



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

DESARROLLO DE NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS BASADOS EN
QUITOSANO Y NANOPARTÍCULAS METÁLICAS CON CAPACIDAD
PARA RETRASAR LA MADURACIÓN DE FRUTAS.

Autor: Nata Teneda, Mariela Abigail

Tutor: Patiño Vidal Cristian Javier, PhD.

Riobamba, Ecuador

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE AGROINDUSTRIA

TRABAJO DE TITULACIÓN - MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

TÍTULO:

Desarrollo de nanocompuestos poliméricos basados en quitosano y nanopartículas metálicas con capacidad para retrasar la maduración de frutas.

AUTOR:

Nata Teneda, Mariela Abigail

TUTOR:

Patiño Vidal Cristian Javier, PhD.

Riobamba, Ecuador

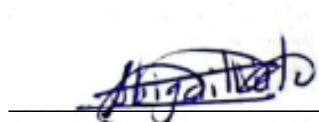
2026

© DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Nata Teneda Mariela Abigail, con cédula de identidad 1850621424, autora del trabajo de titulación: Desarrollo de nanocompósitos poliméricos basados en quitosano y nanopartículas metálicas con capacidad para retrasar la maduración de frutas, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 07 de septiembre de 2026.



NATA TENEDA MARIELA ABIGAIL
NUI: 1850621424

DECLARATORIA SOBRE EL USO DE HERRAMIENTAS DE IA

Yo, Nata Teneda Mariela Abigail, con cédula de identidad 1850621424, autora del presente trabajo de titulación, declaro que el uso de herramientas de inteligencia artificial en la elaboración del presente trabajo de titulación se limitó exclusivamente al apoyo en la organización de ideas y a la mejora de la redacción y claridad expositiva, en los apartados de introducción, marco teórico y marco metodológico, sin implicar la generación autónoma de contenidos académicos, análisis, resultados, conclusiones ni aportes propios del proceso investigativo.

Asimismo, dejo constancia de que las decisiones académicas, el desarrollo conceptual, el enfoque metodológico, el análisis de fuentes y la interpretación de resultados son de mi exclusiva responsabilidad.

Finalmente, declaro que el uso de dichas herramientas no sustituyó mi criterio académico, ni vulneró las disposiciones institucionales sobre plagio, propiedad intelectual y autoría, manteniéndose el cumplimiento de las normas de citación y referenciación, con el fin de garantizar la transparencia académica y el uso ético y responsable de tecnologías emergentes en la elaboración del trabajo de titulación.

En Riobamba, 27 de junio de 2026.



NATA TENEDA MARIELA ABIGAIL
NUI: 1850621424

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado, en primer lugar, a Dios por ser mi guía en cada paso que doy, por darme fortaleza, sabiduría y perseverancia para no rendirme en los momentos difíciles para culminar esta etapa muy importante de mi vida.

A mis padres, Alonso Nata y Cecilia Teneda, quienes han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y sacrificio. Gracias por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por enseñarme valores fundamentales como la humildad, el respeto y la dedicación. Gracias por confiar siempre en mí, por impulsarme a seguir adelante y por demostrarme que rendirse nunca es una opción. Todo lo que he logrado hasta hoy es el resultado de su cariño y de los sacrificios que realizaron para verme cumplir mis metas.

A mi hermano David, por su apoyo, su cariño y por compartir conmigo cada alegría y cada desafío. Gracias por estar siempre presente y celebrar cada uno de mis logros.

A Carlos por su apoyo incondicional, paciencia y confianza durante cada etapa de este proceso. Gracias por ser mi compañero en este camino, por escucharme, animarme y creer en mí.

Finalmente, agradezco a mi familia por estar siempre presente en cada paso que he dado y por sus palabras de aliento. Gracias por ser mi apoyo.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. Asimismo, agradezco a las autoridades y docentes de la carrera de Ingeniería Agroindustrial, quienes a través de su exigencia y conocimientos facilitaron los espacios, herramientas y laboratorios necesarios para consolidar el aprendizaje y hacer lo posible para culminar esta importante etapa de mi vida académica.

De manera especial, agradezco a mi tutor, Ing. Cristian Patiño, por su guía, dedicación, paciencia y valiosos conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta investigación. Su orientación y apoyo fueron fundamentales para la realización exitosa de este trabajo de titulación.

De la misma manera, agradezco especialmente a la PhD. Paola Maldonado, por brindarme sus conocimientos y su apoyo a distancia para la culminación de este trabajo, un abrazo enorme.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a la Ing. Patricia Paredes, por su colaboración, apoyo y conocimientos brindados, los cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento y culminación de esta etapa.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo y motivación durante este proceso académico, permitiéndome alcanzar una de las metas más importantes de mi formación profesional.

INDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN.....	12
Descripción de la situación problemática.....	12
Justificación.....	12
Pregunta de investigación.....	13
OBJETIVOS	14
MARCO REFERENCIAL	15
Antecedentes.....	15
Marco teórico.....	18
Clasificación del material	18
Envase de alimentos	19
Quitosano.....	19
Nanopartículas de óxidos metálicos	19
Frutas	21
Etileno	21
Frutas climatéricas.....	22
Banano.....	23
METODOLOGÍA.....	24
Enfoque.....	24
Tipo de investigación.....	24
Diseño de investigación.....	24
Preparación de los nanocompuestos poliméricos.....	24
Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	25
Propiedades ópticas	25
Propiedades estructurales	25
Propiedades térmicas	26
Evaluación de la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos	26
Análisis de datos aplicados.....	26
Cumplimiento de principios éticos de investigación científica	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46

Índice de Tablas

Tabla 1	Análisis de varianza del parámetro espesor.....	28
Tabla 2	Análisis de varianza del parámetro de color de la película	29
Tabla 3	Análisis de varianza del parámetro de opacidad de la película	31
Tabla 4	Varianza del parámetro pH.....	36
Tabla 5	Varianza del parámetro grados Brix.....	38
Tabla 6	Análisis de varianza del parámetro color del plátano.....	40

Índice de Figuras

Figura 1 Obtención de los nanocompuestos poliméricos.....	32
Figura 2 Análisis del parámetro Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	33
Figura 3 Análisis del parámetro termogravimétrico (TGA).....	34
Figura 4 Diferencia de color.....	41

RESUMEN

Este trabajo de investigación se fundamenta en la necesidad de resolver problemas asociados a la conservación de productos perecederos como el banano (*Musa spp.*, familia Musaceae). Las frutas tienen una corta vida útil y son perecederas por naturaleza debido a cambios fisiológicos que pueden presentar durante su maduración después de la cosecha, influenciados por la exposición al etileno producido durante dicho proceso. Con la finalidad de combatir este problema, el objetivo de este estudio fue desarrollar nanocompuestos poliméricos basados en quitosano y nanopartículas de óxidos metálicos. Se utilizó la técnica de *casting* para elaborar películas de quitosano al 2 % (m/v) conteniendo nanopartículas de ZnO, TiO₂ y MgO al 5 % (respecto al peso del quitosano). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar y unifactorial de un factor con tres niveles. Se evaluaron las propiedades físicas, ópticas, estructurales y térmicas de los nanocompuestos poliméricos. Los resultados no mostraron diferencias significativas en el espesor de los materiales. El color del nanocompuesto con TiO₂ se modificó a blanco y su opacidad aumentó. Los análisis estructurales mostraron que el quitosano fue el componente principal de los nanocompuestos poliméricos. El análisis térmico evidenció una disminución progresiva de la masa a medida que aumentó la temperatura. Sin embargo, los nanocompuestos poliméricos presentaron una mayor estabilidad térmica en comparación con la película de quitosano. Finalmente se evaluó la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos mediante ensayos *in vivo* en banana. Los resultados mostraron que el nanocompuesto retrasó la maduración de la banana durante 7 días, ya que el color de la piel de las frutas se mantuvo en verde y el pH y los grados Brix se modificaron ligeramente. Estos resultados evidencian que los nanocompuestos poliméricos pueden ser usados para el envasado activo de alimentos, cuya funcionalidad se basa en el retraso de la maduración de banana durante el almacenamiento.

Palabras claves: dióxido de titanio, óxido de zinc, óxido de magnesio, banana, envasado activo de alimentos.

ABSTRACT

This research work is grounded in the need to address issues associated with the preservation of perishable products such as bananas (*Musa* spp., family Musaceae). Fruits have a short shelf life and are inherently perishable due to physiological changes that can occur during post-harvest ripening, which are influenced by exposure to the ethylene produced during this process. To tackle this problem, the objective of this study was to develop polymeric nanocomposites based on chitosan and metallic oxide nanoparticles. The casting technique was used to prepare 2% (w/v) chitosan films containing 5% (wt/wt) relative to chitosan weight) of ZnO, TiO₂, and MgO nanoparticles. A completely randomized, single-factor experimental design with three levels was implemented. The physical, optical, structural, and thermal properties of the polymeric nanocomposites were evaluated. The results showed no significant differences in material thickness. The color of the TiO₂ nanocomposite shifted to white, and its opacity increased. Structural analyses indicated that chitosan was the main component of the polymeric nanocomposites. Thermal analysis showed a progressive mass loss as temperature increased; however, the polymeric nanocomposites exhibited higher thermal stability compared to the pure chitosan film. Finally, the functionality of the polymeric nanocomposites was evaluated through *in vivo* tests on bananas. The results revealed that the nanocomposite delayed banana ripening by 7 days, maintaining the fruit peel color green with only minor changes in pH and Brix degrees. These findings demonstrate that polymeric nanocomposites can be used for active food packaging, functioning primarily to delay banana ripening during storage.

Keywords: *titanium dioxide, zinc oxide, magnesium oxide, banana, active food packaging.*



Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León

ENGLISH PROFESSOR

C.I.0601975980

INTRODUCCIÓN

Descripción de la situación problemática

Dentro de la industria, el uso de plásticos derivados del petróleo y de origen biodegradable genera una gran contaminación ambiental debido a su aplicación en envases, embalajes y sistemas de distribución que se usan en los alimentos. Los plásticos, al ser desechados sin ser reciclados, afectan gravemente la biodiversidad y contaminan el medio ambiente. Sin embargo, existen alternativas de aplicación como los biopolímeros, pero su uso en la industria es limitado debido a varios factores técnicos, económicos y operativos, por lo que surge la necesidad de poder desarrollar nuevas soluciones con el propósito de preservar la calidad y seguridad de los alimentos.

Por otra parte, en la industria alimentaria también existen problemas para conservar productos perecederos. Kumar et al. (2020) menciona que la mayoría de los productos, especialmente las frutas como el banano (*Musa spp.*, familia Musaceae), tienen una vida corta y son perecederos por naturaleza; esto se puede atribuir a las condiciones ambientales, fisiológicas o mecánicas que la fruta puede presentar durante su maduración después de la cosecha debido a la cantidad de etileno que poseen, lo que afecta significativamente a su almacenamiento, transporte y comercialización.

El enfoque de la problemática está relacionado con el uso de materiales convencionales, como el polietileno, en el envasado de alimentos. Por lo que se ha visto la necesidad de desarrollar materiales de envase más amigables con el medio ambiente a base de quitosano, que destacan por su biocompatibilidad y propiedades antimicrobianas. Estos materiales podrían ayudar a sustituir parcialmente el uso de plásticos convencionales utilizados durante el almacenamiento y la distribución del banano. Además, la incorporación de nanopartículas de óxidos metálicos puede aportar funcionalidad para degradar etileno y retrasar la maduración de la fruta, al mismo tiempo que se reduce el impacto ambiental (Yarahmadi et al., 2024).

Justificación

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (2023) menciona que el Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) está desarrollando un instrumento jurídicamente vinculante sobre la contaminación plástica, con el objetivo de reducir la contaminación, debido a que el sector alimentario es el mayor generador de residuos plásticos de un solo uso. Alrededor del 36 % de todo el plástico producido se utiliza en envases de alimentos y bebidas, del cual el 85 % acaba en desechos o como residuos mal gestionados. Las discusiones se han centrado en medidas que tengan en cuenta todo el ciclo de vida de los plásticos, desde el abastecimiento y el diseño del producto hasta la fabricación y la gestión de los residuos, lo que brinda la oportunidad de elaborar envases biodegradables con polímeros más amigables con el medio ambiente como parte de una próspera economía circular.

Para evitar problemas en el sector alimentario, la evolución tecnológica ha desarrollado nuevas técnicas de conservación para prolongar la vida útil de las frutas y reducir los desechos postcosecha. Entre estas innovaciones se destaca el uso de nanotecnología con el desarrollo de nanocompuestos poliméricos formados por nanopartículas de óxidos metálicos como óxido de zinc (ZnO), dióxido de titanio (TiO₂) y óxido de magnesio (MgO), capaces de retrasar la maduración mediante la eliminación del etileno producido por las frutas. Investigaciones destacan que estos materiales mejoran el envasado sostenible de alimentos (Herrera-Rivera et al., 2024).

La industria también busca soluciones a base de sustancias naturales no tóxicas que puedan ralentizar el proceso de maduración o reducir la descomposición de los frutos tras la cosecha. Un estudio reportado por Kumar et al. (2020) analizan la aplicación de un recubrimiento comestible a base de quitosano en bananos, mostrando que las películas con un alto porcentaje de quitosano retrasaban la descomposición de la fruta. Zambrano (2024) menciona que otra solución a este problema es la implementación de empaques activos desarrollados a partir de recursos biodegradables con el fin de reducir la dependencia de plásticos convencionales y minimizar el impacto ambiental, asegurando la calidad de los alimentos.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar nanocompuestos poliméricos basados en quitosano y nanopartículas de óxidos metálicos tales como ZnO, TiO₂ y MgO con capacidad para retrasar la maduración de frutas.

Pregunta de investigación

¿De qué manera los nanocompuestos de quitosano con TiO₂, ZnO o MgO afectan el proceso de maduración postcosecha del banano?

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar nanocompósitos poliméricos basados en quitosano y nanopartículas metálicas con capacidad de retraso en la maduración de frutas.

Objetivos específicos

- Elaborar nanocompósitos poliméricos a base de quitosano, ZnO, TiO₂ y MgO mediante la técnica de *casting*.
- Caracterizar los nanocompósitos poliméricos mediante análisis de las propiedades físicas, ópticas, estructurales y térmicas.
- Evaluar la funcionalidad de los nanocompósitos poliméricos mediante ensayos in vivo de maduración del banano.

MARCO REFERENCIAL

Antecedentes

Cruz Francisco et al. (2023) prepararon recubrimientos con soluciones de quitosano al 0,2 % (m/v) en una solución de ácido acético al 1% (m/v) con agitación constante y filtración para garantizar su pureza. Las nanopartículas de quitosano se sintetizaron añadiendo una solución de tripolifosfato de sodio (TPP) a una concentración del 0,3 % (m/v) con agitación a 1000 rpm, luego la mezcla la centrifugaron a 10000 rpm por unos 15 minutos con una agitación constante de 20 minutos. Finalmente, la mezcla la almacenaron a 4 °C y luego se usó como agente antifúngico en frutas de exportación.

En el estudio de Patiño Vidal et al. (2023) desarrollaron una película delgada antibacteriana con estructura multicapa a base de quitosano de alto peso molecular con un espesor de 26 μm a partir de una solución polimérica al 2 % (m/v) preparada en una solución de ácido acético al 1 % (v/v). También incorporaron alcohol isopropílico al 1 % (v/v) a la solución de quitosano para mejorar su humectabilidad.

Uscocovich-Álvarez et al. (2023) hicieron un recubrimiento para la aplicación en bananos a partir de solución base mezclando 990 ml de agua destilada y 10 ml de ácido acético glacial. Luego añadieron quitosano en concentraciones del 0,75 % al 1,50 % a 26 °C. utilizaron agitación magnética a 400 rpm durante 20 minutos para asegurar la homogeneidad de la mezcla. La emulsión se almacenó para que, finalmente, pudieran mojar los bananos.

Sun et al. (2025) elaboraron una película compuesta de quitosano y gelatina funcionalizada con extracto de *Brassicaceae*. Para la obtención de un extracto crudo congelaron el vegetal y realizaron una doble extracción etanólica al 80 % a 4 °C. Para la matriz polimérica, prepararon soluciones independientes de gelatina al 3,5 % (p/v) y quitosano al 2,5 % (p/v), añadiendo glicerol (6 g) y mezclando a 50 °C. Por último, mezclaron volúmenes iguales de las dos soluciones con el extracto al 0 % y al 1 % (p/v), luego vertieron en placas Petri y secaron durante 2 horas a 80 °C para obtener las películas activas denominadas CS/GE/BR.

Chauhan et al. (2020) explican el proceso de fabricación de las películas que realizaron mediante la técnica de colada con disolvente, utilizando moldes de polidimetilsiloxano colocados sobre bandejas de teflón para facilitar su desprendimiento. La solución base utilizada consistió en un conjugado de curcumina-quitosano al 1,5 % (p/v) en ácido acético al 1 % (v/v). La solución la vertieron en el molde y lo sometieron a desecación en una cámara de vacío a 20 mm Hg durante dos días a temperatura ambiente, protegido de la luz con papel de aluminio. Finalmente, las películas con sistema radioprotector potencial que se obtuvieron se cortaron en secciones de 1,0 x 1,0 cm y se almacenaron a 4 °C.

En el desarrollo de recubrimientos comestibles para la conservación del aguacate Hass, Madera-Santana et al. (2022) describen un proceso de formulación a base de quitosano, agar y aceite esencial de tomillo. Según los autores, la solución de agar se preparó al 1 % (p/v) con agua destilada y agitación constante a 60 °C, mientras que el quitosano se

disolvió al 1 % (p/v) en una solución de ácido acético al 1 %. Luego elaboraron mezclas híbridas, a las cuales incorporaron aceite de tomillo al 1 % (v/v) para obtener su variante. Las películas se hicieron mediante la técnica de *casting* (vaciado), vertiendo 80 ml de las formulaciones en moldes plásticos para ser deshidratados en estufa a 60 °C durante 24 horas, terminando con un periodo de estabilización a 25 °C y 24 % de humedad relativa.

Venkatesan et al. (2024) elaboraron películas biocompuestas de quitosano para la conservación de fresas. Prepararon una base disolviendo 2 g de quitosano en 50 ml de agua destilada, incorporando 100 mg de glicerol como agente plastificante. Posteriormente agregaron ácido tánico al 30 % y polvo de semilla de Moringa. La película se obtuvo mediante la adición de 2,5 ml de ácido acético al 2 %, con agitación magnética constante a una temperatura de 80 °C durante una hora para asegurar la homogeneidad, luego vertieron en placas Petri de vidrio y las muestras se sometieron a un proceso de secado dual, primero a temperatura ambiente durante la noche y, luego, en un horno a 40 °C por un tiempo de 24 horas. Finalmente, las películas lo desprendieron con ayuda de una espátula y lo resguardaron en bolsas herméticas para su caracterización.

Chen et al. (2024) prepararon soluciones de películas agregando agua destilada, carboximetilcelulosa sódica (0,1 g/hg) y alginato sódico (0,1 g/hg), glicerol (0,1 g/hg) y polifenoles de té a la pulpa de cáscara de mango (MPP) bajo agitación constante a 500 rpm durante 2 h. La solución de película la vertieron sobre una placa de vidrio para extender el flujo hacia la película, que dejaron secar al aire en un horno de aire caliente a 28 °C, dando como resultado una película antibacteriana de cáscara de mango (MPAF). Todas las películas se almacenaron en una cámara de temperatura y humedad constante (LRH-250-HS) a 23 ± 1 °C y 50 ± 1 % RH durante 48 h antes de probar su rendimiento.

Martínez-González et al. (2020) explicaron que, para proteger la calidad de las fresas durante su almacenamiento, se sintetizaron nanopartículas de quitosano mediante el método de nanoprecipitación. El polímero se disolvió al 0,05 % (m/v) en ácido acético al 1 % (v/v), integrando esta fase acuosa en una fase orgánica de etanol con Tween 20. La mezcla la procesaron en un rotavapor a 40 °C; obteniendo partículas con dimensiones entre 28,4 y 31,5 nm, las cuales almacenaron a 4 °C para ser utilizadas en los recubrimientos en una concentración del 33 %. El preparado final consistió en una solución base de quitosano al 1 % (v/v) con ácido acético, glicerol al 0,3 % (v/v), y las nanopartículas de quitosano y extracto de propóleo en concentraciones de hasta el 30 % mediante agitación constante a 40 °C y una homogeneización posterior a 10 000 rpm. Finalmente, las fresas prelavadas se sumergieron en las distintas fórmulas por 30 segundos, se secaron a temperatura ambiente y se mantuvieron a 4 °C en envases de tereftalato de polietileno durante 8 días.

Avellán et al. (2020) elaboraron láminas de bioplásticos con una mezcla inicial de 5,72 g de almidón de maíz en 17 ml de agua destilada bajo agitación constante, asegurando que la temperatura permaneciera por debajo de los 70 °C para lograr la homogeneización. Posteriormente, añadió 1,7 ml de glicerina de forma gradual, lo que generó un cambio notable en la textura de la sustancia; a esto se sumó la incorporación de 3 ml de ácido acético al 3% v/v hasta que cesó la emanación de vapores. Finalmente, el compuesto se vertió sobre

una placa de vidrio para moldear la lámina, la cual se sometió a secado solar antes de ser retirada para su uso.

Maldonado et al. (2024) evaluaron la efectividad de películas de etileno a base de materiales ecoplásticos y nano-TiO₂, en una prueba in vivo en plátanos envueltos en bolsas con sellado de tres zonas, dejando una parte abierta para permitir la transpiración de la fruta. La fruta la almacenaron durante diez días en una cámara controlada a 14 °C y 70 % de humedad relativa. La caracterización de la madurez la efectuaron cada dos días mediante diversos métodos estandarizados que incluyeron el índice de madurez, la textura de la pulpa, el color de la cáscara, los sólidos solubles y el pH. Adicionalmente, determinaron el índice de almidón con la prueba de Lugol.

Uscocovich-Álvarez et al. (2024) evaluaron la conservación postcosecha de bananos utilizando recubrimientos de quitosano en concentraciones que oscilaban entre el 0,75 % (m/v) y el 1,50 % (m/v). Las soluciones poliméricas se prepararon en soluciones de ácido acético al 1 % (v/v) utilizando agitación magnética a 400 RPM durante 20 minutos para eliminar impurezas. Los frutos, seleccionados por su uniformidad física y desinfectados previamente con hipoclorito de sodio a 0,8 ppm, se sumergieron durante un minuto en la mezcla para formar una película delgada y posteriormente almacenaron en cajas de cartón a temperatura ambiente. Analizaron el color de la cáscara y la carga microbiológica (mohos y levaduras) en intervalos de cinco días hasta completar un ciclo de 20 días.

Mancillas et al. (2023) mencionan que evaluaron dos sistemas de solventes, con ácido acético (0,3 M) y ácido cítrico al 1 % (p/v) en el proceso de desarrollo de películas biodegradables. En ambos casos, el quitosano al 1 % (p/v) lo sometieron a procesos de agitación de 24 horas a temperatura ambiente para el sistema con ácido acético y 4 horas a 80 °C para el sistema con ácido cítrico. Finalmente, las películas se obtienen mediante la técnica de vaciado (casting), donde se vierten 10 ml de la solución en cajas Petri de vidrio y se someten a un proceso de secado en horno a 40 °C durante 24 horas sin agitación.

Para evaluar la eficiencia de los envases activos en la conservación de bananos, Yu et al. (2025) emplearon un procedimiento que consistía en la selección de 75 frutos divididos en cinco grupos, un control sin tratamiento (blanco) y cuatro variantes con distintos recubrimientos (P, PA, PAM y PANM). El estudio se realizó por triplicado, basado en el monitoreo diario durante los cinco días, donde analizaron la apariencia física y parámetros fisicoquímicos, como la firmeza, el pH, la pérdida de masa, la acidez titulable y la concentración de vitamina C. Los datos que obtuvieron fueron procesados mediante análisis estadísticos en el software SPSS, aplicando la prueba de diferencia significativa mínima (LSD) con un nivel de confianza de $p < 0.05$ para validar los resultados.

Ledesma-Ugshiña et al. (2021) mencionan que, para la caracterización de los bioplásticos de almidón de maíz que usaron como envolturas alimenticias degradables, emplearon un pie de rey para medir el espesor de láminas de 2,5 cm x 2,5 cm, mientras que el contenido de humedad lo determinaron mediante un método gravimétrico tras un secado a 105 °C por 24 horas. Según los autores, la solubilidad la desarrollaron sumergiendo el

material en agua desionizada con agitación constante, seguido de un proceso de filtrado y secado hasta alcanzar peso constante para ser evaluado, la permeabilidad al vapor de agua la analizaron utilizando gel de sílice activado en un sistema sellado herméticamente durante cinco días. Luego, las propiedades mecánicas se midieron bajo la normativa NTE INEN 2635:2012 mediante ensayos de tracción. Finalmente, la biodegradabilidad fue valorada gravimétricamente bajo condiciones aeróbicas, anaeróbicas y acuosas para monitorear el nivel de descomposición del polímero.

Gómez Ayala & Yory Sanabria, (2018) destacan que, para la obtención de biomateriales, tales como el ácido poliláctico (PLA) y diversos copoliésteres, es posible mediante la síntesis química de monómeros de origen natural. De igual manera, señalan que ciertos biopolímeros pueden extraerse de microorganismos a través de técnicas de centrifugación y filtración. Debido a su capacidad para retener y liberar compuestos activos, estos materiales poseen un alto potencial en el desarrollo de películas antimicrobianas. Un ejemplo notable es el uso de biocompuestos de quitosano incorporados con extractos de semillas de pomelo, los cuales han demostrado reducir significativamente la proliferación de bacterias y hongos, logrando duplicar la vida útil de productos alimenticios perecederos.

Marco teórico

Clasificación del material

Película activa: material polimérico de buena barrera física realizado para estar en contacto directo con el alimento, gracias a sus componentes antimicrobianos, antioxidantes y captadores de etileno prolongando la vida útil del producto (Azevedo et al., 2022).

Recubrimiento activo: capa delgada aplicada sobre el alimento o sobre un material de envase que actúa como barrera física capaz de interactuar deliberadamente con el alimento o el ambiente que lo rodea, ayudando a incrementar la vida útil del producto (Bastarrachea et al., 2016).

Envase activo: material que actúa activamente e interactúa con el alimento y el medio ambiente para mejorar su conservación controlando factores como la humedad, el crecimiento de los microorganismos y el oxígeno (Arias envases flexibles, 2025).

Nanocompuesto polimérico: Material formado por un polímero y nanopartículas en cantidades bajas que ayudan a mejorar la relación entre el relleno y la matriz mejorando las propiedades térmicas, mecánicas y de barrera de una película (Chinchkar et al., 2023).

Método de casting: es un método de moldeo por vertido en un material uniforme para la realización de películas, esta técnica es utilizada en laboratorios y no para realizar a gran escala (Vinod et al., 2020).

Envase de alimentos

En la industria alimentaria, el empaquetado tradicional sirve para proteger el alimento de factores externos, garantizando la calidad durante un periodo más largo de tiempo. En los últimos años existen grandes innovaciones en el área de envases de alimentos como es el empaquetado “activo e inteligente o biopelículas comestibles” basándose en la interacción existente entre el alimento y la atmósfera que lo rodea (González B, 2017).

Quitosano

El quitosano es un polímero aprobado como de grado seguro por la FDA y puede diseñarse en diversas formas, como geles, películas y nanopartículas, gracias a su solubilidad a pH menor de 6,5. Además, se reconocen sus propiedades en la elaboración de películas, así como en la conservación de los alimentos, ya que el polímero posee actividad antimicrobiana. Este resultado se debe a que la permeabilidad del oxígeno y del dióxido de carbono se adhiere a la tasa de respiración de la fruta, lo que evita la invasión de microorganismos que puedan deteriorar el alimento (Guamán, 2024).

El quitosano es un polisacárido natural de carácter alcalino que se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina. Este polímero no solo actúa como una barrera física, sino que posee actividad biológica capaz de reducir la presencia de diversos patógenos, hongos y levaduras, ralentizando la descomposición enzimática de los productos. Debido a estas propiedades biológicas y su alta biocompatibilidad, los recubrimientos de quitosano son utilizados para retrasar el deterioro y prolongar la vida útil de las frutas durante su almacenamiento (Dai et al., 2025).

Nanopartículas de óxidos metálicos

Las nanopartículas de óxido metálico se han considerado como una herramienta innovadora en la ciencia debido a su capacidad para ser sintetizadas con una precisión nanométrica que define las propiedades físicas, químicas y catalíticas (Alhalili, 2023). Las nanopartículas de óxido metálico como por ejemplo el TiO_2 , ZnO , entre otros son utilizadas en el envasado de los alimentos ya que funcionan como catalizadores con propiedades antimicrobianas eliminando el etileno y mejorando sus propiedades de barrera contra gases y rayos UV (García et al., 2018).

Las nanopartículas de TiO_2 , ZnO y MgO promueven reacciones fotoquímicas ya que se activan bajo iluminación actuando como reductores y antioxidantes en el alimento (Stuparu-Cretu et al., 2023). Al integrar estas nanopartículas en sistemas de envasado, su alta porosidad y área superficial permiten capturar y romper los enlaces de las moléculas de etileno, purificando la atmósfera interna del envase extendiendo la vida útil y manteniendo la calidad comercial de los alimentos (Alhalili, 2023).

Las nanopartículas utilizadas para el desarrollo de esta investigación fueron: Nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), de óxido de magnesio (MgO) y de óxido de zinc (ZnO).

Nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2): Es un material semiconductor; también es considerado un fotocatalizador ideal para aplicaciones industriales debido a su baja solubilidad, bajo costo y alta resistencia a la corrosión química. Su actividad fotocatalítica se basa en la absorción de radiación ultravioleta (UV), la cual genera pares electrón-hueco que producen radicales libres capaces de degradar moléculas orgánicas a temperatura ambiente (Escobar-Alarcón & Solís-Casados, 2020).

Las nanopartículas de TiO_2 se destacan por su capacidad para eliminar bacterias, virus y moléculas con aroma. Su actividad antimicrobiana es efectiva contra bacterias Gramnegativas, debido a que las Grampositivas contienen una pared de peptidoglicano más gruesa que funciona como escudo ante los radicales libres generados. A nivel intracelular, el proceso fotocatalítico del TiO_2 induce la oxidación de la coenzima A (CoA), restringiendo la respiración celular del microorganismo. Asimismo, este óxido actúa como un agente anti-biopelícula mediante la generación de especies reactivas de oxígeno que degradan los lípidos de la membrana celular y desestabilizan matrices preestablecidas, logrando reducciones de hasta el 50% en la formación de biofilms de patógenos como *E. coli* y *B. subtilis* (Shkodenko et al., 2020).

Nanopartículas de óxido de magnesio (MgO): Es un material inorgánico de gran relevancia debido a su estabilidad química y térmica, así como a sus destacadas propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas. Se distinguen por poseer una estructura cristalina, un marcado carácter iónico y una amplia banda prohibida, lo que les confiere una alta actividad fotocatalítica. Además de ser materiales no tóxicos, no volátiles y de bajo costo de producción, su alta reactividad y capacidad de adsorción permiten su aplicación en sectores estratégicos como la electrónica, la catálisis y, especialmente, en el desarrollo de insumos agrícolas y químicos. Es importante destacar que la morfología y el tamaño de estas nanopartículas son altamente dependientes de las condiciones de síntesis, tales como el pH y la temperatura de calcinación (Zhañay Andrade, 2021).

Las nanopartículas de óxido de magnesio (NP- MgO) poseen un amplio espectro de acción contra virus, esporas y bacterias, tanto Gram positivas como Gram negativas. Su efectividad microbiológica está estrechamente ligada a la concentración, además de su función bactericida, el MgO destaca por su capacidad para la formación de biopelículas al fijar la adhesión celular en superficies y disminuir significativamente la biomasa de colonias ya maduras (Shkodenko et al., 2020).

Nanopartículas de óxido de zinc (ZnO): Es un material semiconductor reconocido por su versatilidad física y capacidad fotocatalítica, permitiendo la oxidación de compuestos orgánicos al exponerse a la luz ultravioleta. Gracias a su alta estabilidad térmica y química, el ZnO es ideal para el desarrollo de nanoestructuras, tales como nanopartículas y nanofibras, capaces de operar en entornos biológicos (Flores Hernández, 2021).

La eficiencia de las nanopartículas de óxido de zinc (NP-ZnO) puede potenciarse mediante estímulos físicos, como el ultrasonido, el cual incrementa la generación de peróxido de hidrógeno y facilita la suspensión de las membranas celulares, mejorando la penetración del agente en el microorganismo. Las NP-ZnO suelen actuar como inhibidores de biopelículas al reducir la adhesión celular a las superficies e interferir en la síntesis de peptidoglicanos mediante la liberación de iones de zinc. Estas propiedades mecánicas y biológicas posicionan a las nanopartículas de ZnO como un componente estratégico en el desarrollo de materiales activos para el control microbiológico (Shkodenko et al., 2020).

Frutas

Las frutas contienen alrededor del 80% de agua, por lo que se consideran productos biológicamente activos que mantienen procesos vitales tras su recolección. Durante esta etapa, el metabolismo de los tejidos continúa mediante la respiración celular, un proceso en el que se consume oxígeno y se libera dióxido de carbono, en el que ocurre la transpiración, que consiste en la pérdida de agua celular, lo cual deriva en el marchitamiento y la pérdida de turgencia del producto. Por ello, el control del estado de madurez es un factor crítico para garantizar que los alimentos mantengan las características organolépticas y de calidad requeridas por el mercado (Noriega, 2025).

Las frutas se pueden dividir de dos formas, climatéricas y no climatéricas, las frutas no climatéricas no son capaces de seguir con su proceso de maduración luego de la cosecha ya que producen una cantidad muy baja de etileno, en cambio, en las frutas climatéricas se da un rápido aumento de velocidad en la respiración y desprendimiento del etileno debido a que siguen madurando incluso después de la cosecha teniendo cambios notorios en la fruta (Rizzo et al., 2023).

Etileno

El crecimiento y desarrollo de los productos vegetales están regulados por hormonas que responden a estímulos ambientales, siendo el etileno una hormona vegetal, el principal agente responsable de iniciar y coordinar la maduración en frutos carnosos. Esta hormona no solo interviene en la senescencia y la germinación, sino que también actúa en procesos de cicatrización y respuesta al estrés hídrico o mecánico. Debido a que la maduración se vuelve un proceso irreversible una vez iniciado, las estrategias de conservación en postcosecha se centran en inhibir la biosíntesis de esta hormona mediante el control de la temperatura y la alteración de las atmósferas de almacenamiento, con el fin de prolongar la vida útil (Martínez-González et al., 2017).

El etileno se puede clasificar según su origen en endógeno y exógeno. El etileno endógeno en las frutas es un proceso metabólico resultado de su síntesis interna. Mientras que el etileno exógeno se produce por otros agentes, pueden ser biológicos, por naturaleza o por frutas cercanas. El etileno, desempeña un papel fundamental en los procesos de maduración, regulando la expresión génica, la actividad enzimática y las respuestas fisiológicas. Además, las interacciones entre el etileno y otras hormonas, como las auxinas,

el ácido abscísico y las giberelinas, modulan aún más la dinámica de la maduración (Alonso-Salinas et al., 2024).

El etileno actúa como una hormona que controla la velocidad de maduración. A nivel molecular, la fitohormona ejerce un papel importante en la regulación de los genes involucrados en la biosíntesis del aroma controlando los puntos críticos de la ruta metabólica de compuestos volátiles como monoterpenos y derivados de lípidos, azúcares y aminoácidos. De la misma forma, el etileno interviene en la regulación de los genes responsables de la biosíntesis de antocianinas, estimulando la coloración y acumulación de pigmentos flavonoides y carotenoides, fenómenos que interactúan con factores ambientales como la luz y la temperatura. Por último, esta señalización hormonal activa la expresión de factores de transcripción y enzimas hidrolíticas específicas que conducen a la relajación y despolimerización de la pared celular; promoviendo la modificación de la textura y en la última instancia, guiando la transición del fruto hacia los procesos degradativos y de muerte celular característicos de la senescencia (Martínez-González Mónica et al., 2017)

La ruta de biosíntesis del etileno en las células vegetales sigue mecanismos bioquímicos que ocurren en el citoplasma. La primera etapa se forma en el ciclo del aminoácido metionina (MET) para generar un aminoácido no proteico denominado ácido 1-Aminociclopropano-1-carboxílico (ACC). Seguidamente, actuará la ACC-oxidasa (ACO) como catalizador en la conversión de ACC a etileno; la última etapa implica el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono (CO₂). El ACC puede transportarse de forma activa a las células objetivo, donde puede almacenarse o desactivarse. En ocasiones por biosíntesis autocatalítica el etileno puede regular su propia producción (Vera Rodríguez, 2022).

Frutas climatéricas

La maduración de las frutas es un objeto de estudio constante debido a los componentes nutricionales que mantienen su calidad. Las frutas climatéricas poseen una tasa alta de etileno debido a que están regidas por una red de factores hormonales, genéticos y ambientales; estos frutos pueden continuar madurando incluso después de la cosecha debido a su rápido aumento en la tasa de respiración y producción de etileno que forma parte del fruto (Alonso-Salinas et al., 2024).

La tasa de respiración de las frutas varía, siendo mayor en bananos (*Musa sp.*), mangos (*Mangifera*), aguacate (*Persea americana*), entre otros que poseen una tasa de respiración alta y rápida. Por lo que el tiempo de vida útil de las frutas climatéricas depende del ritmo de su respiración y los cambios químicos que presenten, ya que requieren suministros de energía que obtienen a partir del ATP por medio de la respiración (Bermeo, 2022). Los mismos autores mencionan que existen factores que modifican la tasa de respiración de los frutos y se pueden clasificar según su variedad, que es el estado de maduración de la fruta, según su calibre que se relaciona con el tamaño, si es más grande el fruto presentará una tasa de respiración mayor, según su fecha de cosecha que determinan si

índices de madurez, y también según si la fruta recibe golpes, heridas o presencia de patógenos que pueden deteriorar y dañar la fruta respiración.

Banano

El banano es uno de los principales cultivos agrícolas producidos, comercializados y consumidos en el mundo, que contribuye a la seguridad alimentaria, en especial en países en desarrollo (Romero-García et al., 2025). Este producto es de gran importancia económica y también de seguridad alimentaria dentro de las regiones centroamericanas y latinoamericanas (Álvarez et al., 2023).

Dentro de la clasificación de las frutas, el banano es considerado como una fruta climatérica debido a que después de su cosecha aumenta su respiración y produce etileno. Su calidad se puede ver afectada si los bananos producen cantidades ilimitadas de etileno durante su transporte o almacenamiento (Bioconservación, 2023).

METODOLOGÍA

Enfoque

El enfoque de esta investigación fue de tipo cuantitativo, donde se obtuvieron datos de las propiedades físicas, ópticas, estructurales y térmicas de los nanocompuestos poliméricos elaborados con quitosano y nanopartículas de óxidos metálicos con la capacidad de retrasar la maduración de banana. Estos datos permitieron obtener valores de análisis estadístico y comparar las distintas muestras evaluadas.

Tipo de investigación

La investigación fue de tipo experimental y se desarrolló en el laboratorio del Grupo de Investigación de Inocuidad y Valorización de Recursos para la Agroindustria (INVAGRO) de la Universidad Nacional de Chimborazo. Los análisis estructurales se realizaron en los laboratorios de Química Instrumental de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y los análisis térmicos en el Centro Tecnológico de Innovación en Envases y Embalajes (LABEN-Chile) de la Universidad de Santiago de Chile.

Diseño de investigación

Esta investigación se basó en un diseño experimental unifactorial con tres niveles. El factor del estudio fue el tipo de nanopartícula añadida a la matriz polimérica de quitosano. Los niveles experimentales correspondieron a TiO_2 , ZnO y MgO .

En la evaluación de la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos también se aplicó un diseño unifactorial con tres niveles, donde el factor de estudio fue el tipo de nanopartícula incorporada al material (TiO_2 , ZnO y MgO). Las variables dependientes fueron el pH, grados Brix, color y la prueba de Lugol, mientras que la variable independiente correspondió al tipo de nanocompuesto polimérico.

Preparación de los nanocompuestos poliméricos

Para la obtención de los nanocompuestos poliméricos, se siguió el protocolo descrito por Patiño Vidal et al. (2023). Se prepararon disoluciones poliméricas de quitosano al 2 % (m/v) en una solución de ácido acético al 1 % (v/v), con agitación constante a 100 °C durante 1,5 horas. Previamente, se dispersaron las nanopartículas de ZnO , TiO_2 y MgO al 5 % (respecto al peso del quitosano) en la solución de ácido acético. Una vez disuelto el quitosano, se bajó la temperatura a 40 °C y se añadió glicerol al 20 % (respecto al peso del polímero) con agitación constante durante 30 minutos. Las soluciones poliméricas se colocaron en placas de Petri de plástico y se sometieron a un proceso de secado a 50 °C durante 24 horas. Se prepararon como controles, películas de quitosano sin nanopartículas. Estas concentraciones se usaron en función de los estudios previos desarrollados por Maldonado et al. (2024) y Patiño Vidal et al. (2025).

Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Se recolectaron datos de los análisis de propiedades físicas, ópticas y estructurales realizados en el material de envase y en la materia prima mediante instrumentos que garanticen la validez de los resultados.

Propiedades físicas

Se midió el espesor de los nanocompuestos poliméricos utilizando un micrómetro digital Mitutoyo (Japón). Se tomaron diez puntos aleatoriamente en los materiales con la finalidad de obtener un valor promedio.

Propiedades ópticas

Se midieron los parámetros de color y el índice de opacidad de los nanocompuestos poliméricos.

Los parámetros de color L^* (luminosidad), a^* (tono de rojo a verde) y b^* (tono de azul a amarillo) de los nanocompuestos poliméricos se determinaron mediante un colorímetro Linshang (China). Se tomaron fotografías colocando los materiales sobre una placa patrón, y los parámetros de color se obtuvo del promedio de 8 mediciones aleatorias de las superficies de los nanocompuestos poliméricos. Las diferencias de color (ΔE) de los nanocompuestos poliméricos respecto a la película de quitosano se calcularon mediante la ecuación 1:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{ecuación 1}$$

El índice de opacidad de los nanocompuestos poliméricos se midió mediante espectrofotometría. Se cortaron rectángulos de 1 cm x 4,5 cm (ancho por largo) y se midió la absorbancia a 600 nm mediante un espectrofotómetro UV-Visible Pharo 300 Spectroquant® (Alemania).

Se realizaron 12 mediciones en el material y el índice de opacidad se calculó mediante la ecuación 2:

$$O = \frac{Abs_{600nm}}{L} \quad \text{ecuación 2}$$

Propiedades estructurales

Se evaluó la presencia de los grupos funcionales de los nanocompuestos poliméricos mediante un espectrómetro FT/IR-4100 (Japón) acoplado a un cristal de diamante de reflexión total atenuada (ATR). Se obtuvieron los espectros realizando 64 barridos de la muestra en un intervalo de longitud de onda entre 4000 y 400 cm^{-1} y con una resolución de 16 cm^{-1} .

Propiedades térmicas

La estabilidad térmica y las temperaturas de degradación de los nanocompuestos poliméricos se evaluaron mediante un equipo de análisis termogravimétrico (TGA). Se colocaron 6 mg de cada muestra en cápsulas de alúmina y se calentaron de 30 a 800 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, bajo una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 ml/min.

Evaluación de la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos

La funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos se evaluó en la banana siguiendo el proceso mencionado por Maldonado et al. (2024), con algunas modificaciones. Se utilizaron fundas Ziploc y se realizaron agujeros para facilitar la respiración de la fruta durante el almacenamiento. En la mitad de cada funda Ziploc, se colocó un pedazo de nanocompuesto polimérico de 3 cm x 3 cm, y la funda se sometió a irradiación con luz UV-B durante 1 hora para activar las nanopartículas. Por otra parte, se seleccionó y limpió cada banano y se introdujo una unidad dentro del envase. Las muestras se almacenaron durante 21 días y periódicamente se analizaron el pH, almidón, color de la cáscara y sólidos solubles en el banano.

El pH se determinó en la pulpa del banano con un pH metro digital de modelo Hanna HI 9813-6 previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7. Para cada muestra se utilizó una proporción de 1:3 (10 g de banana y 30 ml de agua destilada) mediante una homogenización de 1 minuto. La medición se realizó con un solo análisis de cada fruta a temperatura ambiente.

Los sólidos solubles totales (grados Brix) se determinaron con un refractómetro de modelo BTX-1 calibrado. Para la preparación de la muestra se trituró una porción del banano para obtener el jugo, y se procedió a colocar 3 gotas sobre el prisma del refractómetro para obtener los diferentes resultados.

El cambio de color de la cáscara se midió mediante un colorímetro de Linshang (China). Se realizó utilizando la metodología como se menciona en la sección 4.5.2.

La presencia de almidón en la pulpa se determinó utilizando la prueba de Lugol.

Análisis de datos aplicados

Los datos obtenidos para cada uno de los parámetros evaluados fueron codificados y organizados en una base de datos Microsoft Excel. Este proceso incluyó la asignación de códigos específicos a cada variable y tratamiento, lo que facilitó el manejo de la información. Además, cada tratamiento tuvo tres réplicas independientes (n=3) para la obtención de los resultados.

La evaluación de las propiedades físicas y ópticas se realizó a 10 películas aleatorias por cada tratamiento (n=10). La caracterización estructural y térmica incluyó el uso de una

película por cada tratamiento (n=1) debido a la alta sensibilidad del ensayo. Para la evaluación del ensayo *in vivo*, se utilizaron un total de 75 bananos (n=75), que se distribuyeron en 3 frutos para el día 0 y 72 frutos distribuidos equitativamente entre los cuatro tratamientos y 6 días seleccionados (n=18 frutos por cada tratamiento). Es decir, cada tratamiento incluyó un análisis por triplicado

El análisis estadístico de los resultados se llevó a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de identificar diferencias significativas entre las distintas muestras evaluadas. Seguidamente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para determinar específicamente qué tratamientos tienen diferencias estadísticamente significativas, utilizando un nivel de confianza del 95%. El procesamiento y análisis de los datos se realizaron empleando el software estadístico Statgraphics Centurion XVI.I.

Cumplimiento de principios éticos de investigación científica

En el ámbito de la propiedad intelectual y la difusión de resultados, se deja constancia de que, en concordancia con los lineamientos institucionales sobre patentes y publicaciones científicas, en el presente trabajo de titulación solamente se presentan los promedios y desviaciones estándar de los resultados experimentales, ya que la información forma parte del artículo científico “*Development of active films containing TiO₂ and ZnO nanoparticles and their effect on postharvest quality of bananas*” sujeto a revisión en la revista Food Control.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas

La Tabla 1 muestra el análisis de varianza (ANOVA) de los valores del espesor de los nanocompuestos poliméricos a base de quitosano y nanopartículas metálicas de TiO₂, ZnO y MgO.

Tabla 1

Análisis de varianza del parámetro espesor

Película	Espesor	Valor-P
Quitosano	56,70 ± 6,99	0,282
Quitosano + TiO ₂	55,10 ± 5,61	
Quitosano + ZnO	59,10 ± 6,31	
Quitosano + MgO	54,20 ± 4,42	

Nota. Valor-P: nivel de significancia

Como se observa en la Tabla 1, se obtuvo un valor de significancia ($p = 0,282$), superior al nivel de confianza establecido ($\alpha = 0,05$). Este resultado indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados en cuanto al espesor del material.

Aunque se observaron ligeras variaciones en los promedios, siendo el nanocompuesto con ZnO el de mayor espesor (59,1 μm), seguido del quitosano (56,7 μm), el modificado con TiO₂ (55,1 μm) y finalmente el MgO (54,2 μm), dichas diferencias no son suficientemente marcadas para atribuir un efecto significativo a la incorporación de las nanopartículas.

El hallazgo reportado por Wang et al. (2024) menciona que las propiedades de formación de la película de quitosano están influenciadas por factores como la concentración de la solución, el pH, la temperatura y el tipo de solvente. Sin embargo, la adición de cargas como nanopartículas en bajas concentraciones no altera de manera drástica el espesor final de la película, siempre que se mantenga una adecuada dispersión y compatibilidad entre la matriz polimérica y el material inorgánico.

Asimismo Kumar et al. (2021) reportaron que al incorporar extracto de cáscara de granada en concentraciones crecientes (0,2-1,0 g/ml) en películas de quitosano, el espesor aumentó significativamente (de 0,142 a 0,159 mm). Esto sugiere que el efecto sobre el espesor depende en gran medida de la concentración y la naturaleza de la carga incorporada.

Desde el punto de vista aplicado, la ausencia de diferencias significativas sugiere que el TiO₂, el ZnO y el MgO lograron integrarse adecuadamente en la matriz de quitosano sin provocar cambios estructurales que modifiquen el espesor de manera sistemática. En el contexto de la conservación de frutas, mantener un espesor relativamente constante es

fundamental, ya que esta propiedad influye directamente en la formación de una barrera semipermeable que regula el intercambio de gases y la pérdida de humedad.

Propiedades ópticas

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las muestras de quitosano y los nanocompuestos poliméricos con TiO₂, ZnO y MgO, considerando los parámetros de color de las películas (L*, a* y b*).

Tabla 2

Análisis de varianza del parámetro de color de la película

Película	L*	a*	b*	ΔE
Quitosano	89,9 ± 2,3 ^a	2,1 ± 0,7 ^b	-0,9 ± 0,4 ^a	-
Quitosano + TiO ₂	90,0 ± 0,8 ^a	0,8 ± 0,4 ^a	4,7 ± 1,8 ^b	5,8 ± 1,9 ^b
Quitosano + ZnO	89,9 ± 1,4 ^a	2,1 ± 0,2 ^b	-2,0 ± 0,6 ^a	1,8 ± 0,4 ^a
Quitosano + MgO	90,8 ± 0,4 ^a	2,1 ± 0,3 ^b	-2,3 ± 0,4 ^a	1,8 ± 0,4 ^a
Valor-P	0,00			

Nota. Letras minúsculas (a y b) muestran las diferencias significativas entre las muestras (p<0,05), de acuerdo con el análisis ANOVA y el test de Tukey.

Se observaron diferencias significativas en los parámetros del color entre las muestras (p = 0,00).

Al analizar los valores de la Tabla 2, se observa que el nanocompuesto polimérico con TiO₂ presenta el valor promedio más alto (31,86), seguido por el quitosano (30,42), el MgO (30,23) y finalmente el ZnO (29,97). Sin embargo, la prueba de rangos múltiples muestra que los tratamientos de quitosano, MgO y ZnO son estadísticamente homogéneos, mientras que TiO₂ es un grupo separado, siendo diferente del resto. Esto sugiere que la incorporación de TiO₂ modifica de manera más pronunciada las características visuales de las películas, mientras que el ZnO y el MgO no generan cambios significativos respecto al quitosano puro.

Este patrón de comportamiento es consistente con lo reportado por Anaya-Esparza et al. (2022) quienes al añadir nanopartículas de óxidos mixtos TiO₂-ZnO-MgO a películas de quitosano observaron un cambio de color en la solución formadora de película a blanco. Este hecho evidencia que el TiO₂ tiene un efecto más pronunciado sobre la apariencia visual de los nanocompuestos poliméricos en comparación con otros óxidos metálicos, y esto es debido a la dispersión de luz y al alto índice de refracción que posee.

El valor L* es mayor que los valores a* y b* debido a la adición de TiO₂, lo que indujo a un desplazamiento de tonalidad más amarillenta, provocando efectos de opacidad en las películas. Sin embargo, Odetayo et al. (2022) mencionan que trabajaron con recubrimientos de quitosano y no observaron cambios significativos en el parámetro de L*, por lo que las películas no se vieron afectadas por la transición lumínica. Este hecho coincide

con las películas a base de ZnO y MgO donde los parámetros de a^* y b^* se mantuvieron al perfil del quitosano puro, presentando una excelente compatibilidad sin alterar la apariencia visual de los nanocompuestos poliméricos.

En cuanto a los parámetros de color, el valor b^* muestra variaciones notables entre las muestras, reflejando cambios en las tonalidades del material al incorporar las diferentes nanopartículas. La interacción entre el tipo de muestra indica que el efecto de las nanopartículas no es igual para todos los parámetros de color, sino que depende del parámetro de color. Este comportamiento es similar a lo documentado por Koosha & Hamed (2019) quienes observaron que el parámetro b^* aumentó significativamente de 1 a 9 en películas de quitosano/PVA al incorporar bentonita, atribuyendo este incremento a la interacción entre la carga de nanopartículas y la matriz polimérica, lo cual explica también el color observado en las películas con TiO_2 en el presente estudio.

Según Bello-Lara et al. (2016) la interacción entre el tipo de muestra y el parámetro de color indica que el efecto de las nanopartículas no es homogéneo sobre los parámetros L^* , a^* y b^* . Esto es importante porque, en aplicaciones de recubrimiento de frutas, la apariencia visual es un factor fundamental para la aceptación del producto por parte del consumidor. Por lo tanto, los autores mencionan que, si un recubrimiento modifica drásticamente el color natural del fruto, tornándolo amarillento (valores de b^* altos y positivos), podría ser rechazado, aunque mejore propiedades como la firmeza o la vida de anaquel.

En la comparación de algunas muestras existen diferencias importantes. En particular, la muestra con TiO_2 presenta una diferencia significativa respecto al quitosano, al ZnO y al MgO; sin embargo, en estas muestras no se observan diferencias estadísticamente significativas. Esto indica que el TiO_2 genera un cambio más notable en el color de las películas, mientras que el ZnO y el MgO no alteran significativamente la apariencia con respecto al quitosano puro.

Parámetro de opacidad de la película

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para la propiedad de opacidad evidenció diferencias significativas entre las muestras evaluadas ($p < 0,05$), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3*Análisis de varianza del parámetro de opacidad de la película*

Película	Opacidad	Valor-P
Quitosano	$0,76 \pm 0,06^a$	0,00
Quitosano + TiO ₂	$11,97 \pm 2,33^b$	
Quitosano + ZnO	$0,77 \pm 0,15^a$	
Quitosano + MgO	$0,98 \pm 0,42^a$	

Nota. Las letras minúsculas (a - b) muestran las diferencias significativas entre las muestras.

El factor tipo de muestra (quitosano y nanopartículas) mostró un efecto altamente significativo ($p = 0,00$), lo que indica que la incorporación de nanopartículas metálicas influye de manera significativa en la opacidad de los nanocompuestos poliméricos a base de quitosano.

Este comportamiento puede explicarse mediante las propiedades de nanopartículas. Wang et al. (2024) señalan que el nano-TiO₂ es uno de los nanomateriales inorgánicos más activos, con propiedades como la protección ultravioleta y la capacidad de dispersar la luz. Precisamente, la alta opacidad observada en el TiO₂ se debe a su capacidad para dispersar y bloquear la luz, propiedad que ha sido aprovechada en recubrimientos comestibles para reducir la transmisión de radiación y proteger los frutos de la degradación fotoquímica.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por Anaya-Esparza et al. (2022) quienes al evaluar películas de quitosano con óxidos mixtos TiO₂-ZnO-MgO observaron que la transmitancia (T%) disminuyó drásticamente desde 95,5% en el quitosano puro hasta 49% en los nanocompuestos poliméricos con la mayor concentración de nanopelículas (500 $\mu\text{g ml}^{-1}$), lo que representa un aumento significativo de la opacidad y confirma que el TiO₂ es el principal responsable de este comportamiento óptico.

De manera similar, Meza Rodríguez (2024) reportó en su tesis sobre nanocompuestos poliméricos de quitosano con TiO₂ y ZnO que el coeficiente de extinción aumentó con la incorporación de los óxidos metálicos, evidenciando una mayor opacidad en los materiales modificados, particularmente aquellos que contenían TiO₂.

Este fenómeno ha sido documentado también por Montes-Ramírez et al. (2024) quienes en películas activas de quitosano con extractos naturales observaron que la incorporación de cargas modifica la opacidad de las películas, atribuyendo este efecto a la interacción entre los componentes añadidos y la matriz polimérica del quitosano, la cual altera la densidad y la estructura de la red polimérica, afectando así el paso de la luz a través del material.

En contraste, el ZnO y el MgO, aunque también son materiales inorgánicos con potenciales propiedades de barrera, no produjeron un efecto significativo en la opacidad en nuestro estudio. Esto podría atribuirse a diferencias en el tamaño de partícula, la morfología,

el grado de dispersión en la matriz de quitosano o la concentración utilizada, Wang et al. (2024) también destacan que la incorporación de nano-TiO₂ en películas de quitosano mejora las propiedades mecánicas y de barrera, y que los nanocompuestos poliméricos de quitosano con nanomateriales han demostrado ser efectivos en la conservación de frutas como el mango y el melón, debido en parte a su capacidad para bloquear la luz y reducir la actividad enzimática asociada al oscurecimiento.

En la Figura 1, se muestra de forma gráfica el efecto de la inclusión de las nanopartículas en la opacidad de los nanocompuestos poliméricos.

Figura 1

Obtención de los nanocompuestos poliméricos



Al comparar las muestras de la Figura 1, la película con mayor opacidad se observa en la muestra de Quitosano + TiO₂, frente al control, donde se debate un alto índice de refracción de dióxido de titanio, resultado que coincide con lo señalado por Siripatrawan & Kaewklin, (2018) donde se menciona que estas características son deseables en el retraso de la maduración de las frutas, ya que actúan como un filtro solar.

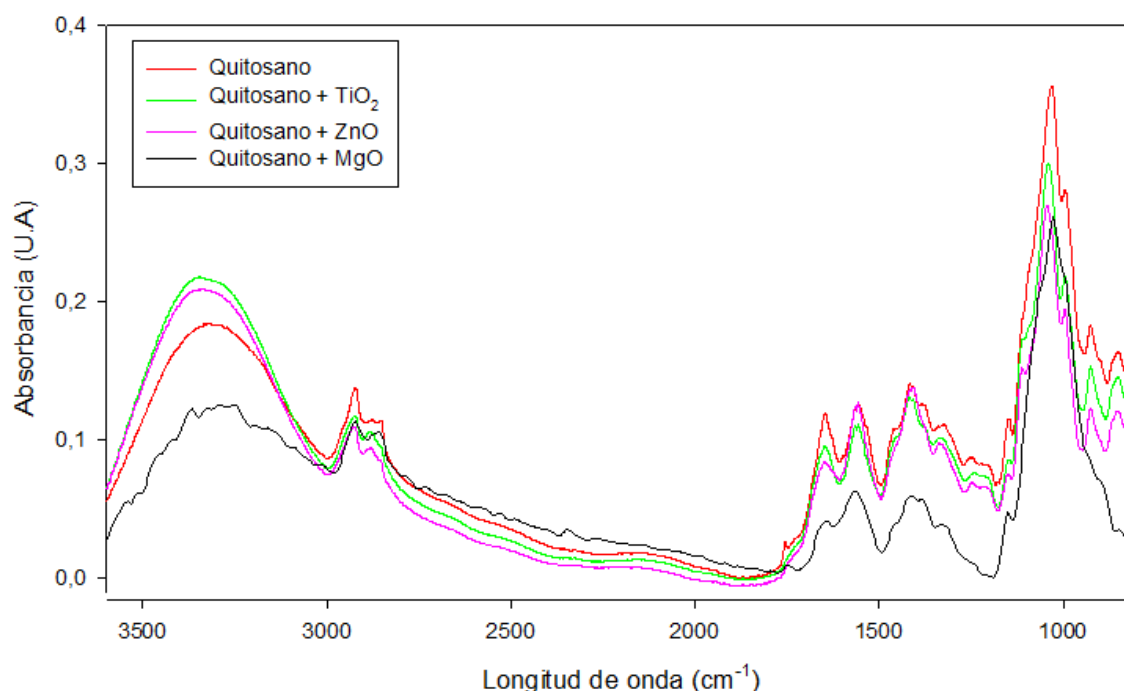
Por otro lado, la integración de la muestra de Quitosano + ZnO y su posterior irradiación con luz UVA sugiere una optimización de la actividad antimicrobiana por mecanismos fotocatalíticos. Según Kumar et al. (2020) la presencia de estas nanopartículas aporta funcionalidad biológica y refuerza la red polimérica de quitosano proporcionando la plasticidad por el glicerol y dando como resultado un nanocompuesto polimérico con mejores propiedades, fundamentales para evitar la rápida maduración de las frutas durante su almacenamiento.

Propiedades estructurales

En la Figura 2 se observa los espectros obtenidos de los nanocompuestos poliméricos de quitosano, TiO₂, ZnO y MgO mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Figura 2

Análisis del parámetro Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)



En la Figura 2 se observan los espectros FTIR-ATR del quitosano (rojo) y los nanocompuestos poliméricos con TiO_2 (verde), ZnO (rosado) y MgO (negro). El análisis indica la presencia de los grupos funcionales característicos del quitosano en todos los nanocompuestos poliméricos. La banda ancha situada en los $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ se asoció con el estiramiento vibracional de los grupos hidroxilo y amino, mientras que las señales cercanas a 2920 y 2850 cm^{-1} correspondieron a los estiramientos simétricos y asimétricos de los enlaces C-H (Bergamonti et al., 2022; Khan, Riahi, Kim, et al., 2025). Las bandas ubicadas alrededor de 1646 cm^{-1} de estiramiento C=O y las bandas de flexión N-H a 1563 y 1324 cm^{-1} corresponden a las amidas I, II y III, respectivamente, reflejando la estructura química característica de la matriz polimérica (Khan, Riahi, Kim, et al., 2025; Liu et al., 2024). Las señales entre 1470 y 1031 cm^{-1} confirmaron las vibraciones de C-O-C y C-O presentes en el esqueleto polisacárido del quitosano (Nyeem et al., 2025).

Los nanocompuestos poliméricos de TiO_2 , ZnO y MgO incorporados en la matriz del quitosano mostraron una disminución en la intensidad de las bandas de absorción ubicadas por debajo de los 3000 cm^{-1} . De igual manera, la banda asociada a los grupos N-H y O-H situada a 3320 cm^{-1} se desplazó a los 3333 cm^{-1} presentando un aumento en su intensidad. Esto evidenció que el quitosano fue el componente principal del material, ya que no hubo cambios significativos en los FTIR/ATR de los nanocompuestos poliméricos (Saefumillah et al., 2025).

En la zona más alta del espectro alrededor de $3000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ aparece una señal amplia que es característica del quitosano. En los materiales con TiO_2 , ZnO y MgO , esta señal cambia ligeramente, lo que indica que las nanopartículas están interactuando con el material base, estos resultados coinciden con lo descrito por Mascarenhas et al. (2018)

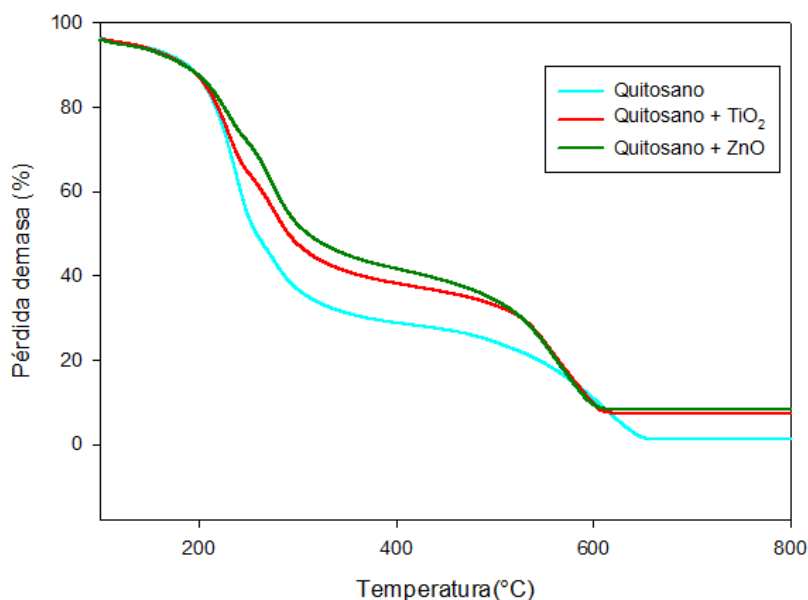
quienes atribuyen dichos desplazamientos a la inmovilización de iones metálicos (Zn^{2+} y Ti^{4+}) sobre los grupos OH y NH_2 del quitosano, formando enlaces como N–Zn.

En lo mencionado anteriormente, Anaya-Esparza et al. (2022) investigaron los cambios estructurales en películas de quitosano funcionalizadas con TiO_2 y con óxidos mixtos $\text{TiO}_2\text{-ZnO-MgO}$ mediante FTIR, encontrando que las modificaciones en los espectros en la región de $1700\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ dependían de la temperatura de almacenamiento.

Propiedades térmicas

En la Figura 3 se presentan los resultados del análisis del parámetro termogravimétrico (TGA) del quitosano con nanopartículas de TiO_2 y ZnO . El nanocompósito polimérico con MgO no pudo ser analizado por motivo de daño físico en el equipo TGA.

Figura 3
Análisis del parámetro termogravimétrico (TGA)



En la Figura 3 se observan tres etapas de una disminución progresiva de la pérdida de masa a medida que aumenta la temperatura en los nanocompuestos poliméricos. En la primera etapa a los 88 °C ocurre la eliminación física del agua absorbida en las películas. En la segunda etapa se da la degradación térmica del quitosano que inicia a los 210 °C, alcanzando dos temperaturas máximas de degradación a 238 y 270 °C. Este proceso se liga a la degradación térmica de la cadena principal del quitosano (El-Araby et al., 2023). Finalmente, en la tercera etapa ocurrió la degradación a los 615 °C del quitosano, mientras que en las nanopartículas metálicas se determinaron temperaturas de degradación entre 532 y 558 °C. Durante esta etapa se generaron varios procesos de pirólisis y oxidación del carbono residual (Ma et al., 2024).

Entre 200 y 400 °C ocurre la mayor pérdida de masa. En esta zona, el quitosano (celeste) muestra una disminución más rápida, mientras que los materiales con TiO₂ (rojo) y ZnO (verde) pierden masa de forma más paulatina. Este comportamiento indica que las nanopartículas actúan como barreras físicas que dificultan la propagación de la degradación térmica. Anaya-Esparza et al. (2022) atribuyeron este efecto a la formación de interacciones químicas entre los grupos funcionales –OH y –NH₂ del quitosano y los óxidos metálicos, lo que genera una estructura más compacta y termorresistente. Al igual que en la segunda etapa, el avance de la descomposición del residuo carbonoso podría estar vinculado con la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de TiO₂ y ZnO (He et al., 2023).

Hamisu et al. (2021) en su estudio sobre síntesis de TiO₂ asistida por quitosano, confirmaron mediante TGA/DTA que la formación de la fase anatasa del TiO₂ se completa alrededor de 400-500 °C, lo cual coincide con la mayor estabilidad térmica observada en los nanocompuestos poliméricos que contienen TiO₂ y ZnO. La presencia de quitosano durante la síntesis influye directamente en la descomposición térmica del material y en la cristalinidad del óxido resultante debido al contenido de ácidos de Lewis vacantes de oxígeno y defectos superficiales que provocan la ruptura de las cadenas poliméricas durante el tratamiento térmico. En los nanocompuestos poliméricos, esta degradación empezó entre 192 °C (ZnO) y 201 °C (TiO₂), y la degradación máxima que alcanzó fue de 219 y 268 °C para ZnO y de 231 y 271 °C para TiO₂, observándose que la adición de las nanopartículas de TiO₂ y ZnO empeoró la estabilidad térmica del quitosano (Wang et al., 2019; Zeng et al., 2025).

Aunque en este análisis no se obtuvieron valores del Quitosano + MgO, existen resultados reportados por Zhao et al. (2020) quienes mediante TGA demostraron que la masa residual de muestras tratadas fue significativamente mayor que la de las no tratadas. Estos autores atribuyeron este fenómeno a la formación de una capa protectora de carbón durante la combustión, la cual protege al material de la degradación térmica adicional. También mencionan que nanocompuestos poliméricos de MgO-quitosano han reportado una pérdida de masa total del 67% para el material compuesto, confirmando que la presencia de MgO contribuye a la formación de residuos carbonosos estables a altas temperaturas.

Evaluación de la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos mediante ensayos in vivo de maduración en el banano.

Evaluación del pH

En la Tabla 4 se presentan los análisis de la varianza (ANOVA) del pH realizados en el banano.

Tabla 4

Varianza del parámetro pH en función del tiempo de almacenamiento.

Película	Días							Valor-P
	0	1	3	6	10	15	21	Días
Quitosano	$5,3 \pm 0,1^{aAB}$	$5,8 \pm 0,1^{aB}$	$6,8 \pm 0,1^{bC}$	$5,7 \pm 0,7^{aB}$	$5,0 \pm 0,2^{abA}$	$5,1 \pm 0,1^{abA}$	$5,7 \pm 0,2^{aB}$	0,00
Quitosano + TiO ₂	$5,3 \pm 0,1^{aA}$	$5,7 \pm 0,2^{aA}$	$6,3 \pm 0,3^{aB}$	$5,1 \pm 0,1^{aA}$	$5,3 \pm 0,3^{bA}$	$5,6 \pm 0,2^{cA}$	$5,2 \pm 0,7^{aA}$	
Quitosano + ZnO	$5,3 \pm 0,1^{aC}$	$5,6 \pm 0,1^{aCD}$	$6,9 \pm 0,1^{bE}$	$5,9 \pm 0,5^{aD}$	$4,9 \pm 0,2^{aA}$	$4,9 \pm 0,1^{aAB}$	$5,3 \pm 0,1^{aBC}$	
Quitosano + MgO	$5,3 \pm 0,1^{aB}$	$5,8 \pm 0,1^{aC}$	$6,8 \pm 0,2^{bD}$	$5,1 \pm 0,4^{aAB}$	$4,9 \pm 0,1^{aA}$	$5,3 \pm 0,1^{aB}$	$5,8 \pm 0,1^{aC}$	
Valor-P Muestra	0,28							

Nota. Las letras minúsculas (a - b) muestran las diferencias significativas entre las muestras y las letras mayúsculas (A - E) muestran las diferencias significativas entre los valores obtenidos en los diferentes días según el ANOVA y la prueba de Tukey.

En la Tabla 4 se observó que el tipo de muestra no presentó un efecto significativo ($p = 0,28$), lo que indica que el pH se mantiene relativamente similar independientemente del material utilizado. Por otra parte, el tiempo de almacenamiento sí mostró un efecto altamente significativo ($p = 0,00$), evidenciando que el pH cambia de manera importante a lo largo del tiempo. Esto sugiere que las variaciones en el pH están asociadas con el aumento de hidrógeno en la pulpa del banano debido a una concentración mayor de metabolitos ácidos formados en los procesos naturales de maduración de la fruta.

Estos hallazgos son concordantes con lo reportado por Salvador-Figueroa et al. (2017) quienes evaluaron recubrimientos de quitosano enriquecidos con aceites esenciales donde no encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en parámetros como el contenido de sólidos solubles totales y la acidez titulable (variable relacionada directamente con el pH) entre los frutos recubiertos y los controles sin recubrimiento, atribuyendo las variaciones observadas a la variabilidad natural entre frutos y al proceso normal de maduración.

Así mismo, Li et al. (2021) evaluaron películas de quitosano con nanomateriales de SiO_2 y TiO_2 en arándanos frescos y reportaron que el recubrimiento con nano- TiO_2 tenía los valores más adecuados de acidez titulable (0,45% de ácido cítrico), mientras que el recubrimiento con nano- SiO_2 presentó cambios más pequeños en acidez (2,61), comprobando que las nanopartículas pueden modificar levemente la evolución de la acidez sin alterar drásticamente el pH respecto al control.

Esta interacción también ha sido documentada por Hassan & Sani, (2025) donde ellos desarrollaron películas de quitosano con nanopartículas de ferrita de níquel (NiFe_2O_4) para la conservación de manzana, donde las muestras almacenadas bajo la película con 2% de NPs presentaron un pH de 3,8,6 en comparación con el pH del control de 3,97 después de 9 días de almacenamiento. Aunque la diferencia numérica fue pequeña, los autores observaron que el comportamiento del pH a lo largo del tiempo dependía de la interacción entre el tipo de recubrimiento y el tiempo de almacenamiento.

Algunos estudios han demostrado que recubrimientos de quitosano con nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) también presentan parámetros de calidad como el pH dentro de rangos aceptables, mientras mejoran significativamente la actividad antioxidante (82.89% vs 73.89% del control) y disminuyen las tasas de infección (13.68% vs 19.65%), lo que sugiere que el efecto benéfico de los nanocompuestos poliméricos opera principalmente a través de mecanismos antimicrobianos y antioxidantes más que por alteraciones directas del pH (Sani et al., 2024).

La interacción significativa que se encontró entre el tipo de muestra (quitosano, TiO_2 , ZnO y MgO) y el tiempo indica que, aunque en general los recubrimientos no presentan diferencias marcadas entre sí, su comportamiento frente al cambio de pH no es exactamente igual en todos los días de evaluación, ya que cada tratamiento puede influir de manera distinta en la evolución del pH a lo largo del almacenamiento.

Evaluación de los grados Brix

En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos del parámetro de grados Brix.

Tabla 5

Varianza del parámetro grados Brix en función del tiempo de almacenamiento.

Película	Días							Valor-P
	0	1	3	6	10	15	21	Días
Quitosano	1,0 ± 0,0 ^{aA}	0,8 ± 0,3 ^{aA}	1,2 ± 0,3 ^{aA}	7,7 ± 2,1 ^{bB}	10,7 ± 1,5 ^{bC}	12,3 ± 1,5 ^{abC}	20,3 ± 1,5 ^{bcD}	0,00
Quitosano + TiO ₂	5,3 ± 0,1 ^{aA}	1,0 ± 0,5 ^{aA}	1,5 ± 0,5 ^{aA}	7,7 ± 1,5 ^{bB}	11,3 ± 2,1 ^{bC}	16,3 ± 1,5 ^{cD}	19,3 ± 1,5 ^{bE}	
Quitosano + ZnO	5,3 ± 0,1 ^{aA}	0,8 ± 0,3 ^{aA}	1,2 ± 0,3 ^{aA}	4,4 ± 0,7 ^{aB}	6,7 ± 2,1 ^{aC}	10 ± 1,0 ^{aD}	13,7 ± 1,5 ^{aE}	
Quitosano + MgO	5,3 ± 0,1 ^{aA}	1,2 ± 0,8 ^{aA}	1,2 ± 0,3 ^{aA}	6,2 ± 1,1 ^{abB}	7,5 ± 0,5 ^{aB}	13,7 ± 3,1 ^{bcC}	22 ± 1 ^{cD}	
Valor-P muestra	0,36							

Nota. Las letras minúsculas (a - c) muestran las diferencias significativas entre las muestras y las letras mayúsculas (A - E) muestran las diferencias significativas entre los valores obtenidos en los diferentes días según el ANOVA y la prueba de Tukey.

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar los grados Brix en los recubrimientos a base de quitosano y su modificación con nanopartículas de TiO_2 , ZnO y MgO , se encontró que en la muestra ($p = 0,36$) no existen diferencias, mientras que el tiempo de almacenamiento (días) tiene un efecto significativo ($p = 0,00$) sobre esta variable. La interacción entre ambos factores también resultó significativa ($p = 0,00$), lo que indica que el comportamiento de los grados Brix a lo largo del tiempo depende del tipo de recubrimiento aplicado.

En relación con el tiempo, se observó un incremento progresivo de los valores de grados Brix conforme avanzan los días de almacenamiento. Según Nazrul Bin Ali & Hamid (2021) este comportamiento es característico del proceso de maduración de frutas climatéricas, como el banano o el mango, donde los azúcares solubles aumentan debido a la degradación de almidones y otros polisacáridos de reserva, también mencionaron que en frutos de banano sin recubrimiento almacenados a temperatura ambiente, el contenido de sólidos solubles totales se incrementa rápidamente como consecuencia de la hidrólisis del almidón, mientras que los frutos recubiertos con quitosano muestran un aumento más lento de los grados Brix.

Este hallazgo es consistente con lo reportado por Alshallash et al. (2022) quienes al evaluar recubrimientos de nano-quitosano en naranja Valencia almacenada a temperatura ambiente durante 75 días, observaron que el porcentaje de sólidos solubles totales (TSS) y la relación TSS/acidez aumentaron progresivamente durante el almacenamiento, pero los frutos recubiertos con nano-quitosano presentaron una menor tasa de incremento en comparación con el control, atribuyendo este efecto a la ralentización de la respiración y el metabolismo del fruto.

De manera similar, Sembiring et al. (2024) demostraron que la aplicación de nanopartículas de quitosano en naranja Siam afectó significativamente los sólidos solubles totales, con una concentración óptima de 0,4% que alcanzó un valor promedio de 11,7 °Brix.

La interacción significativa entre el tipo de recubrimiento y el tiempo confirma que no todos los tratamientos evolucionan de la misma forma. Este resultado es respaldado por Shashi et al. (2024) quienes evaluaron diferentes formulaciones de nano-quitosano con nano-micronutrientes (ZnO y FeO) en mandarina Kinnow y encontraron que la combinación de nano-quitosano con bio-cápsulas y micronutrientes logró valores de sólidos solubles totales de 11,62%, demostrando que el tipo de nanopartícula utilizada influye en la acumulación de azúcares durante la maduración.

Evaluación del color

En la Tabla 6 se presenta los valores de los parámetros de color determinados en la cáscara de los bananos, y la Figura 4 muestra las fotografías de las muestras.

Tabla 6

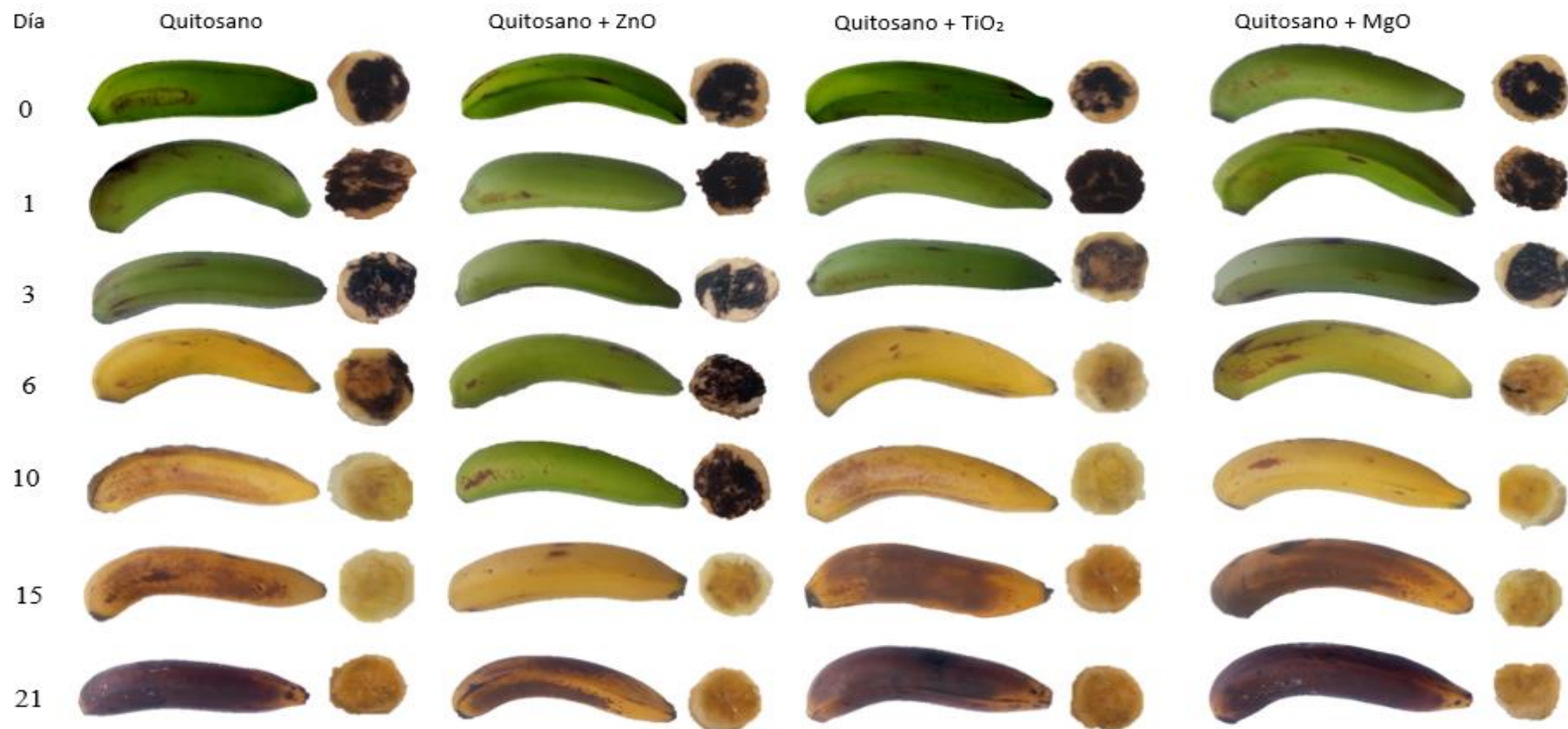
Análisis de varianza del parámetro color del plátano en función del tiempo de almacenamiento.

		Días						
Película		0	1	3	6	10	15	21
L*	Quitosano	53,3 ± 3,7 ^{aC}	43,0 ± 1,6 ^{aB}	35,4 ± 0,9 ^{aA}	58,6 ± 1,9 ^{aCD}	64,5 ± 1,9 ^{aD}	72,1 ± 1,9 ^{bE}	29,8 ± 0,3 ^{abA}
	Quitosano + TiO ₂	53,3 ± 3,7 ^{aCD}	58,0 ± 1,6 ^{bDE}	41,7 ± 4,8 ^{aBC}	65,7 ± 1,1 ^{bE}	62,7 ± 2,3 ^{aDE}	35,4 ± 6,2 ^{aAB}	27,1 ± 2,5 ^{aA}
	Quitosano + ZnO	53,3 ± 3,7 ^{aC}	53,2 ± 3,0 ^{bC}	42,4 ± 1,8 ^{aB}	55,3 ± 1,4 ^{aC}	59,1 ± 1,9 ^{aC}	69,9 ± 1,3 ^{bD}	31,1 ± 1,2 ^{aA}
	Quitosano + MgO	53,3 ± 3,7 ^{aC}	55,1 ± 0,8 ^{bcC}	40,1 ± 1,4 ^{bB}	55,7 ± 2,9 ^{aC}	73,4 ± 1,6 ^{cD}	44,1 ± 7,5 ^{aB}	28,6 ± 1,8 ^{abA}
a*	Quitosano	-12,7 ± 0,5 ^{aA}	-8,8 ± 2,9 ^{aA}	-8,7 ± 0,6 ^{aA}	-11,7 ± 0,6 ^{aA}	6,7 ± 1,7 ^{bB}	5,4 ± 1,3 ^{aB}	7,4 ± 0,2 ^{aB}
	Quitosano + TiO ₂	-12,7 ± 0,5 ^{aA}	-11,2 ± 1,5 ^{aA}	-7,0 ± 2,0 ^{aA}	5,3 ± 2,1 ^{bB}	7,8 ± 0,1 ^{bB}	10,0 ± 3,0 ^{bB}	7,0 ± 1,4 ^{aB}
	Quitosano + ZnO	-12,7 ± 0,5 ^{aA}	-10,8 ± 1,2 ^{aA}	-8,5 ± 0,3 ^{aA}	-12,2 ± 1,5 ^{aA}	-12,2 ± 0,2 ^{aA}	4,1 ± 1,4 ^{aB}	8,1 ± 3,3 ^{aB}
	Quitosano + MgO	-12,7 ± 0,5 ^{aA}	-13,3 ± 2,4 ^{aA}	-8,4 ± 0,1 ^{aB}	-9,5 ± 3,7 ^{aB}	2,5 ± 2,3 ^{bC}	12,4 ± 1,1 ^{bE}	7,6 ± 1,6 ^{aD}
b*	Quitosano	32,3 ± 2,3 ^{aC}	24,1 ± 5,1 ^{aB}	22,7 ± 1,8 ^{aB}	34,4 ± 1,9 ^{aC}	38,4 ± 0,7 ^{aCD}	44,8 ± 1,0 ^{bD}	6,1 ± 0,5 ^{aA}
	Quitosano + TiO ₂	32,3 ± 2,3 ^{aBC}	33,4 ± 0,6 ^{bBC}	25,1 ± 2,9 ^{aB}	40,1 ± 4,2 ^{aC}	36,2 ± 1,7 ^{aC}	11,5 ± 6,9 ^{aA}	5,5 ± 1,1 ^{aA}
	Quitosano + ZnO	32,3 ± 2,3 ^{aBC}	29,0 ± 0,9 ^{abBC}	23,2 ± 0,8 ^{aB}	33,7 ± 3,0 ^{aC}	35,9 ± 2,6 ^{aC}	43,9 ± 0,6 ^{bD}	7,8 ± 3,2 ^{aA}
	Quitosano + MgO	32,3 ± 2,3 ^{aC}	33,3 ± 3,4 ^{bC}	23,5 ± 1,1 ^{aB}	34,7 ± 2,3 ^{aC}	43,1 ± 1,8 ^{dD}	20,1 ± 6,1 ^{aB}	6,1 ± 2,4 ^{aA}
ΔE	Quitosano	-	14,0 ± 5,0 ^{bB}	20,7 ± 0,4 ^{aBC}	5,8 ± 2,3 ^{aA}	23,3 ± 0,7 ^{bcD}	28,9 ± 2,5 ^{aD}	40,6 ± 0,6 ^{aE}
	Quitosano + TiO ₂	-	5,2 ± 1,6 ^{aA}	15,1 ± 4,3 ^{aB}	23,5 ± 0,3 ^{bB}	22,9 ± 1,4 ^{bB}	36,1 ± 5,1 ^{aC}	42,5 ± 1,6 ^{aC}
	Quitosano + ZnO	-	4,7 ± 0,5 ^{aAB}	14,9 ± 0,7 ^{aC}	3,7 ± 1,5 ^{aA}	7,2 ± 0,2 ^{aB}	26,3 ± 1,2 ^{aD}	39,2 ± 1,0 ^{aE}
	Quitosano + MgO	-	3,6 ± 1,0 ^{aA}	16,5 ± 0,6 ^{aB}	4,7 ± 5,2 ^{aA}	27,4 ± 2,8 ^{cC}	29,9 ± 3,8 ^{abC}	41,4 ± 1,7 ^{abD}

Nota. Las letras minúsculas (a - c) muestran diferencias significativas entre los valores de cada parámetro de color obtenidos para diferentes muestras almacenadas al mismo tiempo y las letras mayúsculas (A - E) muestran diferencias significativas entre los valores de cada parámetro de color obtenidos para una misma muestra almacenada en diferentes momentos según el análisis ANOVA y la prueba de Tukey.

Figura 4

Fotografías de la evolución del color de la cáscara de banano y medición del índice de almidón.



En la Tabla 6 se observa el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar los cambios de color en la cáscara del banano tratado con los nanocompósitos poliméricos de TiO_2 , ZnO y MgO . Se determinó que los factores tiempo de almacenamiento (día), tipo de muestra y parámetro de color (L^* , a^* , b^*) tienen un efecto significativo sobre esta variable ($p < 0,05$). Esto indica que el color del fruto cambia con el paso del tiempo, con el tipo de recubrimiento aplicado y el componente de color evaluado.

En cuanto al tiempo de almacenamiento, se puede observar en la Figura 4 que existen cambios progresivos en el color de la cáscara, evidenciando que el color evoluciona conforme avanzan los días, dando como resultado que el Quitosano + ZnO conservó de mejor manera el color de la cáscara en comparación con el Quitosano + TiO_2 . Este comportamiento está asociado a procesos fisiológicos propios de la maduración, como la degradación de clorofila y la aparición de pigmentos amarillos, característicos del banano en estado maduro (Odetayo et al., 2022).

Esto se puede atribuir a que tienen mejores propiedades de barrera y una mejor eficiencia en la captura y degradación fotocatalítica del etileno, permitiendo retrasar la maduración del banano. Estos resultados coinciden con autores que han desarrollado películas reforzadas de quitosano con nanopartículas de ZnO , TiO_2 y Bi_2WO_6 para la conservación de bananos (Ma et al., 2024)

El factor color (L^* , a^* , b^*) mostro un efecto significativo, lo cual es esperado, ya que cada uno de estos parámetros describe diferentes aspectos del color del plátano, la luminosidad (L^*), la transición de verde a rojo (a^*) y la variación de azul a amarillo (b^*). En conjunto, estos cambios reflejan el proceso natural de maduración del fruto.

En los estudios de Roidoung et al. (2025) el factor color (L^* , a^* , b^*) presentó un efecto altamente importante, lo cual es esperado, ya que cada uno de estos parámetros describe diferentes aspectos del color del banano. Estos cambios reflejan el proceso natural de maduración del fruto. Se midieron parámetros y se encontró que los frutos sin recubrimiento desarrollaron más pronto un color amarillo, con un aumento del valor b^* , mientras que los frutos recubiertos mostraron un menor incremento. Los autores mencionan que este comportamiento se atribuye a que los recubrimientos actúan como una barrera que retarda la degradación de la clorofila y la síntesis de pigmentos amarillos, procesos clave en la maduración de frutos climatéricos como el plátano.

De manera similar, Kaeokanphai et al. (2024) demostraron que la aplicación de un recubrimiento de quitosano con nanofibras de quitina retrasó significativamente el cambio de color de la cáscara de banano (de verde a amarillo) hasta 22 días, en comparación con 9 días para los bananos sin recubrimiento, atribuyendo este efecto a la reducción de la tasa de respiración del fruto. Este comportamiento se atribuye a que los recubrimientos actúan como una barrera que retarda la degradación de la clorofila y la síntesis de pigmentos amarillos, procesos clave en la maduración de frutos climatéricos como el plátano (Roidoung et al., 2025).

Nguyen et al. (2025) desarrollaron un recubrimiento de quitosano con nanopartículas de óxido de cerio (hCeO_2) y encontraron que el quitosano-1,5%- hCeO_2 manifestó una eficiencia superior en retrasar la maduración del banano, extendiendo la fecha de vencimiento de los bananos frescos sin deteriorar las características fisicoquímicas del fruto, y observaron que las películas enriquecidas con hCeO_2 presentaron un aumento en el valor b (amarillo) dosis-dependiente.

Arshad & Haghshenas (2025) demostraron que la interacción entre el recubrimiento de quitosano (0,5%) y melatonina (150 mg L^{-1}) retrasó la disminución de clorofila y el aumento de carotenoides, así como el cambio de color de la fruta, logrando aumentar exitosamente la vida útil de los bananos donde también reportaron que en el noveno día de almacenamiento bajo tratamiento con quitosano junto con melatonina, el contenido total de clorofila fue solo 3,89% más bajo que en condiciones control, evidenciando que los recubrimientos de quitosano funcionalizados pueden modular eficazmente los procesos de degradación pigmentaria asociados a la maduración.

Respecto a la evolución del contenido de almidón, como se observa en la Figura 4, se mostró un aumento de grados Brix asociado a la conversión del almidón a fructosa, glucosa y sacarosa por acción del etileno. En el nanocompósito de ZnO se observó que no existe una pronta conversión del almidón, dando como resultado una lenta maduración en el banano.

La pérdida de firmeza en los frutos está ligada a la hidrólisis de macromoléculas como lo menciona Hernández Maya (2023), quien señala que el ablandamiento del banano que se da durante la postcosecha es debido a la degradación enzimática del almidón hacia azúcares más simples. Este comportamiento coincide con nuestra investigación donde se observan cambios notorios de azúcares en el banano.

Odetayo et al. (2022) mencionaron que al evaluar los efectos de los recubrimientos con quitosano aplicado al banano existió la eficiencia de las barreras en las películas, disminuyendo oxígeno (O_2) y aumentando el dióxido de carbono (CO_2), alterando drásticamente la tasa respiratoria de la fruta y regulando la acción de las enzimas hidrolíticas responsables de la degradación del almidón. Este hecho pudo también ocurrir en esta investigación ya que la Figura 4 muestra los cambios mencionados por el autor.

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron nanocompuestos poliméricos a base de quitosano y nanopartículas de ZnO, TiO₂ y MgO mediante la técnica de *casting*, logrando una incorporación exitosa de las nanopartículas metálicas de manera homogénea en la matriz polimérica.
- La incorporación de las nanopartículas metálicas modificó significativamente las propiedades ópticas de los nanocompuestos poliméricos, incrementando la opacidad especialmente en el TiO₂. Además, se mejoraron la estabilidad térmica de los nanocompuestos poliméricos y las propiedades físicas del polímero debido a la incorporación de las nanopartículas metálicas.
- La evaluación de la funcionalidad de los nanocompuestos poliméricos mediante ensayos *in vivo* permitió comprobar que las películas retrasaron el proceso de maduración del banano durante su almacenamiento. El nanocompuesto de Quitosano + ZnO retrasó la maduración de las frutas durante más tiempo en comparación con la película de quitosano.

RECOMENDACIONES

- Evaluar la incorporación de otros agentes naturales o posibles combinaciones de estos para mejorar la capacidad de retrasar la maduración en las frutas e incorporarlos a las películas.
- Garantizar el uso de superficies niveladas durante la etapa del secado por la técnica de *casting*, para asegurar un espesor uniforme en todas las películas.
- Explorar la incorporación de otros agentes activos naturales en combinación con las nanopartículas con el fin de buscar generar efectos que mejoren la capacidad antioxidante y antimicrobiana de los nanocompuestos poliméricos.
- Ampliar el estudio de otras frutas de interés comercial mediante evaluaciones in vivo para verificar la reacción de estas nanopartículas metálicas en diferentes fisiologías de postcosecha y almacenamiento.
- Evaluar los efectos de los diferentes tipos de irradiación sobre los nanocompuestos poliméricos y nanopartículas metálicas para determinar su activación antimicrobiana y propiedades físicas, ópticas, estructurales y térmicas.
- Para futuras investigaciones se recomienda ampliar el análisis termogravimétrico (TGA) de la película de Quitosano + MgO con el fin de completar la caracterización del material.

BIBLIOGRAFÍA

- Ajay V. Chinchkar, Anurag Singh, Meenatai G. Kamble, Pramod K. Prabhakar, Murlidhar Meghwal, Arun Sharma, Chapter 14 - Nanotechnology applications for quality determination of RTE and packaged food, Editor(s): Arun Sharma, P.S. Vijayakumar, Er. Pramod K Prabhakar, Ritesh Kumar, Nanotechnology Applications for Food Safety and Quality Monitoring, Academic Press, 2023, Pages 265-288, <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780323857918000021>
- Alhalili, Z. (2023). Metal Oxides Nanoparticles: General Structural Description, Chemical, Physical, and Biological Synthesis Methods, Role in Pesticides and Heavy Metal Removal through Wastewater Treatment. In *Molecules* (Vol. 28, Number 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules28073086>
- Alonso-Salinas, R., López-Miranda, S., Pérez-López, A. J., & Acosta-Motos, J. R. (2024). Strategies to Delay Ethylene-Mediated Ripening in Climacteric Fruits: Implications for Shelf Life Extension and Postharvest Quality. In *Horticulturae* (Vol. 10, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080840>
- Alshallash, K. S., Sharaf, M., Abdel-Aziz, H. F., Arif, M., Hamdy, A. E., Khalifa, S. M., Hassan, M. F., Abou ghazala, M. M., Bondok, A., Ibrahim, M. T. S., Alharbi, K., & Elkelish, A. (2022). Postharvest physiology and biochemistry of Valencia orange after coatings with chitosan nanoparticles as edible for green mold protection under room storage conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 01–15. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1034535/TEXT>
- Anaya-Esparza, L. M., Vargas-Torres, A., Palma-Rodríguez, H. M., Castro-Mendoza, M. P., Yahia, E. M., Pérez-Larios, A., & Montalvo-González, E. (2022). Effect of Mixed Oxide-Based TiO₂ on the Physicochemical Properties of Chitosan Films. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(3), 422–436. <https://doi.org/10.3311/PPch.18953>
- Arias Envases Flexibles. (11 de septiembre de 2025). ¿Qué son los envases activos? Funciones, beneficios y aplicaciones en alimentos. <https://www.plasticosarias.com/que-son-envases-activos/>
- Arshad, M., & Haghshenas, M. (2025). Melatonin and Chitosan Coating Effects on Banana Postharvest Life and Physiological Traits. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 12(1), 31–42. <https://doi.org/10.22059/IJHST.2024.364005.687>
- Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y., & Riera, M. A. (2020). Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios. *Tecnología y Negocios*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v7n1a1>

- Azevedo, AG, Barros, C., Miranda, S., Machado, AV, Castro, O., Silva, B., Saraiva, M., Silva, AS, Pastrana, L., Carneiro, OS, & Cerqueira, MA (2022). Películas flexibles activas para envasado de alimentos: una revisión. *Polímeros*, 14 (12), 2442. <https://doi.org/10.3390/polym14122442>
- Bastarrachea, LJ, Wong, DE, Roman, MJ, Lin, Z., & Goddard, JM (2016). Recubrimientos para envases activos. *Coatings*, 5 (4), 771-791. <https://doi.org/10.3390/coatings5040771>
- Bello-Lara, J. E., Balois-Morales, R., Juárez-López, P., Alia-Tejacal, I., Peña-Valdivia, C. B., Jiménez-Zurita, J. O., Sumaya-Martínez, M. T., & Jiménez-Ruíz, E. I. (2016). Coatings based on starch and pectin from ‘Pear’ banana (*Musa ABB*), and chitosan applied to postharvest ‘Ataulfo’ mango fruit. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 22(3), 95–104. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.09.037>
- Bergamonti, L., Graiff, C., Bergonzi, C., Potenza, M., Reverberi, C., Ossiprandi, M. C., Lottici, P. P., Bettini, R., & Elviri, L. (2022). Photodegradation of Pharmaceutical Pollutants: New Photocatalytic Systems Based on 3D Printed Scaffold-Supported Ag/TiO₂ Nanocomposite. *Catalysts*, 12(6), 580. <https://doi.org/10.3390/catal12060580>
- Bermeo Cabrera Juan Jerson. (2022). *Métodos de conservación de frutas climatéricas durante el transporte hasta las plantas procesadoras de alimentos*. <https://repositorio.utmachala.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1380ce13-7c09-42b8-932f-e148706d756d/content>
- Bioconservación. (2023). *el etileno y el banano o plátano*. <https://www.bioconservacion.com/blog/etileno-y-el-banano-o-platano>
- Chauhan, R., Kinney, K., Akalkotkar, A., Nunn, B. M., Keynton, R. S., Soucy, P. A., & O’Toole, M. G. (2020). Radiation-induced curcumin release from curcumin-chitosan polymer films. *RSC Advances*, 10(27), 16110–16117. <https://doi.org/10.1039/d0ra00144a>
- Chen, Z., Liu, R., Wei, Y., Li, B., Luo, W., Zhu, X., & Huang, C. (2024). A novel strategy to transform mango peel waste into useful product– Preparing antibacterial film containing tea polyphenols for chicken breast preservation. *LWT*, 197, 115933. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.115933>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643824002123>
- Cruz Francisco, G. J., Solís-Castro, R. L., Rimaycuna, J., Luis Solís, J., Marcela Gómez, M., & Alfaro, R. (2023). Actividad de recubrimientos de quitosano, nanopartículas de quitosano y ZnO contra hongos aislados e identificados molecularmente de frutas con potencial de exportación en la zona norte del Perú. *Manglar*, 20(4), 397–403. <https://doi.org/10.57188/manglar.2023.046>

- Dai, L., Wang, X., Zhang, J., & Li, C. (2025). Aplicación de quitosano y sus derivados en la conservación postcosecha mediante recubrimiento de frutas. *Foods*, 14 (8), 1318. <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/8/1318>
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. In *Foods* (Vol. 10, Number 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods10020249>
- El-Araby, A., Janati, W., Ullah, R., Ercisli, S., & Errachidi, F. (2023). Chitosan, chitosan derivatives, and chitosan-based nanocomposites: eco-friendly materials for advanced applications (a review). *Frontiers in Chemistry*, 11, 1327426. 638 <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1327426>
- Escobar-Alarcón, L., & Solís-Casados, D. A. (2020). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 1e–23e. https://www.researchgate.net/publication/346225853_Desarrollo_de_fotocatalizadores_basados_en_TiO2_en_forma_de_pelcula_delgada_para_la_degradacion_de_moleculas_organicas_en_solucion_acuosa
- FAO. (2023). *Salir del círculo vicioso del plástico en la agricultura*. <https://www.fao.org/newsroom/story/Breaking-the-plastic-cycle-in-agriculture/es>
- Flores Hernández Niels. (2021). *Obtención de películas de ZnO con nanopartículas de plata y evaluación de sus propiedades fotoinducidas*. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/4ec8095c-c269-4477-adc7-4a4e3bd7a588/content>
- Garcia, C. V., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2018). Metal oxide-based nanocomposites in food packaging: Applications, migration, and regulations. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 21–31. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2018.09.021>
- Gómez Ayala, S. L., & Yory Sanabria, F. L. (2018). Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 69–74. <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/3008/4817>
- González Bautista Raquel. (2017). *Envases activos para productos alimentarios*. https://oa.upm.es/45485/1/TFG_RAQUEL_GONZALEZ_BAUTISTA.pdf
- Guamán López Grace Yajaira. (2024). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS A PARTIR DE LA MEZCLA DE POLÍMEROS COMESTIBLES*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/921fdb20-63c9-4943-afb6-836ddc28cdda>

- Hamisu, A., Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2021). Highly hydrophilic TiO₂ nanotubes network by alkaline hydrothermal method for photocatalysis degradation of methyl orange. *Applied Science and Engineering Progress*, 14(3), 313–327. <https://doi.org/10.3390/NANO9040526>
- Hassan, D., & Sani, A. (2025). Chitosan films developed using all-natural resource for fruit preservation and the impact of lemon peel extract mediated nickel ferrite nanoparticles on films' physical and barrier properties. *Food Chemistry*, 482. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.144068>
- He, Y., Rehman, A. U., Xu, M., Not, C. A., Ng, A. M. C., & Djurišić, A. B. (2023). 35 Photocatalytic degradation of different types of microplastics by TiO₂/ZnO tetrapod photocatalysts. *Heliyon*, 9(11), e22562. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22562>
- Hernández Maya, C. (2023). Evolución bioquímica y fisiológica durante la maduración del banano (*Musa x paradisiaca* L.). *Vitalyscience*, 1(2), 6-17. <https://vitalyscience.com/wp-content/uploads/2025/03/1-EVOLUCIONBIOQUIMICAYFISIOLOGICADURANTELAMADURACIONDELBANANO.pdf>
- Herrera-Rivera, M. del R., Torres-Arellanes, S. P., Cortés-Martínez, C. I., Navarro-Ibarra, D. C., Hernández-Sánchez, L., Solis-Pomar, F., Pérez-Tijerina, E., & Román-Doval, R. (2024). Nanotechnology in food packaging materials: role and application of nanoparticles. In *RSC Advances* (Vol. 14, Number 30, pp. 21832–21858). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4ra03711a>
- Kaeokanphai, P., Tanpichai, S., & Boonmahitthisud, A. (2024). Chitosan-Based Coating Incorporated with Chitin Nanofibers for Extension of the Shelf Life of Fruits. *Solid State Phenomena*, 356, 101–106. <https://doi.org/10.4028/P-90XWYY>
- Khan, A., Riahi, Z., Hong, S. J., Kim, J. T., Rhim, J. W., & Min, S. C. (2025). Cellulose nanofiber/gelatin-based multifunctional ethylene scavenging active packaging films integrated with TiO₂-functionalized Bi(III) metal-organic frameworks. *Food Packaging and Shelf Life*, 51(22), 101596. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101596>
- Koosha, M., & Hamed, S. (2019). Intelligent Chitosan/PVA nanocomposite films containing black carrot anthocyanin and bentonite nanoclays with improved mechanical, thermal and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*, 127, 338–347. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2018.11.028>
- Kumar N, Pratibha, Trajkovska Petkoska A, Khojah E, Sami R, Al-Mushhin AAM. Chitosan Edible Films Enhanced with Pomegranate Peel Extract: Study on Physical, Biological, Thermal, and Barrier Properties. *Materials* (Basel). 2021 Jun 15;14(12):3305. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8232757/>

- Kumar, S., Mukherjee, A., & Dutta, J. (2020). Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 97, pp. 196–209). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.002>
- Ledesma-Ugshiña, A. A., Dalgo-Flores, V. M., Flores-Fiallos, L. M., & Chango-Lescano, G. C. (2021). Bioplásticos de almidón de maíz y quinua para uso como envolturas alimenticias biodegradables. *Dominio De Las Ciencias*, 7(4), 39–56. <https://www.dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/2080>
- Li, Y., Rokayya, S., Jia, F., Nie, X., Xu, J., Elhakem, A., Almatrafi, M., Benajiba, N., & Helal, M. (2021). Shelf-life, quality, safety evaluations of blueberry fruits coated with chitosan nano-material films. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80056-z>
- Liu, F., Liu, Y., Guo, Y., Liu, J., Dong, J., Wang, T., Hao, D., & Zhang, Y. (2024). FTIR determination of the degree of molar substitution for hydroxypropyl chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 339(5), 122229. 707 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122229>
- Ma, W., Zhang, Y., Chen, L., Xie, X., Yuan, S., Qiu, Z., Zhu, G., & Guo, J. (2024). A novel ZnO-TiO₂-Bi₂WO₆/Carboxymethyl chitosan composite with high antimicrobial activity and visible-light catalytic degradation of ethylene towards banana preservation in hot and humid environments. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281(4), 136559. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136559>
- Madera-Santana, T. J., Toledo-López, V. M., Martinez-Robison, K., Rejón-Moo, V., & Fortiz Hernández, J. (2022). Evaluación de películas comestibles de quitosano, agar y tomillo para mantener la calidad de frutos de aguacate ‘Hass’ durante su almacenamiento. *Biotecnia*, 25(1), 116–125. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1728>
- Maldonado, A., Aguilar, T., Hauser, C., Wehnert, G., Söthje, D., Schlachter, H., Torres, A., Bruna, J., Valenzuela, X., & Rodríguez-Mercado, F. (2024). Ethylene Scavenging Films Based on Ecofriendly Plastic Materials and Nano-TiO₂: Preparation, Characterization, and In Vivo Evaluation. *Polymers*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/polym16060853>
- Mancillas Álvarez, I. L., Chávez Gutiérrez, M., López Gómez, O. J., & Santos López, G. (2023). Formación de películas de quitosano y su viabilidad económica como empaque para alimentos. *REVISTA IPSUMTEC*, 6(6), 9–16. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i6.47>
- Martínez-González, M. del C., Bautista-Baños, S., Correa-Pacheco, Z. N., Corona-Rangel, M. L., Ventura-Aguilar, R. I., Del Río-García, J. C., & Ramos-García, M. de L. (2020). Effect of nanostructured chitosan/propolis coatings on the quality and antioxidant capacity of strawberries during storage. *Coatings*, 10(2). <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v8nspe19/2007-0934-remexca-8-spe19-4075.pdf>

- Martínez-González, M., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Alberto Cortes-Cruz, M., Apatzingan Palomino-Hermosillo, Y., & Guadalupe López-Gúzman, G. (2017). *Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos** *Postharvest fruits: maturation and biochemical changes*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017001104075
- Mascarenhas, N. P., Goveas, J. J., Gonsalves, R. A., Shetty, T. C. S., & Crasta, V. (2018). Facile Synthesis and Characterisation of Nanocomposite Doped Chitosan—Polystyrene Polymer Blends. In *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering: Part F45* (pp. 265–273). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76276-0_26
- Meza Rodríguez, C. E. (2024). *Evaluación de la actividad antibacteriana de nanocompósitos de Quitosano-ZnO y Quitosano-TiO2 obtenidos en presencia del extracto acuoso de lirio acuático (Eichhornia crassipes)* [UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO]. <https://ri.ujat.mx/handle/200.500.12107/4433>
- Montes-Ramírez, P., Montaña-Leyva, B., Blancas-Benitez, F. J., Bautista-Rosales, P. U., Ruelas-Hernández, N. D., Martínez-Robinson, K., & González-Estrada, R. R. (2024). Active films and coatings based on commercial chitosan with natural extracts addition from coconut by-products: Physicochemical characterization and antifungal protection on tomato fruits. *Food Control*, 155, 110077. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2023.110077>
- Nazrul Bin Ali, M., & Hamid, A. (2021). The Effect of Chitosan Coating on Post-harvest Quality of Banana in Cold Storage. *ESTEEM Academic Journal*, 17, 85–92. <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/46610/1/46610.pdf>
- Nguyen, T. T., Tran Pham, B. T., Le, D. T., Thi Dao, B. T., & Ha Thuc, C. N. (2025). Role of hydrothermally prepared CeO₂ in developing chitosan-based functional coating for banana preservation. *RSC Advances*, 15(38), 31620–31631. <https://doi.org/10.1039/D5RA05091J>
- Noriega Villavicencio John Alejandro. (2025). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, sede Orellana, Facultad de Recursos Naturales: análisis comparativo entre los parámetros de calidad de frutas amazónicas ecuatorianas y las características edafoclimáticas de su producción. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/2673fee9-e8c8-4e05-8b96-00b2fcb952a9/content>
- Novita, M., Husna, N. E., & Alfiana, D. (2024). The Use of Chitosan and Beeswax Coatings on Berangan Banana (*Musa Paradisiaca*) in Different Maturity Stages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1290(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1290/1/012049>
- Nyeem, T. A., Hoque, M. E., Tina, A. A., Zawad, M. S., & Mazumder, N. K. (2025). Extraction and characterization of chitosan from local fish scales in Bangladesh. *Next Materials*, 9, 101227. <https://doi.org/10.1016/J.NXMATE.2025.101227>

- Odeh, C. P., Ilechukwu, A. E., Okeke, J. C., Chikelu, P. O., & Madumere, A. U. (2025). Estimation of film thickness of a polymer using spectrophotometric data. *Journal of Materials Science: Composites* 2025 6:1, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S42252-025-00077-7>
- Odetayo, T., Sithole, L., Shezi, S., Nomngongo, P., Tesfay, S., & Ngobese, N. Z. (2022). Efecto de los recubrimientos enriquecidos con nanopartículas en la vida útil de los plátanos Cavendish. *Scientia Horticulturae*, 304, Artículo 111312. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423822004332>
- Patiño Vidal, C., Luzi, F., Puglia, D., López-Carballo, G., Rojas, A., Galotto, M. J., & López de Dicastillo, C. (2023). Development of a sustainable and antibacterial food packaging material based in a biopolymeric multilayer system composed by polylactic acid, chitosan, cellulose nanocrystals and ethyl lauroyl arginate. *Food Packaging and Shelf Life*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101050>
- Rilda, Y., Damara, D., Syukri, Putri, Y. E., Refinel, & Agustien, A. (2019). Synthesis of ZnO-TiO₂/Chitosan Nanorods By Using Precipitation Methods and Studying Their Structures and Optics Properties at Different Precursor Molar Compositions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 217(1), 7–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/217/1/012015>
- Rizzo, M., Marcuzzo, M., Zangari, A., Gasparetto, A., & Albarelli, A. (2023). Fruit ripeness classification: A survey. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 7, 44–57. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721723000065>
- Roidoung, S., Wongsudtho, S., Pongsanhan, M., Samsudin, H., & Sogi, D. S. (2025). Effect of nanoclay in chitosan-based coating on ripening retardation of banana fruits. *Discover Food*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00431-5>
- Romero-García Cristhel Valeria, C. M. S.-R. B. E. M.-O. R. F. M.-R. (2025). *Agricultura de precisión en la producción de banano*. <https://doi.org/10.35381/i.p.v7i12.4450>
- Saefumillah, A., Mahadika, B. S., Saepurahman, Kurnia, K. A., Wellia, D. V., & Apriandanu, D. O. B. (2025). Adsorption and photodegradation of various organic dyes in batch and flow systems over TiO₂-chitosan immobilized on glass beads. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100418. <https://doi.org/10.1016/J.RSURFI.2025.100418>
- Salvador-Figueroa, M., Castillo-López, D., Adriano-Anaya, L., Gálvez-López, D., Rosas-Quijano, R., & Vázquez-Ovando, A. (2017). Chitosan composite films: Physicochemical characterization and their use as coating in papaya Maradol stored at room temperature. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29(10), 779–791. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2017.v29.i10.1303>

- Sani, A., Hassan, D., Chanihoon, G. Q., Melo Máximo, D. V., & Sánchez-Rodríguez, E. P. (2024). Green Chemically Synthesized Iron Oxide Nanoparticles–Chitosan Coatings for Enhancing Strawberry Shelf-Life. *Polymers*, 16(23), 3239. <https://doi.org/10.3390/POLYM16233239>
- Sembiring, W. A., Utama, I. M. S., Widia, I. W., & Janurianti, N. M. D. (2024). The Effect of Chitosan Nanoparticles Coating on The Physico-Chemical and Post-Harvest Sensory Characteristics of Siam Orange Fruit (*Citrus nobilis*). *JURNAL BETA (BIOSISTEM DAN TEKNIK PERTANIAN)*, 12(2), 376–383. <https://doi.org/https://doi.org/10.24843/JBETA.2024.v12.i02.p20>
- Shashi, K. E., Saket, M., Vijay, B., Annjoe, V. J., & Samir, E. T. (2024). Yield and quality improvement in Kinnow mandarin using nano formulations. *Indian Journal of Horticulture*, 81(2), 155–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.58993/ijh/2024.81.2.6>
- Shkodenko, L., Kassirov, I., & Koshel, E. (2020). Metal oxide nanoparticles against bacterial biofilms: Perspectives and limitations. In *Microorganisms* (Vol. 8, Number 10, pp. 1–21). MDPI AG. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7601517/>
- Siripatrawan, U., & Kaewklin, P. (2018). Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 84, 125–134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X17320957?via%3Dihub>
- Stuparu-Cretu, M., Braniste, G., Necula, G. A., Stanciu, S., Stoica, D., & Stoica, M. (2023). Metal Oxide Nanoparticles in Food Packaging and Their Influence on Human Health. In *Foods* (Vol. 12, Number 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods12091882>
- Sun, Y., Wu, S., Jiao, Z., Liu, D., Li, X., Shang, T., & Tian, Z. (2025). Preparation and characterization of active packaging film containing chitosan/gelatin/brassica crude extract. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90638-4>
- Uscocovich-Álvarez, Á. A. , B.-F. J. M. , R.-U. L. S. , S.-F. M. C. , R.-B. I. M. , & D.-C. E. G. (2024). Efecto del recubrimiento con quitosano en la reducción microbiológica y conservación del color del banano poscosecha effect of chitosan coating on microbiological reduction and color preservation of postharvest bananas. 7(13), 2024. <https://doi.org/10.46296/ig.v7i13.0163>
- Uscocovich-Álvarez, Á. A. , Z.-N. E. M. , P.-M. M. Y. , D.-C. E. G. , B.-M. A. L. , & T.-P. F. F. (2023). *influence of chitosan coating on the physical quality of banana in postharvest*. <https://doi.org/10.46296/yc.v7i13.0353>
- Venkatesan, R., Vetcher, A. A., Al-Asbahi, B. A., & Kim, S. C. (2024). Chitosan-Based Films Blended with Tannic Acid and Moringa Oleifera for Application in Food Packaging: The

- Preservation of Strawberries (*Fragaria ananassa*). *Polymers*, 16(7).
<https://doi.org/10.3390/polym16070937>
- Vera Rodríguez, J. H. (2022). Revisión bibliográfica: Etileno en poscosecha, tecnologías para su manejo y control. *Ecuadorian Science Journal*, 5(4).
https://www.researchgate.net/publication/359411223_Revision_bibliografica_Etileno_en_poscosecha_tecnologias_para_su_manejo_y_control
- Vinod, A., Sanjay, M. R., Suchart, S. y Jyotishkumar, P. (2020). Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. *Journal of Cleaner Production*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620310258>
- Wang, J., Yuan, Y., Liu, Y., Li, X., & Wu, S. (2024). Application of chitosan in fruit preservation: A review. In *Food Chemistry: X* (Vol. 23). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101589>
- Wang, X. jie, Huang, Z., Wei, M. yu, Lu, T., Nong, D. dan, Zhao, J. xu, Gao, X. yang, & Teng, L. jun. (2019). Catalytic effect of nanosized ZnO and TiO₂ on thermal degradation of poly(lactic acid) and isoconversional kinetic analysis. *Thermochimica Acta*, 672(10), 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.12.008>
- Zeng, S., Lu, D., & Yang, R. (2025). Unraveling the Mechanisms of Polyethylene Thermal Oxidation Influenced by TiO₂ and ZnO: A Combined Experimental and Computational Study. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 31(5), 1110–1120.
<https://doi.org/10.1002/vnl.22234>
- Yarahmadi A, Dousti B, Karami-Khorramabadi M and Afkhami H (2024), Materials based on biodegradable polymers chitosan/gelatin: a review of potential applications. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 12:1397668. doi: <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2024.1397668/full>
- Yu, W., Lei, Q., Jiang, J., Yan, J., Yi, X., Cheng, J., Ou, S., Yin, W., Li, Z., & Liao, Y. (2025). Green-Synthesized Silver Nanoparticle-Loaded Antimicrobial Films: Preparation, Characterization, and Food Preservation. *Foods*, 14(14).
<https://doi.org/10.3390/foods14142509>
- Zambrano Arroyo Diana Fernanda. (2024). Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, ingeniero en biotecnología, Elaboración de un empaque activo a base de subproductos de daucus carota, almidón y nanopartículas de plata. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10515/1/FQLIN-289583%20%28PDF-A%29.pdf>
- Zhañay Andrade Alex Sebastian. (2021). *Síntesis de nanopartículas de óxido de magnesio con extractos de chamaemelum nobile para la obtencion de biofertilizante.*

<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/f20e7591-011e-4789-8457-5da25f717d20/content>

Zhao, F., Tang, T., Hou, S., & Fu, Y. (2020). Preparation and Synergistic Effect of Chitosan/Sodium Phytate/MgO Nanoparticle Fire-Retardant Coatings on Wood Substrate through Layer-By-Layer Self-Assembly. *Coatings*, 10(9), 848.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS10090848>