

Evaluación del efecto del veneno de *Micrurus* sobre las propiedades de películas biodegradables y su actividad como agente para la conservación de alimentos

Daniel Buitrago Chinchilla

Asesora

Laura María Reyes Méndez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Programa de Ingeniería de Alimentos

2025

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el acompañamiento, el amor y la presencia constante de personas que han marcado profundamente mi vida y mi camino como estudiante, como investigador y como ser humano.

A Marce, gracias por tu paciencia infinita, por tu amor que me sostiene, por ser mi ancla en medio de cada tormenta y mi impulso cuando la motivación flaquea. Gracias por estar, por creer, por caminar a mi lado durante estos años, en los que no solo terminé una carrera, sino que también construimos juntos un proyecto de vida. Gracias por tu compañía, por las palabras que levantan y por todo lo que haces en silencio, sin pedir nada a cambio.

A mi mamá, gracias por tanto. Por tu amor incondicional, por estar siempre presente en cada logro y en cada caída, por tu ternura, tu fuerza y tu fe en mí incluso cuando yo mismo la he puesto en duda. Todo lo que soy y lo que alcanzo tiene tu raíz: cada paso que doy lleva tu huella, cada triunfo lleva tu nombre. Este logro es tan tuyo como mío, porque sin tu ejemplo y tu empuje no habría llegado hasta aquí.

A la familia Ariza, gracias por tener siempre las puertas abiertas y el corazón dispuesto. A Fanny, por su ternura, sus consejos y esa forma de cuidar que equilibra todo. Y al Quehabidismo extendido, gracias por enseñarme la fuerza de lo sencillo: por los abrazos que reconfortan, las sobremesas que se vuelven refugio, las risas que sanan y los viajes que dejan huellas en el alma. Gracias por recordarme que crecer también es amar sin medida, bajar el ritmo y encontrar en lo cotidiano la esencia de lo que verdaderamente importa.

A Glorita, Dani y la Concu, gracias por su compañía, por estar pendientes de este proceso, por celebrar cada avance y sostener con afecto los días difíciles.

A mis amigos, los de siempre, los de ahora, que han creído en este sueño, que lo han seguido de cerca y que se sienten orgullosos como si fuera propio. Gracias por los mensajes, los cafés, las polas, los asados, los viajes, las rumbas, las preguntas genuinas, los alientos y por ser parte del impulso que me trajo hasta aquí.

A la profesora Laura María Reyes, gracias por su guía, su confianza en este trabajo y su acompañamiento generoso a lo largo de todo el proceso. Su compromiso con la ciencia, su apertura a las ideas y su apoyo constante hicieron de este proyecto algo mucho más grande que un simple requisito académico. A la UNAD, por brindarme el espacio, las herramientas y las oportunidades para crecer académica y personalmente. Por permitirme combinar mi pasión por la biotecnología con el deseo profundo de aportar soluciones reales a nuestro entorno.

Y a Ivancho, que desde otro plano me acompaña. Gracias por sembrar en mí la curiosidad por la ciencia, por despertar ese lado investigador que ahora me define y por ser una inspiración silenciosa que nunca deja de hablarme en momentos clave. Mi hermano, este trabajo también lleva tu nombre, tu huella y tu luz.

Finalmente, a todos mis familiares y amigos que no menciono aquí con nombre propio, pero que han sido parte de este camino, gracias de corazón. Cada gesto, cada palabra de aliento y cada abrazo –presente o ausente– fueron parte del combustible que me trajo hasta aquí.

Recuerda mirar hacia las estrellas y no hacia tus pies. Intenta encontrar sentido a lo que ves y pregúntate qué es lo que hace que el universo exista. Sé curioso. Y por muy difícil que parezca la vida, siempre hay algo que puedes hacer y lograr. Lo importante es que no te rindas jamás.

Stephen Hawking.

Resumen

Se evaluó el potencial antifúngico del veneno de serpientes del género *Micrurus* y su incorporación en soluciones biopoliméricas, con el propósito de desarrollar películas biodegradables destinadas a aplicaciones en la conservación de alimentos y protección agrícola. Las películas fueron formuladas utilizando gelatina tipo A y glicerol como plastificante, variando la concentración de gelatina en 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00%, además de una formulación con veneno a 0,06 mg/mL y 1 % de gelatina. Se realizaron caracterizaciones fisicoquímicas de color, opacidad, humedad, solubilidad y espesor, junto con espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (TGA). Asimismo, se evaluó la aplicación de recubrimientos en uva (*Vitis labrusca* var. Isabela) para determinar pérdida de peso y presencia de hongos durante el almacenamiento. Los resultados mostraron que concentraciones superiores al 0.75% de gelatina confirieron a las películas mayor estabilidad estructural y mejores propiedades físicas. La incorporación del veneno no afectó significativamente la humedad ni la solubilidad, evidenciando buena compatibilidad con la matriz biopolimérica. Además, el uso de recubrimientos con veneno redujo la pérdida de peso de las uvas y retrasó el crecimiento fúngico en la superficie del fruto. Esta investigación aporta al desarrollo de alternativas naturales y sostenibles para la conservación poscosecha, aprovechando recursos biológicos poco explorados con potencial en la industria agroalimentaria.

Palabras clave: Agroindustria, antimicrobianos naturales, bioprospección, péptidos bioactivos, toxinas de serpiente.

Abstract

The antifungal potential of *Micrurus* snake venom and its incorporation into biopolymeric solutions were evaluated with the aim of developing biodegradable films for applications in food preservation and agricultural protection. The films were prepared using type A gelatin and glycerol as plasticizer, varying gelatin concentrations at 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%, and 2.00%, along with an additional formulation containing venom at 0.06 mg/mL and 1 % gelatin. Physicochemical characterizations included color, opacity, moisture content, solubility, and thickness, complemented by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Thermogravimetric Analysis (TGA). In addition, coating applications were tested on grapes (*Vitis labrusca* var. Isabela) to assess weight loss and fungal growth during storage. Results showed that gelatin concentrations above 0.75% provided greater structural stability and improved physical properties to the films. The incorporation of venom did not significantly alter moisture or solubility, indicating good compatibility with the biopolymeric matrix. Furthermore, coatings containing venom reduced grape weight loss and delayed fungal growth on the fruit surface. This research contributes to the development of natural and sustainable alternatives for postharvest preservation, promoting the innovative use of underexplored biological resources with potential in the agro-food industry.

Keywords: Agroindustry, bioactive peptides, bioprospecting, natural antimicrobials, snake toxins.

Tabla de Contenido

Introducción	17
Planteamiento del Problema	19
Justificación	22
Objetivos	24
Objetivo General	24
Objetivos Específicos.....	24
Marco Conceptual y Teórico	25
Bioprospección de Venenos Animales Como Fuente de Compuestos Bioactivos para la Agroindustria	26
Fuentes Naturales de Compuestos Bioactivos	26
Ventajas, Desafíos y Perspectivas Regulatorias	27
Venenos Animales como Fuente de Compuestos Bioactivos.....	28
Aplicaciones de los Venenos Animales en la Industria Agroalimentaria y Farmacéutica ...	29
Potencial Biotecnológico de los Venenos Animales en la Agroindustria.....	30
Serpientes del Género <i>Micrurus</i> , Composición y Actividad Bioactiva de sus Venenos	31
Potencial Bioactivo del Veneno de <i>Micrurus</i> en la Industria Agroalimentaria	32
Composición Bioactiva y Potencial Antimicrobiano del Veneno de <i>Micrurus</i>	33
Fosfolipasas A ₂ y su Mecanismo de Acción Antimicrobiano	34
Toxinas de Tres Dedos y su Actividad en la Inhibición Microbiana.....	36
L-Aminoácido Oxidasas y su Capacidad Antifúngica.....	37

Mecanismos de Acción de los Compuestos Antimicrobianos del Veneno de <i>Micrurus</i>	39
Potencial Aplicación en la Industria Agroalimentaria	39
Desarrollo de Recubrimientos Biopoliméricos Funcionales: Gelatina y Glicerol.....	42
Gelatina como Macromolécula en Recubrimientos Biopoliméricos	42
Glicerol como Plastificante en Recubrimientos Biopoliméricos	44
Interacción Funcional entre Gelatina y Glicerol en Matrices Biopoliméricas.....	47
Tecnologías para el Desarrollo y Caracterización de Películas Biopoliméricas Activas	49
Método Utilizado Para la Producción de las Películas Biopoliméricas: Solvent Casting. ...	49
Técnicas de Caracterización de Películas Biopoliméricas	50
Humedad y Solubilidad en Agua	52
Espesor	52
FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier)	52
TGA (Análisis Termogravimétrico)	53
Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo en la Industria Agroalimentaria	53
Potencial Uso de Recubrimientos con Péptidos Bioactivos en la Conservación de Alimentos	54
Aplicación de Recubrimientos Biopoliméricos en la Protección de Cultivos Agrícolas.....	55
Brechas en el Conocimiento, Oportunidades de Investigación y Contribución a la Innovación Sostenible.....	56
Metodología	59
Diseño del Estudio	59
Población y Muestra	59

Preparación de las Soluciones Biopoliméricas	60
Evaluación Estructural Preliminar de las Películas	60
Incorporación de los Compuestos Bioactivos del Veneno de <i>Micrurus</i>	60
Caracterización Físicoquímica de las Películas Biopoliméricas.....	61
Aspecto Visual y Opacidad (OPA).....	61
Análisis de Color.....	61
Barrera a la Luz UV-Visible.....	62
Propiedades Físicas (Espesor, Humedad y Solubilidad).....	62
Análisis en el Infrarrojo (FTIR) de Películas.....	62
Análisis Termogravimétrico (TGA)	63
Evaluación de la Actividad Biológica de las Películas en la Conservación de Alimentos.....	63
Aplicación del Recubrimiento en Frutos Frescos	63
Evaluación del Aspecto Visual y Pérdida de Peso.....	63
Análisis Estadístico de los Resultados.....	64
Resultados y Discusión.....	65
Evaluación de las Formulaciones Biopoliméricas	65
Preparación de Películas y Selección de Formulaciones Base	65
Incorporación del Veneno y Espesor de las Películas	67
Características Físicoquímicas de las Películas Biopoliméricas.....	67
Aspecto Visual.....	67
Análisis de Color de las Películas Biopoliméricas	70
Resultados UV-Visible (Barrera a la Luz).....	72

	10
Resultados Opacidad (OPA).....	75
Contenido de Humedad, Espesor y Solubilidad de las Películas Biopoliméricas	76
Espesor Promedio de las Películas.....	77
Contenido de Humedad de las Películas.....	77
Porcentaje de Solubilidad de las Películas.....	78
Análisis Espectroscópico FTIR de las Películas Biopoliméricas	79
Análisis Termogravimétrico (TGA)	85
Evaluación de la Actividad Biológica de las Películas en la Conservación de Alimentos.....	88
Aplicación del Recubrimiento en Frutos Frescos	88
Evaluación del Aspecto Visual y Pérdida de Peso.....	89
Evaluación Cuantitativa de la Pérdida de Peso.....	97
Conclusiones	102
Recomendaciones	105
Referencias Bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Micrurus Mipartitus: Patrón Morfológico Característico.</i>	31
Figura 2 <i>Modelo Molecular de una Fosfolipasa A₂ (PLA₂) del Veneno de Serpiente Interactuando con un Fosfolípido de Membrana.</i>	35
Figura 3 <i>Variantes Estructurales de Toxinas de Tres Dedos (3ftx) Mostrando dos Tres Bucles Y Puentes Disulfuro.</i>	37
Figura 4 <i>Representación Estructural y Mecanismo Catalítico Propuesto de la L-Aminoácido Oxidasa (LAAO) del Veneno de Serpiente.</i>	38
Figura 5 <i>Estructura Molecular Básica de la Gelatina.</i>	43
Figura 6 <i>Estructura Molecular del Glicerol.</i>	45
Figura 7 <i>Espectros FTIR de Gelatina Pura y Formulaciones con Glicerol.</i>	48
Figura 8 <i>Aspecto Visual de Películas Biopoliméricas con Diferentes Concentraciones de Gelatina y Una Formulación con Veneno de Micrurus.</i>	68
Figura 9 <i>Película Seca Elaborada con Gelatina al 1 % y Veneno de Micrurus.</i>	69
Figura 10 <i>Transmitancia UV-Visible de Películas Biopoliméricas con Diferentes Concentraciones de Gelatina y Veneno.</i>	73
Figura 11 <i>Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas sin Veneno, Formuladas con Concentraciones de Gelatina de 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % Y 2,00 %.</i>	82
Figura 12 <i>Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas con Gelatina al 1 %, Sin Veneno (F₂) Y Con Veneno de Micrurus (F₃, 0,06 Mg/ML).</i>	84
Figura 13 <i>Curva Termogravimétrica (TGA) de la Película Biopolimérica Con Gelatina al 1%</i>	86
Figura 14 <i>Curva Termogravimétrica (TGA) de la Película Biopolimérica Con Gelatina al 1 % y Veneno de Micrurus (0,06 Mg/ML).</i>	87

Figura 15 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 1).</i>	. 90
Figura 16 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 3).</i>	. 91
Figura 17 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 7).</i>	. 92
Figura 18 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 9).</i>	. 93
Figura 19 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 15).</i>	93
Figura 20 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 17).</i>	94
Figura 21 <i>Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 23).</i>	95
Figura 22 <i>Aspecto Visual de Uvas Recubiertas Con Formulaciones Biopoliméricas Después de 23 Días de Almacenamiento.</i>	95
Figura 23 <i>Evidencia de Crecimiento Fúngico en Uva Sin Recubrimiento (Grupo Control) al Día 23 De Almacenamiento.</i>	96
Figura 24 <i>Porcentaje de Pérdida de Peso en Uvas Recubiertas y Control Durante 23 Días de Almacenamiento.</i>	99
Figura 25 <i>Comparación de La Pérdida de Peso (%) en Uvas Tratadas Y Control al Día 23 De Almacenamiento.</i>	100

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Espesor Promedio por Formulación Ensayos Sin Veneno</i>	66
Tabla 2 <i>Valores de Color (L^*, A^*, B^*) y Diferencia Total de Color (ΔE^*) de Películas Biopoliméricas de Gelatina a Diferentes Concentraciones y Con Adición de Veneno de <i>Micrurus</i>.....</i>	70
Tabla 3 <i>Espesor, Absorbancia y Opacidad de Películas Biopoliméricas don Diferentes Formulaciones</i>	75
Tabla 4 <i>Valores Medios de Contenido de Humedad y Solubilidad de las Películas Biopoliméricas (Ensayos con Veneno).</i>	79
Tabla 5 <i>Identificación de Señales Características en los Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas Con y Sin Veneno de <i>Micrurus</i>.</i>	80
Tabla 6 <i>Peso Promedio de Uvas Tratadas y Control Durante el Almacenamiento ($G \pm$ Desviación Estándar).....</i>	97

Lista de Símbolos y Abreviaturas

%	Porcentaje
°C	Grado Celsius
±	Más o Menos
μg	Microgramo
μL	Microlitro
a*	Coordenada de Color (Verde–Rojo) en el Espacio Cielab
b*	Coordenada de Color (Azul–Amarillo) en el Espacio Cielab
cm ⁻¹	Número de Onda (Número de Ciclos por Centímetro)
ΔE*	Diferencia Total de Color en el Espacio Cielab
3FTx	Toxinas de Tres Dedos
AFM	Microscopía de Fuerza Atómica
ANOVA	Análisis de Varianza
ATR	Atenuador de Reflectancia Total
CMC	Carboximetil Celulosa
CMI	Concentración Mínima Inhibitoria
CR-400	Colorímetro Konica Minolta, Modelo CR-400
DS	Desviación Estándar
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
EM	Módulo Elástico
F	Formulación (F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₄ , F ₅)
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
g	Gramo

h	Hora
L*	Luminosidad en el Espacio Cielab
LAAO	L-Aminoácido Oxidasas
LIDA	Laboratorio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mM	Milimolar
MP	Metaloproteasas
MPa	Megapascal
N ₂	Nitrógeno
nm	Nanómetro
OPA	Opacidad
OMS	Organización Mundial para la Salud
PEG	Polietilenglicol
PLA ₂	Fosfolipasas A ₂
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
SFP	Solución Formadora de Películas
SP	Serina Proteasas
Tg	Temperatura de Transición Vítrea
TGA	Análisis Termogravimétrico
UNAD	Universidad Nacional Abierta y a Distancia
UV-Vis	Espectroscopía Ultravioleta-Visible

WI	Índice de Blancura (Whiteness Index)
Wi	Peso Inicial
Wt	Peso al Tiempo T

Introducción

El desarrollo de tecnologías sostenibles para la industria agroalimentaria es un desafío global que requiere enfoques innovadores basados en el uso responsable de los recursos naturales. En la actualidad, la bioprospección de compuestos bioactivos ha cobrado gran relevancia como una estrategia para el diseño de soluciones que permitan mejorar la conservación de alimentos y la protección de cultivos sin depender de productos químicos sintéticos. Este enfoque se alinea con la creciente necesidad de desarrollar materiales funcionales con menor impacto ambiental y mayor eficacia en la reducción de microorganismos patógenos.

Colombia, como uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, representa un escenario ideal para la exploración de nuevas fuentes de compuestos bioactivos con potencial aplicación en la agroindustria. Entre estas, los venenos de serpientes han sido objeto de estudio debido a su compleja composición de proteínas y péptidos con propiedades antimicrobianas y antifúngicas. En particular, el veneno del género *Micrurus* ha demostrado actividad biológica relevante, aunque su aplicación en el desarrollo de recubrimientos biopoliméricos sigue siendo un área de estudio incipiente (Cañas et al., 2017; Rodríguez-Rojas et al., 2021).

Este trabajo de grado, desarrollado en el programa de Ingeniería de Alimentos, tuvo como propósito formular y caracterizar películas biopoliméricas a base de gelatina tipo A y glicerol como plastificante, con la incorporación de veneno de *Micrurus* a una concentración definida. Para ello, se llevaron a cabo análisis de estabilidad estructural y propiedades fisicoquímicas mediante técnicas avanzadas de caracterización, con el fin de explorar la compatibilidad del veneno dentro de la matriz biopolimérica y su potencial aplicación en el campo de la conservación alimentaria.

Desde una perspectiva científica y tecnológica, esta investigación contribuye al desarrollo de biopolímeros funcionales con posibles aplicaciones en la industria alimentaria y agrícola. Sus hallazgos pueden servir como base para futuras investigaciones en el diseño de sistemas de biocontrol más eficientes y sostenibles. En este sentido, este estudio no solo amplía el conocimiento sobre el uso de compuestos bioactivos en biopolímeros, sino que también se enmarca en las tendencias actuales en biotecnología aplicada, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y promoviendo alternativas innovadoras para la industria agroalimentaria.

Planteamiento del Problema

La industria agroalimentaria enfrenta desafíos crecientes en la conservación de productos y la protección de cultivos debido a la proliferación de microorganismos patógenos. Estos microorganismos, incluidos hongos y bacterias, pueden deteriorar los alimentos, reducir su vida útil y causar pérdidas económicas significativas en los sistemas agrícolas y de distribución (Bubici et al., 2019; Raza et al., 2017). Tradicionalmente, el control de estos patógenos ha dependido del uso de agroquímicos y conservantes sintéticos; sin embargo, estas soluciones presentan limitaciones importantes, como la resistencia microbiana, la toxicidad ambiental y los riesgos para la salud humana (FAO, 2023; Nasr et al., 2023).

A pesar de la eficacia inicial de los métodos convencionales, la creciente resistencia de los patógenos a fungicidas y antibióticos representa un problema crítico para la salud pública y la productividad agrícola. Esta resistencia ha llevado a una dependencia de productos químicos en concentraciones cada vez mayores, lo que no solo disminuye la efectividad de los tratamientos, sino que también contribuye a la contaminación del suelo y del agua, afectando la biodiversidad y generando costos ambientales considerables (Carvalho et al., 2024). Según la FAO (2023); es urgente desarrollar estrategias innovadoras y sostenibles para mitigar estos problemas, reduciendo la carga de agroquímicos en la producción de alimentos y promoviendo alternativas basadas en la biotecnología.

Esta investigación buscó evaluar el potencial de estos compuestos en el desarrollo de recubrimientos biopoliméricos con propiedades antifúngicas, abordando las limitaciones de los métodos tradicionales y proponiendo una solución innovadora, sostenible y efectiva para la conservación de alimentos y la protección de cultivos. Se ha demostrado que los recubrimientos biopoliméricos pueden actuar como barreras protectoras que prolongan la estabilidad de los

productos agroalimentarios y reducen la proliferación de microorganismos (Alexandre et al., 2016; Reyes et al., 2021). La incorporación de péptidos bioactivos de venenos en estas formulaciones podría fortalecer su eficacia antimicrobiana, mejorando su funcionalidad y aplicabilidad en la industria.

Aunque diversos estudios han explorado la actividad antimicrobiana de venenos animales en el ámbito biomédico y biotecnológico, su aplicación en la agroindustria es aún incipiente (Abd El-Aziz et al., 2019; Coyotl-Pérez et al., 2023). En particular, los venenos de serpientes del género *Micrurus* han demostrado contener compuestos con actividad antimicrobiana contra patógenos de interés agroindustrial, pero su integración en materiales poliméricos sigue siendo un reto en términos de estabilidad y funcionalidad (Pérez-Peinado et al., 2020; Bedoya-Medina et al., 2019).

Además, investigaciones previas han documentado el uso de venenos de otros animales, como escorpiones y anfibios, en formulaciones antimicrobianas para diversas aplicaciones, lo que sugiere que el enfoque adoptado en este estudio podría extenderse a otros venenos con propiedades bioactivas (Nasr et al., 2023). Esto abriría nuevas posibilidades para la biotecnología agroalimentaria y permitiría la reducción del uso de conservantes sintéticos, alineándose con las tendencias actuales de producción sostenible y seguridad alimentaria (FAO, 2023).

Desde una perspectiva socioeconómica, la implementación de estos recubrimientos biopoliméricos podría beneficiar a los agricultores y productores agroindustriales al proporcionar una solución de menor impacto ambiental y con mayor valor agregado en mercados nacionales e internacionales. La creciente demanda de alternativas ecológicas y libres de químicos sintéticos resalta la importancia de desarrollar tecnologías innovadoras que contribuyan a la competitividad del sector agroalimentario.

En consecuencia, este estudio planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué aportes puede ofrecer la incorporación de compuestos bioactivos del veneno de *Micrurus* en películas biopoliméricas, en términos de su formulación y caracterización, como base para el desarrollo de estrategias sostenibles en conservación de alimentos? Responder esta pregunta permitirá avanzar en la comprensión del potencial biotecnológico de los venenos de *Micrurus* y su aplicación en estrategias sostenibles para la agroindustria.

Justificación

El desarrollo de soluciones sostenibles para la conservación de alimentos y la protección agrícola constituye una necesidad urgente, dada la amenaza constante de microorganismos patógenos que afectan la seguridad alimentaria y la estabilidad de los sistemas de producción (Bubici et al., 2019; Raza et al., 2017). La proliferación de hongos y bacterias en productos frescos genera pérdidas económicas significativas y limita la exportación de productos agroindustriales debido a restricciones sanitarias internacionales (FAO, 2023).

Los métodos convencionales de control, basados en agroquímicos y conservantes sintéticos, han demostrado efectividad en el corto plazo; sin embargo, presentan limitaciones críticas, como la resistencia microbiana, la contaminación ambiental y los riesgos para la salud humana (Abd El-Aziz et al., 2019; FAO, 2023). La resistencia microbiana, en particular, ha reducido la eficacia de los tratamientos actuales, obligando al uso de dosis más elevadas de químicos y agravando los efectos negativos en los ecosistemas agrícolas (Carvalho et al., 2024).

En este contexto, la bioprospección de compuestos bioactivos naturales se ha consolidado como una alternativa prometedora para el desarrollo de soluciones antimicrobianas más seguras y sostenibles (Coyotl-Pérez et al., 2023). La FAO (2023) ha enfatizado la necesidad de reducir la dependencia de químicos sintéticos y fomentar prácticas agrícolas sostenibles mediante el aprovechamiento de recursos biológicos con aplicaciones tecnológicas. En este sentido, Colombia, como uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, ofrece una oportunidad única para la identificación y aprovechamiento de moléculas bioactivas con aplicaciones en la agroindustria.

Dentro de esta diversidad, los venenos de serpientes del género *Micrurus* han sido objeto de estudio por su compleja composición de proteínas y péptidos con propiedades antimicrobianas

y antifúngicas, lo que los convierte en candidatos de interés para el desarrollo de recubrimientos biopoliméricos funcionales (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020). No obstante, su aplicación en matrices biopoliméricas orientadas al sector agroalimentario sigue siendo un campo incipiente. Investigaciones previas han demostrado que compuestos derivados de venenos animales pueden ser efectivos frente a hongos y bacterias patógenas sin comprometer la estabilidad de los alimentos (Carvalho et al., 2024).

Este proyecto se enmarca en el macroproyecto ECBTIEXT032023, titulado “Bioprospección de los venenos de *Micrurus* en el contexto de su diversidad taxonómica y aproximación -ómica, para el hallazgo de moléculas con actividad sobre patógenos de interés agrícola”, financiado por la Convocatoria 890 de Minciencias para el fortalecimiento de la Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI). Esta iniciativa, liderada por la Universidad de Antioquia en colaboración con otras instituciones académicas, busca desarrollar soluciones innovadoras para la agroindustria mediante la identificación de compuestos bioactivos presentes en venenos de serpientes.

Desde una perspectiva biotecnológica y de innovación, este estudio no solo diversifica las estrategias de biocontrol en la industria agroalimentaria, sino que también amplía el espectro de aplicaciones industriales de los venenos animales. Existen antecedentes sobre la actividad antimicrobiana de venenos de escorpiones y anfibios, lo que indica que este enfoque podría extenderse a otras especies con potencial biotecnológico (Nasr et al., 2023).

En este sentido, la presente investigación contribuye al desarrollo de alternativas más sostenibles y eficientes para la conservación de alimentos y la protección de cultivos, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo un equilibrio entre seguridad alimentaria, innovación y preservación ambiental.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto del veneno de *Micrurus* sobre las propiedades de películas biodegradables y su actividad como agente para la conservación de alimentos.

Objetivos Específicos

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y estructurales de películas biopoliméricas con incorporación de veneno de *Micrurus*.

Evaluar la aplicación de las películas biopoliméricas como recubrimientos en frutos frescos, analizando su efecto en parámetros asociados a la conservación de alimentos.

Marco Conceptual y Teórico

El desarrollo de tecnologías innovadoras en la industria agroalimentaria depende del conocimiento profundo de los procesos biológicos y químicos que intervienen en la conservación de alimentos y la protección de cultivos. La interacción entre microorganismos patógenos y los sistemas biológicos ha impulsado la búsqueda de estrategias alternativas a los métodos convencionales de control, basadas en el aprovechamiento de compuestos bioactivos naturales con propiedades antimicrobianas y antifúngicas (Bubici et al., 2019). En este sentido, la FAO (2023) ha enfatizado la necesidad de desarrollar enfoques sostenibles para la producción agroalimentaria, promoviendo el uso de alternativas naturales a los conservantes sintéticos y pesticidas convencionales, lo que respalda la exploración de fuentes biológicas con potencial antimicrobiano.

Se ha demostrado que los venenos animales contienen una gran diversidad de biomoléculas con actividad antimicrobiana y antifúngica, lo que ha generado gran interés en su aplicación en la biotecnología agroalimentaria (Pérez-Peinado et al., 2020; Bedoya-Medina et al., 2019). En este sentido, los venenos de serpientes del género *Micrurus* han sido investigados por su capacidad para inhibir microorganismos patógenos, destacándose los péptidos antimicrobianos (AMPs), las fosfolipasas A₂ (PLA₂) y las toxinas de tres dedos (3FTx) como los principales agentes bioactivos con potencial aplicación agroalimentaria (Nasr et al., 2023). La actividad antimicrobiana de estos compuestos radica en su capacidad para alterar la membrana celular de los microorganismos, induciendo la pérdida de viabilidad y reduciendo su proliferación en productos agroalimentarios (Alonso et al., 2024).

Paralelamente, el desarrollo de biopolímeros funcionales ha abierto nuevas oportunidades para la formulación de películas y recubrimientos activos que permitan la liberación controlada

de compuestos bioactivos en matrices biodegradables. La gelatina, en combinación con plastificantes como el glicerol, ha sido ampliamente utilizada en la producción de películas biopoliméricas por su capacidad de formar estructuras homogéneas con propiedades mecánicas y barrera ajustables según la aplicación deseada (Alexandre et al., 2016; Sobral et al., 2001).

Desde un enfoque interdisciplinario, la aplicación de estos conocimientos en la industria agroalimentaria permite el diseño de materiales funcionales con propiedades antimicrobianas, capaces de prolongar la vida útil de los alimentos y proteger los cultivos contra microorganismos patógenos. El análisis detallado de los mecanismos de acción de los compuestos bioactivos, la caracterización de biopolímeros y la evaluación de su desempeño en matrices biológicas son aspectos fundamentales para el desarrollo de tecnologías sostenibles y seguras en este campo.

Bioprospección de Venenos Animales como Fuente de Compuestos Bioactivos para la Agroindustria

La bioprospección se ha consolidado como una estrategia fundamental en la búsqueda de compuestos bioactivos derivados de la biodiversidad, con aplicaciones potenciales en sectores como la farmacología, la biotecnología, la agricultura y la industria alimentaria (Cotes et al., 2012). Este enfoque cobra especial relevancia en el contexto agroalimentario, dada la creciente necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los agroquímicos convencionales, cuya aplicación intensiva ha generado problemas como contaminación ambiental, residuos tóxicos y resistencia microbiana (FAO, 2023).

Fuentes Naturales de Compuestos Bioactivos

En las últimas décadas, se han identificado numerosas fuentes naturales capaces de producir metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas, antifúngicas, antioxidantes y bioinsecticidas. Entre ellas se destacan extractos vegetales, hongos, bacterias benéficas y

venenos de animales, todos con alto potencial de aplicación para la conservación de alimentos y la protección agrícola (Coyotl-Pérez et al., 2023; Dini et al., 2024). Estos compuestos han sido evaluados por su compatibilidad con matrices biodegradables y su capacidad para actuar como agentes activos en recubrimientos funcionales, biofertilizantes y formulaciones de biocontrol.

Uno de los principales logros de la bioprospección ha sido la incorporación de compuestos bioactivos en recubrimientos biopoliméricos para productos perecederos, tanto en alimentos como en semillas y plántulas. Estos materiales no solo actúan como barreras físicas, sino también como sistemas de liberación controlada de agentes antimicrobianos, mejorando la inocuidad y prolongando la vida útil de los productos tratados (Reyes et al., 2021).

En el ámbito agrícola, se han formulado recubrimientos y soluciones a base de biopolímeros enriquecidos con compuestos antifúngicos que reducen la incidencia de patógenos como *Fusarium oxysporum* o *Botrytis cinerea*, sin afectar la microbiota benéfica del suelo (Nasr et al., 2023). Además, la encapsulación de estos compuestos en matrices como quitosano o gelatina ha demostrado ser efectiva para mejorar su estabilidad, biodisponibilidad y eficiencia en campo (Carvalho et al., 2024).

Ventajas, Desafíos y Perspectivas Regulatorias

El uso de compuestos bioactivos derivados de fuentes naturales ofrece ventajas relevantes frente a los productos sintéticos, como una menor toxicidad, biodegradabilidad y compatibilidad ecológica (Bubici et al., 2019). También favorece la implementación de modelos de producción agroalimentaria más sostenibles, en línea con los objetivos globales de seguridad alimentaria y agricultura regenerativa.

No obstante, persisten desafíos en términos de escalabilidad, eficiencia de extracción y regulación. La producción a gran escala de estos compuestos requiere métodos rentables de

purificación y validación que garanticen su estabilidad y eficacia sin afectar la inocuidad de los productos agroindustriales. Además, su uso en alimentos y cultivos debe cumplir con estrictos estándares de seguridad y requerir evaluaciones toxicológicas rigurosas (Pérez-Peinado et al., 2020; Alonso et al., 2024).

La bioprospección de compuestos naturales representa un eje estratégico para el desarrollo de soluciones innovadoras en la agroindustria. La exploración sistemática de extractos naturales, microorganismos y venenos animales como fuentes de agentes antimicrobianos abre nuevas posibilidades para reducir la dependencia de insumos químicos, mejorar la calidad y seguridad de los alimentos, y promover una agricultura más sostenible. En adelante, la colaboración entre disciplinas como la química, la biología molecular y la ingeniería de materiales será clave para maximizar el aprovechamiento de estos compuestos en aplicaciones industriales de alto impacto.

Venenos Animales como Fuente de Compuestos Bioactivos

Los venenos animales han sido ampliamente estudiados en biotecnología y farmacología debido a su composición bioquímica compleja y su potencial para diversas aplicaciones industriales. Estos fluidos biológicos contienen una combinación de proteínas, péptidos y enzimas con actividad antimicrobiana, antifúngica, antiparasitaria y citotóxica, lo que los convierte en una fuente prometedora de nuevos compuestos bioactivos (Abd El-Aziz et al., 2019).

La investigación en este campo ha demostrado que los venenos de serpientes, escorpiones, arácnidos y anfibios contienen biomoléculas con efectos terapéuticos y aplicaciones industriales. En el sector biomédico, estos compuestos han servido de base para el desarrollo de fármacos con propiedades analgésicas, anticoagulantes y antitumorales (Carvalho et al., 2024).

Paralelamente, en la biotecnología agroalimentaria, se ha identificado su potencial para la conservación de alimentos y el control de fitopatógenos, permitiendo la formulación de bioplaguicidas y recubrimientos antimicrobianos (Pérez-Peinado et al., 2020).

Uno de los aspectos más relevantes en la aplicación de venenos en la agroindustria es su capacidad para inhibir el crecimiento de microorganismos resistentes a antibióticos y fungicidas sintéticos. La creciente resistencia microbiana ha impulsado la exploración de nuevas alternativas para la preservación de alimentos y la protección agrícola, y ciertos péptidos y proteínas presentes en venenos animales han demostrado ser altamente efectivos en este ámbito. Estos compuestos bioactivos pueden alterar la integridad de la membrana celular de bacterias y hongos, generando la lisis celular y reduciendo significativamente la proliferación de patógenos en alimentos y cultivos (Bedoya-Medina et al., 2019).

Aplicaciones de los Venenos Animales en la Industria Agroalimentaria y Farmacéutica

La creciente resistencia microbiana ha impulsado la exploración de nuevas alternativas para la preservación de alimentos y la protección agrícola. Investigaciones han reportado que ciertos péptidos y proteínas presentes en venenos animales pueden alterar la integridad de la membrana celular de bacterias y hongos, generando la lisis celular y reduciendo significativamente la proliferación de patógenos en alimentos y cultivos (Bedoya-Medina et al., 2019).

En la industria agrícola, los venenos han sido utilizados en el desarrollo de bioplaguicidas con actividad antifúngica y antibacteriana. Los estudios han demostrado que los venenos de serpientes y anfibios contienen proteínas con la capacidad de inhibir hongos fitopatógenos, como *Fusarium oxysporum* y *Botrytis cinerea*, lo que los convierte en una alternativa viable para el control de enfermedades en cultivos agrícolas (Nasr et al., 2023). Además, se ha observado que

estos compuestos pueden ser empleados en la protección de semillas y plantas durante la germinación y el crecimiento, minimizando la necesidad de pesticidas sintéticos y reduciendo el impacto ambiental de la agricultura intensiva (Bedoya-Medina et al., 2019).

En el sector alimentario, los compuestos bioactivos extraídos de venenos han sido incorporados en recubrimientos biopoliméricos para mejorar la conservación de alimentos perecederos. Se ha evaluado la actividad antimicrobiana de péptidos derivados de venenos de *Micrurus* en la inhibición de microorganismos patógenos en productos frescos, como carnes, lácteos y frutas. Su integración en matrices biodegradables ha demostrado ser efectiva para prolongar la vida útil de los alimentos sin comprometer su calidad sensorial ni sus propiedades nutricionales (Pérez-Peinado et al., 2020; Reyes et al., 2021).

Potencial Biotecnológico de los Venenos Animales en la Agroindustria

El uso de venenos animales en la biotecnología agroalimentaria representa una oportunidad para desarrollar productos innovadores que reduzcan la dependencia de agroquímicos sintéticos. La combinación de estas biomoléculas con biopolímeros funcionales, como la gelatina y el quitosano, permitiría la formulación de recubrimientos activos con aplicaciones tanto en la protección de cultivos como en la conservación de productos frescos.

Los avances en técnicas como la secuenciación proteómica, la espectrometría de masas y el modelado molecular han mejorado la identificación y optimización de estos compuestos para su uso en aplicaciones industriales. Además, la caracterización estructural de los venenos mediante estas metodologías está facilitando el diseño de formulaciones más estables y eficientes para el control de patógenos agroalimentarios (Alonso et al., 2024).

A medida que se realicen más estudios sobre la estabilidad, eficacia y seguridad de estos compuestos en la industria, se espera que los venenos animales se conviertan en una herramienta

clave para la conservación de alimentos y la protección de cultivos agrícolas. Su potencial para sustituir agroquímicos y conservantes sintéticos representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones ecológicas y sostenibles para la agroindustria (Reyes et al., 2021).

Serpientes del Género *Micrurus*, Composición y Actividad Bioactiva de sus Venenos

Las serpientes del género *Micrurus*, conocidas como corales verdaderas, pertenecen a la familia *Elapidae* y se caracterizan por su veneno altamente especializado con efectos neurotóxicos. Su distribución se extiende por América, con una alta diversidad en regiones tropicales como Colombia, Brasil y México. En Colombia, se ha registrado una de las mayores diversidades de especies de *Micrurus*, con al menos 33 especies reportadas, lo que convierte al país en un punto clave para su estudio toxinológico (Lynch, 2012; Lynch et al., 2016; Martínez-Vaca & López, 2019). Una de las especies más estudiadas es *Micrurus mipartitus*, ampliamente distribuida en el país y empleada en investigaciones toxinológicas recientes. En la Figura 1 se muestra un ejemplar típico de esta especie, donde se aprecian sus anillos negros y blancos, así como la cabeza y cola de color rojo característico.

Figura 1

Micrurus Mipartitus: Patrón Morfológico Característico



Nota: Ejemplar representativo de *Micrurus mipartitus* (coral rabo de ají), con bandas negras y blancas bien definidas, y coloración roja en la cabeza y la cola. Imagen tomada y adaptada de Cañas, C.A., Castro-Herrera, F. & Castaño-Valencia, S. Envenomation by the red-tailed coral snake (*Micrurus mipartitus*) in Colombia. J Venom Anim Toxins Incl Trop Dis 23, 9 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40409-017-0100-4>

Históricamente, el interés científico en los venenos de *Micrurus* se ha centrado en su impacto en la salud humana, dado que sus neurotoxinas afectan la transmisión neuromuscular, provocando parálisis y dificultades respiratorias. Sin embargo, en los últimos años, la investigación sobre estos venenos ha cobrado relevancia en el campo de la biotecnología aplicada a la agroindustria. Su composición bioquímica, rica en proteínas y péptidos bioactivos, ha despertado interés en la búsqueda de nuevas alternativas para el control de microorganismos patógenos en alimentos y cultivos agrícolas (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020).

Potencial Bioactivo del Veneno de Micrurus en la Industria Agroalimentaria

El potencial antimicrobiano y antifúngico de los venenos de *Micrurus* ha despertado interés en su posible aplicación en biotecnología agroalimentaria. Se ha reportado que los péptidos y proteínas presentes en estos venenos pueden inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos asociados a la conservación de alimentos y la protección de cultivos agrícolas. La actividad antimicrobiana de estos compuestos se basa en su capacidad para afectar la estructura de la membrana celular de los microorganismos, desestabilizándola y generando un ambiente hostil para su proliferación (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020).

Investigaciones han demostrado que la integración de estos compuestos en recubrimientos biopoliméricos permite prolongar la vida útil de productos agroalimentarios sin

comprometer su calidad sensorial ni nutricional. Estudios recientes han evaluado la eficacia de estos péptidos en películas biodegradables para la conservación de carnes, frutas y productos lácteos, mostrando una reducción significativa en la proliferación de bacterias y hongos durante el almacenamiento (Reyes et al., 2021). Además, la aplicación de estos compuestos en cultivos agrícolas ha mostrado resultados prometedores en la prevención de infecciones fúngicas, lo que podría reducir la necesidad de pesticidas sintéticos en la producción agrícola (Cotes et al., 2012).

Composición Bioactiva y Potencial Antimicrobiano del Veneno de *Micrurus*

El veneno de *Micrurus* está compuesto por una mezcla compleja de proteínas, enzimas y péptidos bioactivos con potencial antimicrobiano y antifúngico. Las toxinas de tres dedos (3FTx) y las fosfolipasas A₂ (PLA₂) son las dos familias proteicas más abundantes, representando hasta el 90 % del contenido total en algunas especies (Mackessy, 2010; Lomonte et al., 2016). Las 3FTx son proteínas pequeñas (58–81 aminoácidos) con estructura terciaria estabilizada por puentes disulfuro. Tradicionalmente asociadas a efectos neurotóxicos, recientes investigaciones han revelado su capacidad para alterar la integridad de las membranas celulares bacterianas y fúngicas, induciendo la lisis y actuando como posibles agentes antimicrobianos naturales.

Las PLA₂, por su parte, hidrolizan los fosfolípidos de las membranas microbianas, generando disrupciones estructurales que comprometen la viabilidad celular. Estas enzimas también han sido vinculadas con efectos inmunomoduladores y actividades antimicrobianas contra bacterias grampositivas, gramnegativas y hongos fitopatógenos como *Fusarium oxysporum*, siendo evaluadas para su incorporación en formulaciones biopoliméricas funcionales (Pérez-Peinado et al., 2020).

Otro componente de interés son las L-aminoácido oxidasas (LAAO), que catalizan la producción de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), una especie reactiva que induce estrés oxidativo en

células microbianas. La L-aminoácido oxidasa de *Micrurus mipartitus* (MipLAAO), aislada de su veneno, ha demostrado una potente actividad antibacteriana incluso a bajas concentraciones (Bedoya-Medina et al., 2019).

Además de estas tres familias principales, los venenos de *Micrurus* contienen otros compuestos bioactivos en menor proporción, como metaloproteasas (MP), serina proteasas (SP), inhibidores tipo Kunitz (Kun) y lectinas tipo C (CTL). Aunque menos abundantes, estos componentes pueden contribuir al efecto biológico general del veneno, favoreciendo la desestabilización de tejidos, la inhibición enzimática o la modulación del sistema inmune (Lomonte et al., 2016).

Esta diversidad molecular, combinada con avances en transcriptómica y proteómica, ha permitido identificar variantes con aplicaciones prometedoras en la industria agroalimentaria, especialmente en el desarrollo de recubrimientos activos para la conservación de alimentos y el control de patógenos agrícolas (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020).

Fosfolipasas A₂ y su Mecanismo de Acción Antimicrobiano

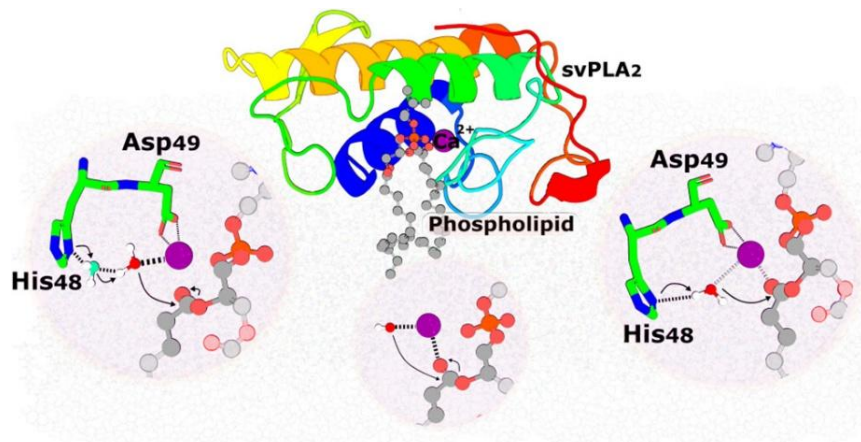
Las fosfolipasas A₂ (PLA₂) son enzimas ampliamente distribuidas en los venenos de serpientes y han demostrado poseer una variedad de efectos biológicos, incluyendo actividad antibacteriana y antifúngica. Su mecanismo de acción se basa en la hidrólisis de los fosfolípidos de las membranas celulares, lo que genera productos que pueden alterar la permeabilidad de la membrana y facilitar la muerte celular en microorganismos patógenos. Además de este efecto directo en la membrana, algunas PLA₂ han mostrado capacidad para modular la respuesta inmune y afectar la actividad metabólica de ciertas bacterias, lo que refuerza su potencial como agentes antimicrobianos naturales en la industria agroalimentaria (Bedoya-Medina et al., 2019).

Estudios recientes han identificado PLA₂ con actividad antimicrobiana contra bacterias

grampositivas y gramnegativas, además de efectos inhibitorios sobre hongos fitopatógenos responsables del deterioro de cultivos agrícolas. Su inclusión en biopolímeros como recubrimientos activos ha sido evaluada en diferentes investigaciones, sugiriendo su viabilidad como componente en estrategias de conservación de alimentos (Pérez-Peinado et al., 2020). En la Figura 2 se presenta un modelo tridimensional que muestra cómo una fosfolipasa A₂ del veneno de serpiente se acopla a la membrana celular e interacciona con un fosfolípido, facilitando su hidrólisis a través de residuos catalíticos clave.

Figura 2

Modelo Molecular de una Fosfolipasa A₂ (PLA₂) del Veneno de Serpiente Interactuando con un Fosfolípido de Membrana



Nota: Representación tridimensional obtenida por simulación molecular que muestra una PLA₂ catalíticamente activa (svPLA₂) anclada a una bicapa lipídica. En la imagen se observa cómo el fosfolípido se acomoda en el sitio activo de la enzima, interactuando con residuos esenciales como Asp49 y His48. Estos aminoácidos participan en la ruptura del enlace éster en la posición sn-2 del fosfolípido, lo que resulta en la liberación de un ácido graso y un lisofosfolípido, tal como ocurre durante su acción antimicrobiana. Imagen adaptada de Castro-Amorim et al. (2023), Catalytically Active Snake Venom PLA₂ Enzymes: An Overview of Its Elusive Mechanisms of

Reaction, Journal of Medicinal Chemistry,

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jmedchem.3c00097>

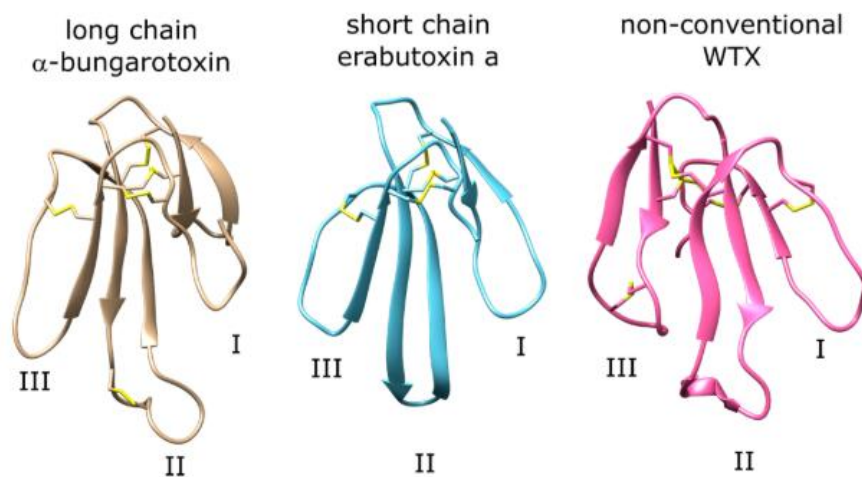
Toxinas de Tres Dedos y su Actividad en la Inhibición Microbiana

Las toxinas de tres dedos (3FTx) constituyen otro grupo predominante en los venenos de *Micrurus*. Son proteínas pequeñas, estabilizadas por puentes disulfuro, que históricamente se han asociado con efectos neurotóxicos. Sin embargo, estudios recientes han evidenciado que ciertas variantes de 3FTx poseen propiedades antimicrobianas, lo que las convierte en candidatas para el desarrollo de bioplaguicidas y conservantes naturales (Bedoya-Medina et al., 2020).

El mecanismo de acción de las 3FTx implica su interacción con receptores de membrana, generando alteraciones en la estructura y función celular de ciertos microorganismos. Se ha observado que estas toxinas pueden inducir la formación de poros en la membrana bacteriana, facilitando la pérdida de viabilidad celular. Investigaciones han reportado que ciertas 3FTx presentes en venenos de elápidos pueden inhibir el crecimiento de bacterias grampositivas y gramnegativas, así como de hongos patógenos relevantes en la conservación de alimentos y la protección agrícola (Pérez-Peinado et al., 2020; Carvalho et al., 2024; Bedoya-Medina et al., 2020). En la Figura 3 se ilustran tres variantes estructurales de estas toxinas, donde se evidencian los tres bucles característicos y los puentes disulfuro que estabilizan su conformación funcional.

Figura 3

Variantes Estructurales de Toxinas de Tres Dedos (3ftx) Mostrando sus Tres Bucles y Puentes Disulfuro



Nota: Representación tridimensional de tres variantes de toxinas de tres dedos (3FTx): toxina de cadena larga (α -bungarotoxina), cadena corta (erabutoxina a) y no convencional (WTX). En todas se distinguen los bucles I, II y III que les confieren su nombre, así como los puentes disulfuro (en amarillo) que estabilizan la estructura. Estas características estructurales son clave en su capacidad para interactuar con membranas celulares y ejercer efectos antimicrobianos.

Imagen adaptada de Gulsevin, A., & Meiler, J. (2020). An Investigation of Three-Finger Toxin—nAChR Interactions through Rosetta Protein Docking. *Toxins*, 12(9), 598.

<https://doi.org/10.3390/toxins12090598>

L-Aminoácido Oxidasas y su Capacidad Antifúngica

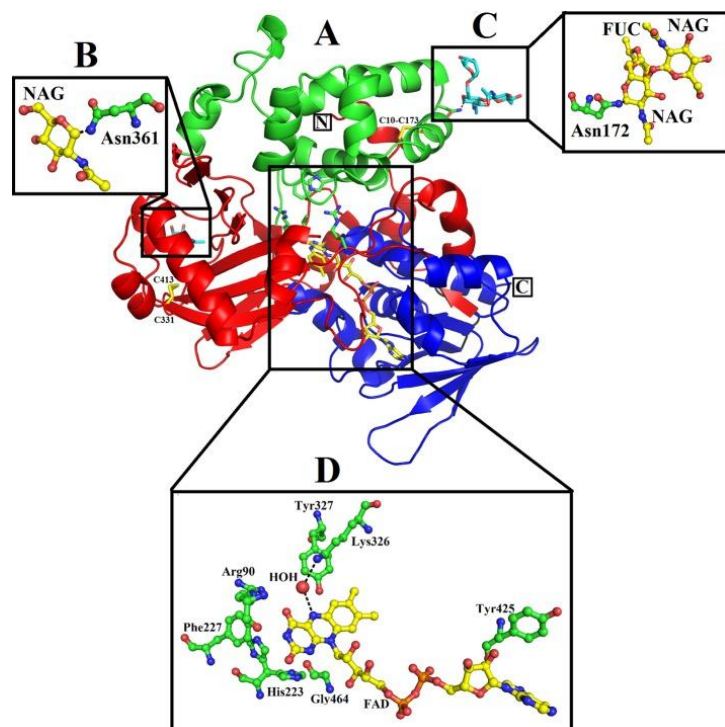
Otro componente bioactivo clave en los venenos de *Micrurus* es la L-aminoácido oxidasa (LAAO), una enzima que cataliza la conversión de aminoácidos en α -cetoácidos, liberando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como subproducto. Este mecanismo es de particular interés debido a que el H_2O_2 generado puede inducir estrés oxidativo en células microbianas, afectando su

viabilidad y reduciendo su capacidad de proliferación (Bedoya-Medina et al., 2020).

Investigaciones han demostrado que las LAAO presentes en venenos de serpientes pueden inhibir el crecimiento de diversas bacterias y hongos, actuando a través de la generación de especies reactivas de oxígeno y promoviendo la apoptosis en células microbianas. Su integración en formulaciones biopoliméricas ha despertado el interés en su posible aplicación en la conservación de alimentos y en estrategias de biocontrol agrícola (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020). En la Figura 4 se presenta el mecanismo catalítico propuesto de esta enzima, donde se ilustra de forma secuencial la transformación del aminoácido en α -cetoácido, la participación del cofactor FAD y la liberación de H_2O_2 como agente responsable del efecto antimicrobiano.

Figura 4

Representación Estructural y Mecanismo Catalítico Propuesto de la L-Aminoácido Oxidasa (LAAO) del Veneno de Serpiente



Nota: Representación compuesta de la LAAO de *Calloselasma rhodostoma*, donde se detalla su arquitectura estructural y funcional. (A) Vista en cinta de la enzima completa, con dominios secundarios codificados por colores: azul (unión al sustrato), rojo (dominio helicoidal) y verde (unión a FAD). Se resaltan los residuos activos (verde) y los puentes disulfuro (amarillo). (B) y (C) Muestran los sitios de glicosilación en Asn361 y Asn172, respectivamente, con residuos de N-acetilglucosamina (NAG) y fucosa (FUC) unidos. (D) Amplificación del sitio activo con los residuos catalíticos implicados en la oxidación del aminoácido sustrato: His223, Arg90, Gly464, Tyr327, Lys326, Tyr425, y el cofactor FAD. Esta región es clave para la producción de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), el cual genera estrés oxidativo y explica la actividad antifúngica observada. Imagen adaptada de Ullah, A. (2020). Structure–Function Studies and Mechanism of Action of Snake Venom L-Amino Acid Oxidases. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 110.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7052187/>

Mecanismos de Acción de los Compuestos Antimicrobianos del Veneno de *Micrurus*

Desde un punto de vista funcional, los compuestos bioactivos del veneno de *Micrurus* ejercen sus efectos antimicrobianos principalmente a través de la alteración de la integridad de la membrana celular y la inhibición de procesos metabólicos esenciales. Las PLA₂ y las 3FTx afectan la fluidez y estabilidad de la membrana, promoviendo la lisis celular en bacterias y hongos sensibles. Por otro lado, las LAAO generan estrés oxidativo mediante la producción de H₂O₂, lo que puede interferir con la replicación del ADN y la actividad enzimática de los microorganismos. Estos mecanismos de acción ofrecen ventajas sobre los antimicrobianos convencionales, ya que atacan múltiples dianas celulares, reduciendo la probabilidad de resistencia microbiana (Bedoya-Medina et al. 2020).

Potencial Aplicación en la Industria Agroalimentaria

El estudio de la actividad bioactiva de los venenos de *Micrurus* ha abierto nuevas posibilidades para su aplicación en la biotecnología agroalimentaria. La integración de estas proteínas y péptidos en recubrimientos biopoliméricos representa una estrategia innovadora para mejorar la conservación de alimentos y la protección de cultivos agrícolas sin recurrir al uso excesivo de conservantes sintéticos o pesticidas químicos. Los estudios actuales se centran en la optimización de estos compuestos para su incorporación en matrices biodegradables que permitan una liberación controlada y sostenida de los agentes antimicrobianos, asegurando su efectividad en diversas aplicaciones industriales (Reyes et al., 2021; Carvalho et al., 2024).

A pesar del gran potencial que presentan los compuestos del veneno de *Micrurus*, su implementación a escala industrial enfrenta desafíos significativos. Uno de los principales obstáculos radica en la optimización de los métodos de extracción y purificación, ya que estos deben garantizar la estabilidad y funcionalidad de las biomoléculas sin comprometer su bioactividad. Investigaciones han demostrado que la actividad antimicrobiana de ciertas proteínas y péptidos presentes en los venenos de serpientes puede verse afectada por cambios en el pH, la temperatura y la exposición prolongada a condiciones ambientales inadecuadas, lo que hace fundamental el desarrollo de estrategias para su estabilización (Pérez-Peinado et al., 2020; Alonso et al., 2024).

Otro aspecto crucial es la evaluación de la seguridad y compatibilidad de estos compuestos con matrices biopoliméricas. La integración de proteínas bioactivas exige evaluar su interacción con la matriz y el impacto en propiedades físicas y funcionales. Se ha reportado que ciertos biopolímeros pueden afectar la estabilidad de los péptidos antimicrobianos, reduciendo su eficacia o alterando su mecanismo de acción (Reyes et al., 2021). Además, la regulación de estos productos en la industria agroalimentaria es un desafío, ya que la aprobación de compuestos

bioactivos derivados de venenos para su uso en alimentos y cultivos requiere pruebas exhaustivas de toxicidad y estudios sobre su impacto en la microbiota natural del suelo y del ambiente (FAO, 2023; Carvalho et al., 2024).

La escalabilidad del proceso de producción es otro factor limitante. La extracción y purificación de estos compuestos a gran escala implica costos elevados y la necesidad de desarrollar tecnologías eficientes para mantener su actividad en formulaciones comerciales. Se ha propuesto el uso de técnicas de biotecnología recombinante para la producción de péptidos antimicrobianos sintéticos basados en la estructura de los encontrados en venenos de serpientes, lo que podría reducir costos y mejorar la viabilidad industrial de estos compuestos (Bedoya-Medina et al., 2019). La regulación de productos basados en compuestos bioactivos derivados de venenos también es un aspecto crucial, ya que su aprobación requiere estudios detallados sobre su inocuidad y eficacia en sistemas agroalimentarios. Los avances en técnicas de bioprospección, proteómica y modelado molecular están permitiendo una mejor caracterización y optimización de los compuestos del veneno de *Micrurus* para aplicaciones en la conservación de alimentos y la protección agrícola. En este sentido, la combinación de estos compuestos con recubrimientos biopoliméricos representa una alternativa innovadora y sostenible en la industria agroalimentaria, alineada con las tendencias actuales de reducción de químicos sintéticos y desarrollo de soluciones ecológicas para la preservación de alimentos y cultivos (Alonso et al., 2024).

Pérez-Peinado et al. (2020) han demostrado que ciertos péptidos derivados de venenos pueden estabilizarse en matrices poliméricas con actividad antimicrobiana. En este sentido, la FAO (2023) ha enfatizado la importancia de evaluar la inocuidad de los nuevos materiales utilizados en la industria alimentaria, asegurando que su integración cumpla con estándares internacionales de seguridad. La escalabilidad y los costos de producción también representan

barreras para la gelatina.

Desarrollo de Recubrimientos Biopoliméricos Funcionales: Gelatina y Glicerol

En el contexto de la industria agroalimentaria, los recubrimientos biopoliméricos son una alternativa sostenible para la conservación de alimentos y la protección agrícola, esto es para lograr el reemplazo de los plásticos sintéticos y conservantes químicos. Estos materiales, al ser biodegradables y seguros, pueden actuar como barreras físicas frente a la humedad, el oxígeno y los microorganismos, además de permitir la incorporación de compuestos bioactivos con propiedades antimicrobianas y antifúngicas (Alexandre et al., 2016).

El desarrollo de estas películas funcionales se basa en la selección de biopolímeros naturales y plastificantes adecuados que garanticen propiedades mecánicas, de barrera y estabilidad en matrices biodegradables. Entre los biopolímeros más utilizados se encuentran la gelatina, el quitosano y la carboximetilcelulosa; sin embargo, en este proyecto se optó específicamente por el uso de gelatina como macromolécula base, dada su versatilidad estructural y capacidad para formar matrices bioactivas. Como plastificante, se seleccionó glicerol, ampliamente reconocido por su compatibilidad con matrices proteicas y su capacidad para mejorar la flexibilidad del material (Reyes et al., 2021).

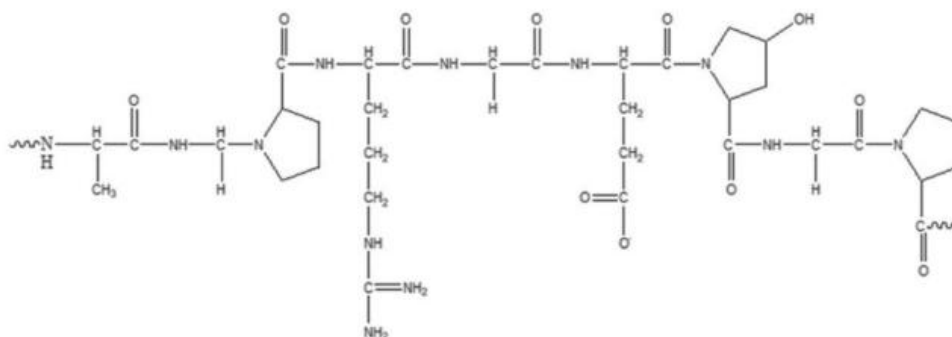
Gelatina como Macromolécula en Recubrimientos Biopoliméricos

La gelatina es un biopolímero natural de origen proteico, obtenido mediante la hidrólisis parcial del colágeno presente en pieles, huesos y tejidos conectivos de animales. Según el método de extracción, puede clasificarse en gelatina tipo A (hidrólisis ácida, con punto isoelectrico entre pH 6 y 9) y tipo B (hidrólisis alcalina, con punto isoelectrico entre pH 4,7 y 5,6) (Sobral et al., 2001). Su estructura está formada por cadenas polipeptídicas capaces de reorganizarse en hélices triples estabilizadas por enlaces de hidrógeno, lo que le confiere una

notable capacidad para formar geles y películas delgadas. En la Figura 5 se observa un fragmento representativo de su estructura molecular, en la que destacan los enlaces peptídicos entre residuos de glicina, prolina y otros aminoácidos típicos.

Figura 5

Estructura Molecular Básica de la Gelatina



Nota: Fragmento de la figura original que muestra la estructura polipeptídica de la gelatina, con enlaces entre aminoácidos característicos como glicina y prolina. Imagen adaptada de Ndlovu et al. (2021), *Polymers*, 13(17), 2959. <https://doi.org/10.3390/polym13172959>

Desde el punto de vista fisicoquímico, la gelatina presenta una alta solubilidad en agua, buena capacidad de retención de humedad y propiedades mecánicas adecuadas para formar matrices cohesivas, flexibles y biodegradables. Estas características la hacen especialmente atractiva para el desarrollo de recubrimientos comestibles y funcionales con propiedades de barrera frente a la humedad, el oxígeno y la actividad microbiana, y han sido validadas en diversas aplicaciones sobre productos cárnicos, lácteos, frutas, hortalizas y semillas, donde se ha observado una mejora en la vida útil y la seguridad microbiológica (Reyes et al., 2023).

Además de su capacidad estructural, la gelatina ha demostrado ser una excelente matriz para la incorporación y liberación controlada de compuestos bioactivos. Diversos estudios han

reportado que películas a base de gelatina enriquecidas con extractos vegetales, aceites esenciales o péptidos antimicrobianos pueden inhibir el crecimiento de bacterias como *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y hongos como *Aspergillus niger*, contribuyendo a la conservación de alimentos perecederos como carnes, lácteos y frutas (Reyes et al., 2021; Bubicic et al., 2019).

En aplicaciones agrícolas, la gelatina también ha sido utilizada en formulaciones biodegradables para proteger semillas y frutos mediante la adición de agentes antifúngicos, mostrando eficacia frente a patógenos como *Fusarium oxysporum* y *Botrytis cinerea* (Cotes et al., 2012; Nasr et al., 2023). Su capacidad para formar películas de liberación sostenida la convierte en una alternativa viable y ecológica a los tratamientos con agroquímicos convencionales.

Recientemente, se ha explorado la funcionalización de matrices de gelatina con proteínas bioactivas derivadas de venenos animales, como los del género *Micrurus*. Estas investigaciones han demostrado que la gelatina permite encapsular compuestos con actividad antimicrobiana y antifúngica sin comprometer su bioactividad, favoreciendo su liberación controlada en sistemas agroalimentarios (Pérez-Peinado et al., 2020; Bedoya-Medina et al., 2019). Gracias a su biocompatibilidad, capacidad estructural y versatilidad funcional, la gelatina se consolida como una macromolécula clave en el diseño de recubrimientos biopoliméricos activos con aplicaciones tanto en la conservación de alimentos como en la protección agrícola.

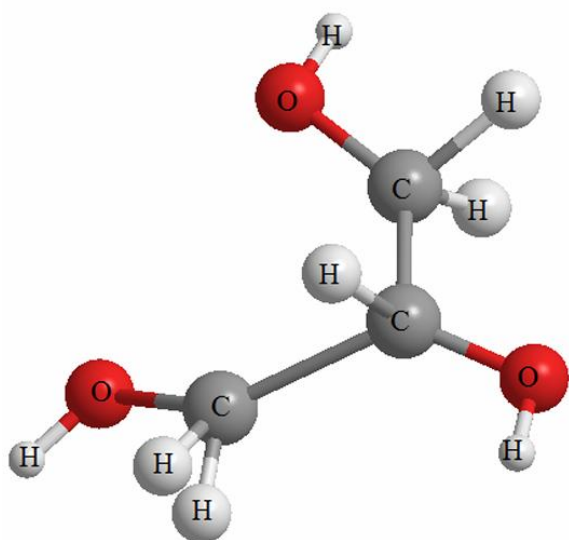
Glicerol como Plastificante en Recubrimientos Biopoliméricos

El glicerol es un polialcohol ampliamente utilizado como plastificante en la formulación de recubrimientos biopoliméricos, debido a su alta compatibilidad con polímeros hidrofílicos, especialmente proteínas como la gelatina. Su función principal es reducir la fragilidad de las

películas, mejorar su elasticidad y facilitar su manipulación, tanto en aplicaciones alimentarias como agrícolas (Bonilla Lag et al., 2015). Su estructura química, compuesta por tres grupos hidroxilo capaces de formar enlaces de hidrógeno con la matriz polimérica, se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Estructura Molecular del Glicerol



Nota: Modelo tridimensional del glicerol (propano-1,2,3-triol), donde se observan tres grupos hidroxilo (-OH) responsables de su función plastificante en matrices poliméricas. Imagen tomada de Kumar & Srivastava (2019), Glycerol as a Green Solvent in Organic Reactions.

https://www.researchgate.net/publication/351105973_Glycerol_as_a_Green_Solvent_in_Organic_Reactions

Desde el punto de vista estructural, el glicerol actúa interfiriendo en las interacciones intermoleculares dentro de la matriz polimérica, disminuyendo las fuerzas de cohesión entre cadenas y aumentando la movilidad molecular. Esto genera una película más flexible y resistente a la fractura, lo cual es fundamental en sistemas de recubrimiento que requieren buena adhesión

a superficies irregulares, resistencia mecánica y facilidad de aplicación (Sobral et al., 2001).

El impacto del glicerol en las propiedades de las películas biopoliméricas depende directamente de su concentración y de la compatibilidad con el biopolímero utilizado. En películas a base de gelatina, por ejemplo, se ha demostrado que el glicerol mejora significativamente la resistencia a la tracción y la elongación, aunque en concentraciones elevadas puede aumentar la permeabilidad al vapor de agua, comprometiendo su eficacia como barrera (Reyes et al., 2021). Por ello, es necesario optimizar su proporción en la formulación para lograr un equilibrio adecuado entre flexibilidad, resistencia y capacidad de barrera.

Además de su función plastificante, el glicerol también puede influir en la dispersión y liberación de compuestos bioactivos incorporados en la matriz polimérica. Su presencia facilita la distribución homogénea de péptidos antimicrobianos, como los derivados del veneno de *Micrurus*, contribuyendo a mantener su estabilidad y actividad funcional en el tiempo (Pérez-Peinado et al., 2020). Esta propiedad resulta clave en aplicaciones donde se busca una liberación sostenida y efectiva de agentes antimicrobianos sobre alimentos frescos o superficies agrícolas.

En el ámbito agrícola, el glicerol ha sido utilizado en la formulación de recubrimientos biodegradables aplicados a semillas y cultivos. Su inclusión mejora la adhesión del recubrimiento y favorece la retención de agentes antifúngicos, facilitando su liberación controlada durante el desarrollo del cultivo. Esta capacidad de integración en sistemas de biocontrol representa una alternativa prometedora al uso de productos químicos tradicionales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad agroindustrial (FAO, 2023).

Gracias a su eficacia como modificador de propiedades mecánicas y su compatibilidad con sistemas bioactivos, el glicerol se consolida como un componente esencial en la formulación de recubrimientos biopoliméricos funcionales, especialmente cuando se utilizan proteínas como

la gelatina como base estructural.

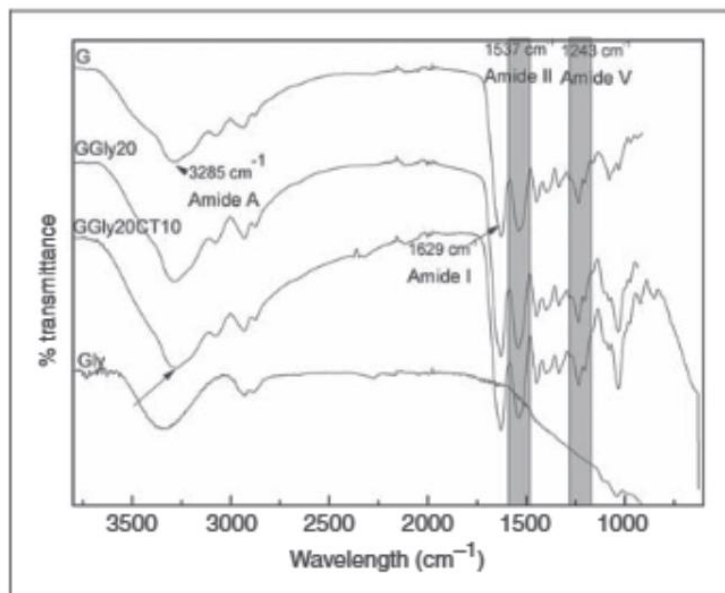
Interacción Funcional entre Gelatina y Glicerol en Matrices Biopoliméricas

La combinación de gelatina como macromolécula estructural y glicerol como plastificante ha demostrado ser particularmente efectiva en la formulación de recubrimientos biopoliméricos funcionales. Esta combinación permite obtener películas con buena cohesión, flexibilidad y capacidad de formar matrices homogéneas, capaces de incorporar y liberar compuestos bioactivos de manera eficiente.

Desde el punto de vista molecular, el glicerol interactúa con los grupos funcionales de la gelatina mediante enlaces de hidrógeno, reduciendo la rigidez de las películas y facilitando su manejo sin comprometer la integridad estructural. Esta interacción ha sido evidenciada a través de espectros de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), donde se observan desplazamientos en las bandas características de Amida A, Amida I y Amida II, al incorporar glicerol a la matriz de gelatina (Figura 7). Dichas modificaciones espectrales reflejan una reorganización de la red polimérica, consecuencia directa de la acción plastificante del glicerol (Peña-Rodríguez et al., 2014).

Figura 7

Espectros FTIR de Gelatina Pura y Formulaciones con Glicerol



Nota: Comparación de espectros FTIR de gelatina (G), gelatina con 20 % p/p de glicerol (GGly20), gelatina con glicerol y 10 % p/p de tanino de castaña (GGly20CT10), y glicerol puro (Gly). Se observan desplazamientos en las bandas características de Amida A, I y II, lo que evidencia la formación de enlaces de hidrógeno entre gelatina y glicerol. Imagen adaptada de Peña-Rodríguez et al. (2014), *Food Science and Technology International*, 21(3), 221–231.

<https://doi.org/10.1177/1082013214525429>

Al mismo tiempo, la gelatina proporciona una red proteica estable que permite mantener la forma y funcionalidad del recubrimiento, incluso en condiciones de humedad moderada. Estas propiedades son fundamentales para aplicaciones en alimentos y cultivos, donde se requiere resistencia mecánica, adherencia y funcionalidad antimicrobiana (Bonilla Lag et al., 2015; Pérez-Peinado et al., 2020).

Además, se ha observado que esta combinación facilita la dispersión de agentes activos como péptidos antimicrobianos derivados de venenos animales, promoviendo una liberación

controlada y sostenida sin pérdida de actividad. Por tanto, la sinergia entre gelatina y glicerol no solo mejora las propiedades físicas de las películas, sino que también optimiza su desempeño como vehículos funcionales en sistemas agroalimentarios (Reyes et al., 2021).

Tecnologías Para el Desarrollo y Caracterización de Películas Biopoliméricas Activas

El desarrollo de películas biopoliméricas activas requiere una combinación de técnicas avanzadas de producción y caracterización para garantizar que estos materiales cumplan con los requisitos de estabilidad, funcionalidad y seguridad en aplicaciones agroalimentarias. Para evaluar su desempeño, es necesario aplicar metodologías que permitan medir propiedades estructurales, térmicas, mecánicas y de barrera, asegurando que sean efectivas en la conservación de alimentos y la protección agrícola (Mercan, 2024).

Los métodos de producción han evolucionado para mejorar la compatibilidad de las películas biopoliméricas con compuestos bioactivos, optimizando su capacidad de liberación controlada y su resistencia a la degradación. Por otro lado, la caracterización de estos materiales se ha centrado en aspectos clave como humedad, espesor, solubilidad en agua, permeabilidad, estabilidad térmica y mecánica, ya que estas propiedades determinan su viabilidad en aplicaciones industriales.

Método Utilizado Para la Producción de las Películas Biopoliméricas: Solvent Casting

Uno de los métodos más utilizados para la producción de películas biopoliméricas es el *Solvent Casting*, el cual permite obtener películas homogéneas mediante la disolución del biopolímero en un solvente adecuado, seguido de la adición de plastificantes y compuestos bioactivos. La solución resultante se vierte sobre una superficie plana y se deja secar hasta que se forme la película (Sobral et al., 2001). Para mejorar la estabilidad y funcionalidad de las películas obtenidas, se han desarrollado técnicas avanzadas de secado y gelificación. Se ha

reportado que la aplicación de secado controlado a diferentes temperaturas puede afectar la resistencia mecánica y la permeabilidad al vapor de agua, lo que influye directamente en la capacidad de conservación del material (Reyes et al., 2021).

El *Solvent Casting* ha sido ampliamente utilizado en la producción de películas de gelatina y glicerol, ya que permite ajustar su espesor, transparencia y propiedades mecánicas. Además, este método ha demostrado ser efectivo en la incorporación de agentes antimicrobianos, lo que facilita su aplicación en recubrimientos activos para la conservación de alimentos (Alexandre et al., 2016).

Para mejorar la estabilidad y funcionalidad de las películas obtenidas, se han desarrollado técnicas avanzadas de secado y gelificación. Se ha reportado que la aplicación de secado controlado a diferentes temperaturas puede afectar la resistencia mecánica y la permeabilidad al vapor de agua, lo que influye directamente en la capacidad de conservación del material (Sobral et al., 2001).

Técnicas de Caracterización de Películas Biopoliméricas

La caracterización de las películas biopoliméricas es fundamental para evaluar su desempeño en aplicaciones agroalimentarias. Se han utilizado diversas metodologías para analizar su composición química, su estabilidad térmica, su resistencia mecánica y su capacidad de barrera contra la humedad y el oxígeno. Estudios han demostrado que el análisis por FTIR permite evaluar la estabilidad estructural de los biopolímeros en la presencia de compuestos bioactivos, mientras que el análisis mediante DSC y TGA ha sido útil para determinar la temperatura de transición vítrea y la estabilidad térmica de las películas biopoliméricas (Pérez-Peinado et al., 2020; Alexandre et al., 2016).

La espectroscopía FTIR se emplea comúnmente para identificar interacciones

moleculares dentro de la estructura polimérica, lo que resulta clave para confirmar la incorporación de compuestos antimicrobianos y la posible formación de enlaces entre la matriz biopolimérica y los péptidos bioactivos (Mercan, 2024). Además, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía de fuerza atómica (AFM) permiten evaluar la homogeneidad de la superficie de las películas, identificando defectos estructurales que podrían afectar su desempeño como barrera protectora (Alexandre et al., 2016; Reyes et al., 2023).

Por otro lado, la estabilidad térmica de las películas biopoliméricas se evalúa mediante DSC y TGA. La DSC permite determinar la temperatura de transición vítrea y la estabilidad térmica de los materiales utilizados, mientras que la TGA se emplea para analizar la degradación térmica de la película en función de la temperatura. Estudios han demostrado que la combinación de gelatina con plastificantes como el glicerol y el sorbitol mejora la resistencia térmica del material, favoreciendo su aplicación en la industria agroalimentaria (Reyes et al., 2021).

La resistencia mecánica de las películas biopoliméricas es otro factor clave en su aplicabilidad industrial. Se evalúan parámetros como resistencia a la tracción, elongación y módulo elástico, determinando su capacidad para soportar esfuerzos sin romperse. La incorporación de plastificantes mejora la elasticidad del material, facilitando su aplicación en recubrimientos de alimentos y productos agrícolas (Bonilla Lag et al., 2015).

Además, la permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno es un aspecto crucial en la formulación de recubrimientos activos, ya que influye en la estabilidad microbiológica del producto. La optimización de la composición del biopolímero y el uso de plastificantes pueden mejorar la resistencia a la humedad y garantizar una mayor protección contra el deterioro (FAO, 2023). Se ha observado que películas biopoliméricas enriquecidas con agentes antimicrobianos pueden reducir significativamente la permeabilidad a gases, mejorando la conservación de

productos perecederos (Reyes et al., 2021).

Humedad y Solubilidad en Agua

Uno de los parámetros más importantes en la evaluación de películas biopoliméricas es su contenido de humedad, ya que influye en su estabilidad durante el almacenamiento y su capacidad para evitar la proliferación de microorganismos. Un alto contenido de humedad puede hacer que las películas sean más susceptibles a la degradación y disminuye su vida útil (Reyes et al., 2021).

La solubilidad en agua es otro factor crítico, especialmente en aplicaciones donde se requiere que los recubrimientos sean solubles o insolubles según el tipo de producto que protegen. En formulaciones con gelatina y glicerol, la solubilidad puede ajustarse dependiendo de la proporción de plastificantes utilizados, permitiendo desarrollar películas con características específicas para diferentes aplicaciones agroindustriales (Alexandre et al., 2016).

Espesor

El espesor de las películas es un parámetro crucial, ya que determina su resistencia mecánica y su capacidad de barrera frente a la humedad y el oxígeno. Se ha reportado que películas más gruesas suelen tener una menor permeabilidad, lo que mejora su capacidad de conservación de alimentos. Sin embargo, el aumento del espesor también puede comprometer su flexibilidad y adhesión a superficies (Bubici et al., 2019).

FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier)

La espectroscopía FTIR se utiliza para analizar las interacciones moleculares dentro de las películas biopoliméricas, permitiendo identificar los grupos funcionales presentes en su estructura. Esta técnica ha sido clave en la evaluación de películas enriquecidas con compuestos bioactivos, asegurando que los agentes antimicrobianos se mantengan estables y funcionales

dentro de la matriz polimérica (Pérez-Peinado et al., 2020).

TGA (Análisis Termogravimétrico)

La estabilidad térmica de las películas biopoliméricas se evaluó mediante análisis termogravimétrico (TGA), técnica que permite identificar los procesos de degradación del material en función de la temperatura. A través de esta metodología es posible establecer las etapas de pérdida de masa asociadas a la eliminación de agua, volatilización de compuestos y descomposición de la matriz polimérica. Diversos estudios han demostrado que la combinación de gelatina con plastificantes como el glicerol y el sorbitol favorece la resistencia térmica del material, ampliando sus posibilidades de aplicación en la industria agroalimentaria (Reyes et al., 2021).

Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo en la Industria Agroalimentaria

El uso de recubrimientos biopoliméricos funcionales ha abierto nuevas oportunidades para la innovación en la industria agroalimentaria, al ofrecer estrategias más sostenibles y efectivas para la conservación de alimentos y la protección de cultivos agrícolas. La incorporación de péptidos bioactivos con propiedades antimicrobianas y antifúngicas en estas matrices ha demostrado ser una alternativa viable a los métodos tradicionales de preservación, al reducir la dependencia de conservantes sintéticos y agroquímicos que pueden representar riesgos para la salud y el medio ambiente (Reyes et al., 2021).

Estos materiales biodegradables han sido aplicados con éxito en productos cárnicos, lácteos, frutas, hortalizas y semillas, mostrando su capacidad para inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos y prolongar la vida útil de los productos agroindustriales (Alexandre et al., 2016). A continuación, se presentan las aplicaciones más destacadas en los sectores alimentario y agrícola.

Potencial Uso de Recubrimientos con Péptidos Bioactivos en la Conservación de Alimentos

El deterioro microbiano es una de las principales causas de pérdida de calidad y vida útil en alimentos perecederos. En este escenario, los recubrimientos biopoliméricos enriquecidos con compuestos antimicrobianos han demostrado su eficacia para inhibir bacterias y hongos patógenos como *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* y *Aspergillus niger* (Bubici et al., 2019).

Diversos estudios han evidenciado que películas a base de gelatina o quitosano, combinadas con extractos naturales o proteínas bioactivas, pueden mejorar la seguridad microbiológica de carnes, productos lácteos y frutas, sin comprometer sus propiedades sensoriales ni su valor nutricional (Reyes et al., 2023; Alexandre et al., 2016). Por ejemplo, se ha observado una reducción significativa de la carga microbiana en carne fresca tratada con recubrimientos bioactivos durante el almacenamiento (Reyes et al., 2023).

En productos lácteos como el queso fresco, el uso de recubrimientos antifúngicos ha permitido prolongar la vida útil y prevenir la formación de biofilms durante el almacenamiento en refrigeración. De igual manera, en frutas y hortalizas, el uso de recubrimientos comestibles a base de gelatina y quitosano ha mostrado eficacia para reducir la pérdida de humedad, controlar la oxidación y retrasar el desarrollo de mohos, especialmente en productos como fresas y tomates (Pérez-Peinado et al., 2020).

Más recientemente, se ha explorado la incorporación de proteínas bioactivas extraídas de venenos de serpientes en matrices poliméricas, con resultados prometedores en la inhibición de patógenos agroalimentarios. Su compatibilidad con polímeros como gelatina y quitosano, junto con su estabilidad en sistemas de liberación controlada, ha fortalecido su potencial para conservar productos perecederos (Carvalho et al., 2024).

Aplicación de Recubrimientos Biopoliméricos en la Protección de Cultivos Agrícolas

La creciente preocupación por los efectos negativos del uso excesivo de agroquímicos ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles en la agricultura. En este contexto, los recubrimientos biopoliméricos funcionales se perfilan como una herramienta innovadora para aplicar compuestos bioactivos directamente sobre semillas, frutos y plantas, sin alterar el equilibrio del ecosistema agrícola (FAO, 2023).

Las infecciones fúngicas son una de las amenazas más serias para la productividad de los cultivos. Investigaciones han demostrado que películas biodegradables con actividad antifúngica pueden reducir significativamente la incidencia de patógenos como *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea* y *Colletotrichum spp.* en semillas y plántulas (Cotes et al., 2012).

La combinación de péptidos antimicrobianos con biopolímeros como gelatina y quitosano permite una liberación sostenida y controlada de los agentes bioactivos en el campo. Esta tecnología ha sido empleada con éxito para proteger semillas de maíz y trigo, favoreciendo una germinación adecuada y reduciendo la necesidad de fungicidas sintéticos (Reyes et al., 2021).

Además, durante el almacenamiento y transporte de frutas y hortalizas, los recubrimientos biopoliméricos actúan como barreras protectoras frente a la deshidratación, el daño físico y la contaminación microbiana. Se ha reportado que su aplicación en cítricos y berries mejora significativamente su estabilidad microbiológica y apariencia sensorial, disminuyendo las pérdidas poscosecha y facilitando su comercialización (Pérez-Peinado et al., 2020).

Por otra parte, estos recubrimientos han sido investigados como vehículos de liberación controlada de biofertilizantes y bioestimulantes. La encapsulación de microorganismos benéficos en matrices biodegradables no solo mejora su supervivencia y colonización en suelos agrícolas,

sino que también incrementa la resistencia de las plantas frente a condiciones adversas, contribuyendo a una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente (Carvalho et al., 2024).

Brechas en el Conocimiento, Oportunidades de Investigación y Contribución a la Innovación Sostenible

El desarrollo de recubrimientos biopoliméricos funcionales con compuestos bioactivos ha mostrado avances significativos en los últimos años, especialmente en su aplicación para la conservación de alimentos y la protección agrícola. No obstante, persisten brechas importantes en el conocimiento que limitan su aprovechamiento integral en la industria. A pesar del creciente interés por biopolímeros enriquecidos con proteínas antimicrobianas y antifúngicas, aún se requiere profundizar en aspectos clave como su estabilidad en matrices poliméricas, compatibilidad fisicoquímica y mecanismos de acción frente a microorganismos objetivo. Estudios recientes destacan la necesidad de caracterizar con mayor precisión la interacción entre estos compuestos bioactivos y los materiales biodegradables, especialmente bajo condiciones reales de almacenamiento y uso agroindustrial (Reyes et al., 2023; Carvalho et al., 2024).

Una de las principales limitaciones actuales es la escasa exploración de la funcionalización de biopolímeros con venenos de serpientes del género *Micrurus*. Aunque se ha documentado la actividad antimicrobiana de componentes como las fosfolipasas A₂ (PLA₂) y las L-aminoácido oxidasas (LAAO), su incorporación en matrices poliméricas biodegradables aún enfrenta desafíos técnicos. Es fundamental avanzar en la evaluación de su estabilidad, encapsulación eficiente, y en la identificación de condiciones óptimas que garanticen una liberación controlada sin comprometer su funcionalidad biológica (Pérez-Peinado et al., 2020; Bedoya-Medina et al., 2019).

También se identifican retos asociados a la optimización de formulaciones que incorporan compuestos bioactivos en matrices como gelatina o quitosano. Estas formulaciones pueden ver alteradas propiedades fundamentales como la permeabilidad, la solubilidad, la resistencia térmica y la integridad mecánica. Se requiere mayor investigación sobre las concentraciones ideales de péptidos bioactivos y sobre el papel modulador de plastificantes como el glicerol en el comportamiento físico de las películas (Reyes et al., 2021).

Desde una perspectiva tecnológica e industrial, la escalabilidad de estos recubrimientos representa una barrera importante. Si bien ofrecen ventajas sostenibles evidentes, su producción a gran escala enfrenta limitaciones asociadas a los costos, la estandarización de procesos y el cumplimiento normativo. La implementación efectiva en la industria alimentaria requiere protocolos de producción eficientes, validación de su inocuidad en productos destinados al consumo humano, y un marco regulatorio claro que permita su autorización comercial (Carvalho et al., 2024).

En este contexto, el uso de compuestos bioactivos derivados de venenos animales representa una alternativa innovadora para sustituir agroquímicos sintéticos y conservantes artificiales. Su aplicación en recubrimientos funcionales podría aumentar la vida útil de los productos agroindustriales, mejorar la seguridad microbiológica y reducir el impacto ambiental. Estas estrategias se alinean con las políticas internacionales de producción responsable, economía circular y reducción de residuos tóxicos en la cadena alimentaria (FAO, 2023; Reyes et al., 2023).

La creciente demanda por soluciones biodegradables y libres de químicos ha impulsado el interés por biopolímeros funcionales aplicados al sector alimentario y agrícola. En este escenario, la integración de proteínas bioactivas en películas de gelatina o quitosano se presenta no solo

como una solución tecnológica, sino como una oportunidad de diferenciación comercial con alto valor agregado. Sin embargo, su implementación requiere estudios de validación en diversas matrices agroindustriales, ensayos de vida útil bajo condiciones reales, y análisis costo-beneficio que respalden su viabilidad comercial.

Finalmente, el avance de la biotecnología aplicada a la conservación de alimentos y cultivos dependerá de la capacidad para diseñar materiales que sean simultáneamente eficaces, seguros y económicamente accesibles. El desarrollo de tecnologías como la encapsulación, la liberación controlada y la modificación estructural de biopolímeros representa un camino prometedor hacia soluciones más sostenibles. En particular, la investigación sobre proteínas bioactivas derivadas de venenos de *Micrurus* se encuentra en una etapa incipiente pero prometedora, y con las estrategias adecuadas de estabilización y formulación, podrían consolidarse como herramientas clave para enfrentar los desafíos actuales de conservación alimentaria, protección agrícola y sostenibilidad ambiental.

Metodología

Este estudio se clasifica como una investigación aplicada con un enfoque experimental y cuantitativo, orientado al desarrollo de soluciones biopoliméricas con actividad antifúngica para su aplicación en la industria agroalimentaria. La investigación se enmarca en el macroproyecto ECBTIEXT032023, que busca la bioprospección de los venenos de *Micrurus* para la identificación de moléculas con potencial actividad antifúngica en la industria agrícola y alimentaria.

Diseño del Estudio

El estudio siguió un diseño experimental completamente al azar, orientado a la preparación, caracterización y evaluación de películas biopoliméricas enriquecidas con compuestos bioactivos del veneno de *Micrurus*. La metodología se desarrolló en varias etapas: preparación de soluciones biopoliméricas, caracterización de sus propiedades fisicoquímicas y evaluación de su impacto en la conservación de alimentos frescos (Bonilla y Sobral, 2016; Reyes et al., 2023).

Población y Muestra

La muestra principal del estudio estuvo conformada por los venenos de *Micrurus*, obtenidos y caracterizados previamente por la Universidad de Antioquia. Además, se prepararon soluciones biopoliméricas utilizando gelatina tipo A como macromolécula, glicerol como plastificante y agua destilada como medio de disolución. Se emplearon diferentes concentraciones de gelatina para evaluar su impacto en la estabilidad estructural de las películas antes de la incorporación del veneno. La concentración de veneno utilizada correspondió a una única formulación (0,06 mg/mL), definida y suministrada por la Universidad de Antioquia, la

cual se fundamenta en estudios previos de concentración mínima inhibitoria (CMI) frente a hongos de interés agroindustrial.

Preparación de las Soluciones Biopoliméricas

Se realizaron pruebas exploratorias con el objetivo de definir la formulación base que facilitara la solubilización y dispersión de los compuestos bioactivos. Para ello, se prepararon soluciones con concentraciones de gelatina de 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 %, empleando glicerol al 0,5 % como plastificante. El procedimiento consistió en la hidratación de la gelatina en agua destilada durante 30 minutos a temperatura ambiente, seguida de solubilización en baño maría a 50 °C durante otros 30 minutos. Posteriormente, se incorporó el glicerol y se homogenizó la mezcla con agitación magnética (Reyes et al., 2021).

Cada solución se ajustó hasta un peso final de 25 g. De este volumen, se distribuyeron 10 g en cajas de Petri de 5,5 cm de diámetro, obteniendo dos películas por formulación. Las cajas se dejaron secar a temperatura ambiente (20 °C) hasta la formación completa de las películas.

Evaluación Estructural Preliminar de las Películas

Las películas obtenidas con diferentes concentraciones de gelatina (0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 %) fueron secadas a temperatura ambiente durante 8 días. Este procedimiento permitió seleccionar las formulaciones con mejores características de estabilidad física y mecánica para su posterior uso.

Incorporación de los Compuestos Bioactivos del Veneno de *Micrurus*

Con base en la formulación seleccionada, se preparó una solución con 1,00 % de gelatina y se incorporó veneno de *Micrurus* en concentración de 0,06 mg/mL. La preparación siguió el mismo procedimiento de solubilización y homogenización descrito anteriormente. Las películas obtenidas fueron secadas a temperatura ambiente durante 8 días antes de su caracterización.

Caracterización Fisicoquímica de las Películas Biopoliméricas

Aspecto Visual y Opacidad (OPA)

Se inspeccionó visualmente la superficie de las películas para verificar la presencia de burbujas o aglomerados. La opacidad se determinó con un espectrofotómetro UV-Visible (UviLine 9600, SECOMAM). El espesor de cada muestra se midió en tres puntos, y las películas se cortaron (12 × 40 mm) para colocarlas en la celda de medición. Las lecturas se realizaron a 600 nm y la opacidad se calculó con la siguiente ecuación:

$$Opa = \frac{A}{X}$$

Donde A es la absorbancia a 600 nm y x el promedio del espesor de las películas (mm).

Análisis de Color

El color de las películas biopoliméricas fue determinado utilizando un colorímetro CR-400 (Konica Minolta), previamente calibrado con el patrón blanco estándar suministrado por el fabricante. Las mediciones se realizaron directamente sobre dicho patrón, registrando los parámetros de la escala CIELab: L* (luminosidad), a* (eje verde-rojo) y b* (eje azul-amarillo). Para cada formulación se realizaron tres mediciones en diferentes puntos de la película y se reportaron los resultados, siguiendo la metodología descrita por Reyes et al. (2021) y Said et al. (2022).

La diferencia total de color (ΔE^*) se calculó réplica por réplica mediante la fórmula:

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

Tomando como muestra patrón la formulación de 1,00 % de gelatina (F₂), cuyos valores promedio fueron utilizados como referencia cromática, bajo el modelo CIELab (ΔE^*_{ab}). Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico mediante ANOVA y prueba de comparación de medias de Fisher (LSD), con un nivel de significancia de $p < 0,05$, siguiendo las

recomendaciones de caracterización cromática en materiales biopoliméricos (Gómez-Estaca et al., 2009; Espinoza-Acosta et al., 2023; Coyotl-Pérez et al., 2023).

Barrera a la Luz UV-Visible

Las propiedades de barrera a la luz ultravioleta y visible se determinaron empleando un espectrofotómetro UV-Vis (UviLine 9600, SECOMAM, Alemania), siguiendo la metodología descrita por Reyes et al. (2021). Las películas fueron cortadas (12×40 mm) y ubicadas en la celda de medición para permitir el paso del haz de luz. Las mediciones se realizaron en un rango de longitud de onda entre 200 y 800 nm.

Propiedades Físicas (Espesor, Humedad y Solubilidad)

El espesor de las películas se midió con micrómetro digital después de 8 días de secado. La humedad residual de las películas se determinó mediante una balanza de humedad *Precisa XM50* con el fin de evaluar la retención de agua tras el proceso de secado.

La solubilidad (S) de las películas en agua se determinó después de 24 horas de inmersión. Las muestras (rectángulos de ~ 1 cm), fueron inmersas en agua destilada (20 mL) por un periodo de 24 horas a ± 20 °C. Posteriormente, fueron sometidas a secado (24 horas, 105 °C) para determinar la masa seca final de la muestra (m_f). El peso inicial de la muestra fue determinado conociendo la humedad de la misma (Reyes Méndez et al., 2023). La solubilidad es expresada en términos de materia seca disuelta y calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%MS = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Donde, $\%MS$ es el porcentaje de material solubilizado (g/100 g de la película), m_i es la masa (g) inicial de la muestra y m_f es la masa (g) seca de la muestra.

Análisis en el Infrarrojo (FTIR) de Películas

El análisis de las películas biopoliméricas se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrofotómetro FT/IR-4X de la marca JASCO, equipado con un accesorio ATR (Reflectancia Total Atenuada) de un solo rebote. Se analizaron películas elaboradas con distintas concentraciones de gelatina (0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 %), así como una formulación adicional con gelatina al 1 % y veneno de *Micrurus* a una concentración de 0,06 mg/mL. Las muestras se colocaron directamente sobre el cristal del accesorio ATR, aplicando presión manual para garantizar un buen contacto.

Los espectros se registraron en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} con una resolución espectral adecuada para la identificación de grupos funcionales.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico se realizó en un equipo TGA PT 1000 (LINSEIS). Las muestras fueron calentadas desde 30 °C hasta 750 °C a una velocidad de 10 °C/min en una atmósfera inerte de nitrógeno.

Evaluación de la Actividad Biológica de las Películas en la Conservación de Alimentos

Aplicación del Recubrimiento en Frutos Frescos

Los recubrimientos al 1% de gelatina con y sin veneno, fueron aplicados mediante el uso de un pincel sobre uva isabella (*Vitis labrusca*). Se almacenaron a temperatura ambiente ($\pm 20^\circ\text{C}$) y se evaluó su efecto en la conservación del producto a lo largo de 23 días (Reyes et al., 2021). Frutos sin recubrimiento se utilizaron como control.

Evaluación del Aspecto Visual y Pérdida de Peso

Se registraron cambios en el aspecto de los frutos mediante inspección visual periódica. La pérdida de peso fue calculada comparando el peso inicial (W_i) con el peso en cada intervalo de tiempo (W_t), utilizando la ecuación:

$$\Delta W = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100$$

Análisis Estadístico de los Resultados

Los datos obtenidos en las pruebas fisicoquímicas, mecánicas y microbiológicas fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA). Se utilizó la prueba de comparación de Fisher con un nivel de confianza del 95%, empleando el software STATISTICA® v.8.0 para el procesamiento y análisis de los datos.

Resultados y Discusión

Evaluación de las Formulaciones Biopoliméricas

Preparación de Películas y Selección de Formulaciones Base

Para determinar la estabilidad y viabilidad de las películas biopoliméricas antes de la adición del veneno de *Micrurus*, se formularon soluciones con diferentes concentraciones de gelatina y glicerol como plastificante. La selección de las concentraciones de gelatina se basó en recomendaciones previas de la Universidad de Antioquia, donde se observó que el uso de 2 g de gelatina no permitía la correcta incorporación del veneno en la matriz polimérica, lo que llevó a reducir la concentración de este biopolímero en las formulaciones experimentales. Las concentraciones utilizadas en los ensayos sin veneno y el espesor promedio obtenido para cada formulación se detallan en la Tabla 1.

Las soluciones preparadas mostraron diferencias en su viscosidad y fluidez en función de la concentración de gelatina utilizada. En concentraciones bajas ($\leq 0.50\%$), las soluciones presentaron menor viscosidad y mayor fluidez, mientras que en concentraciones más altas ($\geq 1.00\%$) se observó un aumento en la viscosidad, lo que indicaba una mayor estabilidad estructural. Estos resultados coinciden con estudios previos que han demostrado que la concentración de biopolímeros influye en la cohesión de la red tridimensional de las películas y en su resistencia mecánica (Reyes et al., 2021; Bonilla y Sobral, 2016).

Una vez obtenidas las soluciones formadoras de película, se procedió al secado de las formulaciones a temperatura ambiente durante 8 días. Posteriormente, se evaluó la estabilidad estructural de las películas y su espesor. Se observó que las formulaciones con 0.25% y 0.50% de gelatina (F₁ y F₂) no fueron viables, ya que las películas resultantes eran frágiles y se rompían fácilmente al ser manipuladas. En contraste, las formulaciones con 0.75%, 1.00% y 1.50% de

gelatina (F₃, F₄ y F₅) lograron formar películas con mayor cohesión y estabilidad, permitiendo su caracterización posterior.

El espesor de las películas fue evaluado tras el periodo de secado de 8 días, observándose una relación directa entre la concentración de gelatina y el grosor de la película obtenida. La formulación con 1,50 % de gelatina presentó el mayor espesor promedio ($0,0558 \pm 0,00148$ mm), mientras que las formulaciones con 0,75 % y 1,00 % registraron valores de $0,0434 \pm 0,00185$ mm y $0,0426 \pm 0,00316$ mm, respectivamente.

Estos resultados sugieren que una mayor concentración de gelatina favorece la formación de películas más gruesas y estructuralmente más resistentes. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios previos sobre biopolímeros, donde se ha demostrado que el aumento de la concentración de gelatina contribuye a una red polimérica más densa, lo que incrementa el espesor y la resistencia mecánica del material (Sobral et al., 2001; Reyes et al., 2023).

Tabla 1

Espesor Promedio por Formulación Ensayos Sin Veneno

Formulación*	Concentración De Gelatina (%)	Espesor Promedio (mm)
F ₁ *	0,25%	No viable
F ₂ *	0,50%	No viable
F ₃ *	0,75%	$0,0434 \pm 0,002^a$
F ₄ *	1,00%	$0,0440 \pm 0,003^a$
F ₅ *	1,50%	$0,0542 \pm 0,001^a$

Nota. Los valores corresponden al promedio de tres mediciones \pm desviación estándar (DS).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de Fisher (LSD). Las formulaciones marcadas con asterisco (*) corresponden a los ensayos sin veneno; aunque posteriormente se ajustaron las concentraciones en los ensayos con

veneno, se mantuvo la misma nomenclatura (F₁, F₂, etc.) para asegurar la trazabilidad. La concentración de gelatina indicada es la referencia clave en cada tratamiento. Elaboración propia.

Incorporación del Veneno y Espesor de las Películas

Tras identificar las formulaciones con mejor estabilidad estructural, se seleccionó la formulación con 1,00 % de gelatina para la adición del veneno de *Micrurus* en una concentración de 0,06 mg/mL. La solución con veneno fue preparada siguiendo el mismo protocolo de las formulaciones previas y se dejó secar durante 8 días para evaluar su estabilidad estructural.

Características Físicoquímicas de las Películas Biopoliméricas

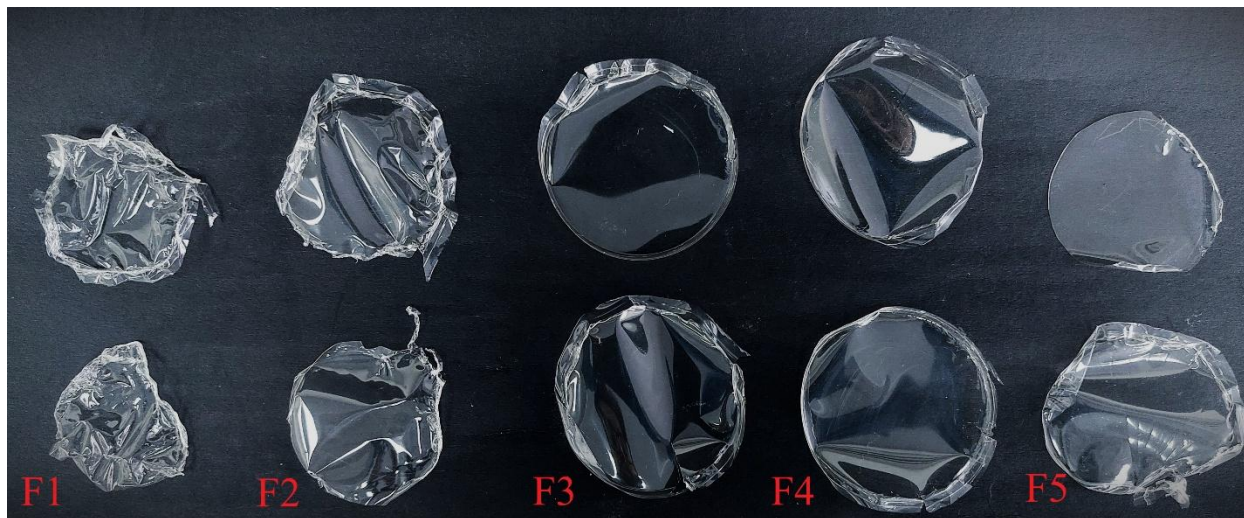
Aspecto Visual

Se evaluó el aspecto visual de las películas biopoliméricas formuladas con diferentes concentraciones de gelatina, incluyendo una formulación bioactiva con veneno de *Micrurus*, con el propósito de analizar su estructura superficial, transparencia, homogeneidad y comportamiento físico post-secado. Esta evaluación permite identificar la influencia del contenido de gelatina y la presencia de compuestos bioactivos sobre las propiedades macroscópicas de las películas.

La Figura 8 presenta las películas obtenidas a partir de cinco formulaciones: cuatro sin veneno (F₁ a F₄) con concentraciones crecientes de gelatina, y una formulación (F₅) que incorpora veneno. Cada tratamiento se replicó dos veces para confirmar la uniformidad del proceso.

Figura 8

Aspecto Visual de Películas Biopoliméricas con Diferentes Concentraciones de Gelatina y Una Formulación con Veneno de Micrurus



Nota: F₁: 0,75 % gelatina; F₂: 1 % gelatina; F₃: 1,5 % gelatina; F₄: 2% gelatina; F₅: 1% gelatina + veneno. Laboratorio LIDA, 2025.

Se observaron diferencias notables en textura, rigidez y homogeneidad entre las formulaciones. Las películas F₁ y F₂, con menor concentración de gelatina (0,75 % y 1 %), presentaron bordes irregulares, arrugas visibles y zonas frágiles. Estas características sugieren que, en concentraciones bajas, la matriz proteica no alcanza la cohesión suficiente para formar estructuras continuas, lo que compromete su estabilidad mecánica y apariencia visual. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Peña-Rodríguez et al. (2014), quienes señalaron que la estabilidad estructural de las películas a base de gelatina está altamente influenciada por la concentración del polímero.

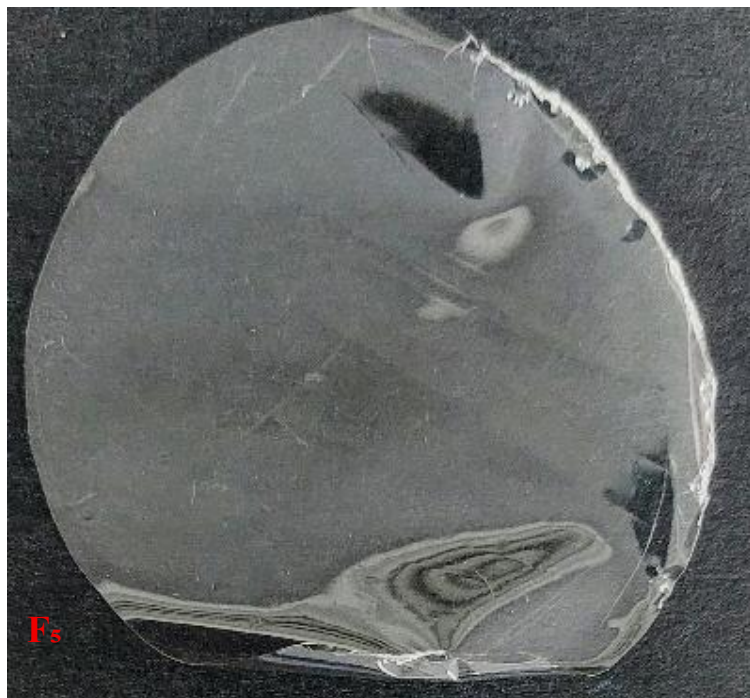
En contraste, las formulaciones F₃ (1,5 %) y F₄ (2 %) generaron películas con superficie más lisa, continua y transparente, reflejando una mayor densidad de red polimérica y una mejor distribución del material durante el secado. Este efecto puede atribuirse a un mayor número de

puntos de interacción entre las cadenas de gelatina, lo que reduce la contracción irregular y mejora la estabilidad dimensional, como también lo señalan Galus y Lenart (2013) en sus estudios sobre películas comestibles.

La formulación F₅ (1 % gelatina + veneno de *Micrurus*) mostró un comportamiento intermedio: aunque presentó una superficie relativamente continua, los bordes fueron más quebradizos y en ciertas zonas se observaron zonas delgadas y frágiles. Esta alteración en la integridad física podría estar relacionada con interacciones moleculares entre los péptidos o proteínas del veneno y las cadenas de gelatina, afectando la conformación tridimensional de la película. Para profundizar en este análisis, se presenta en la Figura 9 un detalle ampliado de la película F₅.

Figura 9

Película Seca Elaborada con Gelatina Al 1 % y Veneno de Micrurus



Nota: Fotografía de la película obtenida a partir de la formulación F₅: 1 % + V_n, donde se observa su textura superficial, uniformidad estructural y transparencia. Esta película corresponde

a la misma composición que fue aplicada mediante pincel sobre los frutos durante el ensayo de conservación.

Aunque la formulación con veneno de *Micrurus* no evidenció diferencias visuales marcadas frente a las demás películas, es probable que esto se deba a la baja concentración del extracto bioactivo (0,06 mg/mL), la cual no fue suficiente para generar alteraciones morfológicas perceptibles a simple vista. La película mostró un aspecto superficial comparable al de la formulación base sin veneno, lo que sugiere que la incorporación del compuesto no interfirió de forma significativa en la formación de la matriz polimérica. No obstante, esto no excluye la posibilidad de que hayan ocurrido interacciones moleculares que no se manifiesten visualmente, por lo que es necesario considerar otros niveles de análisis para evaluar su impacto estructural o funcional.

Análisis de Color de las Películas Biopoliméricas

Los valores de color (L^* , a^* y b^*) de las películas elaboradas con diferentes concentraciones de gelatina y con la adición de veneno de *Micrurus* se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Valores de Color (L^ , A^* , B^*) y Diferencia Total de Color (ΔE^*) de Películas Biopoliméricas de Gelatina a Diferentes Concentraciones y Con Adición de Veneno de *Micrurus**

Formulación (F)	L^* (luminosidad)	a^* (verde-rojo)	b^* (azul-amarillo)	ΔE^*
F ₁ (0,75%)	93,29 ± 0,54 ^a	-0,26 ± 0,02 ^a	4,76 ± 0,19 ^a	0,37 ± 0,30 ^a
F ₂ (1,00%)	93,02 ± 0,95 ^a	-0,25 ± 0,04 ^a	5,02 ± 0,14 ^a	(M. Patrón)
F ₃ (1,50%)	92,70 ± 1,72 ^a	-0,37 ± 0,04 ^b	5,73 ± 0,36 ^b	0,79 ± 0,31 ^a
F ₄ (2,00%)	93,15 ± 0,25 ^a	-0,38 ± 0,03 ^b	5,69 ± 0,03 ^b	0,69 ± 0,13 ^a
F ₅ (1% + Veneno)	93,36 ± 0,25 ^a	-0,40 ± 0,04 ^b	6,02 ± 0,30 ^b	1,07 ± 0,34 ^a

Nota: Los valores corresponden al promedio de tres mediciones ± desviación estándar (DS).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la

prueba de Fisher (LSD). L^* : luminosidad; a^* : eje verde-rojo; b^* : eje azul-amarillo; ΔE^* : diferencia total de color tomando como muestra patrón la formulación F_2 (1,00 % gelatina).

Todas las películas mostraron valores elevados de luminosidad ($L^* > 92$), lo que indica superficies claras y homogéneas, sin diferencias significativas entre formulaciones ($p > 0,05$). De acuerdo con Said et al. (2022), valores altos de L^* en películas de gelatina reflejan una apariencia brillante y uniforme, lo cual coincide con lo observado en este estudio.

El parámetro a^* presentó valores negativos cercanos a cero, reflejando una ligera tendencia hacia el verde. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$): las películas con menor concentración de gelatina (0,75 % y 1,00 %) se agruparon en “a”, mientras que aquellas con mayor concentración (1,50 % y 2,00 %) y la formulación con veneno se agruparon en “b”. Estos resultados coinciden con lo reportado por Reyes et al. (2021), quienes señalan que la incorporación de compuestos bioactivos en matrices biopoliméricas puede inducir variaciones cromáticas, aunque no siempre sean perceptibles a simple vista.

En cuanto al parámetro b^* , los valores fueron positivos (4,76–6,02), indicando una ligera tonalidad amarilla propia de las matrices proteicas (Alexandre et al., 2016). Hubo diferencias significativas ($p < 0,05$): las películas de 0,75 % y 1,00 % de gelatina se agruparon en “a”, mientras que las de 1,50 % y 2,00 % y la de 1 % con veneno se agruparon en “b”. El incremento de b^* en la formulación con veneno ($6,02 \pm 0,30$) sugiere que la presencia de proteínas y péptidos bioactivos intensificó la tonalidad amarilla, como también lo reportan Coyotl-Pérez et al. (2023) en películas enriquecidas con aditivos naturales.

Respecto al ΔE^* , los valores oscilaron entre 0,37 y 1,07, sin diferencias significativas entre formulaciones ($p < 0,05$). Esto indica que las variaciones cromáticas globales fueron poco o nada perceptibles al ojo humano. F_3 (1,50 %) y F_5 (1 % + veneno) presentaron los valores más

altos ($\approx 0,8$ y $1,1$), considerados apenas perceptibles, aunque estadísticamente similares al resto de tratamientos. Resultados similares han sido reportados en películas biopoliméricas donde los cambios de ΔE^* se mantienen en rangos bajos y, por tanto, no representan diferencias perceptibles relevantes (Gómez-Estaca et al., 2009; Espinoza-Acosta et al., 2023; Coyotl-Pérez et al., 2023). En términos prácticos, dado que todos los valores de ΔE^* fueron menores a 2, las diferencias cromáticas entre películas no resultan perceptibles a simple vista.

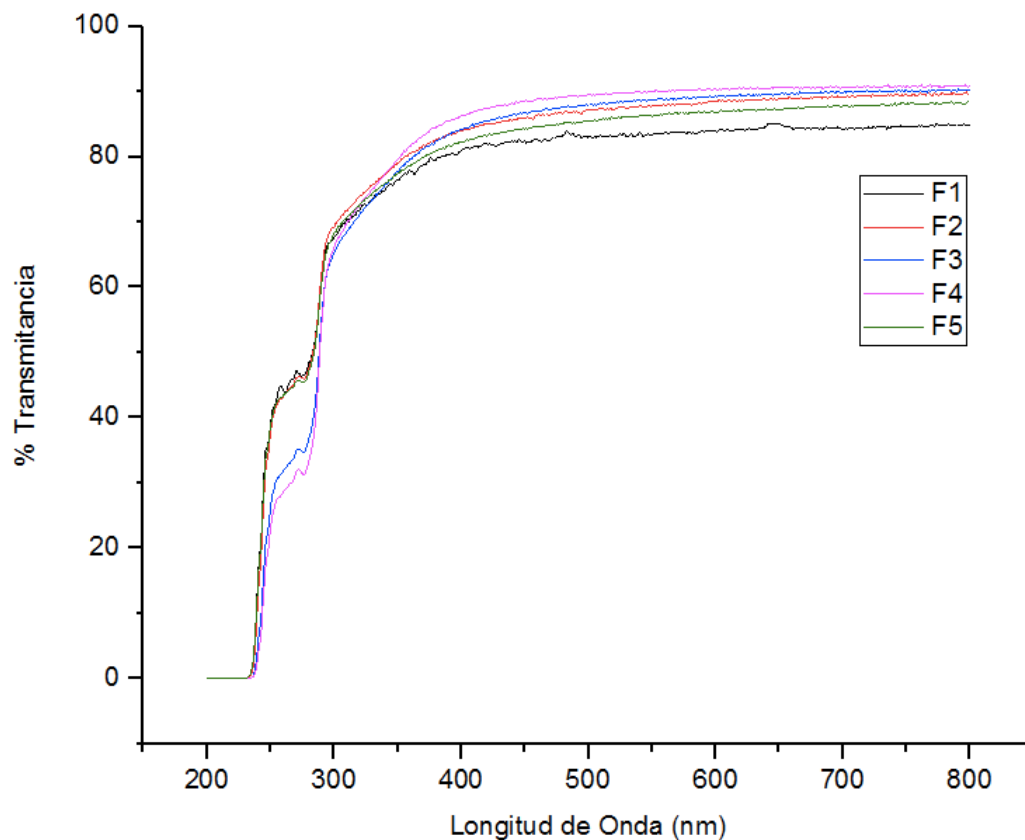
La incorporación del veneno no afecta la claridad de las películas (L^*), incrementa de manera significativa la tonalidad amarilla (b^*), pero no modifica el color global de forma relevante (ΔE^*), manteniendo características visuales adecuadas para aplicaciones en recubrimientos comestibles y empaques biodegradables.

Resultados UV-Visible (Barrera a la Luz)

La Figura 10 muestra los espectros de transmitancia obtenidos mediante espectroscopía UV-visible para las cinco formulaciones de películas biopoliméricas evaluadas. Los análisis se realizaron en el rango de 200 a 800 nm con el fin de determinar la capacidad de cada formulación para bloquear la radiación en distintas longitudes de onda.

Figura 10

Transmitancia UV-Visible de Películas Biopoliméricas con Diferentes Concentraciones de Gelatina y Veneno



Nota. Espectros de transmitancia en el rango 200–800 nm para las formulaciones F₁ (0,75 %), F₂ (1 %), F₃ (1,5 %), F₄ (2 %) y F₅ (1 % gelatina + veneno de *Micrurus*). Se observa una baja transmitancia en la región UV por debajo de los 260 nm, con un aumento progresivo en el rango visible. La formulación F₁ mostró la menor transmitancia general, mientras que F₄ presentó los valores más altos.

En la región UV (200–300 nm), las películas mostraron bajos valores de transmitancia, especialmente por debajo de los 260 nm, donde las curvas se ubican entre el 0 % y el 40 %. Este comportamiento refleja una mayor absorción de radiación en esta zona del espectro, lo cual es

relevante para aplicaciones de conservación de alimentos o formulaciones bioactivas sensibles a la luz. A partir de los ~270–300 nm, se observa un aumento progresivo en la transmitancia, alcanzando valores superiores al 80 % desde aproximadamente 350 nm en adelante, en el espectro visible.

La formulación F₁ (0.75 % gelatina) presentó la menor transmitancia en casi todo el rango, lo que sugiere una mayor opacidad relacionada con su estructura superficial menos homogénea. En contraste, la formulación F₄ (2 %) mostró los valores más altos, indicando una película más clara y posiblemente más uniforme. A medida que aumenta la concentración de gelatina de F₁ a F₄, se evidencia una tendencia general al incremento en la transmitancia, lo cual puede atribuirse a una mejor formación de la matriz.

En el caso de la formulación F₅ (1 % gelatina + veneno), su curva de transmitancia se mantuvo por debajo de la de F₂ (1 % sin veneno), especialmente en la región UV. Esto sugiere que el veneno de *Micrurus* puede tener una ligera influencia en la absorción de radiación ultravioleta, posiblemente por la presencia de compuestos proteicos o peptídicos con estructuras que interactúan con la luz.

Desde el punto de vista óptico, la relación entre transmitancia (T) y absorbancia (A) se puede expresar mediante la ecuación:

$$A = \log_{10}(1/T)$$

lo cual implica que, a mayor transmitancia, menor absorbancia, y viceversa. En este contexto, películas más claras y homogéneas (como F₃ o F₄) presentan menor densidad óptica, mientras que aquellas con mayor dispersión o absorción, como F₁ y F₅, muestran una opacidad relativa más alta.

Estos resultados permiten afirmar que el comportamiento óptico de las películas está condicionado tanto por la concentración del biopolímero como por la incorporación de compuestos bioactivos, y que este tipo de análisis aporta información clave sobre su potencial uso como recubrimientos protectores frente a la radiación.

Resultados Opacidad (OPA)

La opacidad de las películas se determinó a partir de la absorbancia a 600 nm y el espesor promedio de cada formulación (Tabla 3). Este parámetro refleja la capacidad de los materiales para reducir la transmitancia de la luz visible, aspecto relevante en aplicaciones de empaques que buscan proteger los alimentos frente a la radiación (Gómez-Estaca et al., 2009; Espinoza-Acosta et al., 2023).

Tabla 3

Espesor, Absorbancia y Opacidad de Películas Biopoliméricas con Diferentes Formulaciones

Formulación	Espesor promedio (mm)	Absorbancia a 600 nm	Opacidad (A/X)
F ₁ (0,75 %)	0,0434 ± 0,002 ^a	0,0510 ± 0,0010 ^a	1,18 ± 0,06 ^{ab}
F ₂ (1,00 %)	0,0440 ± 0,003 ^a	0,0540 ± 0,0026 ^a	1,23 ± 0,10 ^a
F ₃ (1,50 %)	0,0542 ± 0,001 ^b	0,0543 ± 0,0025 ^a	1,00 ± 0,05 ^b
F ₄ (2,00 %)	0,0732 ± 0,004 ^c	0,0460 ± 0,0010 ^b	0,63 ± 0,04 ^c
F ₅ (1% + Veneno)	0,0480 ± 0,007 ^a	0,0600 ± 0,0030 ^c	1,25 ± 0,19 ^b

Nota: Los valores corresponden al promedio de tres mediciones ± desviación estándar (DS).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de Fisher (LSD). La absorbancia corresponde al valor medido a 600 nm, y la opacidad (A/X) se calculó como la relación entre absorbancia y espesor.

La absorbancia mostró diferencias significativas ($p < 0,05$). La formulación con veneno (F₅) presentó el valor más alto (0,0600 ± 0,0030), mientras que la de 2,0 % de gelatina (F₄) registró el más bajo (0,0460 ± 0,0010). Esto sugiere que la adición de proteínas y péptidos

bioactivos incrementa la interacción de la matriz con la radiación incidente, en concordancia con lo reportado para sistemas biopoliméricos funcionalizados (Reyes et al., 2021; Bedoya-Medina et al., 2019).

En cuanto a la opacidad, los valores oscilaron entre 0,63 y 1,25. La formulación F₅ (1 % + veneno) fue la más opaca ($1,25 \pm 0,19^b$), seguida de F₂ ($1,23 \pm 0,10^a$) y F₁ ($1,18 \pm 0,06^{ab}$). La formulación F₃ ($1,00 \pm 0,05^b$) presentó un valor intermedio, mientras que F₄ ($0,63 \pm 0,04^c$) fue la más transparente, coherente con su baja absorbancia y con los espectros de transmitancia UV-Vis. El análisis estadístico (ANOVA de un factor + Fisher LSD, $p < 0,05$) confirmó estas diferencias, ubicando a F₂ como el tratamiento con mayor opacidad, a F₄ como el más bajo y al resto de formulaciones en posiciones intermedias, con diferencias significativas entre ellas.

Estos resultados son consistentes con lo señalado por Alexandre et al. (2016) y Coyotl-Pérez et al. (2023), quienes reportaron que la opacidad de películas proteicas depende no solo del espesor, sino también de la organización interna de la matriz y de la incorporación de compuestos bioactivos. En conjunto, los datos evidencian que la opacidad no está determinada únicamente por la concentración de gelatina, sino también por la microestructura del material y la presencia de biomoléculas externas, que pueden modificar sus propiedades ópticas y su potencial funcional como material de empaque.

Contenido de Humedad, Espesor y Solubilidad de las Películas Biopoliméricas

La Tabla 4 resume los valores promedio de espesor, contenido de humedad y solubilidad de las películas elaboradas con distintas concentraciones de gelatina, incluyendo una formulación adicional con veneno de *Micrurus* a una concentración de 0,06 mg/mL (F₅). Estos parámetros son fundamentales para caracterizar la estabilidad estructural y la funcionalidad de las películas

en condiciones de almacenamiento, especialmente si se busca su uso como recubrimiento protector en alimentos.

Espesor Promedio de las Películas

El espesor de las películas aumentó progresivamente con la concentración de gelatina. F₄ (2,00 %) presentó el valor más alto ($0,0732 \pm 0,004$ mm), seguido por F₃ (1,50 %) con $0,0542 \pm 0,001$ mm. En formulaciones con concentraciones menores, como F₁ (0,75 %) y F₂ (1,00 %), los valores disminuyeron a $0,0434 \pm 0,002$ mm y $0,0440 \pm 0,003$ mm, respectivamente. Este comportamiento está directamente relacionado con la cantidad de sólidos presentes en la solución formadora de película (SFP), lo que influye en la viscosidad y en el grosor final de la capa depositada sobre los moldes.

En el caso de la formulación F₅ (1,00 % + veneno), se registró un espesor promedio de $0,0480 \pm 0,007$ mm, levemente superior al de F₂, a pesar de tener la misma concentración de gelatina. Este aumento podría deberse a interacciones entre el veneno y la matriz proteica durante el secado, generando una estructura más expandida. No obstante, según la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0,05$), no se detectaron diferencias significativas entre F₅, F₂ y F₁, lo cual indica que la incorporación del veneno no afecta de forma sustancial la formación estructural de la película ni su estabilidad dimensional.

Contenido de Humedad de las Películas

Las películas fueron secadas de forma uniforme durante 8 días a temperatura ambiente en condiciones de laboratorio antes de su análisis ($\pm 20^\circ$ C y 58 % HR). El contenido de humedad disminuyó conforme aumentó la concentración de gelatina, pasando de $9,15 \pm 0,11$ % en F₁ a $8,12 \pm 0,18$ % en F₄. Esta tendencia se atribuye a la mayor densidad de enlaces en la red

polimérica de formulaciones más concentradas, que reduce el espacio disponible para retener agua libre o ligada débilmente.

La formulación F₅ presentó un valor intermedio de $8,73 \pm 0,05$ %, muy cercano al de F₂ ($8,82 \pm 0,16$ %). Ambos valores fueron estadísticamente similares (letra “b”), lo que refuerza la hipótesis de que el veneno de *Micrurus* no altera significativamente la higroscopicidad del sistema. Los resultados concuerdan con lo reportado por Sobral et al. (2001) y Reyes et al. (2021), quienes concluyen que las películas más densas presentan menor contenido de humedad y, por ende, mayor estabilidad mecánica.

Adicionalmente, las diferencias estadísticas observadas entre F₁ (letra “c”) y F₃-F₄ (letra “a”) sugieren que el tipo de interacción molecular en las formulaciones más diluidas propicia una mayor retención de agua. Esto puede tener implicaciones importantes en la funcionalidad del recubrimiento, especialmente en cuanto a su susceptibilidad al deterioro por humedad ambiental.

Porcentaje de Solubilidad de las Películas

Los resultados mostraron una disminución clara en la solubilidad con el aumento en la concentración de gelatina (Tabla 4). La formulación F₁ (0,75 %) presentó el valor más alto ($28,34 \pm 1,45$ %), mientras que F₄ (2,00 %) fue la menos soluble ($22,71 \pm 1,99$ %). Esta tendencia concuerda con lo reportado en la literatura para matrices a base de gelatina, donde un mayor contenido de polímero favorece redes más densamente entrecruzadas que limitan la penetración del agua y reducen la solubilidad (Sobral et al., 2001; Gómez-Estaca et al., 2009; Reyes et al., 2021).

La formulación con veneno (F₅) mostró un valor intermedio de $26,52 \pm 1,33$ %, estadísticamente similar a F₂ (1,00 %) y F₃ (1,50 %). Esto sugiere que la incorporación del veneno de *Micrurus* no comprometió la integridad estructural de la película ni aumentó su

susceptibilidad a la disolución acuosa, atributo deseable en aplicaciones donde se requiere mantener la forma y funcionalidad durante cierto tiempo (p. ej., recubrimientos comestibles).

Los valores más bajos en F₃ y F₄ también podrían asociarse con una mayor compactación estructural y formación de enlaces cruzados, fenómeno descrito en películas proteicas donde el incremento del orden interno se traduce en mayor resistencia y menor solubilidad (Alexandre et al., 2016; Ndlovu et al., 2021; Mercan, 2024).

Tabla 4

Valores Medios de Contenido de Humedad y Solubilidad de las Películas Biopoliméricas (Ensayos Con Veneno)

Formulación (F)	Humedad (%)	Solubilidad (%)
F ₁ (0,75 %)	9,15 ± 0,11 ^c	28,34 ± 1,45 ^b
F ₂ (1,00 %)	8,82 ± 0,16 ^b	26,14 ± 1,61 ^{ab}
F ₃ (1,50 %)	8,38 ± 0,19 ^a	25,05 ± 0,83 ^{ac}
F ₄ (2,00 %)	8,12 ± 0,18 ^a	22,71 ± 1,99 ^c
F ₅ (1% + Veneno)	8,73 ± 0,05 ^b	26,52 ± 1,33 ^{ab}

Nota: Los valores corresponden al promedio de tres mediciones ± desviación estándar (DS).

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de Fisher (LSD). La formulación F₅ contiene veneno de *Micrurus* en una concentración de 0,06 mg/mL y fue elaborada bajo las mismas condiciones experimentales que el resto de las formulaciones.

Análisis Espectroscópico FTIR de las Películas Biopoliméricas

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una herramienta fundamental para el estudio de materiales poliméricos, ya que permite identificar los grupos funcionales presentes y detectar posibles interacciones químicas entre los componentes de una matriz. En sistemas biopoliméricos basados en gelatina, las bandas características asociadas a

estructuras amídicas y grupos hidroxilo permiten determinar el grado de orden, interacción entre cadenas y posibles modificaciones estructurales debidas a la incorporación de compuestos bioactivos (Alvarez-Ramirez et al., 2020; Sobral et al., 2001).

En este estudio, se analizaron los espectros FTIR de películas con distintas concentraciones de gelatina (0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 %), así como una formulación con gelatina al 1 % que incorporó veneno de *Micrurus* a una concentración de 0,06 mg/mL. El objetivo fue determinar si existen cambios atribuibles a la variación de concentración del biopolímero y a la inclusión del veneno en la matriz. Las señales más representativas de cada formulación y su asignación a grupos funcionales se resumen en la Tabla 5, lo cual permitió identificar tanto los picos característicos de la gelatina como las posibles contribuciones del veneno de *Micrurus*.

Tabla 5

Identificación de Señales Características en los Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas con y sin Veneno de Micrurus

Número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de señal	Grupo funcional	Compuesto asociado
3280-3300	Estiramiento N-H	Amida A	Estructura proteica de la gelatina
3050-3100	Estiramiento C-H	Aromáticos	Presente en aminoácidos aromáticos
2900-2950	Estiramiento asimétrico C-H	Metileno (-CH ₂ -)	Componentes lipídicos
1600-1650	Estiramiento C=O	Amida I	Proteínas de gelatina y posibles proteínas del veneno

1500-1550	Flexión N-H y estiramiento C-N	Amida II	Proteínas de gelatina y posibles proteínas del veneno
1400-1460	Flexión asimétrica y simétrica C-H	Metileno y metilo (-CH ₂ -, -CH ₃)	Componentes lipídicos
1200-1250	Estiramiento C-N y flexión N-H	Amida III	Proteínas de gelatina y posibles proteínas del veneno
1050-1100	Estiramiento C-O	Alcoholes y carbohidratos	Compuestos presentes en la gelatina
950-980	Estiramiento P=O	Fosfoproteínas y fosfolípidos	Componentes del veneno de <i>Micrurus</i>
900-930	Estiramiento P-O-C	Fosfolípidos	Componentes del veneno de <i>Micrurus</i>
850-880	Flexión fuera del plano C-H	Aromáticos sustituidos	Componentes aromáticos

Nota: Elaboración propia con base en los espectros obtenidos y literatura consultada (Alvarez-Ramirez et al., 2020; Alexandre et al., 2016; Sobral et al., 2001).

La Figura 11 presenta los espectros FTIR de las películas formuladas con cuatro concentraciones distintas de gelatina (0,75 %, 1,00 %, 1,50 % y 2,00 %). Se observan bandas comunes en todos los tratamientos, con ligeras variaciones en intensidad.

Una banda ancha en la región 3274,5 cm⁻¹ corresponde al estiramiento N-H y O-H (Amida A), asociada a enlaces de hidrógeno entre cadenas de gelatina y al contenido de humedad residual, tal como se ha descrito en estudios previos (Sobral et al., 2001; Alexandre et al., 2016). Su intensidad disminuye con el aumento en la concentración de gelatina, lo que sugiere una mayor densificación de la red y menor disponibilidad de grupos libres.

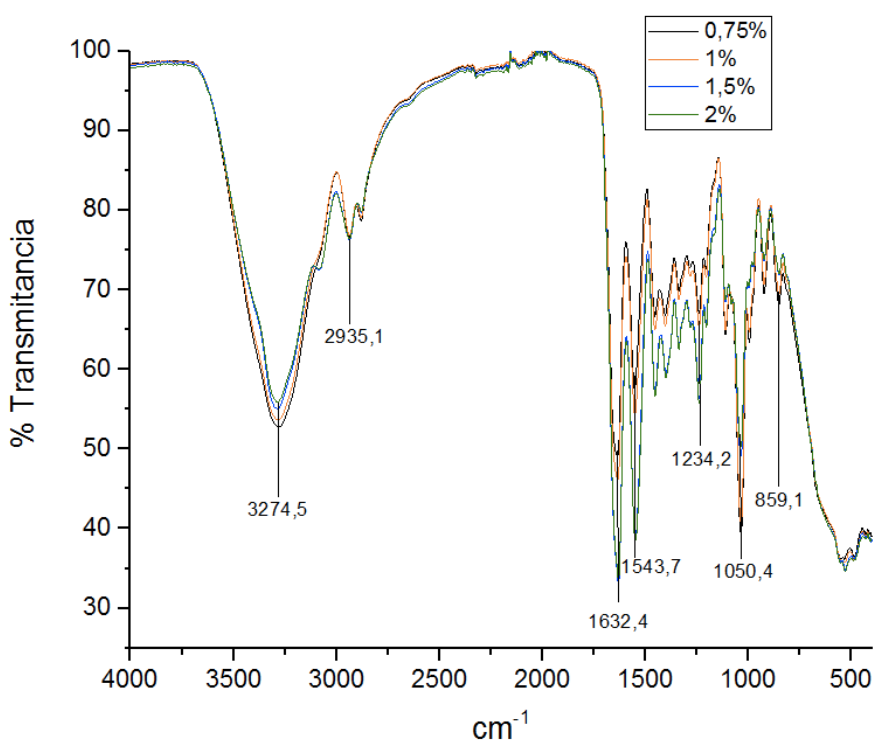
La banda en 2935,1 cm⁻¹ se relaciona con el estiramiento C-H de grupos metileno (-CH₂-), característicos de cadenas laterales alifáticas (Gómez-Estaca et al., 2009). Entre 1632,4 y 1543,7 cm⁻¹ se ubican las bandas más intensas, correspondientes a Amida I (C=O) y Amida II

(N–H y C–N), que confirman la preservación de la estructura proteica de la gelatina (Álvarez-Ramírez et al., 2020; Mercan, 2024).

Asimismo, las señales en 1234,2, 1050,4 y 859,1 cm^{-1} corresponden a Amida III, estiramientos C–O y modos vibracionales de anillos aromáticos, respectivamente, en concordancia con lo reportado para matrices proteicas (Sobral et al., 2001; Alexandre et al., 2016).

Figura 11

Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas Sin Veneno, Formuladas con Concentraciones de Gelatina de 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % Y 2,00 %



Nota: Todas las formulaciones presentan las señales características de la gelatina, con presencia consistente de Amidas I, II y III. La intensidad de las bandas sugiere un ligero aumento en la densidad estructural con el incremento de la concentración de gelatina.

La Figura 12 presenta los espectros FTIR de las películas elaboradas con gelatina al 1 %, comparando la formulación sin veneno (F_2) con aquella que incorpora veneno de *Micrurus* a 0,06 mg/mL (F_5). En ambos casos se observa un alto grado de superposición de las señales, lo que indica una similitud estructural considerable entre las dos matrices.

Las principales señales presentes incluyen una banda amplia en $3291,8 \text{ cm}^{-1}$ (estiramiento N–H de Amida A), asociada a enlaces de hidrógeno (Sobral et al., 2001; Alexandre et al., 2016), así como una señal en $2937,1 \text{ cm}^{-1}$ correspondiente al estiramiento asimétrico C–H de grupos metileno (Gómez-Estaca et al., 2009). Las bandas intensas en $1641,1$ y $1547,5 \text{ cm}^{-1}$ se asignan a Amida I (C=O) y Amida II (N–H y C–N), características de proteínas como la gelatina y los péptidos del veneno (Álvarez-Ramírez et al., 2020; Mercan, 2024).

También se identificaron señales en $1241,9 \text{ cm}^{-1}$ (Amida III), $1031,7 \text{ cm}^{-1}$ (estiramiento C–O, asociado a carbohidratos residuales) y $855,2 \text{ cm}^{-1}$ (flexión fuera del plano de enlaces C–H aromáticos), todas ellas consistentes con lo reportado previamente para matrices proteicas (Sobral et al., 2001; Gómez-Estaca et al., 2009).

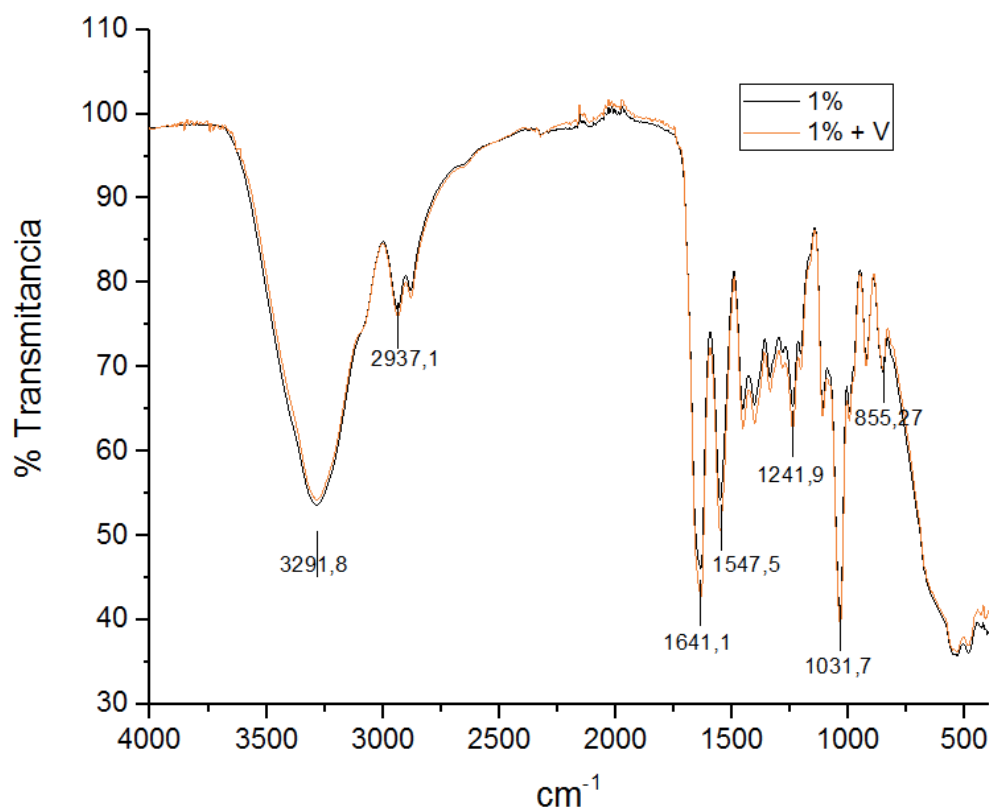
La comparación directa de ambos espectros no evidenció la aparición de nuevas bandas ni desplazamientos significativos que pudieran atribuirse inequívocamente a componentes del veneno. Esto sugiere que, bajo las condiciones de formulación y análisis empleadas, la incorporación del veneno no produjo interacciones químicas detectables con la matriz polimérica. Una posible explicación es que la concentración utilizada (0,06 mg/mL) se encuentre por debajo del umbral de sensibilidad de la técnica, o que ciertas toxinas hayan quedado inmovilizadas o parcialmente agregadas dentro de la matriz filmogénica, limitando su interacción con la radiación infrarroja. Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas con

biomoléculas complejas, donde la encapsulación dentro de redes poliméricas restringe la detección espectroscópica (Álvarez-Ramírez et al., 2020; Mercan, 2024).

En conjunto, estos resultados respaldan la hipótesis de que el veneno se incorpora de manera física en la matriz de gelatina sin generar modificaciones estructurales detectables a nivel molecular. Esto resulta relevante para aplicaciones tecnológicas, ya que garantiza la compatibilidad entre ambos componentes y la estabilidad de la red biopolimérica, condición esencial para el diseño de recubrimientos funcionales.

Figura 12

Espectros FTIR de Películas Biopoliméricas con Gelatina al 1 %, Sin Veneno (F₂) y Con Veneno de Micrurus (F₅, 0,06 Mg/ML)



Nota: No se evidencian diferencias significativas entre los espectros de las películas con y sin veneno. Las bandas principales —Amidas I, II y III— se mantienen inalteradas en posición e

intensidad, lo que sugiere una incorporación del veneno sin interacción química observable con la matriz filmogénica de gelatina.

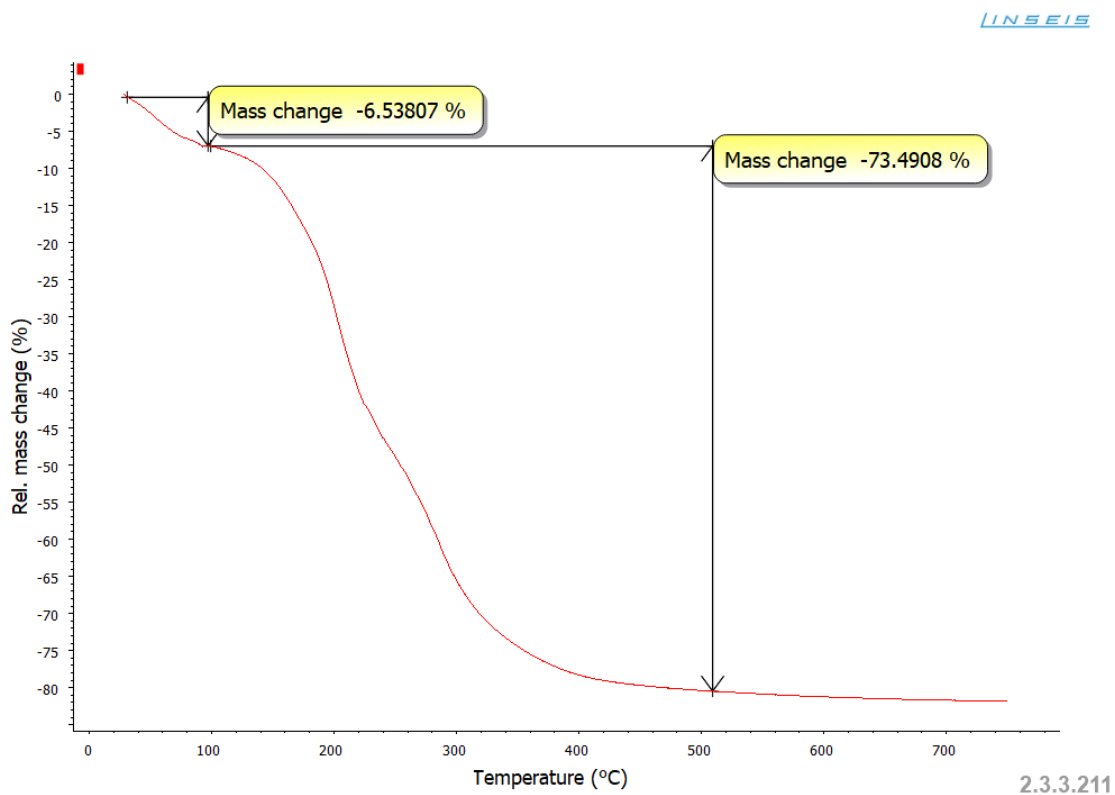
Los resultados obtenidos mediante espectroscopía FTIR permiten concluir que la incorporación del veneno de *Micrurus* a la formulación con gelatina no generó alteraciones estructurales detectables a nivel molecular. La comparación con las películas sin veneno mostró un comportamiento espectral prácticamente idéntico, lo que respalda la hipótesis de una incorporación física sin reacción química directa con la red polimérica. Además, los espectros de las películas sin veneno, con distintas concentraciones de gelatina, evidenciaron una conservación clara de las bandas amídicas esenciales, sin que se observaran nuevas señales atribuibles a desnaturalización proteica o a degradación de la matriz. Estos hallazgos indican que tanto el aumento en la concentración de gelatina como la adición del veneno mantuvieron la integridad química de la película, lo cual es deseable en el diseño de recubrimientos funcionales, ya que garantiza estabilidad estructural y compatibilidad entre los componentes.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Las curvas TGA de las películas de gelatina al 1 % y de gelatina al 1 % con veneno se presentan en las Figuras 13 y 14. Ambas formulaciones mostraron dos etapas principales de pérdida de masa: una inicial (~6,5 %) atribuida a la eliminación de humedad y compuestos volátiles hasta los 100 °C, y una pérdida principal asociada a la degradación de la matriz polimérica entre aproximadamente 250 y 500 °C. La película de gelatina presentó una pérdida total del 73,5 %, mientras que la formulación con veneno alcanzó un 69,9 %.

Figura 13

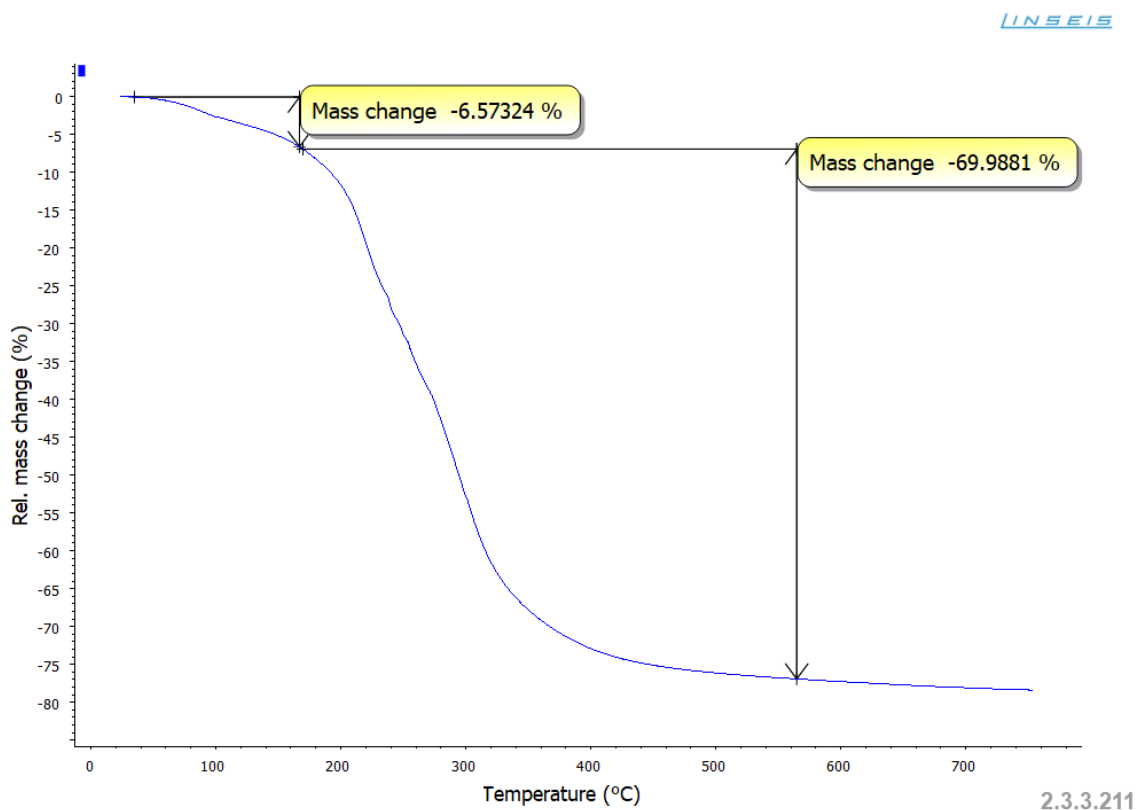
Curva Termogravimétrica (TGA) de la Película Biopolimérica con Gelatina al 1 %



Nota: se observan dos etapas principales de pérdida de masa, con una degradación total del 73,5 %, correspondiente a la humedad inicial (~6,5 %) y la degradación de la matriz proteica entre 250–500 °C.

Figura 14

Curva Termogravimétrica (TGA) de la Película Biopolimérica con Gelatina al 1 % Y Veneno de Micrurus (0,06 Mg/MI)



Nota: se evidencian dos etapas de pérdida de masa similares a la gelatina sola, con una pérdida total de 69,9 % y un residuo final ligeramente mayor, indicando mejor estabilidad térmica.

El residuo final fue ligeramente mayor en la muestra con veneno (~24 % frente a ~20 % en la gelatina sola), lo que sugiere que la incorporación de proteínas y péptidos bioactivos del veneno pudo favorecer la formación de estructuras carbonosas más estables frente a la degradación térmica. Este comportamiento indica una interacción entre los compuestos del veneno y la matriz proteica, que no altera el perfil de degradación global, pero sí incrementa la fracción residual tras el calentamiento, en concordancia con lo reportado en estudios donde la

adición de biomoléculas externas modifica la estabilidad térmica de sistemas poliméricos (Bedoya-Medina et al., 2019; Pérez-Peinado et al., 2020; Reyes et al., 2021).

Estos resultados concuerdan con lo descrito por Reyes et al. (2021) y Alexandre et al. (2016), quienes observaron que las películas de gelatina con plastificantes presentan dos etapas principales de degradación, correspondientes a la pérdida de humedad y a la descomposición de la matriz proteica. De manera similar, Sobral et al. (2001) indican que las películas proteicas tienden a degradarse en el rango de 250–400 °C, en coincidencia con lo obtenido en este estudio. En conjunto, los datos confirman que la adición del veneno de *Micrurus* no compromete la estabilidad térmica de la matriz biopolimérica, manteniendo un comportamiento comparable a la gelatina sola, pero con un residuo final más alto que sugiere interacciones estabilizantes.

Evaluación de la Actividad Biológica de las Películas en la Conservación de Alimentos

Aplicación del Recubrimiento en Frutos Frescos

Las soluciones biopoliméricas fueron aplicadas manualmente con pincel sobre frutos de uva Isabella (*Vitis labrusca*), utilizando formulaciones de gelatina al 1 % con y sin la adición de veneno de *Micrurus* (0,06 mg/mL). Se seleccionaron frutos homogéneos en tamaño, coloración y estado de madurez para garantizar uniformidad experimental. Como grupo control se utilizó un conjunto de uvas sin recubrimiento. Todos los frutos fueron almacenados a temperatura ambiente ($\pm 20^\circ$ C) durante 23 días. Durante este periodo se realizaron registros fotográficos y mediciones del peso en balanza analítica en los días 0, 3, 7, 9, 15, 17 y 23.

El uso de gelatina como matriz polimérica está ampliamente documentado por su capacidad para formar películas comestibles con propiedades semipermeables. Su aplicación en conservación postcosecha busca limitar la pérdida de humedad y el intercambio gaseoso, al tiempo que ofrece una base compatible con compuestos bioactivos. En este caso, se evaluó

también el efecto de incorporar una dosis controlada de veneno de *Micrurus*, aprovechando el potencial antifúngico reportado para ciertas fracciones del mismo.

Evaluación del Aspecto Visual y Pérdida de Peso

Las imágenes capturadas durante el almacenamiento revelan un deterioro gradual en todos los tratamientos. El grupo control (sin recubrimiento) evidenció pérdida de turgencia desde el día 3, con aparición de arrugas y colapso superficial notorio a partir del día 7. Esta evolución es visible en las Figuras 15 a 21, donde se documenta el estado de los frutos a lo largo del experimento.

En contraste, las uvas tratadas con recubrimientos de gelatina —tanto con como sin veneno— conservaron una apariencia ligeramente más firme en las primeras etapas. Sin embargo, esta diferencia visual fue sutil. A lo largo de los días, los tres grupos mostraron signos progresivos de deshidratación, sin que existieran contrastes drásticos en textura o coloración externa. Este comportamiento está en concordancia con lo reportado por Peña-Rodríguez et al. (2014), quienes señalaron que las películas a base de gelatina, si bien útiles como barrera primaria, pueden presentar limitaciones frente a condiciones ambientales adversas como la pérdida acelerada de agua en frutos no refrigerados.

En el día 0 (Figura 15), los frutos lucen visualmente similares. A partir del día 3 (Figura 16), comienzan a evidenciarse los primeros signos de pérdida de turgencia en el control. Esta diferencia se mantiene leve, pero constante, en los días 7 (Figura 17), 9 (Figura 18), 15 (Figura 19) y 17 (Figura 20), mientras que al llegar al día 23 (Figura 21) se observa deterioro evidente en todos los tratamientos.

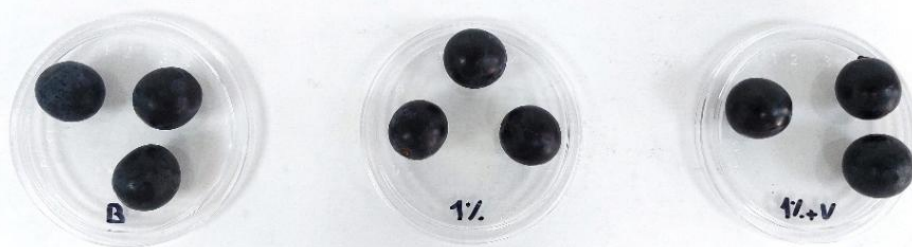
La Figura 22 presenta una comparación directa de las tres muestras al día 23. Si bien todas presentan manchas blancas superficiales, solo la muestra control (izquierda) mostró

evidencia clara de crecimiento fúngico. En las uvas recubiertas (centro y derecha), las manchas corresponden a película biopolimérica deteriorada o desplazada por fricción con la caja de Petri, sin indicios de contaminación microbiana.

Este hallazgo fue confirmado mediante una secuencia de acercamientos fotográficos documentados en la Figura 23, donde se observa una colonia micelial blanca sobre la superficie de la uva control. Esta fue la única muestra que presentó signos visibles de contaminación durante todo el experimento.

Figura 15

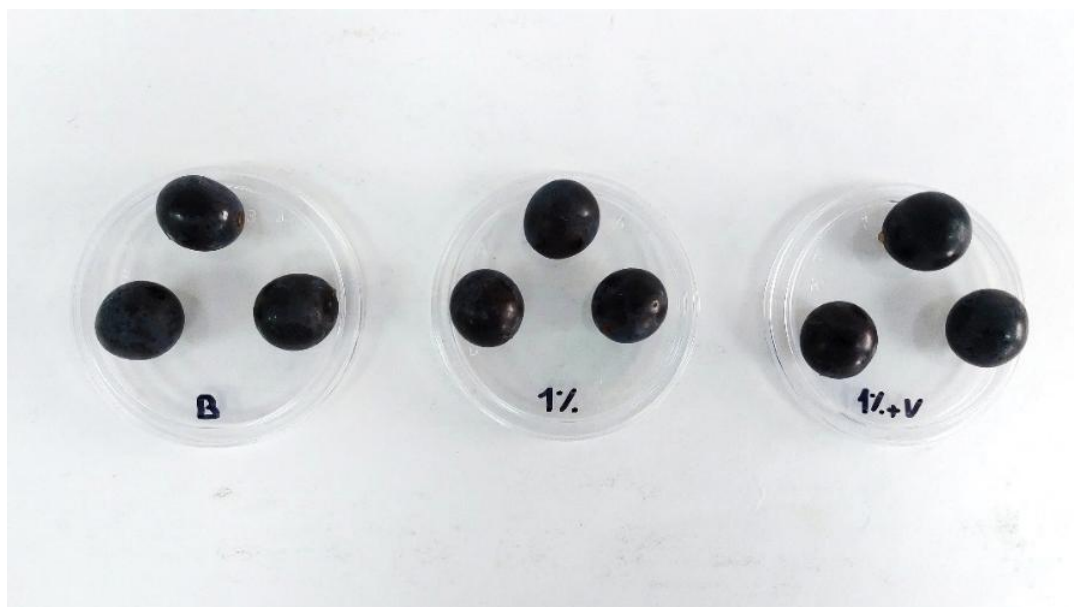
Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 1)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 16

Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 3)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 17

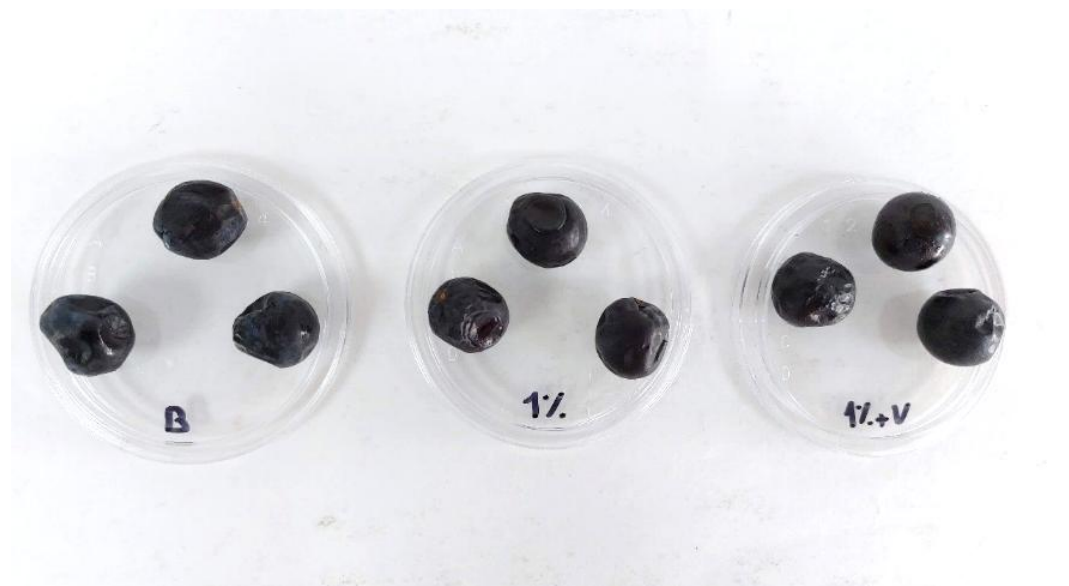
Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 7)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 18

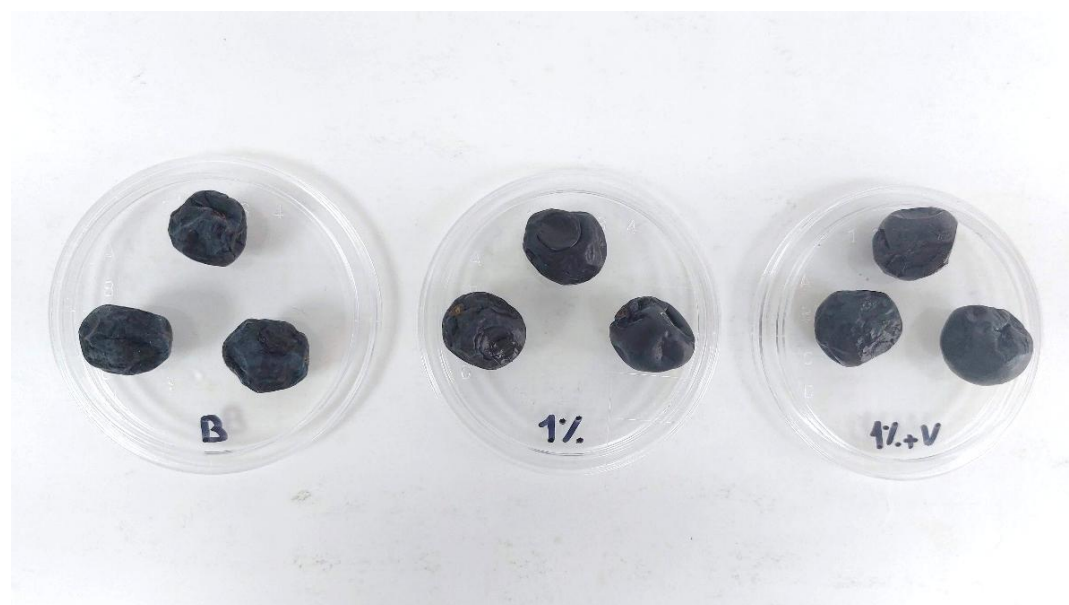
Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 9)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 19

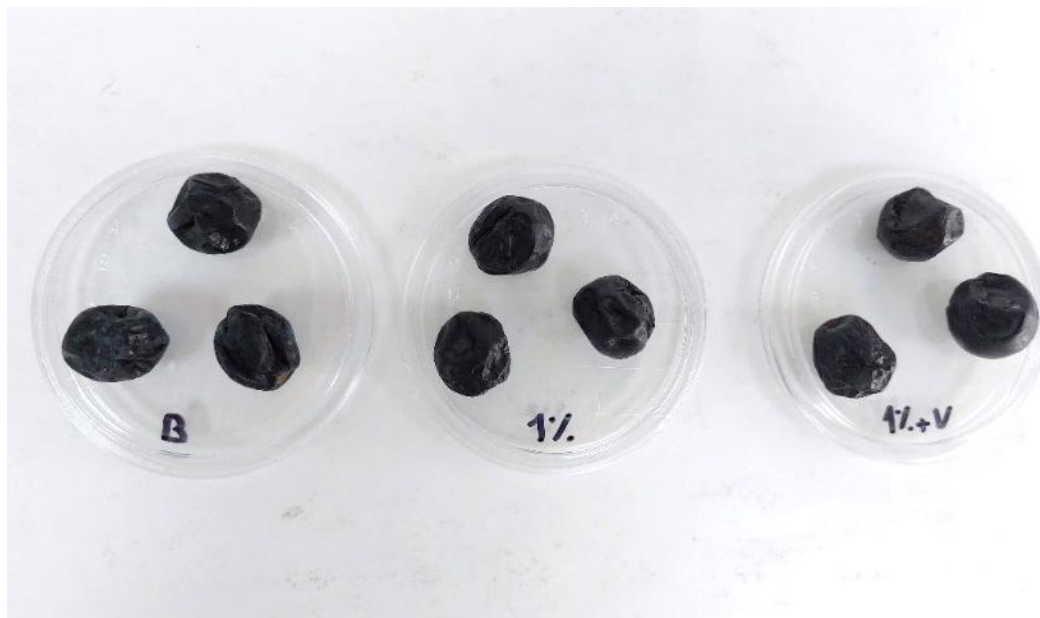
Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 15)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 20

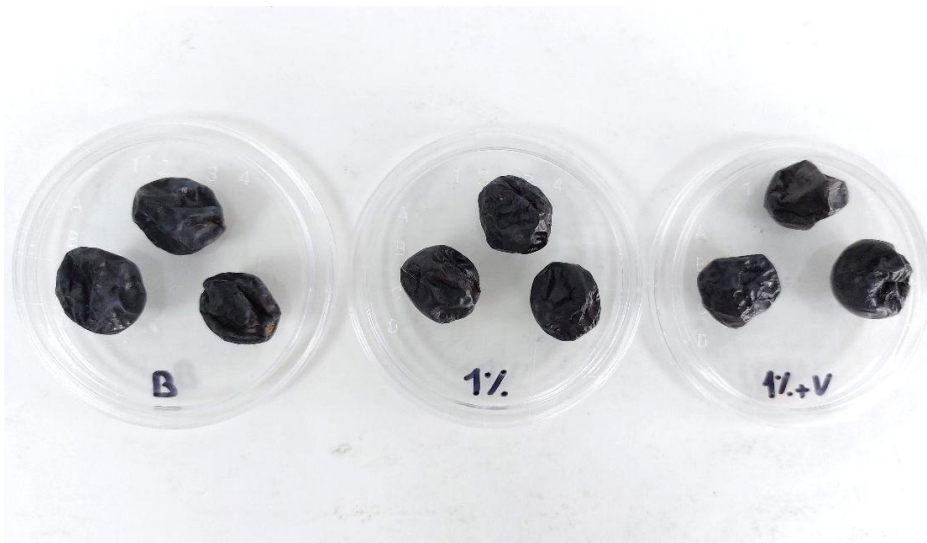
Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 17)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 21

Aspecto Visual de Frutos Tratados y Control Durante el Almacenamiento (Día 23)



Nota. B = Control sin recubrimiento; 1 % = película de gelatina al 1 %; 1 %+V = película de gelatina al 1 % con veneno de *Micrurus*.

Figura 22

Aspecto Visual de Uvas Recubiertas con Formulaciones Biopoliméricas Después de 23 Días de Almacenamiento



Nota: De izquierda a derecha: uva control sin recubrimiento, uva recubierta con gelatina al 1 %, y uva recubierta con gelatina al 1 % + veneno de *Micrurus*. La uva control muestra un punto blanco compatible con crecimiento fúngico. En las muestras tratadas, las manchas blancas

observadas corresponden a restos de película biopolimérica deteriorada por fricción con la caja de Petri, sin evidencia de contaminación microbiana.

Figura 23

Evidencia de Crecimiento Fúngico en Uva sin Recubrimiento (Grupo Control) al Día 23 de Almacenamiento



Nota. Secuencia de acercamientos progresivos sobre una uva del grupo control, donde se observa una colonia micelial blanca compatible con crecimiento fúngico. Esta fue la única muestra en la que se evidenció visualmente contaminación microbiana durante el periodo experimental.

La observación del aspecto visual sugiere que, aunque las diferencias entre tratamientos no fueron marcadamente evidentes en términos estéticos, los recubrimientos cumplieron parcialmente su función protectora. La ausencia de crecimiento fúngico en las uvas tratadas, a pesar de las condiciones ambientales y del tiempo de almacenamiento, es un indicio relevante del posible efecto inhibitor del sistema biopolimérico. En especial, la inclusión del veneno de *Micrurus* no provocó alteraciones visuales adversas, lo cual es positivo desde el punto de vista de la estabilidad del recubrimiento.

Estos resultados deben interpretarse con precaución. Si bien las películas ofrecieron una ligera mejora en la estabilidad visual del fruto, no impidieron por completo el deterioro estructural causado por la pérdida de agua. La limitada diferenciación visual entre los tratamientos refuerza la importancia de complementar esta evaluación con datos cuantitativos,

como el análisis de pérdida de peso y pruebas microbiológicas específicas. En conjunto, los resultados respaldan el enfoque de incorporar compuestos bioactivos en matrices poliméricas, pero también evidencian la necesidad de optimizar las condiciones de formulación y aplicación para alcanzar una efectividad integral en la conservación postcosecha.

Evaluación Cuantitativa de la Pérdida de Peso

La pérdida de peso fue utilizada como un indicador indirecto de la pérdida de humedad y, por tanto, del deterioro fisiológico de los frutos durante el almacenamiento.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6, que muestra los valores promedio de peso de los frutos por tratamiento en cada punto de muestreo. A partir de estos datos, se calcularon los porcentajes de pérdida acumulada, presentados en la Figura 24.

Tabla 6

Peso Promedio de Uvas Tratadas y Control Durante el Almacenamiento (g ± DS)

Día	Control (g)	Gelatina 1 % (g)	Gelatina 1 % +V (g)
Día 0	9,36 ± 0,90 ^a	10,10 ± 1,62 ^{ab}	10,52 ± 1,02 ^b
Día 3	8,51 ± 0,85 ^a	9,10 ± 1,51 ^{ab}	9,46 ± 1,06 ^b
Día 7	7,60 ± 0,77 ^a	8,17 ± 1,34 ^{ab}	8,33 ± 1,03 ^b
Día 9	7,18 ± 0,73 ^a	7,75 ± 1,30 ^{ab}	7,78 ± 1,08 ^b
Día 15	6,10 ± 0,62 ^a	6,65 ± 1,13 ^{ab}	6,93 ± 0,72 ^b
Día 17	5,73 ± 0,58 ^a	6,25 ± 1,11 ^{ab}	6,44 ± 0,82 ^b
Día 23	4,79 ± 0,47 ^a	5,24 ± 1,03 ^{ab}	5,53 ± 0,71 ^b

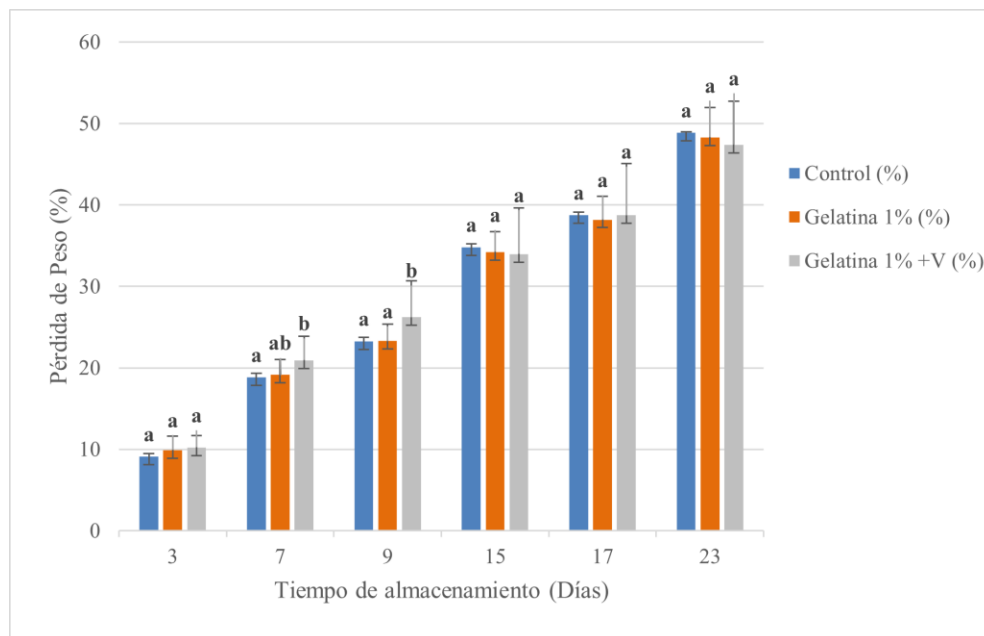
Nota: Los valores corresponden al promedio ± desviación estándar (DS) del peso de las uvas en cada punto de muestreo. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) según ANOVA de un factor y prueba de Fisher (LSD). Elaboración propia.

En el día 3, los tres tratamientos mostraron pérdidas de peso similares, sin diferencias significativas ($p > 0,05$), con valores que oscilaron entre 9,10 % y 10,23 %. Sin embargo, para el día 7, la pérdida fue significativamente mayor en el grupo tratado con gelatina al 1 % + veneno de *Micrurus* (20,94 %), lo que puede atribuirse a la evaporación de la fracción acuosa del recubrimiento, que aún no había formado una película sólida. Este fenómeno ha sido reportado por Galus y Lenart (2013), quienes señalan que la efectividad barrera de las películas comestibles puede verse afectada por la técnica de aplicación y el tiempo de secado.

Desde el día 9 en adelante, todos los tratamientos registraron pérdidas superiores al 23 %, siendo significativamente mayor en el grupo con veneno en ese punto. No obstante, hacia los días 15, 17 y 23, las diferencias se redujeron progresivamente y dejaron de ser estadísticamente significativas. En el día 23, las pérdidas promedio fueron 47,40 % (Gelatina 1 % + veneno), 48,30 % (Gelatina 1 %) y 48,86 % (Control), sin diferencias significativas ($p > 0,05$). Esta comparación puntual, integrada en la Figura 24, permite observar que aunque no hubo diferencias estadísticas, el recubrimiento con veneno presentó la menor pérdida promedio, sugiriendo un posible efecto protector durante las etapas finales del almacenamiento.

Figura 24

Porcentaje de Pérdida de Peso en Uvas Recubiertas y Control Durante 23 Días de Almacenamiento



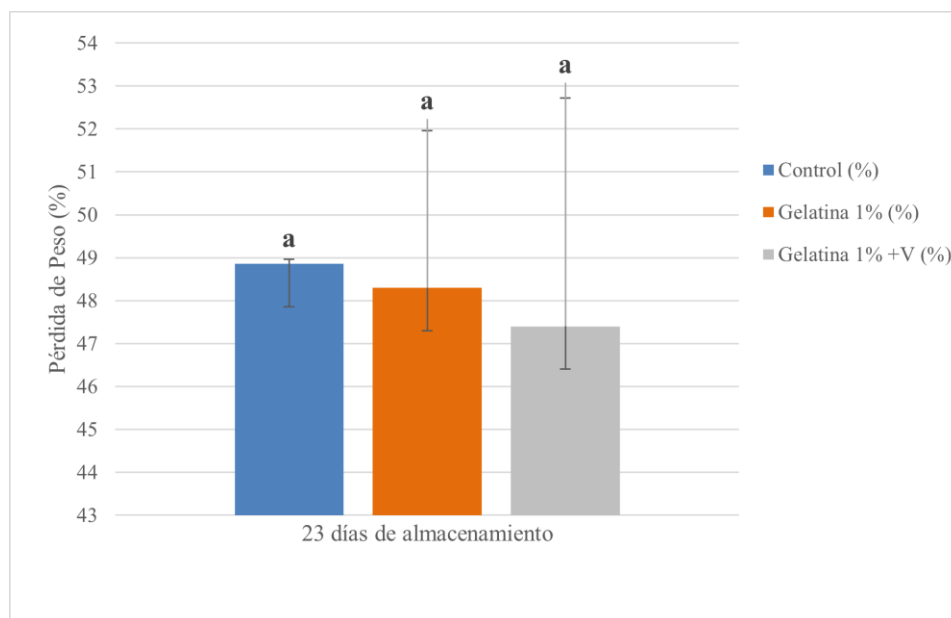
Nota: Los valores corresponden al promedio \pm desviación estándar (DS) de la pérdida de peso en uvas tratadas con gelatina al 1 %, gelatina al 1 % + veneno de *Micrurus*, y control sin recubrimiento. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos en cada día de muestreo ($p < 0,05$) según ANOVA de un factor y prueba de Fisher (LSD). En general, se observa que las películas redujeron parcialmente la pérdida de peso respecto al control, destacándose el recubrimiento con veneno en los días finales. En el día 23, las pérdidas promedio fueron 47,40 % (Gelatina 1 % + veneno), 48,30 % (Gelatina 1 %) y 48,86 % (Control), sin diferencias significativas ($p > 0,05$). Estos resultados sugieren un efecto protector adicional asociado a la formulación bioactiva.

Además, la Figura 25 muestra una comparación puntual del porcentaje de pérdida de peso en el día 23, resaltando visualmente que, aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas al final, el tratamiento con veneno presentó la menor pérdida promedio.

Figura 25

Comparación de la Pérdida de Peso (%) en Uvas Tratadas y Control al Día 23 de

Almacenamiento



Nota: Los valores corresponden al promedio \pm desviación estándar (DS) de la pérdida de peso acumulada al día 23. Aunque no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$, prueba de Fisher LSD), se observa una ligera reducción en la pérdida de peso en el grupo tratado con gelatina al 1 % + veneno de *Micrurus*, en comparación con los demás tratamientos. El recubrimiento bioactivo mostró una tendencia favorable hacia la preservación de la masa del fruto, lo cual podría atribuirse a un efecto barrera más estable durante las etapas finales del almacenamiento.

El análisis conjunto de los datos permite concluir que, si bien ningún tratamiento evitó completamente el deterioro de los frutos, las películas aplicadas —especialmente la formulada

con veneno de *Micrurus*— ofrecieron un leve efecto protector en términos de pérdida de peso y estabilidad durante las etapas finales del almacenamiento.

Los resultados respaldan lo reportado por Peña-Rodríguez et al. (2014), quienes observaron que las películas a base de gelatina tienen una capacidad limitada para controlar la pérdida de humedad en condiciones sin refrigeración. Sin embargo, en este caso, la adición del componente bioactivo no solo no afectó negativamente dicha capacidad, sino que pareció mejorarla levemente en los días finales del ensayo.

Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas al final del periodo, la combinación de observaciones cuantitativas y cualitativas —como la ausencia de crecimiento fúngico en las muestras tratadas y la ligera tendencia a una menor pérdida de peso— respalda el potencial de estas formulaciones para aplicaciones en conservación poscosecha. Estos resultados sugieren la necesidad de profundizar en análisis microbiológicos e *in vitro* para confirmar el posible efecto antifúngico o estabilizador del recubrimiento bioactivo.

Conclusiones

La formulación de películas biopoliméricas a base de gelatina tipo A y glicerol permitió desarrollar estructuras estables, flexibles y homogéneas, aptas para la incorporación de compuestos bioactivos. Las concentraciones superiores al 0,75 % de gelatina ofrecieron mejores propiedades físicas, mayor espesor, menor solubilidad en agua y mayor retención de humedad, demostrando ser las más adecuadas para aplicaciones prácticas en conservación de alimentos. Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que reportan que un mayor contenido de sólidos incrementa la densidad de la red proteica, generando películas más compactas y resistentes.

La incorporación del veneno de *Micrurus* en las películas no generó alteraciones significativas en la estabilidad estructural ni en las propiedades físicas fundamentales, lo cual evidencia una buena compatibilidad entre las biomoléculas del veneno y la matriz polimérica. Los análisis espectroscópicos (FTIR) confirmaron la preservación de las bandas amídicas características de la gelatina, sin aparición de nuevas señales ni desplazamientos marcados, lo que sugiere una integración física de los péptidos del veneno en la red. El análisis termogravimétrico (TGA) corroboró este resultado, mostrando curvas de degradación térmica similares a la gelatina sola, aunque con un residuo final ligeramente mayor en la formulación con veneno, lo que indica una posible estabilización térmica atribuible a interacciones entre el veneno y la matriz.

En el análisis óptico, todas las películas mostraron elevada luminosidad ($L^* > 92$), indicando superficies claras y homogéneas. La adición del veneno se asoció a un incremento en el parámetro b^* (amarillo) y en la absorbancia a 600 nm, lo que se tradujo en una mayor opacidad ($1,25 \pm 0,19$). Estos resultados confirman que la incorporación de compuestos

bioactivos puede modificar sutilmente las propiedades ópticas del material sin comprometer su claridad global, manteniendo su atractivo visual para aplicaciones en recubrimientos comestibles. Además, los espectros UV-Vis mostraron baja transmitancia en la región UV (<260 nm) para todas las películas, lo cual es relevante para la protección de alimentos sensibles a la luz, siendo la formulación con veneno la que mostró mayor absorción en este rango. Es importante resaltar que la diferencia total de color ($\Delta E < 2$) se mantuvo en valores bajos, lo que indica que, aunque se presentaron cambios en la tonalidad amarilla, estos no fueron perceptibles a simple vista, garantizando la aceptabilidad visual del material.

La prueba de conservación de uvas permitió evaluar la aplicabilidad práctica de las películas. Los frutos recubiertos con gelatina, con y sin veneno, mostraron menor deterioro visible en comparación con el control, lo que confirma la función del recubrimiento como barrera primaria frente a la pérdida de agua. Aunque las diferencias visuales entre los tratamientos fueron leves, a partir del día 15 las formulaciones con veneno evidenciaron una ligera tendencia a reducir la pérdida de peso y a mantener una mejor integridad superficial, además de una menor presencia de crecimiento fúngico visible. Este comportamiento sugiere que el veneno podría aportar un efecto antifúngico adicional, aunque se requieren ensayos microbiológicos específicos para confirmarlo.

Desde una perspectiva tecnológica, los resultados apoyan la viabilidad de utilizar matrices poliméricas de gelatina como vehículos para la incorporación y posible liberación controlada de compuestos bioactivos derivados de venenos animales. La combinación de propiedades mecánicas adecuadas, buena estabilidad estructural, capacidad de modificar las propiedades ópticas y potencial actividad antifúngica posiciona a estas películas como una alternativa prometedora para la conservación de frutas frescas y otros productos perecederos.

Finalmente, esta investigación aporta evidencia sobre el potencial de bioprospección del veneno de *Micrurus* como fuente de compuestos funcionales con aplicaciones agroalimentarias. Los resultados se alinean con la tendencia hacia el diseño de recubrimientos naturales, biodegradables y sostenibles que permitan sustituir materiales plásticos convencionales, ofreciendo soluciones innovadoras y con valor agregado para la conservación poscosecha de frutas. Además, la integración de biomoléculas en matrices poliméricas abre nuevas oportunidades de investigación en el campo de los biomateriales, donde el aprovechamiento de recursos biológicos no tradicionales puede contribuir al desarrollo de tecnologías más seguras y ambientalmente responsables.

Recomendaciones

A partir de los hallazgos obtenidos en este trabajo, se recomienda profundizar en el estudio de las propiedades antifúngicas del veneno de *Micrurus*, identificando las fracciones o toxinas específicas responsables de dicha actividad. Esto permitiría optimizar las concentraciones utilizadas en las formulaciones y determinar con mayor precisión su eficacia como agente conservante en matrices biopoliméricas. Para ello, resulta pertinente realizar ensayos microbiológicos dirigidos, tanto in vitro (inhibición de hongos fitopatógenos en medios de cultivo) como in vivo (en frutos u otros alimentos perecederos), de manera que se valide experimentalmente el potencial antifúngico observado de forma preliminar.

También se recomienda desarrollar estudios sobre la cinética de liberación de los compuestos bioactivos del veneno desde la matriz de gelatina. La comprensión de los mecanismos de interacción entre los péptidos y la red polimérica permitirá ajustar parámetros de formulación como el espesor de la película, el tipo y proporción de plastificante o las condiciones de secado. Estos ajustes podrían potenciar el efecto protector del recubrimiento sin comprometer su estabilidad estructural ni sus propiedades físicas.

Una limitante importante identificada durante el desarrollo de este proyecto fue la disponibilidad restringida y no constante del veneno, proporcionado por la Universidad de Antioquia en el marco del macroproyecto. Esta dependencia redujo la posibilidad de replicar y ampliar ensayos, por lo que se recomienda establecer convenios institucionales más sólidos que garanticen un suministro seguro y periódico del insumo biológico bajo condiciones éticas y controladas. Este aspecto es clave si se busca dar continuidad y escalar las investigaciones hacia un nivel industrial.

En paralelo, se considera fundamental fortalecer la articulación con los equipos de investigación vinculados al macroproyecto y con otras instituciones nacionales o internacionales interesadas en el estudio de biopolímeros y compuestos bioactivos. Una comunicación más fluida y el trabajo colaborativo permitirían compartir metodologías, optimizar recursos y acceder a técnicas de caracterización avanzadas (p. ej., espectrometría de masas, microscopía de alta resolución, ensayos microbiológicos especializados), enriqueciendo la calidad de los resultados y aumentando el impacto científico de los proyectos.

De igual forma, se recomienda considerar que las variaciones observadas en las propiedades ópticas (luminosidad, color y opacidad) fueron bajas y no afectan la aplicabilidad práctica de las películas. Esto refuerza que la prioridad en futuros estudios debe enfocarse en la validación microbiológica del efecto antifúngico y en el desarrollo de formulaciones que maximicen dicha actividad.

Finalmente, se recomienda ampliar la evaluación de las películas biopoliméricas a otras matrices alimentarias más perecederas (p. ej., frutos de piel delgada o vegetales de alto contenido de agua) y a condiciones de almacenamiento diversas (temperatura ambiente vs. refrigeración). Asimismo, resulta importante comparar la eficacia de los recubrimientos en frutos con diferentes tratamientos previos de superficie, tales como lavado, desinfección o sin tratamiento, dado que estas condiciones pueden influir en la adherencia, uniformidad y desempeño del recubrimiento. Esto permitirá proyectar con mayor realismo su aplicabilidad industrial y explorar su potencial en diferentes cadenas de valor agroalimentarias. En este sentido, el uso de recubrimientos naturales, biodegradables y funcionales constituye una alternativa innovadora para reducir el desperdicio de alimentos, sustituir envases plásticos convencionales y contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles con valor agregado para el sector agroindustrial.

Referencias Bibliográficas

- Abd El-Aziz, T., Garcia, A., & Stockand, J. (2019). *Snake venoms in drug discovery: Valuable therapeutic tools for life saving*. *Toxins* (Basel), 11(10), 564.
<https://doi.org/10.3390/toxins11100564>
- Agilent Technologies. (s.f.). *Sistemas FTIR para la caracterización de polímeros: control de calidad y análisis estructural*. Sitio web:
https://www.agilent.com/Library/slidepresentation/Public/2-Sistemas_FTIR_para_la_caracterizaci%C3%B3n_de_pol%C3%ADmeros_-_control_de_calidad_y_an%C3%A1lisis_estructural.pdf
- Alexandre, E. M. C., Lourenço, R. V., Bittante, A. M. Q. B., Moraes, I. C. F., & Sobral, P. J. do A. (2016). *Gelatin-based films reinforced with montmorillonite and activated with nanoemulsion of ginger essential oil for food packaging applications*. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 87–96. [https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.fpsl.2016.10.004](https://doi.org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.fpsl.2016.10.004)
- Alonso, L. L., van Thiel, J., Slagboom, J., Dunstan, N., Modahl, C. M., Jackson, T. N. W., Samanipour, S., & Kool, J. (2024). *Studying Venom Toxin Variation Using Accurate Masses from Liquid Chromatography–Mass Spectrometry Coupled with Bioinformatic Tools*. *Toxins*, 16(4), 181. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.3390/toxins16040181>
- Bedoya-Medina, J., Mendivil-Perez, M., Rey-Suarez, P., Jimenez-Del-Rio, M., Núñez, V., & Velez-Pardo, C. (2019). *L-amino acid oxidase isolated from Micrurus mipartitus snake venom (MipLAAO) specifically induces apoptosis in acute lymphoblastic leukemia cells mostly via oxidative stress-dependent signaling mechanism*. *International Journal of*

Biological Macromolecules, 134, 1052-1062.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.174>

Bonilla Lagosa, J., Vicentini, N. M., Dos Santos, R. M. C., Bittante, A. Q. B., & Sobral, P. J. A.. (2015). *Mechanical properties of cassava starch films as affected by different plasticizers and different relative humidity conditions*. International Journal of Food Studies, 4(1).

Bubici, G., Kaushal, M., & Prigigallo, M. I. (2019). *Biological control agents against Fusarium wilt of banana*. Frontiers in Microbiology, 10, 616.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>

Castro-Amorim et al. (2023). *Catalytically Active Snake Venom PLA₂ Enzymes: An Overview of Its Elusive Mechanisms of Reaction*, Journal of Medicinal Chemistry

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jmedchem.3c00097>

Cañas, C.A., Castro-Herrera, F. & Castaño-Valencia, S. (2017). *Envenomation by the red-tailed coral snake (Micrurus mipartitus) in Colombia*. J Venom Anim Toxins Incl Trop Dis 23, 9. <https://doi.org/10.1186/s40409-017-0100-4>

Carvalho, N. S., Nardini, V., Veronezes, R. M., Maciel, J. B., Trabuco, A. C., De Carvalho, M. F., Fontanari, C., Sartim, M. A., de Moraes, L. A. B., & Faccioli, L. H. (2024).

Characterizing lipid constituents of B. moojeni snake venom: a comparative approach for chemical and biological investigations. Archives of Toxicology, 1–12. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/s00204-024-03809-z>

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). (s.f.). *La espectroscopia FTIR-ATR aplicada al análisis de proteínas*. Capítulo 7. Sitio web:

<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/744/1/Cap%207%20La%20espectroscopia%20FTIR%20ATR.pdf>

- Chang Estrada, J. E., Guerrero, T. N., Reyes-Enríquez, D. F., Nardy, E. S., Guimarães Ferreira, R., Ruiz Calderón, C. J., Wellmann, I. A., Monteiro Espíndola, K. M., do Prado, A. F., Soares, A. M., Fontes, M. R. de M., Chagas Monteiro, M., & Zingali, R. B. (2024). *Potential Biotechnological Applications of Venoms from the Viperidae Family in Central America for Thrombosis*. *Toxins*, 16(3), 142. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.3390/toxins16030142>
- Cotes, A., Barrero, L., & Rodríguez, F. (2012). *Bioprospección para el desarrollo del sector agropecuario de Colombia*. CORPOICA.
- Coyotl-Pérez, W. A., Villa-Ruano, N., & Rubio-Rosas, E. (2023). *Biodegradable films with fungistatic activity for the postharvest control of Fusarium solani in Hass avocado fruit*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(3), 343–371. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.18781/R.MEX.FIT.2303-4>
- Dini, S., Oz, F., Bekhit, A. E.-D. A., Carne, A., & Agyei, D. (2024). *Production, characterization, and potential applications of lipopeptides in food systems: A comprehensive review*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4), e13394. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1111/1541-4337.13394>
- Espinoza-Acosta, J. L., Ramón González-Estrada, R., Edith Valencia-Rivera, D., Guadalupe Martínez-Robinson, K., Ledesma Osuna, A. I., Blancas-Benitez, F. J., & Montaña-Leyva, B. (2023). *Antifungal and physicochemical properties of starch-lignin based-films*. *Mexican Journal of Biotechnology*, 8(4), 24–45. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.29267/mxjb.2023.8.4.24>

FAO. (2019). *Innovaciones en la agricultura para la seguridad alimentaria*. Sitio web:

<http://www.fao.org/innovaciones-agricultura>

FAO. (2023). *Alimentación y agricultura sostenibles*. Sitio web: [https://www.fao.org/policy-](https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/sustainable-food-agriculture/es/)

[support/policy-themes/sustainable-food-agriculture/es/](https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/sustainable-food-agriculture/es/)

Gómez-Estaca, J., Bravo, L., Gómez-Guillén, M. C., Alemán, A., & Montero, P. (2009).

Antioxidant properties of tuna-skin and bovine-hide gelatin films induced by the addition of oregano and rosemary extracts. *Food Chemistry*, 112(1), 18-25.

Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J. L. (1992). *Edible wheat gluten films: influence of the main*

process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(1), 190-199.

Gulsevin, A., & Meiler, J. (2020). *An Investigation of Three-Finger Toxin—nAChR Interactions*

through Rosetta Protein Docking. *Toxins*, 12(9), 598.

<https://doi.org/10.3390/toxins12090598>

Khan, M. R., Wasim, M., Farooq, A., Naeem, M. A., Mushtaq, M., Liu, J., Chen, C., & Wei, Q.

(2024). *A review study on derivation of nanocellulose to its functional properties and applications in drug delivery system, food packaging, and biosensing devices*. *Polymer Bulletin*, 81(11), 9519–9568. <https://doi->

[org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/s00289-024-05190-4](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/s00289-024-05190-4)

Lomonte, B., Rey-Suárez, P., Fernández, J., Sasa, M., Pla, D., Vargas, N., Bénard-Valle, M.,

Sanz, L., Corrêa-Netto, C., Núñez, V., Alape-Girón, A., Alagón, A., Gutiérrez, J. M., & Calvete, J. J. (2016). *Venoms of Micrurus coral snakes: Evolutionary trends in*

compositional patterns emerging from proteomic analyses. *Toxicon: official journal of*

- the International Society on Toxinology, 122, 7–25.
- <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2016.09.008>
- Lynch, D., Angarita, T., & Ruiz, F. (2016). *Programa nacional para la conservación de las serpientes presentes en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.
- Lynch, J. D. (2012). *Biodiversidad y conservación de las serpientes en Colombia*. In R. A. Fuenmayor, M. H. Yustiz, & E. González-Sponga (Eds.), *Biodiversidad y Conservación en Venezuela* (pp. 179-204). Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas.
- Lynch, J. D. (2012). *El contexto de las serpientes de Colombia con un análisis de las amenazas en contra de su conservación*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 36(140), 435-449.
- Lynch, J. D., Angarita-Sierra, T., & Ruiz-Gómez, F. (2016). *Serpientes de Colombia: Diversidad, ecología y conservación*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 40(155), 276-294.
- Lynch, J. D., Angarita, S. T., & Ruiz-Gómez, F. J. (2016). *Programa nacional para la conservación de las serpientes presentes en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.
- Mackessy, S. P. (2010). *Handbook of Venoms and Toxins of Reptiles*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Martínez-Vaca, L., & López, X. (2019). *Serpientes, un legado ancestral en riesgo*. Ciencias Ergo-Sum, 26. <https://doi.org/10.30878/ces.v26n2a10>
- Mercan, E. (2024). *Gelatine-Based Biopolymer Film Produced from Ozone-Treated Film-Forming Solutions Containing Whey Protein Concentrate: Effects on Physical,*

- Mechanical, and Thermal Characteristics*. Applied Sciences (2076-3417), 14(5), 2176.
<https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.3390/app14052176>
- Nasr, S., Borges, A., Sahyoun, C., Nasr, R., Roufayel, R., Legros, C., Sabatier, J.-M., & Fajloun, Z. (2023). *Scorpion Venom as a Source of Antimicrobial Peptides: Overview of Biomolecule Separation, Analysis and Characterization Methods*. Antibiotics, 12(9).
<https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.3390/antibiotics12091380>
- Ndlovu, S. P., Ngece, K., Alven, S., & Aderibigbe, B. A. (2021). *Gelatin-Based Hybrid Scaffolds: Promising Wound Dressings*. Polymers, 13(17), 2959.
<https://doi.org/10.3390/polym13172959>
- Pérez-Peinado, C., Defaus, S., & Andreu, D. (2020). Hitchhiking with nature: Snake venom peptides to fight cancer and superbugs. Toxins (Basel), 12, 255.
<https://doi.org/10.3390/toxins12040255>
- Reyes, L. M., Méndez, P. A., López-Córdoba, A., Ortega-Toro R., & Gutiérrez, T. J. (2023). *Active chitosan/gelatin-based films and coatings containing eugenol and oregano essential oil for fresh cheese preservation*. Journal of Food Process Engineering, 46(11), 1–14. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1111/jfpe.14396>
- Reyes, L. M., Landgraf, M., & Sobral, P. J. A. (2021). *Gelatin-based films activated with red propolis ethanolic extract and essential oils*. Food Packaging and Shelf Life, 27.
<https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.fpsl.2020.100607>
- Raza, W., Ling, N., Zhang, R., Huang, Q., Xu, Y., & Shen, Q. (2017). *Success evaluation of the biological control of Fusarium wilts of cucumber, banana, and tomato since 2000 and future research strategies*. Critical Reviews in Biotechnology, 37, 202-212.
<https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1130683>

- Rodríguez, C. A., Buitrago, J. E., Betancur, A., & Cárdenas, R. (2017). *Actividad antagonista de Bacillus sp frente a Fusarium oxysporum: Un aporte a la agricultura sostenible*. Revista Nova, 3 (Colombia).
- Sobral, P. J. A., Menegalli, F. C., Hubinger, M. D., & Roques, M. A. (2001). *Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films*. Food Hydrocolloids, 15(4–6), 423–432. [https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/S0268-005X\(01\)00061-3](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/S0268-005X(01)00061-3)
- Rojas, A. M. (2018). *Informe de evento accidente ofídico, Colombia, 2017*. Instituto Nacional de Salud INS, 3, 1-16.
- Ullah A. (2020). *Structure-Function Studies and Mechanism of Action of Snake Venom L-Amino Acid Oxidases*. Frontiers in pharmacology, 11, 110. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00110>
- Universidad de Granada (UGR). (s.f.). *Tablas de Espectroscopía: Grupo funcional*. Sitio web: https://www.ugr.es/~quiorred/lab/tablas_espec/ir.htm
- Valencia, G. A., Velez, J. A., & Zapata, P. A. (2015). *Producción y caracterización de películas comestibles de almidón de yuca modificado con diferentes tipos de plastificantes*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 68(1), 7519-7527.
- Vinchira-Villaraga, D., & Moreno-Sarmiento, N. (2019). *Control biológico: Camino a la agricultura moderna*. Revista Colombiana de Biotecnología, 21(1), 2-5. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.80860>
- Vonk, F. J., Jackson, K., Doley, R., Madaras, F., Mirtschin, P. J., & Vidal, N. (2011). *Snake venom: From fieldwork to the clinic: Recent insights into snake biology, together with*

new technology allowing high-throughput screening of venom, bring new hope for drug discovery. Bioessays, 33(4), 269-279.

Yacoub, T., Rima, M., Karam, M., Sabatier, J.-M., & Fajloun, Z. (2020). *Antimicrobials from venomous animals: An overview.* Molecules, 25, 2402.