



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
E INGENIERIA EN ALIMENTOS**

T E S I S

**Elaboración y evaluación de películas comestibles adicionadas con
extracto de *Myrtillocactus geometrizans***

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Ingeniero Agroindustrial**

PRESENTA

Carlos Eduardo Vargas Pérez

DIRECTOR

Dr. Cesar Uriel López Palestina

CO-DIRECTOR

Dr. Yair Olovaldo Santiago Saenz

ASESORAS

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes

Dra. Aurora Quintero Lira

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., mayo de 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Agropecuarias
Institute of Agricultural Sciences
Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos
Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 20 de mayo de 2025.

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial, **Carlos Eduardo Vargas Pérez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Elaboración y evaluación de películas comestibles adicionadas con extracto de *Myrtillocactus geometrizans*”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

PRESIDENTE	Dr. César Uriel López Palestina
SECRETARIO	Dr. Yair Olovaldo Santiago Sáenz
VOCAL 1	Dra. Alma Delia Hernández Fuentes
SUPLENTE 1	Dra. Aurora Quintero Lira

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández
Coordinadora del P.E. de Ingeniería Agroindustrial



Av. Universidad Km. 1 Exhacienda de Aquetzalpa.
C.P. 43600. Tulancingo, Hidalgo, México
Teléfono: 7717172000 Ext. 2422
cesar_lopez@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. Este trabajo no habría sido posible sin su orientación, apoyo y estímulo.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis, Dr. Cesar Uriel López Palestina, por su dedicación, paciencia y valiosos aportes durante todo el proceso.

Agradezco también al M.C Cesar Andrés Cabrera Cortes y al Dr. Yair Olovaldo Santiago Sáenz por su colaboración y valiosas sugerencias que enriquecieron enormemente mi trabajo.

No puedo pasar por alto el apoyo incondicional de mi familia y amigos. Su aliento constante y comprensión hicieron más llevaderos los desafíos que surgieron en el camino.

Asimismo, agradezco a mis compañeros de estudio que compartieron ideas, experiencias y momentos de aprendizaje. Su compañía hizo que este viaje académico fuera más enriquecedor.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud al Instituto de Ciencias Agropecuarias por proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo de muchas personas, y estoy profundamente agradecido a cada uno de ustedes por su contribución a este proyecto

Índice

1. Resumen	3
2. Introducción	3
3. Objetivo General	4
4. Objetivos específicos.....	4
5. Justificación.....	5
6. Marco teórico	5
6.1 Taxonomía.....	5
6.2 Ubicación	6
6.3 Importancia nutricional.....	7
6.3.1 Compuestas antioxidantes	7
6.4 Películas comestibles	8
6.4.1 Historia de las películas comestibles.....	9
6.4.2 Recubrimientos comestibles.....	9
7. Materiales y métodos	14
7.1 Obtención del extracto de garambullo	14
7.2 Elaboración de películas comestibles	14
7.3 Caracterización de películas	15
7.3.1 Compuestos bioactivos.....	15
7.3.2 Actividad antioxidante.....	16
7.3.3 Contenido de humedad.....	16
7.3.4 Solubilidad de las películas en agua.....	17
7.3.5 Permeabilidad de vapor de agua.....	18
7.3.6 Pruebas mecánicas.....	18
7.3.7 Espesor	19

7.3.8 Color.....	19
7.3.9 Transparencia	20
8. Resultados	20
8.1 Propiedades ópticas.....	20
8.2 Solubilidad y permeabilidad de vapor de agua	22
8.3 Pruebas mecánicas	23
8.4 Contenido de compuestos antioxidantes.....	24
8.4.1 Fenoles y flavonoides.....	25
8.4.2 Betalaínas	26
8.5 Humedad.....	26
9. Conclusiones	27
Referencias	28

Índice de Figuras

Figura 1 Determinación de compuestos antioxidantes, porcentaje de humedad y solubilidad en agua en películas.....	17
Figura 2 Determinación de vapor de agua y pruebas mecánicas en películas comestibles.	19
Figura 3 Obtención de espesor, color y transparencia en películas	20
Figura 4 Aspecto de películas a base de gelatina con 0 (A), 2 (B), 4.....	21

Índice de Tablas

Tabla 1 Materiales utilizados en la fabricación de películas y recubrimientos comestibles	11
Tabla 2 Parámetros de color en películas comestibles con extracto de garambullo	20
Tabla 3 Parámetros de transparencia en películas comestibles con extracto de garambullo	22
Tabla 4 Permeabilidad de vapor de agua y porcentaje de solubilidad en películas comestibles	23
Tabla 5 Propiedades mecánicas de la película comestible con extracto de garambullo	24
Tabla 6 Capacidad antioxidante de películas comestibles con extracto de garambullo determinada por ensayos DPPH y	25
Tabla 7 Contenido de fenoles y flavonoides en películas comestibles con extracto de garambullo	25
Tabla 8 Contenido de betalaínas en películas comestibles con extracto de garambullo	26
Tabla 9 Porcentaje de humedad en películas comestibles con extracto de garambullo	27

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Humedad.....	17
Ecuación 2 Solubilidad.....	17
Ecuación 3 Permeabilidad de agua.....	18
Ecuación 4 Resistencia a la tracción.....	18
Ecuación 5 % de Elongación a la Rotura	19
Ecuación 6 Módulo de Young	19
Ecuación 7 Transparencia.....	20

1. Resumen

Myrtillocactus geometrizans es una especie endémica de las zonas áridas y semiáridas de México que pertenece a la familia *Cactaceae*. Su fruto comestible es llamado “garambullo”, el cual es una baya de temporada con forma globular con una fina piel que recubre la pulpa; estudios han demostrado que el garambullo contiene propiedades antioxidantes. Sin embargo, estos productos hortofrutícolas son alimentos perecederos que requieren de la aplicación de métodos de conservación, los cuales permiten prolongar su vida de anaquel. Una alternativa para lograrlo son las películas comestibles, las cuales son estructuras independientes preformadas por separado (moldeadas como láminas sólidas, fundidas y secas) y luego aplicadas sobre la superficie de los alimentos, formadas por polímeros naturales como proteínas, polisacáridos, lípidos y sus combinaciones. Es por ello, que el objetivo de este trabajo fue desarrollar y caracterizar una película comestible adicionada con extracto de garambullo para prolongar la vida útil de los productos hortofrutícolas y a su vez brindar un aporte nutricional adicional. Las películas, fueron caracterizadas fisicoquímicamente en términos de grosor, permeabilidad al vapor de agua, humedad y solubilidad. Así mismo se evaluaron propiedades ópticas (Color y transparencia), contenido de compuestos antioxidantes (betalaínas, fenoles y flavonoides ABTS y DPPH) y pruebas mecánicas (Módulo de Young, resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura). Las películas comestibles adicionadas con extracto de garambullo mostraron que la incorporación de este extracto tiene compatibilidad con las propiedades mecánicas y buena actividad antioxidante.

2. Introducción

El inapropiado almacenamiento de los alimentos durante el proceso de conservación puede provocar cambios físicos como pérdida de brillo, pudrición y contracción de la superficie en la fruta debido a la elevada transpiración de agua, pérdida de nutrimentos y deterioro microbiano (Dinh et al., 2023). Es por ello, que a través del tiempo se han utilizado las películas convencionales para envasado de alimentos, sin embargo, la mayoría de estas se derivan del petróleo crudo y del gas natural. Los desechos de envases derivados del petróleo es una de las inquietudes ambientales más graves que enfrenta el mundo, ya que los polímeros derivados de este recurso tienen un impacto tóxico grave en el ecosistema (Sultan et al.,

2023). Según las estadísticas de la OCDE (La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2021) en 2021, solo el 9 % de la basura plástica generada en todo el mundo se reciclará, el 19 % se destruirá y alrededor del 50 % se enterrará en vertederos. Adicionalmente, el 22 % restante son residuos plásticos que han sido mal manipulados o filtrados al exterior (Dinh et al., 2023).

Según Coímbra et al., (2023) las películas comestibles son capas delgadas de materiales de calidad alimentaria que se aplican a productos alimenticios y que pueden mejorar la calidad y vida útil de los alimentos al reducir la tasa de transferencia de masa de vapor de agua, gases y compuestos volátiles entre los alimentos y el medio ambiente. Estas capas protectoras están formadas por polímeros naturales como proteínas, polisacáridos, lípidos y sus combinaciones; además exhiben biodegradabilidad, biocompatibilidad, termo estabilidad, y no presentan toxicidad para el ser humano (Dursun-Capar, 2023).

Myrtillocactus geometrizans, también conocido como cactus arándano o vela azul, es una especie endémica de las zonas áridas y semiáridas de México que pertenece a la familia *Cactaceae*. Su fruto comestible llamado “garambullo”, es una baya de temporada con forma globular y presenta una fina piel que recubre la pulpa. Tiene una estructura gelatinosa de color rojo-púrpura brillante, con un promedio de 1,5 × 1,0 cm, longitudes polares × ecuatoriales, respectivamente y contiene numerosas pequeñas semillas negras comestibles (<1 mm) que se extienden por todo el volumen del fruto (Montiel-Sánchez et al., 2021). Es una rica fuente de fitoquímicos, principalmente betacianinas, betalainas, polifenoles y antioxidantes (Correa-Betanzo et al., 2011a). Por lo antes mencionado, la aplicación de extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) en películas comestibles a base de gelatina sería una alternativa que mejore el aporte nutrimental de un producto.

3. Objetivo General

Elaborar y evaluar películas comestibles incorporadas con extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) para su posible uso en productos hortofrutícolas.

4. Objetivos específicos

Evaluar las propiedades mecánicas en películas comestibles incorporadas con extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*).

Evaluar propiedades ópticas en películas comestibles incorporadas con extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*).

Evaluar propiedades antioxidantes y de barrera al vapor de agua en películas comestibles incorporadas con extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*).

5. Justificación

Para envasar productos hortofrutícolas se recurre a materiales derivados del petróleo, los cuales no se descomponen y contaminan progresivamente el medio ambiente. En este contexto, las películas y recubrimientos comestibles para conservar estos productos representan una alternativa viable con el potencial de reducir los materiales tradicionales no biodegradables. Se ha demostrado que el extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) contiene sustancias bioactivas (carotenoides, flavonoides, betalainas, clorofila y antioxidantes) las cuales resultan de gran interés no solo por sus beneficios para la salud del consumidor, si no como potenciales ingredientes para el recubrimiento de productos.

Las principales prioridades de los envases comestibles bioactivos son mantener la integridad física del alimento, protegerlo del deterioro de factores fisicoquímicos, evitar la contaminación microbiana y extender la vida útil regulando la tasa de respiración, la capacidad de contener compuestos o liberar compuestos específicos. Por esta razón, en este estudio se evaluó el uso del extracto de garambullo para diseñar películas comestibles de nueva generación con propiedades funcionales.

6. Marco teórico

6.1 Taxonomía

La baya de nopal (*Myrtillocactus geometrizans*) es una fruta silvestre mexicana poco estudiada (Montiel-Sánchez et al., 2021). Sus flores son tubulares de color blanco verdoso y producen frutos comestibles del tipo baya, de color azul-rojizo (Sanjuan-Trejo et al., 2021). La estación de cosecha de los frutos es de junio a agosto, estos frutos son de forma globular con un diámetro medio de 2 cm. (Gómez & Misael, 2021). La piel es fina y cubre la pulpa,

que tiene una estructura similar a un gel con un color vino tinto brillante. El fruto contiene numerosas pequeñas semillas negras comestibles (<1 mm) que se extienden por todo el volumen del fruto (Guzmán-Maldonado et al., 2010). A continuación, se presentan sus principales categorías taxonómicas:

- Reino: Plantae.
- Subreino: Tracheobionta.
- División: Magnoliophyta.
- Clase: Magnoliopsida.
- Subclase: Caryophyllidae.
- Orden: Caryophyllales.
- Familia: Cactaceae.
- Subfamilia: Cactoideae.
- Tribu: Pachycereeae.
- Género: *Myrtillocactus*.
- Especie: *Myrtillocactus geometrizans* (Mart. ex Pfeiff.) Console

Finalmente, el fruto de *Myrtillocactus* a menudo se subutiliza o se consume sólo a nivel local; sin embargo, el interés industrial por *Myrtillocactus* ha aumentado recientemente como nuevo alimento en el sector agroalimentario (Guzmán-Maldonado et al., 2010).

6.2 Ubicación

Se localiza de forma silvestre en zonas desérticas, matorrales xerófilos y selvas secas caducifolias de la zona central de México. Es una especie que se adapta al clima seco y tolera la radiación solar directa en verano, no obstante, es susceptible a las heladas. Se distribuye principalmente en zonas áridas, en los estados de Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí, Zacatecas, Tamaulipas, Nuevo León, Estado de México, Puebla, Veracruz, Guerrero y Oaxaca (Sanjuan-Trejo et al., 2021).

6.3 Importancia nutricional

6.3.1 Compuestas antioxidantes

El mecanismo básico de acción de los antioxidantes es retrasar la acción de auto oxidación para inhibir la formación de radicales libres o interrumpir la cadena de propagación de estos radicales (Ahumada-Pérez, 2018). Aunque los informes sobre la caracterización y cuantificación de compuestos antioxidantes en la baya del cactus (*Myrtillocactus geometrizans*) son escasos, se ha informado que es una rica fuente de fitoquímicos (Correa-Betanzo et al., 2011b), los cuales pueden clasificarse en:

a) Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se consideran un grupo importante de moléculas bioactivas que están presentes, y en cantidades abundantes en frutos, como en *Myrtillocactus geometrizans* (Kodikara et al., 2024). Además, son el mayor grupo, a los cuales se atribuye una buena actividad antioxidante, especialmente en aquellos provenientes de extractos vegetales (Ahumada-Pérez, 2018). Estos metabolitos secundarios naturales que se encuentran en las plantas y se sabe que poseen diversas actividades biológicas, como propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, se agrupan en ácidos fenólicos, tocoferoles, derivados del ácido cinámico, lignanos, cumarinas, taninos y estilbenos (Kodikara et al., 2024). Por otro lado, algunos estudios sobre la caracterización de compuestos fenólicos en baya de nopal también han revelado, que este tipo de alimentos vegetales también son ricos en ácidos elágico, cafeico, gálico y protocatecuico (Montiel-Sánchez et al., 2021)

b) Flavonoides

Los polifenoles hidroxilados, también llamados flavonoides, están abundantemente presentes en verduras, frutas y numerosas plantas (Al-Khayri et al., 2022). Se trata de metabolitos secundarios con un anillo heterocíclico y dos anillos de fenilo en un esqueleto de 15 carbonos (Tizazu & Bekele, 2024). Referente a algunas fuentes alimentarias, el garambullo es una fuente potencialmente interesante de flavonoides, como por ejemplo los glucósidos de isorhamnetina y kaempferol-7-O-neohesperidosida (Navarro-Olivera, 2022). Por otra parte, algunos estudios sobre la caracterización de flavonoides en baya de nopal (garambullo)

también han revelado que son ricos en flavonol, quercetina, flavonoles, galato de epigallocatequina, epicatequina y vainillina (Montiel-Sánchez et al., 2021).

c) Betalaínas

Las betalaínas son compuestos nitrogenados solubles en agua que se subdividen en betacianinas (rojo-violeta) y betaxantinas (amarillo-naranja). La glicosilación o acilación en las betalaínas exhibe una enorme diversidad estructural, donde la betanina (betanidina-5- *O*- β -glucósido) es la betacianina más común en el reino vegetal (Montiel-Sánchez et al., 2021). Por otro lado, los informes sobre la caracterización y cuantificación de compuestos bioactivos en bayas de nopal (garambullo) son escasos; sin embargo, algunos estudios han evidenciado la presencia de betalaínas como betanina y filocactina (Correa-Betanzo et al., 2011b). También se ha demostrado presencia de betacianinas (isobetanina) y betaxantinas (portulacaxantina I, vulgaxantina I, Bx-dopamina e indicaxantina) (Navarro-Olivera, 2022).

Es importante comentar, que uno de los principales usos de las betalaínas es como colorante alimentario según la normativa sobre aditivos alimentarios (Betanin: E162). Además, recientemente se ha demostrado los posibles beneficios para la salud de las betalaínas, las cuales pueden estar involucradas en la reparación o reducción del daño causado por el estrés oxidativo (Montiel-Sánchez et al., 2021).

6.4 Películas comestibles

Las películas son estructuras independientes preformadas por separado (moldeadas como láminas sólidas, fundidas y secas) y luego aplicadas sobre la superficie de los alimentos como material de embalaje para envolver componentes de los alimentos, o sellar en bolsas comestibles (Kupervaser et al., 2023a). Estas películas biodegradables mejoran las propiedades mecánicas, las barreras contra la humedad y los gases, la protección microbiana, la percepción sensorial y la vida útil de los productos alimenticios. En particular, las películas obtenidas a partir de polisacáridos se caracterizan por mejores propiedades de barrera a los gases, mientras que las proteínas son conocidas por sus excelentes propiedades mecánicas (Shahidi & Hossain, 2022a).

6.4.1 Historia de las películas comestibles

La ejecución de recubrimientos y películas comestibles para la conservación de alimentos, como verduras, frutas, carnes y frutos secos ha estado cargado de historia. El estudio de la literatura muestra suficientes pruebas que datan de siglos de recubrimientos o películas utilizadas para la conservación de numerosas frutas y verduras para alargar su vida útil promedio (Chettri et al., 2023).

6.4.2 Recubrimientos comestibles

Los recubrimientos comestibles han recibido recientemente una atención creciente en el sector del envasado de alimentos debido a su capacidad protectora del entorno externo y su característica de biodegradabilidad (Shahidi & Hossain, 2022b).

Un recubrimiento se define generalmente como una solución formadora de película que se aplica en forma líquida directamente sobre la superficie del alimento mediante pulverización, inmersión, barrido o brocha (García-Anaya et al., 2023), lo que crea una barrera contra la pérdida de humedad, oxígeno y otros movimientos de solutos en la fruta o entre el alimento y su entorno (Wardak et al., 2024). Cuando el recubrimiento se seca, forma una fina capa de material comestible que puede eliminarse o consumirse como parte de los alimentos (García-Anaya et al., 2023).

Los recubrimientos comestibles a menudo se evalúan por sus propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad (EM), el alargamiento de rotura (E) y la resistencia a la tracción (TS), que se refieren a su elasticidad y rigidez, y a la fuerza necesaria para romperlos. Además, muestran fenómenos de transferencia de masa similares (permeación, adsorción y difusión), que están relacionados con el transporte de solutos entre los alimentos y la atmósfera. Sin embargo, tanto las propiedades mecánicas como los fenómenos de transferencia de masa están influenciados por el tipo de material y el protocolo de fabricación que permite la generación de diferentes estructuras de matrices biopoliméricas (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021). Se utiliza una variedad de materiales para preparar recubrimientos; estos se pueden extraer de animales y plantas, por ejemplo, lípidos, polisacáridos y proteínas. Referente a los recubrimientos a base de proteínas, estos mantienen una barrera contra la humedad y características mecánicas más finas que los recubrimientos a base de polisacáridos, debido a sus excelentes características de barrera contra el dióxido de carbono,

el oxígeno y los lípidos (Kumar & Saini, 2021). Es por ello, que el uso de recubrimientos comestibles es una técnica prometedora, económica y ecológica para mantener la frescura de frutas, verduras y otros alimentos en general (Wardak et al., 2024). Hallazgos demuestran que se están implementando aditivos funcionales en recubrimientos comestibles, estos aditivos han abierto una nueva dimensión para mejorar las propiedades funcionales en los recubrimientos (Nair et al., 2020).

a) Diferencias de recubrimientos y películas comestibles

Algunos autores utilizan indistintamente los términos película comestible y recubrimiento; sin embargo, otros consideran que existe una distinción debido a las técnicas de incorporación al producto alimenticio (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021). Los recubrimientos comestibles, se incorporan a los productos alimenticios directamente en forma líquida. seguido de secado, mientras que las películas comestibles se fabrican como una fina capa y luego se aplica a los productos alimenticios (Shahidi & Hossain, 2022a). A pesar de esto, en ambos casos se forman matrices rígidas con características similares.

b) Clasificación de películas comestibles

Las películas comestibles pueden dividirse en tres grandes grupos con base a sus componentes de elaboración; el primer grupo se denomina compuestos principales, de los cuales derivan los polímeros y a su vez de ellos polisacáridos, proteínas y lípidos. El segundo grupo en el que se puede dividir es con base al solvente de elaboración: agua y etanol. Finalmente, el último grupo se relaciona con los aditivos que pueden agregarse en la matriz de la película comestible, seleccionando aquellos aditivos que pueden mejorar o modificar su funcionalidad básica del material, mejorar la calidad, estabilidad y seguridad de los alimentos empaquetados (Álvarez-Cervantes, 2021).

c) Composición de películas comestibles

Las películas comestibles biodegradables se preparan principalmente a partir de biopolímeros naturales, proteínas y lípidos (Tafa et al., 2023). En la tabla 1 se enumera los biopolímeros más utilizados en la producción de películas y recubrimientos comestibles y sus propiedades (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021; Tavassoli-Kafrani et al., 2016). Por otro lado, se pueden inducir propiedades funcionales a las películas mediante la adición de extractos naturales como aquellos con propiedades antioxidantes. Se ha reportado, que los extractos

antioxidantes ricos en compuestos fenólicos se han aplicado ampliamente en películas (Papadaki et al., 2022).

Tabla 1 Materiales utilizados en la fabricación de películas y recubrimientos comestibles

Materiales	Ejemplos	Propiedades
Polisacáridos	Almidón	
	Celulosa	Espesantes
	Pectina	Gelantes
	Gomas	Emulsionantes
	Chitosán	Estabilizadores
	Agar	Recubrimiento
	Alginato	
Proteínas	Dextrano	Gelantes
	Gelatina	Espesantes
	Caseína	Estabilizadores
	Proteína de suero	Espumantes
Lípidos	Ceras	
	Parafinas	Recubrimientos protectores
	Glicéridos	

Otros componentes de gran importancia en la elaboración de las películas son los plastificantes y emulsificantes. En el caso particular de los plastificantes (moléculas pequeñas de bajo peso molecular), el objetivo de su adición es mejorar la flexibilidad y funcionabilidad de los recubrimientos, haciéndolo menos quebradizo. Entre los plastificantes más utilizados se encuentran: el glicerol, ácidos grasos, sorbitol, aceites, ceras y otros (Fernández Valdés et al., 2015). Por otra parte, los materiales biopoliméricos utilizados para la formulación de bioenvases se incorporan de diferentes formas debido a su naturaleza glucídica (es decir, polisacáridos), proteica o lipídica, creando sistemas de tipo emulsión dispersa (es decir, basados en lípidos) o coloidales (es decir, basados en polisacáridos o proteínas) (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021).

d) Ventajas y desventajas

Los recubrimientos y películas comestibles han tomado gran importancia en la industria de los alimentos; han logrado satisfacer las necesidades de los productores y consumidores, además de generar empaques inofensivos con el medio ambiente (Coimbra et al., 2023; Fernández Valdés et al., 2015) Entre los diferentes beneficios que esta biotecnología ofrece al sector alimentario, específicamente en la conservación de alimentos y frutos (Leite et al., 2023) son:

- Reducir la pérdida de agua, es decir, disminuir la permeabilidad al vapor de agua
- Reducir la permeabilidad al oxígeno para aumentar la vida útil, retrasar la descomposición oxidativa y reducir la producción de etileno (impulsa la maduración en algunas frutas) de los alimentos.
- Aumentar la permeabilidad al dióxido de carbono para prolongar la fase de retraso y el crecimiento logarítmico de microorganismos indeseables (levaduras y mohos).
- Reducir el deterioro, la maduración y la pérdida de aroma y retrasar el oscurecimiento y los cambios de color.
- Mejorar la apariencia y realzar el color y el sabor.
- Mejorar la resistencia mecánica para prolongar la integridad del fruto.
- Reducir la incidencia de la luz mediante altos valores de opacidad ya que la luz promueve la oxidación de las grasas.
- Favorecer el transporte y liberación controlada de agentes que mejoran la textura y capacidad antioxidante de precursores volátiles y compuestos nutricionales y funcionales.

Es importante mencionar como desventaja que, al recubrir un fruto u hortaliza para retardar la pérdida de humedad, es necesario que exista una cierta permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono para evitar una respiración anaeróbica, de lo contrario podría ocasionar desórdenes fisiológicos y una pérdida rápida de la calidad y vida de anaquel en los mismos (Fernández Valdés et al., 2015).

e) Películas comestibles con actividad funcional

La mayoría de las películas y recubrimientos a base de polisacáridos y proteínas exhiben propiedades de barrera contra la humedad deficientes debido a su naturaleza hidrófila; sin

embargo, tienen una buena capacidad de formación de películas junto con una buena barrera contra los gases (O_2CO_2). Por otro lado, los lípidos muestran una mejor barrera al vapor de agua que los polisacáridos y las proteínas debido a su naturaleza hidrofóbica, pero no son capaces de formar estructuras autoportantes, siendo débiles para formar películas flexibles. (Kupervaser et al., 2023b).

Por otro lado, el envasado activo es una de las tecnologías de envasado más prometedoras que no solo puede extender la vida útil sino también mejorar la seguridad y las propiedades sensoriales. Además, los ingredientes activos naturales utilizados para preparar envases activos provienen principalmente de plantas o microorganismos, y estos ingredientes suelen ser compuestos funcionales en los alimentos; por tanto, los envases activos comestibles también pueden mejorar la calidad de los alimentos. Por lo cual, para aumentar la vida útil de los alimentos sin riesgos potenciales, a menudo se introducen ingredientes activos naturales en los materiales de embalaje, como antioxidantes y antimicrobianos (Wang et al., 2023). Recientemente, las películas y recubrimientos comestibles para frutas y verduras, han demostrado que mejoran las propiedades mediante nanosistemas y compuestos bioactivos. Además, los nanosistemas mejoran el área superficial, aumentando así la capacidad de carga de compuestos bioactivos, la estabilidad y las propiedades mecánicas de las películas o recubrimientos (Koirala et al., 2023).

f) Aplicación de películas comestibles en productos hortofrutícolas

Las frutas frescas son muy valoradas por los consumidores de todo el mundo debido a sus deliciosos sabores, abundantes nutrimentos y características que promueven la salud al incorporarse dentro de una dieta correcta (Chen et al., 2021). Sin embargo, es muy frecuente su deterioro antes de ser consumidos o procesado. Se estiman que las pérdidas postcosecha de los productos hortofrutícolas que se producen en el mundo sobrepasan el 20%, debido a deterioros microbiológicos y fisiológicos, como consecuencia de factores de orden tecnológico como inadecuado proceso de recolección, empaques no apropiados e insuficientes vías para la transportación, entre otros, lo que se traduce en un corto período de almacenamiento (Fernández Valdés et al., 2015).

En ese sentido es necesario actualizar las técnicas tradicionales utilizadas para el manejo de patógenos y desarrollar métodos precisos para regular eficientemente la senescencia y resistencia de la fruta (Chen et al., 2021).

En definitiva, los recubrimientos/películas comestibles son una solución eficiente desde el punto de vista del consumidor y del medio ambiente, ya que tienen buenas características de barrera al oxígeno, dióxido de carbono, humedad y vapor de agua que afectan los cambios fisiológicos en frutas y verduras. Estos recubrimientos/películas también previenen el pardeamiento oxidativo, la decoloración, el mal sabor y las infestaciones microbiológicas en frutas y verduras (Chavan et al., 2023).

7. Materiales y métodos

7.1 Obtención del extracto de garambullo

El extracto de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) se preparó según lo descrito por López-Palestina et al. (2018).

Se elaboró un extracto de garambullo con una solución etanólica al 80% en relación 1:1 con frutos de garambullo frescos, y luego se ultrasónico por 60 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente se filtró en papel Whatman no.4. Una vez terminado el filtrado se concentró en un matraz (R-215).

7.2 Elaboración de películas comestibles

Las películas se elaboraron según lo descrito por López-Palestina et al. (2019). Las soluciones filmógenas (FFS) se elaboraron con una concentración de 8 g de gelatina por 100 ml de agua. Como plastificantes se agregó glicerol (1.8 g) y sorbitol (1.2 g). La solución se mezcló durante 20 minutos con ayuda de agitadores magnéticos. Se adicionó extracto de garambullo a la solución de la película a una concentración de 0, 2, 4, 6% (v/v) para la obtención de cuatro tratamientos distintos. Los FFS se homogeneizaron en un Ultraturrax (IKA T25, DS1, Wilmington, NC, EE. UU.). La tasa de homogeneización fue en las siguientes condiciones: 10000 rpm por 2 min con descanso de 1 min, 10000 rpm por 2 min con descanso de 1 min y 10000 rpm por 1 min. Las películas se moldearon colocando 9 ml de FFS en placas de Petri de 8 cm de diámetro. El secado se realizó a 30°C durante 48 h con

una humedad relativa (HR) de $57 \pm 5\%$. Posteriormente las películas se retiraron de las cajas Petri y se almacenaron. En la figura 1 se muestran las películas comestibles elaboradas.

7.3 Caracterización de películas

7.3.1 Compuestos bioactivos.

a) Fenoles totales

Los fenoles totales se determinaron por el método de Folin-Ciocalteu descrito por Waterman & Mole (1994). Se tomó 1 g de la película comestible y se agregó el reactivo de Folin-Ciocalteu diluido con agua destilada, se dejó en estado de reposo durante 7 min; subsiguiente a esto se agregó 1.5 ml de carbonato de sodio al 7.5% y agua destilada; posteriormente se dejó reaccionar en completa oscuridad durante 1 h. Para finalizar se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 725 nm (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway, 6715, EUA).

b) Flavonoides

El contenido de flavonoides se determinó de acuerdo al método de Sánchez-Rodríguez et al. (2012). Para este proceso se tomó 1 g de película comestible, se le agregó 2 ml de agua destilada, y 0.15 ml de NaNO_2 (5%), se mantuvo en estado de reposo la mezcla durante 5 min en la obscuridad; posteriormente se agregaron 0.15 ml de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al (10%) y 1 ml de NaOH (1M), nuevamente la solución se dejó en estado de reposo por 15 min. Se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 415 nm (espectrofotómetro modelo 6715 UV/Vis, Jenway, Techne Inc. Staffordshire, Reino Unido). En la figura 2 se muestra el proceso para determinar los compuestos fenólicos.

c) Betalainas.

Las betalainas se determinaron mediante el método descrito por Castellanos-Santiago & Yahia, 2008). Se pesó 1 g de película de cada tratamiento y se adicionó 10 ml de metanol al 80 % (v/v); posteriormente se centrifugó a 3000 rpm por 10 min. Para la obtención del espectro de absorción del filtrado se utilizó un espectrofotómetro en el intervalo de 400 a 600nm. Se determinó el contenido de betalainas midiendo la absorbancia a 538 y 483 nm, respectivamente. Se utilizó como blanco la solución de metanol al 80%.

7.3.2 Actividad antioxidante

a) DPPH

Para determinar la actividad antioxidante por medio de DPPH se utilizó la metodología propuesta por Brand-Williams et al. (1995). Se tomó un 1 g de película comestible. Se elaboró una disolución etanólica al 6×10^{-5} M de DPPH la cual se colocó en agitación constante durante 2 horas en completa oscuridad. Posteriormente a una muestra del sobrenadante se le agregaron una concentración conocida de la disolución metanólica con DPPH, se agitó durante 15 s y se dejaron en reposo en completa oscuridad por un lapso de 1 h a 4°C; posteriormente se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 517 nm (espectrofotómetro modelo 6715 UV/Vis, Jenway, Techne Inc. Staffordshire, Reino Unido).

b) ABTS

La actividad antioxidante mediante ABTS (2,2'-azinobis [3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico]) se determinó por el método descrito por Re et al. (1999).

La solución ABTS se mezcló (7nM) con 2.45 mM de persulfato de potasio y la mezcla se mantuvo en la oscuridad durante 16 h con agitación constante a temperatura ambiente. La solución de ABTS se diluyó con metanol anhidro hasta que la absorbancia a 734nm alcanzó 0.7 ± 0.002 . Se mezcló 1 g de película comestible con una cantidad conocida de ABTS diluida y se dejaron en estado de reposo durante 6 min. Una vez pasado el tiempo, se midió la absorbancia a 734nm (espectrofotómetro modelo 6715 UV/Vis, Jenway, Techne Inc. Staffordshire, Reino Unido).

7.3.3 Contenido de humedad

Se determinó según el método Antoniou et al. (2014). Se utilizaron cuadrados cortados de 2x2 de película comestible con 3 muestras por tratamiento colocadas en recipientes de papel de aluminio presecados a 105°C durante 24 horas en un horno VWR GR 2.3 CFI.

La muestra se pesó y registro nuevamente su peso. Posteriormente se colocó en los recipientes de papel aluminio y se llevó al horno (VWR GR 2.3 CFI) a 105°C durante 24 horas. Finalmente, se determinó el contenido de humedad de la muestra usando la siguiente ecuación:

Ecuación 1 Humedad

$$\%humedad = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100$$

Donde: Pi = Peso inicial Pf = Peso final

7.3.4 Solubilidad de las películas en agua

Para la evaluación se utilizaron muestras de peso seco según el método descrito por Romero Bastida et al. (2005).

Se agregaron 80 ml de agua destilada en un matraz con un cuadrado de 2x2 de película comestible, llevándola a agitación a temperatura ambiente durante 10 minutos sobre una parrilla magnética con un agitador; la película se colocó a peso constante a en un horno (VWR GR 2.3 CFI) a 60°C durante 24 horas. El interés se calculó según la siguiente fórmula.

Ecuación 2 Solubilidad

$$\%Solubilidad = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100$$

Donde: Pi = Peso Inicial, Pf = Peso final



Figura 1 Determinación de compuestos antioxidantes, porcentaje de humedad y solubilidad en agua en películas

7.3.5 Permeabilidad de vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se evaluó según el método estándar E96 de la American Society for Testing and Materials (ASTM), con algunas modificaciones (César Uriel López-Palestina César Leobardo Aguirre-Mancilla & Hernández-Fuentes, 2019). Se colocaron 4 películas de cada tratamiento en una celda circular de aluminio con una apertura circular de 10 mm de diámetro. Se utilizó gel de sílice (0 % de HR) para sellar las celdas de aluminio y se utilizó un desecador con una HR del 75 % manteniendo el gradiente, se usó una solución saturada de NaCl (75% HR) en el desecador. La permeabilidad del vapor de agua se obtuvo mediante la ganancia de peso de la celda de aluminio. Se tomaron 12 medidas durante 12 h (1/h). La permeabilidad al vapor de agua se calculó utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3 Permeabilidad de agua

$$WVP = \frac{wx}{t * A * \Delta p} * 100$$

Donde: w era el aumento de peso (kg), x el espesor de la película (m), t el tiempo transcurrido para el aumento de peso (s) y ΔP la diferencia de presión de vapor parcial entre la atmósfera seca y el agua pura (2642 Pa a 22 °C).

7.3.6 Pruebas mecánicas

Las propiedades mecánicas de las películas fueron evaluadas acorde a la norma ASTM D882 (ASTM, 1995), para ello se utilizó un texturómetro (TA. XT Plus). Las películas fueron cortadas en secciones rectangulares de 80 mm de largo y 2 mm de ancho, y almacenadas dentro de un desecador con una solución cloruro de sodio (HR 75%) durante 5 días. La separación inicial de agarre fue a 50 mm y la velocidad de extensión fueron fijadas 0.10mm/s. Las propiedades mecánicas de las películas evaluadas fueron: el porcentaje de elongación (% E), la resistencia a la tensión (RT) y el Módulo de Young (MY) (César Uriel López-Palestina César Leobardo Aguirre-Mancilla & Hernández-Fuentes, 2019). Se utilizaron 5 películas de cada formulación para esta evaluación. Los cálculos fueron realizados con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4 Resistencia a la tracción

$$\text{Resistencia a la tracción} = \frac{F_{max}}{T * W}$$

Donde: F_{max} es la carga de falla (fuerza a la que se rompen las películas), t es el espesor inicial de la película y w es el ancho inicial de la película.

Ecuación 5 % de Elongación a la Rotura

$$\text{Porcentaje de elongación a la rotura} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Donde: l_f es la longitud final de la película a la falla y l_0 es la longitud inicial (5 cm) de la película entre agarres

Ecuación 6 Módulo de Young

$$\text{Módulo de Young} = \frac{F * A}{\Delta l * l_0}$$

Donde: F es igual a la fuerza aplicada a la estructura, A es el área de la sección transversal de la película, Δl es el cambio en la longitud de la película cuando se le aplica la fuerza y l_0 es la longitud inicial.

En la figura 2 se muestran los procesos para la obtención de permeabilidad de vapor de agua y pruebas mecánicas.



Figura 2 Determinación de vapor de agua y pruebas mecánicas en películas comestibles

7.3.7 Espesor

Con ayuda de un vernier digital se determinó el espesor de las películas comestibles, se hicieron 3 determinaciones por cada tratamiento en diferentes puntos de la película.

7.3.8 Color

Para medir los parámetros de color de las películas (valores de L^* , a^* , b^* y c^*) se utilizó un colorímetro (3nh, NR110). Los valores de a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul) se usaron para calcular los valores de croma (C^*) y tono de ángulo ($^{\circ}h$).

7.3.9 Transparencia

Se determinó mediante la técnica de Zhang (Zhang et al., 2007), que consiste en medir la transparencia con una tira de película (1.5x3 cm) a una longitud de onda de 600 nm. Mediante la siguiente fórmula se obtuvieron los valores:

Ecuación 7 Transparencia

$$\text{Transparencia: } \frac{A_{600}}{\text{Grosor}} \text{ o } -\frac{\log 600}{\text{Grosor}}$$

En la figura 3 se muestran los procesos para obtener color y transparencia en las películas adicionadas con extracto de gárgambulo.



Figura 3 Obtención de espesor, color y transparencia en películas

8. Resultados

8.1 Propiedades ópticas

La apariencia de las películas con extracto de gárgambulo se puede observar en la figura 4 y las propiedades de color de las películas en la tabla 2.

Tabla 2 Parámetros de color en películas comestibles con extracto de gárgambulo

Muestra	L*	a*	b*	C	hue
0% EG	91.83 ± 0.16a	-0.46 ± 0.03d	-0.88±0.25c	1.00 ± 0.21d	241.54 ± 7.73a
2% EG	81.84 ± 1.63b	9.80 ± 1.68c	14.05 ± 3.22b	17.17 ± 3.300c	54.75 ± 1.82b
4% EG	73.91 ± 1.14c	18.85 ± 1.30b	19.41 ± 1.79ab	27.08 ± 1.79b	45.79 ± 2.72bc
6% EG	67.19 ± 2.14d	27.89 ± 2.74a	22.69 ± 2.33a	35.99 ± 3.03a	39.16 ± 3.14c

EG: Extracto de gárambullo; Los datos son valores medios \pm desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En general, las películas a base de gelatina sin extracto de gárambullo mostraron un aspecto ligeramente brillante, con poca luminosidad, con una tonalidad amarillenta ($^{\circ}h = 241.54$) y muy baja cromaticidad (incoloras a simple vista). Se pudo observar, que a medida que la concentración del extracto de gárambullo aumentó en la formulación de la película, el enrojecimiento (a^*) y el amarilleo (b^*) también aumentaron. Por otro lado, las películas con 6 % de extracto de gárambullo mostraron una tonalidad más roja y un color más intenso (mayor cromaticidad). Al respecto conviene decir, que las propiedades ópticas son esenciales para determinar la idoneidad de una película para ser aplicada sobre la superficie de productos alimenticios, ya que pueden afectar la apariencia del producto recubierto (López-Palestina et al., 2018). Por otra parte, se ha identificado que el gárambullo presenta betalaínas, los cuales son principales responsables de la pigmentación (Montiel-Sánchez et al., 2021).



Figura 4 Aspecto de películas a base de gelatina con 0 (A), 2 (B), 4

Por otro lado, se identificó que el aumento de la concentración del extracto de garambullo en las películas mejoró sus propiedades de barrera UV. En la tabla 3 se muestran los parámetros de transparencia. Los resultados obtenidos sugieren que las propiedades de barrera a la luz ultravioleta que exhiben las películas a base de gelatina adicionadas con extracto de garambullo pueden retardar potencialmente la oxidación de compuestos inducida por la luz ultravioleta. Existe evidencia, que muestra que la luz actúa como catalizador de procesos de oxidación y degradación en los compuestos nutricionales de los alimentos, por lo que, para evitarlos, se adicionan componentes específicos que absorben la luz en el espectro de UV/Vis. Las propiedades de barrera contra los efectos de la luz están relacionadas con el color y la opacidad. En el caso de frutas y hortalizas, el brillo es una característica deseable, por lo que se busca obtener equilibrio entre la calidad sensorial y la nutrimental de estos alimentos (Solano-Doblado et al., 2018).

Tabla 3 Parámetros de transparencia en películas comestibles con extracto de garambullo

Muestras	Transparencia
0% EG	0.470 ± 0.076a
2% EG	0.829 ± 0.3174a
4% EG	0.772 ± 0.0511a
6% EG	1.290 ± 0.917a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios ± desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

8.2 Solubilidad y permeabilidad de vapor de agua

En la tabla 4 se muestran los resultados de permeabilidad; los hallazgos exhiben que hubo poca disminución (WVP) en los extractos de garambullo con respecto al tratamiento 4 (6%). Con base a lo anterior, la evidencia reporta que las buenas películas deben tener un WVP bajo para evitar la migración de humedad y prolongar el tiempo de conservación de los alimentos (Wang et al., 2023; Shivangi et al., 2021; Lei et al., 2019). Es por ello, que los resultados encontrados en esta investigación son alentadores, ya que promoverá a reducir la tasa de transmisión de agua. Además, la evidencia ha demostrado, que la permeabilidad depende de su estructura química, morfología y naturaleza, y, por otra parte, la cadena

polimérica se vuelve menos móvil debido a la adición de bioactivos a la película, lo que reduce la difusión del agua (Shivangi et al., 2021).

Tabla 4 Permeabilidad de vapor de agua y porcentaje de solubilidad en películas comestibles

Muestras	PVA (g/m.s. Pa)	%Solubilidad
0% EG	0.0006 ± 5.83E-05	30.1361 ± 5.8634c
2% EG	0.0007 ± 7.84E-05	43.3605 ± 1.5297b
4% EG	0.0008 ± 0.0001	49.5076± 3.0604ab
6% EG	0.0005 ± 6.64E-05	58.6784 ± 2.0980a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios ± desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Por otro lado, se pudo observar que, a mayor cantidad de extracto de garambullo adicionado, mayor porcentaje de solubilidad (Figura 4). En comparación con las películas control, el WL de las películas con extracto de garambullo aumentó, posiblemente porque los ingredientes bioactivos contenidos son solubles en agua (Wang et al., 2023). Por otro parte, los resultados obtenidos en este estudio son similares a las obtenidas por otras películas a base de gelatina adicionadas con distintos extractos (Wang et al., 2023; Shivangi et al., 2021). Es importante comentar, que el porcentaje de solubilidad de las películas indica su insolubilidad en agua, o su hidrofobicidad, y es un parámetro que tiene importancia comercial, ya que influye en diferentes aplicaciones (López-Palestina et al., 2018).

8.3 Pruebas mecánicas

En la tabla 5 se muestran las propiedades mecánicas de las películas comestibles adicionadas con extracto de garambullo; los parámetros analizados fueron: resistencia a la tracción,

elongación y módulo de Young. Como se observa, existe una diferencia entre las películas control y las que contienen extracto de garambullo, entre mayor porcentaje de extracto aumenta la resistencia y la elongación.

Tabla 5 Propiedades mecánicas de la película comestible con extracto de garambullo

Muestra	Módulo de Young (MPa)	Resistencia a la tracción	Alargamiento a la rotura (%)
0% EG	0.1576±0.0330b	0.1254±0.0593b	0.7693±0.1963a
2% EG	0.0804±0.0471b	0.1134±0.0796b	1.2826±0.6021a
4% EG	0.2258±0.0362ab	0.3652±0.2112ab	1.5426±0.7624a
6% EG	0.3195±0.0784a	0.6105±0.1633a	2.0049±0.70186a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios ± desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Por otro lado, se observó que las películas mostraron disminución de rigidez, alta extensibilidad y elasticidad; lo cual, podría deberse a la adición del extracto. Estos resultados posiblemente se deban a la incorporación del extracto de garambullo, el cual fue rico en compuestos bioactivos promoviendo la generación de fuertes enlaces de hidrógeno, interacción entre grupos funcionales de moléculas de pectina, como los grupos hidroxilo y carboxilo; además, pudieron contribuir a una estructura compacta, y por lo tanto mejoró la resistencia a la tracción de las películas mezcladas de pectina (Shivangi et al., 2021). Por otra parte, también podría haber sido causado no solo por el extracto sino también por el contenido de glicerol y sorbitol en las películas (López-Palestina et al., 2018).

8.4 Contenido de compuestos antioxidantes

En la tabla 6 se muestra la determinación de las actividades antioxidantes de las películas utilizando los métodos DPPH y ABTS. En los resultados se pudo observar, que el extracto de garambullo al 6 % mostro mayor capacidad antioxidante; la eliminación de radicales libres y poder antioxidante férrico indico que la actividad antioxidante máxima fue de 9.6915 y 0.0083 μM Trolox respectivamente. Los resultados encontrados en este estudio son similares a lo reportado en otros estudios que también confirman que la incorporación de antioxidantes

naturales proporciona propiedades antioxidantes a las películas comestibles (Lei et al., 2019; López-Palestina et al., 2018). Es por ello, que la adición de antioxidantes al material de envasado de alimentos es una de las estrategias más importante para darle actividad a este último contra agentes oxidantes, preservando así los alimentos envasados (Priyadarshi et al., 2018).

Tabla 6 Capacidad antioxidante de películas comestibles con extracto de garambullo determinada por ensayos DPPH y ABTS

Muestras	ABTS ($\mu\text{M Trolox/g}$)	DPPH ($\mu\text{M Trolox/g}$)
0% EG	0.7909 \pm 0.1630d	0.0006 \pm 2.1E-05d
2% EG	3.7679 \pm 0.2202c	0.0048 \pm 0.0002c
4% EG	5.9261 \pm 0.1844b	0.0071 \pm 0.0004b
6% EG	9.6915 \pm 0.2238a	0.0083 \pm 0.0001a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios \pm desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). EG: Extracto de garambullo.

8.4.1 Fenoles y flavonoides

En la tabla 7 se muestran los contenidos de fenoles y flavonoides en las películas adicionadas con extracto de garambullo; en la tabla se puede observar que el contenido de ambos compuestos fenólicos aumentó a medida que aumentó la concentración del extracto, siendo mayor en el tratamiento con extracto al 6%. A menudo, los compuestos fenólicos actúan como agentes reductores, terminan la reacción en cadena de los radicales libres al eliminarlos. Es por ello, que al adicionarse inhiben las reacciones de oxidación y previenen la producción de malos olores y sabores (Navarro-Olivera, 2022).

Tabla 7 Contenido de fenoles y flavonoides en películas comestibles con extracto de garambullo

	Muestra	Fenoles (mg EAG/g)	Flavonoides (mg EQ/g)
EG:	0% EG	0.0008 \pm 0.00018d	0.0006 \pm 2.3E-06d
	2% EG	0.0089 \pm 0.00083c	0.0017 \pm 0.00016c
	4% EG	0.0141 \pm 0.0014b	0.0032 \pm 0.0003b
	6% EG	0.0185 \pm 0.0021a	0.0042 \pm 0.0001a

Extracto de garambullo; Los datos son valores medios \pm desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

8.4.2 Betalaínas

El contenido de betalaínas en la película adicionada con extracto de garambullo presento una concentración de betacianinas y betaxantinas de 1.1489 y 1.2768 mg/g de película respectivamente en el tratamiento 4 (6%). De acuerdo con el análisis estadístico se observó que existe una diferencia significativa en la concentración de las betalaínas con respecto a la película control (Tabla 8).

Tabla 8 Contenido de betalaínas en películas comestibles con extracto de garambullo

Muestra	Betacianinas (mg/g)	Betaxantinas (mg/g)	Betalainas (mg/g)
0% EG	0.104 ± 0.019d	0.093 ± 0.021d	0.197 ± 0.040d
2% EG	0.464 ± 0.030c	0.478 ± 0.025c	0.943 ± 0.055c
4% EG	0.752 ± 0.030b	0.730 ± 0.017b	1.483 ± 0.046b
6% EG	1.276 ± 0.030a	1.148 ± 0.026a	2.425 ± 0.056a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios ± desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

En este trabajo se analizó que hay una vinculación positiva entre el contenido de betalaínas y la actividad antioxidante de las películas con extracto de garambullo con resultados similares a lo expuesto por Ahumada-Pérez, (2018). Recientemente, se ha demostrado los posibles beneficios para la salud de las betalaínas, presentando a los alimentos ricos en betalaínas y compuestos fenólicos como promotores de reparación o reducción del daño causado por el estrés oxidativo, así como preventivos que coadyuvan en la oxidación del colesterol y lipoproteínas de baja densidad (LDL) dada su actividad antioxidante (Montiel-Sánchez et al., 2021).

8.5 Humedad

En la tabla 9 se muestra el porcentaje de humedad presente en las películas. El contenido de humedad observado en las películas fue alto; esto puede deberse por la presencia de glicerol en ellas, ya que a mayor contenido de plastificantes mayor contenido de humedad (López-Palestina et al., 2018). Por otro lado, se puede notar que el aumento en los tratamientos no

fue muy considerable. Esto se podría deberse a que el extracto de garambullo contiene compuestos fenólicos los cuales son hidrofílicos, como lo es el caso de las betalainas (Navarro-Olivera, 2022).

Tabla 9 Porcentaje de humedad en películas comestibles con extracto de garambullo

Muestra	% de Humedad
0% EG	11.41 ± 0.94b
2% EG	13.49 ± 0.89ab
4% EG	14.12 ± 0.41a
6% EG	14.77 ± 0.56a

EG: Extracto de garambullo; Los datos son valores medios ± desviaciones estándar. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). EG: Extracto de garambullo.

9. Conclusiones

En este estudio se elaboraron películas comestibles adicionadas con extracto de garambullo, las cuales mostraron que la incorporación de este extracto tiene compatibilidad con las propiedades mecánicas, aumentando su resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura y módulo de Young. Además, las películas mostraron un alta una concentración de betacianinas y betaxantinas, adicional a un alto contenido de fenoles y flavonoides con respecto a la muestra control. Finalmente, las películas comestibles con extracto de garambullo tuvieron mayor insolubilidad en agua y una disminución de la permeabilidad de vapor de agua lo cual ayuda evitar la migración de humedad y prolongar el tiempo de conservación en los alimentos.

Con base a esto se concluye que las películas comestibles adicionadas con extracto de garambullo además de presentarse como fuentes dietéticas prometedoras para la nutrición humana, también podrían ser una alternativa para sustituir a los materiales sintéticos en el envasado de alimentos gracias a sus características bioactivas y biodegradables.

Referencias

- Ahumada-Pérez, G. (2018). *Diseño y caracterización de películas comestibles con actividad antioxidante utilizando materiales no convencionales*. 1–76. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/25047>
- Al-Khayri, J. M., Sahana, G. R., Nagella, P., Joseph, B. V., Alessa, F. M., & Al-Mssallem, M. Q. (2022). Flavonoids as Potential Anti-Inflammatory Molecules: A Review. *Molecules*, 27(9), 2901. <https://doi.org/10.3390/molecules27092901>
- Álvarez-Cervantes, R. D. C. (2021). Películas comestibles adicionadas con extractos antociánicos de fresa para el control de bacterias enteropatógenas. *Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación Para El Desarrollo Integral Regional*, 1–21.
- Antoniou, J., Liu, F., Majeed, H., Qazi, H. J., & Zhong, F. (2014). Physicochemical and thermomechanical characterization of tara gum edible films: Effect of polyols as plasticizers. *Carbohydrate Polymers*, 111, 359–365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.04.005>
- ASTM. (1995). D-882-95a. *Standard Test Methods for Tensile Properties Ofthin Plastic Sheetting*.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. *Lwt - Food Science and Technology*, 28, 25–30. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3808056>
- Castellanos-Santiago, E., & Yahia, E. M. (2008). Identification and Quantification of Betalains from the Fruits of 10 Mexican Prickly Pear Cultivars by High-Performance Liquid Chromatography and Electrospray Ionization Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5758–5764. <https://doi.org/10.1021/jf800362t>
- César Uriel López-Palestina César Leobardo Aguirre-Mancilla, J. C. R.-P. J. G. R.-P. A. V.-T., & Hernández-Fuentes, A. D. (2019). Physicochemical and antioxidant properties of gelatin-based films containing oily tomato extract (*Solanum lycopersicum* L.). *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 142–150. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1564793>
- Chavan, P., Lata, K., Kaur, T., Rezek Jambrak, A., Sharma, S., Roy, S., Sinhmar, A., Thory, R., Pal Singh, G., Aayush, K., & Rout, A. (2023). Recent advances in the preservation of postharvest fruits using edible films and coatings: A comprehensive review. *Food Chemistry*, 418, 135916. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135916>
- Chen, T., Ji, D., Zhang, Z., Li, B., Qin, G., & Tian, S. (2021). Advances and Strategies for Controlling the Quality and Safety of Postharvest Fruit. *Engineering*, 7(8), 1177–1184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.029>

- Chettri, S., Sharma, N., & Mohite, A. M. (2023). Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables. *Biomaterials Advances*, *154*, 213632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213632>
- Coimbra, P., Alarico, S., Empadinhas, N., Braga, M. E. M., & Gaspar, M. C. (2023). Sustainable starch-based edible films with agrifood residues as potential carriers for the probiotic *Lactobacillus rhamnosus*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *88*, 103452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103452>
- Correa-Betanzo, J., Jacob, J. K., Perez-Perez, C., & Paliyath, G. (2011a). Effect of a sodium caseinate edible coating on berry cactus fruit (*Myrtillocactus geometrizans*) phytochemicals. *Food Research International*, *44*(7), 1897–1904. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.053>
- Correa-Betanzo, J., Jacob, J. K., Perez-Perez, C., & Paliyath, G. (2011b). Effect of a sodium caseinate edible coating on berry cactus fruit (*Myrtillocactus geometrizans*) phytochemicals. *Food Research International*, *44*(7), 1897–1904. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.053>
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview. *Foods*, *10*(2), 249. <https://doi.org/10.3390/foods10020249>
- Dinh, T. A., Le, Y. N., Pham, N. Q., Ton-That, P., Van-Xuan, T., Ho, T. G.-T., Nguyen, T., & Phuong, H. H. K. (2023). Fabrication of antimicrobial edible films from chitosan incorporated with guava leaf extract. *Progress in Organic Coatings*, *183*, 107772. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107772>
- Dursun Capar, T. (2023). Characterization of sodium alginate-based biodegradable edible film incorporated with *Vitis vinifera* leaf extract: Nano-scaled by ultrasound-assisted technology. *Food Packaging and Shelf Life*, *37*, 101068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101068>
- Fernández Valdés, D., Bautista Baños, S., Fernández Valdés, D., Ocampo Ramírez, A., García Pereira, A., & Falcón Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *24*(3), 52–57.
- García-Anaya, M. C., Sepulveda, D. R., Zamudio-Flores, P. B., & Acosta-Muñiz, C. H. (2023). Bacteriophages as additives in edible films and coatings. *Trends in Food Science & Technology*, *132*, 150–161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.01.008>
- Gómez, L., & Misaël, I. (2021). *Estudio del efecto biológico de nanopartículas de plata sobre el parásito Trypanosoma cruzi*.
- Guzmán-Maldonado, S. H., Herrera-Hernández, G., Hernández-López, D., Reynoso-Camacho, R., Guzmán-Tovar, A., Vaillant, F., & Brat, P. (2010). Physicochemical, nutritional and functional characteristics of two underutilised fruit cactus species

- (Myrtillocactus) produced in central Mexico. *Food Chemistry*, 121(2), 381–386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.039>
- Kodikara, C., Netticadan, T., Bandara, N., Wijekoon, C., & Sura, S. (2024). A new UHPLC-HRMS metabolomics approach for the rapid and comprehensive analysis of phenolic compounds in blueberry, raspberry, blackberry, cranberry and cherry fruits. *Food Chemistry*, 445, 138778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138778>
- Koirala, P., Nirmal, N. P., Woraprayote, W., Visessanguan, W., Bhandari, Y., Karim, N. U., Nor-Khaizura, M. A. R., & Saricaoğlu, F. T. (2023). Nano-engineered edible films and coatings for seafood products. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101135>
- Kumar, A., & Saini, C. S. (2021). Edible composite bi-layer coating based on whey protein isolate, xanthan gum and clove oil for prolonging shelf life of tomatoes. *Measurement: Food*, 2, 100005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2021.100005>
- Kupervaser, M. G., Traffano-Schiffo, M. V., Dellamea, M. L., Flores, S. K., & Sosa, C. A. (2023a). Trends in starch-based edible films and coatings enriched with tropical fruits extracts: a review. *Food Hydrocolloids for Health*, 4, 100138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2023.100138>
- Kupervaser, M. G., Traffano-Schiffo, M. V., Dellamea, M. L., Flores, S. K., & Sosa, C. A. (2023b). Trends in starch-based edible films and coatings enriched with tropical fruits extracts: a review. *Food Hydrocolloids for Health*, 4, 100138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2023.100138>
- Lei, Y., Wu, H., Jiao, C., Jiang, Y., Liu, R., Xiao, D., Lu, J., Zhang, Z., Shen, G., & Li, S. (2019). Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of pectin-konjac glucomannan composite edible films incorporated with tea polyphenol. *Food Hydrocolloids*, 94, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.011>
- Leite, A. C. C. O., Cerqueira, M. A., Michelin, M., Fuciños, P., & Pastrana, L. (2023). Antiviral edible coatings and films: A strategy to ensure food safety. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 551–563. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.038>
- López-Palestina, C. U., Aguirre-Mancilla, C. L., Raya-Pérez, J., Ramírez-Pimentel, J. G., Gutiérrez-Tlahque, J., & Hernández-Fuentes, A. (2018). The Effect of an Edible Coating with Tomato Oily Extract on the Physicochemical and Antioxidant Properties of Garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) Fruits. *Agronomy*, 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110248>
- Montiel-Sánchez, M., García-Cayuela, T., Gómez-Maqueo, A., García, H. S., & Cano, M. P. (2021). In vitro gastrointestinal stability, bioaccessibility and potential biological

- activities of betalains and phenolic compounds in cactus berry fruits (*Myrtillocactus geometrizans*). *Food Chemistry*, *342*, 128087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128087>
- Nair, M. S., Tomar, M., Punia, S., Kukula-Koch, W., & Kumar, M. (2020). Enhancing the functionality of chitosan- and alginate-based active edible coatings/films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*, 304–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.083>
- Navarro-Olivera, A. (2022). Evaluación de la mezcla de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) y tuna roja (*Opuntia ficus-indica*) y el tipo de carne de pollo en el estatus oxidante y características fisicoquímicas durante la elaboración y almacenamiento de salchichas. *universidad tecnológica de la mixteca*, 13–16.
- Priyadarshi, R., Sauraj, Kumar, B., & Negi, Y. S. (2018). Chitosan film incorporated with citric acid and glycerol as an active packaging material for extension of green chilli shelf life. *Carbohydrate Polymers*, *195*, 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.089>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, *26*(9), 1231–1237. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Romero Bastida, C., Bello-Pérez, L., García, M., Martino, M., Solorza-Feria, J., & Zaritzky, N. (2005). Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starch. *Carbohydrate Polymers*, *60*, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.004>
- Sánchez-Rodríguez, E., Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Romero, L., & Ruiz, J. M. (2012). Grafting under water stress in tomato cherry: improving the fruit yield and quality. *Annals of Applied Biology*, *161*(3), 302–312. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2012.00574.x>
- Sanjuan-Trejo, G., Mejía-Segovia, D. M., & Moreno, C. E. (2021). Ensamblajes de artrópodos asociados a los frutos de garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*) en dos localidades del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *92*(0), 923487. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3487>
- Shahidi, F., & Hossain, A. (2022a). Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(1), 66–105. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1812048>
- Shahidi, F., & Hossain, A. (2022b). Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(1), 66–105. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1812048>

- Shivangi, S., Dorairaj, D., Negi, P. S., & Shetty, N. P. (2021). Development and characterization of a pectin-based edible film that contains mulberry leaf extract and its bio-active components. *Food Hydrocolloids*, *121*, 107046. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107046>
- Solano-Doblado, L. G., Alamilla-Beltrán, L., & Jiménez-Martínez, C. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *21*, 30. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>
- Sultan, M., Abdelhakim, A. A., Nassar, M., & Hassan, Y. R. (2023). Active packaging of chitosan film modified with basil oil encapsulated in silica nanoparticles as an alternate for plastic packaging materials. *Food Bioscience*, *51*, 102298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102298>
- Tavassoli-Kafrani, E., Shekarchizadeh, H., & Masoudpour-Behabadi, M. (2016). Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, *137*, 360–374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.074>
- Tizazu, A., & Bekele, T. (2024). A review on the medicinal applications of flavonoids from aloe species. *European Journal of Medicinal Chemistry Reports*, *10*, 100135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejmcr.2024.100135>
- Wang, M., Li, Y.-C., Meng, F.-B., Wang, Q., Wang, Z.-W., & Liu, D.-Y. (2023). Effect of honeysuckle leaf extract on the physicochemical properties of carboxymethyl konjac glucomannan/konjac glucomannan/gelatin composite edible film. *Food Chemistry: X*, *18*, 100675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100675>
- Wardak, M. H., Nkede, F. N., Van, T. T., Meng, F., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2024). Development of edible films and partial coating, a novel coating technique for tomato fruits, using citric acid-crosslinked starch and cellulose nanofiber. *Progress in Organic Coatings*, *187*, 108127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108127>
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). *Analysis of Phenolic Plant Metabolites*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:83382869>
- Zhang, H., Wang, L., Dong, Y., Jiang, S., Cao, J., & Meng, R. (2007). Postharvest biological control of gray mold decay of strawberry with *Rhodotorula glutinis*. *Biological Control*, *40*(2), 287–292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.10.008>