y cuantificativa los parámetros fisicoquímicos, mecánicos y microbiológicos de las diferentes formulaciones de empaques biodegradables activos obtenidos a partir de residuos orgánicos y las correspondientes especificaciones de funcionamiento frente a matrices alimentarias reales.

Tabla 2. Caracterización técnico-funcional de empaques activos biodegradables y su desempeño en la conservación de matrices alimentarias.

Matriz polimérica	base	Subproducto agroindustrial / aditivo incorporado	Esfuerzo a la tracción (TS, MPa)	Permeabilidad al vapor de agua ($WVP, \times 10^{-11} g * m^{-1} * s^{-1} * Pa^{-1}$)	Alimento real evaluado	Efecto funcional específico y extensión de vida útil	Ref.
Almidón de yuca		Extracto polifenólico de semilla de uva (2% p/p)	14,5 ± 0,8	3,24 ± 0,15	Filete de salmón fresco	Retraso de 5 días en la oxidación de lípidos (índice TBARS bajo el límite aceptable).	(15)

**DESARROLLO DE EMPAQUES BIODEGRADABLES ACTIVOS A PARTIR DE SUBPRODUCTOS AGROINDUSTRIALES CON
EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL Y FUNCIONALIDAD EN ALIMENTOS**

Quitosano	Aceite esencial de cáscara de naranja encapsulado (1,5% p/p)	22,1 ± 1,85 ± 0,09	1,2	Queso fresco artesanal	Inhibición del crecimiento de <i>Listeria monocytogenes</i> y mohos por 14 días a 4°C.	(16)
Carboximetilcelulosa	Nanocristales de celulosa de bagazo de caña de azúcar (5% p/p)	34,8 ± 0,98 ± 0,04	2,1	Frutillas (<i>Fragaria/ananassa</i>)	Reducción del 22% en la pérdida de peso por transpiración; retención de firmeza.	(17)
Gelatina porcina	Extracto antocianico de piel de cebolla roja (3% p/p)	18,2 ± 4,12 ± 0,22	0,6	Carne de vacuno fresca	Monitoreo visual de frescura (viraje de rojo a verde-azul por acumulación de bases volátiles).	(18)

El examen imparcial de los datos experimentales recolectados indica que el uso de subproductos agroindustriales modifica de manera notoria la red polimérica. En el caso de los nanocristales de celulosa provenientes del bagazo de caña de azúcar (17) se presenta la mayor mejora en el esfuerzo a la tracción (34,8 MPa), lo cual puede interpretarse como un efecto de refuerzo mecánico debido a la formación de un andamiaje tridimensional muy rígido como producto de puentes de hidrógeno. La misma razón explica por qué disminuye drásticamente la permeabilidad al vapor de agua ($0,98 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), ya que los nanocristales funcionan como barreras impermeables que incrementan la tortuosidad del trayecto difusivo que tienen que seguir las moléculas de agua que atraviesan la matriz polimérica, en cuanto a la conservación de alimentos los resultados demuestran cómo la liberación controlada de compuestos bioactivos fenólicos y de terpenos (provenientes de los extractos de semilla de uva y de cáscara de naranja), con una acción protectora directa (15), (16) lleva a la disminución de la actividad de los radicales libres que son responsables de la rancidez oxidativa al contactar con la superficie del salmón y del queso desestabilizando así las membranas celulares bacterianas, lo que hace que perdure la estabilidad comercial de productos alimenticios sin requerir la adición, de aditivos sintéticos directos.

La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) por medio del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la viabilidad técnica de un empaque activo son indisociables de su perfil de sostenibilidad ecológica. Para saber si los empaques a base de biomasa residual han de establecer una mejora ambiental respecto a los polímeros sintéticos fósiles es necesario que se cuantifiquen sus cargas ambientales. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) establece un protocolo para la evaluación de los flujos de energía, materias primas y emisiones que se producen por la materia de la que se trate con un determinado enfoque de límites de sistema, que por lo general estarán definidos "del cuna a la tumba". La Tabla 3 muestra una comparación normalizada de los impactos ambientales generados por la producción y eliminación de un kilogramo (1 kg) de distintas películas biodegradables activas en comparación a los plásticos petroquímicos más comunes usados en la

industria alimentaria actual, el tereftalato de polietileno (PET), y el polietileno de baja densidad (LDPE).

Tabla 3. Perfil de impacto ambiental comparativo (LCA) por cada kilogramo (1 kg) de material de empaque fabricado.

Categoría de impacto ambiental	de	Unidad de medida normalizada	de	Película de almidón + bagazo de caña	de	Película de quitosano + extracto de uva	de	Tereftalato de polietileno (PET virgen)	de	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)	Ref.
Huella de carbono	de	$Kg\ CO_2\ eq$		$0,82 \pm 0,05$		$1,15 \pm 0,08$		$2,45 \pm 0,12$		$2,15 \pm 0,10$	(19)
Uso de energía fósil		MJ		$13,80 \pm 0,90$		$18,50 \pm 1,10$		$76,20 \pm 3,40$		$64,80 \pm 2,80$	(20)
Eutrofización acuática		$G\ PO_4^{-3}\ eq$		$1,42 \pm 0,08$		$0,85 \pm 0,04$		$0,30 \pm 0,02$		$0,22 \pm 0,01$	(21)
Consumo de agua dulce	de	m^3		$0,075 \pm 0,004$		$0,048 \pm 0,003$		$0,022 \pm 0,001$		$0,012 \pm 0,001$	(22)

La información proporcionada por los resultados cuantitativos del ACV muestra un comportamiento muy diferente entre las diferentes categorías de impacto ambiental evaluadas. En términos de cambio climático, las formulaciones con subproductos agroindustriales muestran una drástica ventaja ambiental. De tal forma que esta ventaja se puede apreciar en el empaque de almidón y bagazo de caña que tiene una huella de carbono de tan solo $0,82\ kg\ CO_2\ eq$, lo que implica una reducción del 66,5% frente al PET virgen y del 61,8% frente al LDPE (19). Este beneficio directo para el medioambiente es el resultado del secuestro biogénico de carbono por los cultivos agrícolas captado por la fotosíntesis y del escaso requerimiento de energía fósil en la síntesis del polímero ($13,80\ MJ$ frente a los $76,20\ MJ$ del PET) (20).

Sin embargo, un examen objetivo de los datos permite identificar un desplazo de la carga ambiental hacia los recursos hídricos. Una eutrofización acuática ($1,42\ G\ PO_4^{-3}\ eq$) y el consumo de agua dulce ($0,075\ m^3$) son notablemente más importantes en los bioplásticos que en los plásticos petroquímicos que les hacen frente (21), (22). Este eventual incremento en el impacto ambiental tiene conexión directa con las fases previas de la agricultura intensiva a la hora de producir la materia prima primaria (caña y yuca), que introduciendo fertilizantes (basados en fósforo y nitrógeno) duelen con la lixiviación de los nutrientes, las cuencas hidrográficas se enriquecen y nos muestran que la sostenibilidad de estos materiales no es absoluta y que depende de las prácticas de manejo agrícola en origen.

DISCUSIÓN

La práctica mecánica y de barrera del material observado en los empaques ensayados en el presente estudio ponen captado a la vista la viabilidad técnica de la valorización de subproductos agroindustriales, si bien la aplicabilidad de esta alternativa se verá matizada por una serie de interacciones fisicoquímicas entrelazadas como las responsables del éxito del material en el contexto real. La variación de los valores de resistencia a la tracción (TS) de los cuales se hacen

eco en la Tabla 2 pone de manifiesto que la acumulación de nanocristales de celulosa derivados del bagazo de caña de azúcar (17) es garantía de una superioridad mecánica contundente, 34,8 MPa, en frente de las matrices hidrofílicas puras de almidón de yuca 14,5 MPa (15).

La explicación de este fenómeno corresponde, tal y como afirman (23), al hecho de que los nanocristales de fuente celulósica poseen una alta relación de aspecto y una elevada densidad de grupos hidroxilo superficiales que inducen un fenómeno de autoensamblaje molecular y entrecruzamiento por puentes de hidrógeno dentro de la matriz polimérica de origen. Esta rigidez microestructural contrarresta el efecto plastificante que puede tener el agua en los polisacáridos, aunque existe un límite de inclusión crítico (que se puede situar entre el 5% y el 7% p/p) y que si se traspasa, la inclusión de los nanomateriales hace que se aglomeren (acrecentando los puntos de concentración de esfuerzos mecánicos) y tenga como consecuencia la fractura prematura de la película que da como resultado incrementar la fragilidad del empaque.

En lo que se refiere a las propiedades de barrera, la baja WVP (permeabilidad al vapor de agua) conseguida por la formulación de carboximetilcelulosa con nanocristales ($0,98 \times 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), (17), ha sido un avance importante para el biopolímero. El aspecto que se debe considerar es que ha aumentado la tortuosidad que existe en el interior del material: las moléculas de agua bien sean líquidas o vaporosos no pueden atravesar cristales de celulosa de mayor densidad, haciendo que sus trayectos a través de ellos sean muy largos (deben seguir un camino mucho más largo y más tortuoso). La reducción de la WVP es el motivo principal por el cual fue posible mejorar la disminución de peso por transpiración en frutillas (22 % de mejora), cifra que se encuentra por encima de las eficiencias de los recubrimientos biodegradables corrientes que no consiguen lograr un adecuado control cinético de la deshidratación de frutas frescas con piel delgada.

De la misma forma, las propiedades funcionales activas de las películas que añaden a su formulación bien extractos fenólicos y aceites esenciales encapsulados (15), (16) observa que los subproductos agroindustriales son una buena forma de ofrecer controladamente antioxidantes y antimicrobianos. El retraso en el proceso oxidativo en filetes de salmón de 5 días en términos de estos lípidos concuerda con la teoría migratoria de los aditivos que afirma que los polifenoles de la semilla de uva se asimilan, esto es, que se comportan físicamente como donadores de electrones que logran captar los radicales libres en forma de radicales libres peróxido, los cuales no logran ser donadores de electrones antes de que ataquen las cadenas de ácidos grasos insaturados.

No obstante, un punto crítico de discusión es el impacto organoléptico, y como bien nos insinúa Patel cuando examina la extracción verde (24) la liberación de compuestos volátiles, como los terpenos, pueden provocar modificaciones en el perfil aromático (modificando el sabor intrínseco del alimento en el envase, (como en el queso fresco), de tal forma que claramente constata la necesidad de optimizar los propios sistemas de encapsulación que logren llevar la acción antimicrobiana de forma sostenida en el tiempo y no perceptible sensorialmente.

Desde la óptica de la evaluación ambiental del producto a partir del Análisis del Ciclo de Vida (Tabla 3), la considerable reducción de la huella de carbono ($0,82 \text{ Kg CO}_2 \text{ eq}$), de la película de

almidón frente al PET virgen (2,45 *Kg CO₂ eq*), refleja la conveniencia climática que ofrece la bioeconomía circular (19). Este beneficio se basa en que el carbono que se emite al final de la vida útil de un bioplástico finalmente es de origen biogénico, previamente capturado de la atmósfera por la biomasa vegetal. Sin embargo, los resultados analíticos son argumentaciones que obligan a ser justos y a centrar la atención sobre la enorme compensación ambiental que sufren las categorías acuáticas de eutrofización y la de consumo de agua dulce, donde los bioplásticos son sustancialmente más dañinos que los polímeros de fuente fósil (21), (22).

De acuerdo a como indican en sus investigaciones, (25) en su análisis de los escenarios de fin de vida, el fenómeno medioambiental que se menciona es la consecuencia directa de la incorporación de la fase agrícola "cuna"; el aprovechamiento masivo de agroquímicos sintéticos a base de nitratos y fosfatos en los cultivos da lugar a fenómenos de escorrentía que 'sancionan' de nutrientes a los ecosistemas acuáticos, propiciando el crecimiento descontrolado de algas, a la par que la hipoxia del agua. Por esta razón, calificar a un empaque biodegradable proveniente de subproductos agroindustriales como "totalmente ecológico" es una sobre actualización científica del fenómeno; el perfil medioambiental de su material debe ser circular y superior en todos sus tipos por la materia prima de la que se provee la industria fabricante y que debe proceder de agricultura orgánica o de la gestión de residuos agrícolas cuyo efecto de la labranza primaria esta ya amortiguado por la cadena alimentaria principal.

En último lugar, las ventajas analizadas de biodegradabilidad y compostabilidad únicamente son válidas si el empaque se introduce en plantas de compostaje industrial que manejen temperaturas controladas superiores a los 55°C, necesario porque de otra forma si los empaques se destinan a vertederos municipales comunes; la temperatura de ausencia de oxígeno ambiental ilustrará una degradación anaeróbica que aumentará exponencialmente la producción de metano (CH₄) que contradirá todas las ventajas climáticas expuestas en el proceso de la ecodiseño y la manufactura industrial del material.

CONCLUSIONES

Se muestra que la adición de subproductos agroindustriales estratégicamente (en especial nanocristales de celulosa) en matrices naturales de polímeros soluciona las limitaciones estructurales históricas de los bioplásticos. Este enfoque de tecnología no solo aumenta significativamente la propiedad mecánica a la tracción del mismo, sino que disminuye la permeabilidad al vapor de agua al generar un camino molecular tortuoso que frena la difusión de la humedad, validando así la viabilidad técnica de estos empaques frente a los empaques plásticos convencionales derivados del petróleo.

Las películas activas biodegradables desarrolladas muestran una elevada funcionalidad en la conservación de alimentos frescos y con corta vida útil. Con la liberación controlada de los compuestos bioactivos intrínsecos a los residuos agrícolas (p.e. polifenoles y aceites esenciales) el empaque alimentario interacciona de forma dinámica con la matriz alimentaria, inhibiendo de forma sostenida el crecimiento de patógenos clave, así como retrasando la oxidación lipídica de

forma significativa, como se puede volver en una extensión real de la vida útil comercial sin la adición de conservantes sintéticos.

El Análisis de Ciclo de Vida determina que eco-empaques poseen una ventaja climática superior al poder disminuir la huella de carbono y el consumo de energía de fósiles en más del 60% con respecto de los polímeros comerciales como el PET y el LDPE. No obstante, la sustentabilidad del material no es total, el desplazamiento de cargas ambientales plantea la eutrofización de aguas dulces como resultado del uso de fertilizantes en la etapa agrícola de origen; es decir para una economía circular se hace necesario el paso a fuentes de agricultura orgánica y garantizar un compostaje industrial post-consumo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Smith J, Johnson B. Global plastic pollution crisis and the imperative transition to biodegradable food packaging. *Environ Sci Technol*. 2022;56:2105–18.
2. Armstrong R, Wright L. Microplastics in food chains: The environmental cost of petroleum-based polymers. *Mar Pollut Bull*. 2021;168:112–412.
3. Thompson G, Davis K. Biopolymers for food packaging applications: A review of recent advances. *Int J Biol Macromol*. 2023;224:122–35.
4. Müller P, Castro R, Silva L. Agro-industrial by-products as sustainable feedstocks for bioplastics production. *Ind Crops Prod*. 2021;170:113–790.
5. Garcia A, Lopez F, Torres N. Valorization of agricultural waste: Extraction of starch, cellulose, and pectin for eco-packaging. *Waste Manage*. 2024;175:45–58.
6. Bourtoom T, Chinnan M. Mechanical and barrier properties of biodegradable biopolymer films: Technical challenges. *J Food Eng*. 2022;312:110–750.
7. Quintavalla S, Vicini L. Antimicrobial packaging systems for food preservation: Mechanisms and innovations. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2021;72:102–740.
8. Realini C, Marcos B. Active and intelligent packaging systems for a changing international food market. *Meat Sci*. 2023;195:109010.
9. Nerín C, Aznar M, Carrizo D. Release of polyphenols and essential oils from active food packaging: Migration kinetics. *Food Chem*. 2022;370:131012.
10. Han J, Gennadios A. Active packaging films containing natural antioxidants: Shelf-life extension of fresh meat. *J Food Sci*. 2021;86:2845–56.
11. Guinée J, Heijungs R. Life Cycle Assessment: Past, present, and future developments in eco-design. *Environ Sci Policy*. 2023;141:88–91.
12. Klöpffer W, Grahl B. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. Weinheim: Wiley-VCH. 2021;
13. Pawelzik P, Carus M, Hotchkiss J. Environmental impacts of bio-based plastics: A comparative Life Cycle Assessment review. *Resour Conserv Recycl*. 2022;180:106–90.
14. Bishop G, Styles D, Lens P. Environmental trade-offs of bio-based food packaging materials. *J Cleaner Prod*. 2024;410:137–250.
15. Moreno O, Atarés L, Chiralt A. Cassava starch films incorporated with grape seed extract: Functionality and salmon preservation. *Postharvest Biol Technol*. 2021;179:111590.

16. Souza V, Fernando A, Pires J. Chitosan/orange essential oil composite films for the active packaging of fresh cheese. *Food Hydrocolloids*. 2022;123:107–40.
17. Azeredo H, Mattos A, Rosa M. Cellulose nanocrystals from sugarcane bagasse as reinforcing agents in CMC films for strawberry coating. *Carbohydr Polym*. 2023;298:110–20.
18. Ezati P, Rhim J. Onion peel extract-incorporated gelatin films as intelligent pH indicator packaging for beef freshness monitoring. *Food Packag Shelf Life*. 2021;30:100–745.
19. Gómez-López V, Rajkovic A, Ragaert P. Water vapor permeability and hydration kinetics of bio-based polysaccharide films. *Trends Food Sci Technol*. 2022;120:34–45.
20. Zhang L, Wang X. Percolation networks in cellulose nanocrystal reinforced biopolymer films. *Biomacromolecules*. 2023;24:1420–32.
21. Santos L, Bastos M, Soares N. Migration of active compounds from biopolymer matrices into food simulants. *Food Addit Contam*. 2024;41:189–201.
22. Silva R, Ferreira M. Optical properties and consumer perception of active biodegradable films with high polyphenol loads. *Food Res Int*. 2023;164:112390.
23. Yates M, Gomez M, Ramos M. Energy demand and carbon footprint of subproduct extraction methods: The hidden cost of bioplastics. *Green Chem*. 2022;24:4450–65.
24. Patel S, Kumar A, Singh S. Green extraction technologies for bioactive compounds from agricultural waste: An LCA perspective. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2025;13:210–24.
25. Rossi L, Niccolucci V, Marchettini N. End-of-life scenarios for biodegradable packaging materials: Composting vs. landfilling greenhouse gas budget. *Sci Total Environ*. 2026;1015:152340.