



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**“RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES POR BICAPA ADICIONADOS CON
Lactiplantibacillus plantarum E INULINA PARA MEJORAR LAS
PROPIEDADES FUNCIONALES DE *Malus domestica* VAR. “GOLDEN
DELICIOUS” Y EXTENDER SU VIDA ÚTIL”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA

GADIEL PEREA HUERTA

ASESORA

DRA. MA. DEL CARMEN HERNÁNDEZ JAIMES

CO-ASESOR

DRA. LETICIA BUENDÍA GONZÁLEZ



Marzo 2026

Índice

Dedicatoria	4
Agradecimientos	4
Abreviaturas	4
Resumen	5
1.- Introducción	5
2.- Marco teórico	7
2.1.- Plásticos	7
2.2.- Bioplásticos	7
2.3.- Recubrimientos comestibles	8
2.3.1.-Métodos para la elaboración de recubrimientos comestibles	9
2.3.1.1.-Método de bicapa	10
2.3.2.-Principales materiales para su elaboración	11
2.3.2.1.-Proteínas	11
2.3.2.2.- Gelatina	11
2.3.2.3.-Biopolímeros	12
2.3.3.2.1-Alginato de sodio	12
2.3.3.2.2.-Pectina	14
2.3.3.3.-Agentes plastificantes	15
2.3.3.3.1.-Glicerol	15
2.4.-Principales activos adicionados a los recubrimientos comestibles	16
2.4.1.-Probióticos	16
2.4.1.1.- Lactiplantibacillus plantarum	17
2.4.2.-Prebióticos	18
2.4.2.1.-Inulina	18
2.5.- Alimento funcional	19
2.5.1.- Simbióticos	20
2.6.-Microbiota intestinal	21
2.7.-Propiedades de los recubrimientos comestibles	21
2.7.1.-Propiedades físicas de los recubrimientos comestibles	21
2.7.1.1.-Color	21

2.7.1.2.-Espesor	22
2.7.2.-Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos comestibles	22
2.7.2.1.- Solubilidad	22
2.7.2.2.- Permeabilidad al vapor de agua	23
2.7.3.-Propiedades texturales de los recubrimientos comestibles	23
2.7.3.1.-Dureza	23
2.8 Aplicaciones de los recubrimientos en alimentos	23
2.8.1 <i>Malus domestica</i>	24
2.9. Análisis sensorial	24
3.-Justificación	24
4.-Hipótesis	25
5.-Objetivos	25
6.- Materiales y métodos	25
6.1.-Materiales	25
6.2.-Métodos	26
6.2.1.-Preparación del cultivo madre y condiciones de crecimiento	26
6.3.-Elaboración de los recubrimientos	26
6.3.1.-Solución formadora de la primera capa	26
6.3.2.-Solución formadora de la segunda capa	27
6.4.-Aplicación de los recubrimientos	27
6.5.-Conteo viable de microorganismos	27
6.6.-Caracterización de los recubrimientos	28
6.6.1.- Medición de color	28
6.6.2.-Medición del espesor	28
6.6.3.- Medición de la solubilidad	28
6.6.4.- Medición de la permeabilidad al vapor de agua.	28
6.7.- Determinación de la vida útil de las manzanas	29
6.7.1.- Medición de la dureza	29
6.7.2.- Determinación de pérdida de peso	29
6.8.-Análisis sensorial	29
7.-Resultados y discusión	29
7.1.-Caracterización de los recubrimientos	29
7.1.1.- Determinación de color	30

7.1.2.- Determinación del espesor	34
7.1.3.- Determinación de la solubilidad	35
7.1.4.- Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.	36
7.2.-Vida útil de las manzanas recubiertas	38
7.2.1.- Determinación del porcentaje en el cambio de dureza	38
7.2.2.-Determinación de pérdida de peso	41
7.3.-Conteo viable de microorganismos	44
7.4.-Análisis sensorial	46
8.-Conclusiones	49
9.-Perspectivas	50
10.-Referencias	50

Abreviaturas

Sigla	Nombre
GT	Gelatina
PT	Pectina
AS	Alginato de Sodio
SR	Sin recubrir
SPP	Sin prebiótico ni probiótico
CP	Con probiótico
CPP	Con prebiótico y probiótico
1C	Una capa
2C	Dos capas
WVTR	Tasa de transmisión del vapor de agua
WVP	Permeabilidad al vapor de agua
IP	Índice de pardeamiento
BAL	Bacterias ácido-lácticas
AM	Alto metoxilo
BM	Bajo metoxilo
AMB	Ambiente
REF	Refrigeración

Resumen

El indiscriminado uso de los empaques plásticos aunado a la creciente contaminación ambiental y la demanda de alimentos con mayores propiedades nutrimentales ha dirigido la investigación en materia de alimentos al desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles, en donde surgen los recubrimientos comestibles enriquecidos con distintos aditivos. Estos suelen probarse con mezclas de aditivos simples generalmente en fruta fresca mínimamente procesada, sin embargo, la interacción que estos pueden tener, tanto entre sus aditivos como con el fruto mismo define las propiedades de ambos (recubrimiento y alimento), por lo que el objetivo de esta investigación fue observar el efecto de distintos recubrimientos comestibles adicionados con *Lactiplantibacillus plantarum* e inulina por el método de bicapa sobre cortes de manzana, determinando sus propiedades funcionales y el efecto en la vida útil del fruto en condiciones de temperatura ambiente y de refrigeración, para esto se realizaron análisis fisicoquímicos, texturales, sensoriales y microbiológicos. En ellos se encontró que para la vida útil del fruto los recubrimientos con mezcla de *L. plantarum* e inulina fueron los que obtuvieron mejores desempeños en la retención de agua, con pérdidas menores al 80% del peso original, la disminución de la permeabilidad al vapor de agua, los cambios de color, y la aceptabilidad sensorial, con puntuaciones < 60%, mientras que, para la parte funcional, la viabilidad de *L. plantarum* fue mejor en los recubrimientos sin presencia de inulina, con una concentración sobre el umbral de 6.0Log UFC. Los hallazgos sugieren que los recubrimientos por el método de bicapa enriquecidos con microorganismos probióticos y aditivos prebióticos constituyen una estrategia efectiva para incrementar el valor funcional y aumentar la durabilidad de las frutas procesadas, abriendo posibilidades para su aplicación en la industria alimentaria como alimentos funcionales y empaques activos sostenibles.

Palabras clave: Recubrimientos comestibles, *Lactiplantibacillus. plantarum*, inulina, propiedades funcionales, vida útil.

1.- Introducción

El creciente uso de plásticos derivados de combustibles fósiles se presenta como uno de los principales problemas de contaminación ambiental, tan solo, en la industria del envasado, el área de alimentos representa el 50% de los plásticos derivados de combustibles fósiles, los cuales persisten en el medio ambiente y al descomponerse se convierten en microplásticos, que pueden entrar fácilmente en la cadena alimenticia al ser consumidos, por ejemplo, por los peces, lo que provoca su bioacumulación (Ncube et al., 2020). Por ello, se han buscado alternativas biodegradables y sustentables que cumplan con los mismos requisitos que los empaques plásticos convencionales.

Una buena opción son los recubrimientos comestibles, los cuales, son matrices elaboradas a partir de compuestos orgánicos como polisacáridos, proteínas, lípidos y sus derivados (Gol et al.,

2013), lo que los dota de diversas características dependiendo del componente primario de la matriz, tales como: fácil distribución y transporte; protección contra daño externo, sin interactuar con el entorno interno del producto, ya sea daño físico (golpes), químico (temperatura y pH) o biológico (daños causados por microorganismos, insectos y animales); prolongación de la vida útil de los productos almacenados, al reducir la pérdida de peso; disminución de la respiración y las tasas de reacción oxidativa o incluso la omisión de los trastornos fisiológicos de los productos frescos, (Quirós-Sauceda et al., 2014; Matloob et al., 2023) y al ser elaborados a partir de compuestos naturales, resultan ser biodegradables (Pavlath y Orts, 2009).

Los recubrimientos pueden ser aplicados sobre el alimento de diversas maneras; por aspersión, electroaspersión, barnizado, a partir de películas o por inmersión, siendo esta última una alternativa para generar múltiples capas en un mismo alimento con propiedades definidas en cada capa, dependiendo de la necesidad del alimento a cubrir sumándole un valor agregado a los productos alimenticios convencionales como las frutas. En esta instancia, se han aplicado los recubrimientos comestibles en frutas frescas y troceadas, como en peras (Hira et al. 2022), rodajas de manzana (Wong et al., 2021), papayas frescas (Brasil et al., 2012) y fresas (Yan et al., 2019).

Además, en la matriz del recubrimiento se pueden adicionar diversos compuestos, como antioxidantes, antimicrobianos, fitoquímicos, prebióticos y probióticos, estos últimos aportan múltiples beneficios a la salud, ya que tienen una estrecha relación con la regulación de la microbiota humana intestinal (Guerra, 2025).

Los probióticos están definidos como “microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren un beneficio para la salud del huésped” (Hill et al., 2014). Los probióticos pueden ajustar la estructura de los microorganismos intestinales humanos e inhibir la colonización de bacterias patógenas en el intestino. Además, muestran capacidad para ayudar al organismo a construir una capa protectora saludable de la mucosa intestinal, potenciando el efecto de barrera intestinal y mejorando la inmunidad. El crecimiento y la reproducción de los probióticos se ve favorecida por la presencia de prebióticos, los cuales son ingredientes, en su mayoría polisacáridos, que no pueden ser digeridos y absorbidos por el cuerpo humano y pueden contribuir al crecimiento o reproducción de microorganismos activos en el huésped. Tienen la función de mejorar la regulación de la inmunidad, resistir a los patógenos, influir en el metabolismo, aumentar la absorción de minerales y mejorar la salud (Sbehat et al., 2022). Uno de los prebióticos más empleados en alimentos funcionales es la inulina (tipo fructano), esta es un polisacárido soluble en agua no digerible (You et al. 2022).

Por lo antes mencionado, en el presente trabajo se propuso la elaboración de recubrimientos comestibles adicionados con probióticos y prebióticos en manzanas por el método de bicapa adicionados con *Lactobacillus plantarum* e inulina para mejorar las propiedades funcionales de *Malus domestica* Var, Golden Delicious y extender su vida útil.

2.- Marco teórico

2.1.- Plásticos

La contaminación ambiental ha emergido como uno de los principales problemas en los últimos años causada por la producción de empaques y envases de plástico sintético, se estima que 8.3 millones de toneladas de residuos plásticos mal gestionados terminan en los océanos anualmente. La producción mundial superó los 390 millones de toneladas en el 2022, con tasas de reciclaje limitadas y una creciente dependencia de los productos de un solo uso, como lo son los envases alimenticios y se estima que esta cifra aumente, superando los 1100 millones de toneladas para el 2050, entre estos polímeros sintéticos podemos encontrar el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el cloruro de polivinilo y el tereftalato de polietileno, los cuáles son inorgánicos y actúan como contaminantes ambientales en sí mismos, sirviendo como vectores de transporte de diversos tipos de productos químicos, y al ser no biodegradables, se acumulan en lugar de descomponerse, siendo los tratamientos térmicos destructivos la única forma de eliminarlos permanentemente, como la combustión o la pirólisis (Priyadarshi & Rhim, 2020). Estudios recientes sugieren que, a escala mundial, solo el 9 % de todas las materias primas se reutilizan, reciclan o compostan tras su uso (de Wit et al., 2018; Ceballos-Santos et al., 2024; Priyadarshi & Rhim, 2020), incluso estos tratamientos para su eliminación, sumados con su amplia presencia en la vida diaria ha conducido a la degradación parcial y la generación de microplásticos, estos se definen como “partículas sólidas sintéticas o matrices poliméricas, con forma regular o irregular y con un tamaño que varía de 1 μm a 5 mm, de origen de fabricación primaria o secundaria, que son insolubles en agua, estos se han detectado de forma ubicua en una amplia gama de formas, polímeros, tamaños y concentraciones, los cuales se filtran debido a su fragmentación en suelos y mantos acuíferos, además de estar presentes en la atmósfera debido a la quema de plásticos en entornos urbanos, encontrándose además en los entornos de agua marina, agua dulce, agroecosistemas, biota y alimentos, su acumulación se ha identificado como uno de los desafíos de sostenibilidad más apremiantes del siglo XXI en el mundo, además de emerger como un problema de salud pública debido a su presencia en el cuerpo humano y su interferencia con procesos hormonales (Batcham et al., 2025; Campanale et al., 2020; Ceballos-Santos et al., 2024; Priyadarshi & Rhim, 2020; ; Najahi et al., 2025).

En México, se reporta que el 50% de plástico producido anualmente corresponde a plástico de un solo uso, como lo es el envasado de los alimentos, ya que este desempeña un papel fundamental en la preservación de la calidad de los alimentos, garantizando la seguridad y facilitando la distribución, la comercialización y reduciendo así la pérdida y el desperdicio de alimentos (Kumari, 2025; Projectmanager, 2024; Ceballos-Santos et al., 2024) por ello es primordial el desarrollo de alternativas que generen un impacto ambiental y de salud menor o nulo.

2.2.- Bioplásticos

Todos los bioplásticos son elaborados a partir de fuentes naturales, pero es primordial establecer la división que existe entre la familia de bioplásticos, tenemos a los biodegradables (o bio basados) y a los no biodegradables, los bio-basados dependen de la variación de las tasas y rutas de biodegradación. Dichos plásticos incluyen ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), celulosa y almidón, entre otros. Por otro lado, los bioplásticos no biodegradables incluyen bio-tereftalato de polietileno (bio-PET), poliol-poliuretano y bio-polietileno (Bio-PE), es importante mencionar que las rutas de degradación y de reciclaje varían entre bioplásticos debido a su composición primaria (Huang et al., 2025; Narancic et al., 2020; Aziz et al., 2025).

La investigación se ha dirigido al desarrollo de envases biodegradables para su aplicación en la industria alimenticia. Estos materiales biodegradables están diseñados para reducir el impacto medioambiental negativo de los plásticos, al tiempo que aumentan la vida útil, la calidad, las propiedades y la seguridad de los alimentos envasados. Los envases biodegradables suelen fabricarse a partir de biopolímeros alimentarios (Wang, et al., 2022). Uno de los grupos más utilizados es el correspondiente a los polisacáridos, ya sean solos o en conjunto con otros biopolímeros; los polisacáridos (hidratos de carbono complejos) se utilizan en la preparación de envases comestibles. Los polisacáridos se encuentran de forma natural en la naturaleza y pueden tener distintos orígenes: animal (por ejemplo, quitina y quitosano), vegetal (por ejemplo, almidón y pectina), marino (por ejemplo, alginato) y microbiano (por ejemplo, goma xantana y pululano) (Barbosa et al., 2021; Kouhi et al., 2020; Hassan et al., 2018; Mohamed et al., 2020), existiendo un amplio abanico de materiales para la fabricación de bioplásticos que fungen como envases alimentarios.

2.3.- Recubrimientos comestibles

Dentro de la clasificación de los biomateriales podemos encontrar las películas y recubrimientos comestibles, se pueden definir como cualquier material con un espesor inferior a 0.3 mm, que se forma a partir de una combinación de biopolímeros y diferentes aditivos dispersos en medios acuosos (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021). Cabe mencionar que las biopelículas y recubrimientos son conceptos diferentes, por una parte, las películas se utilizan envolviendo al alimento, son generadas mediante fundición, extrusión o casting; como material de envasado, estas no se generan sobre el alimento en sí mismo. Mientras que los recubrimientos se generan directamente sobre la superficie del alimento, por métodos como aspersión, electroaspersión, barnizado o inmersión, siendo la formación de la matriz la característica que los diferencia; ambas matrices pueden ser generadas a partir de biopolímeros, como polisacáridos, proteínas, lípidos y materiales compuestos (Suhag et al., 2020; Petkoska et al., 2021; Aguirre-Joya et al., 2018). Los recubrimientos tienen como finalidad la protección del daño por radiación UV, daño microbiano, barrera contra condiciones ambientales, manejo y transporte además de tener la capacidad de ser

portadores de distintos aditivos. Tanto las películas como los recubrimientos biodegradables pueden ser adicionados con sustancias que les confieran propiedades que no tendrían por sí solos como: compuestos antioxidantes, antimicrobianos extraídos de diversas fuentes, agentes de sabor, aceites esenciales, nanopartículas, prebióticos y probióticos (Bangar et al., 2021; Baghi et al., 2022; Daniloski et al., 2021; Duong et al., 2022; Soukouliset al., 2014), entre otros. Los recubrimientos presentan ventajas como bajos costos y facilidad en su producción tanto a nivel laboratorio (inmersión) como industrial (aspersión) por lo que fueron elegidos en este trabajo como agentes para la adición a *L. plantarum* e inulina.

2.3.1.-Métodos para la elaboración de recubrimientos comestibles

La generación de matrices filmógenas parte de un sistema coloidal, estos son sistemas poliméricos donde se adicionan biopolímeros o proteínas (las grasas pueden incluirse en sistemas de emulsiones) disueltos en fases acuosas, donde se pueden incluir distintos aditivos a la formulación como agentes antioxidantes, plastificantes, estabilizantes, antimicrobianos, entre otros. Los sistemas coloidales no forman una matriz con agrupación ordenada en sus componentes poliméricos, debido a que se pueden producir diferentes tipos de interacciones entre sus componentes (iónicas, puentes de hidrógeno, interacciones electrostáticas) y según el tipo de biomaterial (proteína o polisacárido); por lo tanto, tienden a generar matrices con características (físicoquímicas, sensoriales, texturales y biológicas) variadas (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021; Matloob et al., 2023).

Los métodos para producir recubrimientos comestibles son distintos a los que se usan para la producción de biopelículas, estos se esquematizan en la Figura 1, entre estos encontramos la electroaspersión, que puede ser por presión o asistida por aire, este método es usado mayormente a escala industrial pues requiere condiciones y equipos particulares para su deposición, además de preferirse las matrices filmógenas formadas por emulsiones y de soluciones menos densas. Otros métodos son el barnizado y la inmersión, esta última permite un acabado más uniforme en alimentos con superficies variables, además de la aplicación de sustancias más viscosas, es asequible y sencilla, adaptándose a la mayoría de los frutos, por lo que se ha elegido como técnica principal en la generación de los recubrimientos comestibles de este trabajo (Patil et al., 2023; Suhag et al., 2020; Wang et al., 2022). Existen otros métodos emergentes como el de lecho fluidizado o la pulverización (Leya et al., 2024).



Figura 1. Métodos de producción para recubrimientos comestibles (Fuente propia).

Estos procesos se ven afectados por la geometría y tipo de alimento, las cargas eléctricas del alimento y el recubrimiento, los procesos de secado e interacciones entre los componentes, por lo que resultan cruciales las propiedades de todos los componentes que forman el recubrimiento, así como las de la matriz alimenticia donde se formará (Suhag et al., 2020).

2.3.1.1.-Método de bicapa

Los métodos anteriores permiten la generación de múltiples capas sobre el alimento, produciendo envases más complejos con una mejor protección, con este enfoque se generan los recubrimientos por bicapa, donde el alimento se sumerge dos veces en distintas o la misma solución para la formación del recubrimiento, como se observa en la Figura. 2. En este método se generan capas que interactúan entre sí, con el alimento y sus aditivos, igualmente esto permite superar el reto de la mala adhesión de una capa a la matriz alimenticia, uniéndose física y químicamente entre sí. Esta técnica consta de tres etapas: i) inmersión y reposo, ii) deposición y iii) evaporación de los disolventes, las etapas se repiten tantas veces como capas se apliquen, el alimento recubierto se sumerge en soluciones que contienen polielectrolitos con cargas opuestas, esto con el fin de mejorar la adhesión entre las capas (Sipahi et al., 2012; Arnon-Rips & Poverenov, 2018; Suhag et al., 2020).

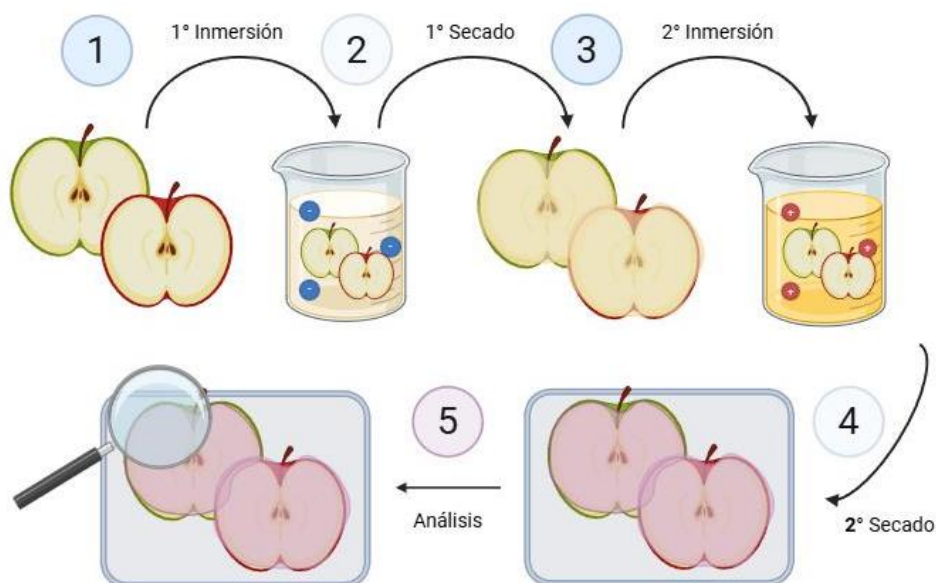


Figura. 2. Método de aplicación de los recubrimientos por bicapa (Fuente propia)

Usualmente en la primera capa se suelen adicionar los ingredientes activos del recubrimiento (probióticos y prebióticos), mientras que las capas posteriores sirven de refuerzo y brindan protección extra a la primera capa, brindando un recubrimiento más complejo con mejores capacidades de barrera. Dichas propiedades, así como el rendimiento se verán afectados por las características del material, como la composición, el tamaño de los poros, el grosor, la polaridad, la capacidad de hinchamiento y la solubilidad. La liberación de los ingredientes activos de los envases multicapa puede verse influenciada por diversos factores internos (la naturaleza de los ingredientes activos y propiedades de la matriz circundante) y externos (influencia del entorno en el perfil de liberación), este enfoque ha sido usado con capas de quitosano y alginato, al igual con capas que contienen liposomas, siendo un enfoque prometedor para la conservación de alimentos (Wang et al., 2022) (Zhao et al., 2022) (Tan et al., 2021).

2.3.2.-Principales materiales para la elaboración de recubrimientos comestibles

2.3.2.1.-Proteínas

Las proteínas son hetero polímeros formados por aminoácidos unidos mediante enlaces peptídicos, estas se encuentran ampliamente en la naturaleza y el cuerpo humano; los polímeros basados en proteínas se derivan principalmente de dos fuentes: proteínas vegetales y proteínas animales. Las principales proteínas vegetales son la proteína de soja, la zeína y de trigo, mientras que las principales proteínas animales son el colágeno, la gelatina, la proteína de suero y la caseína (Matloob et al., 2023; Mohamed et al., 2020; Lu et al., 2025).

El proceso de desnaturalización de las proteínas se lleva a cabo durante la formación del recubrimiento, se pueden formar matrices resistentes, interconectadas y viscoelásticas, mientras

las proteínas se interrelacionan con partículas adyacentes mediante enlaces de hidrógeno, iónicos o covalentes después de la desnaturalización (Matloob et al., 2023).

Las proteínas son buenas candidatas para la elaboración de recubrimientos comestibles debido a su valor biológico, biodegradabilidad, barrera formidable contra los gases (bloqueando la difusión de gases nocivos como el O₂ o el CO₂), pueden mejorar las propiedades mecánicas asociadas a los derivados de lípidos y carbohidratos en matrices más complejas y pueden mantener las características sensoriales impidiendo la migración del aroma y el sabor (Milani & Tirgarian, 2020; Lu et al., 2025).

2.3.2.2.- Gelatina

La gelatina es un polímero natural que se obtiene mediante la degradación hidrolítica de la proteína del colágeno, principalmente de cerdo, vaca y pescado (Alipal et al., 2021). Las principales gelatinas comerciales se extraen mediante tratamientos ácidos y alcalinos y se describen generalmente como gelatinas de tipo A y tipo B, con puntos isoeléctricos de pH 6-9 y pH 5, respectivamente (Xu et al., 2025). La gelatina está compuesta principalmente por 18 variedades de aminoácidos complejos, siendo aproximadamente el 57 % glicina, prolina e hidroxiprolina, mientras que el 43 % restante son otras familias de aminoácidos (fig 3) (Alipal et al., 2021). La calidad de la gelatina viene determinada por la fuerza y viscosidad del gel. La fuerza del gel, (valor «bloom»), es un indicador de la fuerza y rigidez de la gelatina, esté refleja el peso molecular medio de los componentes de la gelatina, suele oscilar entre 30 y 300 bloom (<150 para baja, 150-220 para media y 220-300 para alta) (Hanani et al., 2012).

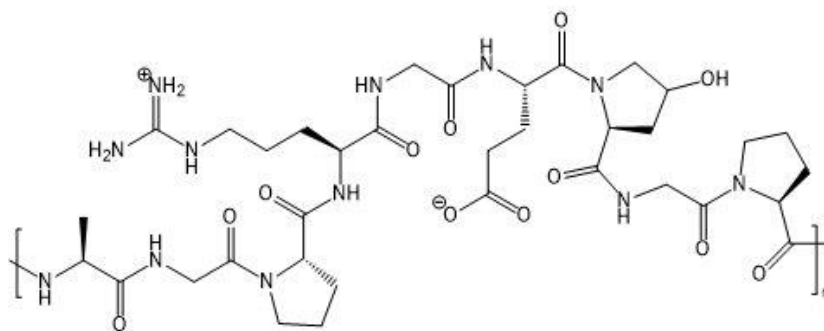


Figura. 3. Estructura química básica de la gelatina (Law et al., 2021).

La gelatina es uno de los biopolímeros más prometedores y ampliamente estudiados debido a sus múltiples propiedades, bajo costo, capacidad de formación de geles, alta dispersabilidad y capacidades higroscópicas (que depende de la humedad relativa a la que se seca y se almacena) debido a su riqueza en grupos hidrófilos (grupos amino e hidroxilo), biocompatibilidad y biodegradabilidad (Said et al., 2021; Alipal et al., 2021 ; Lu et al., 2022; Said & Sarbon, 2022; Said, 2020) por lo que surge como un gran material para la elaboración de recubrimientos comestibles.

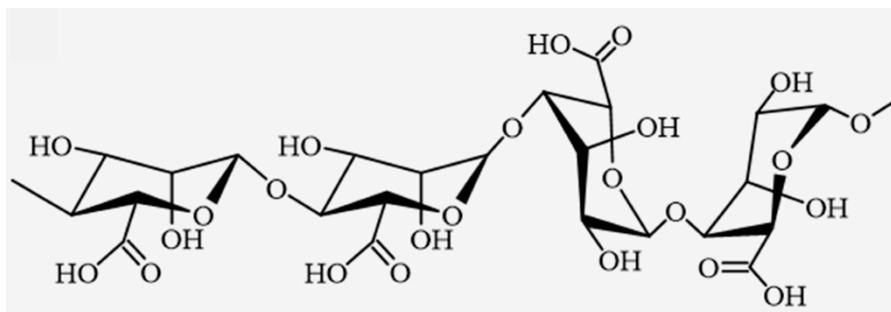
2.3.2.3.-Biopolímeros

Los biopolímeros son moléculas en forma de cadena compuestas por unidades monoméricas unidas covalentemente derivadas de recursos naturales renovables, plantas, animales, microorganismos o fuentes sintéticas biodegradables, suelen estar unidas por enlaces covalentes, entre estas se incluyen aminoácidos, azúcares o nucleótidos como unidades monoméricas, tales como la quitina, el almidón, la celulosa, los péptidos, las proteínas, el ADN y el ARN. Los biopolímeros son biocompatibles y biodegradables y frente a los de origen fósil destaca su potencial sostenibilidad, lo que los hace útiles en diferentes aplicaciones, como películas comestibles, emulsiones, materiales de envasado en la industria alimentaria y como materiales de transporte de fármacos, implantes médicos como órganos, cicatrización de heridas, andamios tisulares y materiales de apósitos en la industria farmacéutica (Baranwal et al., 2022; Liu et al., 2023; Singh et al., 2023).

Estos biopolímeros suelen ofrecer propiedades funcionales similares o mejoradas en comparación con los plásticos convencionales. Las propiedades de los biopolímeros dependen del tipo y la concentración de los aditivos utilizados, el grado de polimerización y la presencia de materiales de refuerzo (Roy et al., 2023).

2.3.3.2.1-Alginato de sodio

El alginato es un polisacárido que se encuentra en abundancia en algas pardas, aunque también puede ser producido por bacterias como *Azotobacter vinelandii*, el alginato de sodio es un copolímero lineal natural, compuesto por residuos de ácido β -D-manurónico (unidad M) y ácido α -L-gulurónico (unidad G) unidos por enlaces glicosídicos (1 $\rightarrow$ 4) (Fig. 4). Su estructura se caracteriza por bloques homopoliméricos (secuencias continuas de M o G) y bloques heteropoliméricos (unidades M y G alternas), al ser extraído de diversos tipos de algas el alginato de sodio presenta arquitecturas y pesos moleculares irregulares, este último varía dependiendo de la fuente, método y condiciones de extracción del alginato, para los alginatos de grado comercial su peso molecular oscila entre 12,000 y 40,000 g/mol (Contreras-Abara et al., 2023 ; Wang et al., 2025 Hasnain et al., 2020 ; Manzano et al., 2019). Es importante recalcar que la capacidad gelificante se ve fuertemente influenciada por el peso molecular del alginato, y este a su vez por las unidades G y M que posee.



Figuar. 4. Estructura química del alginato de sodio. Modificada de Wang et al., (2025).

Su capacidad de gelificación depende de su afinidad con cationes de metales divalente (Ca^{2+} , Zn^{2+} y Ba^{2+}) y trivalentes (Fe^{3+} y Al^{3+}), su naturaleza de unión iónica se relaciona con la selectividad de los residuos de ácido gulurónico, cuando dos cadenas del bloque G se alinean, se generan los sitios de coordinación, debido al bucle de estas cadenas, se forman cavidades entre ellas en las que se alojan los cationes metálicos, tras la adición de los cationes metálicos los alginatos sufren cambios conformacionales, dando lugar al modelo Caja de Huevo (Fig. 5) (Manzano et al., 2019 ; Hasnain et al., 2020).

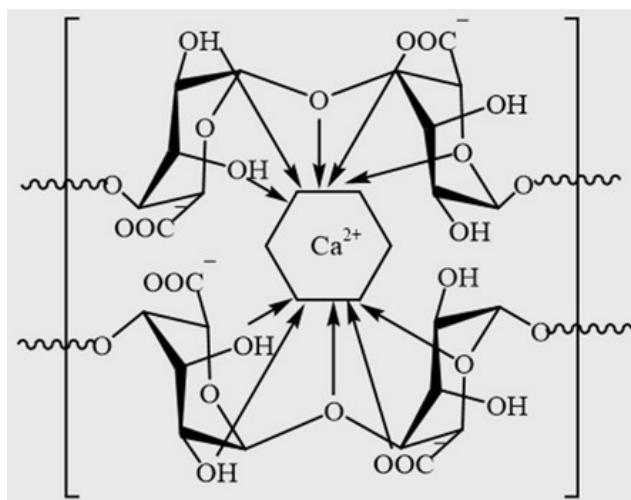


Figura. 5. Modelo de Caja de Huevo en alginato de sodio (Wang et al., 2025).

Además de su capacidad de formar geles estables, resalta su biodegradabilidad y biocompatibilidad; por lo que ha sido ampliamente investigado y usado en la industria farmacéutica tanto como agente liberador de fármacos, en impresión 3D e ingeniería de tejidos mediante cultivo tridimensional y su aplicación en apósitos (Ren et al., 2024 ; Tan et al., 2023), así como su prometedora aplicación en la industria alimentaria como empaque y portador funcional (Wang et al., 2025), ya sea para funcionar sinérgicamente con otros tipos de biopolímeros como gomas (Chen et al., 2022) o acarrear células probióticas (Liu et al., 2021).

2.3.3.2.2.-Pectina

El término «pectina» abarca diversos polímeros que difieren en masa molecular, composición química y concentración de azúcar, aunque puede definirse como un hidrocoloide aniónico que se encuentra de forma natural en la lámina media y en las paredes celulares primaria y secundaria de las plantas terrestres, las más comunes incluyen cáscara de cítricos, orujo de manzana, cáscara de cacao y pulpa de patata (Chandel et al., 2022; Jia et al., 2024). Normalmente, la pectina se divide en dos grupos según su grado de esterificación: alto metoxilaje (AM) y bajo metoxilaje (BM) según su grado de esterificación (Syarifuddin et al., 2025), para este trabajo se empleó pectina de bajo metoxilaje, la pectina BM forma geles en presencia de iones calcio divalentes o cationes multivalentes en concentraciones adecuadas debido a las interacciones iónicas entre los grupos

carboxilo libres del ácido galacturónico y los iones divalentes o polivalentes (Chandel et al., 2022; Freitas et al., 2021).

Las pectinas son principalmente un polímero de ácido D-galacturónico (homopolímero de unidades de ácido [1 → 4] OC-D-galactopiranosilurónico con diversos grados de grupos carboxilo metilesterificados) y ramnogalacturonano (Fig. 6) (Thakur et al., 1997).

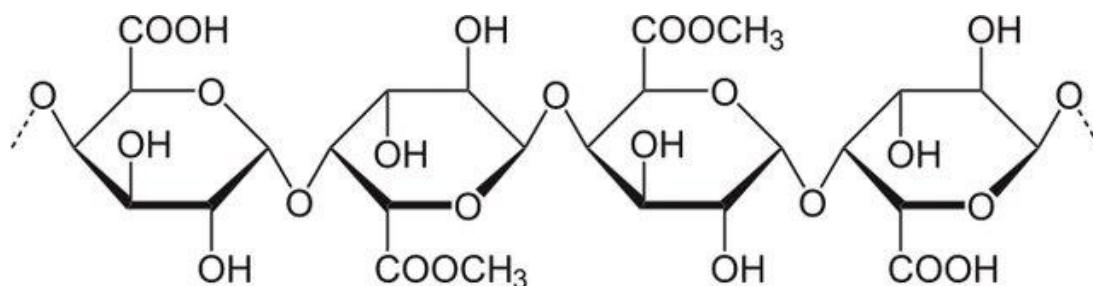


Figura. 6. Estructura química de la pectina (Kitir et al., 2018).

La pectina es ampliamente usada en la industria alimenticia como emulsionante, espesante y estabilizador (Chen et al., 2022). Debido a su capacidad para gelificar y transportar sustancias activas como antimicrobianos y antioxidantes, además de ser biodegradable, biocompatible, comestible y presentar propiedades fisicoquímicas versátiles (permeabilidad selectiva a los gases), la pectina es una matriz polimérica adecuada para la elaboración de recubrimientos comestibles (Espitia et al., 2013; Haque et al., 2025).

2.3.3.3.-Agentes plastificantes

Los plastificantes son otro tipo de agentes que se añaden en la formación de las biopelículas y recubrimientos comestibles, estos se pueden definir como compuestos pequeños de bajo peso molecular y no volátiles, que ayudan particularmente a los recubrimientos reduciendo la fragilidad, el descascarillado y el agrietamiento al mejorar la flexibilidad y la resistencia del mismo. Es necesario añadirlos para conseguir mejores características en los recubrimientos, de manera general reducen las fuerzas intermoleculares a lo largo de las cadenas de polímeros, lo que disminuye la temperatura de transición vítrea (T_g), aumentan el volumen libre y los movimientos de las cadenas (Ghasemlou et al., 2010; Sothornvit & Krochta, 2005).

Los más comunes en la elaboración de biopelículas y recubrimientos son una variedad de: monosacáridos, disacáridos u oligosacáridos (por ejemplo, glucosa, jarabes de fructosa-glucosa, sacarosa y miel), lípidos y derivados (por ejemplo, fosfolípidos, ácidos grasos y tensioactivos), plastificantes de poliol, como el polietilenglicol, el sorbitol, el propilenglicol, el etilenglicol y el glicerol (Chen et al., 2024; Sothornvit & Krochta, 2005).

2.3.3.3.1.-Glicerol

El glicerol es un compuesto orgánico de fórmula química $C_3H_8O_3$, se trata de un triol (un poliol con tres grupos hidroxilo), también conocido como glicerina, propano-1,2,3-triol gliceritol y alcohol glicílico, consta de una cadena de tres carbonos con un grupo hidroxilo unido a cada carbono (Fig. 7), este es un alcohol de baja toxicidad, inocuo tanto para el hombre como para el medio ambiente (Tan et al., 2013; Eslami et al., 2023), físicamente es un líquido transparente, incoloro, inodoro, higroscópico, viscoso y de sabor dulce es altamente soluble en agua lo que lo hace una excelente opción como plastificante (Donkin, 2008).

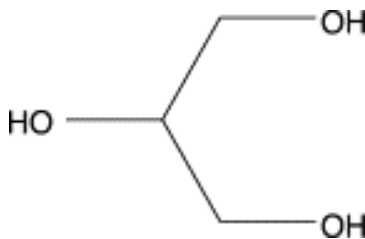


Figura. 7. Estructura química del glicerol (Kwan et al., 2014).

El glicerol es ampliamente utilizado ya que la presencia de los grupos hidroxilo permiten la creación de fuertes enlaces de hidrógeno con el polímero hidrófilo aumentando el espacio intermolecular al reducir los enlaces de hidrógeno internos, esto ayuda a reducir las fuerzas intermoleculares y aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas; un proceso que se utiliza generalmente para mejorar las propiedades mecánicas de los recubrimientos comestibles (Eslami et al., 2023; Jouki et al., 2013; Vityazev et al., 2020).

2.4.-Principales activos adicionados a los recubrimientos comestibles

Existen distintos compuestos que pueden ser adicionados a las matrices filmógenas (Fig. 8) que formaran un recubrimiento comestible, entre estos podemos encontrar; antioxidantes; extraídos de la especie *Opuntia ficus-indica* en recubrimientos de carboximetilcelulosa, a base de proteína de frijol mungo enriquecida con cáscara de granada (Aparicio-Fernández et al., 2017; Moghadam et al., 2020), nanopartículas; de carboximetilcelulosa-quitosano (Kong et al., 2024), antimicrobianos y antifúngicos; en películas de quitosano con extractos fúngicos, mezclas de aceites de cinamaldehído, linalol, isoeugenol y citral para el control de hongos ocratoxigénicos (Koc et al., 2020; Tarazona et al., 2018), aceites de romero, eucalipto, orégano, salvia y tomillo en películas de alginato de sodio (Lopes et al., 2025), probióticos; en películas de gelatina y pectina de bajo metoxilo con mezcla de *L. plantarum* y *Lactobacillus. casei* subsp. *casei* (Khodaei et al., 2020)

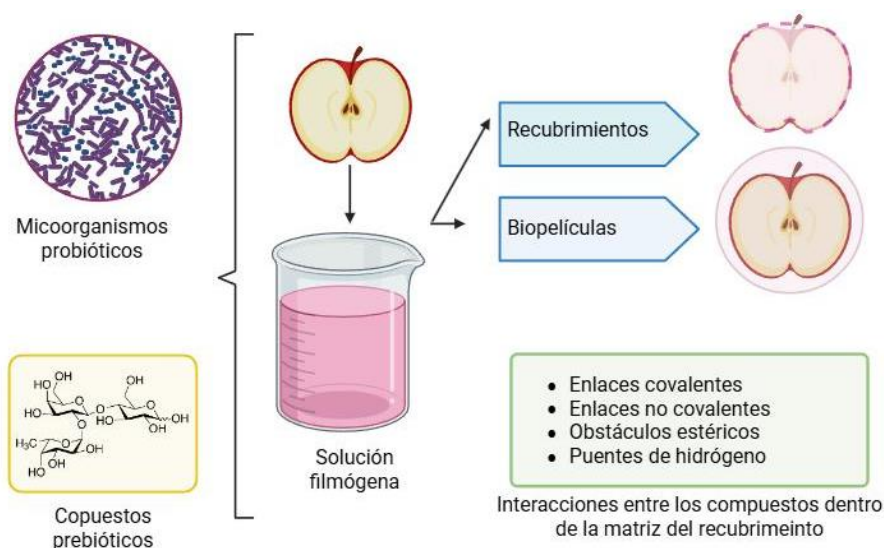


Figura. 8. Aditivos en recubrimientos comestibles. Modificada de Sáez-Orviz et al., (2022).

Todos estos aditivos pueden modificar las características propias de la matriz alimentaria, por ejemplo, en pescados, productos horneados como panes o galletas, verduras, granos o frutas (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021).

2.4.1.-Probióticos

Los probióticos son microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, aportan un beneficio para la salud del huésped (Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2002), esta definición puede verse complementada por Wassenaar and Klein (2008), que añade: se pueden tratar de alimentos o complementos alimenticios.

Algunas de las características más comunes para que un microorganismo se considere un probiótico son: resistencia a los ácidos gástricos y biliares, capacidad de adherirse al moco y/o al epitelio humano para su colonización y poseer actividad antimicrobiana contra potenciales patógenos (Khalighi et al., 2016 ;Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2002; Sáez-Orviz et al., 2022) entre otras; los beneficios a la salud que estos confieren van desde la modulación del sistema inmune, de la respuesta alérgica, mejoramiento en la absorción de nutrientes hasta la prevención de infecciones y regulación de la inflamación intestinal (Oelschlaeger, 2009; Peltó et al., 1998; Yadav et al., 2022), aunque sus beneficios son amplios, es un tema de amplia investigación actual.

Los microorganismos más usados como probióticos en la industria alimenticia corresponden al grupo de las bacterias ácido lácticas (BAL), que se han reconocido como seguras para su consumo por la Administración de Alimentos y Medicamentos, EE. UU. (FDA), dentro de este grupo podemos encontrar mayormente a las correspondientes al género *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*, aunque

también podemos encontrar al género *Streptococcus* y algunas levaduras del género *Saccharomyce* (Sáez-Orviz et al., 2022; Zendeboodi et al., 2020).

2.4.1.1.- *Lactiplantibacillus plantarum* (*L. plantarum*)

L. plantarum, anteriormente conocido como *Lactobacillus plantarum* (Chatsirisakul et al., 2025) es una bacteria láctica Gram positiva (Fig. 9) que destaca por su adaptabilidad metabólica, así como su capacidad para colonizar diversos entornos, como alimentos fermentados, plantas y estar presente en los tractos gastrointestinales, vaginales y urogenitales humanos (Fidanza et al., 2021).

L. plantarum se destaca por sus capacidades de adhesión al epitelio y mucosa estomacal, producción de bacteriocinas, actividad antimicrobiana y antioxidante y regulación de la microbiota intestinal (Echegaray et al., 2022; Zare et al., 2024) así como de sus múltiples beneficios a la salud, como en la mejora de la inflamación por el síndrome del intestino irritable, en su efecto sobre el sistema nervioso central mejorando los síntomas de trastornos del espectro autista o en la modulación de la depresión y regulación del sueño, en su acción contra el virus de inmunodeficiencia humana (VIH) o su efecto sobre la salud de la piel, entre otros múltiples beneficios a la salud (Chen et al., 2021; Mensi et al., 2021; Ho et al., 2021; Tsai et al., 2021; Ranuh et al., 2022), mientras que su aplicación en la industria alimenticia ha sido de gran importancia debido a su capacidad de mejorar las características de los alimentos fermentados, pues esta afecta positivamente al sabor y la composición nutricional, funge como una «predigestión» de los sustratos alimentarios que favorece la biodisponibilidad, la absorción de minerales, puede eliminar algunos alérgenos y anti nutrientes, además de contribuir a mejorar las características organolépticas y cualitativas (vida útil, conservación y seguridad alimentaria) de los mismos (Obafemi et al., 2022; Yilmaz et al., 2022 ; Samtiya et al., 2021; Zare et al., 2024).

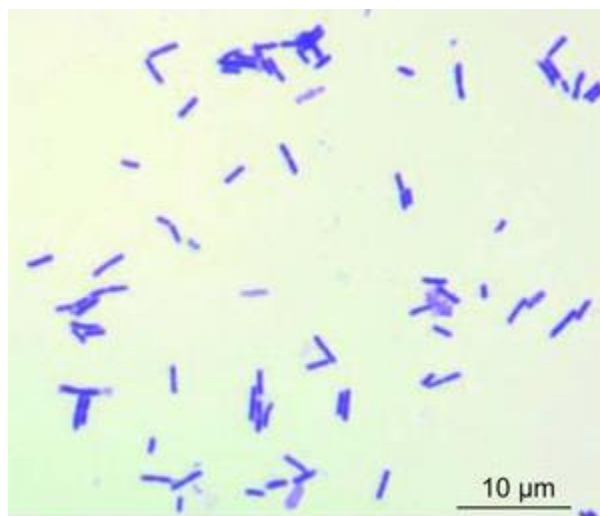


Figura. 9. Tinción Gram de *Lactiplantibacillus. plantarum* (Jiang et al., 2022).

Al ser un promotor activo para mejorar la salud humana y sus múltiples aportaciones a la alimentación, se han empleado como aditivos en matrices alimentarias para ser consumidos de manera más fácil para los consumidores, además de dotar de propiedades nutrimentales adicionales a los que los alimentos tienen por sí solas.

2.4.2.-Prebióticos

El término de prebiótico es relativamente reciente, una definición adecuada es la propuesta por la Asociación Científica Internacional para los Probióticos y Prebióticos (ACIPP), «un sustrato que es utilizado selectivamente por los microorganismos del huésped que confieren un beneficio para la salud», es importante recalcar que este puede afectar tanto al microbioma como al resto de la microbiota gastrointestinal, vaginal, urogenital y dérmica (Hutkins et al., 2015; Gibson et al., 2017).

Por lo general, se trata de carbohidratos de cadena corta que escapan a la digestión, estos no suelen hidrolizarse en el intestino y consisten en grados bajos de polimerización (2-20 unidades), suelen ser monómeros de glucosa, galactosa, fructosa y/o xilosa, estos pueden encontrarse de manera natural en frutas, verduras y cereales integrales, mientras que las formas purificadas más estudiados son los oligosacáridos, que engloba a los fructooligosacáridos (FOS e inulina) y galactooligosacáridos (GOS), aunque también podemos encontrar a los isomaltooligosacáridos (IMO) y los xilooligosacáridos (XOS), estos son fermentados por comunidades microbianas específicas produciendo ácidos grasos de cadena corta (ácidos láctico, butírico y propiónico) y otros metabolitos que intervienen en la regulación intestinal (Yadav et al., 2022 ; Gibson et al., 2017 ; Monteiro et al., 2026 ; Davani-Davari et al., 2019).

2.4.2.1.-Inulina

La inulina se encuentra dentro del grupo de los oligosacáridos, en el subgrupo de fructooligosacáridos (FOS), esta se trata de una cadena lineal de fructosa con enlaces β (2 $\rightarrow$ 1) y una molécula de glucosa que suele encontrarse al final de cada cadena de fructosa y está unida por un enlace α (1—2) (Fig. 10). La inulina tiene un grado de polimerización de hasta 60. El aspecto único de la estructura de la inulina son sus enlaces β (2—1). Estos enlaces impiden que la inulina se digiera como un carbohidrato típico y son responsables de su reducido valor calórico y de sus efectos como fibra dietética (Niness, 1999; Davani-Davari et al., 2019; Vandeputte et al., 2017).

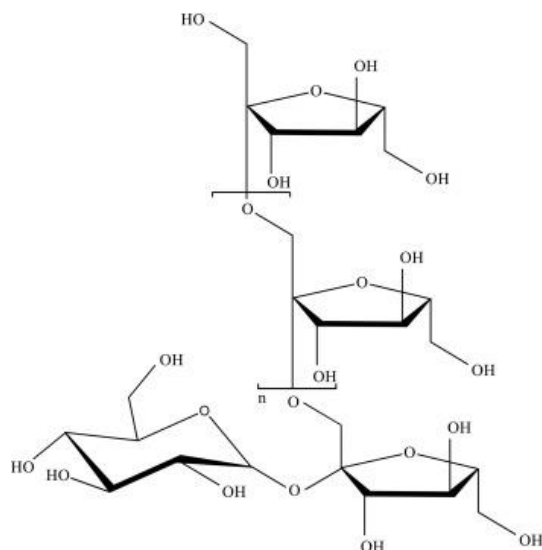


Figura. 10. Estructura química de la inulina (Tresina et al., 2022).

La inulina nativa se encuentra en las alcachofas, espárragos, plátanos, y el trigo como reserva de carbohidratos de estas plantas. Sin embargo, la mayoría de las ITF disponibles en el mercado se sintetizan a partir de la sacarosa o se extraen de las raíces de achicoria, la alcachofa de Jerusalén y el agave (Hughes et al., 2021; Holscher, 2017).

Igualmente, la inulina ha sido usada en la industria alimentaria como espesante, esta capacidad depende del largo de la cadena de inulina, entre más larga menos soluble, pero más capacidad de proporcionar dicha textura y viceversa, usada en productos horneados, postres fríos y aderezos (Hughes et al., 2021; Ninness, 1999), por lo que se presenta como un gran aditivo para ser incorporado en matrices filmógenas.

2.5.- Alimento funcional

Los alimentos funcionales pueden definirse como “alimentos que, más allá de sus efectos nutricionales adecuados, influyen de manera beneficiosa en una o varias funciones específicas del organismo, de forma relevante para mejorar el estado de salud y bienestar y/o reducir el riesgo de enfermedades”, esto gracias a la composición natural de cada alimento, a la incorporación de distintos aditivos (ácidos grasos omega-3, esteroides vegetales o probióticos) o debido a la eliminación o reducción de compuestos perjudiciales (grasas saturadas, azúcares o sodio), además de existir ingredientes meramente funcionales como lo son los prebióticos. Estos confieren grandes beneficios a la salud, como: mejorar la sensibilidad a la insulina, regular la homeostasis de los lípidos y la glucosa, atenuar la inflamación y el estrés oxidativo, mejorar el rendimiento, nutrición de la piel, prevención de enfermedades cardiovasculares, promoción de la salud cognitiva, mejora del sistema inmunitario, control del peso, mantenimiento de la salud bucodental, entre otros beneficios que se dan por diversos mecanismos, como neutralizar las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, influir en la epigenética de los linfocitos o modificar las

composición de la microbiota. Los mecanismos son variados dependiendo del tipo de componente activo del alimento (licopeno, resveratrol, carotenoides, flavonoides, ácido elágico, curcumina, quercetina, sulforafano, epigallocatequina, péptidos, etc.), como los tomates, microbrotes de distintos vegetales, zanahorias, zarzamoras, cúrcuma, nueces, granos de soya, achicoria, alcachofas, alimentos fermentados, entre muchos otros (Sáez-Orviz et al., 2022; Essa et al., 2021; Fekete et al., 2025; Rahimah et al., 2026; Yuan et al., 2024; Partap et al., 2023; Guo et al., 2023). Es importante no confundir esta categoría con los nutraceuticos, ya que estos son las formas aisladas de los componentes beneficiosos de los alimentos, pueden ser extractos concentrados, formulaciones ricas en antioxidantes o compuestos encapsulados (aceite de pescado).

Ya que los productos alimenticios comunes pueden transformarse en alimentos funcionales, los recubrimientos comestibles intervienen en este proceso para además de dotar de mayores propiedades nutrimentales al alimento, extender su vida útil y poder mejorar sus características para hacerlos más atractivos para los consumidores.

2.5.1.- Simbióticos

Los simbióticos se pueden definir como “microorganismos vivos con sustratos utilizados selectivamente por los mismos, ya sean autóctonos o alóctonos, para conferir un beneficio a la salud”, además podemos dividir esta definición en dos categorías, los simbióticos complementarios (unión de un probiótico con un prebiótico) y los simbióticos sinérgicos (donde el sustrato está específicamente diseñado para ser aprovechado por el microorganismo) ambos confieren un beneficio a la salud de la microbiota intestinal y sistemas extraintestinales (Swanson et al., 2020; Obayomi et al., 2024), estos interactúan de manera estrecha en el sistema digestivo mayormente (Fig. 11) produciendo cambios en la microbiota intestinal.

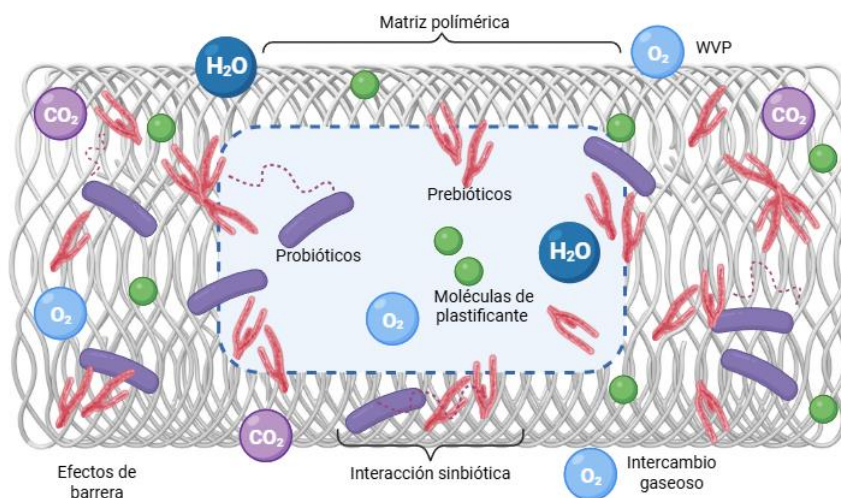


Figura. 11. Relación simbiótica entre prebióticos y probióticos (Fuente propia).

Se ha reportado el uso de simbióticos para potenciar los efectos individuales de los prebióticos y probióticos, además de asegurar la viabilidad probiótica, para el tratamiento de padecimientos dentales como la periodontitis (Yu et al., 2026), el tratamiento en la enfermedad renal crónica (McFarlane et al., 2022), en la producción de metabolitos beneficiosos (Chen et al., 2023), en la disminución de células cancerosas del colon y tratamiento de cáncer (Minj et al., 2020; Chandra et al., 2024) o en el efecto sobre la demencia y estrés oxidativo en el Alzheimer (Ton et al., 2020), por lo que los simbióticos se han ido erigiendo como novedosas herramientas para el tratamiento de enfermedades y mejora general de la salud humana.

2.6.-Microbiota intestinal

La microbiota intestinal humana es un ecosistema complejo compuesto por billones de microorganismos, entre los que se incluyen bacterias, virus, hongos y otras entidades microbianas. Este microbioma denso y diverso ha coevolucionado con los seres humanos, moldeando y siendo moldeado por nuestra fisiología, dieta y estilo de vida, entre sus principales funciones se encuentran: la digestión y absorción de nutrientes, la síntesis de vitaminas, el metabolismo de xenobióticos y el control del sistema inmunitario, además apoya la función de la barrera intestinal inhibiendo el asentamiento de patógenos, los filos más comunes son los *Bacteroidetes*, seguidos de *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Fusobacteria*, *Tenericutes*, *Actinobacteria* y *Verrucomicrobia* (Ji et al., 2023; Anees et al., 2025; Hou et al., 2022).

Este ecosistema complejo modula muchas de las funciones del cuerpo humano, como modulación del sistema inmunitario, una estrecha relación con el estado de ánimo, funciones cognitivas y el estado metabólico, alteraciones en este ecosistema conducen a desregulaciones, que podemos llamar estado de disbiosis, donde dicho desbalance conlleva al desarrollo de patologías y enfermedades para el huésped (Ji et al., 2023; Ansari et al., 2023; Dong et al., 2025; Basnet et al., 2024; Hou et al., 2022), por lo que la regulación de la microbiota y su funcionamiento estable conduce a un estado de salud óptimo, estas modificaciones beneficiosas se pueden llevar a cabo por el efecto de los simbióticos.

2.7.-Propiedades de los recubrimientos comestibles

2.7.-Propiedades físicas de los recubrimientos comestibles

El estudio de las propiedades físicas de los recubrimientos comestibles es vital para entender cómo funcionarán a través del tiempo, como interactuarán con la matriz alimentaria y el consumidor, además de poder modificarlas para obtener recubrimientos con características específicas para cada alimento y obtener la aceptación del consumidor.

2.7.1.-Color

El color es un parámetro clave en la evaluación de los productos alimenticios. La medición precisa del color nos permite mantener una calidad constante. La industria alimentaria suele emplear

sistemas estándar de evaluación del color, como CIELab. Se trata de un modelo de color tridimensional (Figura 12) que expresa el color en tres valores: L^* (luminosidad perceptiva), a^* (verde-rojo) y b^* (azul-amarillo). Se considera uno de los modelos más precisos para la evaluación del color y se utiliza en muchos sectores: desde la industria láctea hasta la transformación de frutas y verduras (Boruckowska et al., 2025; León et al. 2006), por lo que resulta en un análisis esencial para determinar qué tan perceptibles son para el consumidor los cambios que sufre el recubrimiento y el alimento de manera global.

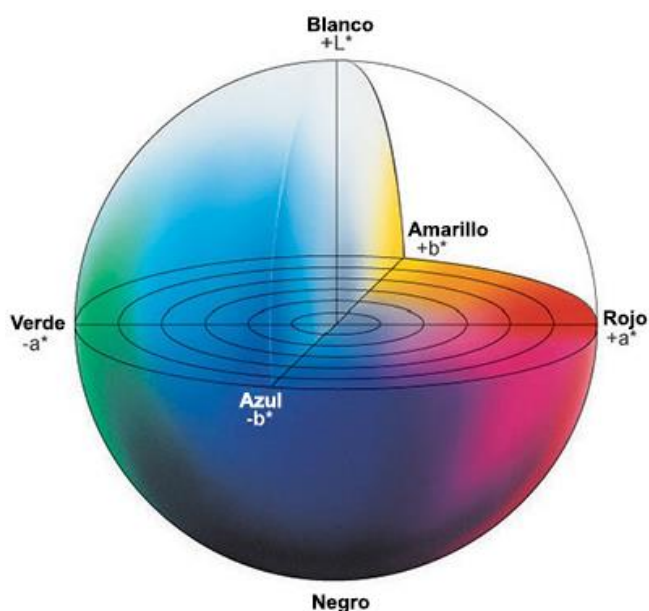


Figura. 12. Espacio de color CIE Lab (Konica Minolta Sensing Americas, 2025).

2.7.1.2.-Espesor

El espesor es definido como la distancia perpendicular entre dos superficies, el biopolímero que compone la matriz es importante para la elaboración de biopelículas y recubrimientos, ya que las variaciones de espesura implican problemas en el desempeño mecánico y las propiedades de barrera que pueden comprometer el desempeño del recubrimiento (Paspuel, 2016).

2.7.2.-Propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos comestibles

2.7.2.1.- Solubilidad

La solubilidad se describe como el equilibrio entre las interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas y se refiere a la tendencia del soluto a disolverse en el disolvente (Soderberg, 2013 ; Agarwal et al., 2020), es una de las principales características del envasado debido a su función protectora, lo que constituye un parámetro relevante que afecta a su posible aplicación práctica en la industria

alimentaria ya que esta puede limitar su uso como película o recubrimiento para productos alimenticios (Garavand et al., 2017).

2.7.2.2.- Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua de un material es una propiedad que describe la capacidad del vapor de agua para pasar a través de un material por difusión (Colinart & Glouannec, 2022), en este caso de una membrana, migrando del alimento hacia el exterior, por lo que resulta fundamental para el diseño de recubrimientos específicos para cada tipo de alimento.

2.7.3.-Propiedades texturales de los recubrimientos comestibles

El análisis textural en alimentos comprende diversos parámetros, desde la fragilidad, elasticidad, masticabilidad hasta la gomosidad y dureza, los cuáles son cruciales para entender cómo estas características afectan el desempeño de un alimento, ya sea fresco o procesado, frente al consumidor, estos arrojan información sobre la aceptabilidad y calidad.

2.7.3.1.-Dureza

La dureza es uno de los principales parámetros texturales que se miden en los alimentos, puede definirse como la fuerza necesaria para lograr una deformación predeterminada, se determina durante la primera compresión como fuerza máxima alcanzada, expresada en Newtons. Si el producto alimenticio es excesivamente duro, no es aceptable para los consumidores (Trinh y Glasgow, 2012), por lo que resulta vital entender cómo este parámetro se ve afectado por la presencia del recubrimiento y los aditivos.

2.8 Aplicaciones de los recubrimientos en alimentos

Los recubrimientos comestibles funcionan como una excelente matriz para ser acarreadores de distintos aditivos (Figura 8), se han aplicado en gran variedad de trabajos; como antioxidantes extraídos de carnauba y aceite mineral para la conservación de tomates (Dávila-Aviña et al., 2012), nanopartículas de ZnO en matrices de quitosano y goma guar para la conservación de aguacates (Chavez-Esquivel et al., 2025), nanoemulsiones; de aceite de orégano en tomates, aceite de limón en matrices de quitosano y pectina para la conservación de fresas (Pirozzi et al., 2020; Abdalla et al., 2023), colorantes como indicadores de frescura; en mezclas con aislado de proteína de suero y nanocristales de celulosa para predecir la frescura de la carne de cerdo, en recubrimientos hechos a partir de gelatina para distintas matrices alimenticias, como productos horneados o carnes (Shaik et al., 2022; Sun et al., 2024), aceites esenciales y aceites orgánicos; aceite de canola, y extracto de rosella en películas de quitosano para la preservación de higos (Saavedra et al., 2020;), probióticos: con aislado de proteína de suero de leche y cultivos de *L. casei* sobre tomates y uvas (Dianin et al., 2019), y prebióticos; inulina y oligofructosa en matrices de alginato y quitosano para la conservación de arándanos (Alvarez et al., 2017).

Como se puede ver, los frutos precortados se presentan como una buena opción para el monitoreo y conservación de sus propiedades nutrimentales y reológicas debido a la aplicación de un recubrimiento comestible, ya que este puede alargar la vida útil del fruto; regulando la transferencia de gases, retrasando la pérdida de agua, retrasando o inhibiendo el crecimiento microbiano, modificando los procesos metabólicos y enzimáticos entre otras propiedades (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021)

2.8.1 *Malus domestica*

La manzana pertenece a la familia de las rosáceas (*Malus domestica*) y es una de las frutas de pepita más cultivadas y con mayor demanda por parte de los consumidores en todo el mundo, siendo la cuarta fruta más importante, después de los cítricos, la uva y el plátano, con una producción media anual de más de 85 millones de toneladas a nivel mundial, esta posee excelentes propiedades nutrimentales como la presencia de polifenoles, polisacáridos, esteroides vegetales y ácidos orgánicos (Patocka et al., 2020), esta suele ser consumida fresca, o procesada en jugos, dulces o precortada (Han et al., 2020; Gupta & Saxena, 2023), su manipulación y procesamiento conduce a un cambio en el color de la pulpa y a un efecto indeseable para el consumidor, tanto de manera visual como reológica, esto es debido mayormente a los procesos enzimáticos que conducen a la oxidación y pardeamiento del fruto, además de su pérdida de agua con el paso del tiempo (Cebulj et al., 2021; Han et al., 2020) por ello los recubrimientos surgen como una manera de retrasar estos procesos, extendiendo su vida útil e incluso mejorando sus propiedades nutrimentales básicas y aceptación general.

2.9. Análisis sensorial

El análisis sensorial examina las propiedades (textura, sabor, apariencia, olor, etc.) de un alimento a través de los sentidos (vista, olfato, gusto, tacto y oído) de los panelistas, en comparación con otros métodos de detección y análisis, la evaluación sensorial no solo permite medir el sabor de los alimentos, sino también detectar cambios en el aroma, el color, las características de la superficie y la percepción del sabor. Los resultados de una evaluación sensorial pueden proporcionar la información necesaria para ajustar el sabor y satisfacer al consumidor (Ruiz-Capillas & Herrero, 2021; Wu et al., 2023).

3.-Justificación

El creciente uso de envases plásticos para fines alimentarios ha derivado en una de las principales preocupaciones medioambientales ya que estos materiales plásticos no son biodegradables y están generando graves problemas de contaminación a nivel mundial; por ello ha surgido la necesidad de usar materiales de envasado alternativos, que no contribuyan a la contaminación y que permitan la fabricación de productos de envasado de forma eficiente mediante procesos sostenibles. En consecuencia, esto ha iniciado una concientización, un aumento de la

investigación y de la industria centrada en el desarrollo de materiales sostenibles, biodegradables y comestibles que puedan mejorar la seguridad alimentaria y aumentar la calidad de los alimentos, gracias a este nuevo paradigma los estudios se han dirigido al uso de biopolímeros que se han introducido como materiales de envasado biodegradables para sustituir a los materiales petroquímicos, estos presentan varias ventajas para la fabricación de envases alimentarios, como la biodegradabilidad y la no toxicidad (Jeevahan & Chandrasekaran, 2019; Jeevahan et al., 2018; Mellinas et al., 2016; Baghi et al., 2022). Dentro del gran grupo de los envases biodegradables podemos encontrar a las películas y recubrimientos comestibles, estos se derivan de los biopolímeros y tienen un excelente potencial para incorporarse con diversos aditivos en su matriz y liberarse tras el almacenamiento dotando a los alimentos que protegen de propiedades funcionales, los envases activos prolongan la vida útil de los alimentos mediante la difusión (emisión) de diversos compuestos que tienen un impacto positivo, como antimicrobianos, antioxidantes, enzimas, nutraceuticos y compuestos aromáticos (Martins et al., 2024; Baghi et al., 2022).

Los recubrimientos comestibles se presentan como una opción prometedora para la ciencia alimentaria debido a su gran versatilidad, su potencial para ser fabricados a partir de diversos materiales y como portadores de diferentes sustancias activas, como agentes antioxidantes, antimicrobianos, fitoquímicos, detectores de pH, prebióticos y probióticos (Petkoska et al., 2021). La combinación sinérgica de prebióticos y probióticos que se encuentra en productos como alimentos, fármacos y suplementos se conoce como simbiosis (Mohanty et al., 2018), esta relación potencia los efectos de cada componente y los hace más eficaces que cuando se usan de forma aislada. Con base en lo anterior, en este trabajo se propuso generar recubrimientos comestibles por bicapa adicionados con *Lactiplantibacillus plantarum* e inulina para mejorar las propiedades funcionales de *Malus domestica* 'Golden Delicious' y extender su vida útil.

4.-Hipótesis

El recubrimiento comestible en bicapa adicionado con *Lactiplantibacillus plantarum* e inulina en *Malus domestica*. “Golden Delicious”, aumentará sus propiedades funcionales y extenderá su vida útil.

5.-Objetivos

General: Elaborar recubrimientos comestibles adicionados con *Lactiplantibacillus plantarum* e inulina, por el método de bicapa, para mejorar las propiedades funcionales de *Malus domestica* “Golden Delicious” y extender su vida útil.

Específicos:

1. Determinar las propiedades ópticas y fisicoquímicas de los recubrimientos.
2. Aplicar el recubrimiento a *Malus domestica* “Golden Delicious” y evaluar su vida útil.
3. Cuantificar los probióticos viables antes y después de condiciones de anaquel.
4. Realizar una prueba sensorial de *Malus domestica* “Golden Delicious” con el recubrimiento

6.- Materiales y métodos

6.1.-Materiales

Se seleccionaron de manera visual los frutos de *Malus domestica* 'Golden Delicious' (manzanas), eligiendo los que no presentaran daños físicos, que tuvieran un color uniforme, un grado de madurez similar entre ellos, y se almacenaron en refrigeración hasta su uso.

6.2.-Métodos

Los métodos se dividieron en el cultivo de *Lactiplantibacillus plantarum* , la elaboración y aplicación de los recubrimientos, así como de su caracterización fisicoquímica, determinación de la vida útil y análisis sensorial.

6.2.1.-Preparación del cultivo madre y condiciones de crecimiento

Los microorganismos se reactivaron en caldo MRS incubado a 35 °C en condiciones aeróbicas sin agitación (“De Man, Rogosa and Sharpe (MRS) Agar,” 1995). El cultivo resultante se inoculó (9% v/v) en 100 mL de caldo MRS fresco y se incubó en las mismas condiciones. Los cultivos en la fase estacionaria temprana (crecidos durante la noche hasta alcanzar una concentración de 10^{10} UFC/mL - 10^{11} UFC/mL) se colectaron por centrifugación a $7000 \times g$ durante 5 min y se lavaron dos veces con solución salina al 0.9% estéril. Los pellets bacterianos se almacenaron en refrigeración para incorporarlos posteriormente a las respectivas soluciones (La Cava *et al.*, 2022).

6.3.-Elaboración de los recubrimientos

Se elaboraron tres recubrimientos, que corresponden a las formulaciones mostradas en la tabla 1, modificando los componentes de la primera capa, mientras que los elementos de la segunda capa se mantuvieron constantes.

Tabla 1. Formulaciones de los distintos recubrimientos.

Tratamiento	1 capa	2 capa
SPP	Gelatina + Glicerol	Alginato de sodio + Glicerol
	Pectina + Glicerol	Alginato de sodio + Glicerol

	Alginato de sodio + Glicerol	Alginato de sodio + Glicerol
CP	Gelatina + Glicerol + <i>L. plantarum</i>	Alginato de sodio + Glicerol
	Pectina + Glicerol + <i>L. plantarum</i>	Alginato de sodio + Glicerol
	Alginato de sodio + Glicerol + <i>L. plantarum</i>	Alginato de sodio + Glicerol
CPP	Gelatina + Glicerol + <i>L. plantarum</i> + Inulina	Alginato de sodio + Glicerol
	Pectina + Glicerol + <i>L. plantarum</i> + Inulina	Alginato de sodio + Glicerol
	Alginato de sodio + Glicerol + <i>L. plantarum</i> + Inulina	Alginato de sodio + Glicerol
SR	Manzana sin recubrir	

SPP: Sin prebiótico ni probiótico; **CP:** Con probiótico y **CPP:** Con prebiótico y probiótico.

6.3.1.-Solución formadora de la primera capa

Se prepararon soluciones al 2% (p/v) de los siguientes biopolímeros: Alginato de sodio (AS), gelatina (GT) y pectina (PT) adicionándolos en 100 ml de agua destilada precalentada (65 °C) y bajo agitación constante hasta su completa disolución. Se adicionó glicerol al 5%(v/v) en todas las formulaciones y cada solución formadora se esterilizó y se mantuvo a 4 °C durante 15 min para disminuir su temperatura (30 °C), posteriormente se adicionaron los cultivos probióticos en condiciones de esterilidad, estos se añadieron a cada solución en una concentración de 1.1×10^{11} UFC/g, (Pavli *et al.*, 2017), finalmente se agregaron 2g/L de inulina a cada formulación de las soluciones. Las soluciones se almacenaron en condiciones de esterilidad hasta la aplicación de los recubrimientos.

6.3.2.-Solución formadora de la segunda capa

Se preparó una solución al 2% (p/v) de alginato de sodio (AS) y glicerol al 5%(v/v) en 150 ml de agua destilada precalentada (65 °C), se llevó a agitación constante hasta su completa disolución, posteriormente se esterilizó y se mantuvo a 4 °C durante 15 min para disminuir la temperatura (30 °C), se almacenó en condiciones de esterilidad hasta la aplicación de los recubrimientos.

6.4.-Aplicación de los recubrimientos

La técnica de bicapa se realizó como se ha informado previamente (Brasil *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2019). Las manzanas seleccionadas se desinfectaron sumergiéndolas en agua clorada (250 mg/ L) durante un minuto, y se lavaron con agua destilada, se secaron con toallas de papel y se reservaron hasta su uso. Todos los materiales (superficies y utensilios) en contacto con las manzanas fueron desinfectadas previamente. Las manzanas se cortaron en pedazos de 1.5 cm de grosor y se recubrieron mediante la técnica de bicapa. Las manzanas se sumergieron en cada una de las soluciones de la primera capa (AS, GT, PT) durante 3 min desechando el exceso de recubrimiento y escurriéndolo hasta su secado antes de sumergir la muestra en la siguiente solución (AS). A continuación, la manzana recubierta se secó en una cabina de flujo laminar a temperatura

ambiente. Como control se utilizó manzana sin recubrir y sin presencia de prebiótico ni probiótico. Finalmente, las muestras recubiertas y no recubiertas se almacenaron durante 5 días a 4 °C y 23 °C (Treviño-Garza *et al.*, 2017).

6.5.-Conteo viable de microorganismos

La viabilidad de las cepas de *L. plantarum* en los recubrimientos aplicados a las manzanas se comprobó utilizando el método descrito por De Lacey *et al.* (2012) con pequeñas modificaciones: con la finalidad de disolver los recubrimientos aplicados en las manzanas, éstas fueron suspendidas en 9 ml de solución salina al 0.9% estéril, se dejaron hidratar y se llevaron a agitación constante en una incubadora orbital a 37 °C durante 1 h. Las soluciones obtenidas se sometieron a diluciones seriadas utilizando solución salina al 0.9% estéril y se vertieron en placas de agar MRS, las placas se almacenaron a 37 °C durante 48 h en condiciones aeróbicas para permitir el crecimiento de las unidades formadoras de colonias (UFC). El recuento de *L. plantarum* en las placas de agar se realizó por triplicado mediante recuento de las UFC (Champagne *et al.*, 2011) y los recuentos totales de las UFC viables se expresaron como log de unidades formadoras de colonias por gramo (log UFC/g, UFC/g = UFC/placa × factor de dilución) (Soukoulis *et al.*, 2014).

6.6.-Caracterización de los recubrimientos

6.6.1.- Medición de color

Se utilizó el método de Li *et al.*, 2025 para calcular el índice de pardeamiento (IP). Los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) de cada muestra se midieron con un colorímetro (CTI). El IP se calculó utilizando las siguientes fórmulas (Ecuaciones 1 y 2):

$$BI (\%) = \frac{x - 0.31}{0.172} \cdot 100 \quad Ec. 1$$

$$x = \frac{a^* + 1.75L^*}{(5.64L^* + a^*) - (3.02b^*)} \quad Ec. 2$$

donde L^* , a^* y b^* son los valores de color del recubrimiento; L , a y b son los valores del control.

6.6.2.-Medición del espesor

El espesor fue medido en mm con un micrómetro digital (Mitutoyo) de acuerdo con la metodología propuesta por Sánchez *et. al.* (2019). Se realizaron 8 mediciones en diferentes muestras elegidas al azar y se reportó el promedio y la desviación estándar de las mediciones realizadas.

6.6.3.- Medición de la solubilidad

Para determinar la solubilidad en agua se tomaron como referencia los métodos utilizados por Miranda, (2019) y Flores *et. al.* (2021) con algunas modificaciones.

Primero se cortó una biopelícula completa en rectángulos con dimensiones de 2 x 3 cm y se registró su peso. A continuación, se colocaron las películas en un vaso de precipitado que contenía 60 ml de agua destilada a una temperatura de 25°C durante 24 horas con agitación esporádica. Una vez pasadas las 24 horas las piezas de las películas fueron filtradas y secadas en horno a 70°C y fueron pesadas hasta obtener un peso constante. El porcentaje de solubilidad se calculó usando la Ecuación 3:

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial seco} - \text{peso final seco}}{\text{Peso inicial seco}} \times 100 \quad \text{Ec. 3}$$

6.6.4.- Medición de la permeabilidad al vapor de agua.

Se determinó siguiendo la metodología propuesta por Bizymis et al. (2024) y (Zhang et al., 2021) con modificaciones. Se colocaron las manzanas recubiertas en frascos con soluciones de glicerol al 10%, se registró el peso de las muestras durante el tiempo de la vida útil y se realizaron los cálculos siguiendo la Ecuación 4.

$$WVP(g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}) = \frac{\Delta M \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta P} \quad \text{Ec. 4}$$

donde ΔM es la cantidad de vapor de agua que atravesó la película durante el intervalo de tiempo Δt , l es el espesor de la película, A es el área de la película y ΔP es la diferencia de presión de vapor a través de la película.

6.7.- Determinación de la vida útil de las manzanas

Para el análisis de vida útil se tomaron en consideración las muestras en condiciones de refrigeración (4°C) y a temperatura ambiente (23 °C), en ambas se realizaron las siguientes pruebas:

6.7.1.- Medición de la dureza

Se usó un texturómetro (Brookfield CT3) para penetrar el fruto hasta una profundidad de 3 mm en la zona del hombro del fruto con una velocidad de ensayo de 3.0 mm s⁻¹. Los resultados se expresaron como fuerza máxima en newton (N). Cada medición se realizó al inicio y al final de la vida útil por triplicado (Yan et al., 2019).

6.7.2.- Determinación de pérdida de peso

La pérdida de peso se midió cada día, durante 5 días de almacenamiento, utilizando una balanza digital. Los resultados se expresaron como porcentaje de pérdida de peso de acuerdo con la Ecuación 5 (Zhang et al., 2022).

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde W_o es el peso inicial y W_t es el peso final.

6.8.-Análisis sensorial

Se realizó mediante una escala hedónica de cinco puntos, se seleccionaron 30 sujetos al azar (panelistas no entrenados) y se les dieron a probar los tratamientos CP y CPP (solo *L. plantarum* y *L. plantarum* e inulina, respectivamente) ambos de temperatura ambiente y se registraron las puntuaciones correspondientes (Brasil *et al.*, 2012).

7.-Resultados y discusión

Los recubrimientos comestibles fueron aplicados a las manzanas previamente cortadas, tal como se describió previamente en la sección de metodología.

Una vez aplicados los recubrimientos se inició el análisis de las manzanas para determinar su vida útil.

7.1.-Caracterización de los recubrimientos

La caracterización se enfocó en la determinación de sus características ópticas, fisicoquímicas y texturales.

7.1.1.- Determinación de color

El color es uno de los parámetros de mayor influencia en la percepción del consumidor, por ello es importante medirlo para entender cómo cambia a lo largo del tiempo y cómo se ve modificado por la adición de distintos componentes, además de los tratamientos que sufren los alimentos.

Para visualizar como se percibe el color se puede recurrir al espacio CIELab, en el cual se puede ubicar el color de los recubrimientos y entender cómo cambia respecto al paso del tiempo (Fig. 13).

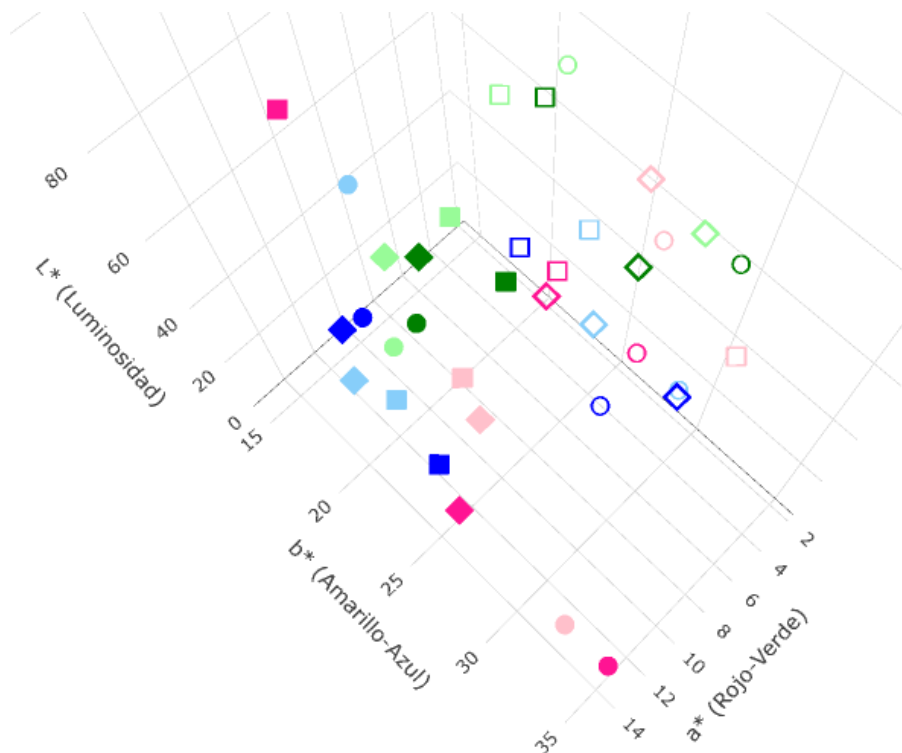


Fig. 13. Espacio CIELab de todos los tratamientos a temperatura ambiente al inicio y final de la vida útil.

En la Figura. 13 se encuentran ubicadas las coordenadas de color de todos los recubrimientos, con ayuda de esta imagen podemos entender cómo funciona el cambio de color, se puede observar que todos los puntos rellenos, los cuales corresponden a las mediciones finales, presentaron valores de L, menores, por lo cual tuvieron tonos de color más oscuros debido a que estos se relacionan con una luminosidad menor, mientras que para las variables a y b sus valores finales nos indican un tono más rojizo y uno más azul respectivamente, siendo el conjunto de estos valores un color café más oscuro en comparación con sus valores iniciales.

TRATAMIENTO	INICIAL AMB	INICIAL REF	FINAL AMB	FINAL REF
SPP/1C/GT				

SPP/2C/GT				
SPP/1C/PT				
SPP/2C/PT				
SPP/1C/AS				
SPP/2C/AS				

Fig. 14. Manzanas recubiertas para los tratamientos de SPP y todas sus mediciones.

Para la determinación de la vida útil se tomó en cuenta el estado visual de las manzanas, como se aprecia en la Figura 14, los estadios finales de las manzanas se encontraban altamente oxidados en las temperaturas a 23°C.

Índice de pardeamiento

El pardeamiento u oscurecimiento es un proceso natural que ocurre al magullar, pelar o cortar (también ocurre debido a enfermedad) o exponer a cualquier condición anormal un fruto o vegetal produciendo un oscurecimiento en contacto con el aire producto de la oxidación y formación de

melaninas marrones procedentes de la oxidación de compuestos fenólicos. La polifenol oxidasa (PPO) y peroxidasa (POD) son las responsables de este oscurecimiento enzimático (Jiang et al., 2015 ;[Ephrem et al., 2018](#)) esto ocurre en diversos productos vegetales como aguacates, plátanos, peras, berenjenas etc., el cambio de color debido a este proceso enzimático es un parámetro importante que indica que tan fresco se encuentra un alimento, las manzanas también se ven afectadas por este proceso, por lo que para este trabajo se midió el índice de pardeamiento (IP), para evaluar cómo se vio afectado por los distintos tratamientos, los resultados se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Índice de pardeamiento de las muestras a 23 °C al inicio y término de la vida útil

	23 °C INICIAL			23 °C FINAL		
TRATAMIENTO	SPP	CP	CPP	SPP	CP	CPP
1C/GT	55.83±5.76 ^{Bb1}	78.50±32.98 ^{Bb1}	35.71±1.50 ^{Ab1}	83.42±9.21 ^{B1}	50.96±31.49 ^{B1}	59.74±2.38 ^{A1}
2C/GT	80.12±13.11 ^{Bb2}	89.69±10.32 ^{Bb2}	54.65±4.35 ^{Ab2}	92.39±8.02 ^{B2}	73.89±14.26 ^{B2}	58.41±8.99 ^{A2}
1C/PT	48.10±1.17 ^{Bab1}	63.55±17.51 ^{Bab1}	53.00±4.09 ^{Aab1}	80.78±23.37 ^{B1}	69.22±10.93 ^{B1}	52.26±6.20 ^{A1}
2C/PT	75.55±8.43 ^{Bab2}	74.81±26.37 ^{Bab2}	55.82±1.46 ^{Aab2}	85.27±12.77 ^{B2}	60.06±6.71 ^{B2}	51.91±7.39 ^{A2}
1C/AS	53.29±7.00 ^{Ba1}	52.19±2.83 ^{Ba1}	37.63±3.93 ^{Aa1}	70.76±26.93 ^{B1}	73.93±14.84 ^{B1}	45.55±5.14 ^{A1}
2C/AS	80.72±11.27 ^{Ba2}	55.42±1.74 ^{Ba2}	39.09±2.64 ^{Aa2}	34.00±3.08 ^{B2}	83.18±6.71 ^{B2}	51.57±4.49 ^{A2}
SR	61.22 ± 5.30			64.05 ± 9.40		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras mayúsculas diferentes en el mismo renglón indican diferencia entre el número de capas, letras minúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre el biopolímero y números diferentes en la misma columna indican diferencias entre el número de capas ($p < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Para el IP en temperatura ambiente inicial se detectaron diferencias en todos los factores, particularmente se encontraron diferencias ($p < 0.05$) entre biopolímeros, el AS mostró una

reducción en los IP mientras que la gelatina mostró IP mayores, esto pudo deberse a la protección que proporcionó el AS, eso pudo deberse a que este tiene capacidad antioxidante moderada (Hoan et al., 2023) o también a que proporcionó una mejor barrera debido al espesor del mismo recubrimiento, retrasando el intercambio gaseoso, como se demostró en los análisis de espesor de dicho trabajo, mientras que la gelatina mostró un incremento en el IP, este fue ligeramente mayor al control, en manzanas recubiertas con gelatina se ha encontrado que esta disminuye el IP, aunque esto difiere con los resultados encontrados aquí, estas formulaciones han sido adicionadas con antioxidantes, como lo hecho por Zhang et al. (2021) quienes adicionaron ácido tánico para retrasar los procesos de oxidación, además de ser estos en formato de biopelícula, esta genera una menor manipulación del fruto y un menor estrés oxidativo, por otro lado, la cantidad de capas también fue un factor que modificó los IP. Los IP de los recubrimientos con una capa fueron menores, a pesar de que se pensaría que la adición de una segunda capa protegería mejor las manzanas, reduciendo el intercambio gaseoso y la senescencia la cuál puede estar asociada al contenido de grados Brix y el pH (Rossi-Márquez et al., 2022) en esta caso, de manera inicial la segunda capa provocó aumentos del IP, lo cual es mayormente atribuible a la manipulación que sufrió el fruto, liberando mayores cantidades de PPO, ya que la manipulación rompe las estructuras celulares (como vacuolas y pared celular) liberando PPO, además de estas quedar expuestas al O₂ libre, aumentando la cantidad de melaninas provocando el pardeamiento (Moon et al., 2020; Queiroz et al., 2008), este comportamiento del número de capas también se observó en los tratamientos iniciales de refrigeración.

Tabla 3. Índice de pardeamiento de las muestras a 4 °C al inicio y final de la vida útil

	4 °C INICIAL			4 °C FINAL		
TRATAMIENTO	SPP	CP	CPP	SPP	CP	CPP
1C/GT	67.11 ± 16.66 ^B	72.41 ± 24.35 ^B	33.13 ± 11.44 ^A	40.91 ± 10.34 ^B	80.01 ± 12.61 ^B	48.53 ± 3.08 ^A
2C/GT	68.38 ± 8.35 ^B	57.83 ± 5.36 ^B	54.66 ± 14.61 ^A	59.57 ± 22.41 ^B	69.27 ± 5.76 ^B	46.13 ± 11.74 ^A
1C/PT	51.94 ± 4.56 ^B	67.55 ± 26.57 ^B	49.35 ± 7.01 ^A	44.46 ± 6.94 ^B	59.88 ± 9.31 ^B	48.57 ± 1.78 ^A
2C/PT	83.80 ± 2.77 ^B	74.06 ± 10.83 ^B	53.09 ± 5.41 ^A	74.85 ± 19.60 ^B	65.27 ± 5.07 ^B	43.80 ± 4.09 ^A

1C/AS	46.05 ±1.84 ^B	49.04 ±0.70 ^B	46.92 ±11.75 ^A	67.99 ±25.27 ^B	81.11 ±37.81 ^B	49.29 ±4.23 ^A
2C/AS	54.63 ±0.92 ^B	97.67 ±4.29 ^B	41.39 ±16.86 ^A	78.10 ±24.15 ^B	96.53 ±39.34 ^B	47.41 ±3.12 ^A
SR	66.68 ± 4.72			72.11 ± 6.46		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras mayúsculas diferentes en el mismo renglón indican diferencia entre tratamiento (p < 0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

En general hubo diferencias (p < 0.05) entre los tratamientos, siendo los CPP los que demostraron tener índices más bajos de IP, mientras que SPP y CP fueron iguales entre sí, esta diferencia radica en la adición de inulina como fibra prebiótica, se ha reportado la capacidad antioxidante de prebióticos, como el uso de polisacáridos de hongos que exhiben capacidades antioxidantes, las cuales se cree inhiben la actividad de la PPO, este comportamiento también se ha observado en polisacáridos obtenidos a partir de frutas como la grosella de la india (*Phyllanthus emblica L*), este mecanismo puede relacionarse con la capacidad de polisacáridos, como lo es la inulina (del tipo fructano) de capturar los radicales libres de O₂ que se producen al cortar o magullar el fruto (El-Maradny et al., 2025; Kim, 2020; Huang et al., 2025; Zhao et al., 2021), particularmente en el tratamiento de refrigeración final hubo una diferencias (p < 0.05) entre el tratamiento CP y CPP, las células prebióticas quedan atrapadas en la membrana semipermeable del recubrimiento facilitando el intercambio gaseosos, por ende la capacidad de la PPO de producir el pardeamiento, por eso podemos observar valores mayores de IP (Fang et al., 2020).

También de manera global el pardeamiento aumentó significativamente (p < 0.05) al final de la vida útil, esto era de esperarse pues con el paso del tiempo se producen mayores cantidades de PPO y POD, existieron casos donde el IP no tuvo un cambio tan dramático, esto pudo deberse a que los sustratos de la PPO se acaban por la acumulación de pigmentos marrones en el fruto (Zhao et al., 2021), esto igual puede observarse en la Fig. 14.

7.1.2.- Determinación del espesor

El espesor de los recubrimientos es uno de los principales parámetros para determinar sus propiedades físicas, las mediciones de espesor de los recubrimientos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Valores promedio de la variable de espesor para los recubrimientos sin inulina ni *L. plantarum* a temperatura ambiente (23°C).

TRATAMIENTO	ESPESOR (mm)	
	SPP	
	1 CAPA	2 CAPAS

GT	0.0400 ± 0.02 ^{Aa}	0.0875 ± 0.05 ^{Ba}
PT	0.0525 ± 0.03 ^{Aab}	0.1338 ± 0.09 ^{Bab}
AS	0.0725 ± 0.01 ^{Ab}	0.1533 ± 0.05 ^{Bb}

Los valores son promedios ± SD (n=8). Letras mayúsculas diferentes en el mismo renglón indican diferencia entre el número de capas y letras minúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre el biopolímero ($p < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Los resultados presentados en la tabla 6 muestran que la adición de una segunda capa de alginato de sodio hace a los recubrimientos significativamente más espesos, además de ser significativamente más espesos que los elaborados a partir de gelatina ($p < 0.05$), esto tiene sentido pues al añadir una segunda capa se esperaba que el grosor aumentara, estos aumentos fueron de un poco más del doble del grosor de la primera capa, esto se debe principalmente a la naturaleza de gelificación del alginato de sodio, en estudios de caracterización por SEM (Moura-Alves *et al.*, 2023; Seixas *et al.*, 2013) en biopelículas de alginato de sodio y glicerol presentaban una superficie más uniforme, en comparación con otras añadidas con distintos aditivos (aceites esenciales y agentes reticulantes), lo cual dota a la capa de un grosor más uniforme y un mejor acomodo, esto también pudo deberse a un mayor número de unidades GG (Ácido α -L-Gulurónico) que proporciona un arreglo más ordenado (Abka-Khajouei *et al.*, 2022) en comparación la gelatina obtuvo el valor más bajo de espesor, también pudo deberse al tipo de enlaces que se forman en la gelificación de la gelatina, los enlaces covalentes son más débiles (Alipal *et al.*, 2021) en comparación a los iónicos a pesar de también presentar una superficie uniforme (Du *et al.*, 2024); ambos biopolímeros son hidrofílicos, no obstante el alginato de sodio presenta un carácter hidrofílico mayor al de la gelatina, al tener un mayor contenido de agua (que puede ser atrapada por dichos biopolímeros) el recubrimiento resultará con un mayor espesor (Hanry *et al.*, 2022) además el espesor promedio de la segunda capa concuerda con espesores reportados por Asiri *et al.* (2024).

Mientras que no hubo diferencias significativas entre el recubrimiento elaborado con pectina ($p > 0.05$).

7.1.3.- Determinación de la solubilidad

La solubilidad es un parámetro que considerar en la formulación de biopelículas y recubrimientos comestibles, está estrechamente relacionada con su aplicabilidad. Las películas pueden requerir insolubilidad en agua para mantener la integridad del producto y la resistencia al agua de los materiales de embalaje (Ballesteros-Mártinez *et al.*, 2020).

Tabla 5. Valores promedio de solubilidad de las diferentes formulaciones de los recubrimientos para todos los tratamientos a temperatura ambiente (23°C).

TRATAMIENTO	SOLUBILIDAD (%)		
	GT	PT	AS

SPP	1 CAPA	99.13% ±1.05 ^a	100.00% ±2.61 ^a	99.57% ±0.32 ^a
	2 CAPAS	99.51% ±0.59 ^b	100.00% ±1.27 ^b	99.81% ±0.13 ^b
CP	1 CAPA	99.85% ±2.54 ^a	98.65% ±0.45 ^a	97.66% ±2.30 ^a
	2 CAPAS	99.70% ±0.13 ^b	99.84% ±0.02 ^b	99.49% ±0.07 ^b
CPP	1 CAPA	99.95% ±0.00 ^{ab}	99.16% ±1.32 ^{ab}	100.00% ±1.22 ^{ab}
	2 CAPAS	99.16% ±0.61 ^{ab}	99.14% ±1.05 ^{ab}	99.67% ±0.05 ^{ab}

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras diferentes en la misma columna diferencia significativa (p<0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

De acuerdo con la tabla 5 los tratamientos con una segunda capa presentaron una solubilidad significativamente mayor ($p < 0.05$) respecto a los de una sola capa (aunque ambos tratamientos presentaron altas solubilidades), esto se debe a que estos tratamientos contienen una cantidad mayor de recubrimiento debido a la segunda capa de alginato de sodio, a pesar de ser soluble en agua este puede tardar y no solubilizarse totalmente (Frent *et al.*, 2022), pero, debido a la alta cantidad de glicerol en el recubrimiento, este pudo haber ayudado a optimizar la solubilidad, el glicerol (como otros plastificantes) puede reducir las fuerzas intermoleculares de las cadenas poliméricas del alginato, mejorando la movilidad de las mismas y por ende aumentando la solubilidad (Cao *et al.*, 2017; Saberi *et al.*, 2016), como lo reportado por Wang *et al.* (2022) y Ballesteros-Mártinez *et al.* (2020) en biopelículas de almidón al aumentar la concentración de glicerol la solubilidad aumentaba, esta diferencia de solubilidad también se puede explicar por la alta higroscopicidad del alginato de sodio (Fasulo *et al.*, 2025) esta alta solubilidad ha sido reportada por Puscaselu *et al.* (2019).

Se observó también una solubilidad significativamente mayor ($p < 0.05$) en el tratamiento que no tenía presencia de *L. plantarum* ni de inulina, mientras que en los recubrimientos que contenían *L. plantarum* presentaron una solubilidad significativamente menor ($p < 0.05$), la incorporación de las células probióticas da lugar a discontinuidades en la matriz del recubrimiento, lo que provoca un aumento de la velocidad de difusión de la humedad a través de la película comestible (Semwal *et al.*, 2022), esta característica está estrechamente relacionada con una alta solubilidad, otra razón podría deberse a la formación de puentes de hidrogeno entre las membranas fosfolipídicas de *L. plantarum* (Sáez-Orviz *et al.*, 2022) con los grupos hidroxilo del alginato de sodio, creando una estructura más fuerte, lo que dificulta que el agua cree dichos enlaces para empezar el proceso de solubilización.

Mientras que no se observaron diferencias en la solubilidad de la primera capa de los distintos biopolímeros, esto pudo deberse a que las condiciones de disolución fueron suficientes para que todos los biopolímeros se solubilizaran sin presentar diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellos, ni en el tratamiento con presencia de *L. plantarum* e inulina.

7.1.4.- Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.

La permeabilidad al vapor de agua (WVP) es uno de los parámetros más importantes a considerar al diseñar recubrimientos comestibles, pues esta nos indicará que tan eficiente será el mismo para retrasar la deshidratación y extender la vida útil (Saidi et al., 2024).

Tabla 6. Valores de la velocidad de transmisión de vapor de agua de todos los tratamientos a temperatura ambiente (23 °C).

TRATAMIENTO		WVP (g/(m*día*Pa))		
		GT	PT	AS
SPP	1 CAPA	6.25E-07 ± 1.23E-06 ^a	1.11E-07 ± 3.18E-06 ^a	5.87E-07 ± 4.29E-06 ^a
	2 CAPAS	5.60E-07 ± 4.75E-06 ^b	1.45E-06 ± 1.23E-04 ^b	7.47E-07 ± 4.97E-06 ^b
CP	1 CAPA	2.61E-07 ± 1.78E-06 ^a	7.08E-07 ± 4.28E-06 ^a	3.44E-07 ± 9.72E-06 ^a
	2 CAPAS	2.11E-07 ± 7.41E-06 ^b	1.02E-07 ± 6.62E-06 ^b	7.84E-07 ± 1.05E-06 ^b
CPP	1 CAPA	5.46E-06 ± 3.33E-05 ^a	7.08E-07 ± 4.28E-06 ^a	3.44E-07 ± 9.72E-06 ^a
	2 CAPAS	2.11E-07 ± 7.10E-06 ^b	1.02E-07 ± 6.62E-06 ^b	7.48E-07 ± 1.05E-06 ^b
		SR		
SR		5.47E-07 ± 3.03E-06		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras minúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia entre el número de capas (p<0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Como se puede apreciar en la tabla 6 los valores obtenidos de WVP de manera general que el número de capas influyó en la WVP, la adición de dos capas ofrece una menor WVP, esto tiene sentido pues una segunda capa ofrece una segunda barrera por la cual el vapor de agua debe migrar, en estudios realizados por Niu et al. (2023) en recubrimientos en cítricos por método de multi capa se observó una disminución en la WVP y en la pérdida de peso, esto también se apoya con la idea de que el PM y densidad de las soluciones juega un papel en la difusión del agua, en recubrimientos, ya que los recubrimientos de una sola capa fueron elaborados con distintos biopolímeros estos quedaron con grosores variables y a causa de la primer capa poros y grietas superficiales en el recubrimiento, mientras que al añadir una segunda capa del mismo biopolímero se permitió tener un acabado más uniforme, como se observó en lo reportado por Chen et al. (2023) en sus recubrimientos hechos a partir de quitosano y konjac, demostrando que sus tratamientos con múltiples capas fueron los que mejoraron la WVP y retrasaron la pérdida de agua.

Tabla 7. Valores de la velocidad de transmisión de vapor de agua de todos los tratamientos a temperatura de refrigeración (4 °C).

TRATAMIENTO		WVP (g/(m*día*Pa))		
		GT	PT	AS
SPP	1 CAPA	1.48E-06 ± 2.92E-05 ^A	6.73E-07 ± 1.08E-06 ^A	7.11E-07 ± 3.08E-06 ^A
	2 CAPAS	7.08E-07 ± 9.25E-06 ^A	2.01E-06 ± 6.61E-06 ^A	8.42E-07 ± 3.23E-06 ^A
CP	1 CAPA	2.43E-07 ± 3.04E-06 ^B	3.01E-07 ± 2.12E-06 ^B	3.48E-07 ± 5.03E-06 ^B
	2 CAPAS	1.88E-06 ± 4.49E-05 ^B	1.13E-05 ± 2.03E-04 ^B	1.42E-07 ± 2.20E-06 ^B
CPP	1 CAPA	2.34E-07 ± 3.04E-06 ^B	3.01E-07 ± 2.12E-06 ^B	3.48E-07 ± 5.03E-06 ^B
	2 CAPAS	1.88E-07 ± 4.49E-06 ^B	1.13E-05 ± 2.03E-04 ^B	1.42E-07 ± 2.20E-06 ^B
		SR		
SR		1.05E-05 ± 1.94E-04		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia entre el tratamiento (p<0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Como se puede apreciar en la tabla 7 los valores obtenidos de WVP para la temperatura de refrigeración se encontró que el tratamiento SPP mostró valores más altos de WVP, mientras que tanto el CP como el CPP fungieron como una mejor barrera, esta diferencia radica en la adición de *L. plantarum*, ya que fue el único factor que comparten ambos tratamientos, las células probióticas causan deformaciones en la conformación de la matriz polimérica, se ha mencionado que estos cambios conformacionales se comportan como poros, los cuales aumentan el espacio libre por el cual el agua puede permear (Davachi et al., 2021), los valores de CP y CPP pueden ser explicados debido a los cambios conformacionales en la matriz polimérica, estas interrupciones espaciales crean rutas más complejas por las que el agua permeará (Abedinia et al., 2021), además puede que debido a las membranas fosfolipídicas de los probióticos se reducen los espacios de enlaces libres de OH que crean sitios hidrofílicos (Sáez-Orviz et al., 2022), igualmente de manera general todos los tratamientos obtuvieron valores de WVP menores al control.

7.2.-Vida útil de las manzanas recubiertas

De acuerdo con los análisis posteriores de esta sección (pérdida de peso y dureza) junto con los análisis de color y aspecto visual de las manzanas (Fig. 14), se determinó que la vida útil de estas fue de cuatro días.

7.2.1.- Determinación del porcentaje en el cambio de dureza

La dureza se ve afectada por los cambios celulares que sufre la manzana debido a procesos enzimáticos y no enzimáticos, los cuáles se ven desencadenados por el corte, mayormente, y por la manipulación, se atribuye a la descomposición de la protopectina insoluble en pectina más

soluble (Tarawneh et al., 2025). La dureza es un factor a considerar para determinar la vida útil de la manzana, en la Tabla 8 se presenta el cambio en los valores de dureza de cada recubrimiento.

Tabla 8. Porcentajes de cambio de dureza de las diferentes formulaciones de los recubrimientos a 23 °C.

TRATAMIENTO		DUREZA (%)		
		23 °C		
		GT	PT	AS
SPP	1 CAPA	62 ± 0.06 ^{Aa}	42 ± 0.13 ^{Aa}	67 ± 0.30 ^{Aa}
	2 CAPAS	62 ± 0.16 ^{Ab}	46 ± 0.30 ^{Ab}	50 ± 0.23 ^{Ab}
CP	1 CAPA	126 ± 0.45 ^{Ba}	132 ± 0.10 ^{Ba}	108 ± 0185 ^{Ba}
	2 CAPAS	56 ± 0.10 ^{Bb}	93 ± 0.13 ^{Bb}	121± 0.26 ^{Bb}
CPP	1 CAPA	189 ± 0.22 ^{Ca}	166 ± 0.35 ^{Ca}	255 ± 0.42 ^{Ca}
	2 CAPAS	102 ± 0.44 ^{Cb}	97 ± 0.01 ^{Cb}	95 ± 0.04 ^{Cb}
		SR		
SR		60 ± 0.06		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia significativa por el tratamiento y letras minúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre el número de capas (p<0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

En la Tabla 8, se puede observar que se obtuvieron valores menores de dureza al final de la vida útil en los tratamientos correspondientes a los tratamientos SPP, aumentando los tratamientos CP y CPP progresivamente, siendo los CPP los que obtuvieron mayores cambios que reflejan aumentos en la dureza de las muestras, esto concuerda con lo realizado por Solís-Contreras et al. (2021) donde se ha visto que en manzanas mínimamente procesadas la textura se mantiene de mejor manera, aunque sus recubrimientos inicialmente mostraron un buen comportamiento este con el paso del tiempo fue decreciendo, Ali et al. (2025) igualmente reportaron un cambio significativo en manzanas tratadas con quitosano y aceites esenciales, respecto a su control y muestras tratadas, igualmente se vio un decremento de la dureza en manzanas recubiertas con formulaciones combinadas (proteínas y polisacáridos) (Jang et al., 2025) ya que estas sufren una mayor manipulación y tratamiento a sus contrapartes solamente sin recubrir.

La adición de la segunda capa disminuyó la dureza, esto pudo deberse a que la segunda capa afecta la cantidad de agua que puede salir de la manzana, esta pérdida de agua se da por evaporación y por procesos osmóticos (Ali et al., 2025). Estos procesos pudieron llevarse a cabo durante el secado de los recubrimientos y durante el tiempo que permaneció la manzana expuesta a la intemperie, lo cual podemos relacionar igualmente con los cambios que la manzana sufre debido a la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO). En experimentos de múltiples capas

Rossi-Márquez et al. (2022) observaron una mejor capacidad de retención de la dureza en chirimoyas con múltiples capas en comparación del control sin tratar, aunque esta dureza disminuyó significativamente después de dos días, se puede sugerir que las capas crean pequeñas atmosferas donde se aumenta la cantidad de CO₂ disminuyendo a su vez el O₂ libre retrasando los procesos enzimáticos que llevan a la pérdida de dureza, aunque este no fue el caso de las manzanas, sin embargo, podemos suponer que la atmosfera generada en las chirimoyas fue debida mayormente a la deposición de ácidos de quitosano en el recubrimiento generando una carga positiva en el mismo, mientras que en este proyecto se utilizó alginato de sodio, el cual es un anión (Sivaramakrishnan & Vimala, 2022).

En comparación con el control los valores tendieron a ser mayores, por lo que la dureza de los recubrimientos sufrió cambios que indican una mayor dureza.

Tabla 9. Porcentajes de cambio de dureza de las diferentes formulaciones de los recubrimientos a 4 °C.

TRATAMIENTO		DUREZA (%)		
		4 °C		
		GT	PT	AS
SPP	1 CAPA	120 ± 0.08 ^B	105 ± 0.30 ^B	92 ± 0.25 ^B
	2 CAPAS	113 ± 0.21 ^B	110 ± 0.37 ^B	104 ± 0.04 ^B
CP	1 CAPA	95 ± 0.18 ^B	91 ± 0.07 ^B	83 ± 0.06 ^B
	2 CAPAS	71 ± 0.18 ^B	79 ± 0.4 ^B	99 ± 0.27 ^B
CPP	1 CAPA	97 ± 0.32 ^A	90 ± 0.17 ^A	91 ± 0.21 ^A
	2 CAPAS	70 ± 0.02 ^A	101 ± 0.14 ^A	105 ± 0.41 ^A
		SR		
SR		80 ± 0.11		

Los valores son promedios ± SD (n=3). Letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencia significativa por el tratamiento (p<0.05), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Se encontraron menores cambios en la dureza en los tratamientos de CPP, estos indican que la dureza disminuyó menos en comparación con los otros dos tratamientos, nuevamente la adición de inulina jugó un papel fundamental en la conservación de las propiedades de la manzana, siendo esta la pérdida de dureza que sufre por senescencia. La inulina (como otros polisacáridos), podría jugar un papel en la viscosidad de la fruta, mejorando la adhesión de las células, aumentando el contenido que no se ha degradado de pectina, por ende reteniendo mejor la dureza (Liu et al., 2024) o contribuyendo como un polisacárido estructural en la organización de las estructuras celulares de la manzana (Tarawneh et al., 2025), igualmente podría tratarse de la pectina al capturar mejor el agua crea una atmósfera mayor en CO₂ dificultando la acción enzimática y por ende la

degradación de la pectina estructural de la manzana (Allanigue et al., 2017) reduciendo así la pérdida de dureza por los procesos de senescencia celular en el fruto.

En general los valores se mantuvieron más cercanos al valor del control, aunque estos presentaron aumentos en la dureza con respecto a la manzana sin recubrir, resulta vital entender como estos valores de una dureza mayor afectan la percepción del consumidor, pues podrían ser más incómodos al momento de consumirlos sintiéndose con una textura fibrosa, mientras que para valores de dureza más bajos se podría interpretar con una textura que indique un menor grado de frescura debido a su consistencia más blanda, estas interpretaciones se ven fuertemente influenciadas por la apariencia del fruto, por lo que este análisis debe ser complementado por uno sensorial para entender como la dureza interfiere en la aceptabilidad general. De manera global la dureza se mantuvo mejor en condiciones de refrigeración, por el efecto que tienen las bajas temperaturas en la velocidad en que se llevan los procesos de senescencia celular, presentando cambios menos dramáticos en la dureza.

7.2.2.-Determinación de pérdida de peso

Uno de los principales objetivos de este trabajo fue medir como los recubrimientos podrían proteger a la manzana frenando su deterioro, para esto se probaron dos condiciones de almacenamiento, a temperatura ambiente y de refrigeración (siendo esta la más utilizada por los consumidores). La pérdida de peso o de agua se produce cuando la piel de las manzanas recién cortadas se expone a un ambiente con menor humedad relativa (Olivas et al, 2003).

Clave	Tratamiento
	SR
	CP/1C
	CP/2C
	CPP/1C
	CPP/2C
	SPP/1C
	SPP/2C

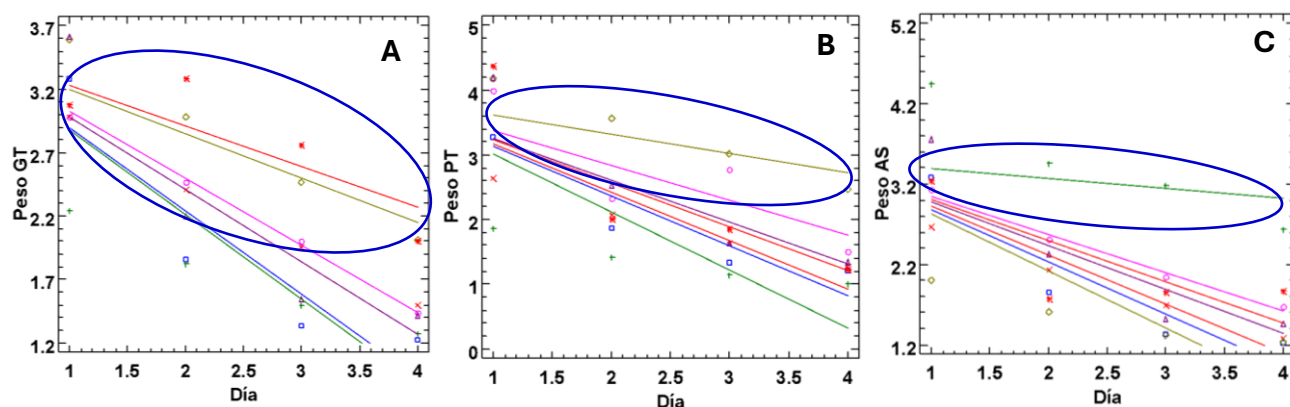


Figura 15. Pérdidas de peso a 23 °C de: A) Gelatina. B) Pectina. C) Alginato de sodio.

En la Figura 15, se puede observar que la pendiente señalada con un óvalo azul en la Figura 16.A), línea roja, corresponde al tratamiento donde solo se aplica el recubrimiento sin aditivos (SSP/1C/GT), esto pudo deberse a una mejor adhesión de la gelatina en la manzana, la alteración del potencial, Z que se asocia a la adhesión del biopolímero con su sustrato, debido a la adición de otras partículas (como las células probióticas) (Estrella-Osuna et al., 2024 ; Pérez-Marroquín et al., 2022) pudo ser la responsable de que sin aditivos la gelatina se adhiriese mejor y creará una capa más uniforme frenando la pérdida de agua. La línea verde de la misma imagen corresponde al recubrimiento adicionado con *L. plantarum* e inulina con dos capas (CPP/2C/GT), comportamiento que también se ve en el mismo tratamiento del recubrimiento formulado con pectina (CPP/2C/PT) correspondiente a la pendiente señalada de la Figura 1.B, en el tratamiento con inulina y *L. plantarum* podemos ver que el que tiene solo una capa presentó una pérdida de peso mayor en comparación al de dos capas, y para el recubrimiento hecho con alginato de sodio (CPP/1C/AS) a una capa también se presentó una menor pérdida de peso, esto concuerda por lo reportado por Rößle et al. (2010) en donde sus manzanas recubiertas con alginato de sodio e inulina presentaron una menor pérdida de peso (del 1% al 2%) en comparación con una manzana sin recubrir, al que Şahan and Bozkurt (2025), donde sus recubrimientos con alginato de sodio y un cultivo bacteriano en alta dosis (5 log) fueron los que mejor retuvieron el agua en pistaches después de cinco meses, al igual que Miao et al. (2025) donde sus recubrimientos de alginato de sodio, mejorado con partículas de sílica redujeron la pérdida de peso en naranjas y persimos, por lo que un recubrimiento de alginato de sodio mejorado con distintos aditivos reducen la pérdida de peso a temperatura ambiente.

Se puede observar que el tratamiento CPP fue donde se presentaron las menores pérdidas de peso, esto se pudo deber a la presencia de la inulina, ya que el tratamiento solo con *L. plantarum* no exhibió tal comportamiento para ningún polímero, por lo que la presencia de inulina fue el factor que produjo tal cambio, debido a su carácter hidrofílico, la inulina presenta una alta capacidad de retener agua y formar geles, por lo que esta pudo ser la mayor responsable de retener el agua que perdían los recubrimientos, además la inulina de cadena corta, del tipo usada para este trabajo,

presenta una mayor capacidad de retener agua en comparación de la nativa y la de cadena larga (Canazza et al., 2025 ; Bchir et al., 2019).

Todos estos tratamientos mostraron una menor pérdida peso a lo largo del tiempo de manera significativa ($p < 0.05$) en comparación con el tratamiento control, sus pendientes son menos pronunciadas, lo cual indica un mejor rendimiento por parte de los tratamientos recubiertos que nos indica una mayor conservación del fruto debido a una menor tasa en la pérdida de agua.

En la Figura 16 se presentan los resultados de pérdida de peso obtenidos para las manzanas recubiertas en condiciones de refrigeración (4°C).

Aquí puede observarse que de los tratamientos elaborados a partir de gelatina el correspondiente a CP/2C/GT presentó significativamente ($p < 0.05$) una menor pérdida de peso en comparación con el control, mientras que el correspondiente a CPP/2C/GT presentó en contraste de manera significativa ($p < 0.05$) una mayor pérdida de peso en comparación con el control, para ambos análisis en sus distintas condiciones de temperatura se busca que las pérdidas de peso sean menores, ya que esto indica que el agua que pierde el fruto es poca, por ende indica un retraso en los procesos de senescencia en la manzana, esto se relaciona con un mayor estado de frescura lo que se busca obtener en este trabajo y análisis.

Clave	Tratamiento
	SR
	CP/1C
	CP/2C
	CPP/1C
	CPP/2C
	SPP/1C
	SPP/2C

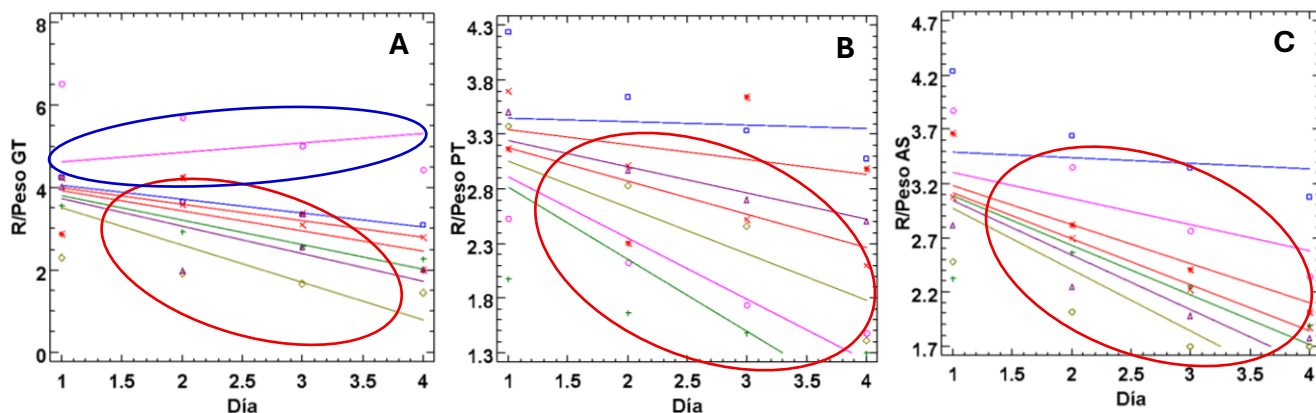


Figura 16. Pérdidas de peso a 4°C de: A) Gelatina. B) Pectina. C) Alginato de sodio.

Para el grupo de pectina los tratamientos correspondientes a: CP/2C/PT, CPP/1C/PT y CPP/2C/PT, presentaron pérdidas significativas ($p < 0.05$) en comparación con el grupo control, esto contrasta con lo reportado por Li et al. (2025), donde las manzanas control presentaron la mayor pérdida de peso, esto pudo deberse a que sus formulaciones contenían ϵ -polilisina, la cual en conjunto con la pectina y un mayor contenido de glicerol ($\approx 40\%$) mejoraron las propiedades de barrera en condiciones de refrigeración.

Para el grupo de alginato de sodio todos los tratamientos, excepto CP/2C/AS, presentaron mayores pérdidas de peso ($p < 0.05$) en comparación con el grupo control. Para los tratamientos con inulina, su menor rendimiento en comparación de la temperatura ambiente pudo deberse a que a bajas temperaturas su proceso de gelificación cambia, esta se recristaliza, las moléculas con un menor grado de polimerización se reagrupan dejando núcleos, estos núcleos pudieron interferir en la conformación del recubrimiento dejando poros de mayor tamaño que dejaban escapar agua más rápido que el grupo control (Canazza et al., 2025; Bchir et al., 2019).

Es importante recalcar que de manera global la refrigeración retrasa la pérdida de peso, pero para efectos del análisis se separaron ambas condiciones para evaluarlas de manera independiente.

7.3.-Conteo viable de microorganismos

Tabla 10. Viabilidad de *L. plantarum* después de la vida de anaquel a 23 °C para todos los tratamientos.

VIABILIDAD DE <i>L. plantarum</i> (Log UFC/ml) a 23 °C				
TRATAMIENTO		GELATINA	PECTINA	ALGINATO
CP	1 CAPA	6.93 $\pm$ 0.88 ^a	2.10 $\pm$ 3.46 ^a	6.40 $\pm$ 0.00 ^a
	2 CAPAS	0.00 $\pm$ 0.00 ^a	2.00 $\pm$ 3.64 ^a	6.00 $\pm$ 0.46 ^a
CPP	1 CAPA	4.40 $\pm$ 3.82 ^a	4.10 $\pm$ 3.55 ^a	0.00 $\pm$ 0.00 ^a
	2 CAPAS	2.00 $\pm$ 3.46 ^a	2.10 $\pm$ 3.64 ^a	6.36 $\pm$ 0.10 ^a

Los valores son promedios $\pm$ SD (n=3). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias entre el tratamiento ($p < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

Para las condiciones de temperatura ambiente no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ninguna de las variables del experimento, aunque de manera general se puede observar que la adición de una segunda capa disminuyó la viabilidad para ambos tratamientos de CP y CPP, esto puede ser atribuido al estrés respiratorio (Sáez-Orviz et al., 2022) que supuso la adición de la segunda capa durante su aplicación y proceso de secado el cuál fue decisivo para la concentración inicial que tenía la primer capa, esta idea se puede apoyar en los resultados obtenidos en las pruebas de WVP (Tabla 8) donde a pesar de que la segunda capa redujo la WVP, esta también indujo un mayor estrés durante el secado o debido a las distintas condiciones de temperatura (Ceylan & Atasoy, 2023) o pudo haber sido por estrés osmótico (Mbye et al., 2020) debido a que la segunda capa tiene una concentración diferente de aditivos (inulina y *L. plantarum*).

Además de haber obtenido valores globales menores de viabilidad en comparación con los tratamientos en temperatura de refrigeración, lo que avala el estrés debido al factor de la temperatura, aunque este no es un factor que presente una diferencia significativa ($p > 0.05$).

Tabla 11. Viabilidad de *L. plantarum* después de vida de anaquel a 4 °C para todos los tratamientos.

VIABILIDAD DE <i>L. plantarum</i> (Log UFC/ml) a 4 °C				
TRATAMIENTO		GELATINA	PECTINA	ALGINATO
CP	1 CAPA	7.17 $\pm$ 0.24 ^A	6.55 $\pm$ 0.56 ^A	6.57 $\pm$ 0.38 ^A
	2 CAPAS	7.37 $\pm$ 0.28 ^A	6.53 $\pm$ 0.68 ^A	6.90 $\pm$ 0.43 ^A
CPP	1 CAPA	6.24 $\pm$ 0.34 ^B	4.00 $\pm$ 3.46 ^B	2.00 $\pm$ 3.46 ^B
	2 CAPAS	0.00 $\pm$ 0.00 ^B	2.50 $\pm$ 4.33 ^B	0.00 $\pm$ 0.00 ^B

Los valores son promedios $\pm$ SD (n=3). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias entre el tratamiento ($p < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

En la tabla 11 podemos observar el recuento de *L. plantarum* al final de la vida útil para 4 °C, de manera global, el tratamiento con solamente *L. plantarum* mostró valores mayores de viabilidad ($p < 0.05$) en comparación con el que contenía *L. plantarum* e inulina. Estos datos difieren con lo reportado por Boubakeur et al. (2026) quienes reportaron que los recubrimientos en mango adicionados con inulina y *L. plantarum* estuvieron encima del umbral (6.53 log UFC), mientras que los que no contenían inulina presentaron un valor de 5.61 log UFC al cabo de 5 días, siendo este valor menor al del umbral (6 log UFC), los autores sugieren que la inulina fue el factor que mejoró la viabilidad de *L. plantarum*, sin embargo, en el presente trabajo se encontró un comportamiento opuesto, pues aquí el tratamiento que solo contenía *L. plantarum* mostró una mayor viabilidad, esto pudo deberse a que la cantidad de inulina fue mayor en este trabajo en comparación con el de Boubakeur et al. (2026), de manera general la inulina pudo haber capturado el agua libre

dejando a *L. plantarum* con una limitación para permanecer hidratado o pudo haber modificado la estructura polimérica de la matriz, permitiendo que el agua migrara más fácilmente, como se sugiere en el análisis de pérdida de peso de este mismo trabajo (Fig. 17). Los resultados de este trabajo también concuerdan con lo reportado por Hashemi y Jafarpour (2021), quienes obtuvieron conteos de 6 y 7 log UFC en piezas de kiwi a esta temperatura adicionados con especies de lactobacilos.

De acuerdo con Bambace et al. (2024) en manzanas recubiertas igualmente adicionadas con probióticos (especie de BAL) y prebióticos (entre ellos inulina) se mantuvieron conteos menores en sus manzanas enriquecidas con prebióticos en comparación con las que no lo tenían, aunque estos igualmente se mantuvieron por encima del umbral mínimo, pero dicho resultado concuerda con lo reportado en este trabajo. Otro parámetro que pudo haber influenciado la viabilidad de *L. plantarum* fue el pH, de acuerdo con Speranza et al. (2018) en manzanas recubiertas con alginato de sodio y BAL se presentó un aumento en el pH de sus recubrimientos, lo que incrementó la viabilidad en el tiempo, *L. plantarum* es una bacteria ácido láctica que soporta rangos de pH ácidos (4 a 7), siendo entre 6.0 y 7.0 (Popova-Krumova et al., 2024) los óptimos para su desarrollo, como lo reportó Speranza et al. (2018), en sus estudios posteriores en piezas de melón igualmente se pudo encontrar una alta viabilidad de BAL.

Para el tratamiento de CPP el pH fue de alrededor de 3.58, mientras que para el tratamiento CP fue de 3.66, estos rangos quedan fuera del rango de pH que soporta *L. plantarum*, aunque la mayor supervivencia del tratamiento fue en donde hubo un mayor pH, este es un parámetro esencial por tomar en cuenta para la viabilidad de *L. plantarum* y en otras características del recubrimiento.

Bambace et al. (2024) y Boubakeur et al. (2026) atribuyen los cambios de viabilidad a la modificación de la permeabilidad por la adición de distintos componentes a las matrices poliméricas, esto se puede relacionar con las múltiples interacciones que una matriz alimentaria (carnes, productos horneados, jugos) puede presentar con células probióticas y aditivos (Siyahli et al., 2025; García et al., 2016). Para esta temperatura (4°C), la presencia de una segunda capa fue mejor, en comparación con la temperatura ambiente, ya que esta como se mencionó anteriormente puede provocar estrés celular. A 4°C hubo mayor presencia de *L. plantarum*, aunque no hubo diferencias significativas en comparación con una sola capa ($p > 0.05$).

A pesar del bajo recuento de probióticos viables, los que se encuentran muertos nos brindan una idea de cómo pueden fungir como postbióticos, estos pueden definirse como sustancias derivadas de probióticos inactivos, muertos o partes de ellos (como su pared celular) que tienen un efecto en la salud humana (Vinderola et al., 2022) y de cómo mejorar las formulaciones.

7.4.-Análisis sensorial

La aceptabilidad de un producto puede ser medida mediante un análisis sensorial por medio de una escala hedónica, esta arroja información sobre qué tan aceptado es un atributo.

Clave	Tratamiento	Numero de capas	Biopolímero
CP/1C/AS	Con probiótico	1 capa	Alginato de sodio
CP/1C/GT	Con probiótico	1 capa	Gelatina
CP/1C/PT	Con probiótico	1 capa	Pectina
CP/2C/AS	Con probiótico	2 capas	Alginato de sodio
CP/2C/GT	Con probiótico	2 capas	Gelatina
CP/2C/PT	Con probiótico	2 capas	Pectina

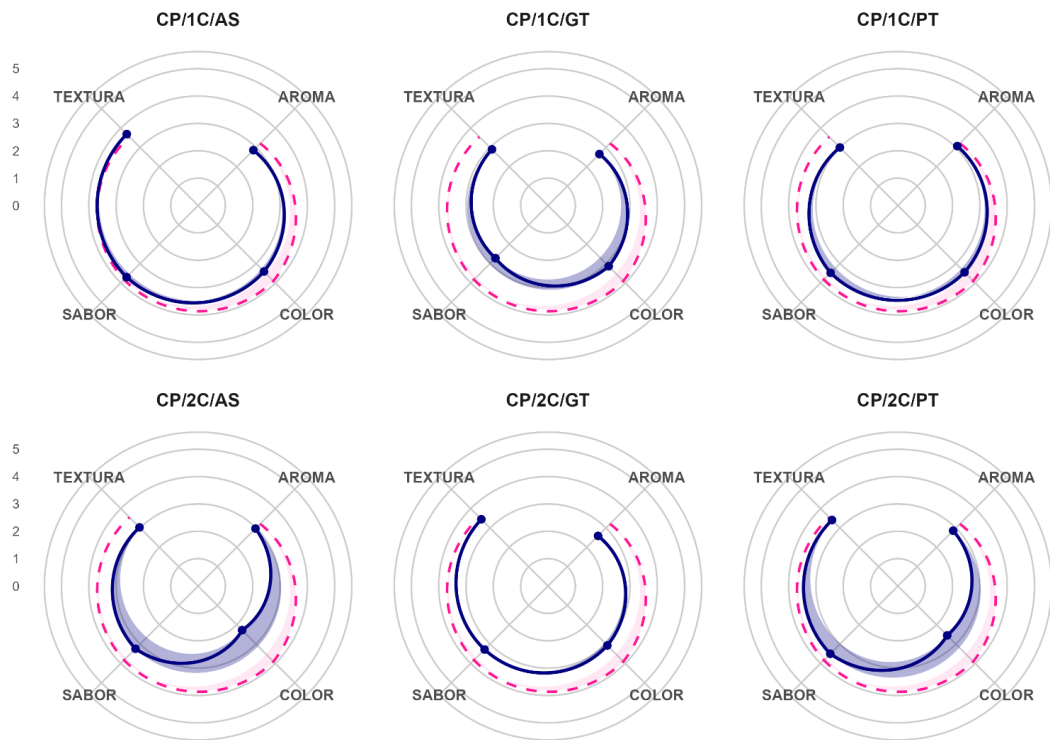


Fig. 17. Análisis sensorial de todos los tratamientos con presencia de *L. plantarum* (área azul) contra el control (línea punteada rosa).

Para el análisis sensorial se consideró como buena aceptación los puntajes >60%.

En la Figura. 17. Se puede observar la variación que existe para cada atributo respecto al control para todos los tratamientos de los recubrimientos solo con presencia de *L. plantarum*.

Respecto al color, el control tuvo un 78% de aprobación, esta fue diferente ($p < 0.05$) a los tratamientos con dos capas, los recubrimientos elaborados con pectina y alginato de sodio

obtuvieron las peores puntuaciones (> 60%), el resto de los tratamientos resultaron sin diferencias significativas y con puntuaciones positivas, estos resultados coinciden con lo reportado por García *et al* (2016).

Mientras que, para el sabor, solo el control, con una aceptación del 76%, fue diferente ($p < 0.05$) al tratamiento de gelatina a una capa, con una valoración del 55%, ya que el resto de los tratamientos son estadísticamente iguales tanto al mejor, como al peor tratamiento, aunque todos estos poseen puntuaciones favorables.

Para el atributo de aroma y textura no se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), para la textura, la mayoría de tratamientos, excepto los hechos con gelatina, presentaron valoraciones positivas (>60%), por lo que no presentan diferencias perceptibles para el consumidor respecto al control, de modo contrario en el atributo de aroma todos los tratamientos tuvieron mala recepción, incluyendo el control, por lo que se debe explorar como mejorar dicho atributo con los recubrimientos, ya que estos tampoco presentan diferencia perceptible respecto al control.

De manera general el control fue el que obtuvo mayores puntuaciones en todos los atributos, sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) con los tratamientos que presentaron puntuaciones positivas.

Clave	Tratamiento	Numero de capas	Biopolímero
CPP/1C/AS	Con prebiótico y probiótico	1 capa	Alginato de sodio
CPP/1C/GT	Con prebiótico y probiótico	1 capa	Gelatina
CPP/1C/PT	Con prebiótico y probiótico	1 capa	Pectina
CPP/2C/AS	Con prebiótico y probiótico	2 capas	Alginato de sodio
CPP/2C/GT	Con prebiótico y probiótico	2 capas	Gelatina
CPP/2C/PT	Con prebiótico y probiótico	2 capas	Pectina

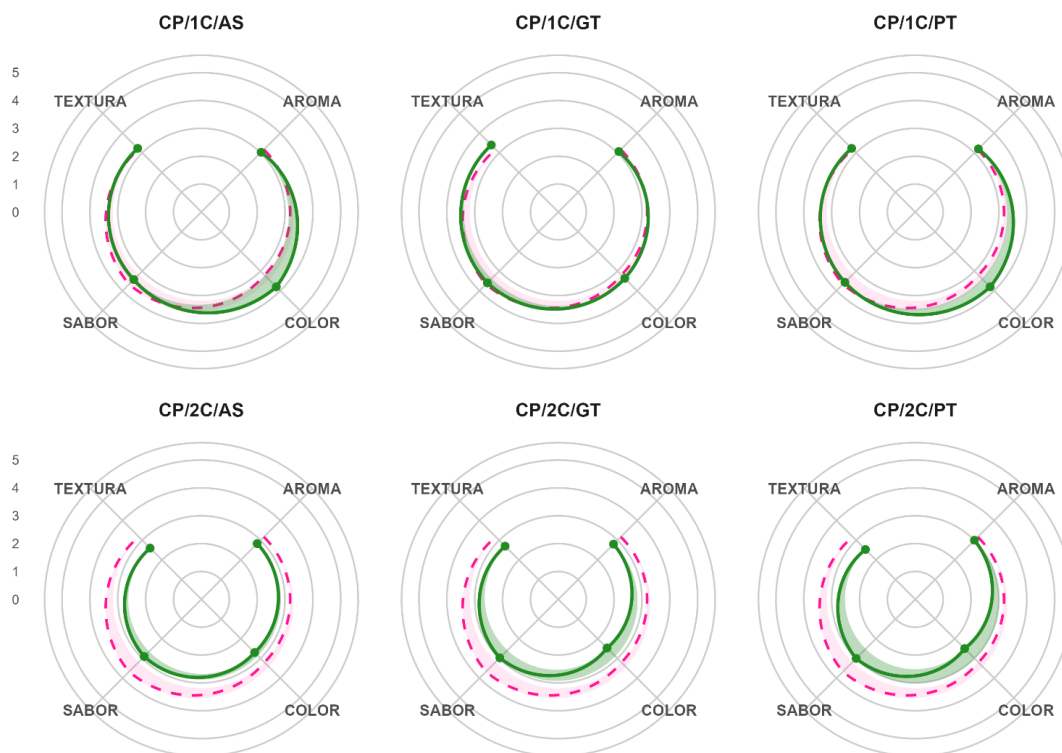


Fig. 18. Análisis sensorial de todos los tratamientos con presencia de *L. plantarum* e inulina (área verde) contra el control (línea punteada rosa).

En la Figura. 18. Se puede observar la variación que existe para cada atributo respecto al control en todos los tratamientos de los recubrimientos con presencia de *L. plantarum* e inulina (probiótico y prebiótico).

En el atributo de color podemos observar que los recubrimientos con una capa tuvieron puntuaciones más altas ($> 68\%$) respecto al control, aunque estas diferencias no son significativas, esto pudo deberse a que el brillo aportado por las segundas capas no resultó visualmente placentero, además de que la manzana control se notaba más deteriorada por su estado de oxidación, esto se vio de igual manera en los experimentos de Rößle et al. (2010).

Para el atributo de aroma tampoco se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$), a pesar de que las segundas capas tendieron a presentar valoraciones más bajas en comparación con su contraparte de una capa, del mismo modo estas variaciones fueron mínimas.

Los recubrimientos que contenían una segunda capa fueron los peor calificados ($> 50\%$), esto se pudo deber al sabor amargo de la segunda capa hecha de alginato y a tener una textura más incomoda al paladar, para el atributo de sabor fueron diferentes ($p < 0.05$) al resto de los tratamientos, como lo reportado por Rößle et al. (2010) donde las manzanas con alginato de sodio fueron las peor calificadas, para este mismo atributo, los tratamientos que contenían una capa tuvieron valoraciones positivas ($> 68\%$), esto pudo deberse a que en esas capas el contenido de

inulina fue más fácilmente percibido por los panelistas, lo que resultó en un sabor dulce y más agradable (Röbke et al., 2010), al igual estas puntuaciones fueron diferentes ($p > 0.05$) a las segundas capas, percibiéndose iguales al control, lo que resulta favorecedor pues esta no interfiere con la percepción del sabor de manera negativa, como fue visto en la Figura 14. de los recubrimientos sin la presencia de esta.

La textura de los recubrimientos al igual presentó valoraciones positivas en la primera capa, siendo la mejor la correspondiente al tratamiento de gelatina (68%) superando al control, mientras que para las segundas capas se registraron puntuaciones más bajas, siendo el tratamiento de pectina (50%) el peor valorado significativamente ($p < 0.5$), el resto de los tratamientos fueron estadísticamente iguales entre sí.

Sin embargo, debido al reducido número de participantes (< 50), el análisis sensorial debe considerarse preliminar y requiere una investigación más profunda.

8.-Conclusiones

Los resultados demuestran que la aplicación de los recubrimientos comestibles en bicapa tiene un impacto favorable sobre en las propiedades funcionales y la conservación de la manzana 'Golden Delicious', especialmente los que fueron enriquecidos con inulina y *L. plantarum*. La caracterización fisicoquímica mostró que los recubrimientos en general mejoraron la retención de agua y disminuyendo la permeabilidad al vapor de agua, retrasando así la pérdida de peso en comparación con los frutos sin recubrir, este comportamiento se vio favorecido en los tratamientos con inulina y *L. plantarum*, ayudando además a conservar una textura más firme, retardando además el proceso de pardeamiento inicial e influyendo positivamente en la percepción sensorial.

Mientras que para el análisis microbiológico se observó que los tratamientos con la sola presencia de *L. plantarum* mostraron una mayor presencia de células probióticas viables al final de la vida útil en comparación con su tratamiento enriquecido con inulina, lo anteriormente mencionado se observó con mayor énfasis para la temperatura de refrigeración, aunque para ambas condiciones se observó dicho comportamiento.

En conjunto, dichos hallazgos muestran que los recubrimientos en bicapa con *L. plantarum* e inulina se erigen como una estrategia viable para la conservación y la adición de propiedades nutrimentales promoviendo así alimentos de carácter sostenible.

9.-Perspectivas

Resulta necesario establecer cambios en las formulaciones de cada matriz polimérica, añadiendo por ejemplo agentes reticulantes para mejorar las propiedades conformacionales dependiendo

del tipo de biopolímero, igualmente añadir agentes antioxidantes compatibles con *L. plantarum* para retrasar el pardeamiento del fruto, establecer metodologías que manipulen menos el fruto o procesarlo de una manera distinta como la deshidratación para eliminar los problemas que se relacionan con su vida útil centrándonos en su aceptabilidad y en su capacidad como alimento funcional, mejorando la sinergia simbiótica de *L. plantarum* con la inulina, pudiendo incluso aumentar los tipos de probióticos que puede utilizar *L. plantarum*, además de establecer una concentración mayor de este para que no decaiga durante los tiempos de almacenamiento, igualmente mejorar las condiciones de las pruebas sensoriales.

10.-Referencias

1. Abedinia, A., Alimohammadi, F., Teymori, F., Razgardani, N., Asl, M. R. S., Ariffin, F., Nafchi, A. M., Huda, N., & Roslan, J. (2021). Characterization and cell viability of Probiotic/Prebiotics Film based on Duck Feet Gelatin: a novel poultry gelatin as a suitable matrix for probiotics. *Foods*, 10(8), 1761. <https://doi.org/10.3390/foods10081761>
2. Abka-Khajouei, R., Tounsi, L., Shahabi, N., Patel, A. K., Abdelkafi, S., & Michaud, P. (2022). Structures, properties and applications of alginates. *Marine Drugs*, 20(6), 364. <https://doi.org/10.3390/md20060364>
3. Agarwal, A., Pathera, A. K., Kaushik, R., Kumar, N., Dhull, S. B., Arora, S., & Chawla, P. (2020). Succinylation of milk proteins: Influence on micronutrient binding and functional indices. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.016>
4. Aguirre-Joya, J.A., De Leon-Zapata, M.A., Alvarez-Perez, O.B., Torres-León, C., Nieto-Oropeza, D.E., Ventura-Sobrevilla, J.M., Aguilar, M.A., Ruelas-Chacón, X., Rojas, R., Ramos-Aguiñaga, M.E. & Aguilar, C.N. (2018). Basic and Applied Concepts of Edible Packaging for Foods. *Food Packaging and Preservation*, 1-60.
5. Ali, N., Dina, E., & Tas, A. A. (2025). Bioactive Edible Coatings for Fresh-Cut Apples: A Study on Chitosan-Based Coatings Infused with Essential Oils. *Foods*, 14(13), 2362. <https://doi.org/10.3390/foods14132362>
6. Alipal, J., Pu'ad, N. M., Lee, T., Nayan, N., Sahari, N., Basri, H., Idris, M., & Abdullah, H. (2021). A review of gelatin: Properties, sources, process, applications, and commercialization. *Materials Today Proceedings*, 42, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.922>
7. Allanigue, D.K.A.; Sabularse, V.C.; Hernandez, H.P.; Serrano, E.P. The effect of chitosan-based nanocomposite coating on the postharvest life of papaya (*Carica papaya* L.) fruits. *Philipp. Agric. Sci.* 2017, 100, 233–242.
8. Alvarez, M. V., Ponce, A. G., & Moreira, M. R. (2017). Influence of polysaccharide-based edible coatings as carriers of prebiotic fibers on quality attributes of ready-to-eat fresh

- blueberries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(7), 2587–2597. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8751>
9. Anees, Muhammad & Rehman, Ur & Azeem, Muhammad & Saeed, Kanza & Ashfaq, Khuram & Qureshi, Abdul & Abu, Muhammad & Ghaffari, Zar & Ameer, Kashif & Iqbal, Faiza & Jamil, Muhammad & Javed, Sidra. (2025). The Role of Probiotics and Prebiotics in Modulating Human Gut Health and Immunity. 10.47278/book.HH/2025.292.
 10. Ansari, F., Neshat, M., Pourjafar, H., Jafari, S. M., Samakkhah, S. A., & Mirzakhani, E. (2023). The role of probiotics and prebiotics in modulating of the gut-brain axis. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1173660. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1173660>
 11. Aparicio-Fernández, X., Vega-Ahuatzin, A., Ochoa-Velasco, C. E., Cid-Pérez, S., Hernández-Carranza, P., & Ávila-Sosa, R. (2017). Physical and Antioxidant Characterization of Edible Films Added with Red Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) cv. San Martín Peel and/or Its Aqueous Extracts. *Food and Bioprocess Technology*, 11(2), 368–379. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2017-x>
 12. Arnon-Rips, H., & Poverenov, E. (2018). Improving food products' quality and storability by using Layer by Layer edible coatings. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.003>
 13. Asiri, S. A., Matar, A., Ismail, A. M., & Farag, H. A. S. (2024). Sodium alginate edible films incorporating cactus pear extract: antimicrobial, chemical, and mechanical properties. *Italian Journal Of Food Science*, 36(4), 151-168. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v36i4.2675>
 14. Aziz, S., Heidarian, P., Mathel, V., McNally, T., Peijs, T., Nanjundan, A. K., Varley, R. J., Halley, P. J., & Vandi, L. (2025). Bioplastic fibres: processing, properties, applications and challenges. *Advanced Fiber Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42765-025-00647-1>
 15. Baghi, F., Gharsallaoui, A., Dumas, É., & Ghnimi, S. (2022). Advancements in biodegradable active films for food packaging: Effects of Nano/Microcapsule incorporation. *Foods*, 11(5), 760. <https://doi.org/10.3390/foods11050760>
 16. Ballesteros-Mártinez, L., Pérez-Cervera, C., & Andrade-Pizarro, R. (2020). Effect of glycerol and sorbitol concentrations on mechanical, optical, and barrier properties of sweet potato starch film. *NFS Journal*, 20, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.06.002>
 17. Bambace, M. F., Alvarez, M. V., & Del Rosario Moreira, M. (2024). Alginate coatings applied on apple cubes as a vehicle for *Lactobacillus casei*: probiotic viability and overall quality of a new functional product. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(1), 74–83. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13805>
 18. Bangar, S. P., Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Kumar, M., & Trif, M. (2021). Natural antimicrobials as additives for Edible Food Packaging applications: A review. *Foods*, 10(10), 2282. <https://doi.org/10.3390/foods10102282>

19. Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., & Kumar, A. (2022). Biopolymer: a sustainable material for food and medical applications. *Polymers*, 14(5), 983. <https://doi.org/10.3390/polym14050983>
20. Barbosa, C. H., Andrade, M. I. P., Vilarinho, F., Da Cruz Fernando, A. L. A., & Sanches-Silva, A. (2021). Active Edible packaging. *Encyclopedia*, 1(2), 360–370. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020030>
21. Basnet, J., Eissa, M. A., Cardozo, L. L. Y., Romero, D. G., & Rezq, S. (2024). Impact of probiotics and prebiotics on gut microbiome and hormonal regulation. *Gastrointestinal Disorders*, 6(4), 801–815. <https://doi.org/10.3390/gidisord6040056>
22. Batcham, I., Adjalo, D. K., Houedakor, K. Z., Tede, K. K. E., & Zinsou-Klassou, K. (2025). Proliferation of plastic packaging and its environmental impacts at the commune of Agoè-Nyivé 4 in Togo. *Waste*, 3(4), 38. <https://doi.org/10.3390/waste3040038>
23. Bchir, B., Sadin, N., Ronkart, S. N., & Blecker, C. (2019). Effect of powder properties on the physicochemical and rheological characteristics of gelation inulin–water systems. *Colloid & Polymer Science*, 297(6), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00396-019-04510-9>
24. Bizymis, A., Giannou, V., & Tzia, C. (2024). Development of Functional Composite Edible Films or Coatings for Fruits Preservation with Addition of Pomace Oil-Based Nanoemulsion for Enhanced Barrier Properties and Caffeine for Enhanced Antioxidant Activity. *Molecules*, 29(16), 3754. <https://doi.org/10.3390/molecules29163754>
25. Boruckowska, H., Boruckowski, T., Bronkowska, M., Prajzner, M., & Rytel, E. (2025). Comparison of colour measurement methods in the food industry. *Processes*, 13(5), 1268. <https://doi.org/10.3390/pr13051268>
26. Boubakeur, H., Tanhaş, E., & Erci, F. (2026). Alginate-Based edible films loaded by probiotic and prebiotic for preservation of Fresh-Cut mango snacks. *Food and Bioprocess Technology*, 19(3). <https://doi.org/10.1007/s11947-026-04213-4>
27. Brasil, I., Gomes, C., Puerta-Gomez, A., Castell-Perez, M., & Moreira, R. (2012). Polysaccharide-based multilayered antimicrobial edible coating enhances quality of fresh-cut papaya. *LWT*, 47(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.005>
28. Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of Concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
29. Canazza, E., Grauso, M., Mihaylova, D., & Lante, A. (2025). Techno-Functional properties and applications of inulin in food systems. *Gels*, 11(10), 829. <https://doi.org/10.3390/gels11100829>
30. Cao, L., Liu, W., & Wang, L. (2017). Developing a green and edible film from Cassia gum: The effects of glycerol and sorbitol. *Journal of Cleaner Production*, 175, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.064>

31. Ceballos-Santos, S., De Sousa, D. B., García, P. G., Laso, J., Margallo, M., & Aldaco, R. (2024). Exploring the environmental impacts of plastic packaging: A comprehensive life cycle analysis for seafood distribution crates. *The Science of the Total Environment*, 951, 175452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175452>
32. Cebulj, A., Vanzo, A., Hladnik, J., Kastelec, D., & Vrhovsek, U. (2021). Apple (*Malus domestica* Borkh.) Cultivar ‘Majda’, a Naturally Non-Browning Cultivar: An Assessment of Its Qualities. *Plants*, 10(7), 1402. <https://doi.org/10.3390/plants10071402>
33. Champagne, C. P., Ross, R. P., Saarela, M., Hansen, K. F., & Charalampopoulos, D. (2011). Recommendations for the viability assessment of probiotics as concentrated cultures and in food matrices. *International Journal of Food Microbiology*, 149(3), 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.005>
34. Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current advancements in pectin: extraction, properties and multifunctional applications. *Foods*, 11(17), 2683. <https://doi.org/10.3390/foods11172683>
35. Chandra, P.; Sharma, H.; Sachan, N. The Potential Role of Prebiotics, Probiotics, and Synbiotics in Cancer Prevention and Therapy. In *Synbiotics in Metabolic Disorders*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2024; pp. 191–213.
36. Chatsirisakul, O., Leenabanchong, N., Siripaopradit, Y., Chang, C., Buhngamongkol, P., & Pongpirul, K. (2025). Strain-Specific Therapeutic Potential of *Lactiplantibacillus plantarum*: A Systematic Scoping Review. *Nutrients*, 17(7), 1165. <https://doi.org/10.3390/nu17071165>
37. Chavez-Esquivel, G., Ángeles-Beltrán, D., De La Torre, P. T., Cortes-Cordova, D., Huerta-Arcos, L., & De Los Santos, P. E. (2025). Antimicrobial and antifungal edible coatings with ZnO nanoparticles dispersed in a chitosan-guar gum matrix for hass avocado preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 308(Pt 4), 142467. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142467>
38. Chen, C., Chen, Z., & Zhong, Q. (2022). Caseinate nanoparticles co-loaded with quercetin and avenanthramide 2c using a novel two-step pH-driven method: Formation, characterization, and bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 129, 107669. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107669>
39. Chen, H., Kuo, P., Hsu, C., Chiu, Y., Liu, Y., Lu, M., & Chen, C. (2021). Psychophysiological Effects of *Lactobacillus plantarum* PS128 in Patients with Major Depressive Disorder: A Preliminary 8-Week Open Trial. *Nutrients*, 13(11), 3731. <https://doi.org/10.3390/nu13113731>
40. Chen, H., Liu, Y., Zhang, J., Jiang, Y., & Li, D. (2022). Pectin extracted from dragon fruit Peel: An exploration as a natural emulsifier. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221, 976–985. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.069>
41. Chen, Q., Fan, J., Lin, L., & Zhao, M. (2023). Combination of *Lycium barbarum* L. and *Laminaria japonica* polysaccharides as a highly efficient prebiotic: Optimal screening and

- complementary regulation of gut probiotics and their metabolites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125534. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125534>
42. Chen, Y., Wang, J., Xu, L., Nie, Y., Ye, Y., Qian, J., Liu, F., & Zhang, L. (2024). Effects of different plasticizers on the structure, physical properties and film forming performance of Curdlan edible films. *Foods*, 13(23), 3930. <https://doi.org/10.3390/foods13233930>
 43. Chen, Y., Wang, S., Yang, C., Zhang, L., Li, Z., Jiang, S., Bai, R., Ye, X., & Ding, W. (2023). Chitosan/konjac glucomannan bilayer films: Physical, structural, and thermal properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257(Pt 2), 128660. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128660>
 44. Colinart, T., & Glouannec, P. (2022). Accuracy of water vapor permeability of building materials reassessed by measuring cup's inner relative humidity. *Building and Environment*, 217, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109038>
 45. Contreras-Abara, P., Castillo, T., Ponce, B., Urtuvia, V., Peña, C., & Díaz-Barrera, A. (2023). Continuous Bioproduction of Alginate Bacterial under Nitrogen Fixation and Nonfixation Conditions. *Fermentation*, 9(5), 426. <https://doi.org/10.3390/fermentation9050426>
 46. Daniloski, D., Petkoska, A. T., Lee, N. A., Bekhit, A. E., Carne, A., Vaskoska, R., & Vasiljevic, T. (2021). Active edible packaging based on milk proteins: A route to carry and deliver nutraceuticals. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 688–705. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.024>
 47. Davachi, S. M., Pottackal, N., Torabi, H., & Abbaspourrad, A. (2021). Development and characterization of probiotic mucilage based edible films for the preservation of fruits and vegetables. *Scientific Reports*, 11(1), 16608. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95994-5>
 48. Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S., Berenjian, A., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>
 49. Davani-Davari, D., Negahdaripour, M., Karimzadeh, I., Seifan, M., Mohkam, M., Masoumi, S., Berenjian, A., & Ghasemi, Y. (2019). Prebiotics: definition, types, sources, mechanisms, and clinical applications. *Foods*, 8(3), 92. <https://doi.org/10.3390/foods8030092>
 50. Dávila-Aviña, J. E., Villa-Rodríguez, J. A., Villegas-Ochoa, M. A., Tortoledo-Ortiz, O., Olivas, G. I., Ayala-Zavala, J. F., & González-Aguilar, G. A. (2012). Effect of edible coatings on bioactive compounds and antioxidant capacity of tomatoes at different maturity stages. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2706–2712. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0771-3>
 51. De Lacey, A. L., López-Caballero, M., Gómez-Estaca, J., Gómez-Guillén, M., & Montero, P. (2012). Functionality of *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium bifidum* incorporated to edible coatings and films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.07.001>

52. de Man, J. D., Rogosa, D., & Sharpe, M. E. (1960). A medium for the cultivation of lactobacilli. *Journal of applied microbiology*, 23(1), 130-135.
53. De man, rogosa and sharpe (MRS) agar. (1995). In *Progress in industrial microbiology* (pp. 362–363). [https://doi.org/10.1016/s0079-6352\(05\)80056-6](https://doi.org/10.1016/s0079-6352(05)80056-6)
54. De Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H., & Douma, A. (2018). *The Circularity Gap Report: An analysis of the circular state of the global economy*. Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands, 17.
55. Del Consumidor, P. F. (Mayo 2021). Contaminación por plástico. gob.mx. <https://www.gob.mx/profeco/articulos/contaminacion-por-plastico?idiom=es> Consultado el 07/03/2026
56. Dianin, I., Oliveira, A., Junior, Pimentel, T., Hernandez, N., & Costa, G. (2019). Edible Biofilms Formulated with Whey Proteins Isolate and L. Casei Probiotic Culture: Characterization and Application in Tomatoes Or Grapes. [www.cetjournal.it. https://doi.org/10.3303/CET1975079](https://doi.org/10.3303/CET1975079)
57. Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible Films and Coatings as Food-Quality Preservers: An Overview. *Foods*, 10(2), 249. <https://doi.org/10.3390/foods10020249>
58. Dmour, I., & Taha, M. O. (2018). Natural and semisynthetic polymers in pharmaceutical nanotechnology. In *Elsevier eBooks* (pp. 35–100). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813663-8.00002-6>
59. Dong, Y., Wu, X., Zhang, Y., Hu, A., Zhou, Q., Yue, X., Liu, Z., & Li, M. (2025). The role of probiotics in modulating the gut microbiome in Alzheimer’s disease: a review. *Foods*, 14(9), 1531. <https://doi.org/10.3390/foods14091531>
60. Donkin, S. S. (2008). Glycerol from biodiesel production: the new corn for dairy cattle. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 37(spe), 280–286. <https://doi.org/10.1590/s1516-35982008001300032>
61. Du, J., Zhu, Q., Guo, J., Gu, J., Guo, J., Wu, Y., Ren, L., Yang, S., & Jiang, J. (2024). Preparation and characterization of edible films from gelatin and hydroxypropyl methyl cellulose/sodium carboxymethyl cellulose. *Heliyon*, 11(1), e41613. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41613>
62. Duong, N. T. C., Uthairatanakij, A., Laohakunjit, N., Jitareerat, P., & Kaisangsri, N. (2022). An innovative single step of cross-linked alginate-based edible coating for maintaining postharvest quality and reducing chilling injury in rose apple cv. “Tabtimchan” (*Syzygium samarangense*). *Scientia Horticulturae*, 292, 10648. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110648>
63. Echegaray, N., Yilmaz, B., Sharma, H., Kumar, M., Pateiro, M., Ozogul, F., & Lorenzo, J. M. (2022). A novel approach to *Lactiplantibacillus plantarum*: From probiotic properties to the omics insights. *Microbiological Research*, 268, 127289. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127289>

64. Effect of Edible Coating Based on Whey, Inulin and Gelatine with *Lactobacillus casei* on the Textural and Sensorial Properties of a Cracker Cookie. Available from: https://www.researchgate.net/publication/312169791_Effect_of_Edible_Coating_Based_on_Whey_Inulin_and_Gelatine_with_Lactobacillus_casei_on_the_Textural_and_Sensorial_Properties_of_a_Cracker_Cookie [accessed Jan 28 2026].
65. El-Maradny, Y. A., Abouakkada, A. S., Abbass, A. a. G., Abaza, A. F., & El-Fakharany, E. M. (2025). Prebiotic properties and antioxidant effect of crude extracts and polysaccharides from *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* mushrooms. *Scientific Reports*, 15(1), 31113. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16152-9>
66. Ephrem, E., Najjar, A., Charcosset, C., & Greige-Gerges, H. (2018). Encapsulation of natural active compounds, enzymes, and probiotics for fruit juice fortification, preservation, and processing: An overview. *Journal of Functional Foods*, 48, 65–84. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.06.021>
67. Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., & Adjallé, K. (2023). A review of the effect of plasticizers on the physical and mechanical properties of Alginate-Based films. *Molecules*, 28(18), 6637. <https://doi.org/10.3390/molecules28186637>
68. Espitia, P. J. P., Du, W., De Jesús Avena-Bustillos, R., De Fátima Ferreira Soares, N., & McHugh, T. H. (2013). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review. *Food Hydrocolloids*, 35, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.06.005>
69. Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H., Govindarajan, N., Freidland, R. P., & Qoronfleh, M. W. (2021). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>
70. Estrella-Osuna, D. E., Ruiz-Cruz, S., Rodríguez-Félix, F., Figueroa-Enríquez, C. E., González-Ríos, H., Fernández-Quiroz, D., Márquez-Ríos, E., Tapia-Hernández, J. A., Pérez-Álvarez, J. Á., & Suárez-Jiménez, G. M. (2024). Rheological Properties and Antioxidant Activity of Gelatin-Based Edible Coating Incorporating Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Extract. *Gels*, 10(10), 624. <https://doi.org/10.3390/gels10100624>
71. Fang, X., Duan, Q., Wang, Z., Li, F., Du, J., Ke, W., Liu, D., Beier, R. C., Guo, X., & Zhang, Y. (2020). Products of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* Strain F17 and *Leuconostoc lactis* Strain H52 Are Biopreservatives for Improving Postharvest Quality of ‘Red Globe’ Grapes. *Microorganisms*, 8(5), 656. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050656>
72. Fda, U. S., & Food and Drug Administration. (2018). CFR-code of federal regulations Title 21. US Food and Drug Administration: Washington, DC, USA.
73. Fekete, M., Lehoczki, A., Kryczyk-Poprawa, A., Zábó, V., Varga, J., Bálint, M., Fazekas-Pongor, V., Csípő, T., Rząsa-Duran, E., & Varga, P. (2025). Functional foods in Modern

- Nutrition Science: Mechanisms, evidence, and public health implications. *Nutrients*, 17(13), 2153. <https://doi.org/10.3390/nu17132153>
74. Fidanza, M., Panigrahi, P., & Kollmann, T. R. (2021). Lactiplantibacillus plantarum–Nomad and ideal probiotic. *Frontiers in Microbiology*, 12, 712236. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.712236>
 75. Food, J., & Agriculture Organization/World Health Organization Working Group. (2002). Guidelines for the evaluation of probiotics in food. Report of a Joint FAO/WHO: London, ON, Canada.
 76. Freitas, C. M. P., Coimbra, J. S. R., Souza, V. G. L., & Sousa, R. C. S. (2021). Structure and Applications of pectin in food, biomedical, and pharmaceutical industry: a review. *Coatings*, 11(8), 922. <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>
 77. Frent, O. D., Vicas, L. G., Duteanu, N., Morgovan, C. M., Jurca, T., Pallag, A., Muresan, M. E., Filip, S. M., Lucaciu, R., & Marian, E. (2022, October 19). Physico-Chemical properties of sodium alginate. <https://encyclopedia.pub/entry/29966>
 78. Garavand, F., Rouhi, M., Razavi, S. H., Cacciotti, I., & Mohammadi, R. (2017). Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104(Pt A), 687–707. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.093>
 79. García-Argueta I, Quintero-Salazar B, Dominguez-Lopez A, Gómez-Oliván LM, Díaz-Bandera D, et al. (2016) Effect of Edible Coating Based on Whey, Inulin and Gelatine with Lactobacillus casei on the Textural and Sensorial Properties of a Cracker Cookie. *J Prob Health* 4: 153. doi: 10.4172/2329-8901.1000153 (PDF)
 80. Ghasemlou, M., Khodaiyan, F., & Oromiehie, A. (2010). Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefiran. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 477–483. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.010>
 81. Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 14(8), 491–502. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75>
 82. Gol, N. B., Patel, P. R., & Rao, T. R. (2013). Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan. *Postharvest Biology and Technology*, 85, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.008>
 83. Guerra, N. P. (2025). The impact of probiotics, prebiotics, and functional foods on human health. *Nutrients*, 17(9), 1529. <https://doi.org/10.3390/nu17091529>
 84. Guo, Q., Chen, P., & Chen, X. (2023). Bioactive peptides derived from fermented foods: Preparation and biological activities. *Journal of Functional Foods*, 101, 105422. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105422>

85. Gupta, S., & Saxena, S. (2023). Endophytes: Saviour of apples from post-harvest fungal pathogens. *Biological Control*, 182, 105234. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105234>
86. Han, Q., Liu, F., Hao, Y., & Ni, Y. (2020). Characterization of membrane-bound polyphenol oxidase from Granny Smith apple (*Malus × domestica* Borkh.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 977–984. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.225>
87. Hanani, Z. N., Roos, Y., & Kerry, J. P. (2012). Use of beef, pork and fish gelatin sources in the manufacture of films and assessment of their composition and mechanical properties. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.01.015>
88. Hanry, E. L., Redzwan, N. F. M., Badeges, N. F. a. K., & Surugau, N. (2022). Characterization of biofilms developed from alginate extracted from *Padina* sp. incorporated with calcium chloride (CaCl₂). *Journal of Physics Conference Series*, 2314(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2314/1/012022>
89. Haque, S. M., Kabir, A., Ratemi, E., Elzagheid, M., Appu, S. P., Ghani, S. S., & Sarief, A. (2025). Greener pectin extraction Techniques: applications and challenges. *Separations*, 12(3), 65. <https://doi.org/10.3390/separations12030065>
90. Hashemi, S. M. B., & Jafarpour, D. (2021). Bioactive edible film based on Konjac glucomannan and probiotic *Lactobacillus plantarum* strains: Physicochemical properties and shelf life of fresh-cut kiwis. *Journal of Food Science*, 86(2), 513–522. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15568>
91. Hasnain, M. S., Jameel, E., Mohanta, B., Dhara, A. K., Alkahtani, S., & Nayak, A. K. (2020). Alginates: sources, structure, and properties. In Elsevier eBooks (pp. 1–17). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817640-5.00001-7>
92. Hassan, B.; Chatha, S.A.S.; Hussain, A.I.; Zia, K.M.; Akhtar, N. (2018). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 1095–1107.
93. Ho, Y., Tsai, Y., Kuo, T. B. J., & Yang, C. C. H. (2021). Effects of *Lactobacillus plantarum* PS128 on Depressive Symptoms and Sleep Quality in Self-Reported Insomniacs: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Pilot Trial. *Nutrients*, 13(8), 2820. <https://doi.org/10.3390/nu13082820>
94. Hoan, N. X., Anh, L. T. H., Ha, H. T., & Cuong, D. X. (2023). Antioxidant activities, anticancer activity, Physico-Chemistry characteristics, and acute toxicity of Alginate/Lignin polymer. *Molecules*, 28(13), 5181. <https://doi.org/10.3390/molecules28135181>
95. Holscher, H. D. (2017). Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota. *Gut Microbes*, 8(2), 172–184. <https://doi.org/10.1080/19490976.2017.1290756>
96. Hou, K., Wu, ZX., Chen, XY. et al. Microbiota in health and diseases. *Sig Transduct Target Ther* 7, 135 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41392-022-00974-4>

97. Huang, H., Zhou, X., Sun, M., Chen, J., Tan, T., & Yang, D. (2025). Study on the extraction, antioxidant and prebiotic activity of the polysaccharides from the fruits of *Phyllanthus emblica* L. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1607077. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1607077>
98. Huang, S., Dong, Q., Che, S., Li, R., & Tang, K. H. D. (2025). Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production. *The Science of the Total Environment*, 969, 178911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178911>
99. Hughes, R. L., Alvarado, D. A., Swanson, K. S., & Holscher, H. D. (2021). The Prebiotic Potential of Inulin-Type fructans: A Systematic review. *Advances in Nutrition*, 13(2), 492–529. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab119>
100. Hutkins, R. W., Krumbeck, J. A., Bindels, L. B., Cani, P. D., Fahey, G., Goh, Y. J., Hamaker, B., Martens, E. C., Mills, D. A., Rastal, R. A., Vaughan, E., & Sanders, M. E. (2015). Prebiotics: why definitions matter. *Current Opinion in Biotechnology*, 37, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.09.001>
101. Jang, A., Song, H., Choo, E., & Lee, S. (2025). Evaluation of base ingredients for edible coating of fresh-cut apples to preserve the quality during cold storage. *Food Science and Biotechnology*, 35(3), 701–709. <https://doi.org/10.1007/s10068-025-02036-1>
102. Jeevahan J, Chandrasekaran M (2018). Effect of olive oil concentrations on film properties of edible composite films prepared from corn starch and olive oil. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 11, 4934–4938
103. Jeevahan, J., & Chandrasekaran, M. (2019). Nanoedible films for food packaging: a review. *Journal Of Materials Science*, 54(19), 12290-12318. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03742y>
104. Ji, J., Jin, W., Liu, S., Jiao, Z., & Li, X. (2023). Probiotics, prebiotics, and postbiotics in health and disease. *MedComm*, 4(6), e420. <https://doi.org/10.1002/mco2.420>
- Jia, Y., Wang, C., Khalifa, I., Zhu, Y., Wang, Z., Chen, H., Liang, X., Zhang, H., Hu, L., & Yang, W. (2024). Pectin: A review with recent advances in the emerging revolution and multiscale evaluation approaches of its emulsifying characteristics. *Food Hydrocolloids*, 157, 110428. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110428>
105. Jiang, Y., Duan, X., Qu, H., & Zheng, S. (2015). Browning: Enzymatic browning. In Elsevier eBooks (pp. 508–514). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00090-8>
106. Jiang, Y., Xin, W., Zhang, Q., Lin, L., & Deng, X. (2022). A Novel Bacteriocin Against *Shigella flexneri* From *Lactiplantibacillus plantarum* Isolated From *Tilapia* Intestine: Purification, Antibacterial Properties and Antibiofilm Activity. *Frontiers in Microbiology*, 12, 779315. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.779315>
107. Jouki, M., Khazaei, N., Ghasemlou, M., & HadiNezhad, M. (2013). Effect of glycerol concentration on edible film production from cress seed carbohydrate gum. *Carbohydrate Polymers*, 96(1), 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.077>

108. Journal of Dynamics and Control. (2025, July 31). TEXTURE PROFILE ANALYSIS: A COMPREHENSIVE INSIGHT INTO FOOD TEXTURE EVALUATION - Journal of Dynamics and Control. <https://jodac.org/texture-profile-analysis-a-comprehensive-insight-into-food-texture->
109. Journal of Dynamics and Control. (2025, July 31). TEXTURE PROFILE ANALYSIS: A COMPREHENSIVE INSIGHT INTO FOOD TEXTURE EVALUATION - Journal of Dynamics and Control. <https://jodac.org/texture-profile-analysis-a-comprehensive-insight-into-food-texture-evaluation/>
110. Khalighi, A., Behdani, R., & Kouhestani, S. (2016). Probiotics: A comprehensive review of their classification, mode of action and role in human nutrition. InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/63646>
111. Kim, S. (2020). Antioxidant Compounds for the Inhibition of Enzymatic Browning by Polyphenol Oxidases in the Fruiting Body Extract of the Edible Mushroom *Herichium erinaceus*. *Foods*, 9(7), 951. <https://doi.org/10.3390/foods9070951>
112. Kitir, N., Yildirim, E., Şahin, Ü., Turan, M., Ekinci, M., Ors, S., Kul, R., Ünlü, H., & Ünlü, H. (2018). Peat use in horticulture. In InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79171>
113. Koc, B., Akyuz, L., Cakmak, Y. S., Sargin, I., Salaberria, A. M., Labidi, J., Ilk, S., Cekic, F. O., Akata, I., & Kaya, M. (2020). Production and characterization of chitosan-fungal extract films. *Food Bioscience*, 35, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100545>
114. Kong, P., Rosnan, S. M., & Enomae, T. (2024). Carboxymethyl cellulose–chitosan edible films for food packaging: A review of recent advances. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122612. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122612>
115. Konica Minolta Sensing Americas. (2025, April 15). Entendiendo El Espacio de Color CIE L*A*B* - Konica Minolta Sensing. Konica Minolta Sensing. <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
116. Kouhi, M., Prabhakaran, M. P., & Ramakrishna, S. (2020). Edible polymers: An insight into its application in food, biomedicine and cosmetics. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 248–263. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.025>
117. Kumari, A., PhD. (2025, January 9). Environmental Impact of Packaging: Challenges and Eco-Friendly Solutions. Made With REGENTM. <https://made-with-regen.ca/blog/environmental-impact-packaging/>
118. Kwan, Y. H., Tung, Y. K., Kochhar, J. S., Li, H., Poh, A., & Kang, L. (2014). Essential monographs. In Elsevier eBooks (pp. 75–314). <https://doi.org/10.1533/9781908818713.75>
119. La Cava, E., Gerbino, E., Sgroppo, S., & Gomez-Zavaglia, A. (2022). Baked mango slices coated with *Lactiplantibacillus plantarum* immobilized in pectic extracts. *Applied Food Research*, 2(2), 100236. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100236>

120. Law, S., Hui, K., Fung, Y., Leung, W., Han, J., Lo, C., Aida, T., Yaseen, W., Dong, R., Aini, A., Zhu, X., Aida, T., Meijer, E., Stupp, S., Meijer, A., E, Xia, D., Wang, P., Ji, X., . . . Deng, S. (2021). A literature review on Supramolecular devices. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(5), 6815–6832. <https://doi.org/10.33263/briac125.68156832>
121. León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084–1091. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006>
122. Leya, B., Nivetha, T.U., Freeda Blessie, R. and Pragalyaashree, M.M. (2024). Edible Coating Deposition Methods. In *Food Coatings and Preservation Technologies*, M. Sen (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781394237623.ch14>
123. Li, C., Pan, J., Nawaz, M., Liu, H., Lv, Z., Yang, W., Zhang, Q., Liu, J., & Jiao, Z. (2025). A Pectin-Based Active Coating for Preservation of Fresh-Cut Apples: Incorporated with Luteolin and ϵ -Polylysine for Enhanced Performance. *Foods*, 15(1), 63. <https://doi.org/10.3390/foods15010063>
124. Linshang. (2021, July 13). Color Management: Know about Color Spaces. <https://www.linshangtech.com/tech/color-space-tech1439.html>
125. Liu, J., Liu, F., Ren, T., Wang, J., Yang, M., Yao, Y., & Chen, H. (2021). Fabrication of fish gelatin / sodium alginate double network gels for encapsulation of probiotics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(10), 4398–4408. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11081>
126. Liu, L., Feng, Y., Han, Z., Song, Y., Guo, J., Yu, J., Wang, Z., Wang, H., Gao, H., Yang, Y., Wang, Y., & Zhao, Z. (2024). Functional analysis of the xyloglucan endotransglycosylase/hydrolase gene MdXTH2 in apple fruit firmness formation. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(9), 3418–3434. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.12.034>
127. Liu, L., Liang, W., Zhang, Y., & Fu, Q. (2023). Nanoencapsulation in polymeric materials: Weaving magical coats for microorganisms. *Nano Today*, 52, 101973. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.101973>
128. Lopes, A. I., Melo, A., Afonso, T. B., Silva, S., Barros, L., Tavora, F. K., & Pintado, M. (2025). Alginate edible films containing essential oils: characterization and bioactive potential. *Polymers*, 17(9), 1188. <https://doi.org/10.3390/polym17091188>
129. Lu, J., Xu, Q., Ma, J., Xu, X., Zhao, Y., Pu, Y., Deng, Y., Yan, K., Zong, Y., & Fan, Q. (2025). Recent progress in protein-based food packaging films. *Collagen and Leather*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42825-025-00231-8>
130. Lu, Y., Luo, Q., Chu, Y., Tao, N., Deng, S., Wang, L., & Li, L. (2022). Application of gelatin in food packaging: a review. *Polymers*, 14(3), 436. <https://doi.org/10.3390/polym14030436>

131. Manzano, V. E., Pacho, M. N., Tasqué, J. E., & D'Accorso, N. B. (2019). Alginates: hydrogels, their chemistry, and applications. In Apple Academic Press eBooks (pp. 89–140). <https://doi.org/10.1201/9780429023439-3>
132. Martins, V. F. R., Pintado, M. E., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2024). Recent highlights in sustainable Bio-Based edible films and coatings for fruit and vegetable applications. *Foods*, 13(2), 318. <https://doi.org/10.3390/foods13020318>
133. Matloob, A., Ayub, H., Mohsin, M., Ambreen, S., Khan, F. A., Oranab, S., Rahim, M. A., Khalid, W., Nayik, G. A., Ramniwas, S., & Ercisli, S. (2023). A review on edible coatings and films: advances, composition, production methods, and safety concerns. *ACS Omega*, 8(32), 28932–28944. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03459>
134. Mbye, M., Baig, M. A., AbuQamar, S. F., El-Tarabily, K. A., Obaid, R. S., Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Turner, M. S., Shah, N. P., & Ayyash, M. M. (2020). Updates on understanding of probiotic lactic acid bacteria responses to environmental stresses and highlights on proteomic analyses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(3), 1110–1124. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12554>
135. McFarlane, C., Kelly, J. T., Conley, M., Johnson, D. W., & Campbell, K. L. (2022). Consumers' perspectives and experiences of prebiotics and probiotics for gut health in chronic kidney disease. *Journal of Renal Nutrition*, 33(1), 116–125. <https://doi.org/10.1053/j.jrn.2022.04.003>
136. Mellinas C., Valdés A., Ramos M., Burgos N., Garrigós M.D.C., & Jiménez A. (2016). Active edible films. Current state and future trends. *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 1–15
137. Mensi, M. M., Rogantini, C., Marchesi, M., Borgatti, R., & Chiappedi, M. (2021). *Lactobacillus plantarum* PS128 and Other Probiotics in Children and Adolescents with Autism Spectrum Disorder: A Real-World Experience. *Nutrients*, 13(6), 2036. <https://doi.org/10.3390/nu13062036>
138. Miao, J., Lai, Y., Zhang, Y., Wei, J., Fan, K., Sun, N., & Qin, Z. (2025). Sodium Alginate-Based Antibacterial Coatings Reinforced with Quaternized Lignin–Cinnamaldehyde Composite Particles for Fruit Preservation. *Foods*, 14(24), 4203. <https://doi.org/10.3390/foods14244203>
139. Milani, J. M., & Tirgarian, B. (2020). An overview of Edible Protein-Based Packaging: Main Sources, Advantages, Drawbacks, Recent Progressions and Food Applications. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4(1), 103–115. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00086-w>
140. Minj, J., Chandra, P., Paul, C., & Sharma, R. K. (2020). Bio-functional properties of probiotic *Lactobacillus*: current applications and research perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(13), 2207–2224. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1774496>

141. Moghadam, M., Salami, M., Mohammadian, M., Khodadadi, M., & Emam-Djomeh, Z. (2020). Development of antioxidant edible films based on mung bean protein enriched with pomegranate peel. *Food Hydrocolloids*, 104, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105735>
142. Mohamed, S. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A. (2020). Polysaccharides, protein and lipid -Based natural edible films in food Packaging: a review. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>
143. Mohamed, S.A.A.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M.A.M. (2020). Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116178.
144. Mohanty, D., Misra, S., Mohapatra, S., & Sahu, P. S. (2018). Prebiotics and synbiotics: Recent concepts in nutrition. *Food Bioscience*, 26, 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.10.008>
145. Monteiro, C. R. a. V., Boguea, E. G., Campos, C. D. L., Pereira-Filho, J. L., Almeida, V. S. S., Vale, A. a. M., Azevedo-Santos, A. P. S., & Monteiro-Neto, V. (2026). Prebiotics and gut health: mechanisms, clinical evidence, and future directions. *Nutrients*, 18(3), 372. <https://doi.org/10.3390/nu18030372>
146. Moon, K. M., Kwon, E., Lee, B., & Kim, C. Y. (2020). Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. *Molecules*, 25(12), 2754. <https://doi.org/10.3390/molecules25122754>
147. Moslemi, M. (2020). Reviewing the recent advances in application of pectin for technical and health promotion purposes: From laboratory to market. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117324. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117324>
148. Moura-Alves, M., Souza, V. G. L., Silva, J. A., Esteves, A., Pastrana, L. M., Saraiva, C., & Cerqueira, M. A. (2023). Characterization of Sodium Alginate-Based Films Blended with Olive Leaf and Laurel Leaf Extracts Obtained by Ultrasound-Assisted Technology. *Foods*, 12(22), 4076. <https://doi.org/10.3390/foods12224076>
149. Najahi, H., Banni, M., Nakad, M., Abboud, R., Assaf, J. C., Operato, L., Belhassen, M., Gomes, L., & Hamd, W. (2025). Plastic pollution in food packaging systems: impact on human health, socioeconomic considerations and regulatory framework. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18, 100667. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100667>
150. Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N., & O'Connor, K. E. (2020). Recent advances in bioplastics: application and biodegradation. *Polymers*, 12(4), 920. <https://doi.org/10.3390/polym12040920>
151. Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Nongwe, I. (2020). Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials. *Materials*, 13(21), 4994. <https://doi.org/10.3390/ma13214994>

152. Niness, K. R. (1999). Inulin and oligofructose: What are they? *Journal of Nutrition*, 129(7), 1402S-1406S. <https://doi.org/10.1093/jn/129.7.1402s>
153. Niu, C., Liu, L., Farouk, A., Chen, C., & Ban, Z. (2023). Coating of Layer-by-Layer Assembly based on Chitosan and CMC: Emerging alternative for quality maintenance of citrus fruit. *Horticulturae*, 9(6), 715. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060715>
154. Obafemi, Y. D., Oranusi, S. U., Ajanaku, K. O., Akinduti, P. A., Leech, J., & Cotter, P. D. (2022). African fermented foods: overview, emerging benefits, and novel approaches to microbiome profiling. *Npj Science of Food*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00130-w>
155. Obayomi, O. V., Olaniran, A. F., & Owa, S. O. (2024). Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review. *Journal of Functional Foods*, 119, 106337. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106337>
156. Oelschlaeger, T. A. (2009). Mechanisms of probiotic actions – A review. *International Journal of Medical Microbiology*, 300(1), 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2009.08.005>
157. Olivas GI, Rodríguez JJ, Barbosa-Canovas GV. 2003. Edible coatings composed of methylcellulose, stearic acid, and additives to preserve quality of pear wedges. *J Food Process Preserv* 27:299–320.
158. Orqueda, M. E., Zampini, I. C., Torres, S., & Isla, M. I. (2023). Functional Characterization and Toxicity of Pectin from Red Chilito Fruit Waste (Peels). *Plants*, 12(14), 2603. <https://doi.org/10.3390/plants12142603>
159. Partap, M., Sharma, D., Hn, D., Thakur, M., Verma, V., Ujala, & Bhargava, B. (2023). Microgreen: A tiny plant with superfood potential. *Journal of Functional Foods*, 107, 105697. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105697>
160. Paspuel, A. E. (2016). Caracterización De Un Bioplástico De Almidones De Maíz Y Yuca Con Antocianinas De Repollo Morado (Brassica Oleracea) Como Potencial Indicador De Ph (Doctoral Dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2016.)
161. Patil, V., Shams, R., & Dash, K. K. (2023). Techno-functional characteristics, and potential applications of edible coatings: A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100886. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100886>
162. Patocka, J., Bhardwaj, K., Klimova, B., Nepovimova, E., Wu, Q., Landi, M., Kuca, K., Valis, M., & Wu, W. (2020). *Malus domestica*: A Review on Nutritional Features, Chemical Composition, Traditional and Medicinal Value. *Plants*, 9(11), 1408. <https://doi.org/10.3390/plants9111408> Abdalla, G., Mussagy, C. U., Brasil, G. S. P., Scontri, M., Da Silva Sasaki, J. C., Su, Y., Bebbler, C., Rocha, R. R., De Sousa Abreu, A. P., Goncalves, R. P., Burd, B. S., Pacheco, M. F., Romeira, K. M., Picheli, F. P., Guerra, N. B., Farhadi, N., Floriano, J. F., Forster, S., He, S., . . . Herculano, R. D. (2023). Eco-sustainable coatings based on chitosan, pectin, and lemon essential oil nanoemulsion and their effect on

- strawberry preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 126016. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126016>
163. Pavli, F., Kovaïou, I., Apostolakopoulou, G., Καπετανάκου, A. E., Skandamis, P., Nychas, G. E., Tassou, C. C., & Chorianopoulos, N. (2017). Alginate-Based Edible Films Delivering Probiotic Bacteria to Sliced Ham Pretreated with High Pressure Processing. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(9), 1867. <https://doi.org/10.3390/ijms18091867>
 164. Pelto, Isolauri, Lilius, Nuutila, & Salminen. (1998). Probiotic bacteria down-regulate the milk-induced inflammatory response in milk-hypersensitive subjects but have an immunostimulatory effect in healthy subjects. *Clinical & Experimental Allergy*, 28(12), 1474–1479. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2222.1998.00449.x>
 165. Pérez-Marroquín, X., Aguirre-Cruz, G., Campos-Lozada, G., Callejas-Quijada, G., León-López, A., Campos-Montiel, R., García-Hernández, L., Méndez-Albores, A., Vázquez-Durán, A., & Aguirre-Álvarez, G. (2022). Green Synthesis of Silver Nanoparticles for Preparation of Gelatin Films with Antimicrobial Activity. *Polymers*, 14(17), 3453. <https://doi.org/10.3390/polym14173453>
 166. Petkoska, A. T., Daniloski, D., D’Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. *Food Research International*, 140, 109981. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>
 167. Pirozzi, A., Del Grosso, V., Ferrari, G., & Donsì, F. (2020). Edible coatings containing oregano essential oil nanoemulsion for improving postharvest quality and shelf life of tomatoes. *Foods*, 9(11), 1605. <https://doi.org/10.3390/foods9111605>
 168. Pop, O. L., Pop, C. R., Dufrechou, M., Vodnar, D. C., Socaci, S. A., Dulf, F. V., Minervini, F., & Suharoschi, R. (2019). Edible Films and Coatings Functionalization by probiotic incorporation: a review. *Polymers*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/polym12010012>
 169. Popova-Krumova, P., Danova, S., Atanasova, N., & Yankov, D. (2024). Lactic Acid Production by *Lactiplantibacillus plantarum* AC 11S—Kinetics and Modeling. *Microorganisms*, 12(4), 739. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040739>
 170. Priyadarshi, R., & Rhim, J. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346>
 171. Projectmanager, C. (2024, December 17). Environmental footprint of food packaging and how it affects climate change - Interreg Baltic Sea Region. Interreg Baltic Sea Region. <https://interreg-baltic.eu/project-posts/changeknow/environmental-footprint-of-food-packaging-and-how-it-affects-climate-change/>

172. Puscaselu, R., Gutt, G., & Amariei, S. (2019). Biopolymer-Based Films Enriched with *Stevia rebaudiana* Used for the Development of Edible and Soluble Packaging. *Coatings*, 9(6), 360. <https://doi.org/10.3390/coatings9060360>
173. Queiroz, C., Lopes, M. L. M., Fialho, E., & Valente-Mesquita, V. L. (2008). Polyphenol oxidase: Characteristics and mechanisms of browning control. *Food Reviews International*, 24(4), 361–375. <https://doi.org/10.1080/87559120802089332>
174. Quirós-Sauceda, A. E., Palafox-Carlos, H., Sáyago-Ayerdi, S. G., Ayala-Zavala, J. F., Bello-Perez, L. A., Álvarez-Parrilla, E., De La Rosa, L. A., González-Córdova, A. F., & González-Aguilar, G. A. (2014). Dietary fiber and phenolic compounds as functional ingredients: interaction and possible effect after ingestion. *Food & Function*, 5(6), 1063–1072. <https://doi.org/10.1039/c4fo00073k>
175. Rahimah, S., Tallei, T. E., Savitri, M., Yamada, C., Kim, H. J., Choi, M., Park, M. N., Ophinni, Y., & Kim, B. (2026). Functional foods and dietary matrices for metabolic improvement: an integrative review of mechanisms, evidence, and future directions. *Journal of Functional Foods*, 139, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2026.107240>
176. Rahman, M. M., Shahid, M. A., Hossain, M. T., Sheikh, M. S., Rahman, M. S., Uddin, N., Rahim, A., Khan, R. A., & Hossain, I. (2024). Sources, extractions, and applications of alginate: a review. *Discover Applied Sciences*, 6(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06151-2>
177. Ranuh, R. G., Radhiah, S., Sumitro, K. R., Darma, A., Puspitasari, D., Husada, D., ... & Sudarmo, S. M. (2022). Regulation of T Helper and Regulatory T Cells by *Lactobacillus Plantarum* IS-10506 Supplementation to Human Immunodeficiency Virus-Infected Children Under Antiretroviral Therapy. *International Journal of Probiotics and Prebiotics*, 17(1), 42-46.
178. Rossi-Márquez, G., Dávalos-Saucedo, C. A., Mayek-Pérez, N., & Di Pierro, P. (2022). Multilayered Edible Coatings to Enhance Some Quality Attributes of Ready-to-Eat Cherimoya (*Annona cherimola*). *Coatings*, 13(1), 41. <https://doi.org/10.3390/coatings13010041>
179. Röble, C., Brunton, N., Gormley, R. T., Wouters, R., & Butler, F. (2010). Alginate coating as carrier of oligofructose and inulin and to maintain the quality of Fresh-Cut apples. *Journal of Food Science*, 76(1), H19-29. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01902.x>
180. Roy, S., Ramakrishnan, R., Goksen, G., Singh, S., & Łopusiewicz, Ł. (2023). Recent progress on UV-light barrier food packaging films – a systematic review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91, 103550. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103550>
181. Ruiz-Capillas, C., & Herrero, A. M. (2021). Sensory analysis and consumer research in new product development. *Foods*, 10(3), 582. <https://doi.org/10.3390/foods10030582>
182. Saberi, B., Thakur, R., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Optimization of physical and optical properties of

- biodegradable edible films based on pea starch and guar gum. *Industrial Crops and Products*, 86, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.015>
183. Şahan, A., & Bozkurt, H. (2025). Optimization of Fresh Storage of Pistachio (*Pistacia vera* L.) by Use of Different Coatings Under Vacuum. *Foods*, 14(20), 3533. <https://doi.org/10.3390/foods14203533>
 184. Said, M. I. (2020). Role and function of gelatin in the development of the food and non-food industry: A review. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 492(1), 012086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012086>
 185. Said, N. S., & Sarbon, N. M. (2022). Physical and Mechanical characteristics of Gelatin-Based Films as a Potential food Packaging material: a review. *Membranes*, 12(5), 442. <https://doi.org/10.3390/membranes12050442>
 186. Said, N., Howell, N. K., & Sarbon, N. (2021). A review on potential use of gelatin-based film as active and smart biodegradable films for food packaging application. *Food Reviews International*, 39(2), 1063–1085. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1929298>
 187. Saidi, L., Wang, Y., Wich, P. R., & Selomulya, C. (2024). Polysaccharide-based edible films — strategies to minimize water vapor permeability. *Current Opinion in Food Science*, 61, 101258. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101258>
 188. Samtiya, M., Aluko, R. E., Puniya, A. K., & Dhewa, T. (2021). Enhancing Micronutrients Bioavailability through Fermentation of Plant-Based Foods: A Concise Review. *Fermentation*, 7(2), 63. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020063>
 189. Sánchez, L. A. P., Ballén, A. B., & Marchand, L. C. S. (2019). Preparación y caracterización de una película de quitosano plastificado: un biomaterial de gran potencial en el campo de la medicina. *Reto*, 7(1), 11-24.
 190. Sariçoban, C., & Yılmaz, M. T. (2010). Modelling the effects of processing factors on the changes in colour parameters of cooked meatballs using response surface methodology. *World Applied Sciences Journal*, 9(1), 14-22.
 191. Seixas, F. L., Turbiani, F., Salomao, P., Souza, R., & Gimenes, M. (2013). Biofilms composed of alginate and pectin: effect of concentration of crosslinker and plasticizer agents. *www.cetjournal.it*. <https://doi.org/10.3303/CET1332283>
 192. Semwal, A., Ambatipudi, K., & Navani, N. K. (2022). Development and characterization of sodium caseinate based probiotic edible film with chia mucilage as a protectant for the safe delivery of probiotics in functional bakery. *Food Hydrocolloids for Health*, 2, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100065>
 193. Shaik, M. I., Azhari, M. F., & Sarbon, N. M. (2022). Gelatin-Based Film as a color Indicator in Food-Spoilage Observation: A review. *Foods*, 11(23), 3797. <https://doi.org/10.3390/foods11233797>
 194. Singh, N. K., Baranwal, J., Pati, S., Barse, B., Khan, R. H., & Kumar, A. (2023). Application of plant products in the synthesis and functionalisation of biopolymers.

- International Journal of Biological Macromolecules, 237, 124174. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124174>
195. Sipahi, R., Castell-Perez, M., Moreira, R., Gomes, C., & Castillo, A. (2012). Improved multilayered antimicrobial alginate-based edible coating extends the shelf life of fresh-cut watermelon (*Citrullus lanatus*). *LWT*, 51(1), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.013>
 196. Sivaramakrishnan, S., & Vimala, R. (2022). Biosynthesis of bioflocculant from bacterial consortium of municipal wastewater and its characterization. In Elsevier eBooks (pp. 7–68). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91138-2.00007-6>
 197. Siyahli, O., Sivri, G. T., & Demirci, A. S. (2025). Probiotic stability and bioactive enhancement in black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) juice: a functional beverage study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(15), 8888–8897. <https://doi.org/10.1002/jsfa.70127>
 198. Soderberg, J. (2013). Editor's Note. *Eolas the Journal of the American Society of Irish Medieval Studies*, 6(1), 1–3. <https://doi.org/10.1353/eol.2013.a959702>
 199. Solís-Contreras, G. A., Rodríguez-Guillermo, M. C., De La Luz Reyes-Vega, M., Aguilar, C. N., Reboloso-Padilla, O. N., Corona-Flores, J., De Abril Alexandra Soriano-Melgar, L., & Ruelas-Chacon, X. (2021). Extending Shelf-Life and Quality of Minimally Processed Golden Delicious Apples with Three Bioactive Coatings Combined with Cinnamon Essential Oil. *Foods*, 10(3), 597. <https://doi.org/10.3390/foods10030597>
 200. Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2005). Plasticizers in edible films and coatings. In Elsevier eBooks (pp. 403–433). <https://doi.org/10.1016/b978-012311632-1/50055-3>
 201. Soukoulis, C., Behboudi-Jobbehdar, S., Yonekura, L., Parmenter, C., & Fisk, I. D. (2014). Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG in prebiotic edible films. *Food Chemistry*, 159, 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.008>
 202. Speranza, B., Campaniello, D., Bevilacqua, A., Altieri, C., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2018). Viability of *Lactobacillus plantarum* on Fresh-Cut Chitosan and Alginate-Coated Apple and Melon Pieces. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2538. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02538>
 203. Sriamornsak, P. (2003). Chemistry of pectin and its pharmaceutical uses: A review. *Silpakorn University International Journal*, 3(1-2), 206-228.
 204. Suhag, R., Kumar, N., Petkoska, A. T., & Upadhyay, A. (2020). Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. *Food Research International*, 136, 109582. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109582>
 205. Sun, H., Liu, X., Huang, Y., & Leng, X. (2024). Incorporating functional colorants in whey protein isolate–cellulose nanocrystal-blended edible films for pork freshness prediction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(Pt 1), 137276. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137276>

206. Swanson, K. S., Gibson, G. R., Hutkins, R., Reimer, R. A., Reid, G., Verbeke, K., Scott, K. P., Holscher, H. D., Azad, M. B., Delzenne, N. M., & Sanders, M. E. (2020). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of synbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 17(11), 687–701. <https://doi.org/10.1038/s41575-020-0344-2>
207. Syarifuddin, A., Muflih, M. H., Izzah, N., Fadillah, U., Ainani, A. F., & Dirpan, A. (2025). Pectin-based edible films and coatings: From extraction to application on food packaging towards circular economy- A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 9, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100680>
208. Tan, C., Wang, J., & Sun, B. (2021). Biopolymer-liposome hybrid systems for controlled delivery of bioactive compounds: Recent advances. *Biotechnology Advances*, 48, 107727. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107727>
209. Tan, H., Aziz, A. A., & Aroua, M. (2013). Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.035>
210. Tan, J., Luo, Y., Guo, Y., Zhou, Y., Liao, X., Li, D., Lai, X., & Liu, Y. (2023). Development of alginate-based hydrogels: Crosslinking strategies and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124275>
211. Tarawneh, H., Obeidat, H., Shawaqfeh, S., Al-Massad, M., Alrabadi, N., Hiary, M., Talhouni, M., & Alrosan, M. (2025). Effectiveness of edible coating in extending shelf life and enhancing quality properties of golden delicious apple. *Discover Food*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00425-3>
212. Tarazona, A., Gómez, J. V., Gavara, R., Mateo-Castro, R., Gimeno-Adelantado, J. V., Jiménez, M., & Mateo, E. M. (2018). Risk management of ochratoxigenic fungi and ochratoxin A in maize grains by bioactive EVOH films containing individual components of some essential oils. *International Journal of Food Microbiology*, 269, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.02.002>
213. Thakur, B. R., Singh, R. K., Handa, A. K., & Rao, M. A. (1997). Chemistry and uses of pectin — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37(1), 47–73. <https://doi.org/10.1080/10408399709527767>
214. Ton, A. M. M., Campagnaro, B. P., Alves, G. A., Aires, R., Côco, L. Z., Arpini, C. M., Oliveira, T. G. E., Campos-Toimil, M., Meyrelles, S. S., Pereira, T. M. C., & Vasquez, E. C. (2020). Oxidative stress and dementia in Alzheimer's patients: Effects of synbiotic supplementation. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/2638703>

215. Tresina, P., Selvam, M. S., Doss, A., & Mohan, V. (2022). Antidiabetic bioactive natural products from medicinal plants. In *Studies in natural products chemistry* (pp. 75–118). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91250-1.00004-5>
216. Treviño-Garza, M. Z., García, S., Heredia, N., Alanís-Guzmán, M. G., & Arévalo-Niño, K. (2017). Layer-by-layer edible coatings based on mucilages, pullulan and chitosan and its effect on quality and preservation of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*). *Postharvest Biology and Technology*, 128, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.007>
217. Trinh, K. T., & Glasgow, S. (2012, September). On the texture profile analysis test. In *Proceedings of the Chemeca* (pp. 23-6)
218. Tsai, W., Chou, C., Chiang, Y., Lin, C., & Lee, C. (2021). Regulatory effects of *Lactobacillus plantarum*-GMNL6 on human skin health by improving skin microbiome. *International Journal of Medical Sciences*, 18(5), 1114–1120. <https://doi.org/10.7150/ijms.51545>
219. Vandeputte, D., Falony, G., Vieira-Silva, S., Wang, J., Sailer, M., Theis, S., Verbeke, K., & Raes, J. (2017). Prebiotic inulin-type fructans induce specific changes in the human gut microbiota. *Gut*, 66(11), 1968–1974. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2016-313271>
220. Vinderola, G., Sanders, M. E., & Salminen, S. (2022). The concept of postbiotics. *Foods*, 11(8), 1077. <https://doi.org/10.3390/foods11081077>
221. Vityazev, F. V., Khramova, D. S., Saveliev, N. Y., Ipatova, E. A., Burkov, A. A., Beloserov, V. S., Belyi, V. A., Kononov, L. O., Martinson, E. A., Litvinets, S. G., Markov, P. A., & Popov, S. V. (2020). Pectin–glycerol gel beads: Preparation, characterization and swelling behaviour. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116166. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116166>
222. Wang, B., Xu, X., Fang, Y., Yan, S., Cui, B., & El-Aty, A. M. A. (2022). Effect of different ratios of glycerol and erythritol on properties of corn Starch-Based films. *Frontiers in Nutrition*, 9, 882682. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.882682>
223. Wang, Q., Chen, W., Zhu, W. et al. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, 6, 18. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00132-8>
224. Wang, W., Huang, Y., Pan, Y., Dabbour, M., Dai, C., Zhou, M., & He, R. (2025). Sodium Alginate Modifications: A Critical review of current strategies and emerging applications. *Foods*, 14(22), 3931. <https://doi.org/10.3390/foods14223931>
225. Wassenaar, T. M., & Klein, G. (2008). Safety aspects and implications of regulation of probiotic bacteria in food and food supplements. *Journal of Food Protection*, 71(8), 1734–1741. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-71.8.1734>
226. Wu, T., Zhu, W., Chen, L., Jiang, T., Dong, Y., Wang, L., Tong, X., Zhou, H., Yu, X., Peng, Y., Wang, L., Xiao, Y., & Zhong, T. (2023). A review of natural plant extracts in beverages:

- Extraction process, nutritional function, and safety evaluation. *Food Research International*, 172, 113185. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113185>
227. Xu, X., Xi, Y., & Weng, Y. (2025). Gelatin-based materials: fabrication, properties and applications in the food packaging system. *RSC Advances*, 15(37), 30605–30621. <https://doi.org/10.1039/d5ra03325j>
 228. Yadav, M. K., Kumari, I., Singh, B., Sharma, K. K., & Tiwari, S. K. (2022). Probiotics, prebiotics and synbiotics: Safe options for next-generation therapeutics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(2), 505–521. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11646-8>
 229. Yan, J., Luo, Z., Ban, Z., Lü, H., Liu, D., Yang, D., Aghdam, M. S., & Li, L. (2019). The effect of the layer-by-layer (LBL) edible coating on strawberry quality and metabolites during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 147, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.002>
 230. Yilmaz, B., Bangar, S. P., Echegaray, N., Suri, S., Tomasevic, I., Lorenzo, J. M., Melekoglu, E., Rocha, J. M., & Ozogul, F. (2022). The Impacts of *Lactiplantibacillus plantarum* on the Functional Properties of Fermented Foods: A Review of Current Knowledge. *Microorganisms*, 10(4), 826. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040826>
 231. Yu, K., He, D., Fan, L., Wang, L., & Sun, J. (2026). The role and potential mechanisms of prebiotics in periodontitis treatment: a review. *Journal of Functional Foods*, 139, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2026.107221>
 232. Yuan, X., Zhong, M., Huang, X., Hussain, Z., Ren, M., & Xie, X. (2024). Industrial production of functional foods for human health and sustainability. *Foods*, 13(22), 3546. <https://doi.org/10.3390/foods13223546>
 233. Zare, D., Aryaee, H., Mirdamadi, S., & Shirkhan, F. (2024). The Benefits and Applications of *Lactobacillus plantarum* in Food and Health: A Narrative Review. *Iranian Journal of Public Health*, 53(10), 2201–2213. <https://doi.org/10.18502/ijph.v53i10.16698>
 234. Zendeboodi, F., Khorshidian, N., Mortazavian, A. M., & Da Cruz, A. G. (2020). Probiotic: conceptualization from a new approach. *Current Opinion in Food Science*, 32, 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.009>
 235. Zhang, C., Li, C., Aliakbarlu, J., Cui, H., & Lin, L. (2022). Typical application of electrostatic layer-by-layer self-assembly technology in food safety assurance. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.006>
 236. Zhang, C., Yang, Z., Shi, J., Zou, X., Zhai, X., Huang, X., Li, Z., Holmes, M., Daglia, M., & Xiao, J. (2021). Physical properties and bioactivities of chitosan/gelatin-based films loaded with tannic acid and its application on the preservation of fresh-cut apples. *LWT*, 144, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111223>

237. Zhang, L., Grace, P. M., & Sun, D. (2021). An accurate water activity model for glycerol solutions and its implementation on moisture sorption isotherm determination. *Drying Technology*, 40(11), 2404–2413. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1948425>
238. Zhang, W., Li, M., Chen, J., Chen, Y., Liu, C., & Wu, X. (2024). A review of modified gelatin: physicochemical properties, modification methods, and applications in the food field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(38), 20705–20721. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c03194>
239. Zhang, Y., Zhu, D., Ren, X., Shen, Y., Cao, X., Liu, H., & Li, J. (2022). Quality changes and shelf-life prediction model of postharvest apples using partial least squares and artificial neural network analysis. *Food Chemistry*, 394, 133526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133526>
240. Zhao, Q., Tang, S., Fang, X., Wang, Z., Jiang, Y., Guo, X., Zhu, J., & Zhang, Y. (2021). The Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* BX62 Alone or in Combination with Chitosan on the Qualitative Characteristics of Fresh-Cut Apples during Cold Storage. *Microorganisms*, 9(11), 2404. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112404>
241. Zhao, S., Jia, R., Yang, J., Dai, L., Ji, N., Xiong, L., & Sun, Q. (2022). Development of chitosan/tannic acid/corn starch multifunctional bilayer smart films as pH-responsive actuators and for fruit preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.101>