

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Desarrollo de biorecubrimiento con potencial antifúngico aplicado al banano
postcosecha

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Amanda Mishel Balseca Pachar

Nadia Anabella Vargas Rumazo

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mi madre, Imelda Pachar, quien siempre ha demostrado una paciencia admirable al soportarme y brindarme su apoyo incondicional.

En memoria de mi padre, Ricardo Balseca, quien siempre creyó en mí y me impulsó a crecer académicamente.

A mis adorados gatos, mis fieles compañeros en las noches de estudio.

Este logro es un tributo a todos quienes han sido parte de mi viaje. Con cariño y gratitud sincera,

Amanda Balseca

Dedicatoria

Dedico este proyecto a las personas más importantes de mi vida, a Dios por ser mi guía y fortaleza.

A mi madre Ana Rumazo, quien con su amor infinito y atención inagotable ha hecho este arduo camino más llevadero, eres mi mayor inspiración.

A mi padre Sergio Vargas, su amor, sacrificio y apoyo incondicional me motivaron cada día a nunca rendirme.

A mi hermano Sergio, mi novio Washington, mi familia y amigos por creer en mí y llenar mi vida de alegría.

A mi perrita Danna, por su dulce compañía desde el día uno.

Este logro no es solo mío, es nuestro. Con el corazón lleno de amor y gratitud,

Nadia Vargas

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecerle a Dios por permitirnos culminar nuestra etapa universitaria, sin él, nada de esto hubiera sido posible.

A nuestros padres, quienes han sido un pilar fundamental desde el principio. Gracias por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A nuestros amigos, quienes ha compartido con nosotras momentos inolvidables.

Valoramos su amistad y el respaldo que nos han brindado a lo largo de este proyecto.

A nuestra tutora Patricia Manzano y a Glenda Piloza por su apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo.

Amanda Balseca

Nadia Vargas

Declaración Expresa

Nosotras Amanda Mishel Balseca Pachar y Nadia Anabella Vargas Rumazo acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 26 de enero del 2024.



Amanda Mishel Balseca Pachar



Nadia Anabella Vargas Rumazo

Evaluadores

Nadia Flores Manrique, M.Sc.

Profesor de Materia

Patricia Manzano Santana, PhD.

Tutor de proyecto

Glenda Piloza Muentes, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

El cultivo de banano es susceptible a enfermedades fúngicas durante el transporte y almacenamiento. Para abordar este problema, se propuso desarrollar un biorecubrimiento antifúngico para el banano postcosecha. La propuesta se basó en una revisión bibliográfica para seleccionar materiales de recubrimiento y especies vegetales con metabolitos antifúngicos. Se obtuvieron los extractos mediante métodos de maceración y molienda; evaluándolos *in vitro* contra los patógenos *Lasiodiplodia theobromae* y *Colletotrichum musae* que afectan al cultivo de banano. El extracto de *Sapindus saponaria* a 10 mg mL⁻¹ destacó por reducir significativamente el crecimiento de *Colletotrichum musae*. Posteriormente, se desarrollaron dos biorecubrimientos: goma arábica (GA/GE/SS*) y quitosano (CH/GE/SS*). De ambos, la película CH/GE/SS* mostró mejores propiedades físicas con un contenido de humedad del 12.02 ± 0.08%, una solubilidad en agua del 45.49 ± 0.52% y una permeabilidad al vapor de 1.37 ± 0.11 g·mm/m²·h·kPa. En evaluación *in vivo*, CH/GE/SS* destacó al reducir significativamente la pérdida de peso 0.56 ± 0.09%, la incidencia de enfermedades 34.63 ± 6.72% y el índice de maceración 16.09 ± 3.14% en comparación con el control negativo. Estos resultados respaldan el uso del biorecubrimiento CH/GE/SS* como alternativa eco-amigable para el control de la antracnosis en el banano.

Palabras clave: Biorecubrimiento, antifúngico, inhibición, postcosecha.

Abstract

The banana crop is susceptible to fungal diseases during transport and storage. To address this problem, it was proposed to develop an antifungal biocoating for postharvest banana. The proposal was based on a literature review to select coating materials and plant species with antifungal metabolites. Extracts were obtained by maceration and milling methods; evaluating them *in vitro* against the pathogens *Lasiodiplodia theobromae* and *Colletotrichum musae* that affect the banana crop. *Sapindus saponaria* extract at 10 mg mL⁻¹ was found to significantly reduce the growth of *Colletotrichum musae*. Subsequently, two biocoatings were developed: gum arabic (GA/GE/SS*) and chitosan (CH/GE/SS*). Of the two, the CH/GE/SS* film showed better physical properties with a moisture content of 12.02 ± 0.08%, a water solubility of 45.49 ± 0.52% and a vapor permeability of 1.37 ± 0.11 g-mm/m²-h-kPa. In *in vivo* evaluation, CH/GE/SS* stood out by significantly reducing weight loss 0.56 ± 0.09%, disease incidence 34.63 ± 6.72% and maceration index 16.09 ± 3.14% compared to the negative control. These results support the use of CH/GE/SS* biocoating as an eco-friendly alternative for the control of anthracnose in banana.

Keywords: Biorecoating, antifungal, inhibition, postharvest.

Índice General

Dedicatoria	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Declaración Expresa	V
Evaluableores	VI
Resumen.....	VII
Abstract	VIII
Índice General	IX
Abreviaturas	XIII
Simbología	XIV
Índice de figuras.....	XV
Índice de tablas	XVI
Capítulo 1	- 17 -
1. Introducción	- 18 -
1.1 Descripción del problema	- 18 -
1.2 Justificación del problema.....	- 19 -
1.3 Objetivos	- 20 -
1.3.1 Objetivo general.....	- 20 -
1.3.2 Objetivos específicos	- 20 -
1.4 Marco teórico	- 21 -
1.4.1 Banano	- 21 -
1.4.2 Sapindus saponaria.....	- 21 -
1.4.3 Azadirachta indica	- 26 -
1.4.4 Recubrimientos comestibles	- 29 -

1.4.4.1 Quitosano	- 29 -
1.4.4.2 Goma arábica	- 31 -
Capítulo 2.....	- 33 -
2. Metodología	- 34 -
Figura 2.1	- 34 -
2.1 Revisión bibliográfica	- 34 -
2.1.1 Selección de materiales.....	- 35 -
2.2 Preparación de extractos vegetales.....	- 35 -
2.2.1 Recolección de material vegetal	- 35 -
2.2.2 Extracto de <i>Sapindus saponaria</i>	- 36 -
.....	- 36 -
2.2.3 Extracto de <i>Azadirachta indica</i>	- 37 -
2.3 Evaluación antifúngica <i>in vitro</i> de extractos vegetales	- 38 -
2.3.1 Cepas patógenas.....	- 38 -
2.3.2 Preparación de medios de cultivo	- 38 -
2.3.3 Actividad antifúngica <i>in vitro</i> de extractos vegetales contra patógenos del banano ..	- 38 -
38 -	
2.4 Preparación de los tratamientos	- 39 -
2.5 Preparación de las películas	- 40 -
2.6 Propiedades físicas de las películas.....	- 41 -
2.6.1 Contenido de humedad	- 41 -
2.6.2 Solubilidad en agua.....	- 41 -
2.6.3 Permeabilidad al vapor de agua	- 42 -
2.6.4 Valores referenciales.....	- 42 -
2.7 Evaluación <i>in vivo</i> de tratamientos	- 43 -

2.8 Propiedades físicas del banano.....	- 44 -
2.8.1 Pérdida de peso	- 44 -
2.8.2 Incidencia de la enfermedad	- 44 -
2.8.3 Sólidos solubles totales	- 44 -
2.8.4 Acidez titulable	- 45 -
2.8.5 Índice de maduración.....	- 45 -
2.9 Análisis estadístico.....	- 45 -
Capítulo 3.....	- 46 -
3. Resultados y análisis	- 47 -
3.1 Actividad antifúngica <i>in vitro</i> de extractos vegetales	- 47 -
3.2 Actividad antifúngica <i>in vitro</i> de <i>Sapindus saponaria</i> a diferentes concentraciones	- 49 -
3.3 Propiedades físicas de las películas.....	- 50 -
3.3.1 Contenido de humedad	- 50 -
.....	- 51 -
3.3.2 Solubilidad en agua.....	- 51 -
3.3.3 Permeabilidad al vapor de agua	- 52 -
.....	- 53 -
3.4 Propiedades físicas del banano.....	- 53 -
3.4.1 Pérdida de peso	- 53 -
3.4.2 Incidencia de la enfermedad	- 54 -
3.4.3 Sólidos solubles totales	- 56 -
3.4.4 Acidez titulable	- 57 -
3.4.5 Índice de maduración y color de la cáscara	- 58 -
Capítulo 4.....	- 60 -
4.1 Conclusiones y recomendaciones	- 61 -

4.1.1	<i>Conclusiones</i>	- 61 -
4.1.2	Recomendaciones.....	- 62 -
	Referencias	- 64 -
	Apéndice	- 75 -
	Apéndice A	- 76 -
	Apéndice A. 1 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento	- 76 -
	- 76 -
	Apéndice A.2 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento	- 77 -
	Apéndice A.3 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento	- 78 -
	Apéndice A.4 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento	- 79 -

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CIBE	Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador
USD	Dólar estadounidense
PDA	Agar de Papa y Dextrosa
SS	<i>Sapindus saponaria</i>
CH	Quitosano
GA	Goma arábica
GE	Gelatina
SST	Sólidos solubles totales
AT	Acidez titulable
ANOVA	Análisis de la varianza

Simbología

mL	Militros
g	Gramo
mg	Miligramos
mm	Milímetros
cm	Centímetro

Índice de figuras

<i>Figura 1.1 Molécula de saponina de Sapindus saponaria</i>	- 22 -
<i>Figura 1.2 Detalle morfológico de Sapindus saponaria</i>	- 23 -
<i>Figura 1.3 Estructura molecular de los fitoquímicos comunes del neem</i>	- 26 -
<i>Figura 1.4 Detalle morfológico de Azadirachta indica</i>	- 27 -
<i>Figura 1.5 Estructura molecular del quitosano</i>	- 30 -
<i>Figura 1.6 Estructura química de la goma arábica</i>	- 31 -
<i>Figura 2.1 Resumen gráfico</i>	- 34 -
<i>Figura 2.2 Extracto del pericarpio de Sapindus saponaria</i>	- 36 -
<i>Figura 2.3 Extracto de hojas de Azadirachta indica</i>	- 37 -
<i>Figura 2.4 Extracto de semillas de Azadirachta indica</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Figura 2.5 Proceso de secado de las películas</i>	- 41 -
<i>Figura 3.1 Actividad antifúngica in vitro de extractos vegetales contra C. musae y L. theobromae</i>	- 48 -
<i>Figura 3.2 Actividad antifúngica in vitro de S. saponaria a diferentes concentraciones</i>	- 49 -
<i>Figura 3.3 Contenido de humedad (%) de las películas CH/GE/SS* y GA/GE/SS*</i>	- 51 -
<i>Figura 3.4 Solubilidad en agua (%) de las películas CH/GE/SS* y GA/GE/SS*</i>	- 52 -
<i>Figura 3.5 Permeabilidad al vapor de agua de las películas CH/GE/SS* y GA/GE/SS*</i>	- 53 -
<i>Figura 3.6 Pérdida de peso (%) del banano sometido a diferentes tratamientos</i>	- 54 -
<i>Figura 3.7 Incidencia de la enfermedad (%) del banano sometido a diferentes tratamientos</i> -	55 -
<i>Figura 3.8 Sólidos solubles totales (%) del banano sometido a diferentes tratamientos</i>	- 57 -
<i>Figura 3.9 Acidez titulable (%) del banano en tiempo inicial y en el día 14</i>	- 58 -
<i>Figura 3.10 Índice de maduración del banano en tiempo inicial y en el día 14</i>	- 59 -

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1 Uso tradicional de Sapindus saponaria</i>	- 23 -
<i>Tabla 1.2 Principales constituyentes de Sapindus saponaria</i>	- 24 -
<i>Tabla 1.3 Actividad antifúngica de Sapindus saponaria</i>	- 25 -
<i>Tabla 1.4 Uso tradicional de Azadirachta indica</i>	- 27 -
<i>Tabla 1.5 Principales constituyentes de Azadirachta indica</i>	- 28 -
<i>Tabla 1.6 Actividad antifúngica de Azadirachta indica</i>	- 28 -
<i>Tabla 1.7 Recubrimientos a base de quitosano</i>	- 30 -
<i>Tabla 1.8 Recubrimientos a base de goma arábiga</i>	- 32 -
<i>Tabla 2.1 Composición de los diferentes biorecubrimientos</i>	- 40 -
<i>Tabla 2.2 Rango de valores adecuados para películas a base de gelatina</i>	- 43 -

Capítulo 1

1. Introducción

El banano es una de las frutas más populares en todo el mundo, por su valor nutricional y bajo costo (Li et al., 2019). Ecuador uno de los principales exportadores a nivel mundial, con una producción de 6.6 millones de toneladas anuales en una superficie de 0.16 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2021). El banano tiene gran importancia socioeconómica para el país, representando el 2% del PIB general y el 35% del PIB agrícola (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2021).

El banano es susceptible a diversas enfermedades que provocan pérdidas masivas durante el transporte y almacenamiento (Kulkarni et al., 2022). Una de las enfermedades más críticas es la pudrición de la corona, causada principalmente por los hongos *Lasiodiplodia theobromae*, *Fusarium oxysporum* y *Colletotrichum musae* (Murmu & Mishra, 2018). En la agricultura convencional, la fruta se rocía constantemente con fungicidas antes de la cosecha para prevenir la descomposición, pero siempre es necesario un tratamiento postcosecha (Matrose et al., 2021).

En respuesta a los desafíos postcosecha, se han explorado alternativas eco-amigables en los últimos años. Estrategias como la conservación en frío y el uso de atmósferas controladas han mostrado limitaciones en términos de viabilidad económica (A. Islam et al., 2022). En este contexto, los recubrimientos comestibles con compuestos naturales se presentan como una alternativa sostenible para conservar la calidad del banano.

1.1 Descripción del problema

Las pérdidas económicas causadas por la presencia de hongos en bananos frescos a lo largo de la cadena de suministro se estiman en un rango del 20% al 25% (Dadrasnia et al., 2020; Yagual et al., 2023). Según datos del (Banco Central del Ecuador, 2023), se reporta una disminución en las exportaciones de USD 1.055,4 millones durante el primer semestre a USD 934,7

millones durante el segundo semestre. La contracción del 11.4% se atribuye a factores estacionales, así como la maduración prematura del producto y a un exceso de lluvias (ACORBANEC, 2023).

La pudrición de la corona es una enfermedad postcosecha grave del banano, que limita drásticamente la comercialización nacional y exportación al reducir significativamente la vida útil de la fruta (Murmu & Mishra, 2018). La infección se manifiesta como necrosis en la superficie cortada que une los dedos de banano durante el transporte a largas distancias (Kulkarni et al., 2022). Los síntomas de ablandamiento y ennegrecimiento de la corona son visibles después de 7 días (Tian et al., 2022).

En la actualidad, las empresas bananeras controlan las enfermedades fúngicas mediante tratamientos de que incluye la desinfección de los racimos, seguida de la aplicación de un fungicida como el tiabendazol o el imazalil en la corona de los gajos (Murmu & Mishra, 2018). Sin embargo, los residuos de plaguicidas en los alimentos representan una preocupación para la salud pública, dado que su inadecuado manejo ha sido vinculado a graves intoxicaciones crónicas (Zambrano-Ganchozo, 2022).

1.2 Justificación del problema

El uso de plaguicidas para el control de las enfermedades fúngicas representa una preocupación en la inocuidad alimentaria. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta anualmente tres millones de casos de intoxicación aguda vinculados al uso de plaguicidas, con informes de 80.000 y 220.000 casos de mortalidad (Yagual et al., 2023). Además de los riesgos para la salud pública, el uso extensivo de plaguicidas como el tiabendazol conlleva impactos ambientales significativos (Bijlsma et al., 2021).

Un enfoque novedoso para preservar la calidad del banano, sin recurrir a químicos sintéticos, radica en el desarrollo de recubrimientos comestibles con compuestos naturales (La et

al., 2021). Los recubrimientos comestibles crean una atmósfera modificada alrededor de la fruta mediante una barrera semipermeable contra el movimiento del O₂ y CO₂ (Sahraee et al., 2019). La adición de extractos vegetales aporta bioactivos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Ncama et al., 2018).

El extracto de *Sapindus saponaria* y el extracto *Azadirachta indica* han mostrado una prometedora actividad antifúngica contra los hongos del cultivo del banano (S. Kumar et al., 2022; Marinho et al., 2018). En la actualidad, no hay reportes en la literatura sobre recubrimientos que integren estos extractos naturales, por lo que el desarrollo de un biorecubrimiento antifúngico podría representar un paso significativo hacia la reducción de la dependencia de sustancias químicas en los tratamientos postcosecha del banano. Este enfoque busca contribuir a prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un biorecubrimiento para el banano postcosecha mediante la integración de extracto vegetal con potencial antifúngico

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar la actividad antifúngica *in vitro* de extractos naturales contra patógenos del cultivo de banano
2. Evaluar diferentes matrices de biorecubrimiento mediante el análisis de las propiedades físicas de su película
3. Determinar el efecto del biorecubrimiento *in vivo* en las propiedades físicas relacionadas con la calidad del banano

1.4 Marco teórico

1.4.1 Banano

El banano es una fruta tropical que proviene de la planta herbácea *Musa acuminata*, perteneciente a la familia *Musaceae*.(Chávez-Salazar et al., 2017). Se presenta en racimos de bayas alargadas con cáscaras de diversos colores (Dadrasnia et al., 2020). El banano es una rica fuente de fitonutrientes importantes, compuestos fenólicos, incluyendo vitaminas B6, C y A. Existen más de 1000 tipos de bananos cultivados a nivel mundial, siendo el grupo Cavendish el más cultivado (FAO, 2023).

Los hongos fitopatógenos son los agentes causales de la mayoría de las enfermedades del banano. Estos hongos pueden infectar los tejidos de la raíz, las hojas y los racimos, causando síntomas como la necrosis, la marchitez y la pudrición (Dadrasnia et al., 2020).

Entre los principales patógenos se encuentran:

- *Colletotrichum musae*
- *Ceratocystis paradoxa*
- *Lasiodiplodia theobromae*
- *Nigrospora sphaerica*
- *Fusarium oxysporum*
- *Cladosporium spp.*
- *Fusarium verticillioides*
- *Acremonium spp.*
- *Fusarium sporotrichoides*
- *Penicillium spp.*
- *Musicillium theobromae*

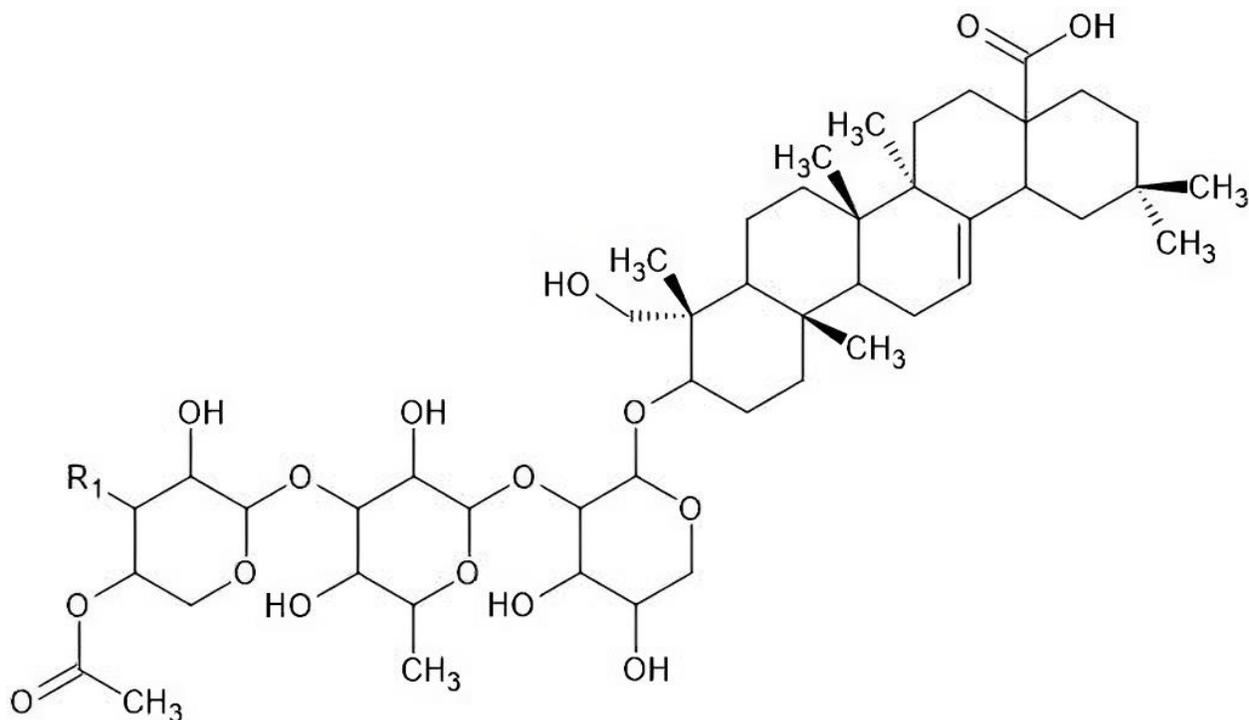
1.4.2 *Sapindus saponaria*

El *Sapindus saponaria* o "árbol del jabón" pertenece a la familia *Sapindaceae* (Rodriguez et al., 2018). Originario de América, este árbol destaca por sus frutos, ampliamente reconocidos como una fuente abundante de saponinas (Gasca et al., 2020). Estos compuestos orgánicos exhiben propiedades detergentes y espumantes, en su estructura tienen núcleos pentacíclicos del

tipo oleanano con cadenas de azúcares unidas al carbono C-3 como se observa en la *Figura 1.1* (Y. Xu et al., 2021). La literatura reporta actividad antifúngica importante por la presencia de los núcleos esteroideos/triterpénicos glicosilados (Grisi et al., 2015).

Figura 1.1

Molécula de saponina de Sapindus saponaria



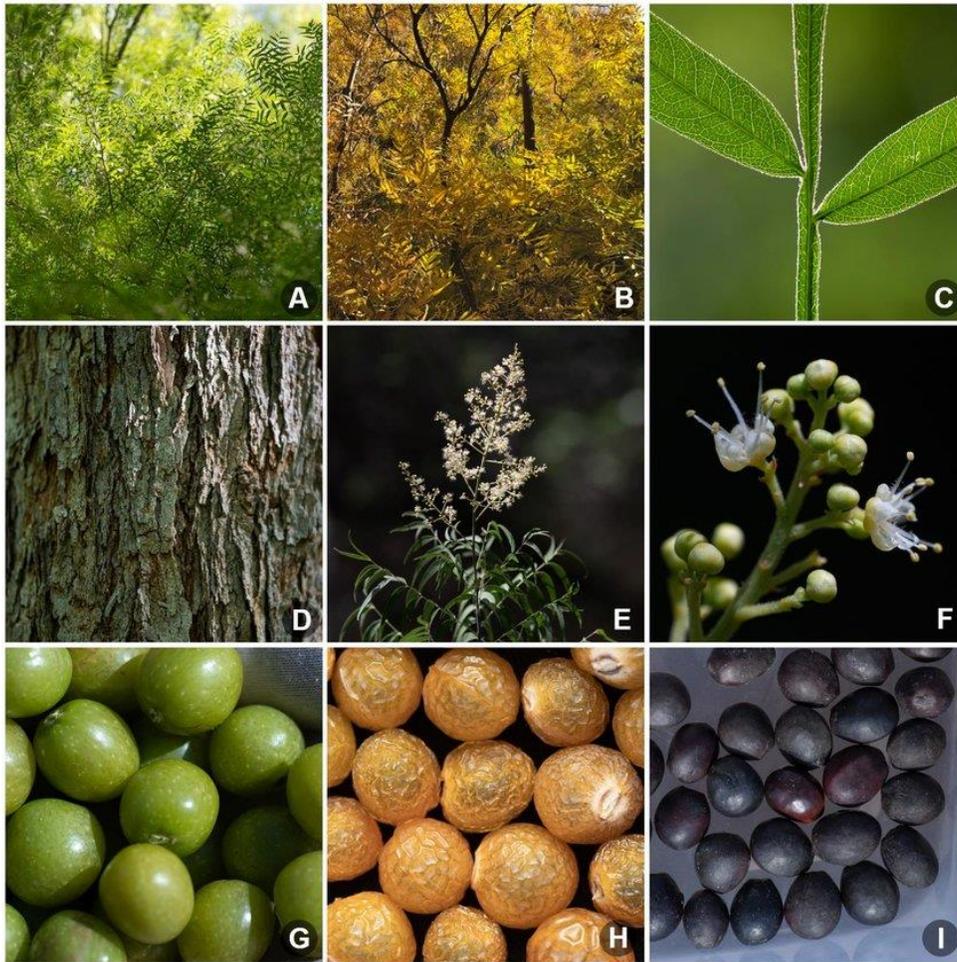
Saponina: 3-O-(4-acetil- β -D-xilopiranosil)-(1 \rightarrow 3)- α -L-ramnopiranosil-(1 \rightarrow 2)- α -L-arabinopiranosil-hederagenina

En la *Figura 1.2* se presentan los detalles morfológicos del árbol de *Sapindus saponaria*, capaz alcanzar alturas de 12 a 25 metros. La corteza presenta finas fisuras con tonalidades que van desde el amarillo oscuro al pálido (Singh & Sharma, 2019). Las hojas constan de 5 a 10 pares de folíolos. Las flores de color blanco verdoso tienen un diámetro de 5 mm (Rodríguez et al., 2018). Las frutas se caracterizan por su estructura de drupa, que consiste en un pericarpio

carnoso que rodea una única semilla. Estas drupas son globosas, con dimensiones entre 1.8-2.5 cm de ancho (Singh & Sharma, 2019).

Figura 1.2

Detalle morfológico de Sapindus saponaria



Nota. (A) Hojas en verano. (B) Hojas en otoño. (C) Raquis de hoja. (D) Corteza típica del árbol viejo. (E) Flores y hojas. (F) Flores con pétalos. (G) Frutos verdes. (H) Frutos maduros. (I) Semillas. Tomado de (McNair & Andresen, 2020).

La *Tabla 1.1* proporciona una perspectiva detallada de los usos tradicionales de *Sapindus saponaria*, destacando distintas partes de la planta y los métodos de extracción empleados. Estos

métodos han sido fundamentales para obtener compuestos bioactivos con aplicaciones significativas.

Tabla 1.1

Usos tradicionales de Sapindus saponaria

Parte planta	Método de extracción	Actividad	Referencias
Pericarpio y semillas	Sistema Soxhlet con 600 mL de éter de petróleo.	Tensioactivo	(Saxena et al., 2018)
Pericarpio	Maceración en agua Millipore durante 24 h.	Detergente doméstico	(Pradhan & Bhattacharyya, 2017)
Pericarpio	Maceración en etanol 1:6 (p/v).	Bioplaguicida	(Gasca et al., 2020)
Hojas	Maceración en 30 mL de solución de etanol 1:3 (p/v) durante 7 días.	Bioplaguicida	(Marinho et al., 2018)

La *Tabla 1.2* proporciona una visión detallada de los constituyentes clave presentes en *Sapindus saponaria*. Este análisis revela la riqueza química de la especie, crucial para comprender su potencial aplicación en áreas de investigación y desarrollo.

Tabla 1.2

Principales constituyentes químicos de Sapindus saponaria

Parte planta	Extracto	Constituyentes químicos	Referencias
Semillas	-	3-O-{4-acetyl- β -D-xylopyranosyl-(1-3)- α -L-rhamnopyranosyl-(1-2)- α -L-arabnopyranosyl}-hederagenin;3-O-{ α -L-arabinopyranosyl-(1-3)- α -L-rhamnopyranosyl-(1-2)- α -L-arabnopyranosyl}-hederagenin;3-	(Gupta and Ahamad, 1990)

Pericarpio	Extracto etanólico	3-β-O-[α-L-rhamnopyranosyl-(1→3)-β-D-glycopyranosyl}	(Ribeiro et al., 1995)
Hojas	Extracto etanólico	3-(1,2-dimethyl-5-oxabicyclo [2.1.1] hexan-2-yl) but-2-enoic	(Grisi et al., 2015)
Partes aéreas	Extracto hidrometanólico	estigmasterol, ácido oleanólico, luteolina, luteolina 8---glucósido (orientina), luteolina 6--ββ-- glucósido (isoorientina),	(Rashed et al., 2013)

La información presentada en la *Tabla 1.3* destaca la actividad antifúngica de *Sapindus saponaria*. Esta información permite comprender la efectividad de la planta contra diferentes patógenos fúngicos. Los datos de inhibición proporcionan una visión general sobre cómo *Sapindus saponaria* podría ser aprovechada para desarrollar agentes antifúngicos

Tabla 1.3

Actividad antifúngica de Sapindus saponaria

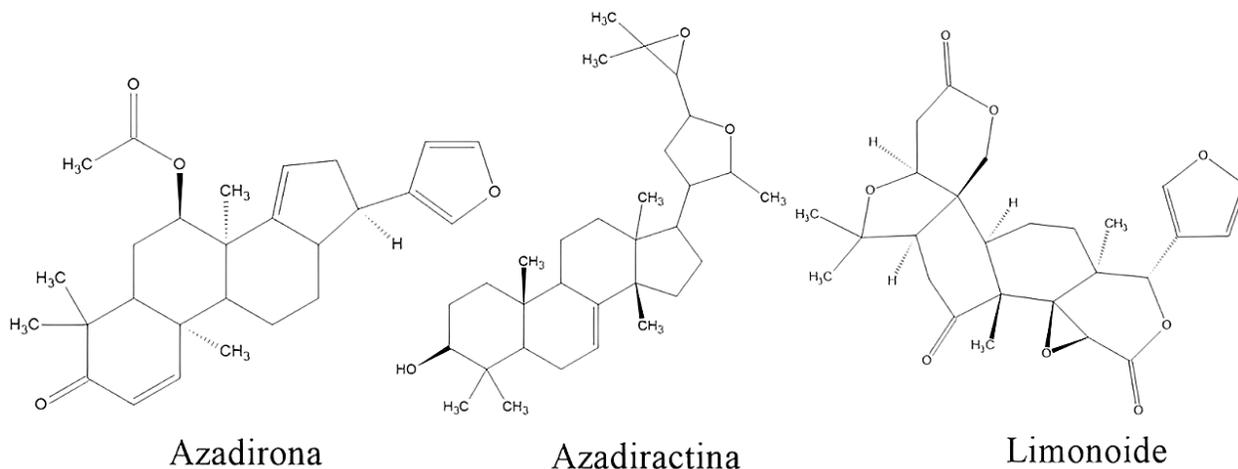
Parte planta	Método extracción	Actividad	Método análisis	Referencias
Pericarpio	Maceración en etanol 1:6 (p/v)	Inhibición de 14,18 ± 1,44* mm contra <i>C. musae</i> .	Difusión en disco de Kirby-Bauer	(Gasca et al., 2020)
Hoja	Maceración en 30 mL etanol:agua (1:3) por 7 días	80% inhibición contra <i>C. gloeosporioides</i>	Medio inhibido	(Marinho et al., 2018)
Pericarpio	Mezcla de pericarpio en polvo en 100 mL de agua	Inhibición completa contra <i>Venturia inaequalis</i> y <i>Botrytis cinérea</i>	Alimentos envenenados	(Porsche et al., 2017)
Pericarpio	Molido en etanol:agua (9:1)	Fuerte actividad contra <i>Candida</i>	Microdilución en caldo	(Tsuzuki et al., 2007)

1.4.3 *Azadirachta indica*

La *Azadirachta indica* o "árbol de neem" pertenece a la familia de la caoba Meliaceae (S. Kumar et al., 2022). El árbol es originario de la India y es reconocido a nivel mundial por la producción de su aceite esencial (Islas et al., 2020). Las semillas y hojas poseen numerosos componentes bioactivos como azadirona, azadiractina, limonoide, en la *Figura 1.3* se muestra su estructura molecular (Gupta et al., 2017). Los fitoconstituyentes han demostrado poseer una gran cantidad de actividades biológicas y farmacológicas (S. M. Patel et al., 2016).

Figura 1.3

Estructura molecular de los fitoquímicos comunes del neem



En la *Figura 1.4* se presentan los detalles morfológicos del árbol de *Azadirachta indica*, capaz de alcanzar alturas de 15 a 20 metros (W. Islam et al., 2019). La corteza del árbol presenta un característico tono marrón con fisuras verticales (S. M. Patel et al., 2016). Las hojas pueden extenderse hasta 30 cm de largo. Cada hoja se compone de 10 a 12 folíolos dentados, que miden

aproximadamente 7 cm de largo por 2.5 cm de ancho (Saleh Al-Hashemi & Hossain, 2016). La fruta varía de forma ovalada a redonda (Ghosh et al., 2016).

Figura 1.4

Detalle morfológico de Azadirachta indica



Nota. (A) Árbol entero. (B) Hojas. (C) Flores. (D) Frutos. Tomado de (Patel et al., 2016)

La *Tabla 1.4* presenta una síntesis de los usos tradicionales de *Azadirachta indica*, abordando distintas partes de la planta y sus métodos de extracción. Este conocimiento permite contextualizar la relevancia de la especie en la medicina tradicional, brindando una visión general de su potencial utilidad en la salud y el bienestar humanos.

Tabla 1.4

Uso tradicional de Azadirachta indica.

Parte planta	Método de extracción	Actividad	Referencias
Hojas	Extracción manual con agua	Estimular el apetito y combatir gusanos	(Saleh Al-Hashemi & Hossain, 2016)

Semillas	Prensado en frío	Pesticida	(Sujarwo et al., 2016)
Semillas	Maceración de semillas	Insecticida	(Boursier et al., 2011)
Hojas y semillas	Masticar directamente	Cuidado dental	(Sujarwo et al., 2016)

La *Tabla 1.5* proporciona una visión general de los constituyentes clave de *Azadirachta indica*. Esta información es crucial para comprender las propiedades y potenciales aplicaciones de *A indica*, ya que los constituyentes químicos desempeñan un papel fundamental en sus propiedades medicinales, biológicas y químicas.

Tabla 1.5

Principales constituyentes químicos de Azadirachta indica

Parte planta	Extracto	Constituyentes químicos	Referencias
Semillas y hojas	Aceite	Ácido benzoico, ácido t-cinámico, 3-OH-4-MeO-benzaldehído y naringenina.	(Cesa et al., 2019)
Hojas	Extracto crudo de hexano	(2E)-3,7,11,15-tetrametil-2-hexadecen-1-ol, metil petroselinato, fitol, metil isoheptadecanoato, hexadecametilciclooctasiloxano, palmitato de butilo, 2,6,10,14-tetrametilheptadecano, nonadecano, isobutil estearato, ácido	(Hossain et al., 2013)
Hojas	Extracto crudo de metanol	(Z,E)- α -farneseno, gamma-elemeno, 2E-3,7,11,15-tetrametil-2-hexadecen-1-ol, hexahidrofarnesil acetona, metil 14-metilpentadecanoato, ácido 9,12,15-	(Hossain et al., 2013)

La *Tabla 1.6* da una buena idea de cómo *Azadirachta indica* muestra actividad antifúngica. Esto es importante porque nos ayuda a entender cómo la especie podría ser útil para combatir infecciones por hongos.

Tabla 1.6*Actividad antifúngica de Azadirachta indica*

Parte planta	Método extracción	Actividad	Método análisis	Referencias
Hojas	Maceración en agua destilada y ebullición	Inhibición completa contra <i>S. commune</i>	Difusión en Agar	(Islam et al., 2009)
Hojas	Molido en 100 mL de agua destilada	57.06% inhibición contra <i>L. theobromae</i>	Intoxicación alimentaria	(Adeniyi et al., 2015)
Hojas	Macerar en 25 mL de agua	Reducción del crecimiento micelial contra <i>B. theobromae</i>	Alimentos envenenados	(Sahi et al., 2012)
Hojas y semillas	Molido y suspensión en éter de petróleo	Distorsión del patrón de crecimiento de <i>T. mentagrophytes</i> , <i>T. rubrum</i> , y <i>M. nanum</i>	Dilución in vitro en tubo	(Natarajan et al., 2003)

1.4.4 Recubrimientos comestibles

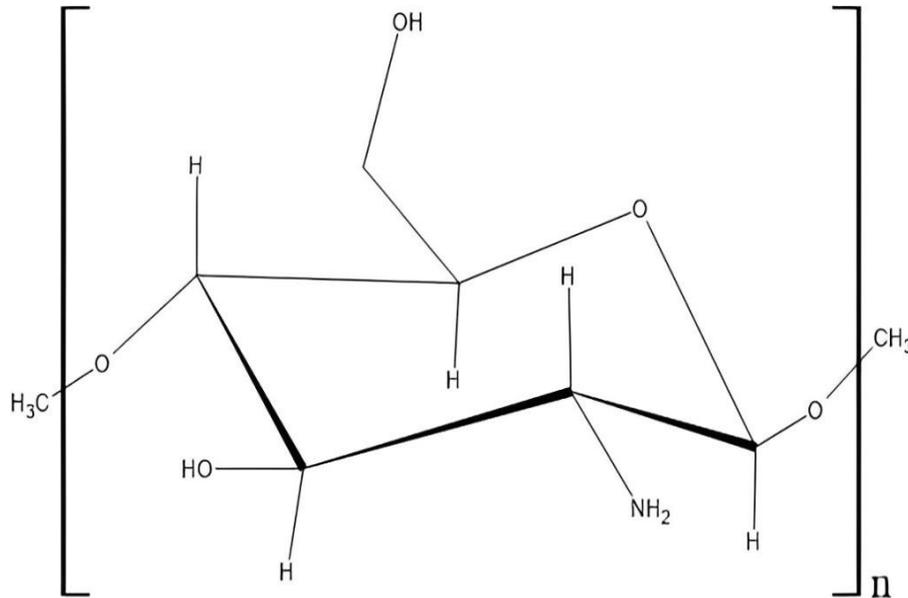
Los recubrimientos comestibles son películas finas que se aplican en la superficie de los alimentos para extender su vida útil. Los recubrimientos están formados por una matriz de polímeros, que puede ser hidrofóbica o hidrofílica, o una combinación de ambas (de Oliveira et al., 2021). Los polímeros hidrofóbicos actúan como barrera contra la humedad y al oxígeno, mientras que los hidrofílicos ofrecen protección contra microorganismos (Panwar et al., 2023).

1.4.4.1 Quitosano. Es un biopolímero catiónico derivado de la desacetilación de la quitina, (Grande-Tovar et al., 2018). Se compone principalmente de unidades distribuidas aleatoriamente de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces glicosídicos β -

(1-4) (Wang et al., 2020). Debido a sus propiedades biológicas y fisicoquímicas, el quitosano encuentra numerosas aplicaciones industriales y biomédicas (Priyadarshi & Rhim, 2020).

Figura 1.5

Estructura molecular del quitosano (poli(2-amino-2-deoxi-D-glucosa))



La *Tabla 1.7* muestra información sobre recubrimientos a base de quitosano con propiedades antifúngicas y beneficios adicionales. Esta información permite conocer sus aplicaciones potenciales en la conservación de productos agrícolas.

Tabla 1.7

Recubrimientos a base de quitosano reportados en la literatura

Principio activo	Concentración	Métodos	Resultados	Referencias
-	4% CH, 2% AA, 30% (p/v) glicerol	Agitar a 400 rpm por 24 h. pH a 5.5	Actividad antifúngica contra especies <i>Colletotrichum, F. oxysporum</i>	(Arceo-Martínez et al., 2018)

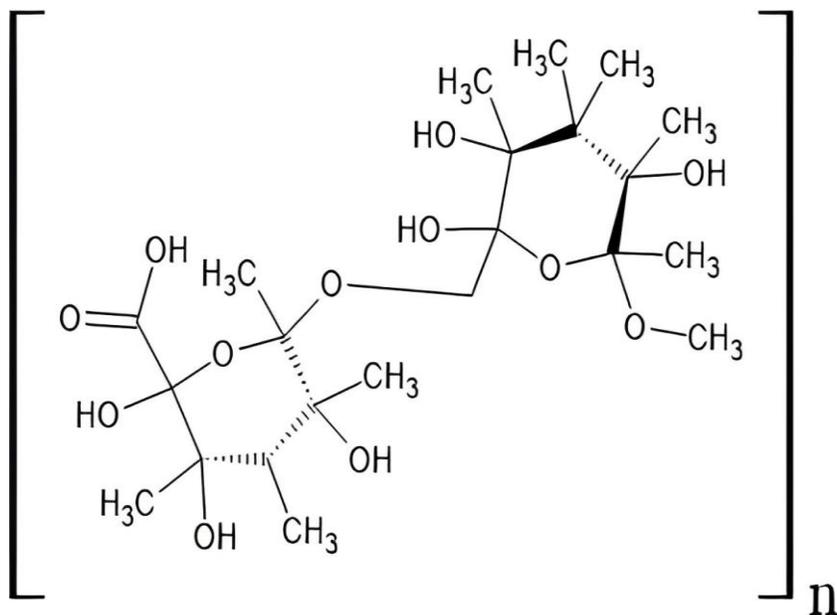
Extracto de cáscara de plátano (BPE)	2% CH, 1% AA, 30% (p/v) glicerol y 4%, 8%, 12% BPE	Agitar por 30 min y desgasificar	Excelente actividad antioxidante y mayor firmeza	(Zhang et al., 2020)
Aceite de tomillo (AT)	1% CH, 400 μ LL-1 AT	Agitar por 1 h	Inhibición completa contra <i>C. gloeosporioides</i>	(Shah et al., 2021)

Nota. CH: quitosano. AA: ácido acético.

1.4.4.2 Goma arábiga. Es un polisacárido natural obtenido de exudados de árboles de acacia, compuesto por galactosa, ramnosa, ácido glucurónico y residuos de proteínas (Al-Baadani et al., 2021). La goma arábiga tiene un peso molecular alto y una estructura ramificada *Figura 1.6*. El esqueleto principal está compuesto por unidades de β -D-galactopiranosil unidas por enlaces glicosídicos β -(1 \rightarrow 3) (de Almeida et al., 2022). La goma arábiga tiene aplicaciones en varias industrias debido a sus propiedades emulsificantes (Hu et al., 2019).

Figura 1.6

Estructura química de la goma arábiga



La *Tabla 1.8* proporciona información sobre recubrimientos a base de goma arábica y sus beneficios. Este tipo de recubrimientos podría ser útil para conservar por más tiempo productos agrícolas al prevenir la pérdida de nutrientes y características como el color y la firmeza.

Tabla 1.8

Recubrimientos a base de goma arábica reportados en la literatura

Principio activo	Concentración	Métodos	Resultados	Referencias
Cloruro de calcio	10% GA, 3% CaCl ₂	Agitar por 30 min. Ajustar pH a 5.6	Inhibió pérdida de contenido fenólico total y ácido ascórbico	(Khaliq et al., 2016)
Aceite esencial de canela (CEO)	0,5,10% GA 0,1,2% CEO 1% glicerol	Calentar a 40°C por 1h. Ajustar pH a 5.6	Conservó el color, firmeza, contenido de clorofila y carotenoides, etc.	(Etemadipoor et al., 2019)
-	5%,10%,15% y 20% GA	Agitar a 40°C por 1 h, filtrar, ajustar pH a 5.6	Retrasó la maduración y ralentizó la respiración	(A. Ali et al., 2013)

Nota. GA: goma arábica

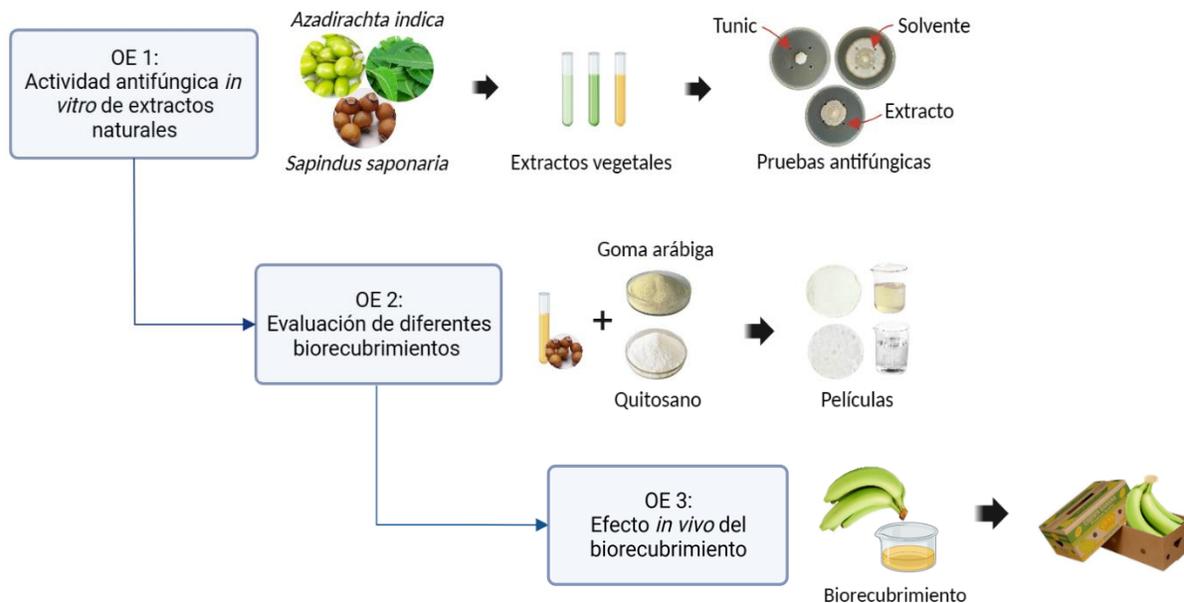
Capítulo 2

2. Metodología

La *Figura 2.1* muestra las fases del proceso de desarrollo del biorecubrimiento antifúngico, detallando las actividades llevadas a cabo para alcanzar los objetivos específicos establecidos. Estas etapas abarcan desde evaluaciones *in vitro* hasta pruebas *in vivo*, proporcionando una visión completa de la implementación y validación del biorecubrimiento.

Figura 2.1

Esquema del proceso de desarrollo del biorecubrimiento



2.1 Revisión bibliográfica

Se revisaron alrededor de 50 artículos científicos en ScienceDirect, utilizando palabras clave como recubrimiento comestible, actividad antifúngica y frutas. El enfoque principal fue la selección de materiales para preservar la calidad de las frutas. Se examinaron aspectos como la composición específica del recubrimiento, los resultados de la evaluación *in vivo* y las técnicas de preparación utilizadas.

Con el objetivo de potenciar el efecto antifúngico del biorecubrimiento, se propone la incorporación de extractos vegetales. En este sentido, se llevó a cabo la revisión de 30 artículos científicos sobre extractos vegetales con capacidad para inhibir el crecimiento de patógenos asociados al cultivo de banano. Durante la investigación, se examinaron aspectos como la parte utilizada de la planta, la técnica de extracción, el método antifúngico y la concentración de inhibición del extracto.

2.1.1 Selección de materiales

El quitosano y la goma arábica fueron seleccionados por su habilidad para formar películas resistentes y sus propiedades antimicrobianas. Estos polímeros han demostrado ser efectivos para preservar la calidad de las frutas, al reducir el crecimiento de microorganismos patógenos, como hongos y bacterias (Etemadipoor et al., 2019; Shah et al., 2021).

Los resultados de la revisión bibliográfica mostraron que los extractos de las especies vegetales *Sapindus saponaria* y *Azadirachta indica* tienen una alta actividad antifúngica contra los patógenos del banano. Estos extractos contienen metabolitos secundarios que tienen propiedades antifúngicas, insecticidas y detergentes (Gasca et al., 2020; D. Kumar et al., 2016).

2.2 Preparación de extractos vegetales

2.2.1 Recolección de material vegetal

Los frutos de *S. saponaria* se obtuvieron de un huerto del cantón Simón Bolívar, provincia Guayas, Ecuador (2°01'24.1"S 79°23'01.9"W). Se seleccionaron aquellos en estado maduro y sin defectos fisiológicos ni infecciones. Para preservar su calidad, se almacenaron en bolsas de papel Kraft a temperatura ambiente (Bose et al., 2019).

Las hojas y semillas de *A. indica* se recolectaron en el Campus universitario Gustavo Galindo, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) (2°08'54.0"S 79°57'32.3"W). El material se lavó con agua destilada para eliminar rastros de polvo o contaminantes superficiales.

Los frutos de banano de la variedad 'Cavendish Valery' fueron adquiridos de la finca San Jacinto ubicado en cantón El Triunfo, provincia Guayas, Ecuador (2°23'11.8"S 79°18'17.4"W). Los clústeres recibieron un tratamiento previo en la bananera, que consistió en una inmersión de 5 min en una solución de hipoclorito de sodio al 0.5%, sin adición de fungicidas.

2.2.2 Extracto de *Sapindus saponaria*

El extracto de *S. saponaria* se obtuvo siguiendo la metodología especificada por (Gasca et al., 2020). El pericarpio se separó de las semillas y se maceró con etanol en la proporción 1:6 (pericarpio: solvente, p/v) durante 72 h con agitación constante, tal como se ilustra en la *Figura 2.2*. Luego, el extracto resultante fue filtrado con papel filtro y se procedió a la eliminación del solvente utilizando un rotavapor a 50 °C. Finalmente, el extracto purificado se almacenó en pequeños frascos de vidrio ámbar a 4°C.

Figura 2.2

Extracto de Sapindus saponaria



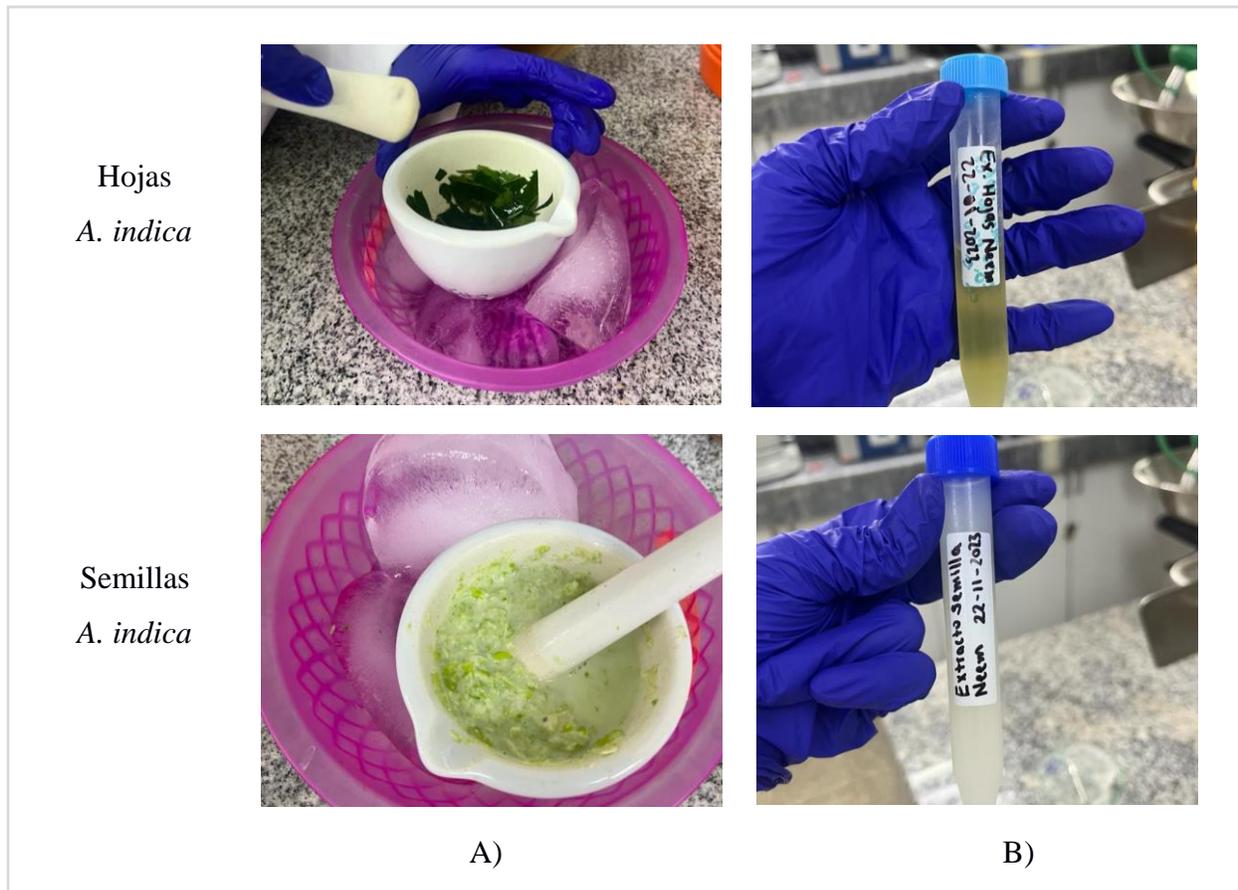
Nota. A) Maceración. B) Extracto

2.2.3 Extracto de *Azadirachta indica*

Los extractos de *Azadirachta indica* se obtuvieron siguiendo el procedimiento detallado por (Thangavelu et al., 2019). Se realizó la obtención individual de los extractos de hojas y semillas, triturando cada muestra en una solución de fosfato de sodio 0.1 M (pH 7.0) en la proporción 1:1 (muestra: solvente, p/v). El proceso se realizó usando un mortero sobre una cama de hielo, tal como se muestra en la *Figura 2.3*. A continuación, la solución se centrifugó durante 20 min, y el sobrenadante obtenido fue recolectado y filtrado esterilizado a través de un filtro Millipore de 0.22 μm antes de su uso inmediato en un ensayo de actividad antifúngica.

Figura 2.3

Extractos de Azadirachta indica



Nota. A) Molienda. B) Extracto

2.3 Evaluación antifúngica in vitro de extractos vegetales

2.3.1 Cepas patógenas

Lasiodiplodia theobromae y *Colletotrichum musae* fueron adquiridos de la colección de microorganismos del Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador (CIBE).

2.3.2 Preparación de medios de cultivo

La elaboración del medio de cultivo agar de papa y dextrosa (PDA) se realizó conforme a las instrucciones del fabricante, utilizando una proporción de 2,925 g en 75 mL de agua destilada. Esta mezcla se distribuyó en cinco botellas de vidrio de 300 mL y fue sometido a autoclave durante aproximadamente 1 h y 30 min. Después de la esterilización, las botellas se enfriaron gradualmente en la estufa a 50 °C antes de su utilización. Se repitió este proceso para cada ensayo antifúngico, garantizando la preparación fresca de los medios de cultivo necesarios.

2.3.3 Actividad antifúngica in vitro de extractos vegetales contra patógenos del banano

Se evaluó la actividad antifúngica de tres extractos vegetales contra *Lasiodiplodia theobromae* y *Colletotrichum musae* mediante la técnica de difusión en pozos de agar (Vijayakumar et al., 2020), con modificaciones. En cada pozo se colocó el extracto correspondiente en su concentración máxima, y se inoculó el patógenos subcultivado en el centro de las placas de Petri. En todos los tratamientos, se empleó Tunic (0.05% v/v) como control positivo, mientras que el control negativo fue el solvente usado para preparar el extracto. Las placas se sellaron con parafilm y se incubaron a 28 °C. Las evaluaciones de los ensayos con *L. theobromae* se realizaron después de 5 días, mientras que los ensayos con *C. musae* se evaluaron después de 12 días. El diámetro de crecimiento del hongo se midió en milímetros en el programa ImageJ. Cada tratamiento se repitió mínimo 3 veces.

Luego, se evaluó el extracto de *S. saponaria* a concentraciones de 4, 6, 8 y 10 mg/ml contra *C. musae* utilizando el método de difusión en pozos de agar mencionado anteriormente.

2.4 Preparación de los tratamientos

Se prepararon cinco formulaciones diferentes de recubrimientos comestibles con extracto de *S. saponaria* (10 mg/ml). La primera formulación se realizó conforme al procedimiento detallado por (Łupina et al., 2021). Se preparó una solución de goma arábiga al 3.5% (p/v) agitando continuamente a 50 °C durante 1 h. Luego, se añadió gelatina al 1.5% (p/v) con agitación constante durante 1 h, y se incorporó 1% (v/v) de glicerina como plastificante. Tras un periodo de enfriamiento, se integró el extracto vegetal en la solución y se sometió a ultrasonido para el tratamiento de desgasificación.

Para la segunda formulación se siguió el enfoque propuesto por (Kan et al., 2019). Primero, se preparó una solución de quitosano al 1.5% (p/v) en ácido acético al 1% (v/v), agitándola continuamente a 40 °C durante 5 h. Al mismo tiempo, se elaboró otra solución utilizando gelatina al 2% (p/v) agitándola contantemente a 50 °C por 1 h. En ambas soluciones, se añadió 0.45% v/v de glicerina. Posteriormente, se mezcló estas soluciones en una proporción 1:1 (v/v) durante 30 min, añadiendo luego el extracto vegetal. La solución se desgasificó. La tercera formulación se preparó de forma similar a la segunda, excepto que la gelatina se disolvió directamente en la solución de quitosano.

En la cuarta formulación, se siguió el método descrito por (T. Xu et al., 2019). Primero, se preparó una solución de quitosano al 1.5% (p/v) en ácido acético al 1% (v/v) a 40 °C durante 5 h. Luego, se añadió 0.3% v/v de glicerina a la mezcla. Simultáneamente, se preparó otra solución utilizando goma arábiga al 1.5% (p/v) en agua destilada a 28 °C durante 1 h, y se le añadió el extracto vegetal. Posteriormente, estas dos soluciones fueron mezcladas en proporción 1:1 (v/v)

durante 30 min. En cuanto a la quinta formulación, se llevó a cabo de manera similar a la cuarta, pero en este caso, la goma arábica se disolvió directamente en la solución de quitosano. Ver detalles en la *Tabla 2.1*, que resume las cantidades usadas en las 5 formulaciones.

Tabla 2.1

Proporciones utilizadas en las formulaciones de biorecubrimiento

N°	Formulación	Goma arábica (% p/v)	Quitosano (% p/v)	Gelatina (% p/v)	Glicerina (% v/v)	Extracto SS (mg mL ⁻¹)
1	GA/GE/SS*	3.5	-	1.5	1	10
2	CH/GE/SS	-	1.5	2	0.45	10
3	CH/GE/SS*	-	1.5	2	0.45	10
4	CH/GA/SS	1.5	1.5	-	0.3	10
5	CH/GA/SS*	1.5	1.5	-	0.3	10

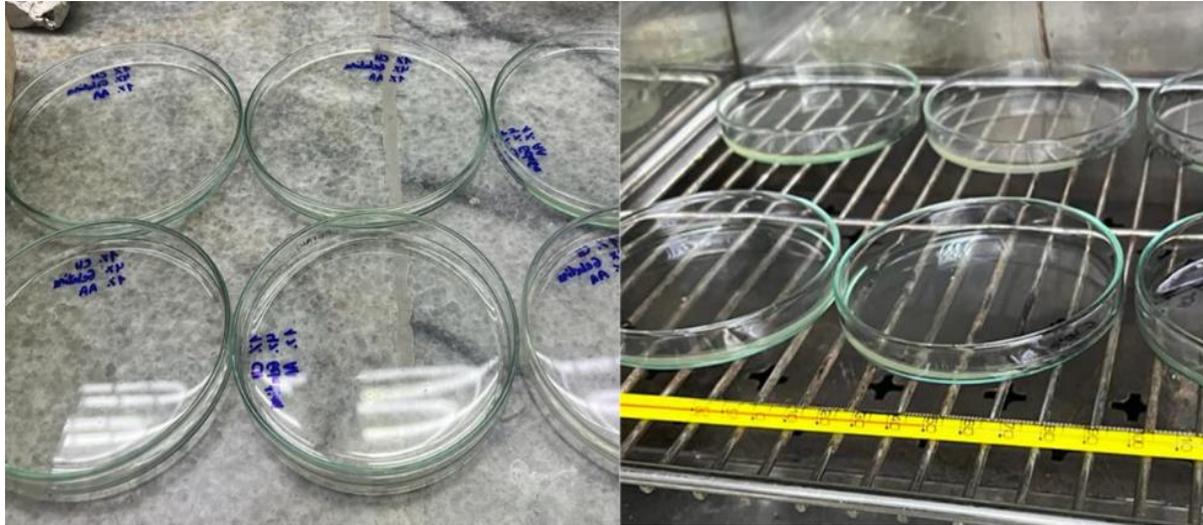
Nota. SS: *Sapindus saponaria*, CH: quitosano, GA: goma arábica, GE: gelatina

2.5 Preparación de las películas

Para cada formulación, se prepararon seis películas siguiendo el procedimiento de (Poverenov et al., 2014). Se vertieron 8 mL de las soluciones filmogénicas en placas de Petri de 8 cm de diámetro. Las formulaciones que contenían gelatina se secaron a 23 ± 2 °C durante 72 h, mientras que las demás se secaron a 45 °C durante 12 h, tal como se muestra en la *Figura 2.4*. Como resultado, solo las formulaciones GA/GE/SS y CH/GE/SS* se plastificaron. Las películas se despegaron de las placas y se pre-acondicionaron a 28 °C en un desecador por 48 h antes de las pruebas físicas.

Figura 2.4

Proceso de secado de las películas



2.6 Propiedades físicas de las películas

2.6.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó por triplicado secando muestras de película en un horno a 105 °C durante 24 h hasta alcanzar un peso constante (Kan et al., 2019). La humedad se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(M_o - M_f)}{M_o} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde M_o y M_f es el peso de las películas antes y después del secado (g).

2.6.2 Solubilidad en agua

La solubilidad en agua se obtuvo por triplicado sumergiendo las películas secas en 30 ml de agua destilada por 24 h con agitación constante. Después de la inmersión, las películas hinchadas se retiraron y secaron nuevamente a 105 °C hasta alcanzar un peso constante (Zhang et al., 2020). La solubilidad se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{(M_o - M_f)}{M_o} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde M_o y M_f es la masa seca inicial y la masa seca final (g).

2.6.3 Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua se determinó por triplicado, según el método gravimétrico descrito en la norma ASTM E96-05 (Du et al., 2021). Se colocaron muestras de película sobre recipientes de plástico con 15 mL de agua destilada (1.5 cm de diámetro y 5.5 cm de altura). Los frascos se colocaron en un desecador a 25 °C y se midió la pérdida de masa durante 6 h, con pesos registrados a intervalos de 1.5 h. La permeabilidad se calculó con la siguiente ecuación:

$$WVP = \frac{\Delta m \cdot d}{A \cdot t \cdot \Delta P} \quad (2.3)$$

Donde Δm es el cambio de peso del recipiente (g), d es el espesor medio de la película (mm), A es el área de la película expuesta (m^2), t es el intervalo de tiempo y ΔP es la diferencia de presión de vapor de agua (kPa) en ambos lados de la película.

2.6.4 Valores referenciales

Se recopilaron datos de permeabilidad, solubilidad y humedad de películas comestibles de gelatina. Los datos se obtuvieron de 12 artículos científicos de la base de datos de ScienceDirect. Los rangos se establecieron utilizando los valores reportados en los estudios seleccionados.

Tabla 2.2*Rango de valores adecuados para películas a base de gelatina*

Contenido de humedad (%)	Solubilidad en agua (%)	Permeabilidad al vapor (g·mm/m²·h·kPa)	Referencias
10.40 - 23.32	20.54 - 46.10	0.37 - 2.71	(Fakhreddin et al., 2013; Kan et al., 2019; Liu et al., 2020; Pérez et al., 2018; Pulla et al., 2021; Sahraee et al., 2017)

2.7 Evaluación *in vivo* de tratamientos

En este estudio, se utilizaron 80 clústeres de banano en estado comercial, los cuales se dividieron en cinco grupos para someterlos a diferentes tratamientos: GA/GE/SS*, CH/GE/SS*, control positivo, control negativo y nada.

Para los dos primeros tratamientos, se sumergió individualmente la corona de los clústeres en los biorecubrimientos CH/GE/SS* y GA/GE/SS*, respectivamente. Como control positivo, se aplicó tres dosis de una solución de tiabendazol (0.91 mL de Mertect® 20 SL, Syngenta en 500 mL de agua), mediante un atomizador estéril que cubrió la parte superior del banano (Syngenta Crop Protection S.A.). Los dos últimos grupos solo recibieron el pretratamiento de desinfección de la bananera. Todos los tratamientos se dejaron secar durante 17 horas.

Posteriormente, se colocó 20 uL de una solución de esporas que contenía 1×10^4 esporas/mL en discos de papel estéril sobre la corona del banano (Elmer et al., 2007). Cabe destacar que el último grupo no fue infectado. Después de la inoculación, los frutos fueron cubiertos con películas plásticas y almacenados a 25 °C siguiendo las condiciones descritas por

(Gao et al., 2024). El tiempo de almacenamiento de 14 días fue el mismo tiempo de exportación de banano de Ecuador a EE. UU (Dole Ecuador, 2020).

2.8 Propiedades físicas del banano

2.8.1 Pérdida de peso

La pérdida de peso se determinó mediante la diferencia entre el peso inicial del clúster de banano y el peso registrado después de 14 días (Odetayo et al., 2022). La pérdida de peso se calculó con la siguiente ecuación

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{(M_o - M_f)}{M_o} \times 100 \quad (2.4)$$

Donde M_o y M_f es el peso inicial y final del fruto, respectivamente.

2.8.2 Incidencia de la enfermedad

La incidencia de la enfermedad se refiere al porcentaje de frutos de banano que están afectados por enfermedades. En este estudio, se consideraron las manchas negras visibles y otros síntomas como indicadores de enfermedad cada 14 días (Odetayo et al., 2022). La incidencia de la enfermedad se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$DI(\%) = \frac{N^\circ \text{ de bananos infectados}}{^\circ N \text{ total de bananos}} \times 100 \quad (2.5)$$

2.8.3 Sólidos solubles totales

El índice de refracción del jugo de la fruta se midió con un refractómetro de mano (ATC-Aichose) para determinar los sólidos solubles. Para ello, se homogeneizaron 5 g de pulpa de banano en 15 mL de agua destilada y se filtró. Se colocó una gota del jugo en el prisma del

refractómetro para obtener la lectura del % de SST directamente (Odetayo et al., 2022). Para cada tratamiento, se utilizaron dos clústeres, de los cuales se tomaron tres dedos de manera aleatoria.

2.8.4 Acidez titulable

La acidez titulable se ensayó en tejidos de pulpa de banano. Para ello, se pesaron 10 g de pulpa de banano y se maceraron en 40 ml de agua destilada. La filtración del homogeneizado se realizó con una gasa. Posteriormente, el filtrado se tituló con NaOH (0.1 mol L⁻¹) con un pH de 8. Se utilizó el 0.1% de fenolftaleína como indicador y la acidez titulable de la pulpa del fruto se expresó como porcentaje sobre la base del peso fresco, siendo el ácido málico el principal ácido presente (S. Ali et al., 2022). Para cada tratamiento, se utilizaron dos clústeres, de los cuales se tomaron tres dedos de manera aleatoria.

2.8.5 Índice de maduración

Se calculó dividiendo los valores de sólidos solubles totales por acidez titulable en cada período de muestreo (S. Ali et al., 2022).

$$IM = \frac{\% SST}{\% AT}$$

2.9 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con Python 3.6, utilizando la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la distribución. Se aplicó ANOVA con prueba post-hoc Tukey para resultados con distribución normal y Kruskal-Wallis con método Dunn para otros casos. Los resultados se representaron gráficamente con medias \pm desviación estándar, y se estableció un nivel de significación del 5% en todos los casos

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Actividad antifúngica *in vitro* de extractos vegetales

Los extractos de *Sapindus saponaria* y de semillas de *Azadirachta indica* redujeron significativamente el crecimiento micelial de *Colletotrichum musae*, el hongo responsable de la antracnosis del banano *Figura 3.1A*. El extracto de *S. saponaria* destacó como el mejor tratamiento vegetal, exhibiendo un diámetro de crecimiento de 50.03 ± 4.44 mm, significativamente menor que el control negativo 70.09 ± 0.47 mm ($P < 0.05$).

Este resultado es consistente con los hallazgos de otros estudios, que han demostrado que el extracto de *S. saponaria* pueden inhibir el crecimiento de *C. musae* en un grado similar al tiabendazol (Gasca et al., 2020). La actividad antifúngica del extracto se atribuye a las saponinas presentes en el pericarpio del fruto (Augustin et al., 2011; Gasca et al., 2020). El principal modo de acción de las saponinas contra los hongos implica la formación de poros y la pérdida de integridad de la membrana (Zaynab et al., 2021).

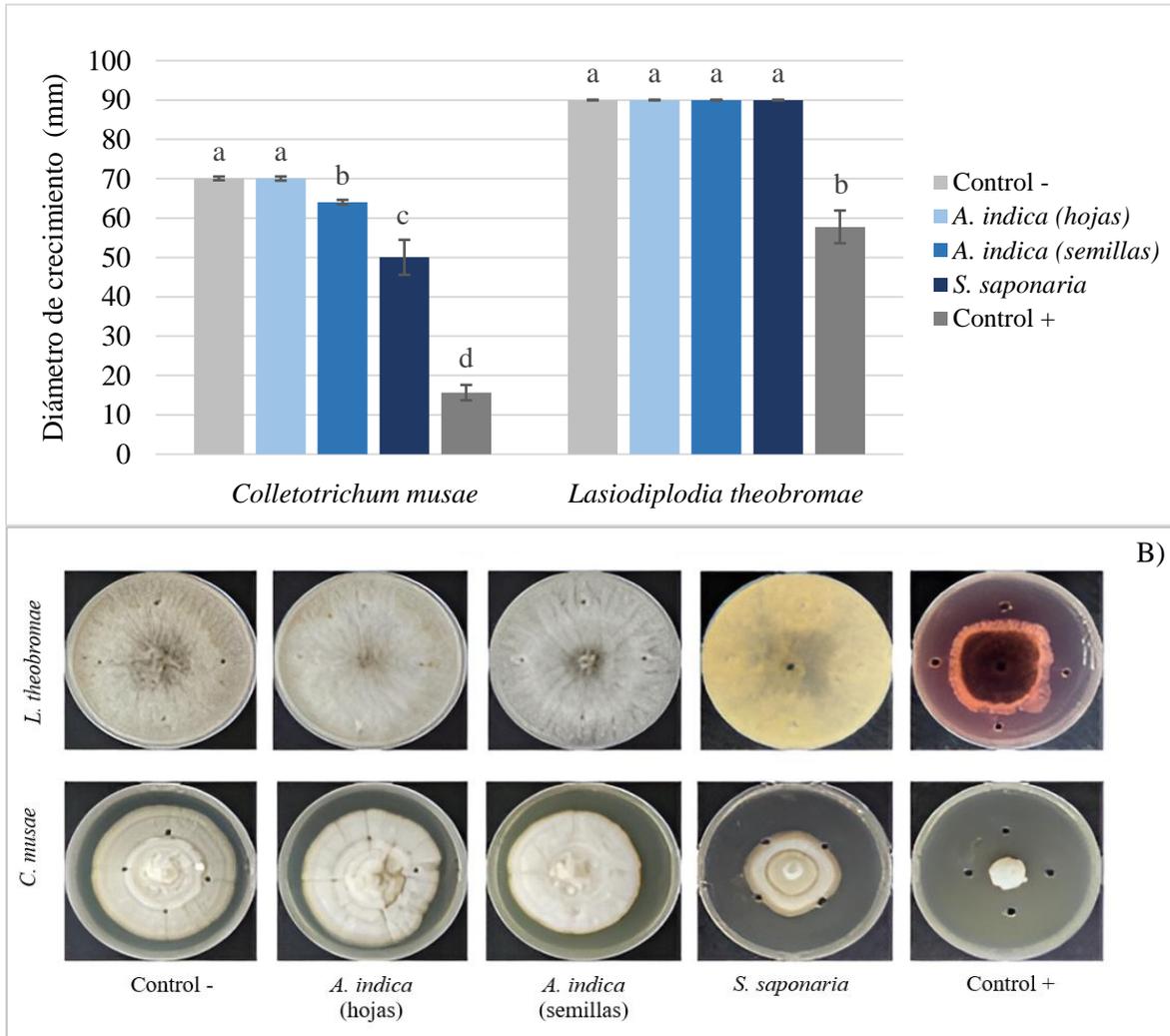
No obstante, los extractos evaluados no fueron eficaces para reducir el crecimiento *Lasiodiplodia theobromae*, el hongo responsable de la podredumbre marrón del banano. Todos los tratamientos vegetales mostraron un diámetro de 90 mm, similar al control negativo. Estos resultados pueden deberse a la capacidad del patógeno de desarrollar mecanismo de resistencia contra una variedad de agentes antifúngicos (Yang et al., 2021). En este caso, el tratamiento control con el fungicida sintético tuvo un diámetro considerable de 57.77 ± 4.16 mm y adquirió una tonalidad roja *Figura 3.1B*.

El cambio de color sugiere que el fungicida puede estar induciendo la producción de melanina. La melanina es un pigmento natural que se produce en algunos hongos y desempeña un papel importante en su protección (Crispim et al., 2023). Otro aspecto importante es la

recolección del material vegetal. Se ha demostrado que la concentración de metabolitos secundarios segregados por las plantas fluctúa con la estación, así como con diferentes condiciones climáticas y geográficas (Bharti et al., 2021).

Figura 3.1

Actividad antifúngica in vitro de extractos vegetales contra C. musae y L. theobromae



Nota. A) análisis estadístico del diámetro micelial, B) apariencia visual de las placas de Petri. En las barras, las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

3.2 Actividad antifúngica *in vitro* de *Sapindus saponaria* a diferentes concentraciones

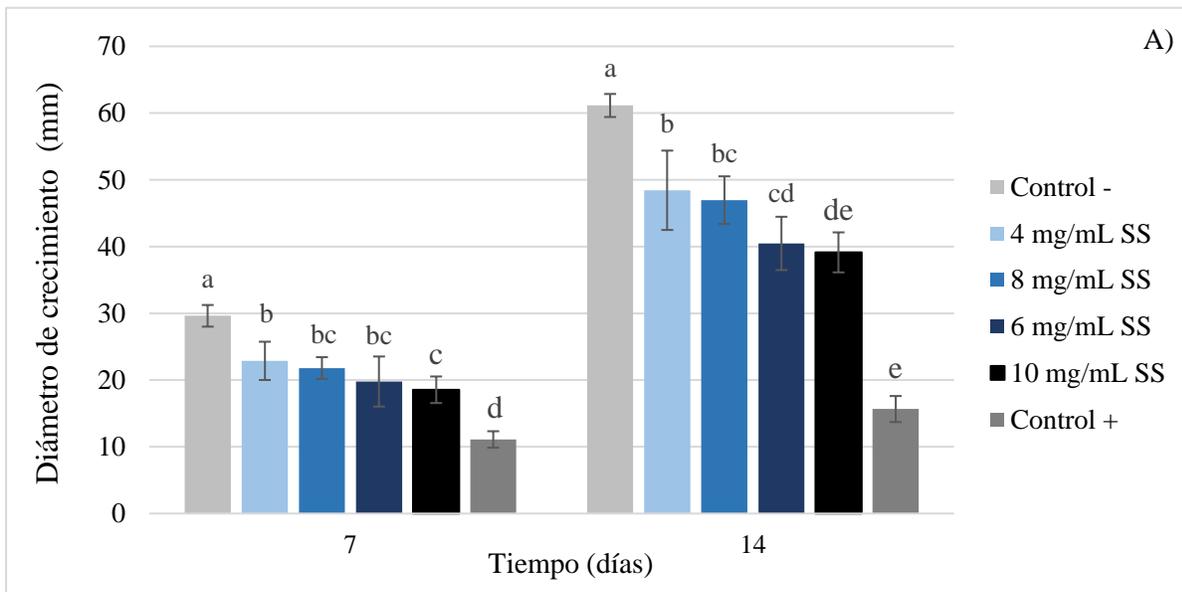
En este estudio, se evaluaron diferentes concentraciones del extracto de *Sapindus saponaria* contra el crecimiento de *Colletotrichum musae*. Se encontró que el efecto inhibitor del extracto aumentó con la concentración. Todos los tratamientos vegetales evaluados redujeron significativamente el diámetro respecto al control negativo, tanto para el día 7 como para 14.

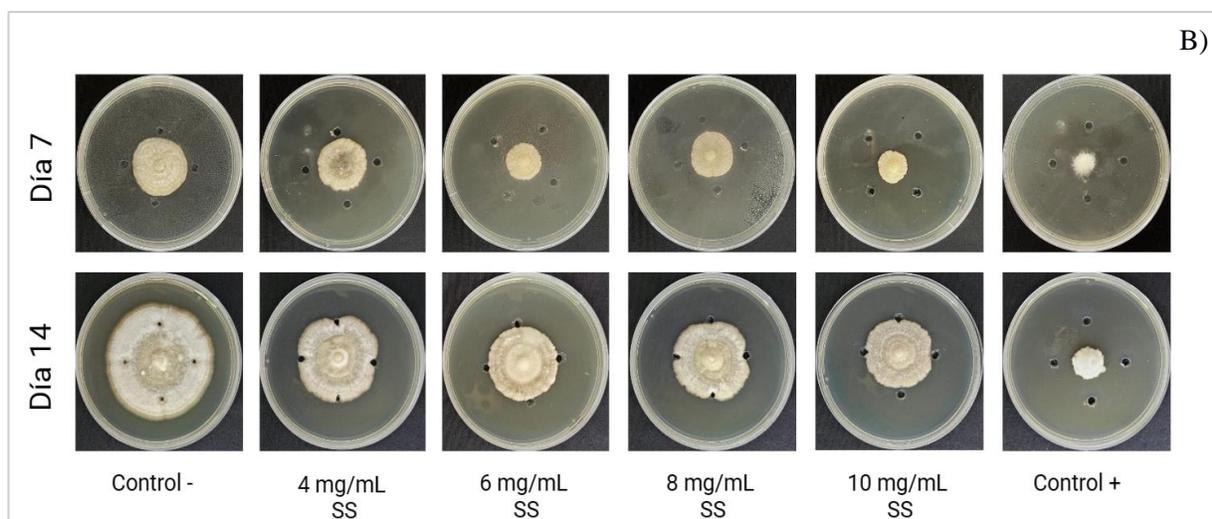
Para el día 14, los tratamientos con 6 mg mL⁻¹ y 10 mg mL⁻¹ de *S. saponaria* fueron los más efectivos para inhibir el crecimiento del patógeno, con diámetros de 40.47 ± 3.99 mm y 39.13 ± 2.99 mm, respectivamente *Figura 3.2*. No obstante, el tratamiento con 10 mg mL⁻¹ fue el único que se asemejó al control positivo, lo que sugiere que es la mejor concentración.

Una investigación anterior realizada con frutos de Brasil demostró que se requiere de concentración de *S. saponaria* más bajas (0.5 mg mL⁻¹ y 1 mg mL⁻¹) para presentar una zona de inhibición significativa contra *C. musae* (Gasca et al., 2020). La variabilidad en la composición del extracto podría explicarse por diversas interacciones bióticas, condiciones ambientales, topografía, genotipo de la especie y condiciones de cultivo (Bharti et al., 2021).

Figura 3.2

Actividad antifúngica in vitro de S. saponaria a diferentes concentraciones





Nota. A) análisis estadístico del diámetro micelial, B) apariencia visual de las placas de Petri. En las barras, las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas en los tratamientos según la prueba de Dunn ($P < 0.05$).

3.3 Propiedades físicas de las películas

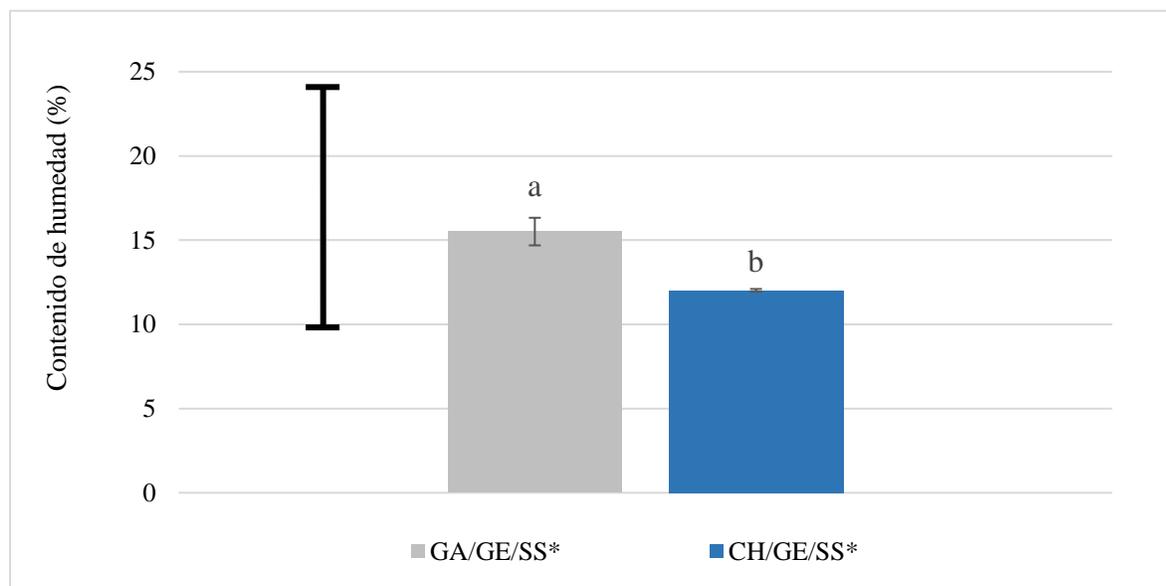
3.3.1 Contenido de humedad

Las películas con extracto de *S. saponaria* mostraron diferencias significativas en el contenido de humedad según el material de recubrimiento utilizado *Figura 3.3*. Las películas CH/GE/SS* y GA/GE/SS* presentaron niveles del $12.02 \pm 0.08 \%$ y $15.51 \pm 0.82 \%$, respectivamente, resultados que se encuentran dentro del rango establecido en la literatura para películas de gelatina.

La diferencia entre la humedad entre ambas películas se atribuye a la estructura de los materiales. La goma arábiga, al ser más porosa que el quitosano, presenta un mayor número de espacios intersticiales entre sus partículas (Bashir & Haripriya, 2016). Estos espacios pueden albergar moléculas de agua, lo que explica su mayor capacidad de retención de agua. No obstante, se prefieren películas con menor contenido de humedad para el envasado de alimentos sensibles a la humedad, como el banano (Zhang et al., 2020).

Figura 3.3

Contenido de humedad (%) de las películas CH/GE/SS y GA/GE/SS**



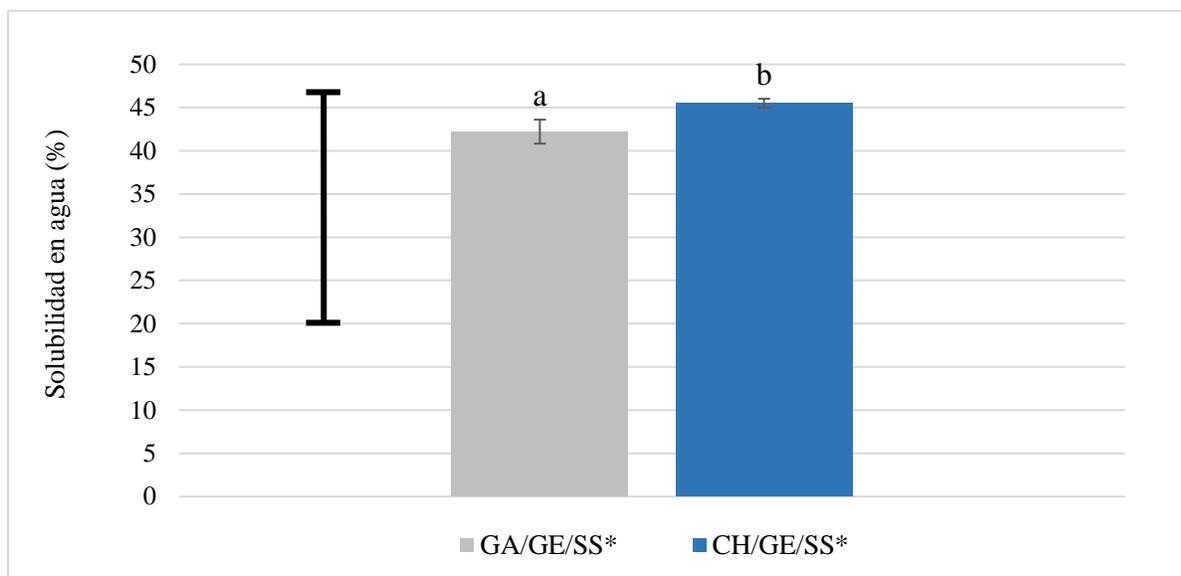
Nota. La línea negra muestra el rango establecido bibliográficamente. En las barras, las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de ANOVA ($P < 0.05$).

3.3.2 Solubilidad en agua

La solubilidad de una película en agua es una propiedad importante de las películas comestibles y la insolubilidad o resistencia al agua generalmente se requiere para una película potencialmente comercial (Ma et al., 2012). En este estudio, se evaluó la solubilidad en agua de dos películas de biorecubrimiento, CH/GE/SS* y GA/GE/SS*. Los resultados mostraron que ambas películas presentaron una solubilidad en agua dentro del rango establecido bibliográficamente, con valores de $45,49 \pm 0,52$ % y $42,21 \pm 1,39$ %, respectivamente. Estos resultados sugieren que ambas películas son adecuadas, ya que cumplen con los requisitos de insolubilidad en agua establecidos, aunque se observaron diferencias significativas entre ellas ($P < 0.05$).

Figura 3.4

Solubilidad en agua (%) de las películas CH/GE/SS y GA/GE/SS**



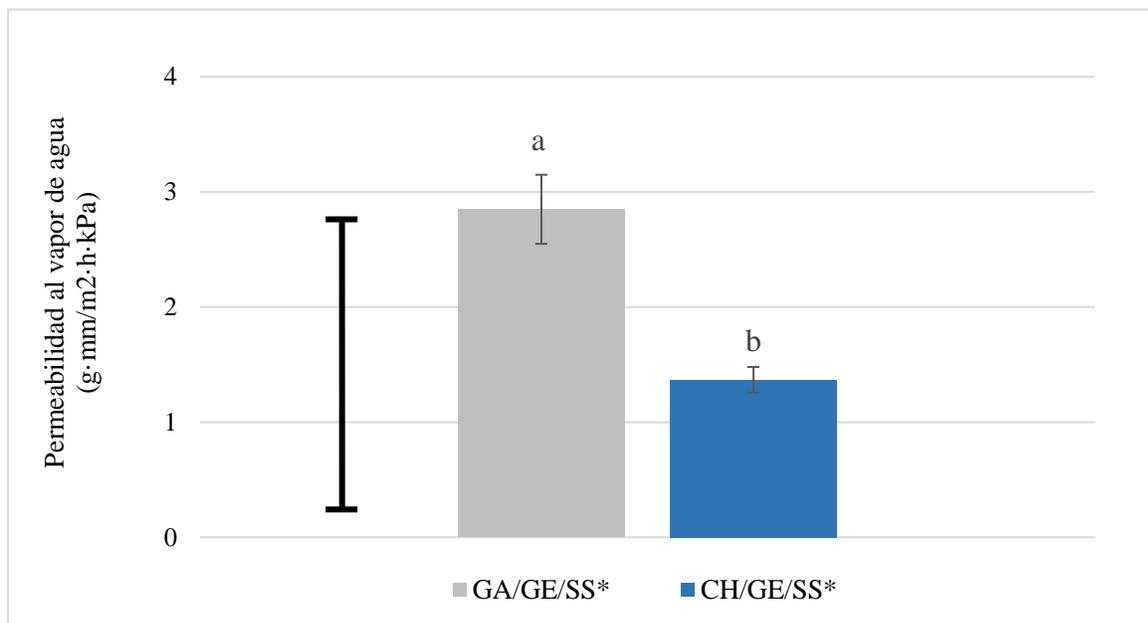
Nota. La línea negra muestra el rango establecido bibliográficamente. En las barras, las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de ANOVA ($P < 0.05$).

3.3.3 Permeabilidad al vapor de agua

Ambas películas se encuentran dentro del rango establecido para la permeabilidad al vapor de agua según la literatura. En comparación con la película GA/GE/SS*, la película CH/GE/SS* mostró una menor permeabilidad al vapor de agua *Figura 3.5*. Esto puede deberse a las interacciones entre los componentes de las películas. La goma arábica, que es uno de los componentes de la película GA/GE/SS*, es un polisacárido con una estructura altamente reticulada. Esta estructura reticulada proporciona a la película una mayor porosidad, lo que facilita el paso del vapor de agua (de Almeida et al., 2022). El quitosano, que es uno de los componentes de la película CH/GE/SS*, es un polisacárido con una estructura menos reticulada (Li et al., 2018). Esta estructura menos reticulada proporciona a la película una menor porosidad, lo que dificulta el paso del vapor de agua.

Figura 3.5

Permeabilidad al vapor de agua de las películas CH/GE/SS y GA/GE/SS**



Nota. La línea negra muestra el rango establecido bibliográficamente. En las barras, las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de ANOVA ($P < 0.05$).

3.4 Propiedades físicas del banano

3.4.1 Pérdida de peso

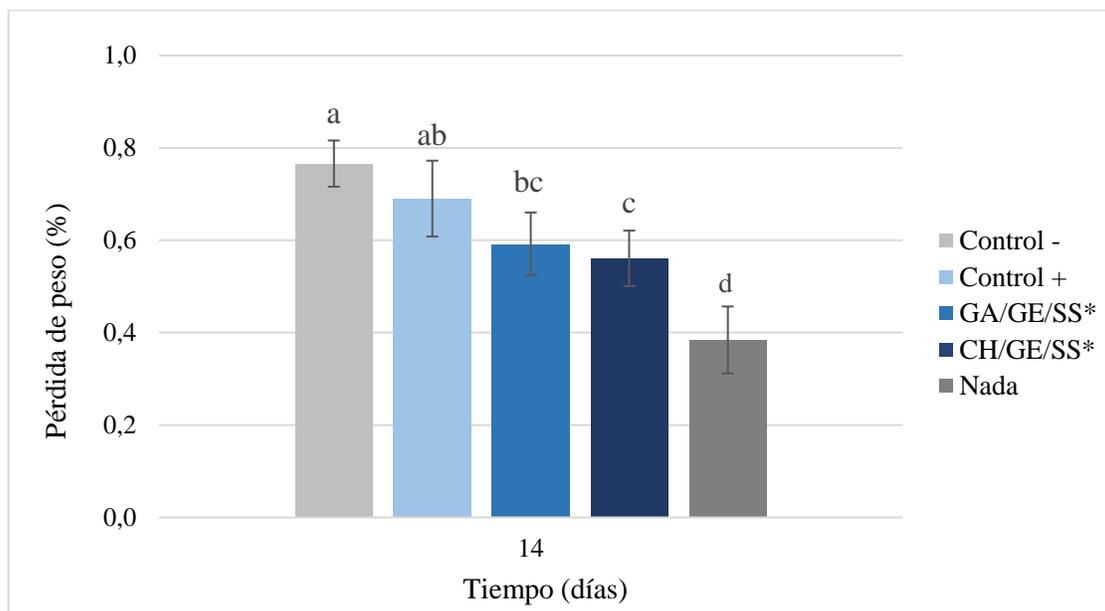
La pérdida de peso del banano en el periodo postcosecha es uno de los parámetros de calidad a considerar durante el almacenamiento y transporte de frutas (Li et al., 2019). Se puede observar que en el día 14 existe diferencia significativa en la pérdida de pesos de bananos sometidos a diferentes tratamientos *Figura 3.6*. El control negativo exhibió una pérdida de peso del 0.77%, la más elevada entre los tratamientos. Esta mayor pérdida de agua se debe a la exposición directa al ambiente, lo que provoca la transpiración y, como consecuencia, el marchitamiento de la fruta (Robert Walle, 2023). Además, se observó que tanto la formulación

de GA/GE/SS* y CH/GE/SS* pueden inhibir efectivamente la pérdida de humedad conservando la calidad de las frutas en comparación con el grupo de control negativo.

La disminución de la pérdida de humedad por evaporación y transpiración se atribuye a la capacidad de barrera de la película comestible, que impide el paso de moléculas de agua a través de la película (Chi et al., 2019). La formulación CH/GE/SS* tuvo un porcentaje de pérdida de peso del 0.56%, siendo menor al de la formulación de GA/GE/SS* con 0.59%. El quitosano forma películas protectoras menos permeables al vapor de agua comprobado en la sección 3.3.3

Figura 3.6

Pérdida de peso (%) del banano sometido a diferentes tratamientos



Nota. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Dunn ($P < 0.05$).

3.4.2 Incidencia de la enfermedad

La incidencia de la enfermedad es significativamente mayor en los bananos infectados y sin tratamiento (control negativo). Por el contrario, la formulación CH/GE/SS* presenta una

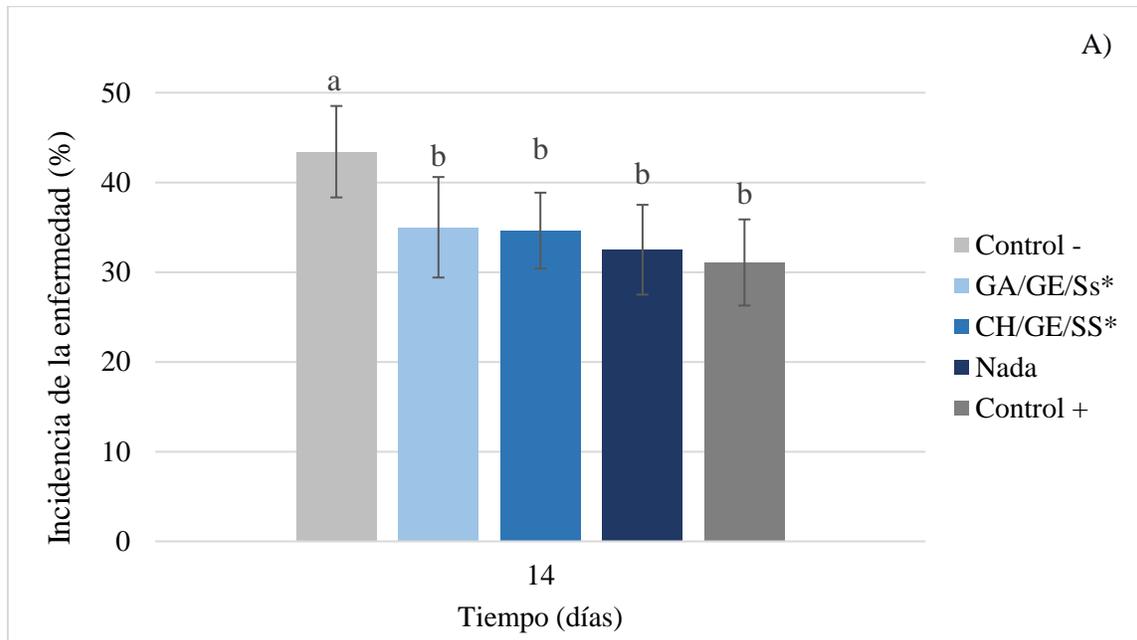
menor incidencia en comparación con la película GA/GE/SS*. Al no existir una diferencia significativa del control positivo con las biopelículas, estas últimas se consideran adecuadas y son más beneficiosas para el consumo de banano al ser un producto natural.

El MERTECT 20 SL se clasifica como categoría toxicológica IV (ligeramente tóxico) por la presencia de tiabendazol. Al reemplazar el uso de fungicidas químicos por biorecubrimientos comestibles se evitan posibles intoxicaciones causadas por el consumo de frutos expuestos a fungicidas (edifarm, 2020).

En otros estudios se ha informado que no se identifican indicios de la enfermedad con los tratamientos vegetales en el día 15, siendo los cambios notables recién en el día 20 (Odetayo et al., 2022). La variabilidad en los resultados podría derivarse de la naturaleza subjetiva de la evaluación, ya que esta depende del criterio del evaluador, es decir, de lo que considere como indicio de enfermedad.

Figura 3.7

Incidencia de la enfermedad (%) del banano sometido a diferentes tratamientos





Nota. A) Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Dunn ($P < 0.05$). B) Coloración de bananos en día 1 y día 14.

3.4.3 Sólidos solubles totales

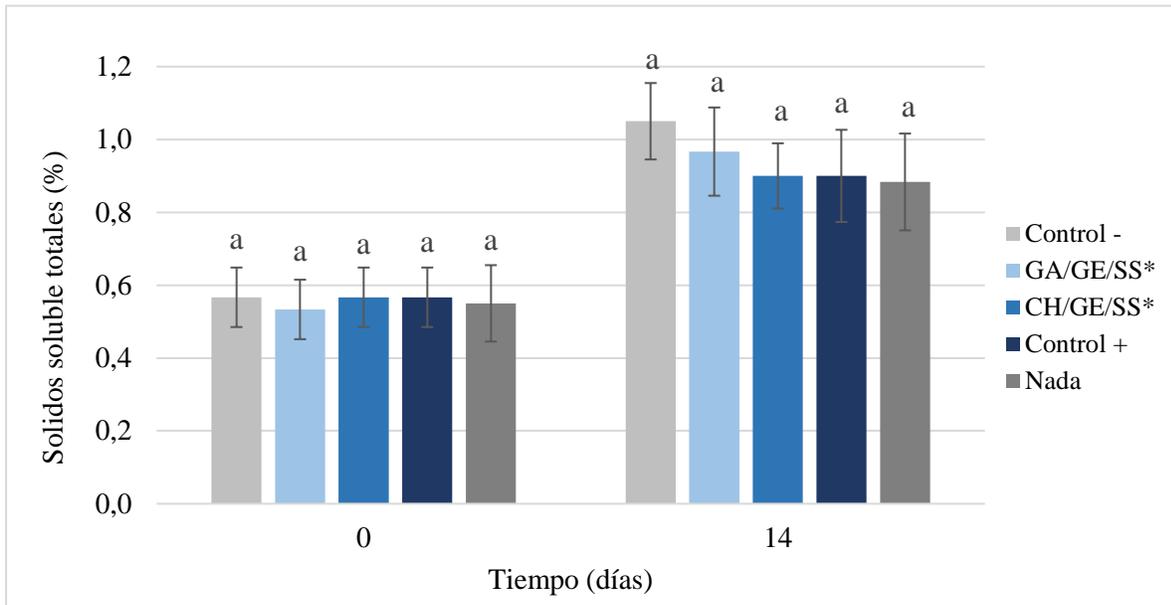
Los sólidos solubles totales de los frutos aumentan naturalmente a medida que maduran, ya que al inicio la fruta no ha alcanzado su máxima concentración. En la *Figura 3.8* se observa que esta tendencia se mantuvo al llegar al día 14 (Li et al., 2019). Una fruta con mayor contenido de SST puede tener un sabor más dulce y una textura más suave, debido principalmente a la hidrólisis del almidón y otros carbohidratos que conducen a la producción de azúcares solubles

Nota. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Dunn ($P < 0.05$).

La formulación de GA/GE/SS* genera que el banano tenga un mayor porcentaje de SST con un valor de 0.97 °Brix en comparación con la de CH/GE/SS* con 0.90 ° Brix, además se evidenció que la aplicación de los recubrimientos retrasó el aumento de SST producto de un nivel bajo de oxígeno interno (Li et al., 2019).

Figura 3.8

Sólidos solubles totales (%) del banano sometido a diferentes tratamientos



Nota. Las diferencias significativas se evaluaron con la prueba de ANOVA ($P < 0.05$).

3.4.4 Acidez titulable

La acidez titulable representa el total de ácidos orgánicos, en especial el ácido cítrico y el ácido málico que existen en un fruto, y son los que brindan el sabor ácido o dulce característico del banano. Entre mayor sea el contenido de ácidos orgánicos medido, más ácida será la fruta (Li et al., 2019), por lo que a medida que la fruta se vaya madurando se espera que adquiera un sabor más dulce por lo que la acidez debe disminuir tal como se observa en la *Figura 3.9*.

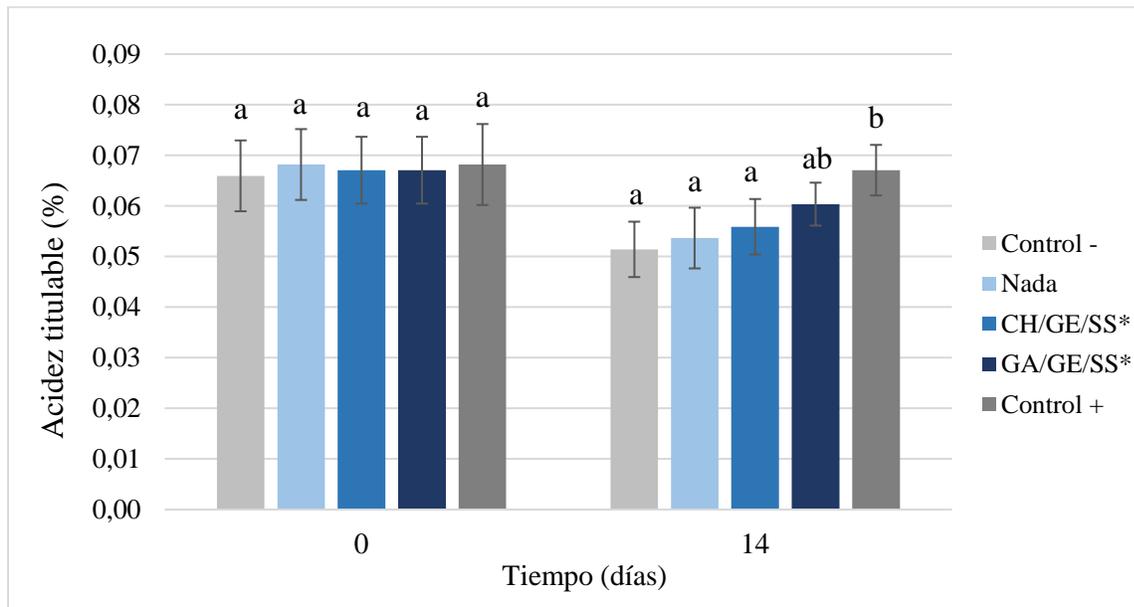
En el día 14 la presencia de una película comestible en la corona del fruto detiene el consumo de ácido titulable ya que reduce la tasa de respiración. Por tanto, al tener una AT significativamente menor en los bananos con biorecubrimiento se tuvo una fruta más dulce comparada con el control positivo. (Li et al., 2019).

En otro estudio que empleó recubrimientos de bionanocompuestos, se reportan valores de sólidos solubles totales del 10.31% después de 7 días de evaluación *in vivo* (Li et al., 2019).

Durante ese periodo, los SST de sus bananos aumentaron aproximadamente un 4%, mientras que, en el doble del tiempo, los nuestros apenas superaron el 1%. Esta variación podría atribuirse a la madurez inicial de los plátanos; los nuestros provienen directamente de la bananera, a diferencia de los del otro estudio, que fueron adquiridos en un mercado local.

Figura 3.9

Acidez titulable (%) del banano en tiempo inicial y en el día 14



Nota. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

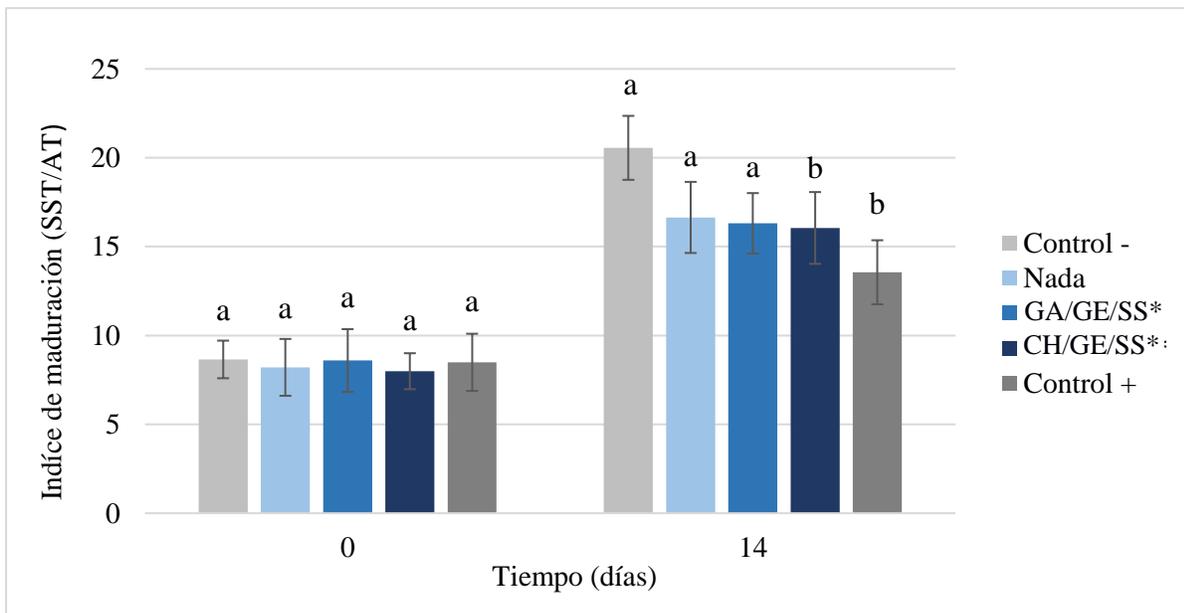
3.4.5 Índice de maduración y color de la cáscara

Por lo general, el índice de maduración tiende a aumentar a medida que la fruta avanza en su proceso evolutivo. Como se puede apreciar en la *Figura 3.10*, los recubrimientos de quitosano y goma arábica tienen el efecto de retardar el proceso de maduración en relación con el control negativo. Esto se debe a que la película reduce la tasa de intercambio de gases entre la fruta y las condiciones ambientales favoreciendo a una mayor frescura del banano (Li et al., 2019).

Cabe destacar que, durante los 14 días de estudio, no se aprecia variación en el color de la cáscara del banano en ninguno de los tratamientos. Desde el inicio hasta el día 14, la coloración permanece completamente verde *Figura 3.7 B*, un fenómeno atribuible a las condiciones de temperatura y humedad controladas a las que se encuentran sometidos los bananos.

Figura 3.10

Índice de maduración del banano en tiempo inicial y en el día 14



Nota. Las letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se desarrollaron dos biorecubrimientos con materiales comestibles y naturales como lo son el quitosano y la goma arábica incorporando extracto de *Sapindus saponaria*. Se evidenció un 40% de capacidad antifúngica en el extracto vegetal contra el patógeno *Colletotrichum musae*, causante de la enfermedad de Antracnosis en la postcosecha del banano. Se obtuvieron dos formulaciones de películas: CH/GE/SS* y GA/GE/SS*. Pruebas *in vivo* representan una alternativa viable al retardar la maduración del fruto en un 25% y para mejorar la calidad postcosecha del banano.
- Los extractos de semillas de *Azadirachta indica* y *Sapindus saponaria* inhibieron significativamente el crecimiento micelial de *Colletotrichum musae* después de 14 días. El extracto de *S. saponaria* a una concentración de 10 mg mL⁻¹, demostró mayor inhibición en comparación con *A. indica*. No hubo diferencia significativa respecto al control positivo empleado en el estudio (P<0.05). En relación con *Lasiodiplodia theobromae*, ninguno de los tratamientos vegetales mostró una reducción significativa de su crecimiento. Estos resultados resaltan el potencial particular de *Sapindus saponaria* como un agente antifúngico prometedor, justificando su integración en el biorecubrimiento.
- Se obtuvieron películas plastificadas en las formulaciones CH/GE/SS* y GA/GE/SS*, exhibiendo propiedades físicas que se encuentran dentro de los parámetros establecidos en la literatura científica. Sin embargo, es importante señalar que la goma arábica presente en la formulación GA/GE/SS* posee una estructura reticulada y porosa. Esta particular

estructura de la goma arábica conduce a un aumento significativo en el contenido de humedad y a una permeabilidad al vapor de agua superior en comparación con el quitosano. Estas propiedades hacen que la goma arábica no sea la opción más adecuada, en aplicaciones relacionadas con alimentos sensibles, como el banano.

- Se aplicaron dos recubrimientos naturales, uno de quitosano CH/GE/SS* y otro de goma arábica GA/GE/SS* en la corona del banano. Los resultados mostraron que ambos recubrimientos, en comparación con los bananos infectados sin tratar, provocaron una disminución en la pérdida de peso y menor incidencia de la enfermedad de Antracnosis. Además, retardan la maduración del fruto con valores de 16.31 y 16.05 respectivamente, frente a un valor de 20.56 del control negativo. Las pruebas *in vivo* demuestran que la formulación CH/GE/SS* hace que pierda menos peso frente a la formulación de GA/GE/SS*. Además, el quitosano tuvo una menor cantidad de bananos infectados, menor AT brindando un sabor más dulce a la fruta. Por tanto, aplicar recubrimientos naturales antifúngicos es una alternativa viable para mantener la calidad y disminuir las pérdidas de bananos durante la postcosecha.

4.1.2 Recomendaciones

- Realiza pruebas antifúngicas *in vitro* con las películas de biorecubrimiento para evaluar el efecto inhibitorio del extracto vegetal cuando interactúa con otros componentes. Esta fase es crucial para confirmar que el proceso de elaboración del biorecubrimiento no afecta negativamente la actividad del extracto.
- Emplear técnicas avanzadas como cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) o espectroscopía de masas para llevar a cabo una caracterización detallada del extracto de

Sapindus saponaria. Este análisis permitirá identificar y cuantificar los componentes específicos del extracto, proporcionando una mejor comprensión de los factores que contribuyen a su actividad antifúngica.

- Se recomienda extender el tiempo de evaluación *in vivo* del biorecubrimiento a 29 días. Esta extensión es fundamental para contemplar el tiempo necesario de exportación hacia cualquier país, no limitándose únicamente a Estados Unidos.

Referencias

- ACORBANEC. (2023). *ACORBANEC*.
- Adeniyi, D. O. , & J. A. (2015). In-vitro evaluation of plant extracts against *Lasiodiplodia theobromae* causing cashew inflorescent blight. *African Journal of Biotechnology*, *14*(13), 1139–1142.
- Al-Baadani, H. H., Al-Mufarrej, S. I., Al-Garadi, M. A., Alhidary, I. A., Al-Sagan, A. A., & Azzam, M. M. (2021). The use of gum Arabic as a natural prebiotic in animals: A review. *Animal Feed Science and Technology*, *274*, 114894. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2021.114894>
- Ali, A., Maqbool, M., Alderson, P. G., & Zahid, N. (2013). Effect of gum arabic as an edible coating on antioxidant capacity of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 119–124. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2012.09.011>
- Ali, S., Ullah, M. A., Nawaz, A., Naz, S., Shah, A. A., Gohari, G., Razavi, F., Khaliq, G., & Razzaq, K. (2022). Carboxymethyl cellulose coating regulates cell wall polysaccharides disassembly and delays ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *191*, 111978. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.111978>
- Arceo-Martínez, M. T., Jiménez-Mejía, R., Salgado-Garciglia, R., Santoyo, G., López-Meza, J. E., & Loeza-Lara, P. D. (2018). In vitro AND in vivo ANTI-FUNGAL EFFECT OF CHITOSAN ON POST-HARVEST STRAWBERRY PATHOGENS. In *Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia* (Vol. 53).
- Augustin, J. M., Kuzina, V., Andersen, S. B., & Bak, S. (2011). Molecular activities, biosynthesis and evolution of triterpenoid saponins. *Phytochemistry*, *72*(6), 435–457. <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2011.01.015>
- Banco Central del Ecuador. (2023). *Banco Central del Ecuador*.
- Bashir, M., & Haripriya, S. (2016). Assessment of physical and structural characteristics of almond gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, *93*, 476–482. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2016.09.009>
- Bharti, D., Singh, R., Arora, D., & Arora, C. (2021). Role of phytopesticides in sustainable agriculture. *Global Climate Change*, 341–359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00011-3>

- Bijlsma, L., Pitarch, E., Hernández, F., Fonseca, E., Marín, J. M., Ibáñez, M., Portolés, T., & Rico, A. (2021). Ecological risk assessment of pesticides in the Mijares River (eastern Spain) impacted by citrus production using wide-scope screening and target quantitative analysis. *Journal of Hazardous Materials*, *412*, 125277. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125277>
- Bose, S. K., Howlader, P., Jia, X., Wang, W., & Yin, H. (2019). Alginate oligosaccharide postharvest treatment preserve fruit quality and increase storage life via Abscisic acid signaling in strawberry. *Food Chemistry*, *283*, 665–674. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.01.060>
- Boursier, C. M., Bosco, D., Coulibaly, A., & Negre, M. (2011). Are traditional neem extract preparations as efficient as a commercial formulation of azadirachtin A? *Crop Protection*, *30*(3), 318–322. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2010.11.022>
- Cesa, S., Sisto, F., Zengin, G., Scaccabarozzi, D., Kokolakis, A. K., Scaltrito, M. M., Grande, R., Locatelli, M., Cacciagrano, F., Angiolella, L., Campestre, C., Granese, A., Chimenti, P., & Basilico, N. (2019). Phytochemical analyses and pharmacological screening of Neem oil. *South African Journal of Botany*, *120*, 331–337. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2018.10.019>
- Chávez-Salazar, A., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Castellanos-Galeano, F. J., Álvarez-Barreto, C. I., & Pacheco-Vargas, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, *98*, 240–246. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.01.024>
- Chi, H., Song, S., Luo, M., Zhang, C., Li, W., Li, L., & Qin, Y. (2019). Effect of PLA nanocomposite films containing bergamot essential oil, TiO₂ nanoparticles, and Ag nanoparticles on shelf life of mangoes. *Scientia Horticulturae*, *249*, 192–198. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.01.059>
- Crispim, A. C., Crispim, S. M. A., Rocha, J. R., Ursulino, J. S., Sobrinho, R. R., Porto, V. A., Bento, E. S., Santana, A. E. G., & Caetano, L. C. (2023). Light effects on *Lasiodiplodia theobromae* metabolome cultured in vitro. *Metabolomics*, *19*(8), 75. <https://doi.org/10.1007/s11306-023-02041-7>
- Dadrasnja, A., Usman, M. M., Omar, R., Ismail, S., & Abdullah, R. (2020). Potential use of *Bacillus* genus to control of bananas diseases: Approaches toward high yield production and

- sustainable management. *Journal of King Saud University - Science*, 32(4), 2336–2342. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2020.03.011>
- de Almeida, W. S., Marinho Filho, J. D., Araújo, A. J., Barros, A. B., & da Silva, D. A. (2022). Synthesis, characterization and biocompatibility of quaternized derivatives of gum arabic. *Materials Today Communications*, 33, 104611. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2022.104611>
- de Oliveira Filho, J. G., Albiero, B. R., Cipriano, L., de Oliveira Nobre Bezerra, C. C., Oldoni, F. C. A., Egea, M. B., de Azeredo, H. M. C., & Ferreira, M. D. (2021). Arrowroot starch-based films incorporated with a carnauba wax nanoemulsion, cellulose nanocrystals, and essential oils: a new functional material for food packaging applications. *Cellulose*, 28(10), 6499–6511. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03945-0>
- Dole Ecuador. (2020). *Exportación de banano a Estados Unidos*. <http://www.dole.com.ec/>
- Du, H., Liu, C., Unsalan, O., Altunayar-Unsalan, C., Xiong, S., Manyande, A., & Chen, H. (2021). Development and characterization of fish myofibrillar protein/chitosan/rosemary extract composite edible films and the improvement of lipid oxidation stability during the grass carp fillets storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184, 463–475. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.06.121>
- edifarm. (2020). *MERTECT® 20-S*.
- Elmer, P. A. G., Spiers, T. M., & Wood, P. N. (2007). Effects of pre-harvest foliar calcium sprays on fruit calcium levels and brown rot of peaches. *Crop Protection*, 26(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2006.03.011>
- Etemadipoor, R., Ramezani, A., Mirzaalian Dastjerdi, A., & Shamili, M. (2019). The potential of gum arabic enriched with cinnamon essential oil for improving the qualitative characteristics and storability of guava (*Psidium guajava* L.) fruit. *Scientia Horticulturae*, 251, 101–107. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.03.021>
- Fakhreddin Hosseini, S., Rezaei, M., Zandi, M., & Ghavi, F. F. (2013). Preparation and functional properties of fish gelatin–chitosan blend edible films. *Food Chemistry*, 136(3–4), 1490–1495. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.09.081>
- FAO. (2023). *Bananas*. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/bananos/es/#:~:text=La%20fruta%20m%C3%A1s%20popular%20El%2>

Obanano%20es%20una,las%20poblaciones%20de%20los%20pa%C3%ADses%20productores%20e%20importadores.

- FAOSTAT. (2021). *Crops and livestock products*.
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- Gao, Y., Li, Y., Li, F., Zhang, H., Chen, J., & Yuan, D. (2024). Phenyllactic acid treatment for controlling anthracnose disease (*Colletotrichum musae*) and preserving banana fruit quality during storage. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *129*, 102181.
<https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2023.102181>
- Gasca et al. (2020). Chemical composition and antifungal effect of ethanol extract from *Sapindus saponaria* L. fruit against banana anthracnose. *Scientia Horticulturae*, *259*, 108842.
<https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.108842>
- Ghosh, V., Sugumar, S., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2016). Neem (*Azadirachta indica*) Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 593–599.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00067-5>
- Grande-Tovar, C. D., Chaves-Lopez, C., Serio, A., Rossi, C., & Paparella, A. (2018). Chitosan coatings enriched with essential oils: Effects on fungi involved in fruit decay and mechanisms of action. *Trends in Food Science & Technology*, *78*, 61–71.
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2018.05.019>
- Grisi, P. U., Forim, M. R., Costa, E. S., Anese, S., Franco, M. F., Eberlin, M. N., & Gualtieri, S. C. J. (2015). Phytotoxicity and Identification of Secondary Metabolites of *Sapindus saponaria* L. Leaf Extract. *Journal of Plant Growth Regulation*, *34*(2), 339–349.
<https://doi.org/10.1007/s00344-014-9469-2>
- Gupta and Ahamad. (1990). *Emarginatosides B and C: Two new saponins from sapindus emarginatus fruits*. *27*(3).
- Gupta, S. C., Prasad, S., Tyagi, A. K., Kunnumakkara, A. B., & Aggarwal, B. B. (2017). Neem (*Azadirachta indica*): An indian traditional panacea with modern molecular basis. *Phytomedicine*, *34*, 14–20. <https://doi.org/10.1016/J.PHYMED.2017.07.001>
- Hossain, M. A., Al-Toubi, W. A. S., Weli, A. M., Al-Riyami, Q. A., & Al-Sabahi, J. N. (2013). Identification and characterization of chemical compounds in different crude extracts from leaves of Omani neem. *Journal of Taibah University for Science*, *7*(4), 181–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2013.05.003>

- Hu, B., Han, L., Kong, H., Nishinari, K., Phillips, G. O., Yang, J., & Fang, Y. (2019). Preparation and emulsifying properties of trace elements fortified gum arabic. *Food Hydrocolloids*, *88*, 43–49. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.09.027>
- Islam, A., Acikalın, R., Ozturk, B., Aglar, E., & Kaiser, C. (2022). Combined effects of Aloe vera gel and modified atmosphere packaging treatments on fruit quality traits and bioactive compounds of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit during cold storage and shelf life. *Postharvest Biology and Technology*, *187*, 111855. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.111855>
- Islam, M. M., Shams, M. I., Ilias, G. N. M., & Hannan, M. O. (2009). Protective antifungal effect of neem (*Azadirachta indica*) extracts on mango (*Mangifera indica*) and rain tree (*Albizia saman*) wood. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *63*(2), 241–243. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2008.07.010>
- Islam, W., Mourshed, M., Masud, M. H., Sozal, S. I., & Sabur, S. Bin. (2019). Prospects of non-edible neem (*Azadirachta indica*) oil in Bangladesh: performance and emission evaluation in a direct injection diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, *40*(5), 525–536. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1421578>
- Islas, J. F., Acosta, E., G-Buentello, Z., Delgado-Gallegos, J. L., Moreno-Treviño, M. G., Escalante, B., & Moreno-Cuevas, J. E. (2020). An overview of Neem (*Azadirachta indica*) and its potential impact on health. *Journal of Functional Foods*, *74*, 104171. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2020.104171>
- Kan, J., Liu, J., Yong, H., Liu, Y., Qin, Y., & Liu, J. (2019). Development of active packaging based on chitosan-gelatin blend films functionalized with Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruit extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, *140*, 384–392. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.08.155>
- Khaliq, G., Muda Mohamed, M. T., Ghazali, H. M., Ding, P., & Ali, A. (2016). Influence of gum arabic coating enriched with calcium chloride on physiological, biochemical and quality responses of mango (*Mangifera indica* L.) fruit stored under low temperature stress. *Postharvest Biology and Technology*, *111*, 362–369. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2015.09.029>
- Kulkarni, S. A., Sellamuthu, P. S., Nagarajan, S. K., Madhavan, T., & Sadiku, E. R. (2022). Antifungal activity of wild bergamot (*Monarda fistulosa*) essential oil against postharvest

- fungal pathogens of banana fruits. *South African Journal of Botany*, 144, 166–174. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2021.08.019>
- Kumar, D., Rahal, A., & Malik, J. K. (2016). Neem Extract. *Nutraceuticals: Efficacy, Safety and Toxicity*, 585–597. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802147-7.00043-7>
- Kumar, S., Singh, N., Devi, L. S., Kumar, S., Kamle, M., Kumar, P., & Mukherjee, A. (2022). Neem oil and its nanoemulsion in sustainable food preservation and packaging: Current status and future prospects. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100254. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2021.100254>
- La, D. D., Nguyen-Tri, P., Le, K. H., Nguyen, P. T. M., Nguyen, M. D. B., Vo, A. T. K., Nguyen, M. T. H., Chang, S. W., Tran, L. D., Chung, W. J., & Nguyen, D. D. (2021). Effects of antibacterial ZnO nanoparticles on the performance of a chitosan/gum arabic edible coating for post-harvest banana preservation. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106057. <https://doi.org/10.1016/J.PORGOAT.2020.106057>
- Li, J., Hu, J., Li, S., Li, J., & Liu, J. (2018). The effect of guar gum and chitosan on fiber and fiber fine micromorphology in paper-process reconstituted tobacco pulp. *Carbohydrate Polymers*, 196, 102–109. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.04.125>
- Li, J., Sun, Q., Sun, Y., Chen, B., Wu, X., & Le, T. (2019). Improvement of banana postharvest quality using a novel soybean protein isolate/cinnamaldehyde/zinc oxide bionanocomposite coating strategy. *Scientia Horticulturae*, 258, 108786. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.108786>
- Liu, C., Huang, J., Zheng, X., Liu, S., Lu, K., Tang, K., & Liu, J. (2020). Heat sealable soluble soybean polysaccharide/gelatin blend edible films for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100485. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2020.100485>
- Łupina, K., Kowalczyk, D., & Kazimierzak, W. (2021). Gum Arabic/Gelatin and Water-Soluble Soy Polysaccharides/Gelatin Blend Films as Carriers of Astaxanthin—A Comparative Study of the Kinetics of Release and Antioxidant Properties. *Polymers*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/polym13071062>
- Ma, W., Tang, C. H., Yin, S. W., Yang, X. Q., Wang, Q., Liu, F., & Wei, Z. H. (2012). Characterization of gelatin-based edible films incorporated with olive oil. *Food Research International*, 49(1), 572–579. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2012.07.037>

- Marinho, G. J. P., Klein, D. E., & Siqueira Junior, C. L. (2018). Evaluation of soapberry (*Sapindus saponaria* L.) leaf extract against papaya anthracnose. *Summa Phytopathologica*, *44*(2), 127–131. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/175605>
- Matrose, N. A., Obikeze, K., Belay, Z. A., & Caleb, O. J. (2021). Plant extracts and other natural compounds as alternatives for post-harvest management of fruit fungal pathogens: A review. *Food Bioscience*, *41*, 100840. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2020.100840>
- McNair, D., & Andresen, C. (2020). Soapberry (*Sapindus* L.) in Arizona. *Phytoneuron*, *2020–78*, 1–23.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*.
- Murmu, S. B., & Mishra, H. N. (2018). Post-harvest shelf-life of banana and guava: Mechanisms of common degradation problems and emerging counteracting strategies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *49*, 20–30. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2018.07.011>
- Natarajan, V., Venugopal, P. V., & Menon, T. (2003). EFFECT OF AZADIRACHTA INDICA (NEEM) ON THE GROWTH PATTERN OF DERMATOPHYTES. *Indian Journal of Medical Microbiology*, *21*(2), 98–101. [https://doi.org/10.1016/S0255-0857\(21\)03129-7](https://doi.org/10.1016/S0255-0857(21)03129-7)
- Ncama, K., Magwaza, L. S., Mditshwa, A., & Tesfay, S. Z. (2018). Plant-based edible coatings for managing postharvest quality of fresh horticultural produce: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, *16*, 157–167. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2018.03.011>
- Odetayo, T., Sithole, L., Shezi, S., Nomngongo, P., Tesfay, S., & Ngobese, N. Z. (2022). Effect of nanoparticle-enriched coatings on the shelf life of Cavendish bananas. *Scientia Horticulturae*, *304*, 111312. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111312>
- Panwar, A., Kumar, V., Dhiman, A., Thakur, P., Sharma, V., Sharma, A., & Kumar, S. (2024). Nanoemulsion based edible coatings for quality retention of fruits and vegetables-decoding the basics and advancements in last decade. *Environmental Research*, *240*, 117450. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.117450>
- Patel, H. M., Venkata, K. C. N., Bhattacharyya, P., Sethi, G., & Bishayee, A. (2016). *Review of neem (Azadirachta indica L.) for prevention and treatment of oncologic diseases*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53492724>
- Patel, S. M., Nagulapalli Venkata, K. C., Bhattacharyya, P., Sethi, G., & Bishayee, A. (2016). Potential of neem (*Azadirachta indica* L.) for prevention and treatment of oncologic diseases.

Seminars in Cancer Biology, 40–41, 100–115.
<https://doi.org/10.1016/J.SEMCANCER.2016.03.002>

- Pérez-Córdoba, L. J., Norton, I. T., Batchelor, H. K., Gkatzionis, K., Spyropoulos, F., & Sobral, P. J. A. (2018). Physico-chemical, antimicrobial and antioxidant properties of gelatin-chitosan based films loaded with nanoemulsions encapsulating active compounds. *Food Hydrocolloids*, 79, 544–559. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2017.12.012>
- Porsche, F. M., Molitor, D., Beyer, M., Charton, S., André, C., & Kollar, A. (2017). Antifungal Activity of Saponins from the Fruit Pericarp of *Sapindus mukorossi* against *Venturia inaequalis* and *Botrytis cinerea*. *Plant Disease*, 102(5), 991–1000. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-17-0906-RE>
- Poverenov, E., Rutenberg, R., Danino, S., Horev, B., & Rodov, V. (2014). Gelatin-Chitosan Composite Films and Edible Coatings to Enhance the Quality of Food Products: Layer-by-Layer vs. Blended Formulations. *Food and Bioprocess Technology*, 7(11), 3319–3327. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1333-7>
- Pradhan, A., & Bhattacharyya, A. (2017). Quest for an eco-friendly alternative surfactant: Surface and foam characteristics of natural surfactants. *Journal of Cleaner Production*, 150, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.013>
- Priyadarshi, R., & Rhim, J. W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102346>
- Pulla-Huillca, P. V., Gomes, A., Quinta Barbosa Bittante, A. M., Lourenço, R. V., & Sobral, P. J. do A. (2021). Wettability of gelatin-based films: The effects of hydrophilic or hydrophobic plasticizers and nanoparticle loads. *Journal of Food Engineering*, 297, 110480. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2021.110480>
- Rashed, K. N., Ćirić, A., Glamočlija, J., Calhelha, R. C., Ferreira, I. C. F. R., & Soković, M. (2013). Antimicrobial Activity, Growth Inhibition of Human Tumour Cell Lines, and Phytochemical Characterization of the Hydromethanolic Extract Obtained from *Sapindus saponaria* L. Aerial Parts. *BioMed Research International*, 2013, 659183. <https://doi.org/10.1155/2013/659183>

- Ribeiro, A., Zani, C. L., de Almeida Alves, T. M., Mendes, N. M., Hamburger, M., & Hostettmann, K. (1995). *Molluscicidal saponins from the pericarp of Sapindus saponaria*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86301030>
- Robert Walle. (2023). Prolongación de la vida post-cosecha de frutas y hortalizas frescas. *Notas de Desarrollo ECHO (EDN)*, 160. <https://www.echocommunity.org/es/resources/a6f33ccb-fdad-499a-a4a2-96a81de4d333>
- Rodrigues, A. A., Vasconcelos Filho, S. C., Müller, C., Rodrigues, D. A., Mendes, G. C., Rehn, L. S., Costa, A. C., Vital, R. G., & de Fátima Sales, J. (2018). Sapindus saponaria bioindicator potential concerning potassium fluoride exposure by simulated rainfall: Anatomical and physiological traits. *Ecological Indicators*, 89, 552–558. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.02.043>
- Sahi, S. T., Habib, A., Ghazanfar, M. U., & Badar, A. J. (2012). *IN VITRO EVALUATION OF DIFFERENT FUNGICIDES AND PLANT EXTRACTS AGAINST BOTRYODIPLODIA THEOBROMAE, THE CAUSAL AGENT OF QUICK DECLINE OF MANGO*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:85679791>
- Sahraee, S., Milani, J. M., Ghanbarzadeh, B., & Hamishehkar, H. (2017). Effect of corn oil on physical, thermal, and antifungal properties of gelatin-based nanocomposite films containing nano chitin. *LWT - Food Science and Technology*, 76, 33–39. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.10.028>
- Sahraee, S., Milani, J. M., Regenstein, J. M., & Kafil, H. S. (2019). Protection of foods against oxidative deterioration using edible films and coatings: A review. *Food Bioscience*, 32, 100451. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.100451>
- Saleh Al-Hashemi, Z. S., & Hossain, M. A. (2016). Biological activities of different neem leaf crude extracts used locally in Ayurvedic medicine. *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, 18(2), 128–131. <https://doi.org/10.1016/J.PSRA.2016.09.013>
- Saxena, N., Pal, N., Ojha, K., Dey, S., & Mandal, A. (2018). Synthesis, characterization, physical and thermodynamic properties of a novel anionic surfactant derived from: Sapindus laurifolius. *RSC Advances*, 8(43), 24485–24499. <https://doi.org/10.1039/c8ra03888k>
- Shah, S., Hashmi, M. S., Qazi, I. M., Durrani, Y., Sarkhosh, A., Hussain, I., & Brecht, J. K. (2021). Pre-storage chitosan-thyme oil coating control anthracnose in mango fruit. *Scientia Horticulturae*, 284, 110139. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110139>

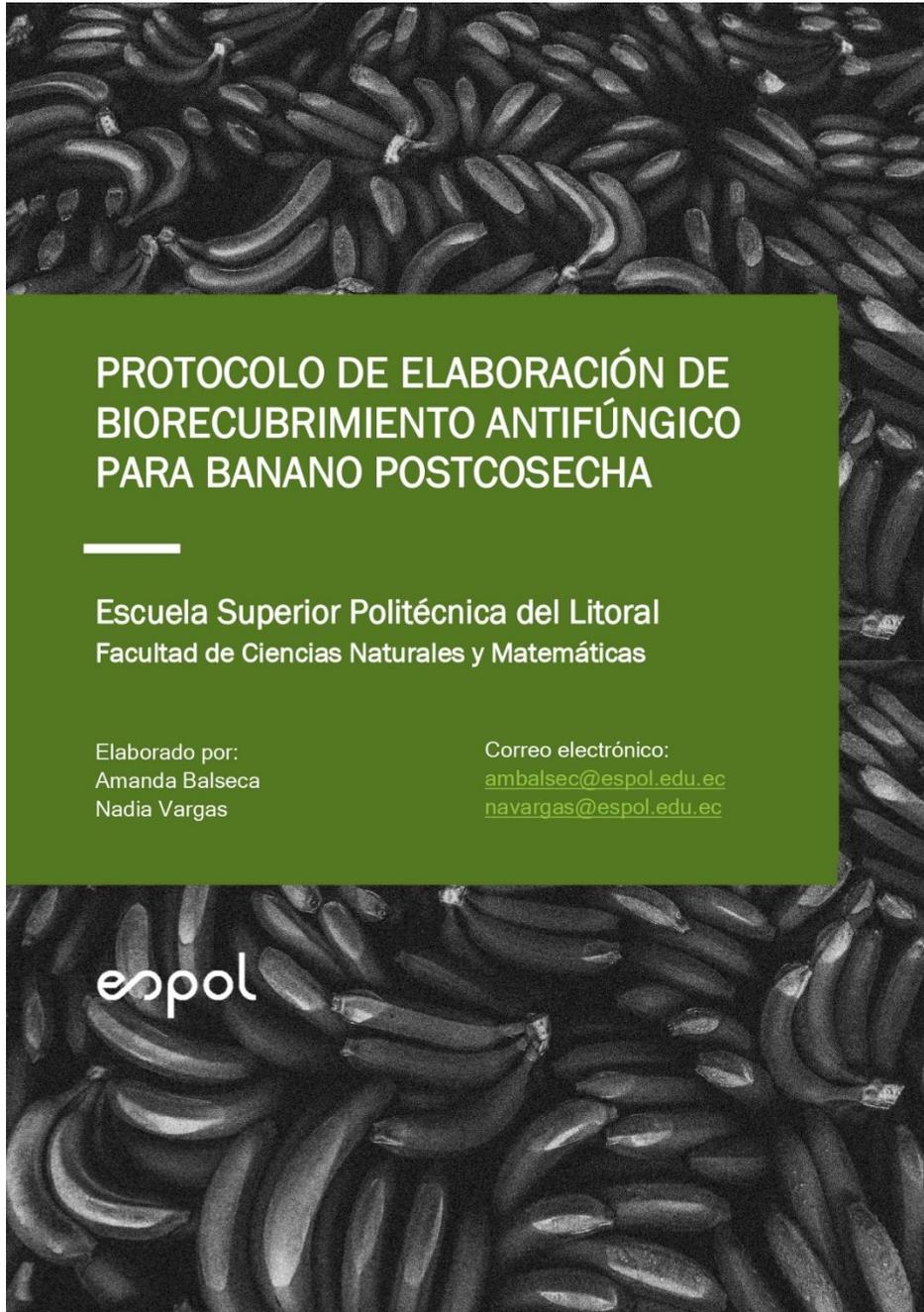
- Singh, R., & Sharma, B. (2019). Morphological Characteristics of Sapindus Species. In R. Singh & B. Sharma (Eds.), *Biotechnological Advances, Phytochemical Analysis and Ethnomedical Implications of Sapindus species* (pp. 5–15). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9189-8_2
- Sujarwo, W., Keim, A. P., Caneva, G., Toniolo, C., & Nicoletti, M. (2016). Ethnobotanical uses of neem (*Azadirachta indica* A.Juss.; Meliaceae) leaves in Bali (Indonesia) and the Indian subcontinent in relation with historical background and phytochemical properties. *Journal of Ethnopharmacology*, *189*, 186–193. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2016.05.014>
- Syngenta Crop Protection S.A. (n.d.). *FICHA TECNICA MERTECT 20S*.
- Thangavelu, R., Sundararaju, P., & Sathiamoorthy, S. (2004). Management of anthracnose disease of banana caused by *Colletotrichum musae* using plant extracts. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *79*(4), 664–668. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511823>
- Tian, J., Xie, S., Zhang, P., Wang, Q., Li, J., & Xu, X. (2022). Attenuation of postharvest peel browning and chilling injury of banana fruit by *Astragalus* polysaccharides. *Postharvest Biology and Technology*, *184*, 111783. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2021.111783>
- Tsuzuki, J. K., Svidzinski, T. I. E., Shinobu, C. S., Silva, L. F. A., Rodrigues-Filho, E., Cortez, D. A. G., & Ferreira, I. C. P. (2007). Antifungal activity of the extracts and saponins from *Sapindus saponaria* L. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *79*(4), 577–583. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400002>
- Vijayakumar, S., Arulmozhi, P., Kumar, N., Sakthivel, B., Prathip Kumar, S., & Praseetha, P. K. (2020). *Acalypha fruticosa* L. leaf extract mediated synthesis of ZnO nanoparticles: Characterization and antimicrobial activities. *Materials Today: Proceedings*, *23*, 73–80. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.06.660>
- Wang, W., Xue, C., & Mao, X. (2020). Chitosan: Structural modification, biological activity and application. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*, 4532–4546. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.09.042>
- Xu, T., Gao, C. C., Feng, X., Huang, M., Yang, Y., Shen, X., & Tang, X. (2019). Cinnamon and clove essential oils to improve physical, thermal and antimicrobial properties of chitosan-

- gum arabic polyelectrolyte complexed films. *Carbohydrate Polymers*, 217, 116–125. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2019.03.084>
- Xu, Y., Gao, Y., Chen, Z., Zhao, G., Liu, J., Wang, X., Gao, S., Zhang, D., & Jia, L. (2021). Metabolomics analysis of the soapberry (*Sapindus mukorossi* Gaertn.) pericarp during fruit development and ripening based on UHPLC-HRMS. *Scientific Reports*, 11(1), 11657. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91143-0>
- Yagual, D., Villavicencio-Vasquez, M., Chavez, J., Puebla, E., Cornejo-Franco, J., Coronel-León, J., Keener, K., & Yopez, X. (2023). Control of crown rot on Cavendish banana by high voltage atmospheric cold plasma treatment. *Journal of Food Engineering*, 357, 111654. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2023.111654>
- Yang, Y., Dong, G., Wang, M., Xian, X., Wang, J., & Liang, X. (2021). Multifungicide resistance profiles and biocontrol in *Lasiodiplodia theobromae* from mango fields. *Crop Protection*, 145, 105611. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2021.105611>
- Zambrano-Ganchozo Gabriela and Rodriguez-Ramos, A. and E.-S. K. and D.-C. L. and G.-C. D. (2022). Neurotoxic Effects on Banana Workers Exposed to Agrochemicals: Ecuador Case Study. In H. and D. C. A. and D. B. Botto-Tobar Miguel and Cruz (Ed.), *Emerging Research in Intelligent Systems* (pp. 327–337). Springer International Publishing.
- Zaynab, M., Sharif, Y., Abbas, S., Afzal, M. Z., Qasim, M., Khalofah, A., Ansari, M. J., Khan, K. A., Tao, L., & Li, S. (2021). Saponin toxicity as key player in plant defense against pathogens. *Toxicon*, 193, 21–27. <https://doi.org/10.1016/J.TOXICON.2021.01.009>
- Zhang, W., Li, X., & Jiang, W. (2020). Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1205–1214. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.10.275>

Apéndice

Apéndice A

Apéndice A. 1 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento



Apéndice A.2 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento

2

Etapas 1: Obtención de extracto de *Sapindus saponaria*

1. Separar el pericarpio de las semillas.
2. Pesar 10 g de pericarpio y colocarlo en un recipiente con tapa.
3. Añadir 50 mL de etanol y cubrir la botella con papel aluminio.
4. Colocar el recipiente en una mesa agitadora orbital por 72 h.
5. Filtrar la mezcla utilizando papel filtro.
6. Pesar un matraz de fondo redondo seco y verter la solución filtrada.
7. Evaporar el solvente a 50 °C en un rotavapor.
8. Secar el exterior del matraz con papel y dejar reposar en un desecador durante 15 min.
9. Pesar el matraz con el extracto resultante.
10. Recuperar el extracto del fondo, añadir agua destilada a 40 °C hasta lograr una concentración de 200 mg mL⁻¹.
11. Almacenar el extracto en un recipiente de color ámbar en la refrigeradora.

Fuente: (Gasca et al., 2020)

Etapas 2: Elaboración de biorecubrimiento

1. En un vaso de precipitación, verter 100 mL de agua destilada y 1 mL de ácido acético
2. Pesar 1.5 g de quitosano y colocarlo en el vaso
3. Agitar la mezcla a 40 °C durante 5 h
4. Pesar 2 g de gelatina y añadirla a la mezcla

Apéndice A.3 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento

3

5. Agitar la solución a 50 °C durante 1 h
6. Añadir 0.45 mL de glicerina a la mezcla y agitar por 15 min
7. Ajustar la concentración del extracto de *Sapindus saponaria* concentrado en la solución filmogénica a 10 mg mL⁻¹.
8. Colocar el vaso de precipitación en un baño ultrasónico durante 30 min para desgasificar.

Fuente: (Kan et al., 2019)

Apéndice A.4 Protocolo de elaboración de biorecubrimiento

4

Referencias

Gasca et al. (2020). Chemical composition and antifungal effect of ethanol extract from *Sapindus saponaria* L. fruit against banana anthracnose.

Scientia Horticulturae, 259, 108842.

<https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.108842>

Kan, J., Liu, J., Yong, H., Liu, Y., Qin, Y., & Liu, J. (2019). Development of active packaging based on chitosan-gelatin blend films functionalized with Chinese hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruit extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 384-392.

<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.08.155>