



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN QUÍMICA

TESIS

**DISEÑO DE PELÍCULAS HIDRÓFOBAS OBTENIDAS
A PARTIR DE BAGAZO DE CEBADA Y SU USO
COMO RECUBRIMIENTO DE ZARZAMORA**

**Para obtener el título de
Licenciada en Química**

PRESENTA

Verónica Alvarado Soto

Directora

Dra. Araceli Castañeda Ovando

Codirectora

Dra. Yari Jaguey Hernández

Mineral de la Reforma, Hgo., México., mayo 2026.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 8 de mayo de 2026

Número de control: ICBI-D/917/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química **Verónica Alvarado Soto**, quien presenta el trabajo de titulación "**Diseño de películas hidrófobas obtenidas a partir de bagazo de cebada y su uso como recubrimiento de zarzamora**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Javier Añorve Morga
Secretario: Dr. Simplicio González Montiel
Vocal: Dra. Araceli Castañeda Ovando
Suplente: Dra. Yari Jaguey Hernández

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

“En algún lugar del mundo, algo increíble está esperando ser descubierto”.

-Carl Sagan

Algunos de los resultados de este trabajo han sido presentados en el siguiente foro científico:

- Latin American Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering #LatinEnvChemPSE 2025. *De residuo a biomaterial: Películas hidrófobas y biodegradables a partir de bagazo de cebada*. Celebrado el 9 de octubre de 2025.

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de:

- Fisicoquímica de Alimentos 2 del Área Académica de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Agradecimientos

“Los grandes logros de cualquier persona generalmente dependen de muchas manos, corazones y mentes”.

-Walt Disney

Con el corazón profundamente agradecido, dedico este espacio a quienes me brindaron su amor, paciencia y apoyo incondicional, especialmente cuando el camino parecía más difícil. Hubo días de incertidumbre y cansancio, pero también hubo manos que sostuvieron, palabras que alentaron y miradas que me devolvieron la confianza cuando más lo necesitaba.

Gracias a mis papás, por brindarme la oportunidad de estudiar lo que realmente me apasiona y dejarme perseguir mis sueños a pesar de las adversidades. A mi papá, por mantener esa confianza silenciosa pero constante en que lograría mis objetivos, porque, aunque el camino lo recorrimos con pocas palabras, el saber que estabas ahí fue suficiente para saber que no caminaba sola. A mi mamá, porque a pesar de que estos años han sido difíciles, nunca me soltó la mano; aun en la distancia, su aliento diario es mi motor para salir adelante y recordar cada mañana que somos capaces de alcanzar nuestros sueños.

Gracias a mis hermanas, porque aun siendo la más pequeña, han confiado en mí con tal fuerza que me han hecho sentir que soy capaz de alcanzar las mismas cimas que ellas han conquistado, impulsándome siempre a estar a su altura. A mi sobrino Elías, porque su vida cambió el rumbo de la mía y ahora sueño con convertirme en la científica que le ayude a explorar el mundo con curiosidad y asombro.

Gracias a Ernesto, mi amor desde la preparatoria y mi compañero de vida durante más de siete años. Gracias por confiar en mi potencial incluso cuando yo misma dudaba y por ser mi refugio en los momentos de quiebre; gracias por limpiar mis lágrimas cuando el cansancio y las situaciones me superaban y por recordarme que soy capaz de lograr esto y mucho más, sin tu amor y tu paciencia, el camino no habría sido el mismo.

A Monika, mi amiga desde la preparatoria que ha permanecido a mi lado de forma incondicional desde entonces. Gracias por no soltarme a pesar del tiempo y los cambios que da la vida.

A todas las personas que se cruzaron en mi camino a lo largo de estos años: gracias.

A los amigos que estuvieron desde el primer día, Alex y Paty: gracias por cada risa, por cada experiencia en el laboratorio y por no soltarnos en ningún momento de esta travesía.

A los que llegaron después para quedarse, Pao: gracias por aparecer en el momento justo y por caminar a mi lado en la recta final de este sueño.

Y a aquellos que, aunque se fueron, dejaron una huella en mi historia. Gracias por hacer de este viaje una experiencia colectiva y por enseñarme que nadie llega a la meta solo.

Es imposible concebir este trabajo sin expresar mi más profundo agradecimiento a la Dra. Araceli, quien, aun sin conocerme previamente, confió en mi capacidad para sacar adelante este proyecto. Gracias por su apoyo incesante, por facilitar cada etapa del proceso y por compartir los ideales que le dieron vida a esta investigación.

Al Dr. Simplicio, mi reconocimiento especial: su apoyo, que inició en las aulas de tercer semestre, ha sido el motor que me permitió desarrollar este trabajo con éxito. Gracias por no dejar de confiar en mí.

Finalmente, le agradezco a la Dra. Yari por impulsarme a aceptar este reto y por su paciencia al explicarme lo complejo, así como a todos los integrantes del Laboratorio de Físicoquímica de Alimentos 2, por recibirme con tanta calidez y brindarme un espacio donde la amistad y la ciencia van de la mano.

Con cariño, a mis fieles compañeras: Luna y Kira. Gracias por escucharme con paciencia cuando intentaba explicar mi trabajo y por estar ahí sin pedir nada a cambio. Un agradecimiento especial a Kiris por sus desvelos compartidos. A Lunita y Coquito, que se adelantaron en el camino: su presencia siempre habita en mi corazón y este logro también está iluminado por su memoria.

Gracias a la vida, porque aprendí que de nada sirve ser luz si no es para iluminar el camino de los demás y que los sueños son solamente para hacerse realidad.

Índice general

1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1. Subproductos de la industria cervecera: bagazo de cebada.....	3
2.2. Arabinoxilanos	5
2.3. Películas y recubrimientos biodegradables	7
2.3.1. Definición y principales características.....	7
2.3.2. Clasificación según el tipo de polímero utilizado	10
2.3.2.1. Naturales.....	10
2.3.2.2. Sintéticos	11
2.3.2.3. Semisintéticos.....	12
2.3.3. Aditivos utilizados para mejorar su funcionalidad.....	13
2.3.3.1. Aceites esenciales.....	13
2.3.3.2. Plastificantes.....	14
2.3.3.3. Agentes activos.....	14
2.3.3.4. Nanomateriales	15
2.4. Uso de películas biodegradables en la conservación de frutos.....	15
3. Objetivos.....	18
3.1. General	18
3.2. Específicos.....	18
4. Metodología.....	19
4.1. Preparación de la muestra de bagazo de cebada.....	19
4.2. Extracción de arabinoxilanos a partir de bagazo de cebada	19
4.3. Preparación de las películas hidrófobas a base de BSG-AX.....	20
4.4. Caracterización del BSG-AX y de las películas compuestas	21
4.4.1. Análisis proximal.....	21
4.4.2. Color	21
4.4.3. Análisis estructural	22
4.4.4. Morfología superficial	22
4.4.5. Análisis térmico.....	22
4.4.6. Propiedades funcionales de las películas.....	22
4.4.6.1. Rugosidad	22

4.4.6.2. Propiedades físicas	23
Espesor.....	23
Contenido de humedad	23
4.4.6.3. Propiedades mecánicas	23
4.4.6.4. Propiedades de barrera.....	24
Permeabilidad al vapor de agua (WVP).....	24
Solubilidad al agua.....	24
Ángulo de contacto	25
4.5. Aplicación de las películas como recubrimiento de zarzamora	25
4.5.1. Preparación de los grupos experimentales.....	25
4.5.2. Evaluación de los cambios	26
4.5.2.1. Pérdida de peso	26
4.5.2.2. Color	26
4.5.2.3. Acidez titulable y pH.....	26
4.5.2.4. Determinación del orden de reacción y parámetros cinéticos	27
4.5.2.5. Análisis microestructural.....	27
4.5.2.6. Análisis estadístico	27
5. Resultados y discusión	28
5.1. Rendimiento de la extracción	28
5.2. Caracterización de BSG-AX	28
5.2.1. Análisis proximal.....	28
5.2.2. Color	29
5.2.3. Análisis estructural	30
5.2.4. Análisis térmico.....	32
5.2.5. Morfología superficial	33
5.3. Caracterización de películas hidrófobas de BSG-AX	34
5.3.1. Análisis estructural	34
5.3.2. Análisis morfológico	36
5.3.2.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	36
5.3.2.2. Rugosidad	38
5.3.3. Análisis térmico.....	40
5.3.4. Propiedades físicas	41

5.3.5. Propiedades mecánicas	43
5.3.6. Propiedades de barrera.....	45
5.4. Aplicación de la película hidrófoba de AX/PLA como material de recubrimiento de zarzamoras	47
5.4.1. Pérdida de peso	49
5.4.2. Color	52
5.4.3. Acidez titulable.....	57
5.4.4. pH	60
5.4.5. Determinación del orden de reacción y parámetros cinéticos	62
5.4.6. Análisis microestructural.....	65
6. Conclusiones.....	71
Referencias.....	72

1. Introducción

La industria cervecera se distingue entre todos los procesos industriales debido a la enorme cantidad de residuos que genera (Amoriello & Ciccoritti, 2021). Durante el proceso de producción, se originan volúmenes significativos de subproductos, como lodos de levadura, restos de lúpulo y, de manera predominante, bagazo de cebada (BSG) (Pasquet et al., 2024). Se estima que, por cada 100 L de cerveza producida, se obtienen aproximadamente 20 kg de BSG, lo que representa más del 85 % de los desechos totales del sector (Pérez-Alva et al., 2025). Debido a su composición química, rica en celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas y lípidos, el BSG representa un recurso valioso para obtener materiales con valor agregado (Liffourrena et al., 2024; Zeko-Pivač et al., 2022).

Dentro de la fracción de hemicelulosa presente en el BSG, los arabinoxilanos (AX) son los componentes mayoritarios, representando entre el 6.4 y 17.8 % del BSG (Naibaho et al., 2025). Más allá de su función estructural en la pared celular vegetal (Rojas-Lema et al., 2024), estos polisacáridos destacan por sus propiedades biológicas, incluyendo beneficios en la salud digestiva, el control de azúcar en la sangre y la modulación del microbiota intestinal (Virti et al., 2025).

Gracias a su elevada masa molecular y la presencia de grupos hidroxilo en su estructura, los AX de cereales constituyen una matriz prometedora para el desarrollo de biopolímeros (Bangar et al., 2025). Se ha identificado que la integración de los AX con otros compuestos, permite diseñar películas con propiedades mecánicas mejoradas y funcionalidades adicionales, tales como capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana (Rojas-Lema et al., 2024).

Por su parte, el ácido poliláctico (PLA) es un poliéster semisintético de gran relevancia en la ciencia de materiales. Este termoplástico, comparable en diversos aspectos al poliestireno, destaca por su transparencia, rigidez y resistencia mecánica (Upadhyaya et al., 2022). Además, su biodegradabilidad y sus notables propiedades de barrera, gracias a su naturaleza hidrófoba, lo posicionan como un candidato idóneo para el desarrollo de películas y recubrimientos avanzados (Westlake et al., 2023).

El diseño y uso de películas biodegradables con propiedades hidrófobas representan una solución para sustituir los recubrimientos sintéticos o derivados del petróleo para envasar frutos, verduras, lácteos y productos cárnicos a nivel comercial (Matar et al., 2025). En

particular, el uso de recubrimientos ofrece una protección adicional para frutos altamente perecederos, prolongando su vida útil al actuar como barrera selectiva frente al intercambio de gases y a la pérdida de humedad (Miteluț et al., 2021).

En este contexto, en el presente trabajo se desarrollaron biopelículas compuestas (AX/PLA) a partir de la extracción de una fracción rica en AX de BSG con el fin de evaluar su eficacia como recubrimientos protectores de frutos de zarzamora.

2. Antecedentes

2.1. Subproductos de la industria cervecera: bagazo de cebada

La industria cervecera desempeña un papel significativo en la economía global gracias a la alta demanda de cerveza entre distintos sectores de la población. En México, la producción de esta bebida ha logrado consolidar la cadena de valor cebada-malta-cerveza, con una producción que en 2019 superó los 124.5 millones de hectolitros y posicionó al país como el cuarto productor a nivel mundial (Vázquez-Alfaro et al., 2021).

La cerveza es la bebida alcohólica de mayor consumo global, derivada de cereales malteados, agua, levadura y lúpulo (Karlović et al., 2020); se encuentra en el quinto lugar entre las bebidas más ingeridas, después del té, los refrescos, la leche y el café (Kalak, 2022). Sin embargo, su proceso de elaboración genera cantidades significativas de subproductos líquidos y sólidos, como aguas residuales, bagazo de cebada, residuos de levadura y de lúpulo (Aioriello & Ciccoritti, 2021).

El BSG es el principal subproducto generado por la industria cervecera; por cada 100 litros de cerveza producida, se generan aproximadamente 20 kg de BSG, lo que representa el 85 % del total de residuos (Chin et al., 2024). De hecho, cada año se generan alrededor de 36.4 millones de toneladas de BSG a nivel mundial.

Generalmente, el BSG fresco contiene entre un 75 y 80 % de humedad, lo que lo hace susceptible al deterioro microbiano. Por ello, su uso se limita principalmente a ser alimento para animales, o bien se desecha en vertederos (Nyhan et al., 2023), donde sufre una descomposición anaeróbica que libera metano, un gas de efecto invernadero con un potencial 25 veces mayor que el del CO₂ (Pérez-Alva et al., 2025).

En este sentido, el BSG puede secarse para prolongar su vida útil y facilitar su uso como ingrediente alimentario; además, gracias a su alto contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos, presenta importantes oportunidades para el aprovechamiento sostenible de los recursos (Nyhan et al., 2023).

Desde el punto de vista estructural, el BSG está compuesto principalmente por la cáscara, el pericarpio y la testa (Virdi et al., 2025). Aunque su composición química puede variar según la variedad de cebada, el momento de la cosecha y las condiciones de elaboración, el BSG

se considera un material lignocelulósico (Nyhan et al., 2023), rico en hemicelulosa (20–40 %), celulosa (16-29 %) y lignina (12-18 %), además de un contenido de proteínas del 20 al 30 %, entre las que destacan las hordeínas, glutelinas, globulinas y albúminas como las más abundantes (Pérez-Alva et al., 2025).

El BSG también contiene fósforo, calcio, magnesio, hierro, cobre, potasio y manganeso; vitaminas como biotina, niacina, ácido fólico, riboflavina, tiamina y piridoxina (Chetrariu & Dabija, 2020), así como ácidos fenólicos, lo que lo convierte en una fuente rica de compuestos nutritivos para productos alimenticios y fines nutraceuticos. También es importante destacar las propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y antimutagénicas de los derivados del BSG (Naibaho et al., 2025).

La fibra es uno de los componentes de mayor interés desde el punto de vista nutricional (Chetrariu & Dabija, 2020). Los β -glucanos, por ejemplo, pueden tener efectos fisiológicos beneficiosos en el tracto gastrointestinal, como la disminución del riesgo de cáncer de colon (Pérez-Alva et al., 2025). La hemicelulosa, principal componente del BSG, está compuesta especialmente por arabinosilanos (AX), que han demostrado contribuir a la salud intestinal, mejorar el control de los niveles de glucosa en sangre y presentar actividad antioxidante (Virdi et al., 2025; Nyhan et al., 2023).

Dada la extensa producción industrial de cerveza, el BSG está disponible en grandes cantidades durante todo el año y puede aprovecharse de diversas maneras (Karlović et al., 2020). Hasta la fecha, se ha reportado su uso principalmente en productos de panadería, como pan, galletas, masa para pizza, así como en algunas aplicaciones en pasta, yogur, salchichas y otros embutidos (Nyhan et al., 2023); asimismo, algunos estudios han destacado su potencial en el procesamiento de biopolímeros (Naibaho et al., 2025).

La importante presencia de AX aumenta el valor funcional del BSG, por lo que puede considerarse una excelente opción para la obtención de compuestos de alto valor añadido (Rojas-Lema et al., 2024), los cuales pueden emplearse en procesos de producción química, cosmética, farmacológica y alimentaria para promover el cambio hacia una economía circular que beneficie a la industria cervecera (Belardi et al., 2025).

2.2. Arabinoxilanos

Los arabinoxilanos (AX) son polisacáridos no amiláceos presentes en una amplia variedad de fuentes vegetales, especialmente en cereales como trigo, centeno, cebada, avena, arroz y maíz (Rojas-Lema et al., 2024). Constituyen el componente principal de la hemicelulosa y representan entre un 6.4 y 17.8 % de la composición de BSG (Naibaho et al., 2025).

La estructura química de los AX consiste principalmente en dos pentosas: la xilosa y la arabinosa. Están formados por una cadena principal compuesta por unidades repetidas de β -D-xilopiranosas unidas mediante enlaces glicosídicos β -(1 $\rightarrow$ 4). A esta cadena se unen residuos de α -L-arabinofuranosilo en las posiciones O-3 y/o O-2 de la xilosa, mediante enlaces α -(1 $\rightarrow$ 3) y/o α -(1 $\rightarrow$ 2), respectivamente (Belardi et al., 2025).

Además de las unidades de arabinosa, los AX también pueden incorporar ácidos fenólicos en su estructura, como el ácido *p*-cumárico y ácido ferúlico (Figura 1). Estos ácidos suelen estar unidos mediante enlaces éster en la posición O-5 de los residuos de α -L-arabinofuranosa (Figura 2) (Cervantes-Ramírez et al., 2022).

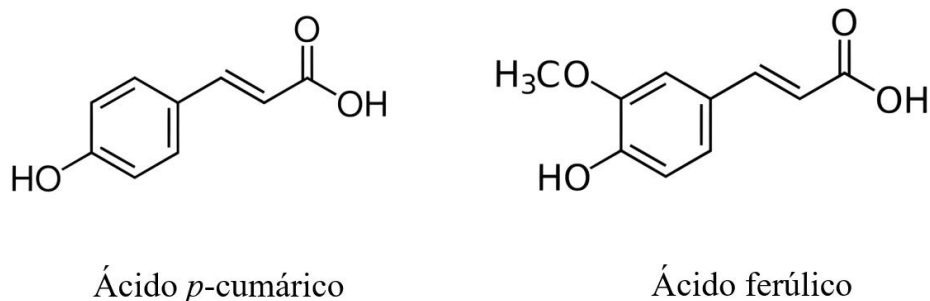


Figura 1. Estructura química de los principales ácidos fenólicos que se esterifican a los arabinoxilanos.

Las características estructurales de los arabinoxilanos, como el peso molecular, el grado de ramificación, la proporción y el tipo de monosacáridos, así como el contenido de ácidos fenólicos, influyen de manera significativa en su actividad biológica (Feng et al., 2025). Entre sus propiedades bioactivas destacan los efectos antidiabéticos, antioxidantes, anticancerígenos y prebióticos (Rojas-Lema et al., 2024).

En particular, su capacidad antioxidante está estrechamente relacionada con el contenido de compuestos fenólicos, que modulan las interacciones del AX con radicales libres y especies oxidativas (Boukid, 2024). Los AX altamente ramificados presentan mayor resistencia a la fermentación y a la degradación, debido a una mayor área superficial en comparación con los de baja ramificación (Feng et al., 2025).

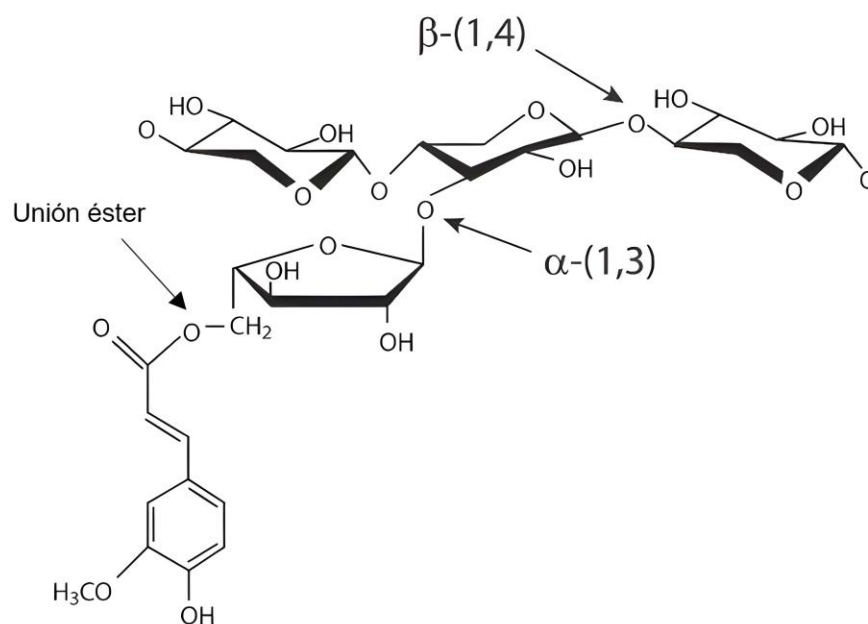


Figura 2. Estructura química de los arabinoxilanos ferulados.

Los AX también pueden modificar la composición de la microbiota intestinal y mejorar la absorción de minerales. Además, se ha reportado que contribuyen a la resistencia frente a patógenos intestinales. La mayoría de sus beneficios para la salud se atribuyen a la presencia de compuestos fenólicos en su estructura (Bangar et al., 2025). En general, las características moleculares de los AX varían según su fuente, lo que determina sus propiedades funcionales (Lagüéns Pérez, 2018).

Según su solubilidad en agua, estos polisacáridos se pueden clasificar en solubles (WE-AX) e insolubles (WU-AX), cuyo grado de extractabilidad varía según su localización dentro del grano (Michiels et al., 2024). Los WE-AX se encuentran débilmente unidos a la superficie de la pared celular y son extraíbles a temperatura ambiente. En cambio, los WU-AX están

enlazados mediante puentes de hidrógeno y enlaces covalentes a componentes de la matriz celular, como proteínas y lignina, por lo que requieren tratamientos más agresivos (como el uso de soluciones alcalinas) para su recuperación. Además, presentan un peso molecular más elevado y una mayor diversidad en las cadenas laterales (Rodríguez-Viveros et al., 2023; Boukid, 2024).

Hasta el momento, se han desarrollado diversos métodos para la extracción y purificación de AX: extracción alcalina y ácida, hidrólisis enzimática, extracción asistida por microondas o por ultrasonido, así como métodos de purificación mediante precipitación con etanol o con sulfato de amonio (Feng et al., 2025).

Los AX presentan una importante capacidad como ingrediente en una amplia variedad de productos alimenticios. En el sector del pan, por ejemplo, pueden actuar como reguladores de la viscosidad, lo que mejora la capacidad de retención de agua (Boukid, 2024). Asimismo, gracias a su estructura polimérica, su elevada masa molecular, la presencia de grupos hidroxilo y la feruloilación, los AX derivados de cereales constituyen una matriz favorable para el desarrollo de biopolímeros. En particular, su masa molecular relativamente alta es clave para la obtención de películas con buenas propiedades mecánicas (Bangar et al., 2025).

Diversos estudios han reportado que los AX extraídos de cebada pueden aplicarse en la elaboración de películas o recubrimientos con propiedades de barrera al oxígeno y, al combinarse con otros compuestos, pueden obtenerse películas con propiedades mecánicas mejoradas y características funcionales adicionales (Rojas-Lema et al., 2024).

2.3. Películas y recubrimientos biodegradables

2.3.1. Definición y principales características

Las películas biodegradables han cobrado gran importancia al utilizarse como una alternativa al uso de polímeros petroquímicos presentes en los envases plásticos actuales, lo que permite garantizar la sostenibilidad del ecosistema (Almeida et al., 2022; Goyal et al., 2015). Además, las sustancias químicas tóxicas que se utilizan en la fabricación de plástico pueden migrar y contaminar los alimentos, ocasionando efectos adversos para la salud humana (Sun et al., 2022).

Como resultado, se han desarrollado diversas películas que pueden ser degradadas por microorganismos, al mismo tiempo que permiten incorporar ingredientes funcionales, lo que resulta en una mayor vida útil, seguridad y calidad (Adbullah et al., 2022).

Las películas y los recubrimientos se definen como una capa externa continua y delgada (entre 0.025 y 0.050 mm) que cubre la superficie del producto alimenticio y actúa como barrera contra el intercambio de humedad o gases. Las películas se utilizan principalmente para envolver alimentos, mientras que los recubrimientos pueden aplicarse directamente sobre ellos, con el fin de preservar su calidad y además servir de empaque (Gupta et al., 2022).

Las películas pueden obtenerse utilizando métodos secos, como la extrusión, o métodos húmedos, como el colado. No obstante, para aplicar recubrimientos directamente sobre productos alimenticios, se emplean técnicas distintas que incluyen la pulverización, inmersión, lecho fluidizado y recubrimiento de bandeja. La elección del método a utilizar dependerá de las propiedades físicas del alimento, tales como el tamaño, la forma y los patrones de maduración del mismo (Caleb & Belay, 2023; Leya et al., 2024).

Los materiales utilizados para la producción de películas provienen principalmente de fuentes biológicas compuestas por almidón, celulosa, hemicelulosa, proteínas, fibra, etc., gracias a sus propiedades gelificantes y capacidades fisicoquímicas (Leya et al., 2024).

En este sentido, las películas biodegradables pueden descomponerse en el suelo después de su uso previsto (Adbullah et al., 2022; Figura 3), donde ocurre el deterioro de sus propiedades físicas y químicas, con la formación de dióxido de carbono, agua, metano y otros productos de bajo peso molecular a partir de microorganismos naturales como bacterias, hongos y algas (Upadhyaya et al., 2022). Este tipo de películas sirve como sustituto eficiente de los materiales sintéticos, ya que reducen eficazmente la respiración y la pérdida de humedad en los productos alimenticios (Leya et al., 2024), además de exhibir características deseables como la flexibilidad, transparencia y resistencia mecánica (Dhalsamant et al., 2025).

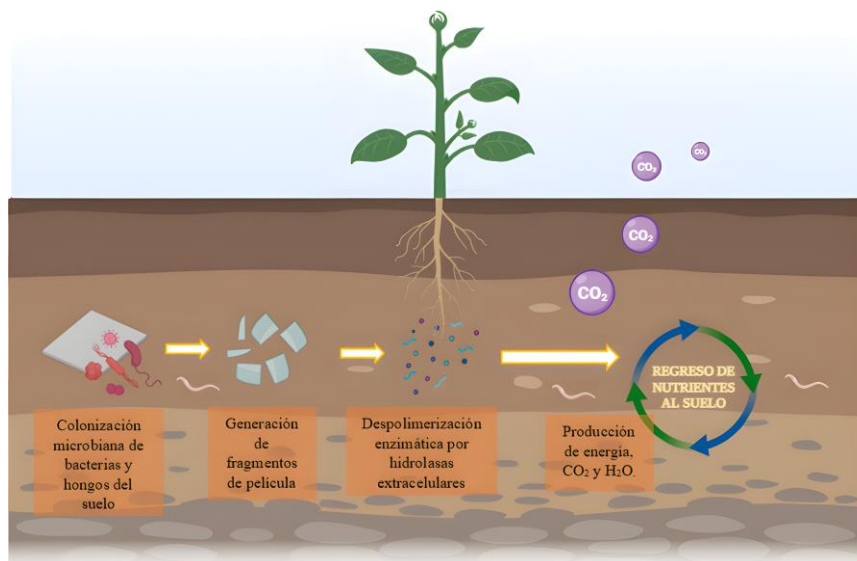


Figura 3. Representación gráfica del proceso de degradación de películas biodegradables en condiciones de suelo.

La resistencia a la tracción, la elongación a la rotura, el módulo de elasticidad, la permeabilidad y la solubilidad son propiedades a través de las cuales se evalúa la eficacia de la película para ser utilizadas en el envasado de alimentos (Evyan et al., 2022), misma que también está determinada por el proceso y los biomateriales utilizados para su preparación (Sun et al., 2022).

Los recubrimientos y películas biodegradables están compuestos principalmente de carbohidratos (azúcares y polisacáridos), proteínas y lípidos. La presencia de polisacáridos y proteínas en su composición, les confiere buenas propiedades mecánicas y de barrera al oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, debido a la elevada interacción entre sus moléculas para formar redes moleculares cohesionadas, lo que al mismo tiempo aporta dureza, nitidez y adhesividad a las películas (Mederos-Torres et al., 2020).

Estas películas son ampliamente utilizadas en diversas industrias como la alimentaria, farmacéutica y agroquímica, en cápsulas, bolsas flexibles y recubrimientos (Leya et al., 2024). Además, la incorporación de aditivos funcionales proporciona protección a los alimentos contra riesgos físicos, químicos y biológicos, lo que también puede ofrecer

actividades antimicrobianas y antioxidantes con efectos positivos en la salud del consumidor (Singh et al., 2025).

2.3.2. Clasificación según el tipo de polímero utilizado

En general, los plásticos tradicionales se fabrican utilizando combustibles fósiles, mientras que las películas biodegradables son producidas a partir de materiales que se descomponen mediante procesos biológicos, por lo que se pueden clasificar según el tipo de polímero utilizado para su preparación: naturales, sintéticos y semisintéticos (Dirpan et al., 2023).

2.3.2.1. Naturales

Este tipo de películas incluyen aquellas elaboradas a partir de polímeros extraídos directamente de la biomasa y que no han sido modificados químicamente, como polisacáridos y proteínas (Dirpan et al., 2023).

Los polisacáridos, un tipo de carbohidrato complejo, constituyen la base estructural principal de los exoesqueletos de animales y materia vegetal (Upadhyaya et al., 2022). Algunos ejemplos como la celulosa, alginato, almidón, pectina, quitosano, pululano o derivados de estas sustancias, son utilizados para la formación de biopelículas (Adbullah et al., 2022).

Las películas a base de polisacáridos se caracterizan por ser insípidas, incoloras, no tóxicas y por tener una permeabilidad selectiva a los gases. Estos materiales muestran buenas propiedades mecánicas, incluyendo la resistencia a la tracción y elongación a la rotura, características que los convierten en una opción ideal para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles (Leya et al., 2024).

Dadas sus excelentes propiedades de barrera a los gases y su alta resistencia mecánica, las proteínas se consideran altamente eficaces para la producción de películas (Dhalsamant et al., 2025). Las proteínas están compuestas de aminoácidos y suelen presentarse como fibrosas y globulares. El colágeno y algunas proteínas globulares como el gluten de trigo, la soya, la zeína de maíz y la proteína de suero de leche, han demostrado tener buenas propiedades formadoras de películas y recubrimientos (Gupta et al., 2022). La caseína, por su parte,

destaca por ser un excelente emulsionante, además de su capacidad para formar películas transparentes y resistentes al calor (Mederos-Torres et al., 2020).

En combinación con polisacáridos y proteínas, los lípidos pueden utilizarse en la formación de películas y recubrimientos para mejorar las propiedades de barrera, flexibilidad, cohesión e hidrofobicidad (Leya et al., 2024), lo que al mismo tiempo mejora el aroma, la frescura y la estabilidad microbiológica de los alimentos (Gupta et al., 2022). Los compuestos a base de lípidos incluyen ceras naturales, aceites, ácidos grasos y resinas, a los cuales se les puede incorporar sustancias activas que confieren propiedades antioxidantes o antimicrobianas a las películas (Singh et al., 2025).

2.3.2.2. Sintéticos

Las películas de este tipo se fabrican con polímeros sintéticos, los cuales se obtienen mediante procesos químicos derivados del petróleo (Dirpan et al., 2023).

La policaprolactona (PCL) es un poliéster que se degrada en entornos bioactivos, por lo que es considerada biodegradable. Se sintetiza a partir del petróleo crudo mediante la polimerización por apertura de anillo de la ϵ -caprolactona (Perera et al., 2023). Su producción es escalable y se pueden obtener películas de PCL resistentes al agua gracias a su naturaleza hidrófoba; sin embargo, tiene una tasa de degradación lenta. La adición de compuestos fenólicos a su matriz permite obtener películas capaces de lograr una buena inhibición bacteriana (Westlake et al., 2023).

El tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT) es otro polímero utilizado en este tipo de películas, elaborado a partir de la policondensación de tres componentes principales: ácido adípico, ácido tereftálico y 1,4-butanodiol. El PBAT es considerado biodegradable y, debido a su alta tenacidad y flexibilidad, es adecuado para la formación de bolsas y embalajes, ofreciendo propiedades similares a las del polietileno de baja densidad (LDPE) convencional (Westlake et al., 2023).

2.3.2.3. Semisintéticos

Los polímeros semisintéticos se fabrican con monómeros de origen biológico. Los poliésteres alifáticos, como el ácido poliláctico (PLA), son biopolímeros compuestos por estructuras repetitivas que son fácilmente biodegradables gracias a la presencia de enlaces éster en sus cadenas blandas (Figura 4), susceptibles de romperse por hidrólisis (Perera et al., 2023).

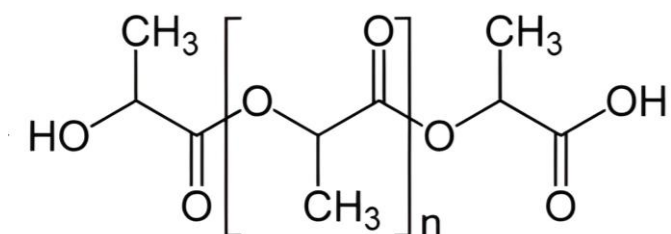


Figura 4. Estructura química del ácido poliláctico (PLA).

El PLA se ha convertido en un producto básico destacado en el campo de los poliésteres. Después de su enfriamiento, es un termoplástico transparente e incoloro, con propiedades similares a las del poliestireno en varios aspectos (Upadhyaya et al., 2022). Su producción puede lograrse mediante la condensación del ácido láctico o la polimerización por apertura de anillo de las lactidas. El monómero del PLA suele obtenerse mediante la fermentación de materias primas renovables como la tapioca, el almidón de maíz o la caña de azúcar (Westlake et al., 2023).

El ácido poliláctico presenta propiedades increíbles para el desarrollo de películas y recubrimientos, como resistencia mecánica, rigidez, transparencia, biodegradabilidad y excelentes propiedades de barrera. Además, el PLA se ha utilizado ampliamente como material de encapsulación para diversos agentes activos. Esta versatilidad se debe a sus propiedades biodegradables y biocompatibles, así como a su facilidad de procesamiento, lo que lo convierte en un polímero de elección (Westlake et al., 2023; Perera et al., 2023).

2.3.3. Aditivos utilizados para mejorar su funcionalidad

La composición de las películas y recubrimientos comestibles es crucial para definir sus propiedades estructurales, mecánicas y de barrera, lo que influye directamente en su capacidad para proteger los alimentos (Feng et al., 2025; Alahmed & Simsek, 2024). Diversos estudios indican que las formulaciones de recubrimientos de biopolímeros, al combinarse con aditivos, generan beneficios adicionales. Esta mezcla no solo mejora sus propiedades, sino que también enriquece sus características nutricionales (Perera et al., 2023).

Para obtener estructuras protectoras eficaces y funcionales, las películas y los recubrimientos requieren múltiples procesos físicos y químicos. Durante la formulación de la película, es posible incorporar una variedad de agentes activos que se liberan gradualmente en los alimentos para mejorar sus propiedades físicas y químicas, como antioxidantes, antimicrobianos, colorantes, aromas y/o plastificantes (Kola & Carvalho, 2023).

Un aditivo se define como cualquier compuesto que se añade intencionalmente a un producto durante su preparación, procesamiento, envasado o transporte. Su propósito es desempeñar una función tecnológica específica para mejorar las propiedades o características del producto final (Singh et al., 2022).

Los aditivos alimentarios pueden clasificarse, según su origen, en naturales, que comprenden extractos vegetales y aceites esenciales, y en sintéticos, que se refieren a compuestos creados mediante procesos químicos, tales como plastificantes, agentes reticulantes y nanomateriales (Singh et al., 2025). Mediante el uso de estos aditivos, las películas biodegradables pueden igualar las propiedades de los plásticos tradicionales en cuanto a la protección de los alimentos (Sun et al., 2022).

2.3.3.1. Aceites esenciales

Los aceites esenciales son el resultado del metabolismo secundario de las plantas y pueden extraerse de diferentes partes, como raíces, tallos, hojas y flores (Almeida et al., 2022). Su composición básica incluye éteres, fenoles, terpenos, cetonas, aldehídos, carbohidratos y alcoholes, los cuales determinan sus propiedades biológicas (Singh et al., 2025).

En la formulación de películas, los aceites esenciales se incorporan mediante encapsulación dentro de la matriz polimérica; esto disminuye su volatilidad e incrementa su eficiencia. Gracias a su naturaleza lipofílica, su uso en películas y recubrimientos comestibles mejora las propiedades de barrera, así como su resistencia a la tracción y su elasticidad (Gupta et al., 2022).

2.3.3.2. Plastificantes

Los plastificantes son sustancias orgánicas no volátiles y de alto punto de ebullición, cuya función es modificar las propiedades físicas o mecánicas de un material al combinarse con él (Mederos-Torres et al., 2020). El uso de plastificantes en películas biodegradables tiene como objetivo incrementar su flexibilidad y prevenir que se vuelvan quebradizas (Singh et al., 2025).

Los más utilizados son los polioles, entre los que destacan el glicerol, el sorbitol y el polietilenglicol. Estos compuestos actúan reduciendo la fuerza del puente de hidrógeno intermolecular e incrementando el espaciado intermolecular, lo que se traduce en películas menos frágiles (Almeida et al., 2022).

La eficacia de los plastificantes en los recubrimientos depende de su compatibilidad con la matriz polimérica, un factor determinado por el peso molecular, la polaridad, la estructura química y la proporción de los componentes presentes (Mederos-Torres et al., 2020), ya que el rendimiento de las películas y recubrimientos mejora cuando se utilizan plastificantes con propiedades químicas afines a las del polímero base (Caleb & Belay, 2023).

2.3.3.3. Agentes activos

La incorporación de compuestos bioactivos como antioxidantes o antimicrobianos mejora las propiedades mecánicas y de barrera de las películas, al mismo tiempo que les otorga la capacidad de interactuar directamente con el producto alimenticio mediante la liberación de sustancias beneficiosas y el secuestro de gases que favorecen la degradación, como el oxígeno y el etileno (Kola & Carvalho, 2023; Westlake et al., 2023).

Los aditivos antimicrobianos, como los extractos de plantas y los aceites esenciales, optimizan las propiedades de las películas al inhibir el crecimiento microbiano, lo que, a su

vez, previene el deterioro y extiende la vida útil de los productos alimenticios. Por su parte, los antioxidantes contribuyen a este proceso al evitar la formación de productos encapsulados y minimizar la degradación oxidativa del material de la película, algunos ejemplos son los polifenoles del té verde y el extracto de semilla de uva (Singh et al., 2025).

Los pigmentos naturales suelen ser antioxidantes y potencian la actividad antimicrobiana frente a bacterias mesófilas aerobias, coliformes y hongos. Otro ejemplo importante son los prebióticos, los cuales actúan como aditivos que optimizan las propiedades nutricionales, elevan la capacidad antioxidante y dificultan la absorción de agua (Singh et al., 2022).

2.3.3.4. Nanomateriales

Los nanomateriales se definen como sustancias con tamaños de partícula entre 1 y 100 nm. Aquellos derivados de fuentes vegetales, como la nanocelulosa, la quitina y el almidón, se utilizan comúnmente en el desarrollo de recubrimientos comestibles gracias a sus propiedades mecánicas superiores y su naturaleza sostenible (Pillai et al., 2024).

Gracias a su actividad antimicrobiana, la incorporación de nanopartículas inorgánicas confiere una función protectora. Este efecto se ve potenciado por su elevada área superficial, misma que también contribuye a un mejor refuerzo estructural de la matriz polimérica (Perez-Vazquez et al., 2023).

El objetivo de adicionar nanopartículas a la composición de películas es lograr una distribución homogénea para mejorar la resistencia mecánica, la solidez y la resistencia al desgaste, además de potenciar su eficacia como barrera protectora contra la humedad, la luz y los gases ambientales (Gupta et al., 2022).

2.4. Uso de películas biodegradables en la conservación de frutos

Debido a su valor nutricional, los frutos y las verduras son fundamentales para la dieta humana. Estos productos, que aportan una gran cantidad de vitaminas, minerales esenciales, antioxidantes y fibra dietética, son altamente perecederos debido a su elevado contenido de agua (Miteluţ et al., 2021). Su gestión en la cadena de suministro es compleja, ya que, al tratarse de tejidos vivos, mantienen su actividad metabólica después de ser cosechados, lo

que involucra consumo de O₂ y producción de CO₂ durante la respiración (Perez-Vazquez et al., 2023).

Los frutos y las verduras cuentan con una capa natural de cera que les confiere propiedades impermeables. Esta capa está compuesta por hidrocarburos, ésteres, alcoholes libres, ácidos grasos, aldehídos y cetonas. La función principal de estas ceras naturales es retrasar los procesos vitales de los vegetales luego de su recolección. Sin embargo, cuando estas ceras se eliminan por completo, durante el lavado, pelado o corte, los frutos y las verduras pierden durabilidad, se vuelven susceptibles a cambios de color y sabor, pierden su brillo o se oxidan (Kocira et al., 2021). La vida útil de estos alimentos perecederos se acorta aún más por factores como golpes, condiciones ambientales adversas y la descomposición causada por patógenos (Perez-Vazquez et al., 2023).

La fase de postcosecha y almacenamiento de frutos es fundamental para su distribución y viabilidad comercial. Las pérdidas en esta etapa, que varían del 5 al 25 % en países desarrollados y del 20 al 50 % en países en desarrollo, son considerables. Estas pérdidas se atribuyen a una combinación de factores, entre ellos el deterioro natural (fisiológico y microbiológico), prácticas de recolección deficientes, empaques inadecuados e infraestructura de transporte insuficiente (Mederos-Torres et al., 2020).

Actualmente, los métodos habituales para la conservación de frutos postcosecha abarcan el control de la temperatura, la humedad, el uso de atmósferas controladas y el tratamiento con radiación (Meng et al., 2024). Si bien, el almacenamiento a baja temperatura es el método físico más común, cabe destacar que algunos frutos tropicales pueden sufrir alteraciones fisiológicas si se exponen a temperaturas demasiado bajas, lo que provoca pérdida de textura, sabor y color (Pillai et al., 2024).

La creciente demanda de productos frescos ha impulsado a la industria a innovar en métodos más eficaces para preservar la calidad y prolongar su conservación. Esta prolongación de la vida útil no solo optimiza la calidad, el sabor y la textura de los frutos, sino que también contribuye significativamente a minimizar el desperdicio de los mismos y los gastos operativos relacionados (Kocira et al., 2021).

El uso de películas o recubrimientos comestibles se perfila como una alternativa prometedora al ofrecer una barrera protectora adicional para los alimentos frescos, lo que prolonga su vida

útil al ralentizar la degradación microbiana y al actuar como barrera eficaz frente a la humedad y los gases (Miteluț et al., 2021). El recubrimiento aplicado a la superficie del fruto limita la transferencia de gases y evita la formación de olores desagradables, por lo que presenta una alta integridad estructural y garantiza la frescura y la calidad a lo largo del tiempo (Pillai et al., 2024).

3. Objetivos

3.1. General

Formular biopelículas compuestas a partir de la extracción de una fracción rica en arabinoxilanos de bagazo de cebada para evaluar su eficacia como recubrimientos protectores de frutos de zarzamora.

3.2. Específicos

- Extraer y purificar una fracción rica en arabinoxilanos del bagazo de cebada mediante un tratamiento alcalino para maximizar el rendimiento y la pureza del polisacárido.
- Formular películas compuestas a partir de la fracción de arabinoxilanos con ácido poliláctico, incorporando plastificantes y agentes emulsionantes en su composición.
- Analizar la capacidad hidrofóbica de las películas obtenidas empleando pruebas específicas de contacto superficial con agua.
- Determinar la funcionalidad de las películas elaboradas mediante la evaluación integral de sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de barrera.
- Aplicar las películas como recubrimiento sobre zarzamora para evaluar su efectividad sobre la cinética de maduración y parámetros de vida útil.

4. Metodología

4.1. Preparación de la muestra de bagazo de cebada

El BSG húmedo se recolectó de la “Cervecería Hacienda” ubicada en Zempoala, Hidalgo. El material se sometió a una congelación previa a -35 °C seguida de un proceso de liofilización. Una vez seco, se pulverizó y se colocó en un recipiente con sello hermético.

Antes de su uso, el BSG se sometió a un proceso de esterilización a 121 °C durante 10 min utilizando un autoclave marca Lab-Med© modelo 25 × 45 cm, con el fin de eliminar cualquier carga bacteriana o fúngica y asegurar que el extracto de AX fuera apto para su uso como recubrimiento.

4.2. Extracción de arabinosilanos a partir de bagazo de cebada

La extracción de una fracción rica de AX de bagazo de cebada (BSG-AX) se llevó a cabo conforme al procedimiento metodológico establecido por Jaguey-Hernández et al., (2022) y se representa en la Figura 5. Inicialmente, se mezclaron 50 g de BSG con 250 mL de agua destilada y se sometió a tratamiento térmico a 100°C durante 30 min con agitación constante. La mezcla resultante se centrifugó durante 10 min para separar el líquido del sólido.

El líquido se descartó, y al residuo sólido se le adicionaron 250 mL de una solución de NaOH 0.5 M. Esta nueva mezcla se incubó en un incu-shaker mini Benckmark Scientific a 60°C y 100 rpm durante 5 h. Posteriormente, la mezcla se centrifugó nuevamente y el sobrenadante se ajustó a pH 4.0 con HCl 3 M.

Una tercera centrifugación de 10 min a 6000 rpm permitió obtener el sobrenadante empleado para la precipitación de la BSG-AX. Esta precipitación se logró mediante la adición de etanol absoluto en una proporción 1:2 (v/v) y refrigeración a 4°C durante 12 h. El precipitado se recuperó mediante una centrifugación final, se lavó con agua destilada y se homogeneizó. A continuación, el material se ultracongeló y se liofilizó durante 72 h.

Una vez seco, el material se trituroó en un mortero de ágata y se molió para reducir el tamaño de partícula antes de almacenarlo en recipientes adecuados para su uso posterior.



Figura 5. Metodología empleada para la extracción alcalina de arabinosilanos a partir de bagazo de cebada y su purificación.

4.3. Preparación de las películas hidrófobas a base de BSG-AX

El proceso de obtención de las películas se basó en una formulación específica 60:40 (p/p) de BSG-AX y PLA (Figura 6). El procedimiento inició mezclando 100 mg de Tween 80 con 10 mL de NaOH 0.5 M que se sometieron a agitación por 10 min. Posteriormente, se incorporaron 500 mg de BSG-AX y la combinación obtenida se mantuvo en calentamiento a 25°C por 10 min y agitación a 870 rpm.

Paralelamente, se preparó una solución de PLA disolviendo 333.3 mg del polímero en 10 mL de acetona caliente (50°C) bajo agitación constante hasta homogeneizar. Esta solución se adicionó gota a gota a la mezcla de BSG-AX y la combinación resultante se sometió a calentamiento (90°C) y agitación (870 rpm) durante 20 min.

La mezcla obtenida se transfirió a 100 mg de glicerol, manteniendo las condiciones de agitación y calentamiento durante otros 20 min. Finalmente, 500 µL de esta mezcla se vertieron en 12 pocillos de una placa de poliestireno, y el secado se realizó a temperatura ambiente hasta la formación de la película.

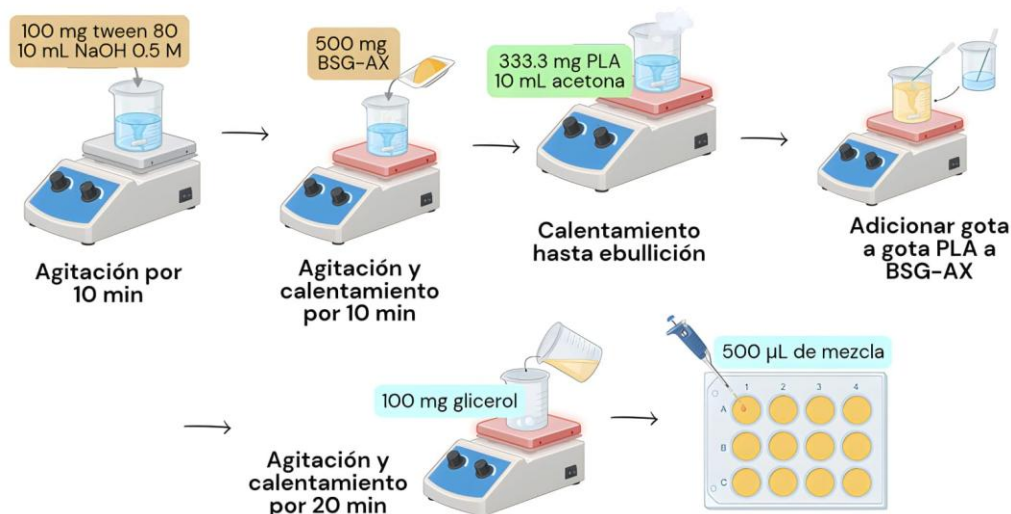


Figura 6. Metodología experimental para la obtención de películas compuestas a base de arabinosilanos (BSG-AX) y ácido poliláctico (PLA).

4.4. Caracterización del BSG-AX y de las películas compuestas

4.4.1. Análisis proximal

La composición nutricional del extracto se determinó según los métodos oficiales de la AOAC (2005), mediante el análisis de humedad, grasa cruda, ceniza y proteína cruda. La fibra dietética se obtuvo mediante el método enzimático-gravimétrico (AOAC 985.29). Cada medición se realizó por triplicado.

4.4.2. Color

La determinación de color se realizó con un colorímetro portátil (marca FRU®, modelo WR-10QC) que emplea el sistema CIE-L*a*b*. Antes de la medición, se verificó la estabilidad de los datos mediante una calibración de blanco manual. El color del extracto (BSG-AX) se evaluó por triplicado, mientras que para las películas se realizaron cinco mediciones aleatorias en distintas zonas de la muestra. En ambos casos, las mediciones se efectuaron sobre fondo blanco para evitar interferencias.

4.4.3. Análisis estructural

Los grupos funcionales y las interacciones estructurales tanto de la BSG-AX como de la película se determinaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). Los análisis se realizaron en un espectrómetro PerkinElmer Spectrum Two, equipado con un accesorio de Reflectancia Total Atenuada (ATR) de diamante, abarcando un intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} .

4.4.4. Morfología superficial

El análisis morfológico de la BSG-AX y de las películas compuestas se realizó mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) utilizando un microscopio JEOL JSM-IT700HR. Con el fin de comparar morfologías, también se analizó una película sin PLA en su formulación y una película modificada que incluía BSG-AX secada en spray drying. Todas las muestras fueron montadas en portaobjetos de aluminio con cinta de carbono doble cara y se observaron en condiciones de alto vacío a diferentes voltajes de aceleración.

4.4.5. Análisis térmico

El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó en un equipo METTLER TOLEDO modelo TGA/SDTA 851e, para lo cual se colocaron cerca de 7 mg en el caso de BSG-AX y 10 mg de película en crisoles de alúmina. Las muestras se calentaron a una velocidad de 10°C/min, en un rango de 25 a 700°C y bajo atmósfera inerte de nitrógeno.

4.4.6. Propiedades funcionales de las películas

4.4.6.1. Rugosidad

Los parámetros de rugosidad se obtuvieron mediante perfilometría de aguja con un perfilador de aguja Alpha Step D-100 de KLA-Tencor. El valor de R_a representa la media aritmética de las desviaciones absolutas, mientras que R_q se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones. Por su parte, R_t indica la diferencia máxima entre el pico más alto y el valle más bajo.

4.4.6.2. Propiedades físicas

Espesor

El espesor de la película se determinó mediante un micrómetro digital (Traceable®) en 5 puntos aleatorios de la película. El valor correspondiente se expresó como el promedio de estas mediciones.

Contenido de humedad

El contenido de humedad de las películas se analizó según la metodología propuesta por Asghar et al., (2025). Las muestras de película de 2.5 cm de diámetro se secaron en estufa a 105°C durante 24 h, posteriormente se enfriaron en desecador durante 1 h y se pesaron nuevamente. El análisis se realizó por triplicado y el porcentaje de humedad se determinó por diferencia de masa.

4.4.6.3. Propiedades mecánicas

Para determinar la resistencia a la tracción, la elongación a la rotura y el módulo de Young, se utilizó un analizador de textura (TA.XT_ plus, Stable Micro Systems®). Las muestras, previamente acondicionadas durante 5 días en desecador con sílice, se cortaron en rectángulos de 30 x 70 mm y se fijaron en las pinzas de tracción (A/TG). Las pruebas se realizaron a una velocidad constante de 2 mm/s y una separación inicial de agarre de 40 mm hasta la rotura.

La resistencia a la tracción (σ , MPa) se calculó dividiendo la fuerza máxima (F, N) por el área de la sección transversal inicial de la muestra (S, m²), misma que se calculó en base al espesor previamente determinado (Ecuación 1).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

El cálculo de la elongación a la rotura se realizó mediante la Ecuación 2.

$$\varepsilon = \left(\frac{l_f - l_i}{l_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde l_f (mm) es la longitud final de la película justo antes de su punto de desgarro y l_i (mm) es la longitud inicial de la película. El resultado final se reportó como porcentaje (%). El módulo de Young (E, MPa) se obtuvo a partir de la pendiente con la mayor correlación lineal en el gráfico esfuerzo vs deformación.

4.4.6.4. Propiedades de barrera

Permeabilidad al vapor de agua (WVP)

La permeabilidad de las películas se determinó mediante el método ASTM E96 de acuerdo con lo reportado por Zhou et al., (2021) con algunas modificaciones. Las muestras de película se fijaron a la boca abierta (1.3 cm de diámetro) de un vial lleno con 4 mL de agua destilada (100 % HR) y se pesaron junto con todo el contenido. Los viales se colocaron en un desecador que contenía gel de sílice (0 % HR), mismo que se mantuvo en incubación en una incu-shaker mini Benckmark Scientific a 25°C. Se registró la pérdida de peso en los viales a intervalos de tiempo fijos durante una semana.

Se obtuvo un gráfico de peso frente al tiempo y la pendiente se estimó mediante regresión lineal. La tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) se obtuvo dividiendo la pendiente de cada vial entre el área de prueba de la película (m^2). El valor de WVP se calculó utilizando la Ecuación 3.

$$WVP = \frac{WVTR \times d}{\Delta P} \quad (3)$$

Donde d es el espesor promedio de la película (m) y ΔP es la diferencia de presión parcial entre ambos lados de la película (Pa). Cabe destacar que los análisis se llevaron a cabo por triplicado.

Solubilidad al agua

La solubilidad de cada película se determinó utilizando la metodología establecida por Asghar et al., (2025) con cambios menores. Por triplicado, cada película de 2.5 cm de diámetro se secó a 105°C por dos horas y se dejó enfriar en desecador por 30 min. Previamente pesadas, las películas se sumergieron individualmente en 50 mL de agua destilada en vasos de precipitado cubiertos con Parafilm®, y se dejaron reposar durante 24

h. Transcurrido este tiempo, se retiró el agua y las porciones de película no disueltas se separaron para un segundo proceso de secado a 105°C por 24 h, seguido de un enfriamiento en desecador por 2 h. Las muestras se pesaron nuevamente y la solubilidad porcentual se calculó utilizando la Ecuación 4.

$$\% \text{Solubilidad} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde W_1 es el peso inicial de las películas secas y W_2 el peso del residuo no solubilizado.

Ángulo de contacto

Para medir el ángulo de contacto se utilizó el método de la gota sésil, depositando 5 µL de agua destilada sobre la superficie horizontal de la película. La captura de imágenes se realizó con el lente macro (5MP, $f/2.4$) de un dispositivo móvil. Para el análisis cuantitativo, se empleó el software de código abierto ImageJ, con el plugin automatizado “Contact Angle”, que permite ajustar el contorno de la gota para calcular la tangente en la línea de triple contacto, lo que lleva a obtener el valor del ángulo de contacto con alta precisión (Lamour et al., 2010). El software arrojó el ángulo de contacto en ambos lados de la gota y se promedió para obtener el ángulo representativo de cada réplica. El procedimiento se realizó por triplicado y se reportó el promedio final.

4.5. Aplicación de las películas como recubrimiento de zarzamora

4.5.1. Preparación de los grupos experimentales

Las zarzamoras se adquirieron en un mercado local de Pachuca, Hgo., y se dividieron aleatoriamente en dos grupos principales: control y recubiertas, subdivididos a su vez según su almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C), refrigeración (4 °C) y congelación (-15 °C).

Los grupos experimentales se enjuagaron con agua corriente para eliminar la suciedad superficial y, posteriormente, se colocaron en 1 L de agua con 8 gotas del desinfectante Microdyn® durante 10 min. Los frutos se dejaron escurrir y se eliminó el exceso de humedad con ayuda de toallas de papel adsorbente.

Las zarzamoras del grupo recubierto pasaron por un proceso de inmersión en la solución formadora preparada como se describe en la sección 4.4 y se dejaron secar por 2 h a temperatura ambiente. Finalmente, las muestras se almacenaron durante 14 días según los diferentes tratamientos. Los atributos de calidad de la zarzamora se evaluaron cada 24 horas en los controles y cada 48 horas en las recubiertas.

4.5.2. Evaluación de los cambios

4.5.2.1. Pérdida de peso

Se midió el peso inicial de las muestras de zarzamora de los distintos grupos experimentales y, posteriormente, se realizaron mediciones en intervalos de tiempo fijos durante los días de estudio en una balanza analítica marca Precisa, modelo ES 220A. La pérdida de peso se calculó según la Ecuación 5.

$$\text{Pérdida de peso} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde W_1 es el peso tomado en el día 0 y W_2 el peso en los diferentes días de evaluación.

4.5.2.2. Color

El cambio de coloración en la zarzamora se evaluó mediante un colorímetro portátil FRU® (WR-10QC) según el sistema CIE-L*a*b*. Luego de medir los parámetros de color iniciales, se realizaron mediciones periódicas en la zona media de tres zarzamoras por tratamiento. A partir del promedio de estos datos, se determinó el valor de ΔE tomando como referencia el color inicial del control.

4.5.2.3. Acidez titulable y pH

El método para analizar las muestras de zarzamora consistió inicialmente en su homogeneización. Se pesaron 5 g de la muestra y se diluyeron en agua destilada hasta alcanzar un volumen final de 100 mL. Se analizó el pH en una alícuota de 10 mL empleando un potenciómetro (HANNA Instruments® modelo HI3221) previamente calibrado.

La acidez titulable (AT) se cuantificó sobre la misma alícuota siguiendo la metodología de Villegas y Albarracín (2016), mediante titulación potenciométrica con una solución estandarizada de NaOH (0.1001 ± 0.0004 M) hasta alcanzar un pH de 8.2 utilizando fenolftaleína al 1% como indicador. Ambas mediciones se realizaron por triplicado en cada grupo experimental.

4.5.2.4. Determinación del orden de reacción y parámetros cinéticos

Para determinar el orden de reacción, se evaluaron modelos de orden cero y de primer orden, ajustando los datos experimentales mediante regresión lineal. El orden de reacción se seleccionó con base en el coeficiente de determinación (R^2) más cercano a 1. Una vez determinado, se calculó el valor de las constantes de velocidad (k) y el tiempo de vida media ($t_{1/2}$) de los tratamientos con y sin recubrimiento a diferentes temperaturas.

4.5.2.5. Análisis microestructural

Para evaluar el desempeño del recubrimiento sobre la maduración de la zarzamora y la proliferación de microorganismos como mohos y hongos, se empleó un microscopio digital KEYENCE VHX-7000. El análisis morfológico se realizó mediante micrografías obtenidas a diferentes aumentos (20, 200 y 500x). Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación de la superficie del fruto antes y después de desinfectar para validar la eficacia del tratamiento desinfectante.

4.5.2.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) considerando como factores el tratamiento (control y recubierta) y el tiempo de almacenamiento (0, 2, 7, 9, 11 y 14 días) para determinar la significancia de los efectos principales y la interacción entre factores (Tratamiento $\times$ tiempo). En los casos donde se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) se llevó a cabo una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95%. El procesamiento de los datos se realizó utilizando el software Minitab® v. 22.

5. Resultados y discusión

5.1. Rendimiento de la extracción

El rendimiento de extracción se determinó a partir de dos extracciones independientes, obteniéndose un valor promedio de 4.41 ± 0.04 %, calculado en función del peso seco de la muestra inicial de BSG.

Este valor de rendimiento es ligeramente superior comparado con los datos reportados por Jaguey-Hernández y colaboradores (2022), donde se emplea el mismo método de extracción con un rendimiento de 3.62 %. La discrepancia en los resultados puede atribuirse a la etapa de esterilización a la que se sometió el BSG antes de la extracción.

De acuerdo con lo reportado por Naibaho et al., (2023) el pretratamiento con autoclave mejora el rendimiento y la funcionalidad de los alabinos (AX) al alterar la estructura de la pared celular y debilitar interacciones, lo que facilita la separación de los AX de otros componentes como lignina y celulosa. Este proceso incrementa la solubilidad de la hemicelulosa y facilita el acceso a los AX, lo que permite que el tratamiento térmico y la extracción alcalina subsecuentes sean más eficientes y productivos.

5.2. Caracterización de BSG-AX

5.2.1. Análisis proximal

El análisis proximal de BSG-AX reflejó el efecto combinado del pretratamiento en autoclave y del proceso de extracción alcalina sobre la composición final del extracto. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis proximal de BSG-AX.

Componente	Contenido en BSG-AX*
Humedad	6.98 ± 0.02
Grasa cruda	1.04 ± 0.02
Proteína cruda	5.91 ± 0.11
Cenizas	5.31 ± 0.02
Fibra dietética total	82.03 ± 0.18

*Resultados expresados en % (m/m) sobre peso base seca, como media $\pm$ desviación estándar.

En general, se observó un incremento relativo en el contenido de proteínas, acompañado de una disminución de grasas y cenizas respecto al 4.90 %, 1.82 % y 6.93 % reportados previamente por Jaguey-Hernández y colaboradores (2022).

Informes indican que el tratamiento en autoclave desestructura parcialmente la matriz del BSG, lo que facilita la liberación y el acceso a las hemicelulosas (Naibaho et al., 2021). Esto provoca un aumento en la fibra dietética soluble, lo que consecuentemente genera cambios en el contenido de grasa, la liberación de minerales y disponibilidad de compuestos fenólicos (Steier et al., 2023).

Esta modificación estructural se reflejó en un 82.03 % de fibra dietética total, lo que comprueba la liberación y concentración de fibra dietética en el BSG-AX sin comprometer la integridad del polisacárido. Este resultado guarda consistencia con lo establecido por Herrera-Balandrano et al., (2025), quienes determinaron porcentajes de fibra dietética soluble superiores al 85 % en arabinoxilanos derivados de salvado de maíz nixtamalizado.

El contenido de cenizas coincide con el 5.36 % hallado por Alahmed & Simsek (2024) para arabinoxilanos extraídos de salvado de maíz seco. Asimismo, el aumento del contenido proteico (5.90 %) se atribuye a que el proceso térmico en autoclave facilita la liberación y extracción de proteínas solubles o asociadas a la matriz de BSG.

5.2.2. Color

El modelo CIE-L*a*b* cuantifica el color mediante tres ejes específicos: L* mide la luminosidad, que va del 0 (negro) al 100 (blanco); la coordenada a* define la posición entre el rojo positivo y el verde negativo; y la coordenada b* varía del amarillo (valores positivos) al azul (valores negativos) (Salvada et al., 2022).

Los parámetros de color (L*, a* y b*) obtenidos para BSG-AX (Tabla 2) indican un material con alta luminosidad, tonalidad ligeramente rojiza y marcada tendencia al color amarillo. El valor elevado de L* sugiere que el extracto presenta una apariencia clara, comparable con lo reportado para fracciones ricas en arabinoxilanos obtenidas a partir de BSG sin tratamientos de decoloración intensivos (Jaguey-Hernández et al., 2022).

Tabla 2. Parámetros de color de BSG-AX.

Parámetro	Valor
L*	81.12 ± 0.16
a*	1.51 ± 0.30
b*	18.87 ± 0.13
Color	

Todos los resultados se obtuvieron por triplicado y están reportados como media ± desviación estándar.

Los valores positivos y bajos de a* indican una contribución mínima de tonalidades rojizas, mientras que los valores positivos de b* reflejan una coloración amarilla moderada. Este comportamiento cromático ha sido atribuido por Chen et al. (2019) a la presencia residual de compuestos fenólicos, lignina y otros compuestos naturales asociados a la fracción de hemicelulosas del bagazo de cebada.

El tratamiento previo de esterilización por autoclave también pudo haber influido en los parámetros de color, ya que este tipo de procedimiento favorece la liberación de compuestos fenólicos (Naibaho et al., 2023), lo cual no solo afecta las propiedades fisicoquímicas, sino también las visuales y el color final del extracto (Lynch et al., 2016).

5.2.3. Análisis estructural

El espectro FT-IR de BSG-AX (Figura 7) presenta el perfil característico de los polisacáridos de tipo hemicelulósico, con bandas específicas que confirman la identidad y la pureza de los arabinoxilanos.

La banda ancha observada en 3306 cm⁻¹ se atribuye a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilo (-OH), característicos de los polisacáridos. En comparación con lo reportado por Jaguey-Hernández y colaboradores (2022), esta banda se presenta con una disminución de intensidad, lo cual puede relacionarse con la modificación de la estructura polimérica y con una menor cantidad de agua ligada debido al pretratamiento de esterilización en autoclave.

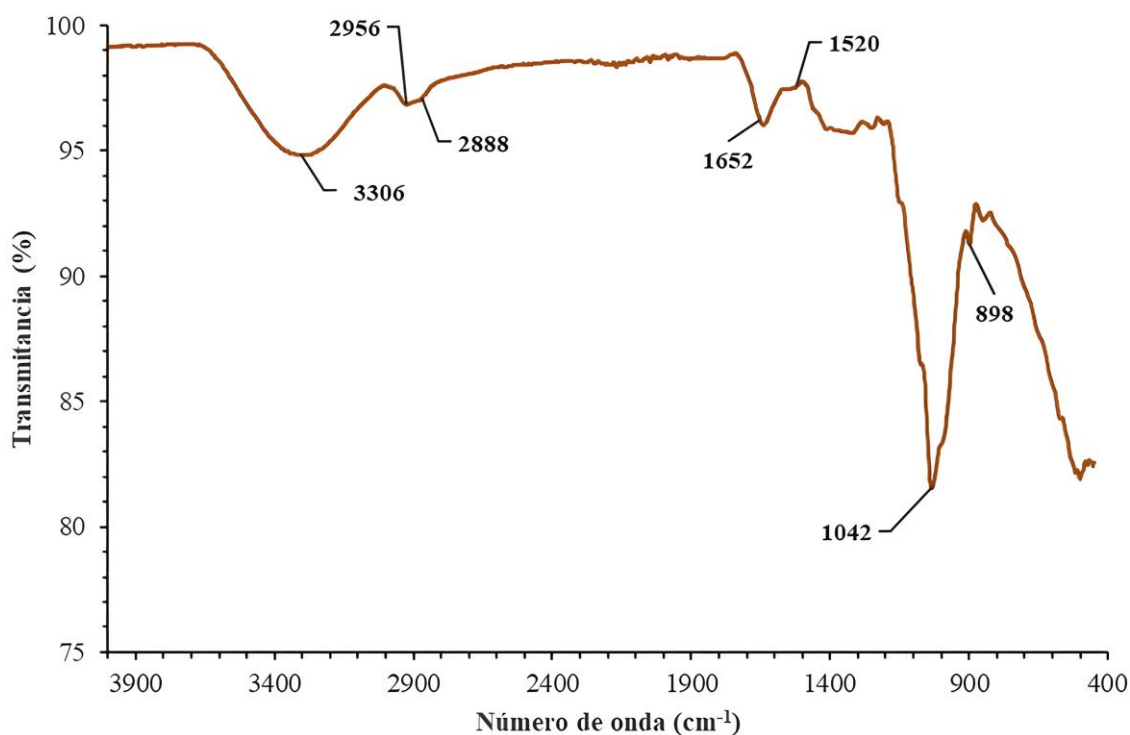


Figura 7. Espectro FT-IR de BSG-AX.

Las bandas localizadas alrededor de 2956 y 2888 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H del grupo metilo y metileno presentes en los anillos de xilosa y arabinosa (Yao et al., 2021). En la región de 1652 cm^{-1} puede observarse una banda débil que puede indicar restos de proteína (Pérez-Flores et al., 2019) o estar asociada a vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) proveniente de grupos acetilo o ésteres ferúlicos (Hussain et al., 2022).

La banda en 1520 cm^{-1} sugiere la presencia de compuestos fenólicos ligados a los AX (Pérez-Flores et al., 2019), mientras que la banda en 1042 cm^{-1} corresponde al estiramiento C-O, C-O-C característica de la xilosa. La banda en 898 cm^{-1} es típica del enlace β -glucosídico de la cadena principal, lo que es consistente con lo establecido por Raza et al., (2022).

A diferencia de los extractos de BSG no sometidos a autoclave, el espectro IR obtenido muestra una reducción en la intensidad de sus bandas, lo que indica que su estructura se ha modificado (Naibaho et al., 2021).

5.2.4. Análisis térmico

La estabilidad térmica es un parámetro crucial para determinar la velocidad de descomposición de ciertos materiales. Su evaluación se realiza mediante el análisis de la pérdida de masa en función de la temperatura o del tiempo de exposición, cuando la muestra es sometida a un programa de temperatura controlada (Bangar et al., 2025).

El comportamiento térmico del BSG-AX, analizado mediante TGA y DTG (Figura 8), es consistente con la estructura de polisacáridos ricos en hemicelulosa, con una pérdida total del 71.50 % a 700 °C.

La primera pérdida de masa se presenta en el intervalo de 35.40 a 102.20 °C, con un pico máximo de 64.97 °C, y se atribuye principalmente a la eliminación de la humedad absorbida y del agua estructural ligada a los grupos hidroxilo. Este hallazgo concuerda con lo descrito por Benedetto y colaboradores (2025), quienes indican que esta etapa representa el 10% del peso inicial del arabinoxilano. Esta etapa inicial se refleja en la curva DTG como una señal de baja intensidad, lo que confirma que se trata de un proceso físico y no de una degradación química significativa.

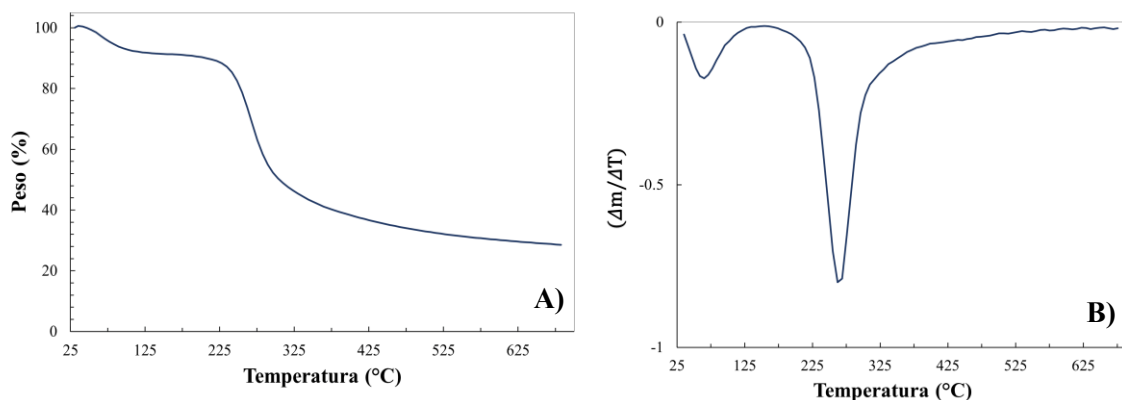


Figura 8. Análisis termogravimétrico de BSG-AX. A) Termograma; y B) Curva DTG.

La segunda y principal pérdida de masa ocurre en el rango de 220.96 a 337.18 °C, lo que corresponde a la etapa de descomposición térmica del extracto, reportada anteriormente en un intervalo de 200 a 350 °C (Benedetto et al., 2025). Esta región coincide directamente con el pico más intenso observado en la curva DTG, indicando que en este rango ocurre la máxima velocidad de pérdida de masa a una T_{max} de 261.95 °C. Esta pérdida se asocia a la

ruptura de los enlaces glucosídicos del esqueleto polisacárido y a la degradación de las cadenas laterales de los arabinoxilanos, como lo describe la literatura para la degradación térmica de hemicelulosas (Zhao et al., 2021).

Finalmente, a temperaturas mayores de 317 °C, la pendiente de la curva TGA disminuye gradualmente, lo que sugiere la formación de un residuo carbonoso más estable térmicamente (Zhao et al., 2021).

Estos resultados son comparables con lo reportado en la literatura para hemicelulosas aisladas y fracciones enriquecidas en arabinoxilanos, donde se observa que la mayor descomposición ocurre en una fase intermedia del análisis térmico, asociada a la naturaleza amorfa y parcialmente ferulada de estos polisacáridos (Raza et al., 2022).

5.2.5. Morfología superficial

Las micrografías SEM de BSG-AX se presentan en la Figura 9. Se obtuvo una morfología irregular y porosa, caracterizada por fragmentos laminares heterogéneos, con textura rugosa y apariencia de esponja. Estos hallazgos coinciden con las observaciones de Hussain et al., (2022) para AX en salvado de maíz y de Jaguey-Hernández y colaboradores (2022) en BSG. Asimismo, la ausencia de superficies lisas o estructuras cristalinas concuerda con la naturaleza amorfa de los arabinoxilanos, lo cual ha sido ampliamente documentado en imágenes SEM de polisacáridos obtenidos mediante extracción alcalina y sometidos a procesos de secado como la liofilización (Pérez-Flores et al., 2019).

De acuerdo con Raza y colaboradores (2022), la presencia de ácido ferúlico propicia la formación de una red polimérica compacta mediante procesos de esterificación con las cadenas de polisacáridos. Esta organización estructural se observa en las Figuras 9D-F, con la aparición de configuraciones en red con porosidad irregular. El uso de la autoclave favorece la reorganización de las cadenas y fortalece dichas interacciones, lo que sustenta la presencia de estas microestructuras en el extracto.

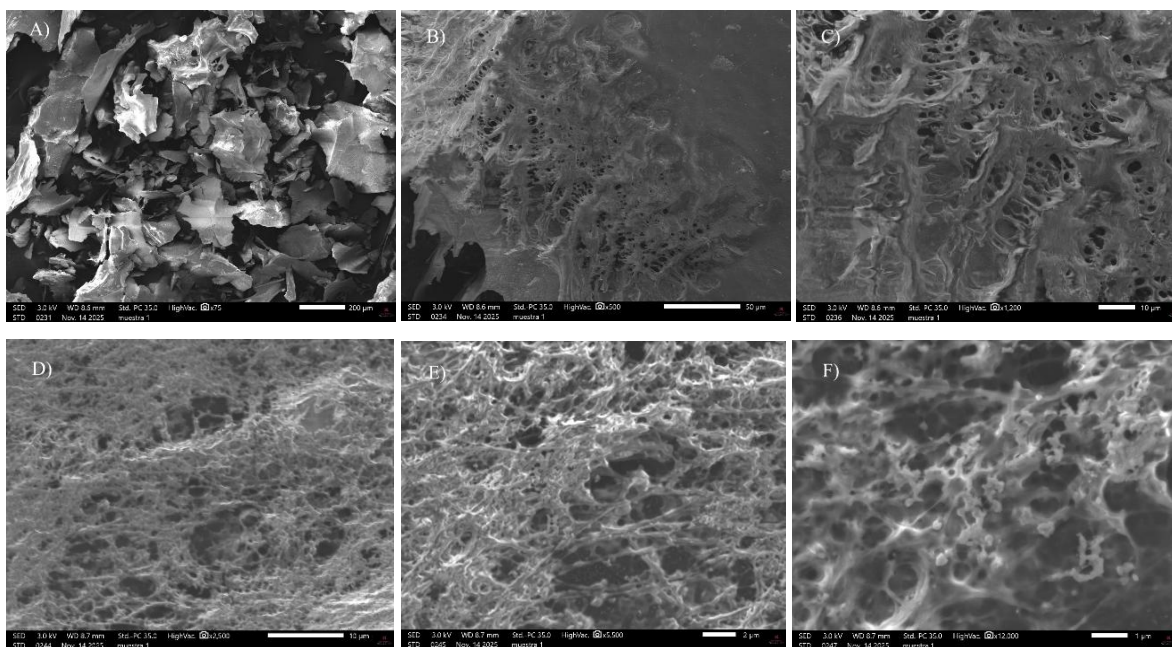


Figura 9. Micrografías de BSG-AX a diferentes aumentos. A) 75x; B) 500x; C) 1200x; D) 2500x; E) 5500x; y F) 12000x.

5.3. Caracterización de películas hidrófobas de BSG-AX

5.3.1. Análisis estructural

Se realizó un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) mediante ATR (Figura 10) con el fin de caracterizar los grupos funcionales de las películas y verificar que son aptas para uso alimentario.

La banda ancha observada cerca de 3312 cm^{-1} se asocia al estiramiento O-H, indicativo de grupos hidroxilo presentes en los arabinosilanos, así como al glicerol y Tween 80. Esta banda es consistente con lo reportado para películas de AX mezcladas con plastificantes (Alahmed & Simsek, 2024).

Las bandas localizadas entre 2926 y 2872 cm^{-1} corresponden a las tensiones simétricas y asimétricas de los enlaces C-H (CH_2 y CH_3), característicos tanto de la estructura del PLA como de las cadenas del agente tensioactivo Tween 80 (Choksi & Desai, 2017; Zhao et al., 2021).

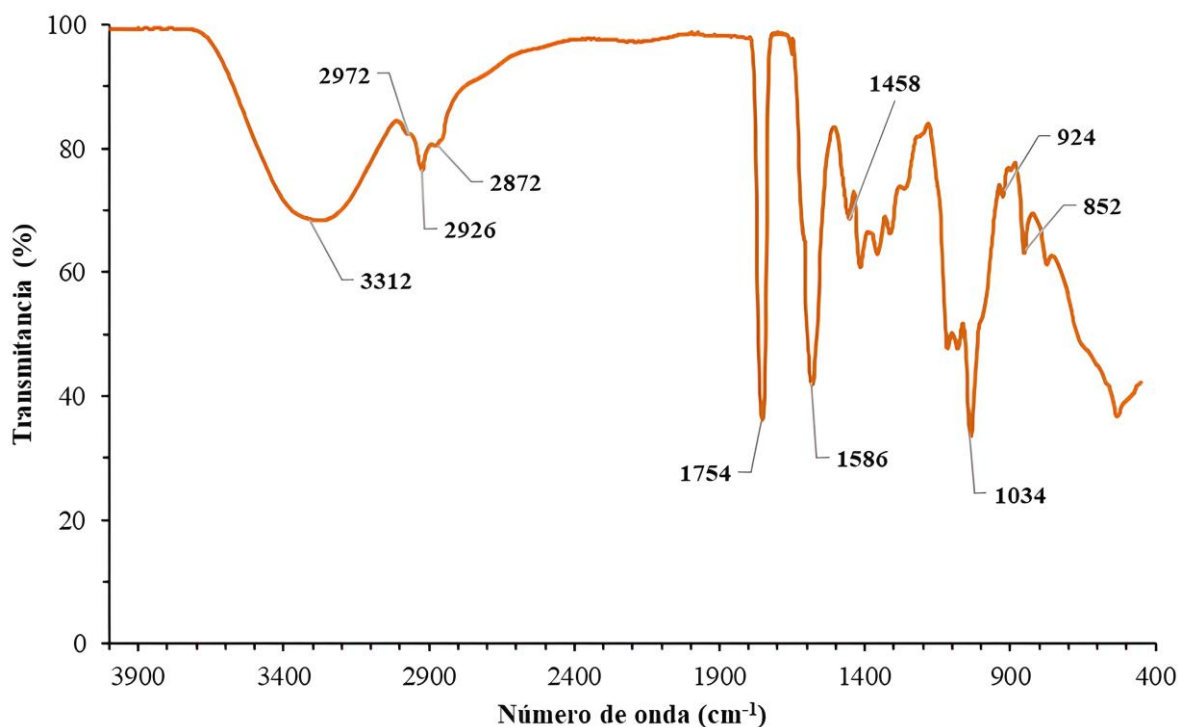


Figura 10. Espectro FT-IR de la película composite AX/PLA.

La banda más intensa en 1754 cm^{-1} confirma la presencia del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) característico del PLA. Este valor es comparable con estudios previos como el de Popa et al., (2017), que identificaron una banda similar (1749 cm^{-1}) en materiales compuestos a base de celulosa y PLA. La claridad de esta banda indica que la estructura del poliéster permanece intacta en la mezcla.

La banda observada alrededor de 1586 cm^{-1} puede atribuirse a estiramientos $\text{C}=\text{C}$ del anillo aromático presente en el ácido ferúlico (Sajjadi et al., 2012), lo que confirmaría la presencia de compuestos fenólicos residuales en el extracto de AX en la matriz de la película compuesta.

En la región de la huella dactilar, en 1458 cm^{-1} , se presentan las deformaciones de los grupos metilo y metileno correspondientes al PLA (Choksi & Desai, 2017) y los arabinosilanos (Alahmed & Simsek, 2024).

La banda intensa cerca de 1034 cm^{-1} indica la tensión $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ y $\text{C}-\text{O}$ del esqueleto de la xilosa (Bai et al., 2024). Complementariamente, se identificaron dos bandas que confirman la identidad estructural de los AX: la banda en 924 cm^{-1} , asociado al enlace β -glucosídico de la

cadena principal (Raza et al., 2022), y la banda en 852 cm^{-1} , que indica las unidades de arabinofuranosa presentes como ramificaciones laterales (Robert et al., 2005).

En comparación con el espectro FT-IR de BSG-AX, las vibraciones de tensión del enlace C-O-C de la xilosa se localizaron en 1042 cm^{-1} . Esta disminución en el número de onda sugiere una fuerte interacción a través de puentes de hidrógeno entre los grupos del glicerol y las unidades de la cadena principal de los arabinoxilanos (Bangar et al., 2025), lo que indica un proceso de plastificación efectivo. Asimismo, la banda del enlace β -glucosídico, originalmente en 898 cm^{-1} en BSG-AX, aumentó a 924 cm^{-1} en la película final, posiblemente causada por el confinamiento del polisacárido dentro de la red hidrofóbica del PLA (Yuniarto et al., 2017).

En general, la coexistencia de las bandas características del PLA y de los AX, así como el cambio en el número de onda de las bandas en el espectro, confirma la interacción química entre los componentes (Bai et al., 2024).

5.3.2. Análisis morfológico

5.3.2.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis de las micrografías SEM (Figura 11) revelan una morfología heterogénea con superficie rugosa y una estructura densa y compacta, caracterizada por la presencia de estructuras circulares distribuidas uniformemente sobre la superficie. Estos dominios circulares se atribuyen a la fase rica en PLA, dispersa en la matriz continua de AX.

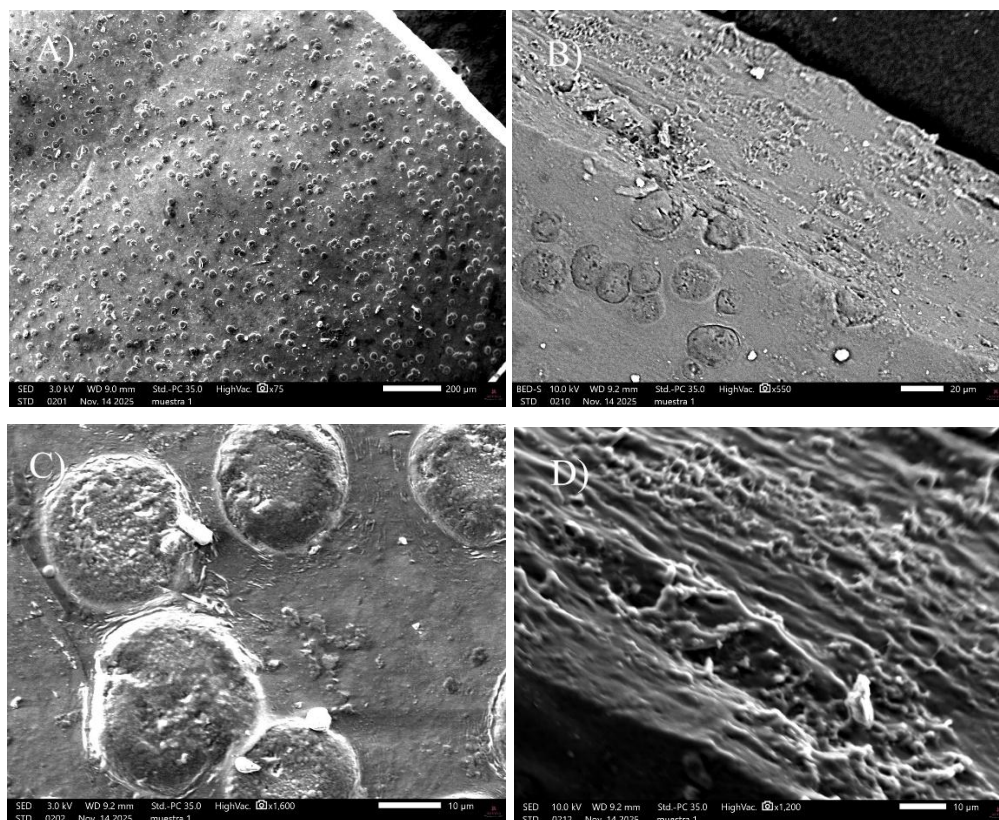


Figura 11. Micrografías de la película de BSG-AX: PLA a diferentes aumentos. A) 75x; B) 550x; C) 1600x; y D) 1200x.

A diferencia de las películas de arabinosilano extraídas de salvado de maíz estudiadas por Alahmed & Simsek, (2024), las cuales mostraron fisuras superficiales pese al uso de lipasa y acetato para mejorar su hidrofobicidad, la integración de PLA generó películas sin microgrietas o canales de fractura. Esta morfología indicaría una mejora de sus propiedades mecánicas y de barrera para su uso como recubrimiento.

La Figura 12 muestra las micrografías obtenidas para el resto de las películas analizadas. De acuerdo con Bai et al., (2024), la morfología superficial de la película se ve influenciada por la interacción de sus componentes y el método de secado. Por esta razón, el uso de BSG-AX obtenido mediante secado por aspersión (spray drying) altera significativamente la morfología del material.

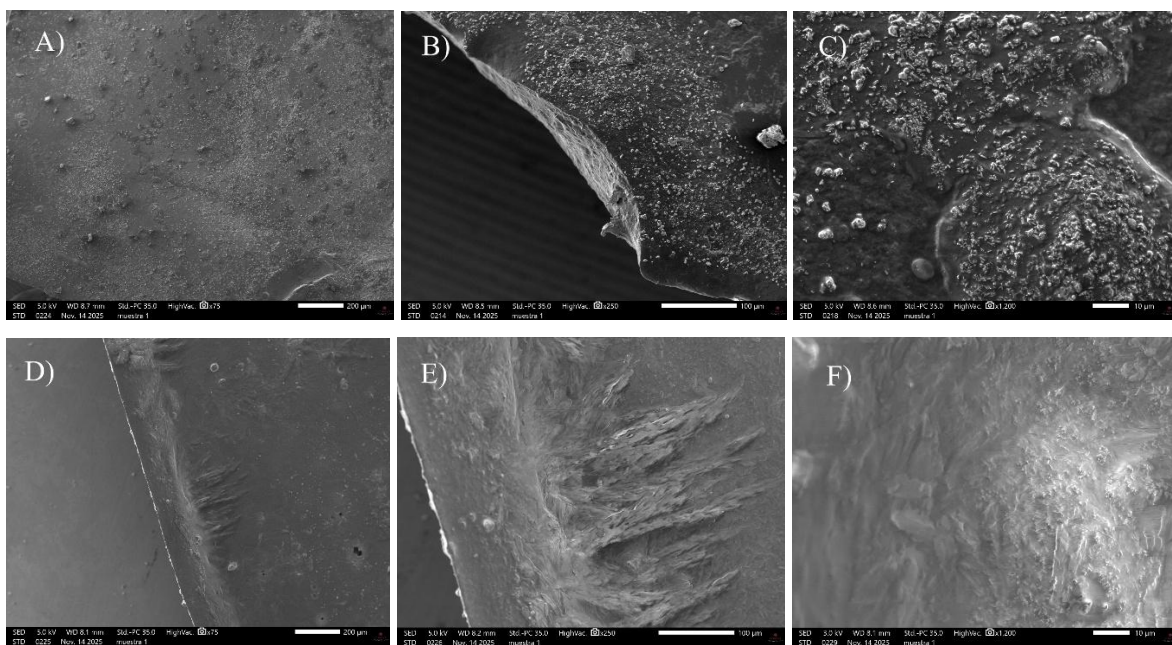


Figura 12. Micrografías de las películas a base de BSG-AX a 75x, 250x y 1200x, respectivamente. (A, B, y C) película con BSG-AX secada por aspersión; (D, E y F) película sin PLA en su formulación.

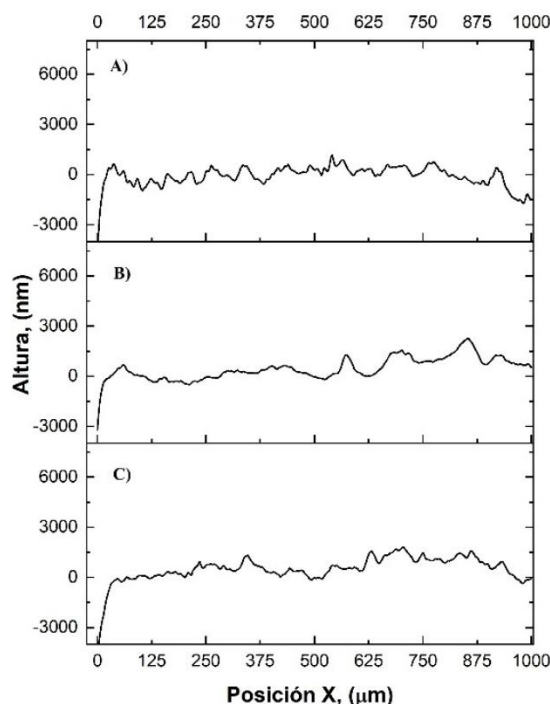
Las micrografías a 75x (Figura 12A) revelan ligeramente los dominios circulares correspondientes al PLA; sin embargo, se observan partículas irregulares con distribución heterogénea. La presencia de estas partículas puede indicar que los componentes no lograron redisolverse o reacomodarse adecuadamente durante la formación de la película.

Finalmente, la ausencia de dominios circulares en la película sin PLA en su formulación (Figura 12D) confirma que dicha fase es responsable de la morfología esférica descrita previamente. Al eliminar el PLA, la película exhibe una superficie lisa y plana, lo que se refleja en una morfología uniforme y sin relieves. Esta apariencia es similar a la reportada en la literatura para películas de AX de maíz plastificadas con glicerol (Salvada et al., 2022).

5.3.2.2. Rugosidad

En la Figura 13 se muestran los parámetros de rugosidad R_t , R_a y R_q para las películas plastificadas con glicerol, glicerol y Tween 80 y con la adición de PLA. El estudio de la rugosidad demuestra que la matriz pasa de ser lisa a presentar una estructura más compleja. Mientras que las muestras con solo glicerol y Tween 80 presentan superficies de baja rugosidad, la incorporación de PLA incrementa el valor de R_a . Este incremento es consistente

con las observaciones de SEM, en las que los dominios circulares de PLA se encuentran dispersos en la matriz continua de AX, lo que genera un relieve microtexturizado.



Parámetro	Valor (nm)
R _t	-3569.48
R _a	420.43
R _q	593.57

Parámetro	Valor (nm)
R _t	-963.65
R _a	599.03
R _q	797.96

Parámetro	Valor (nm)
R _t	-2932.11
R _a	678.67
R _q	889.98

Figura 13. Parámetros de rugosidad de las películas a base de BSG-AX. A) película plastificada con glicerol; B) película con glicerol y Tween 80; C) película con glicerol, Tween 80 y PLA.

El valor obtenido para R_a de 678.67 nm, se mantiene dentro del rango aceptable para prevenir la colonización microbiana (menor a 900 nm) (Flint et al., 2000). Por lo tanto, la presencia de PLA no compromete la resistencia de la película a la adherencia bacteriana, al contrario, el aumento en la rugosidad es el resultado de refuerzos hidrofóbicos que pueden mejorar las propiedades mecánicas y de barrera.

La ausencia de grietas o fisuras en la superficie resulta favorable para la funcionalidad de la película. De acuerdo con Dantas et al., (2016), la presencia de irregularidades como grietas o surcos en la superficie influye significativamente en la adhesión bacteriana al ofrecer refugio para las bacterias.

5.3.3. Análisis térmico

El análisis termogravimétrico de la película (Figura 14) mostró cuatro etapas de degradación térmica con una pérdida total de masa del 71.05 % a 700 °C.

La primera etapa de pérdida de masa ocurre en un rango de 40.97 a 147.17 °C, con un pico máximo en 82.91 °C, mismo que corresponde a la eliminación de agua ligada y humedad residual atrapada en la matriz de la película (Yilmaz-Turan et al., 2020).

Entre los 227.72 y 241.34 °C se presenta la degradación y volatilización de compuestos de bajo peso molecular, principalmente el glicerol y el Tween 80. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Sanyang et al., (2015), quienes sitúan la degradación de la fracción rica en glicerol de películas comestibles a base de polisacáridos entre los 150 y 280 °C.

La pérdida de masa más significativa se localiza en el tercer rango, de 248.17 a 330.50 °C, asociada a la despolimerización y ruptura de los enlaces glucosídicos de las cadenas de arabinosilanos (Benedetto et al., 2025). Con una T_{max} de 289.55 °C, el comportamiento térmico concuerda con lo reportado por Jaguey-Hernández et al., (2022), quienes establecieron la descomposición de hemicelulosas en torno a los 284.61 °C.

La etapa final de descomposición, situada entre los 337.36 y 398.81 °C, corresponde a la ruptura de las cadenas poliméricas del PLA, alcanzando su mayor tasa de pérdida de masa a los 364.73 °C. Este comportamiento demuestra una estabilidad térmica comparable con el valor de 362.3 °C reportado por Lv et al., (2019) para el PLA en sistemas similares.

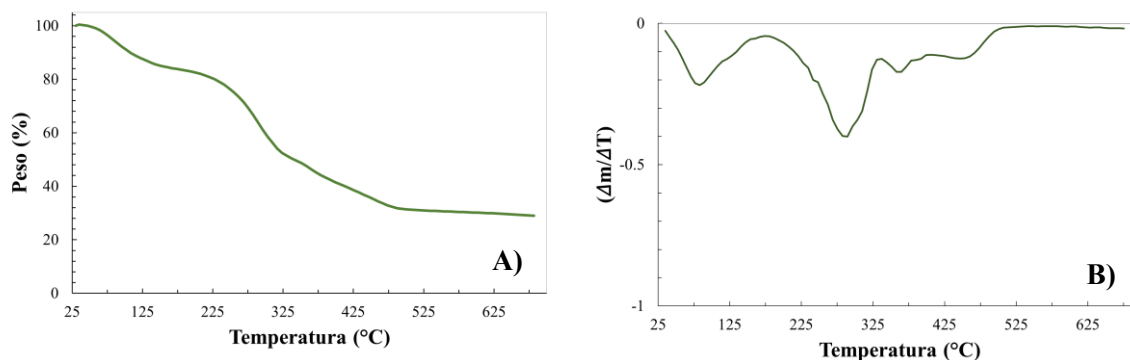


Figura 14. Análisis termogravimétrico de la película AX/PLA. A) Termograma; B) Curva DTG.

El análisis de la primera etapa de pérdida de masa en las curvas TGA y DTG reveló un incremento significativo en la estabilidad térmica del agua ligada al pasar de 64.97 °C en BSG-AX a 82.91 °C en la película formulada. Este aumento en la temperatura indica que la

mezcla de PLA con glicerol y Tween 80 potenció las interacciones por puente de hidrógeno, creando una matriz estructural que retiene con mayor fuerza las moléculas de agua. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Zhou et al., (2021) para películas enriquecidas con aceite esencial de galanga, donde la interacción entre los componentes incrementó la energía necesaria para la evaporación del agua.

Asimismo, la $T_{\max}$ de degradación de la matriz de los AX aumentó de 261.95 °C a 289.56 °C en la película final. Este incremento sugiere un efecto protector del PLA sobre los AX, lo que confirma la formación de un material compuesto con interacciones intermoleculares efectivas (Temesgen et al., 2024; Zhao et al., 2023; Oliver et al., 2024), lo cual es congruente con el aumento en número de onda en las bandas observadas previamente en el análisis FT-IR.

5.3.4. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las películas formuladas se presentan en la Tabla 3. El espesor es un parámetro significativo que modula la funcionalidad de las películas y afecta propiedades como la resistencia a la tracción y la barrera frente a la humedad (Lee et al., 2020). El valor obtenido (0.098 mm) se sitúa en el rango óptimo para materiales de empaque flexible.

Este resultado muestra una estrecha concordancia con los hallazgos de Weng et al., (2021), quienes reportaron un espesor de 101 μm para películas basadas en AX plastificadas con glicerol. Sin embargo, Salvada et al., (2022) reportan espesores que van de 156.4 a 301.6 μm cuando se les adiciona Tween 20 y diferentes concentraciones de ácido oléico.

La disminución en el espesor obtenido podría atribuirse a la incorporación de PLA en la formulación. Mientras que el glicerol actúa expandiendo la matriz polimérica (Abotbina et al., 2021), la estructura del PLA favorece un empaquetamiento molecular más denso (Shakour et al., 2021)

Según Sanyang et al., (2015), un espesor aproximado de 100 μm asegura una manipulación adecuada del material sin comprometer su flexibilidad. En este sentido, el espesor de 98 μm obtenido confirma la eficacia de la formulación.

Tabla 3. Propiedades físicas de la película de AX/PLA.

Propiedad		Valor
Espesor (mm)		0.098 ± 0.008
Contenido de humedad (%)		9.65 ± 0.07
Color	L*	62.52 ± 0.27
	a*	26.07 ± 0.90
	b*	49.81 ± 0.16
	ΔE	43.66

Todos los resultados se obtuvieron por triplicado y son reportados como media $\pm$ desviación estándar.

Alahmed & Simsek, (2024) establecen una relación directa entre el contenido de humedad y la funcionalidad de las películas, la cual influye en sus propiedades mecánicas e interacciones hídricas. El contenido de humedad del 9.65 % es significativamente menor al reportado por Anderson & Simsek, (2019), quienes registraron valores de 12.1 y 29.0 % para películas compuestas por AX de salvado de trigo con un 10 y 50 % de glicerol, respectivamente. Esta disminución confirma que la incorporación de PLA crea una barrera entre el agua y los grupos hidrófilos de las cadenas de AX, lo que resulta en una menor cantidad de humedad en las películas (Salvada et al., 2022; Popa et al., 2017).

De acuerdo con Alahmed & Simsek, (2024), la disminución del contenido de humedad indica que las películas de AX se han vuelto más hidrófobas.

Además, el contenido de humedad puede verse influido directamente por la presencia de glicerol y Tween 80 en las películas. Salvada et al. (2022) determinaron un porcentaje de humedad del 10.9 % luego de incorporar cera de abeja a películas de AX y de glicerol. Este aumento confirma que la incorporación de lípidos o aditivos puede reorganizar la estructura del polímero y su capacidad de retención de agua.

En cuanto al color, la película mostró un valor de L* de 62.52 ± 0.27 , lo que indica una luminosidad moderada, que le confiere una apariencia opaca en lugar de transparencia total. El valor positivo de a* (26.07 ± 0.90) indica una marcada tendencia hacia tonalidades rojizas, mientras que el valor de b* (49.81 ± 0.16) confirma la dominancia amarilla en la película.

Al contrastar estos resultados con los de Salvada et al., (2022), cuya matriz de AX + glicerol reportó una luminosidad superior ($L^* = 77.17$) y una menor intensidad de amarillos ($b^* = 40.52$), se hace evidente que la formulación actual posee una pigmentación más profunda y una mayor opacidad, lo que puede atribuirse tanto a la naturaleza y procedencia de los arabinoxilanos como a los componentes que integran la película.

La disminución en el valor de L^* tiene congruencia con lo reportado por Shakour et al., (2021), donde se establece que la presencia de compuestos fenólicos aumenta la opacidad de películas basadas en PLA, ya que pueden generarse fases que dispersan más la luz. Esto es consistente con las imágenes SEM previamente analizadas, la heterogeneidad en la película contribuye a la dispersión de la luz.

En este sentido, los valores de a^* y b^* suelen estar relacionados con la presencia de compuestos fenólicos residuales o impurezas de la materia prima, arrojando valores más altos que los establecidos en la literatura. Además, durante el calentamiento necesario para la formulación de la película, se puede inducir un ligero pardeamiento, lo que aumenta la saturación de amarillos y rojos (Naibaho & Korzeniowska, 2021; Chen et al., 2019).

La transparencia reducida de la película y los altos valores de a^* y b^* pueden disminuir la transmisión de luz visible y ultravioleta, lo que desacelera el deterioro oxidativo de los alimentos y ofrece una mejor protección antioxidante al alimento envasado (Shakour et al., 2021).

El valor de ΔE se calculó para cuantificar los cambios respecto al color inicial del BSG-AX. Basado en la interpretación convencional, valores de ΔE entre 0 y 1 no son perceptibles al ojo humano, en tanto que valores mayores a 5 significan que se perciben colores distintos. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor es el contraste entre ambos colores (Weng et al., 2025). Dado que se obtuvo un valor de 43.66, es evidente que existe una diferencia de color significativa en comparación al BSG-AX del que se partió para la obtención final de la película.

5.3.5. Propiedades mecánicas

La durabilidad y la firmeza de un recubrimiento dependen de sus propiedades mecánicas, que aseguran su integridad ante fuerzas externas desde su producción hasta su almacenamiento y transporte. La resistencia a la tracción, elongación a la rotura y el módulo

de Young son indicadores cruciales para medir el potencial mecánico de los recubrimientos (Bangar et al., 2025), los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de las películas de AX/PLA.

Propiedad	Valor
σ (MPa)	5.09 ± 0.37
ε (%)	24.13 ± 0.81
E (MPa)	21.09 ± 0.83

Donde: σ es la resistencia a la tracción, ε es la elongación a la rotura y E es el módulo de Young. Resultados reportados como media $\pm$ desviación estándar (n =3).

La resistencia a la tracción alcanzada (5.09 ± 0.37 MPa) es significativamente mayor que los 1.67 MPa y 1.91 MPa reportados por Salvada et al., (2022) para películas de AX de maíz plastificadas únicamente con glicerol y con adición de surfactantes, respectivamente, lo que demuestra que la incorporación de PLA como fase dispersa actúa efectivamente como refuerzo estructural.

A pesar de que este resultado (5.09 MPa) se posiciona dentro del rango funcional establecido por Dewi et al., (2025) para películas compuestas de PLA y celulosa (entre 5.00 y 42.0 MPa), es evidente que se sitúa en el límite inferior de dicho intervalo. Esta reducción en la resistencia a la tracción se atribuye a la interacción entre los componentes de la mezcla; específicamente, el glicerol y el Tween 80 incrementan el volumen libre intermolecular, lo que reduce la cohesión de la matriz a favor de la flexibilidad (Liu et al., 2016).

Se ha reportado que la adición de plastificantes disminuye la resistencia a la tracción, lo que favorece su capacidad de deformación elástica (Bangar et al., 2025). Este proceso se vio reflejado en un alargamiento a la rotura de 24.13 ± 0.81 %, una cifra significativamente superior al 1.3 % observado en películas producidas solo con AX (Weng et al., 2021), al 4.77 % reportado al emplear glicerol como plastificante (Salvada et al., 2022) y a un 2.5 % para películas formuladas con PLA puro (Zhao et al., 2023).

Esta mejora se debe a una plastificación eficiente mediada por el glicerol y el Tween 80. Estos componentes promovieron una mayor movilidad de las cadenas de AX y PLA, logrando así un material más flexible y deformable sin comprometer la estabilidad de la película (Bangar et al., 2025).

Finalmente, el Módulo de Young registrado (21.09 ± 0.83 MPa) indica que las películas poseen una flexibilidad moderada. Este valor es considerablemente inferior a los 3184 MPa reportados por Zhao et al., (2023) para películas de PLA puro, debido a que el glicerol y el Tween 80 actúan disminuyendo la rigidez. Asimismo, representa un incremento importante frente a las películas de AX plastificadas con glicerol, Tween 20 y ácido oleico, las cuales alcanzan un valor de 2.24 MPa (Salvada et al., 2022).

Este comportamiento confirma que la integración de PLA actúa como refuerzo estructural mejorando la resistencia sin comprometer la ductilidad, lo que permite que la película sea más resistente que una de AX puro.

5.3.6. Propiedades de barrera

La capacidad de una película para resistir o tolerar el contacto con el agua depende directamente de su solubilidad y de sus propiedades de barrera. Los parámetros de solubilidad, tasa de transmisión del vapor de agua, permeabilidad y ángulo de contacto se presentan en la Tabla 5.

Según Salvada et al. (2022), una alta solubilidad resulta inconveniente para la conservación de alimentos húmedos o en entornos con alta humedad relativa. El valor obtenido (17.05 ± 0.33 %) es notablemente inferior al reportado por Anderson y Simsek (2019), quienes hallaron una solubilidad de 38.0 y 34.2 % en películas de arabinosilano de salvado de trigo plastificadas con 10 y 50 % de glicerol, respectivamente.

Tabla 5. Propiedades de barrera de la película de AX/PLA.

Propiedad	Valor
WVTR ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$1.86 \times 10^{-4} \pm 2.76 \times 10^{-6}$
WVP ($\text{mol} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)	$5.75 \times 10^{-12} \pm 8.54 \times 10^{-14}$
Solubilidad en agua (%)	17.05 ± 0.33
Ángulo de contacto ($^{\circ}$)	96.65 ± 1.86

Donde: WVTR, tasa de transmisión del vapor de agua; WVP, permeabilidad al vapor de agua. Todos los resultados se obtuvieron por triplicado, reportados como media $\pm$ desviación estándar.

Esta diferencia se debe principalmente a la presencia de PLA. Mientras que los AX puros tienen una alta afinidad por el agua, pudiendo llegar al 86.10% de solubilidad (Weng et al., 2021), la mezcla con PLA crea una matriz compuesta donde actúa como una barrera física. Esto reduce la penetración de moléculas de agua, lo que disminuye drásticamente la capacidad de disolución total de la película y la permeabilidad al vapor (Zhao et al., 2023). Asimismo, la adición de Tween 80, que actúa como surfactante, permite optimizar la unión entre los AX y el PLA, consolidando una estructura molecular más firme. Esta mejora se evidencia en una reducción significativa en la permeabilidad al vapor de agua ($5.75 \times 10^{-12} \text{ mol}\cdot\text{m}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$), en comparación con el rango de 5.18 a 14.41×10^{-11} reportado para películas de AX de maíz sin PLA en su formulación (Salvada et al., 2022). Estos resultados son congruentes con lo observado previamente en las imágenes SEM; las esferas de PLA actúan como barreras físicas que interrumpen la red hidrofílica de los AX, obligando a las moléculas de agua a seguir un camino de difusión más largo para atravesar la película.

Finalmente, el ángulo de contacto es un parámetro fundamental para determinar la hidrofobicidad de una superficie sólida: valores inferiores a 90° indican superficies hidrofílicas, mientras que valores superiores a 90° indican un carácter hidrofóbico (Alahmed & Simsek, 2024).

En este estudio, las películas alcanzaron un ángulo de 96.65° , lo que las clasifica como hidrofóbicas. Este resultado es superior a los 76.71° registrados por Anderson y Simsek (2019) para películas de arabinosilanos de salvado de trigo plastificadas con 10 % de glicerol. Asimismo, se observa un incremento en la hidrofobicidad respecto a lo reportado en la literatura para películas de arabinosilano formuladas con glicerol, Tween 20 y diferentes concentraciones de ácido oleico, cuyos valores oscilaron entre 36.97° y 48.22° (Salvada et al., 2022).

No obstante, Alahmed y Simsek (2024) reportaron un ángulo de contacto de 105.15° para películas de arabinosilanos de salvado de maíz seco modificadas con lipasa-acetato de vinilo. La diferencia con el valor obtenido en este estudio sugiere un aumento de la capacidad de absorción de agua, lo que puede verse afectado por la presencia de Tween 80 y glicerol en la

formulación, ya que incrementan la afinidad por el agua en la matriz polimérica (Basiak et al., 2018).

En contraste, la superioridad en el ángulo de contacto respecto de los arabinosilanos puros puede atribuirse a la incorporación del PLA, cuya naturaleza hidrofóbica compensa la hidrofilia de los arabinosilanos. Como se observó en las micrografías de SEM, los dominios esféricos de PLA aumentan la rugosidad de la película, lo que, a la vez, influye directamente en sus propiedades de mojabilidad (Salvada et al., 2022). La rugosidad o lisura de la película desempeña un papel esencial en la determinación del ángulo de contacto y en la interacción con las moléculas de agua (Alahmed & Simsek, 2024).

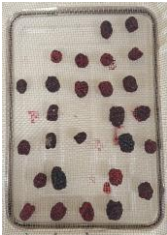
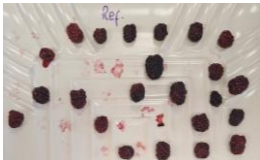
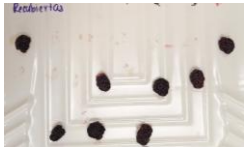
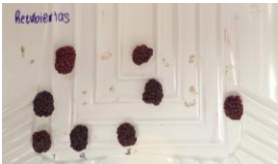
En general, las películas formuladas se comportan como materiales hidrofóbicos con una baja tendencia a la humectación, lo que demuestra que la mezcla física 60:40 (AX/PLA) es altamente efectiva para mejorar la resistencia al agua.

5.4. Aplicación de la película hidrófoba de AX/PLA como material de recubrimiento de zarzamoras

Para dar seguimiento al cambio en la apariencia de las zarzamoras recubiertas con película hidrófoba de AX/PLA, se adoptó como primera estrategia la toma de fotografías durante dos semanas (14 días). En la Tabla 6 se presentan algunas de las imágenes de las zarzamoras sometidas al estudio. Se puede observar que en las muestras control (sin recubrimiento) uno de los principales cambios que se presentan a temperatura ambiente es la disminución aparente de tamaño, debido a la pérdida de agua, y el color.

A consecuencia de ello, se consideraron como factores de seguimiento la pérdida de peso, los parámetros de color, así como la acidez titulable y el pH (que pueden estar relacionados con la actividad microbiana).

Tabla 6. Apariencia de las zarzamoras con y sin recubrimiento durante el almacenamiento a diferentes temperaturas.

<i>Temperatura ambiente (25°C)</i>			
Día	0	7	14
Control			
Recubierta			
<i>Refrigeración (4°C)</i>			
Día	0	7	14
Control			
Recubierta			
<i>Congelación (-15°C)</i>			
Día	0	7	14
Control			
Recubierta			

5.4.1. Pérdida de peso

En la Tabla 7 y en la Figura 15 se muestra el incremento de la pérdida de peso en las zarzamoras, tanto a temperatura ambiente (25°C) como bajo refrigeración (4°C) y congelación (-15°C), con y sin recubrimiento. La pérdida de peso aumentó gradualmente a medida que avanzaba el período de almacenamiento. En las tres condiciones evaluadas, tanto el tratamiento como el tiempo y la interacción entre factores presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), lo que demuestra que la eficacia del recubrimiento aumenta proporcionalmente al tiempo de almacenamiento.

Tabla 7. Cambios en el porcentaje de pérdida de peso de las zarzamoras con y sin recubrimiento almacenadas a diferentes temperaturas.

Tratamiento	Día					
	0	2	7	9	11	14
<i>Temperatura ambiente (25°C)</i>						
Control	0.00±0.00 ^k	12.92±0.07 ^h	34.01±0.17 ^d	42.65±0.30 ^c	51.02±0.27 ^b	58.03±0.08 ^a
Recubierta	0.00±0.00 ^k	2.78±0.05 ^j	11.92±0.23 ⁱ	17.90±0.03 ^g	23.33±0.04 ^f	28.03±0.19 ^e
<i>Refrigeración (4°C)</i>						
Control	0.00±0.00 ^k	3.16±0.29 ⁱ	7.96±0.11 ^f	11.01±0.07 ^d	14.86±0.61 ^b	18.12±0.12 ^a
Recubierta	0.00±0.00 ^k	1.05±0.06 ^j	5.56±0.06 ^h	7.11±0.12 ^g	9.49±0.02 ^e	13.09±0.20 ^c
<i>Congelación (-15°C)</i>						
Control	0.00±0.00 ^g	0.73±0.21 ^f	3.78±0.14 ^d	5.14±0.19 ^c	6.02±0.04 ^b	6.90±0.02 ^a
Recubierta	0.00±0.00 ^g	1.10±0.10 ^f	3.18±0.14 ^e	3.95±0.31 ^d	5.02±0.36 ^c	6.78±0.05 ^a

Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n=3). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Las comparaciones estadísticas se realizaron de forma independiente para cada nivel de temperatura.

A temperatura ambiente (25 °C), se observó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos, en particular al día 14 de almacenamiento. El uso del recubrimiento logró reducir la pérdida de peso en un 51.7 % en comparación con el grupo control, lo que demuestra su eficacia para reducir la deshidratación bajo condiciones de mayor estrés térmico.

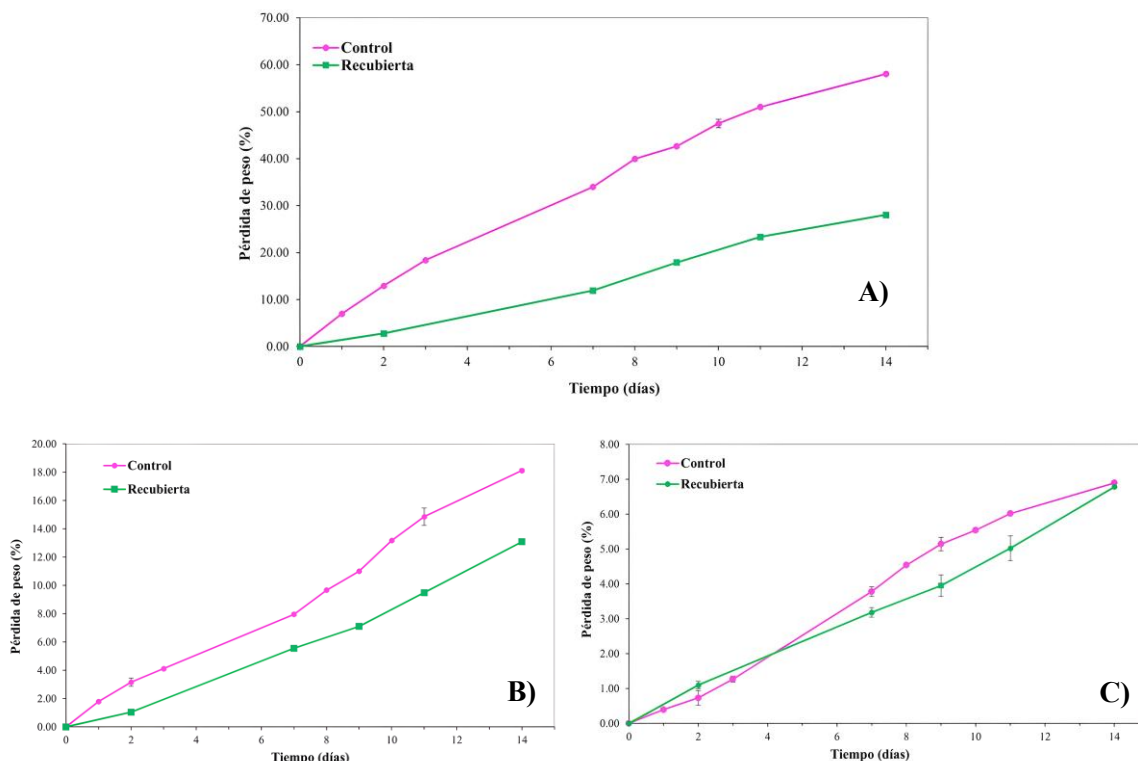


Figura 15. Efecto del recubrimiento sobre la pérdida de peso fisiológico de las zarzamoras durante el almacenamiento a diferentes temperaturas, reportado como media $\pm$ desviación estándar. A) Temperatura ambiente (25 °C); B) Refrigeración (4 °C); C) Congelación (-15 °C).

La pérdida total del 28.02 % para zarzamoras recubiertas después de 14 días de almacenamiento, representa una mayor eficiencia en comparación con lo reportado por Ascencio-Arteaga y colaboradores (2022), quienes obtuvieron un 33 % de pérdida en un intervalo de tiempo más corto (6 días) en frutos de mora (*Rubus fruticosus*) con recubrimientos comestibles de cera de *Candelilla* y goma guar almacenadas a 25 °C. Esta diferencia sugiere que la matriz de AX/PLA proporciona una barrera estable y duradera al vapor de agua, lo que reduce la tasa de deshidratación.

Bajo refrigeración (4 °C), aunque la pérdida de peso fue considerablemente menor que a temperatura ambiente, se mantuvo un incremento significativo con el tiempo ($p < 0.05$). Al día 14, las muestras control presentaron una pérdida mayor (18.12 %) que las recubiertas (13.09 %), lo que generó una diferencia significativa entre ambos tratamientos ($p < 0.05$). Estos hallazgos son comparables con lo reportado por Nadeem et al. (2025), quienes registraron una pérdida de peso del 18 % en zarzamoras recubiertas con gel SMAP después de 21 días de refrigeración.

Este comportamiento confirma que el recubrimiento actúa como una barrera física efectiva que limita la difusión de vapor de agua, al mismo tiempo que se ve potenciado por las bajas temperaturas. Estos resultados son consistentes con las propiedades de barrera y la morfología observadas en las películas, lo que, en conjunto, garantiza una mayor estabilidad fisiológica de la zarzamora durante su almacenamiento.

En contraste, bajo condiciones de congelación (-15 °C), no se mostraron diferencias significativas entre el control y recubierta al día 14 ($p > 0.05$). La pérdida máxima para el control fue de 6.90 %, mientras que las recubiertas presentaron un 6.78 % de pérdida. Estos valores son mucho más bajos que en las otras temperaturas, lo que sugiere que la congelación minimizó el impacto adicional del recubrimiento como barrera física.

En concordancia con los resultados obtenidos, Ascencio-Arteaga et al. (2022) reportaron que el incremento de la temperatura de almacenamiento promueve una mayor pérdida de peso.

La integridad del recubrimiento durante el almacenamiento a diferentes temperaturas se atribuye a las propiedades mecánicas discutidas anteriormente, mismas que le proporcionaron la flexibilidad necesaria para adaptarse a la superficie irregular de la zarzamora y evitar la formación de fracturas y grietas.

La reducción del peso fisiológico es un factor crítico para la conservación de productos frescos. Este proceso se relaciona con la respiración, la transpiración y la evaporación de agua, lo que provoca el deterioro de los atributos de calidad del fruto (Nadeem et al., 2025).

La mayor pérdida de peso fisiológico observada en las zarzamoras control, en comparación con las recubiertas, indica que el recubrimiento actúa modificando el intercambio gaseoso entre el fruto y el medio externo, lo que reduce la tasa respiratoria (Ascencio-Arteaga et al., 2022).

5.4.2. Color

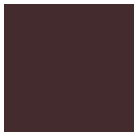
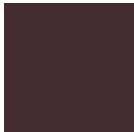
Los parámetros de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) para la zarzamora control y la recubierta se presentan en las Tablas 8 y 9, respectivamente. Asimismo, la Tabla 10 y la Figura 16 detallan la evolución de la luminosidad (L^*) durante los 14 días de almacenamiento en las tres condiciones térmicas evaluadas: ambiente, refrigeración y congelación.

Los parámetros iniciales para el día 0 ($L^* = 20.48$; $a^* = 11.88$) guardan consistencia con lo reportado en la literatura para moras de castilla (*Robus glaucus* Benth) en un estado de madurez del 100% en base al color, mientras que el valor de b^* (2.57) es menor a lo establecido (Samaniego et al., 2020).

Los valores de luminosidad definen la intensidad cromática de la zarzamora y tienden a disminuir conforme avanza la maduración (Samaniego et al., 2020). En las tres temperaturas evaluadas, tanto el tratamiento como el tiempo presentan diferencia significativa ($p < 0.05$). Sin embargo, la interacción Tratamiento $\times$ Tiempo solo fue significativa a temperatura ambiente y en refrigeración, por lo que el efecto del recubrimiento sobre la luminosidad depende del tiempo transcurrido en dichas temperaturas, pero no en congelación.

A temperatura ambiente se registraron los mayores valores de ΔE en ambos tratamientos, lo que indica un cambio progresivo durante los días de almacenamiento. Al día 14, las muestras control alcanzaron un ΔE de 10.36, mientras que las recubiertas mostraron un valor de 5.83. Aunque en ambos casos el cambio es perceptible al ojo humano ($\Delta E > 5$), el recubrimiento redujo aproximadamente a la mitad el cambio total de color, lo que demuestra su capacidad para preservar la cromaticidad. Las temperaturas altas pueden provocar el pardeamiento no enzimático de las frutas, lo que ocasiona cambios en el color de la zarzamora (Morillo-Robles et al., 2023), por lo que la mayor estabilidad en los parámetros a^* y b^* sugiere que el recubrimiento reguló la tasa metabólica de la zarzamora, evitando una síntesis acelerada de antocianinas o su degradación oxidativa (Samaniego et al., 2020), responsables de una tonalidad rojiza o parda como fue el caso del control.

Tabla 8. Parámetros de color de las zarzamoras sin recubrimiento almacenadas a diferentes temperaturas.

<i>Temperatura ambiente (25 °C)</i>										
Día	0	1	2	3	7	8	9	10	11	14
L*	20.48±0.32	20.10±0.27	19.47±0.45	18.41±0.40	16.33±0.08	15.34±0.46	14.70±0.13	13.02±0.08	13.87±0.09	12.38±0.18
a*	11.88±0.18	8.62±0.14	7.56±0.23	6.08±0.32	7.48±0.17	12.32±0.07	14.63±0.17	8.12±0.17	16.31±0.41	14.63±0.17
b*	2.57±0.13	2.26±0.20	1.42±0.21	2.18±0.24	4.41±0.10	6.64±0.27	7.56±0.26	12.97±0.19	9.22±0.29	8.41±0.43
Color										
ΔE	-	3.30	4.58	6.17	6.32	6.57	8.11	13.34	10.37	10.36
<i>Refrigeración (4°C)</i>										
Día	0	1	2	3	7	8	9	10	11	14
L*	20.48±0.32	20.36±0.08	20.11±0.11	19.89±0.12	18.91±0.09	18.35±0.35	17.88±0.15	17.06±0.27	16.29±0.33	15.89±0.10
a*	11.88±0.18	11.53±0.16	11.35±0.17	10.41±0.36	9.66±0.28	10.08±0.10	8.72±0.34	9.26±0.17	10.00±0.30	10.48±0.38
b*	2.57±0.13	2.46±0.28	2.42±0.12	3.63±0.38	3.52±0.44	3.61±0.36	3.06±0.06	3.86±0.26	4.60±0.36	5.01±0.14
Color										
ΔE	-	0.39	0.66	1.91	2.88	2.98	4.12	4.49	5.02	5.39
<i>Congelación (-15 °C)</i>										
Día	0	1	2	3	7	8	9	10	11	14
L*	20.48±0.32	19.93±0.11	19.81±0.06	19.76±0.11	19.69±0.10	19.61±0.05	19.45±0.18	19.54±0.04	19.35±0.11	19.26±0.03
a*	11.88±0.18	13.52±0.41	13.60±0.05	13.65±0.09	13.96±0.15	10.52±0.74	12.83±0.25	13.58±0.44	13.73±0.22	12.47±0.08
b*	2.57±0.13	3.20±0.11	3.32±0.22	2.84±0.17	4.12±0.13	3.61±0.32	3.18±0.24	3.62±0.27	3.89±0.24	4.05±0.07
Color										
ΔE	-	1.84	1.99	1.92	2.71	1.92	1.53	2.13	2.54	2.01

El valor de ΔE se calculó con base en el día 0. Los resultados se reportan como media ± desviación estándar (n =3).

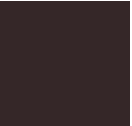
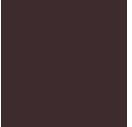
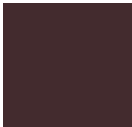
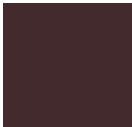
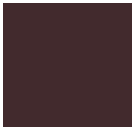
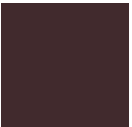
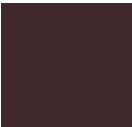
Los valores de luminosidad (L^*) en las muestras control disminuyeron significativamente ($p < 0.05$) a partir del segundo día de almacenamiento, mientras que las zarzamoras recubiertas preservaron su brillo durante un período más prolongado, mostrando diferencias significativas hasta el día nueve de evaluación. Estos resultados son consistentes con los valores reportados para ΔE y con la capacidad del recubrimiento para conservar la apariencia brillante de la zarzamora.

En el caso de refrigeración, el incremento en la diferencia total de color (ΔE) fue notablemente menor que el registrado en temperatura ambiente, lo que confirma que la disminución de la temperatura reduce la velocidad de cambio cromático. No obstante, el recubrimiento mantuvo su función protectora, alcanzando al día 14 un valor de $\Delta E = 3.27$, lo que evidencia un cambio perceptible pero moderado (Weng et al., 2025); en contraste, en el grupo control el cambio de coloración aún es perceptible al ojo humano, con un ΔE de 5.39.

Este efecto conservador fue más evidente en la luminosidad (L^*). Mientras que el grupo control mostró una diferencia significativa ($p < 0.05$) a partir del séptimo día, las muestras recubiertas lograron retrasar este deterioro hasta el día 11. Al llegar al día 14, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, con valores de L^* de 18.61 en las zarzamoras recubiertas y de 15.89 en los controles. Estos resultados comprueban la capacidad del recubrimiento para actuar como barrera al oxígeno, lo que frena el pardeamiento y la pérdida de luminosidad.

Finalmente, bajo congelación se obtienen los valores de ΔE más bajos para ambos tratamientos. Al día 14, el grupo control presentó una variación final de 2.01, mientras que las zarzamoras recubiertas mantuvieron una estabilidad superior con un valor de 1.22. Estos cambios se sitúan por debajo de la percepción del ojo humano (Weng et al., 2025), lo que indica que la apariencia visual de la zarzamora prácticamente no se alteró. En estas condiciones, se observó una diferencia significativa ($p < 0.05$) en la luminosidad al día 14 entre el control (19.26) y las muestras recubiertas (19.42).

Tabla 9. Parámetros de color de las zarzamoras con recubrimiento almacenadas a diferentes temperaturas.

<i>Temperatura ambiente (25 °C)</i>						
Día	0	2	7	9	11	14
L*	20.48±0.32	20.37±0.28	19.95±0.08	19.27±0.33	18.54±0.39	17.33±0.27
a*	11.88±0.18	10.52±0.34	5.63±0.38	4.51±0.42	5.60±0.41	7.03±0.12
b*	2.57±0.13	2.40±0.18	1.84±0.07	1.23±0.24	2.27±0.25	1.83±0.07
Color						
ΔE	-	1.38	6.31	7.59	6.58	5.83
<i>Refrigeración (4°C)</i>						
Día	0	2	7	9	11	14
L*	20.48±0.32	20.42±0.03	20.13±0.05	19.96±0.06	19.06±0.07	18.61±0.30
a*	11.88±0.18	10.33±0.39	8.44±0.35	9.26±0.16	7.31±0.16	9.20±0.13
b*	2.57±0.13	2.28±0.34	2.34±0.40	2.48±0.06	2.59±0.27	2.66±0.30
Color						
ΔE	-	1.58	3.47	2.67	4.79	3.27
<i>Congelación (-15 °C)</i>						
Día	0	2	7	9	11	14
L*	20.48±0.32	20.24±0.08	20.17±0.15	20.06±0.07	19.70±0.22	19.42±0.13
a*	11.88±0.18	12.40±0.27	11.73±0.27	11.65±0.13	11.44±0.39	11.28±0.22
b*	2.57±0.13	2.92±0.14	3.15±0.16	2.70±0.33	2.56±0.09	2.48±0.16
Color						
ΔE	-	0.67	0.67	0.50	0.90	1.22

El valor de ΔE se calculó con base en el día 0. Los resultados se reportan como media ± desviación estándar (n=3).

Tabla 10. Cambios en el valor de luminosidad (L*) de las zarzamoras, con y sin recubrimiento, almacenadas a diferentes temperaturas.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 7	Día 9	Día 11	Día 14
<i>Temperatura ambiente (25°C)</i>						
Control	20.48±0.32 ^a	19.47±0.45 ^b	16.33±0.08 ^e	14.70±0.13 ^f	13.87±0.09 ^g	12.38±0.18 ^h
Recubierta	20.48±0.32 ^a	20.37±0.28 ^a	19.95±0.08 ^{ab}	19.27±0.33 ^{bc}	18.54±0.39 ^c	17.33±0.27 ^d
<i>Refrigeración (4°C)</i>						
Control	20.48±0.32 ^a	20.11±0.11 ^a	18.91±0.09 ^b	17.88±0.15 ^c	16.29±0.33 ^d	15.89±0.10 ^d
Recubierta	20.48±0.32 ^a	20.42±0.03 ^a	20.13±0.05 ^a	19.96±0.06 ^a	19.06±0.07 ^b	18.61±0.30 ^b
<i>Congelación (-15°C)</i>						
Control	20.48±0.32 ^a	19.81±0.06 ^{bcd}	19.69±0.10 ^{cde}	19.45±0.18 ^{de}	19.35±0.11 ^{de}	19.26±0.03 ^e
Recubierta	20.48±0.32 ^a	20.24±0.08 ^{ab}	20.17±0.15 ^{abc}	20.06±0.07 ^{abc}	19.70±0.22 ^{cde}	19.42±0.13 ^{de}

Los valores están expresados como media ± desviación estándar (n=3). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$); las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Las comparaciones estadísticas se realizaron de forma independiente para cada nivel de temperatura.

Aunque esta variación es menor que la de las otras temperaturas, evidencia la eficacia del tratamiento incluso en condiciones de congelación. Este fenómeno puede estar relacionado con la sublimación del hielo, lo que provoca quemaduras por congelación y opacidad en el fruto (Zhao & Takhar, 2017). Al presentar una baja permeabilidad al vapor de agua, el recubrimiento establece una resistencia a la transferencia de masa, lo que mantiene la superficie de la zarzamora hidratada y, por ende, un valor de L^* más alto.

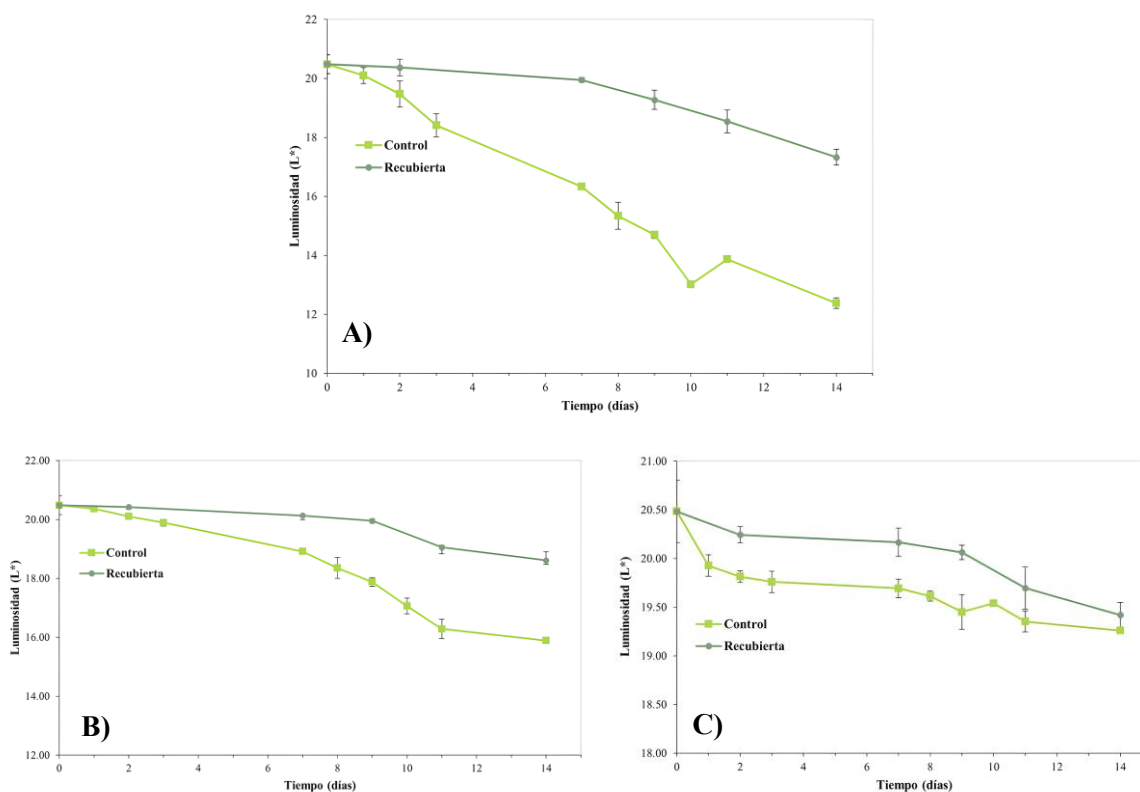


Figura 16. Efecto del recubrimiento sobre la luminosidad de las zarzamoras durante el almacenamiento a diferentes temperaturas, reportado como media $\pm$ desviación estándar. A) Temperatura ambiente (25 °C); B) Refrigeración (4 °C); C) Congelación (-15 °C).

5.4.3. Acidez titulable

La acidez titulable de las zarzamoras (*Rubus fruticosus*) representa el contenido total de ácidos orgánicos, mismos que influyen en el equilibrio entre el dulzor y acidez del fruto. Esta acidez se debe principalmente a la presencia de ácido málico (Zia-UI-Haq et al., 2014). La

cuantificación de ácido málico en las zarzamoras con y sin recubrimiento se detalla en la Tabla 11 y se ilustran en la Figura 17.

Tabla 11. Cambios en el porcentaje de ácido málico en las zarzamoras con y sin recubrimiento almacenadas a diferentes temperaturas.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 7	Día 9	Día 11	Día 14
Temperatura ambiente (25°C)						
Control	2.25±0.02 ^a	2.05±0.03 ^b	1.40±0.02 ^f	1.17±0.04 ^g	0.98±0.03 ^h	0.69±0.11 ⁱ
Recubierta	2.25±0.02 ^a	2.12±0.02 ^b	1.87±0.02 ^c	1.77±0.12 ^d	1.70±0.03 ^d	1.58±0.13 ^e
Refrigeración (4°C)						
Control	2.25±0.02 ^a	2.14±0.05 ^{bc}	1.94±0.06 ^d	1.76±0.03 ^e	1.55±0.03 ^g	1.46±0.03 ^h
Recubierta	2.25±0.02 ^a	2.17±0.02 ^{ab}	2.08±0.03 ^c	1.90±0.12 ^d	1.86±0.01 ^d	1.66±0.02 ^f
Congelación (-15°C)						
Control	2.25±0.02 ^a	2.19±0.01 ^a	2.07±0.13 ^{bc}	1.99±0.03 ^d	1.88±0.14 ^e	1.86±0.05 ^e
Recubierta	2.25±0.02 ^a	2.21±0.01 ^a	2.11±0.03 ^b	2.07±0.10 ^{bc}	2.00±0.02 ^{cd}	1.89±0.01 ^e

Los valores están expresados como media ± desviación estándar (n=3) del porcentaje de ácido málico en las zarzamoras. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$); las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Las comparaciones estadísticas se realizaron de forma independiente para cada nivel de temperatura.

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) en las tres temperaturas de medición para los factores de tratamiento, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre ambos. Esto comprueba que la aplicación del recubrimiento generó un efecto medible en la retención de ácido málico en comparación con los controles, y que depende directamente del tiempo de almacenamiento.

Tanto a temperatura ambiente (25 °C) como en refrigeración (4 °C), los controles presentaron una disminución significativa ($p < 0.05$) del contenido de ácido málico en comparación con las zarzamoras recubiertas. Este fenómeno es particularmente evidente a temperatura ambiente, donde las muestras control redujeron su acidez hasta un 0.69 %, mientras que las recubiertas mantuvieron niveles superiores, alcanzando un 1.58 %.

De manera consistente con los resultados de pérdida de peso, el recubrimiento actúa como una barrera que limita el flujo de oxígeno, lo que reduce la tasa respiratoria y, por consiguiente, se mantiene el equilibrio con el sabor de la zarzamora (Ascencio-Arteaga et al.,

2022; Zia-UI-Haq et al., 2014). Esto evita que el fruto consuma el ácido málico con mayor rapidez, como ocurre en los controles.

En condiciones de refrigeración, la degradación de ácido málico fue menos agresiva en ambos grupos, pero la tendencia de protección del recubrimiento se mantuvo. Los controles llegaron a un valor final de 1.46 % y las recubiertas preservaron una mayor acidez con un 1.66 %. Esta diferencia confirma que la combinación de refrigeración y recubrimiento potencia la conservación de los solutos, lo que prolonga su frescura durante el almacenamiento.

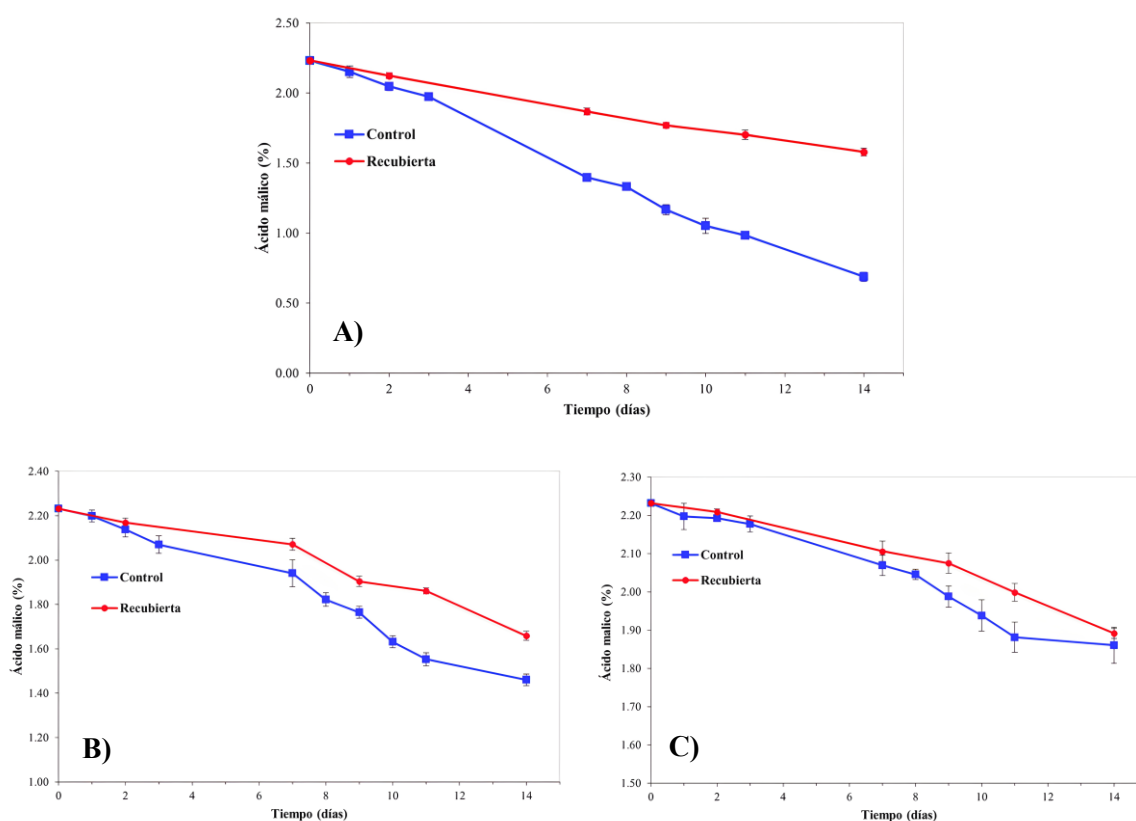


Figura 17. Efecto del recubrimiento sobre la cantidad de ácido málico presente en las zarzamoras durante el almacenamiento a diferentes temperaturas, reportado como media $\pm$ desviación estándar. A) Temperatura ambiente (25 °C); B) Refrigeración (4 °C); C) Congelación (-15 °C).

Finalmente, bajo congelación (-15 °C) no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las zarzamoras control y las recubiertas al llegar al día 14 de almacenamiento. La temperatura de congelación detiene la actividad metabólica y enzimática del fruto (Morillo-

Robles et al., 2023), por lo que el consumo de ácido málico se minimiza y el efecto protector del recubrimiento no ejerce una influencia significativa bajo estas condiciones.

Los resultados de este trabajo tienen un comportamiento similar a los reportados en mora de castilla tratada con un recubrimiento de HPMC a 4°C (Villegas & Albarracín, 2016), y en moras recubiertas con cera de Candelilla y goma guar a 25°C (Ascencio-Arteaga et al., 2022).

5.4.4. pH

El pH es un indicador fundamental de la madurez fisiológica y la calidad sensorial en frutos como la zarzamora (*Rubus fruticosus*), relacionado con la estabilidad microbiológica y el sabor del fruto (Zia-UI-Haq et al., 2014). Los valores obtenidos durante el análisis del pH se encuentran en la Tabla 12 y la Figura 18.

Tabla 12. Cambios en el pH de las zarzamoras con y sin recubrimiento, almacenadas a diferentes temperaturas.

Tratamiento	Día 0	Día 2	Día 7	Día 9	Día 11	Día 14
Temperatura ambiente (25°C)						
Control	3.27±0.06 ^f	3.37±0.15 ^{ef}	3.70±0.00 ^d	4.07±0.15 ^{bc}	4.27±0.06 ^{ab}	4.40±0.10 ^a
Recubierta	3.27±0.06 ^f	3.30±0.10 ^f	3.53±0.06 ^{def}	3.63±0.12 ^{de}	3.70±0.00 ^d	3.80±0.10 ^{cd}
Refrigeración (4°C)						
Control	3.27±0.06 ^d	3.30±0.00 ^d	3.47±0.12 ^{cd}	3.57±0.06 ^{bc}	3.70±0.10 ^{ab}	3.80±0.10 ^a
Recubierta	3.27±0.06 ^d	3.27±0.06 ^d	3.40±0.00 ^{cd}	3.47±0.12 ^{cd}	3.53±0.06 ^{bc}	3.57±0.06 ^{bc}
Congelación (-15°C)						
Control	3.27±0.06 ^c	3.27±0.06 ^c	3.40±0.00 ^{abc}	3.47±0.06 ^{ab}	3.53±0.06 ^{ab}	3.57±0.06 ^a
Recubierta	3.27±0.06 ^c	3.27±0.12 ^c	3.37±0.06 ^{bc}	3.40±0.00 ^{abc}	3.47±0.12 ^{ab}	3.53±0.06 ^{ab}

Los valores están expresados como media ± desviación estándar (n=3). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$); las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Las comparaciones estadísticas se realizaron de forma independiente para cada nivel de temperatura.

El análisis estadístico de las muestras almacenadas a temperatura ambiente reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los factores de tratamiento, tiempo de almacenamiento y la interacción (Tratamiento × Tiempo). Estos resultados indican que el cambio en el pH no depende solo del proceso natural de maduración, sino que se modifica de manera efectiva

por la aplicación del recubrimiento y ejerce una mayor influencia a medida que avanza el tiempo de almacenamiento.

Partiendo de un pH inicial de 3.27, el grupo control aumentó significativamente ($p < 0.05$) hasta 4.40. En contraste, las zarzamoras recubiertas mantuvieron un pH más bajo de 3.80, lo que puede relacionarse con una desaceleración de los procesos metabólicos (Nadeem et al., 2025). Este comportamiento es consistente con los cambios observados en la acidez titulable discutidos previamente. El marcado aumento del pH en los controles es un indicador del consumo acelerado del ácido málico durante la respiración.

En el caso de las zarzamoras sometidas a refrigeración, el análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) únicamente para los factores individuales de tratamiento y tiempo de almacenamiento, sin detectar una influencia significativa de la interacción entre ambos. Esta ausencia de interacción sugiere que el efecto protector del recubrimiento actúa de manera independiente del tiempo.

Bajo estas condiciones, el recubrimiento continúa cumpliendo su función de barrera, con diferencias significativas ($p < 0.05$) en el día 14. Mientras los controles alcanzaron un pH de 3.80, las recubiertas mostraron mayor estabilidad, alcanzando únicamente 3.57. Este comportamiento guarda consistencia con lo establecido para la mora de Castilla tratada con un recubrimiento de HPMC a 4°C (Villegas & Albarracín, 2016).

Esto indica que la disminución de la temperatura logra estabilizar el metabolismo del fruto, de modo que el aumento de pH es más lento (Morillo-Robles et al., 2023). En este sentido, el recubrimiento ejerce una protección uniforme que preserva la calidad de la zarzamora.

Sin embargo, en congelación (-15 °C), el pH mostró variaciones distintas. Se reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) únicamente respecto al tiempo de almacenamiento, mientras que el factor tratamiento y la interacción entre ambos no ejercieron una influencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$). Por lo tanto, a temperaturas de congelación, el incremento gradual del pH es independiente de la aplicación del recubrimiento.

En general, la estabilización del pH no solo protege las propiedades sensoriales y el color de la zarzamora, sino que también constituye un factor determinante para minimizar el crecimiento bacteriano y fúngico (Morillo-Robles et al., 2023). Por lo tanto, a temperatura ambiente (25°C) y con refrigeración (4°C), el recubrimiento actúa como barrera multifuncional y extiende la vida útil de la zarzamora.

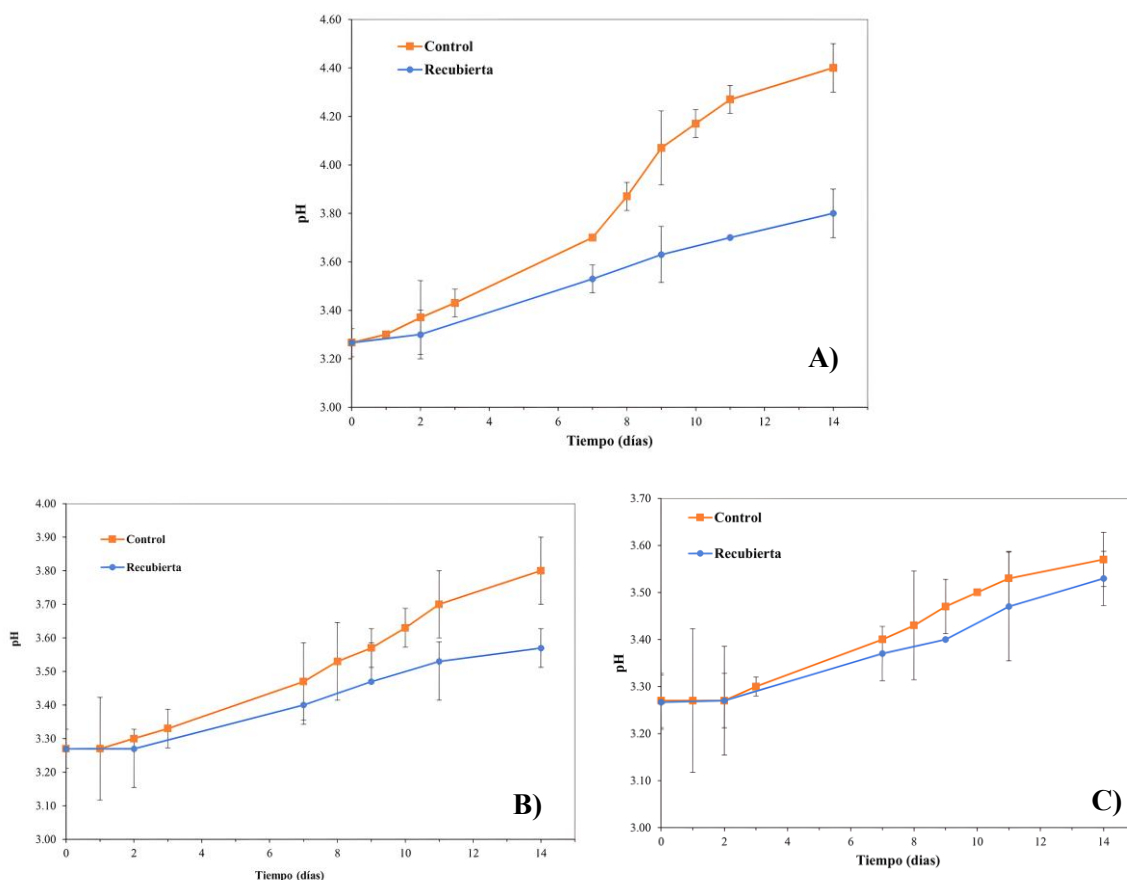


Figura 18. Efecto del recubrimiento sobre el pH de las zarzamoras durante el almacenamiento a diferentes temperaturas, reportado como media $\pm$ desviación estándar. A) Temperatura ambiente (25 °C); B) Refrigeración (4 °C); C) Congelación (-15 °C).

5.4.5. Determinación del orden de reacción y parámetros cinéticos

La determinación del orden de reacción de las propiedades fisicoquímicas (Tabla 13) generó variaciones en los mecanismos de deterioro de la zarzamora según el tratamiento aplicado. Mientras que los frutos control a 25 °C tendieron a ajustarse a modelos de primer orden en pérdida de peso y luminosidad, con una degradación acelerada y dependiente de la cantidad de atributo restante, la aplicación del recubrimiento logró desplazar estas cinéticas hacia un orden cero.

Este cambio en el orden de reacción sugiere que el recubrimiento limita la transferencia de masa y genera un proceso de pérdida de peso más controlado y estable (Ascencio-Arteaga et al., 2022), al mismo tiempo que reduce la tasa de oxidación de pigmentos, evitando la pérdida

de luminosidad acelerada, de modo que el cambio de color sea lineal y menos agresivo (Samaniego et al., 2020).

Tabla 13. Estimación del orden de reacción para las propiedades fisicoquímicas de las zarzamoras con y sin recubrimiento durante el almacenamiento.

Propiedad	Temperatura (° C)	Tratamiento	Orden cero		Orden uno	
			R ²	k	R ²	k
Pérdida de peso	25	Control	0.9867	0.2243	0.9975	0.0622
		Recubierta	0.9903	0.1283	0.9848	0.0242
	4	Control	0.9937	0.0819	0.9901	0.0139
		Recubierta	0.9872	0.0463	0.9822	0.0099
	-15	Control	0.9927	0.0319	0.9918	0.0054
		Recubierta	0.9965	0.0312	0.9958	0.0049
Luminosidad	25	Control	0.9948	0.5977	0.9960	0.0367
		Recubierta	0.9796	0.2137	0.8666	0.0112
	4	Control	0.9512	0.3502	0.9412	0.0193
		Recubierta	0.8418	0.1317	0.8358	0.0067
	-15	Control	0.8513	0.0768	0.8458	0.0768
		Recubierta	0.8851	0.0680	0.8822	0.0034
Acidez titulable	25	Control	0.9961	0.1144	0.9863	0.0833
		Recubierta	0.9929	0.0251	0.9985	0.0478
	4	Control	0.9739	0.0585	0.9621	0.0319
		Recubierta	0.9555	0.0401	0.9402	0.0204
	-15	Control	0.9741	0.0295	0.9710	0.0144
		Recubierta	0.9750	0.0246	0.9660	0.0118
pH	25	Control	0.9693	0.087	0.9721	0.0229
		Recubierta	0.9919	0.0401	0.9906	0.0114
	4	Control	0.9795	0.0394	0.9832	0.0112
		Recubierta	0.9764	0.0237	0.9762	0.0070
	-15	Control	0.9762	0.0237	0.9764	0.0070
		Recubierta	0.9705	0.0194	0.9727	0.0057

k = constante de velocidad; R² = coeficiente de determinación.

En contraste, el cambio en la acidez titulable a 25 °C en los controles presentó un mejor ajuste al modelo de orden cero, mientras que el tratamiento recubierto mostró un comportamiento más cercano al de orden uno.

En este caso, un orden cero sugiere que la degradación del ácido málico ocurre a una velocidad constante y máxima hasta agotarse el ácido. El cambio a una cinética de primer orden podría atribuirse a la capacidad del recubrimiento para actuar como barrera al intercambio de gases durante la respiración celular (Moreno & Oyola, 2016; Ascencio-

Arteaga et al., 2022). Esto provoca que el consumo de sustrato sea proporcional a la concentración residual.

Finalmente, en cuanto al pH, se observa un cambio de cinética de primer orden en los frutos control a un orden cero en las zarzamoras recubiertas; sin embargo, en este caso ocurre tanto a temperatura ambiente como en refrigeración. Estos hallazgos son coherentes con el análisis estadístico previo, que reveló que la acidez titulable y el pH no se comportaron de manera similar a lo largo del tiempo de almacenamiento.

En estas condiciones, el recubrimiento podría actuar como un regulador metabólico que mantiene la estabilidad química del fruto, lo que hace que el incremento de pH ocurra a una velocidad constante (Nadeem et al., 2025).

En los casos en que el orden de reacción se mantuvo constante entre los tratamientos, la reducción de los valores de las constantes de velocidad (k) en las zarzamoras recubiertas demuestra una eficacia protectora persistente. Aunque a temperaturas de congelación (-15 °C) esta disminución fue menos pronunciada, como se observó en el análisis estadístico, en todos los escenarios el recubrimiento aumentó la vida media de la zarzamora en comparación con los controles (Tabla 14).

Tabla 14. Estimación de la vida media de la zarzamora según el modelo de mejor ajuste.

Propiedad	Temperatura (° C)	Tratamiento	Orden	t_{1/2} (días)
Pérdida de peso	25	Control	Uno	11.14
		Recubierta	Cero	24.02
	4	Control	Cero	39.46
		Recubierta	Cero	53.89
	-15	Control	Cero	96.77
		Recubierta	Cero	104.78
Luminosidad	25	Control	Uno	18.89
		Recubierta	Cero	47.92
	4	Control	Cero	29.24
		Recubierta	Cero	77.75
	-15	Control	Cero	133.33
		Recubierta	Cero	150.59
Acidez titulable	25	Control	Cero	9.83
		Recubierta	Uno	14.50
	4	Control	Cero	19.23
		Recubierta	Cero	28.05
	-15	Control	Cero	38.14
		Recubierta	Cero	45.73
pH	25	Control	Uno	30.27
		Recubierta	Cero	40.77
	4	Control	Uno	61.89
		Recubierta	Cero	68.99
	-15	Control	Uno	99.02
		Recubierta	Uno	121.60

Donde: t_{1/2} es el tiempo de vida media.

5.4.6. Análisis microestructural

El análisis microestructural de las zarzamoras (control y recubiertas) reveló diferencias importantes entre ambos tratamientos a distintas temperaturas de almacenamiento.

Inicialmente, las micrografías del día 0 (Figura 19) confirmaron que tanto las muestras sin desinfectar como las desinfectadas presentaban una epidermis continua, drupeolas firmes y el brillo característico del fruto. La desinfección no generó alteraciones en la morfología superficial del fruto, por lo que no se observaron daños mecánicos ni deterioro tisular.

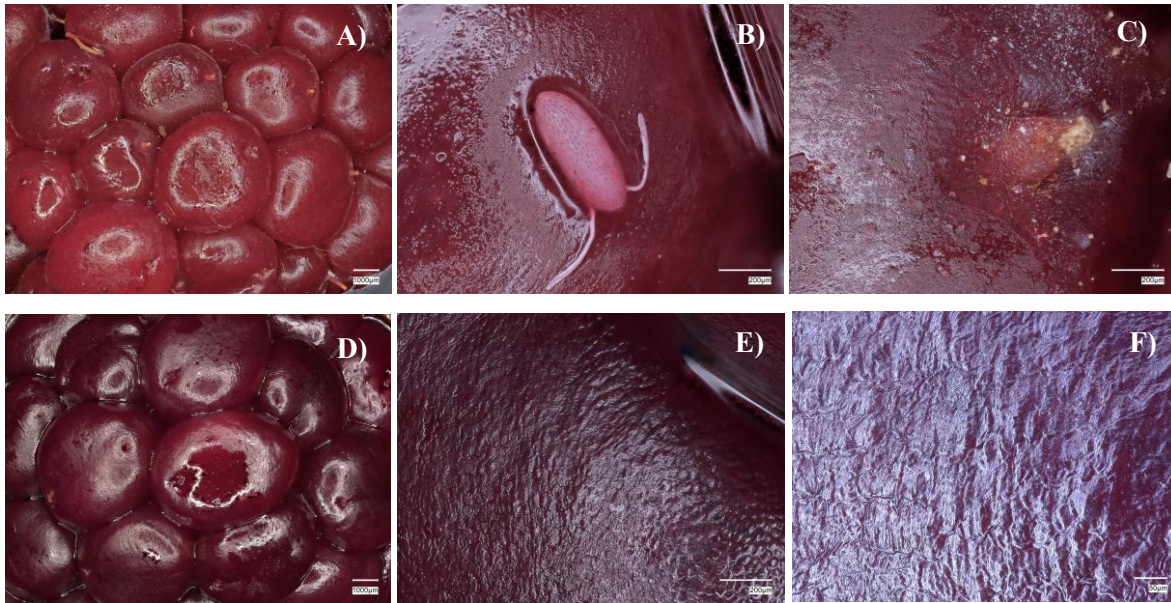


Figura 19. Zarzamoras sin recubrir en día cero a 20x, 200x y 50x, respectivamente. A, B y C) sin desinfectar; D, E, F) desinfectadas.

Después de siete días de almacenamiento a 25 °C (Figura 20), se observó un colapso estructural severo y una pérdida evidente de firmeza, atribuidos a la elevada tasa respiratoria y la deshidratación de la zarzamora. No obstante, en la Figura 20B se evidencia que la desinfección es un paso crítico, ya que las muestras sin este tratamiento presentaron crecimiento fúngico, lo que indica que la proliferación microbiana acelera la degradación en comparación con las frutas desinfectadas.

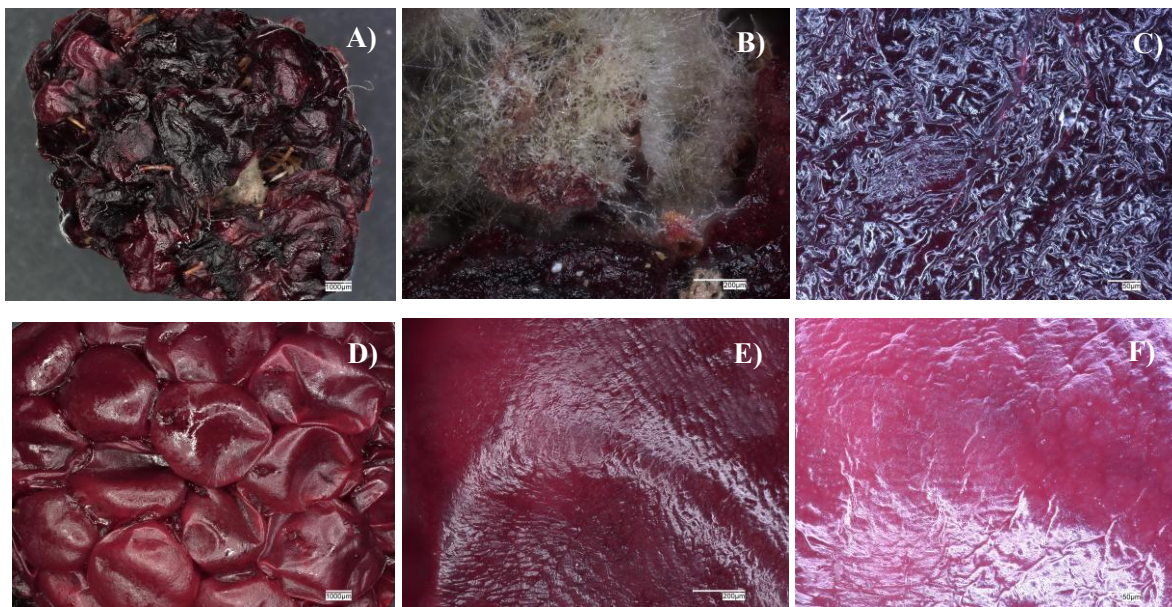


Figura 20. Zarzamoras sin recubrir durante 7 días de almacenamiento (25 °C) a 20x, 200x y 500x, respectivamente. A, B y C) sin desinfectar; D, E, F) desinfectadas.

A temperatura ambiente (Figura 21), la diferencia entre tratamientos fue más evidente luego de 14 días de almacenamiento. Las muestras control presentaron contracción del tejido, con una superficie opaca y rugosa, producto de una deshidratación acelerada (Figura 21B). En contraste, las muestras recubiertas mantuvieron una superficie continua y menos fragmentada, similar a la del día cero (Figura 21E). A 500x, se observa la capa correspondiente al recubrimiento, lo que reduce la exposición directa al ambiente. Esta preservación morfológica sustenta las diferencias significativas encontradas en los valores de luminosidad (L^*) y una menor pérdida de peso, donde el recubrimiento actuó como una barrera contra la pérdida de humedad, lo que además valida el cambio de cinética hacia un orden cero.

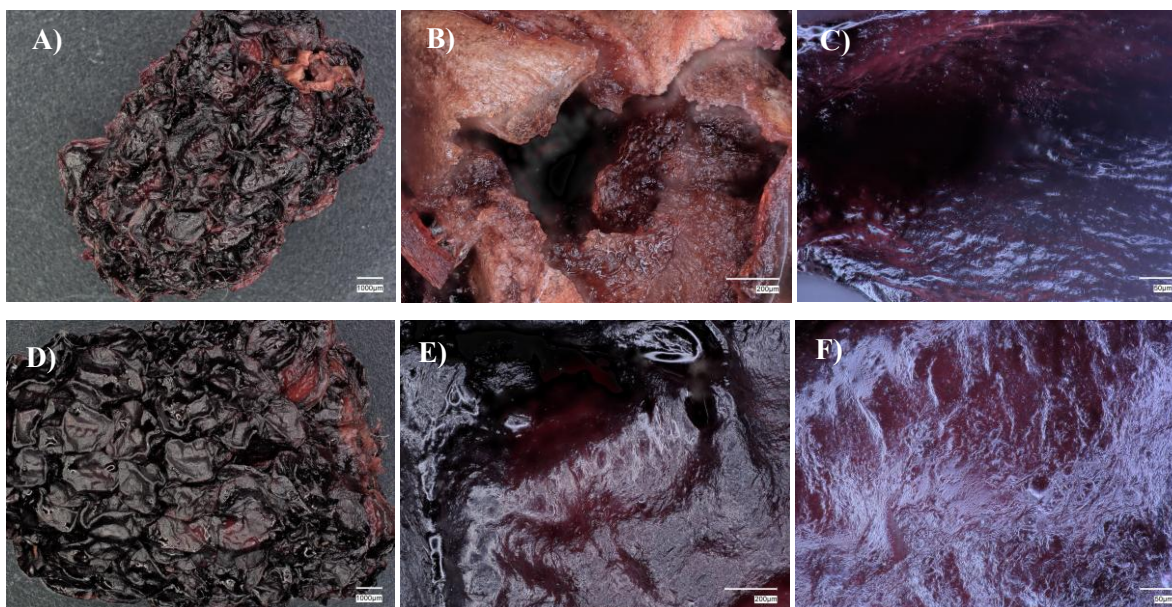


Figura 21. Zarzamoras durante 14 días de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C) a 20x, 200x y 500x, respectivamente. A, B y C) sin recubrir; D, E, F) recubiertas.

En condiciones de refrigeración (4°C), la combinación entre la baja temperatura y la aplicación del recubrimiento favoreció una conservación más prolongada de la zarzamora. En las muestras control (Figura 22A-B), se identificó el inicio de la pérdida de firmeza y una textura visual ligeramente contraída hacia el día 14, caracterizada por un arrugamiento moderado de la epidermis (Figura 22C).

Por el contrario, las muestras recubiertas presentaron una superficie más lisa y uniforme (Figura 22E-F). Este comportamiento demuestra que el recubrimiento permaneció íntegro y adherido al fruto, sin presentar fracturas debido a la humedad del refrigerador.

En estas condiciones, el recubrimiento potencia el efecto del frío, extendiendo la vida útil de la zarzamora al reducir eficazmente las tasas de transpiración y respiración. Estos hallazgos guardan consistencia con los resultados reportados en las propiedades fisicoquímicas, en los que el recubrimiento limita el intercambio gaseoso y la pérdida de vapor de agua.

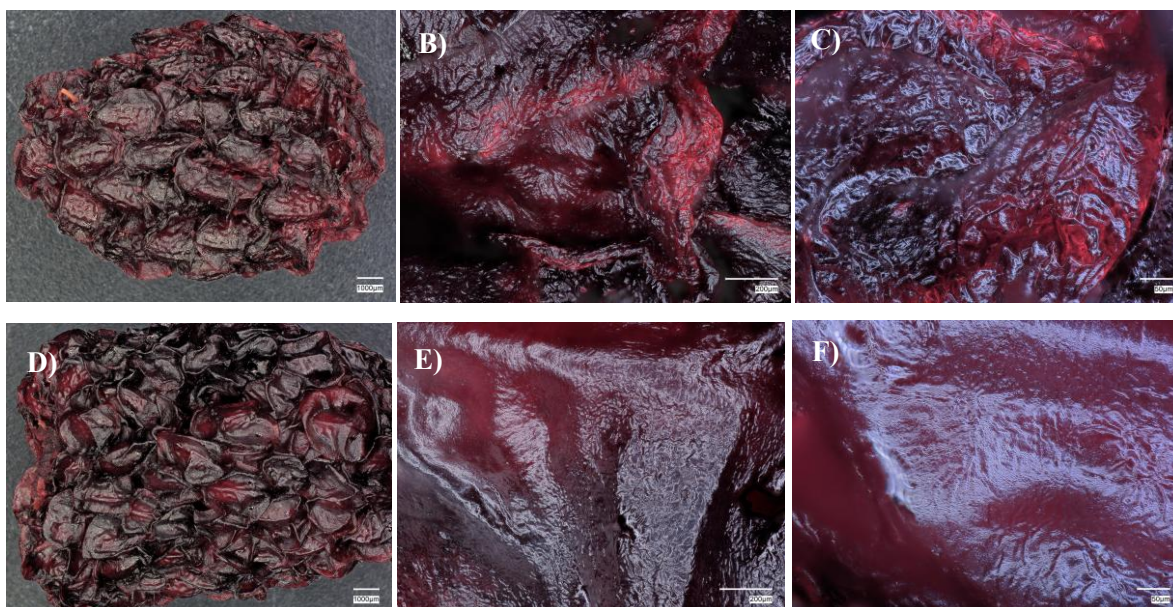


Figura 22. Zarzamoras durante 14 días de almacenamiento en refrigeración (4 °C) a 20x, 200x y 500x, respectivamente. A, B y C) sin recubrir; D, E, F) recubiertas.

En condiciones de congelación (-15°C), la morfología superficial se conservó en mayor medida, aunque con diferencias estructurales críticas entre tratamientos. Con 28 días de almacenamiento (Figura 23), las muestras control evidenciaron daños atribuibles a la formación de cristales de hielo, los cuales progresaron hacia mayores zonas de ruptura celular y desorganización interna a los 56 días (Figura 24). Particularmente, las micrografías mostradas en las Figuras 23B y 24C revelan la presencia de exudado y agua libre superficial en los controles, lo que confirma la pérdida de integridad celular.

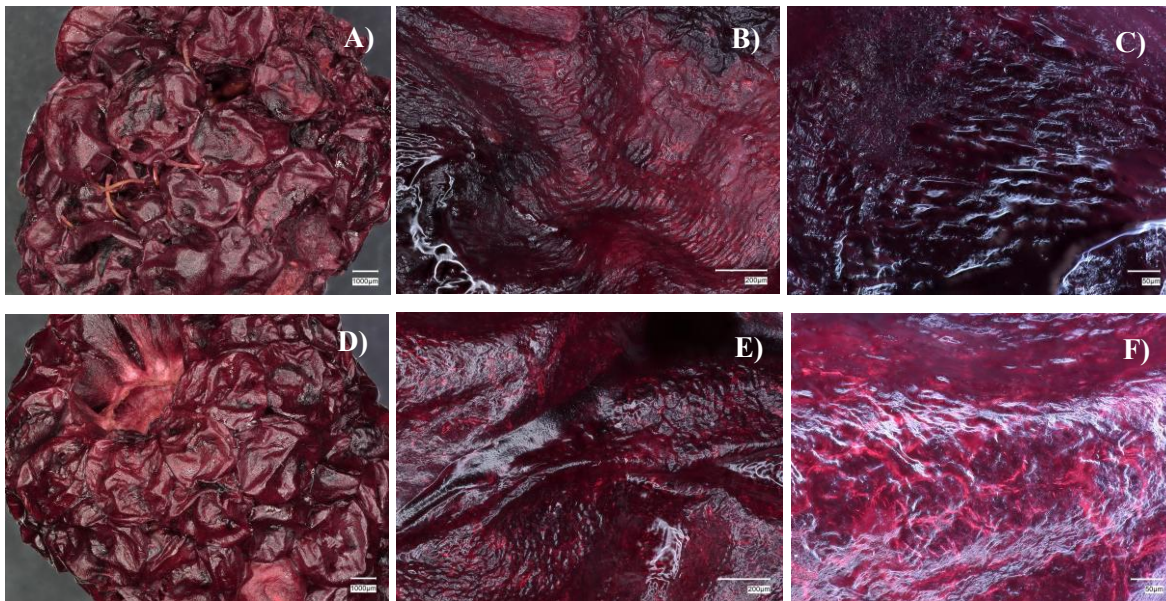


Figura 23. Zarzamoras durante 28 días de almacenamiento en congelación ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 20x, 200x y 500x, respectivamente. A, B y C) sin recubrir; D, E, F) recubiertas.

Por el contrario, tanto a 28 como a 56 días, las muestras recubiertas mantuvieron una superficie continua y con un menor grado de fractura. A diferencia de los controles, las figuras 23E y 24F mostraron una superficie libre de exudado, lo que sugiere que el recubrimiento actuó como una capa protectora que retiene el agua y previene las quemaduras por congelación.

Estos resultados confirman que, bajo congelación, el beneficio del recubrimiento no se manifiesta en los parámetros fisicoquímicos cuantificados, sino que resulta determinante para preservar la integridad estructural del fruto. Este comportamiento es consistente con las propiedades mecánicas y de barrera evaluadas, así como con la estabilidad térmica observada en el TGA de la película, lo que permite que el recubrimiento actúe como una barrera eficaz que evita la migración de agua hacia la superficie de la zarzamora y retiene la humedad interna.

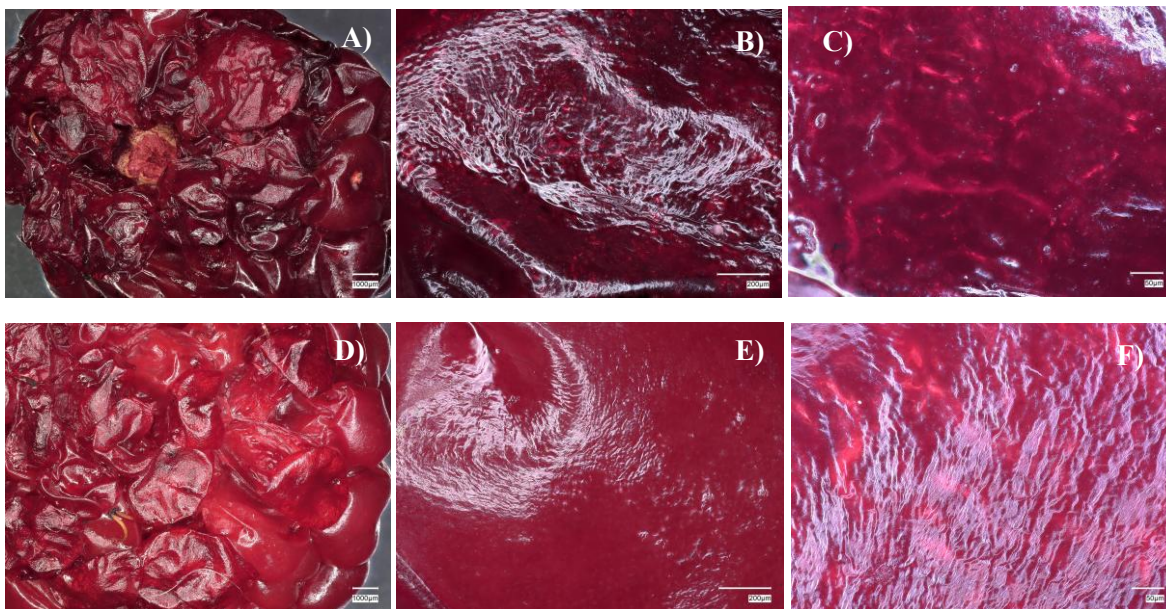


Figura 24. Zarzamoras durante 56 días de almacenamiento en congelación ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 20x, 200x y 500x, respectivamente. A, B y C) sin recubrir; D, E, F) recubiertas.

6. Conclusiones

El bagazo de cebada es un subproducto de la industria alimentaria que puede aprovecharse para obtener compuestos, como los arabinosilanos, que sirven como materia prima para la formulación de materiales biodegradables.

La solubilidad en agua de los arabinosilanos impide que, por sí solos, se utilicen como material de barrera para alimentos perecederos, como los frutos.

La formulación de una película composite (arabinosilano/ácido poliláctico, AX/PLA) permite obtener un material hidrófobo que puede utilizarse para el recubrimiento de alimentos perecederos.

El uso del ácido poliláctico en la formulación de la película composite mantuvo las propiedades mecánicas de esta, así como la biodegradabilidad, mejorando la permeabilidad al vapor de agua, lo que permite que sea utilizado como material de recubrimiento en frutos como la zarzamora, para incrementar la vida útil, sobre todo en condiciones ambientales ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de refrigeración ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Referencias

- Abotbina, W., Sapuan, S. M., Sultan, M. H., Alkbir, M. F. M., & Ilyas, R. A. (2021). Development and characterization of cornstarch-based bioplastics packaging film using a combination of different plasticizers. *Polymers*, 13(20), 3487. <https://doi.org/10.3390/polym13203487>
- Adbullah, C. J., Hafeez, M. A., Wang, Q., Farooq, S., Huang, Q., Tian, W., & Xiao, J. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1000116. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1000116>
- Alahmed, A., & Simsek, S. (2024). Improving biodegradable films from corn bran arabinoxylan for hydrophobic material and green food packaging. *Foods*, 13(12), 1914. <https://doi.org/10.3390/foods13121914>
- Almeida, V. S. D., Ito, V. C., Barretti, B. R. V., Demiate, I. M., Pinheiro, L. A., & Lacerda, L. G. (2022). Biodegradable films with the addition of nanofibers: a review focusing on raw materials and analysis. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 65, e22220141. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022220141>
- Amoriello, T., & Ciccoritti, R. (2021). Sustainability: Recovery and reuse of brewing-derived by-products. *Sustainability*, 13(4), 2355. <https://doi.org/10.3390/su13042355>
- Anderson, C., & Simsek, S. (2019). How do arabinoxylan films interact with water and soil? *Foods*, 8(6), 213. <https://doi.org/10.3390/foods8060213>
- Ascencio-Arteaga, A., Luna-Suárez, S., Cárdenas-Valdovinos, J. G., Oregel-Zamudio, E., Oyoque-Salcedo, G., Ceja-Díaz, J. A., Angoa-Pérez, M.V., & Mena-Violante, H. G. (2022). Shelf life of blackberry fruits (*Rubus fruticosus*) with edible coatings based on candelilla wax and guar gum. *Horticulturae*, 8(7), 574. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070574>
- Asghar, M. A., Ibrahim, F., Waseem, U., Naeem, S., Zafar, F., Fatima, K., Ali, I., Mehmood S. J., & Ahmed, F. (2025). Evaluation of physio-mechanical and antimicrobial properties of indigenously developed food packaging films from corn starch/chitosan incorporated with Fe-NPs and black tea extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 318, 145285. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145285>
- Bai, Z., Lan, H., Li, J., Geng, M., Luo, D., Feng, J., Li, X., & Zhang, Y. (2024). Recycling of wheat gluten wastewater: Recovery of arabinoxylan and application of its film in

- cherry and strawberry preservation. *Food Chemistry: X*, 22, 101415.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101415>
- Bangar, S. P., Gumber, S., Whiteside, W. S., & Phimolsiripol, Y. (2025). Arabinoxylan-based films and coatings for fresh produce: A review of emerging trends in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 310, 143097.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143097>
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), 412. <https://doi.org/10.3390/polym10040412>
- Belardi, I., Marconi, O., Marrocchi, A., & Musatto, S. I. (2025). Sequential extraction of protein, phenolic compounds, and oligosaccharides from brewer's spent grains. *Separation and Purification Technology*, 371, 133385.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133385>
- Belardi, I., Sarasini, F., Tirillò, J., Russo, P., De Francesco, G., Marconi, O., & Marrocchi, A. (2025). Brewers' Spent Grain-Derived Arabinoxylan as a Sustainable Filler for Enhanced PHBV Biocomposites. *Polymers*, 17(1), 114.
<https://doi.org/10.3390/polym17010114>
- Benedetto, E., Piazza, V., Lietti, L., Frassoldati, A., Faravelli, T., & Beretta, A. (2025). A comprehensive kinetic study of hemicellulose pyrolysis: TGA datasets and detailed quantitative speciation for xylan, glucomannan and arabinoxylan. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 193, 107477.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107477>
- Boukid, F. (2024). Comprehensive review of barley dietary fibers with emphasis on arabinoxylans. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 31, 100410.
<https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2024.100410>
- Caleb, O. J., & Belay, Z. A. (2023). Role of biotechnology in the advancement of biodegradable polymers and functionalized additives for food packaging systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 83, 102972.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102972>
- Cervantes-Ramirez, J. G., Vasquez-Lara, F., Sanchez-Estrada, A., Troncoso-Rojas, R., Heredia-Olea, E., & Ilsa-Rubio, A. R. (2022). Arabinoxylans release from brewers'

- spent grain using extrusion and solid-state fermentation with *Fusarium oxysporum* and the antioxidant capacity of the extracts. *Foods*, 11(10), 1415. <https://doi.org/10.3390/foods11101415>
- Chen, H., Chen, Z., Fu, Y., Liu, J., Lin, S., Zhang, Q., Liu, Y., Wu, D., Lin, D., Han, G., Wang, L., & Qin, W. (2019). Structure, antioxidant, and hypoglycemic activities of arabinoxylans extracted by multiple methods from triticale. *Antioxidants*, 8(12), 584. <https://doi.org/10.3390/antiox8120584>
- Chetrariu, A., & Dabija, A. (2020). Brewer's spent grains: Possibilities of valorization, a review. *Applied Sciences*, 10(16), 5619. <https://doi.org/10.3390/app10165619>
- Chin, Y. L., Keppler, J. K., Dinani, S. T., Chen, N. W., & Boom, R. (2024). Brewers' spent grain proteins: The extraction method determines the functional properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 94, 103666. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103666>
- Choksi, N., & Desai, H. (2017). Synthesis of biodegradable polylactic acid polymer by using lactic acid monomer. *Int. J. Appl. Chem*, 13(2), 377-384.
- Dantas, L. C. D. M., Silva-Neto, J. P. D., Dantas, T. S., Naves, L. Z., das Neves, F. D., & da Mota, A. S. (2016). Bacterial adhesion and surface roughness for different clinical techniques for acrylic polymethyl methacrylate. *International Journal of Dentistry*, 2016(1), 8685796. <https://doi.org/10.1155/2016/8685796>
- Dewi, R., Sylvia, N., Subhan, M., Kusuma, B. S., Ananda, A., Riza, M., Siregar, J. P., Chan, C. K., Cionita, T., & Abdelrahman, E. E. A. (2025). Effect of polylactic acid (PLA) blends on cellulose degradable plastics from the Lotus stem (*Nelumbo nucifera*). *Polymers*, 17(17), 2281. <https://doi.org/10.3390/polym17172281>
- Dhalsamant, K., Dalai, A., Pattnaik, F., & Acharya, B. (2025). Biodegradable carbohydrate-based films for packaging agricultural products—A review. *Polymers*, 17(10), 1325. <https://doi.org/10.3390/polym17101325>
- Dirpan, A., Ainani, A. F., & Djalal, M. (2023). A review on biopolymer-based biodegradable film for food packaging: trends over the last decade and future research. *Polymers*, 15(13), 2781. <https://doi.org/10.3390/polym15132781>

- Evyan, Y. C. Y., Liew, M. S., Patricia, J., Chong, M. Y., & Zairul, Z. A. (2022). Biodegradable food packaging and film: a short review. *Food Res*, 6(S1), 1-12. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(S1\).007](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(S1).007)
- Feng, C., Cai, C., Deehan, E. C., Jiang, S., Yang, M., Weng, Z., Long, J., Li, G., Li, J., Liu, J., & Zhang, Z. (2025). Evaluating the effects of intrinsic and isolated arabinoxylans on human gut microbiota and short-chain fatty acids: A systematic review and meta-analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 156, 104837. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104837>
- Flint, S. H., Brooks, J. D., & Bremer, P. J. (2000). Properties of the stainless steel substrate, influencing the adhesion of thermo-resistant streptococci. *Journal of Food Engineering*, 43(4), 235-242. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00157-0)
- Goyal, R., Verma, S., Vaish, M., Hussain, S., & Shekhar, A. (2015). Development of biodegradable biopolymer-based packaging films: A short review. *International Journal of Molecular Biology and Biochemistry*, 7(1), 29-33. <https://www.doi.org/10.33545/26646501.2025.v7.i1a.80>
- Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications. *Materials*, 15(17), 5899. <https://doi.org/10.3390/ma15175899>
- Herrera-Balandrano, D. D., Báez-González, J. G., Carvajal-Millán, E., Urías-Orona, V., Méndez-Zamora, G., & Niño-Medina, G. (2025). Feruloylated arabinoxylans from nixtamalized maize bran by-product as a baking ingredient: physicochemical, nutritional, and functional properties. *Polysaccharides*, 6(3), 59. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6030059>
- Hussain, M., Saeed, F., Niaz, B., Imran, A., & Tufail, T. (2022). Biochemical and structural characterization of ferulated arabinoxylans extracted from nixtamalized and non-nixtamalized maize bran. *Foods*, 11(21), 3374. <https://doi.org/10.3390/foods11213374>
- Jaguey-Hernández, Y., Tapia-Ignacio, C., Aguilar-Arteaga, K., González-Olivares, L. G., Castañeda-Ovando, E. P., Cruz-Cansino, N., Ojeda-Ramirez, D., & Castañeda-Ovando, A. (2022). Thermoplastic biofilms obtained from an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain: physicochemical characterization and thermal

- analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 14035-14047.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-02288-x>
- Kalak, T. (2022). The use of post-production waste generated in the brewing industry for the effective bioremoval of Cu (II) ions. *Desalination and Water Treatment*, 271, 124-142. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28814>
- Karlović, A., Jurić, A., Ćorić, N., Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2020). By-products in the malting and brewing industries—Re-usage possibilities. *Fermentation*, 6(3), 82. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030082>
- Kocira, A., Kozłowicz, K., Panasiewicz, K., Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Hortyńska, P. (2021). Polysaccharides as Edible Films and Coatings: characteristics and influence on fruit and vegetable quality—A review. *Agronomy*, 11(5), 813. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050813>
- Kola, V., & Carvalho, I. S. (2023). Plant extracts as additives in biodegradable films and coatings in active. *Food Bioscience*, 54, 102860. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102860>
- Lagüéns Pérez, S. (2018). *Planta de obtención de arabinosilanos a partir de bagazo de cerveza para la formulación de alimentos funcionales*. [Tesis de grado, Universidad de Valladolid]. UVaDoc. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/30928>
- Lamour, G., Hamraoui, A., Buvailo, A., Xing, Y., Keuleyan, S., Prakash, V., Eftekhari-Bafrooei, A., & Borguet, É. (2010). Contact angle measurements using a simplified experimental setup. *Journal of Chemical Education*, 87(12), 1403-1407. <https://doi.org/10.1021/ed100468u>
- Lee, Y., Yusof, Y., & Pui, L. (2020). Development of milk protein edible films incorporated with *Lactobacillus rhamnosus* GG. *BioResources*, 15(3), 6960-6973. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.6960-6973>
- Leya, B., Franklin, S. R., Pragalyaashree, M. M., Monicka, A. A., Tiroutchelbame, D., Blessy, C., & Blessie, F. R. (2024). Biopolymer-based edible packaging: a critical review on the biomaterials, formation, and applications on food products. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 12(6), 42-57. <https://dx.doi.org/10.7324/JABB.2024.145531>

- Liffourrena, A., Heredia, R., Challier, C., & Boeris, P. (2024). Exploring barley bagasse as affordable biosorbent for efficient copper and zinc removal from synthetic solutions and effluent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(10), 8941-8954. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06223-1>
- Liu, Y., Sun, B., Wang, Z., & Ni, Y. (2016). Mechanical and water vapor barrier properties of bagasse hemicellulose-based films. *BioResources*, 11(2), 4226-4236. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.4226-4236>
- Lv, S., Zhang, Y., & Tan, H. (2019). Thermal and thermo-oxidative degradation kinetics and characteristics of poly (lactic acid) and its composites. *Waste Management*, 87, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.027>
- Lynch, K. M., Steffen, E. J., & Arendt, E. K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(4), 553-568. <https://doi.org/10.1002/jib.363>
- Matar, G. H., & Andac, M. (2025). Recent advances in sustainable biopolymer films incorporating vanillin for enhanced food preservation and packaging. *Polymer Bulletin*, 82(8), 2751-2777. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05661-2>
- Mederos-Torres, Y., Bernabé-Galloway, P., & Ramírez-Arrebato, M. Á. (2020). Películas basadas en polisacáridos como recubrimientos biodegradables y su empleo en la postcosecha de los frutos. *Cultivos tropicales*, 41(3), e09. Recuperado a partir de <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1563>
- Meng, Y., Zhao, H., Dong, C., He, Z., & Long, Z. (2024). Eco-friendly and flexible polysaccharide-based packaging films for fruit preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136132. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136132>
- Michiels, P., Debyser, W., Langenaeken, N. A., & Courtin, C. M. (2024). Impact of barley selection and mashing profile on the arabinoxylan content and structure in beer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 280, 136031. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136031>
- Miteluț, A. C., Popa, E. E., Drăghici, M. C., Popescu, P. A., Popa, V. I., Bujor, O. C., Ion, V. A., & Popa, M. E. (2021). Latest developments in edible coatings on minimally

- processed fruits and vegetables: A review. *Foods*, 10(11), 2821. <https://doi.org/10.3390/foods10112821>
- Morales-Ortega, A., Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Gardea-Béjar, A., Torres-Chávez, P., López-Franco, Y., Rascón-Chu, A., & Lizardi-Mendoza, J. (2013). Los arabinoxilanos ferulados de cereales: Una revisión de sus características fisicoquímicas y capacidad gelificante. *Revista fitotecnica mexicana*, 36(4), 439-446. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.4.439>
- Moreno, B. L., & Oyola, Y. A. (2016). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (*Rubus alpinus* Macfad). *Acta agronómica*, 65(2), 130-136. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45587>
- Morillo-Robles, C., Briones-García, J. I., Segovia-Cáceres, S., & Toledo-Castillo, N. D. R. (2023). Degradación de los componentes químicos presentes en los alimentos por influencia de la temperatura. *Polo del Conocimiento*, 8(8), 1736-1753. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i8.5936>
- Nadeem, M., Leaks, K., Abdullah, A., Adamson Felix, J. S., & Shahid, M. A. (2025). Enhancing postharvest quality of blackberries: Impact of sonicated and microwave-assisted pasteurized edible coating gels at different storage temperatures. *Gels*, 11(4), 243. <https://doi.org/10.3390/gels11040243>
- Naibaho, J., & Korzeniowska, M. (2021). Brewers' spent grain in food systems: Processing and final products quality as a function of fiber modification treatment. *Journal of Food Science*, 86(5), 1532-1551. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15714>
- Naibaho, J., Korzeniowska, M., Wojdyło, A., Figiel, A., Yang, B., Laaksonen, O., Foste, M., Vilu, R., & Viiard, E. (2021). Fiber modification of brewers' spent grain by autoclave treatment to improve its properties as a functional food ingredient. *Lwt*, 149, 111877. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111877>
- Naibaho, J., Bobak, Ł., Pudło, A., Wojdyło, A., Andayani, S. N., Pangestika, L. M. W., Korzeniowska, M., & Yang, B. (2023). Chemical compositions, antioxidant activities and techno-functionality of spent grain treated by autoclave treatment: evaluation of water and temperature levels. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 2130-2140. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16042>

- Naibaho, J., Setiawan, R. D., & Korzeniowska, M. (2025). Biological properties of bioactive compounds from brewers' spent grain: Current trends, challenges, and perspective. *Current Opinion in Food Science*, 62, 101268. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101268>
- Nyhan, L., Sahin, A. W., Schmitz, H. H., Siegel, J. B., & Arendt, E. K. (2023). Brewers' spent grain: An unprecedented opportunity to develop sustainable plant-based nutrition ingredients addressing global malnutrition challenges. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(28), 10543-10564. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02489>
- Oliver, I., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2024). Thermal decomposition of bio-based plastic materials. *Molecules*, 29(13), 3195. <https://doi.org/10.3390/molecules29133195>
- Pasquet, P. L., Villain-Gambier, M., & Trébouet, D. (2024). By-product valorization as a means for the brewing industry to move toward a circular bioeconomy. *Sustainability*, 16(8), 3472. <https://doi.org/10.3390/su16083472>
- Perera, K. Y., Jaiswai, A. K., & Jaiswai, S. (2023). Biopolymer-based sustainable food packaging materials: challenges, solutions, and applications. *Foods*, 12(12), 2422. <https://doi.org/10.3390/foods12122422>
- Pérez-Alva, A., Martín-del-Campo, S. T., & Baigts-Allende, D. K. (2025). Brewer's Spent Grain (BSG) as an ingredient for leavened bread making: challenges and opportunities. *Journal of Cereal Science*, 124, 104223. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104223>
- Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Castañeda-Ovando, A., Pérez-Moreno, F., Aguilar-Arteaga, K., Álvarez-Romero, G. A., & Téllez-Jurado, A. (2019). Physicochemical characterization of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain and its application as a release matrix for caffeine. *Food Research International*, 116, 1020-1030. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.041>
- Perez-Vazquez, A., Barciela, P., Carpena, M., & Prieto, M. A. (2023). Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality. *Foods*, 12(19), 3570. <https://doi.org/10.3390/foods12193570>
- Pillai, A. R., Eapen, A. S., Zhang, W., & Roy, S. (2024). Polysaccharide-based edible biopolymer-based coatings for fruit preservation: A review. *Foods*, 13(10), 1529. <https://doi.org/10.3390/foods13101529>

- Popa, E. E., Rapa, M., Popa, O., Mustatea, G., Popa, V. I., Mitelut, A. C., & Popa, M. E. (2017). Polylactic acid/cellulose fibres based composites for food packaging applications. *Mater. Plast*, 54, 673-677. <https://doi.org/10.37358/MP.17.4.4923>
- Raza, M. A., Saeed, F., Afzaal, M., Imran, A., Niaz, B., Hussain, M., Rasheed, A., Mukhtar, M. K., Waleed, M., & Al Jbawi, E. (2022). Comparative study of cross-and uncross-linked arabinoxylans extracted from maize bran with special reference to their structural and antioxidant potential. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2495-2504. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2143524>
- Robert, P., Marquis, M., Barron, C., Guillon, F., & Saulnier, L. (2005). FT-IR investigation of cell wall polysaccharides from cereal grains. Arabinoxylan infrared assignment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(18), 7014-7018. <https://doi.org/10.1021/jf051145y>
- Rodríguez-Viveros, N., Paz-Samaniego, R., Hernández-Hernández, A. A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Extracción de arabinoxilanos de subproductos agroindustriales adaptada a la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 774-784. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.100>
- Rojas-Lema, S., Mellinas, C., Jiménez, A., Garrigós, M. C., Garcia-Garcia, D., & Balart, R. (2024). Enhanced properties of methyl hydroxyethyl cellulose films with arabinoxylans-rich extract from brewer's spent grain. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 8, 100624. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100624>
- Sajjadi, S. E., Shokoohinia, Y., & Moayedi, N. S. (2012). Isolation and identification of ferulic acid from aerial parts of *Kelussia odoratissima* Mozaff. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 7(4), 159-162. <https://doi.org/10.5812/jjnpp.4861>
- Salvada, J., Alke, B., Brazinha, C., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2022). Development and characterisation of arabinoxylan-based composite films. *Coatings*, 12(6), 813. <https://doi.org/10.3390/coatings12060813>
- Samaniego, I., Brito, B., Viera, W., Cabrera, A., Llerena, W., Kannangara, T., Vilcacundo, R., Angós, I., & Carrillo, W. (2020). Influence of the maturity stage on the phytochemical

- composition and the antioxidant activity of four Andean blackberry cultivars (*Rubus glaucus* Benth) from Ecuador. *Plants*, 9(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/plants9081027>
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2015). Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch. *Polymers*, 7(6), 1106-1124. <https://doi.org/10.3390/polym7061106>
- Shakour, N., Khoshkhoo, Z., Basti, A. A., Khanjari, A., & Shotorbani, P. M. (2021). Investigating the properties of PLA-nanochitosan composite films containing Ziziphora Clinopodioides essential oil and their impacts on oxidative spoilage of Oncorhynchus mykiss fillets. *Food Science & Nutrition*, 9(3), 1299-1311. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2053>
- Singh, G. P., Bangar, S. P., Yang, T., Trif, M., Kumar, V., & Kumar, D. (2022). Effect on the properties of edible starch-based films by the incorporation of additives: A review. *Polymers*, 14(10), 1987. <https://doi.org/10.3390/polym14101987>
- Singh, S., Habib, M., Rao, E. S., Kumar, Y., Bashir, K., Jan, S., & Jan, K. (2025). A comprehensive overview of biodegradable packaging films: Part I—sources, additives, and preparation methods. *Discover Food*, 5(41), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00303-y>
- Steier, J., Kupetz, M., & Becker, T. (2023). Influence of hydrothermal treatment of brewer's spent grain on the concentration and molecular weight distribution of 1, 3-1, 4-β-D-glucan and arabinoxylan. *Foods*, 12(20), 3778. <https://doi.org/10.3390/foods12203778>
- Sun, Y., Yang, W., Shi, H., Tanveer, S. K., & Hai, J. (2022). Past, present, and future perspectives of biodegradable films for soil: A 30-year systematic review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 1006388. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1006388>
- Temesgen, S., Rennert, M., Tesfaye, T., Großmann, L., Kuehnert, I., Smolka, N., & Nase, M. (2024). Thermal, morphological, and structural characterization of starch-based biopolymers for melt spinnability. *e-Polymers*, 24(1), 20240025. <https://doi.org/10.1515/epoly-2024-0025>

- Upadhyaya, P., Bhattacharjee, M., & Haloi, D. J. (2022). Biodegradable polymers and their classification: A brief review. *Chemical Science & Engineering Research*, 4(9), 19-28. <https://doi.org/10.36686/Ariviyal.CSER.2022.04.09.050>
- Vázquez-Alfaro, M., Aguilar-Ávila, J., & Palacios-Rangel, M. I. (2021). Cadena de valor de la industria cervecera en México. *Nova scientia*, 13(27). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2778>
- Villegas, C., & Albarracín, W. (2016). Aplicación y efecto de un recubrimiento comestible sobre la vida útil de la mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth). *Vitae*, 23(3), 202-209. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v23n3a06>
- Virdi, A. S., Mahajan, A., Devraj, M., & Sangui, R. (2025). Brewers' Spent Grains: Techno-Functional Challenges and Opportunity in the Valorization for Food Products. *LWT*, 227, 117785. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117785>
- Weng, V., Brazinha, C., Coelho, I. M., & Alves, V. D. (2021). Decolorization of a corn fiber arabinoxylan extract and formulation of biodegradable films for food packaging. *Membranes*, 11(5), 321. <https://doi.org/10.3390/membranes11050321>
- Weng, V., Gago, D., Brazinha, C., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2025). Decolorization of corn fiber arabinoxylan extract with (MN102) resin: Adsorption performance and film-forming capacity. *Polymers*, 17(15), 2128. <https://doi.org/10.3390/polym17152128>
- Westlake, J. R., Tran, M. W., Jiang, Y., Zhang, X., Burrows, A. D., & Xie, M. (2023). Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. *Sustainable Food Technology*, 1(1), 50-72. <https://doi.org/10.1039/D2FB00004K>
- Yao, H., Wang, Y., Yin, J., Nie, S., & Xie, M. (2021). Isolation, physicochemical properties, and structural characteristics of arabinoxylan from hull-less barley. *Molecules*, 26(10), 3026. <https://doi.org/10.3390/molecules26103026>
- Yilmaz-Turan, S., Jiménez-Quero, A., Menzel, C., de Carvalho, D. M., Lindström, M. E., Sevastyanova, O., Moriana, R., & Vilaplana, F. (2020). Bio-based films from wheat bran feruloylated arabinoxylan: Effect of extraction technique, acetylation and feruloylation. *Carbohydrate polymers*, 250, 116916. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116916>

- Yuniarto, K., Purwanto, Y. A., Purwanto, S., Welt, B. A., Purwadaria, H. K., & Sunarti, T. C. (2017). Infrared and Raman studies on polylactide acid and polyethylene glycol-400 blend. In AIP conference proceedings. *AIP Publishing LLC*, 1725(1), 020101. <https://doi.org/10.1063/1.4945555>
- Zeko-Pivač, A., Tišma, M., Žnidaršič-Plazl, P., Kulisic, B., Sakellaris, G., Hao, J., & Planinić, M. (2022). The potential of brewer's spent grain in the circular bioeconomy: State of the art and future perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 870744. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.870744>
- Zhao, S., Chen, S., Ren, S., Li, g., Song, K., Guo, J., Liu, S., He, J., & Zhou, X. (2023). Preparation and Performance of *Pueraria lobata* Root Powder/Polylactic Acid. *Journal of Renewable Materials*, 11(6), 2531. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.026066>
- Zhao, Y., & Takhar, P. S. (2017). Freezing of foods: Mathematical and experimental aspects. *Food engineering reviews*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9157-z>
- Zhao, Y., Sun, H., Yang, B., Fan, B., Zhang, H., & Weng, Y. (2021). Enhancement of mechanical and barrier property of hemicellulose film via crosslinking with sodium trimetaphosphate. *Polymers*, 13(6), 927. <https://doi.org/10.3390/polym13060927>
- Zhou, W., He, Y., Liu, F., Liao, L., Huang, X., Li, R., Zou, Y., Zhou, L., Zou, L., Liu, Y., Ruan, R., & Li, J. (2021). Carboxymethyl chitosan-pullulan edible films enriched with galangal essential oil: Characterization and application in mango preservation. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117579. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117579>
- Zia-UI-Haq, M., Riaz, M., De Feo, V., Jaafar, H. Z., & Moga, M. (2014). *Rubus fruticosus* L.: constituents, biological activities and health related uses. *Molecules*, 19(8), 10998-11029. <https://doi.org/10.3390/molecules190810998>